

ESCOAMENTO LAMINAR DE FLUIDOS NÃO-NEWTONIANOS EM TUBOS DE SEÇÃO TRANSVERSAL ELÍPTICA

Eveline M. Mattiusi¹(UTFPR), Henrique T. Coradin²(UTFPR), Wellington M. Brondani³(UTFPR), Admilson T. Franco⁴(UTFPR), Rigoberto E. M. Morales⁵(UTFPR), André L. Martins⁶(CENPES/PETROBRAS)
^{1,2,3,4,5} Av. Sete de Setembro, 3165, Curitiba, Brazil, 80230-901,

¹evelinemattiusi@yahoo.com.br, ²henrique_coradin@yahoo.com.br, ³w.brondani@gmail.com

⁴admilson@utfpr.edu.br, ⁵rmorales@utfpr.edu.br, ⁶aleibsohn@cenpes.petrobras.com.br

O presente trabalho apresenta o estudo do escoamento de um fluido viscoplástico do tipo Herschel-Bulkley através de um tubo de seção transversal elíptica. Esse fluido é conhecido por possuir características de dois outros modelos de fluidos também viscoplásticos, o fluido de Bingham e o Power-Law. Durante o processo de perfuração de um poço de petróleo, a passagem da broca permite que o poço tome uma forma ovalizada. Portanto, este é o motivo pelo qual estudou-se o escoamento de fluido não-newtoniano em tubo de geometria elíptica. Assim, o objetivo deste estudo é analisar o efeito dos parâmetros geométricos, cinemáticos e reológicos. Os perfis de velocidade ao longo do eixo maior e menor da elipse são comparados com tubos de seção circular. É determinada também a perda de carga em função do comprimento do tubo, da área transversal e da vazão volumétrica de fluido. Para a solução das equações da conservação foi utilizado o método de volumes finitos. As simulações numéricas foram realizadas com o programa comercial PHOENICS-CFD.

Herschel-Bulkley, fluido viscoplástico, tubo elíptico.

1. INTRODUÇÃO

A extração de petróleo em águas profundas tem impulsionado estudos para solução de problemas de perfuração, gerando assim grandes desafios para a engenharia. Na atividade de perfuração de poços de petróleo é comum encontrar-se geometrias anulares. As geometrias anulares devem-se a configuração parede do poço e broca de perfuração, enquanto a geometria elíptica deve-se a parede do poço, que apresenta uma forma ovalizada devido às oscilações da broca de perfuração. Durante o processo de perfuração, fluido é bombeado pela parte interna da broca e retorna através do espaço anular entre a broca e a formação rochosa do poço. Os fluidos de perfuração são empregados para auxiliar o processo de perfuração de poços.

Atualmente estão disponíveis vários tipos de fluidos de perfuração, como por exemplo, os fluidos de comportamento não-newtoniano. As principais finalidades do fluido de perfuração são: arrefecer a broca, carrear o cascalho proveniente do processo e estabilizar o poço contra o colapso das paredes da formação rochosa. As propriedades destes fluidos, controladas através de suas composições, devem ser projetadas para um desempenho ótimo destas funções. A massa específica deve ser tal que a pressão hidrostática desenvolvida seja alta a baixas taxas de deformação para garantir um bom carregamento de cascalhos e baixa a altas taxas de deformação para diminuir a perda de carga do sistema e, conseqüentemente, a potência de bombeamento (Mattuti, 2002). E a taxa de deformação sofre influência da viscosidade, o que caracteriza um fluido viscoplástico, tornando assim a análise do escoamento de fluidos de perfuração mais complexa.

Os fluidos viscoplásticos são uma importante classe de materiais não-newtonianos, e exibem deformação acima de um certo nível de tensão, conhecido como tensão limite de escoamento. Alguns exemplos de fluidos viscoplásticos são as soluções poliméricas, fibras em suspensão, produtos alimentícios, tintas, argilas, ceras, sangue, creme dental e os próprios fluidos de perfuração. A tensão limite de escoamento é vista como uma adequação de um conceito de engenharia que descreve o comportamento do fluido como um sólido rígido quando a tensão cisalhante é menor que a tensão de escoamento. Sob o campo de tensões o fluido escoar com uma relação não-linear entre a tensão e a taxa de cisalhamento. A consequência direta dessa propriedade é que o campo de escoamento é dividido em duas regiões: a região de escoamento e a região de não escoamento (Huigol et al., 2005). Os fluidos viscoplásticos podem convenientemente ser subdivididos em: plásticos de Bingham, pseudoplásticos ou fluidos *shear-thinning*, fluidos dilatantes ou *shear-thickening*.

