

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

EFEITO DO NÚMERO DE REYNOLDS SOBRE O DESEMPENHO DO PROCESSO DE LIMPEZA DE POÇOS HORIZONTAIS

Hóliver Zambon Zanete, holiverzambon@gmail.com¹

Renato do Nascimento Siqueira, renatons@ifes.edu.br¹

Instituto Federal do Espírito Santo, Rodovia BR 101 Norte – Km 58 – Litorâneo, São Mateus, ES, 29932-540, Brasil.

Resumo: O processo de perfuração de poços constitui parcela significativa do custo total de exploração de um campo petrolífero. A técnica de perfuração horizontal permite o aumento da área de contato do poço com o reservatório, melhorando a eficiência da extração e vem sendo amplamente utilizada na indústria petrolífera. Apesar dos benefícios, alguns problemas são gerados a partir dessa técnica. Os principais problemas são o deslocamento da coluna de perfuração, gerando uma excentricidade no anular formado entre o poço e a coluna e a sedimentação das partículas de cascalho, formando um leito sólido, que prejudica o carreamento do material rochoso para fora do poço. Entre os parâmetros que podem afetar o desempenho do processo de perfuração de um poço de petróleo encontram-se: a excentricidade e a velocidade de rotação da coluna, a taxa de escoamento axial e a reologia do fluido de perfuração. Embora o fluido de perfuração tenha várias funções, uma das principais é o carreamento do cascalho. O presente estudo analisa o efeito da taxa de escoamento axial através da variação do número de Reynolds sobre a dinâmica do escoamento em um espaço anular. Para análise do escoamento foi utilizada a técnica da dinâmica dos fluidos computacional (CFD), com o uso do aplicativo ANSYS® CFX 16.0. A geometria analisada é composta por dois cilindros de 2,5 m de comprimento (L), sendo o diâmetro do cilindro interno (d_i) igual a 0,0508 m e o diâmetro do cilindro externo (d_e) igual a 0,1016 m. Foram utilizados dois valores de excentricidade ($\epsilon = 0$ e $\epsilon = 0,8$) e a rotação do cilindro interno (ω) foi fixada em 200 rpm. O número de Reynolds (Re) variou de 200 a 1000, garantindo a condição de escoamento laminar. O fluido de perfuração possui massa específica (ρ) de 1000 kg/m³, tensão limite de escoamento (τ_0) de 17,81 Pa, índice de consistência (K) de 0,26 Pa.s, índice de comportamento (n) igual a 0,74 e é representado pelo modelo reológico de Herschel-Bulkley. Os dados mostram que o aumento do número de Reynolds altera a distribuição dos perfis de velocidade e de viscosidade do escoamento. Essas mudanças afetam diretamente a capacidade de carreamento dos cascalhos para fora do poço e o conhecimento do padrão de escoamento é fundamental para a definição de uma boa estratégia de perfuração.

Palavras-chave: CFD, perfuração horizontal, escoamento axial.

1. INTRODUÇÃO

O setor industrial, de maneira geral, tem buscado cada vez mais a redução dos custos associados à produção de bens ou de serviços. Na indústria petrolífera, por exemplo, a redução dos custos associados à exploração e produção do óleo garante a competitividade e viabilidade da exploração frente aos elevados custos de produção associados à atividade.

O processo de exploração de um campo de petróleo é extremamente caro e a perfuração dos poços consome uma parcela bastante significativa dos recursos financeiros disponíveis.

Para aumentar a eficiência de extração do óleo em um reservatório, e consequentemente reduzir o custo de produção, a técnica de perfuração horizontal vem sendo amplamente utilizada no setor. Esta técnica garante uma maior área de contato do poço com o reservatório, permitindo assim, uma maior remoção do óleo a partir de um poço. Além disso, a técnica permite o acesso a locais distantes do ponto de perfuração na superfície. Apesar dos benefícios, uma série de problemas são gerados a partir da aplicação desta técnica. A sedimentação dos cascalhos no fundo do poço é um dos principais problemas encontrados. Esta tende a formar um leito de partículas sólidas na região inferior do poço que tende