Como geometrias anulares estão presentes na atividade de perfuração de poços de petróleo, o presente trabalho tem por objetivo verificar o efeito dos parâmetros geométricos, cinemáticos e reológicos para escoamentos no tubo elíptico, constituindo assim um estudo preliminar para geometrias como um tubo anular com seção transversal elíptica e tubo interno cilíndrico e tubo anular com seção transversal elíptica e tubo interno cilíndrico excêntrico.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Diferentes atividades industriais envolvem o escoamento de fluidos não-newtonianos, como a extrusão e o processamento de polímeros, o processamento de tintas, de produtos alimentícios, farmacêuticos, etc, além das atividades de perfuração. Devido a isso, o estudo do comportamento de fluidos não-newtonianos têm-se intensificado nas últimas décadas.

Velusamy e Garg (1996) estudaram o escoamento permanente completamente desenvolvido de fluido newtoniano no interior de dutos elípticos verticais. Utilizaram o sistema de coordenadas cilíndricas elípticas e o método de discretização de volumes finitos. O sistema de coordenadas consiste de uma família ortogonal de elipses confocais e hipérbolas em um plano transladado na terceira direção. Dados como perfil de velocidade, fator de atrito e número de Nusselt foram apresentados. Observaram que fator de atrito é maior em tubos de seção elíptica comparados a seções circulares.

Soares et al. (1999) apresentam a análise da transferência de calor na região de entrada de escoamentos de fluidos viscoplásticos. O escoamento é laminar e a viscosidade é modelada segundo a equação de Herschel-Bulkley. As equações da conservação são resolvidas numericamente via método de volumes finitos. O efeito da dependência da temperatura nas propriedades reológicas é também investigado e o número de Nusselt, por exemplo, é obtido como função da coordenada axial, do campo de tensões e do expoente Power-Law. Soares et al. (1999) apresentam também os perfis de velocidade em quatro diferentes posições axiais ao longo da região de entrada. É possível então perceber, que há uma velocidade próxima à parede e isto ocorre devido à difusão axial da quantidade de movimento, e além do mais não pode ser determinada por formulações que consideram a difusão radial somente. Esse fator deve ser considerado para fluidos newtonianos, visto que isto deve ter um importante impacto na transferência de calor.

Escudier et al. (2002) estudaram o escoamento de fluido Power-Law em tubo anular excêntrico com cilindro interno em rotação. Apresentaram um extenso número de cálculos numéricos, utilizando um método de volumes finitos altamente preciso, para o escoamento laminar completamente desenvolvido de um fluido Power-Law inelástico *shear-thinning*. São também apresentados cálculos adicionais para modelos reológicos mais complexos, incluindo Cross, Carreau e Herschel-Bulkley, os quais são comparados sistematicamente com o modelo Power-Law. Comparações são feitas com outros resultados numéricos recentes. Perceberam que para fluido Power-Law há um crescimento do produto $f.Re$ (fator de atrito de Fanning multiplicado pelo número de Reynolds) com o crescimento do Ta (número de Taylor), e um crescimento de $f.Re$ com a baixa e alta excentricidade, mas um decréscimo com uma excentricidade intermediária.

Huigol e You (2005) estudaram escoamentos em regime permanente para os fluidos de Bingham, Casson e Herschel-Bulkley em tubos de diferentes seções transversais, como a circular e a quadrada, através da aplicação do método dos multiplicadores de Lagrange. Os resultados revelaram o efeito da não linearidade da viscosidade nos escoamentos examinados. Desse trabalho conclui-se que, para o escoamento no tubo circular, os resultados numéricos concordam melhor com os resultados teóricos. No tubo quadrado, a zona morta é obtida e as regiões de não escoamento são precisamente determinadas.

Kelessidis et al. (2006) estudaram escoamento de fluido Herschel-Bulkley em tubos de geometria circular e anular circular. Realizaram estudos de fluidos de perfuração que exibem comportamento não-newtoniano, os quais podem ser descritos pelos três parâmetros do modelo reológico de Herschel-Bulkley. Segundo os autores os dois parâmetros do modelo de fluido plástico de Bingham e de fluido Power-Law são usados com maior frequência devida sua simplicidade e concordância com os reogramas. Os modelos reológicos mais complexos são avaliados mais precisamente em estudos do comportamento de fluidos de perfuração do que os modelos mais simples, como Bingham e Power-Law. Porém, modelos mais complexos não são largamente aplicados devido à dificuldade de encontrar soluções analíticas para equações diferenciais da quantidade de movimento e por causa da complexidade dos cálculos para parâmetros hidráulicos apropriados. Desse modo, o trabalho de Kelessidis et al. (2006) propôs uma metodologia diferente e ótima para determinar os dados reológicos dos três parâmetros de fluidos de perfuração do modelo Herschel-Bulkley, e também discute que a escolha de parâmetros reológicos pode afetar a determinação da queda de pressão e dos perfis de velocidade dos fluidos de perfuração ao longo do circuito de perfuração (tubo anular e circular).

3. MODELAGEM MATEMÁTICA E GEOMÉTRICA

Neste tópico apresenta-se a modelagem matemática para escoamento incompressível, permanente e em regime laminar de um fluido viscoplástico. A modelagem matemática é realizada com base nas equações de conservação da massa, da quantidade de movimento e de uma equação constitutiva mecânica que estabeleça o tensor tensões do escoamento. Apresentam-se também as condições de contorno. Para a construção da geometria elíptica utiliza-se *Body Fitted Coordinate (BFC)*, que consiste em um sistema de coordenadas ajustadas ao corpo. Para a discretização do domínio de cálculo foi utilizado o Método de Volumes Finitos

(MFV). O método de interpolação utilizado consiste no sistema híbrido de interpolação, e o pacote comercial utilizado foi o PHOENICS –CFD.

3.1 Equações Governantes

O escoamento de fluido viscoplástico através de um tubo de seção transversal elíptica é governado pelas equações de conservação da massa e quantidade de movimento, escritas na forma conservativa por meio de operadores tensoriais:

$$(\nabla \cdot \rho \mathbf{V}) = 0 \quad (1)$$

$$(\nabla \cdot \rho v \mathbf{V}) = (\nabla \pi) + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

onde π na Equação 2 representa o tensor de tensões total. O tensor de tensões total está representado a seguir pela Equação 3.

$$\pi = -p\delta + \tau \quad (3)$$

onde τ representa o tensor tensões e δ indica pressão somente nas direções normais.

Devido o sistema de coordenadas ajustadas ao corpo – *Body Fitted Coordinate (BFC)* – é necessário escrever as equações da conservação em coordenadas generalizadas não-ortogonais (Maliska, 1995).

3.2 Caso Estudado

O caso estudado consiste no escoamento de fluido Herschel-Bulkley através de tubos elípticos de diferentes excentricidades e em diferentes números de Reynolds. A seguir a Figura 1 apresenta o tubo de seção elíptica de raios a e b e comprimento L .

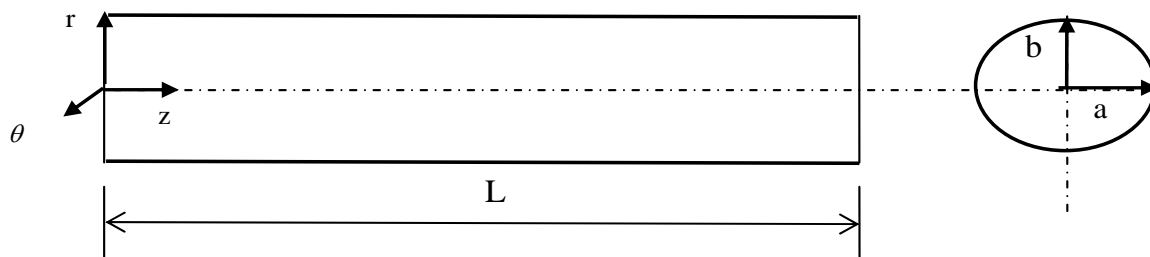


Figura 1 - Tubo de seção transversal elíptica.

Nesses casos determina-se o perfil de velocidade em função da razão de aspecto da elipse (b/a) e a perda de carga em função do comprimento do tubo, da vazão volumétrica e dos parâmetros reológicos. Os campos de velocidade são comparados com os de um tubo de seção circular para os raios maior e menor da elipse.

Antes de entrar nas considerações e condições de contorno do tubo elíptico é importante destacar a equação da excentricidade de uma elipse, bem como a equação do raio de uma elipse. As Equações 4 a 7 mostram os detalhes da equação da excentricidade, do raio, do diâmetro hidráulico e da área da elipse.

Excentricidade da elipse:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} \quad (4)$$

Raio de uma elipse:

$$r^2 = \frac{a^2 b^2}{a^2 \sin^2 \theta + b^2 \cos^2 \theta} \quad (5)$$

Diâmetro hidráulico de uma elipse:

$$D_h = \frac{4ab}{\sqrt{2(a^2 + b^2)}} \quad (6)$$

Área de uma elipse:

$$A = \pi ab \quad (7)$$

Para o tubo de seção elíptica são feitas as seguintes considerações:

- Escoamento em regime permanente,
- Escoamento incompressível,
- Escoamento isotérmico.

E as seguintes condições de contorno:

- Velocidade nula nas paredes do tubo,

$$v = 0 \text{ em } r^2 = \frac{A^2 B^2}{A^2 \sin^2 \theta + B^2 \cos^2 \theta}.$$

- perfil de velocidades retangular na entrada do tubo,
- perfil de velocidades completamente desenvolvido na saída do tubo.

3.3 Equação Constitutiva

O fluido Herschel-Bulkley é conhecido por possuir características de dois outros fluidos também viscoplásticos, o fluido de Bingham e o Power-Law. A seguir tem-se a equação constitutiva para um fluido Herschel-Bulkley.

$$\begin{aligned} \dot{\gamma} &= 0 & \text{se} & \quad \tau < \tau_y \\ \tau &= \tau_y + k\dot{\gamma}^n & \text{se} & \quad \tau \geq \tau_y \end{aligned} \quad (8)$$

onde τ_y é a tensão limite de escoamento, τ é o tensor tensões viscoso, $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação, k é o índice de consistência do fluido e n é o índice Power-Law, o qual se for menor que a unidade caracteriza um fluido pseudoplástico (*shear thinning*) e quando maior que a unidade caracteriza um fluido dilatante (*shear thickening*).

A equação para fluido não-newtoniano generalizado é representada pela seguinte equação:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (9)$$

Comparando a Equação para fluido não-newtoniano generalizado com a equação constitutiva para fluido Herschel-Bulkley, encontra-se a equação da viscosidade para fluido Herschel-Bulkley.

$$\eta = \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} + k\dot{\gamma}^{n-1} \quad (10)$$

A magnitude do tensor tensões e da taxa de deformação são dadas pelas seguintes equações:

$$|\tau| = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_i \sum_j \tau_{ij}^2} \quad |\dot{\gamma}| = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_i \sum_j \dot{\gamma}_{ij}^2} \quad (11)$$

Da Equação 8 pode-se obter as equações constitutivas para fluido newtoniano, Power-Law e Bingham, se forem aplicadas as seguintes condições:

- Se $\tau_y = 0$, $n = 1$ e $k = \mu$, tem-se um fluido newtoniano,
- Se $\tau_y = 0$ e $n \neq 1$ tem-se um fluido Power-Law,

- Se $\tau_y \neq 0$ e $n = 1$ tem-se um fluido de Bingham.

No caso de fluido de Herschel-Bulkley utiliza-se a seguinte equação para cálculo do número de Reynolds (Quaresma e Macedo, 1998):

$$\text{Re} = \frac{\rho V_m^{2-n} D_h^n}{k} \quad (12)$$

E as seguintes equações para Número de Escoamento (Yield Number) e fator de atrito de Fanning respectivamente:

$$Y = \frac{\tau_y}{k} \left(\frac{D_h}{V_m} \right)^n \quad f = \left(-\frac{dp}{dz} \right) \frac{D_h}{2\rho V_m^2} \quad (13)$$

onde D_h é o diâmetro hidráulico, V_m é a velocidade média e $\left(-\frac{dp}{dz} \right)$ é o gradiente de pressão.

3.4. Solução Numérica

Para a discretização do domínio de cálculo foi utilizado o Método de Volumes Finitos (MFV), o método de interpolação utilizado consiste no sistema híbrido de interpolação e o pacote comercial é o PHOENICS-CFD. Na modelagem das geometrias elípticas, é necessário utilizar um sistema de coordenadas ajustadas ao corpo (*BFC – Body Fitted Coordinate*) para escrever as equações de conservação e construir a malha computacional. A malha computacional a ser utilizada é não-ortogonal e uniforme.

Para o sistema de equações generalizado não-ortogonal, obtêm-se melhores resultados quando se utiliza o método elíptico GCV (*General Colocated Velocity Method*) se comparado ao método elíptico de malha deslocada (Spalding, 1994). O GCV é um algoritmo alternativo para resolver as equações de Navier-Stokes em coordenadas ajustadas ao corpo (BFC).

É indispensável ressaltar que o pacote comercial PHOENICS-CFD não possui formulação para fluido Herschel-Bulkley, assim como possui para fluido newtoniano, Power-Law e fluido de Bingham. Sendo assim, foi necessária a implementação do modelo de fluido Herschel-Bulkley através de Inform, que consiste em um suplemento da linguagem de entrada do PHOENICS-CFD, a qual facilita a entrada de dados. Especificamente, permite que os usuários expressem suas exigências com equações algébricas, como exemplo para discretização do espaço e do tempo, propriedades materiais, valores iniciais, termos fontes, condições limite, formas e movimentos de corpos, ou outras características especiais. As equações são colocadas no arquivo conhecido como Q1 através de um editor de texto (Spalding, 1994).

Com relação à malha utilizada, após vários testes, verificou-se que a malha 21x21x40 apresentou resultados independentes da malha computacional e com um tempo de simulação viável. A partir desse momento todos os casos, independente da razão de aspecto, foram estudados com a malha 21x21x40.

4. RESULTADOS

Como resultados, primeiramente é apresentado o método de validação do modelo Herschel-Bulkley. A seguir é apresentado o comportamento de um fluido viscoplástico para elipses de diferentes razões de aspectos. Por fim, é apresentada a variação do fator de atrito em função dos parâmetros reológicos.

Como um método de validação do modelo implementado, foram comparados os resultados numéricos para um fluido newtoniano obtido através das modificações no modelo de fluido Herschel-Bulkley, citadas no item anterior, com resultados analíticos para fluido newtoniano. A figura 2 apresenta a comparação entre os resultados implementado e analítico para o perfil de velocidade de um fluido newtoniano reduzido do modelo Herschel-Bulkley.

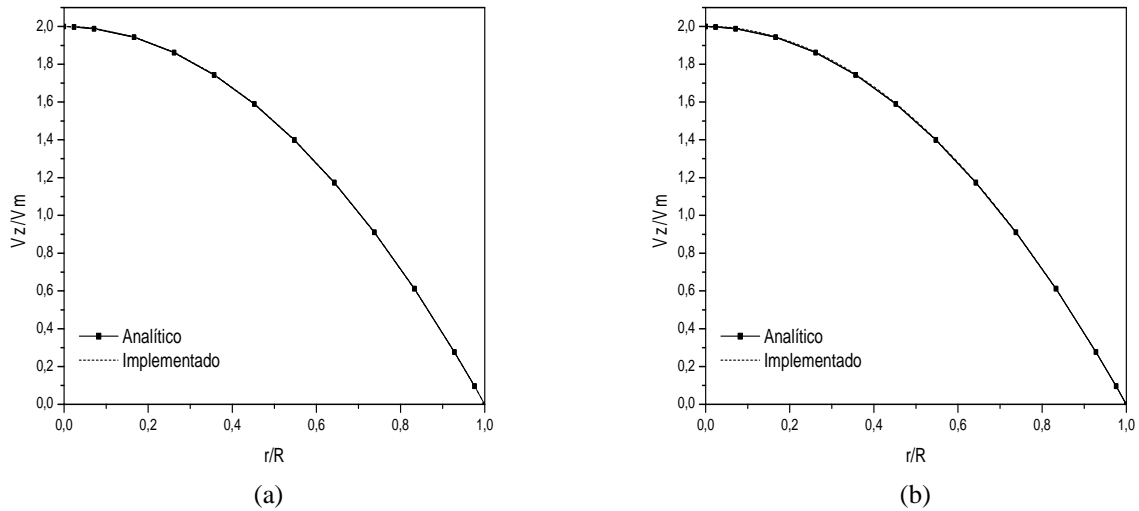


Figura 2 - Perfil de velocidade para fluido newtoniano reduzido do modelo de fluido Herschel-Bulkley, (a) ao longo do raio maior e (b) ao longo do raio menor para $b/a = 0,5$ e $Re = 500$, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 0,001 \text{ Pa.s}$ e $\tau_y = 0 \text{ Pa}$ e $n = 1$.

A seguir a Tabela 1 apresenta a comparação entre o fator de atrito de Fanning e uma formulação paramétrica, específica para tubo de seção transversal elíptica, para fluido newtoniano reduzido do modelo Herschel-Bulkley.

Tabela 1 – Comparação entre os fatores de atrito para caso do fluido newtoniano reduzido do modelo Herschel-Bulkley em tubo elíptico de $b/a = 0,5$ e $Re = 500$.

Fator de Atrito de Fanning	$f = \left(-\frac{dp}{dz} \right) \frac{D_h}{2\rho V_m^2}$	0,03224
Cheremisinoff (1988)	$\frac{2(V_m - V_w)}{R_h} = \frac{\tau_w}{\mu} \frac{1}{(a^* + b^*)}$ $a^* = 0,2629$ e $b^* = 0,7886$ $f = \frac{2\tau_w}{\rho V_m^2}$	0,03354

onde D_h é o diâmetro hidráulico, V_w é a velocidade na parede, que no caso é nula, a^* e b^* são parâmetros geométricos para o caso do tubo elíptico.

Através dos resultados apresentados nos gráficos da Figura 2 e na Tabela 1, é possível verificar que existe uma ótima concordância entre os resultados do modelo implementado e da solução analítica para fluido newtoniano.

O comportamento de um fluido viscoplástico para elipses de diferentes razões de aspectos é detalhado a seguir. A Figura 3 apresenta a comparação entre os perfis de velocidade ao longo do eixo maior e menor da elipse com tubo de seção circular.

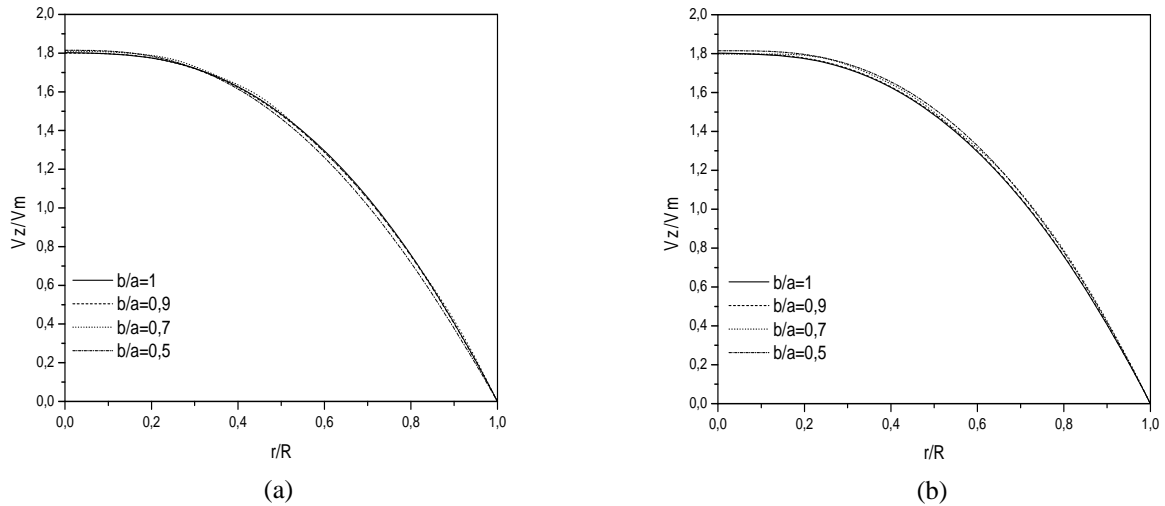


Figura 3 - Perfil de velocidade para fluido Herschel-Bulkley, (a) ao longo do raio maior e (b) ao longo do raio menor para $Re = 500$, $\rho = 1100 \text{ kg/m}^3$, $k = 0,118 \text{ Pa.s}$, $Y = 0,5$ e $n = 0,8$.

A variação do fator de atrito em função dos parâmetros reológicos é detalhada a seguir. A Figura 4 apresenta a influência das propriedades reológicas Y e n no fator de atrito em diferentes números de Reynolds.

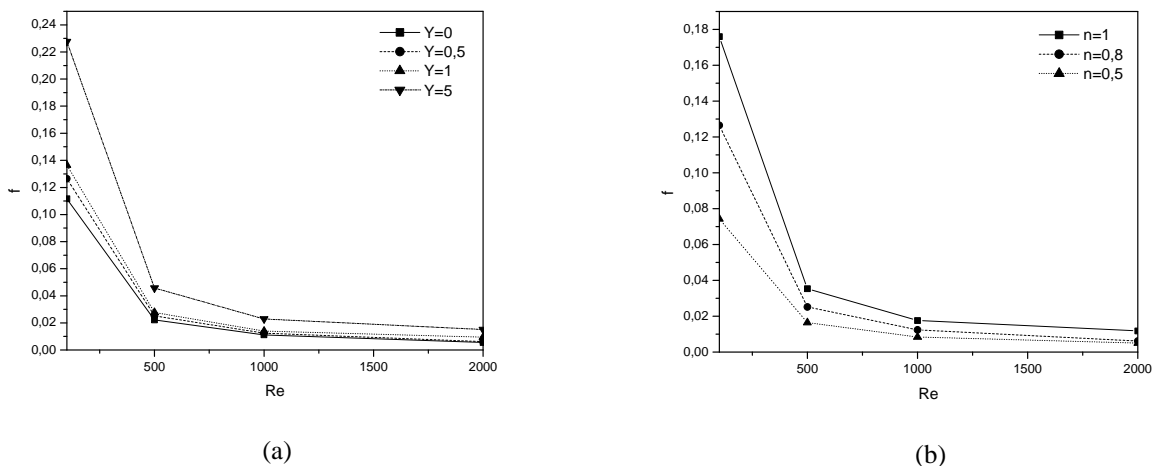


Figura 4 – Fator de atrito em função do número de Reynolds, (a) para diferentes Y e (b) para diferentes n para $b/a = 0,5$, $\rho = 1100 \text{ kg/m}^3$, $k = 0,118 \text{ Pa.s}$.

Através dos gráficos da Figura 4 é possível perceber que o aumento dos parâmetros reológicos (Y e n) causam um aumento no fator de atrito para todos os Números de Reynolds (Re), porém nota-se que com o aumento do Re os fatores de atrito para diferentes parâmetros reológicos tendem para um mesmo valor.

5. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados apresentados, é possível afirmar que o modelo Herschel-Bulkley implementado possui excelente concordância com a solução analítica para perfil de velocidade. O modelo implementado também apresenta ótima concordância entre o fator de atrito de Fanning e o fator de atrito paramétrico específico para tubo elíptico.

Com relação ao comportamento do fator de atrito de Fanning mediante alterações nos parâmetros reológicos Y (Número de Escoamento) e n (índice Power-Law), há um aumento no fator de atrito em todos os Números de Reynolds, a medida que aumenta-se o valor das propriedades reológicas. A explicação para esse fenômeno é que valores maiores de Y implicam em maiores valores de tensão limite de escoamento (τ_y) e

maiores valores de n implicam no aumento da viscosidade do fluido, ou seja, quanto maior o n maior é o comportamento dilatante do fluido.

Ainda sobre o fator de atrito, é possível observar uma dependência maior com relação aos parâmetros reológicos em baixos números de Reynolds. Em Números de Reynolds maiores, ou seja, quanto mais próximo da região de transição do escoamento laminar para turbulento, menores são os efeitos dos parâmetros reológicos no escoamento do fluido viscoplástico. Os valores dos fatores de atrito, em Números de Reynolds próximos à região de transição do escoamento, tendem para um mesmo valor.

Com a concordância apresentada entre resultados numéricos e analíticos para o modelo implementado de fluido Herschel-Bulkley, é possível afirmar que o presente trabalho constitui um estudo preliminar do escoamento de fluidos viscoplásticos em tubos anulares elípticos, como o tubo anular com seção transversal elíptica e tubo interno cilíndrico e o tubo anular com seção transversal elíptica e tubo interno cilíndrico excêntrico.

6. AGRADECIMENTOS

Apoio financeiro da Agência Nacional de Petróleo – ANP – e da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP – por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o setor Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCT (PRH10-UTFPR).

7. REFERÊNCIAS

- BIRD, R. B., Armstrong, R. C. Hassager, O.; **Dynamics of Polymeric Liquids**, Editora John Wiley e Sons, Vol. 1, 2ª edição, New York, 1987.
- CHEREMISINOFF, N. P.; **Encyclopedia of Fluid Mechanics – Volume 7 – Rheology and Non-Newtonian Flows**; GPC, Houston, 1988.
- ESCUDIER, M. P.; PRESTI, F.; **Pipe Flow of a Thixotropic Liquid**; **J. Non-Newtonian Fluid Mech.**, 62, 291-306, 1996.
- HUILGOL, R.R.; YOU, Z.; **Application of the Augmented Lagrangian Method to Steady Pipe Flows of Bingham, Casson and Herschel-Bulkley Fluids**, **J. Non-Newtonian Fluid Mech.**, 128, 126-143, 2005.
- KELESSIDIS, V.C.; MAGLIONE, R.; TSAMANTAKI; ASPIRTAKIS, Y.; **Optimal Determination of Rheological Parameters for Herschel-Bulkley Drilling Fluids and Impact on Pressure Drop, Velocity Profiles and Penetration Rates During Drilling**, **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 53, 203-224, 2006.
- MALISKA, C. R., **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**, Editora LTC, Rio de Janeiro, 1995.
- MATUTTI, O. C.; **Instabilidade de Taylor-Couette em Escoamentos de Fluidos Viscoplásticos**, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, 2002.
- QUARESMA, J. N. N.; MACÊDO, E.N.; **Integral Transform Solution for the Forced Convection of Herschel-Bulkley Fluids in Circular tubes and Parallel-Plates Ducts**, **Braz. J. Chem. Eng.** V.15 n.1, 1998.
- SOARES, M.; NACCACHE, M.; MENDES, P.R.S; **Heat Transfer to Viscoplastic Materials Flowing Laminarily in the Entrance Region of Tubes**; **International Journal of Heat and Fluid Flow**, 20,60-67, 1999.
- VELUSAMY, K.; GARG, V. K.; **Laminar Mixed Convection in Vertical Elliptic Ducts**; **Int. J. Heat Mass Transfer**, vol.39, nº4, 745-752, 1996.
- SPALDING, D. B.; **The PHOENICS Encyclopedia**, CHAM Ltda, UK, 1994.

LAMINAR FLOW OF NON-NEWTONIAN FLUIDS IN DUCTS OF ELLIPTICAL CROSS-SECTION

The present work shows a study of the viscoplastic fluid flow, a Herschel-Bulkley fluid, through of the elliptical cross-section duct. This fluids is known by has characteristics of two other viscoplastic fluids, the Bingham fluid and the Power-Law fluid. During the drilling operations of oil wells, the drill makes with that the well takes an oval shape. Therefore, this is the reason for which we study the non-Newtonian fluid flow in the elliptical ducts. The objective this study is the analysis of de geometric, kinematic and rheological parameters effects. The velocity fields on the greater and de smaller elliptical axis are compared with circular ducts. The pressure drop in function of the length of the duct, the cross-area and the volumetric fluid are also determined. For a solution of conservation equations, the method of finite volumes was used. The numeric simulations had been carried with the commercial program PHOENICS-CFD.

Herschel-Bulkley, viscoplastic fluid, elliptical duct.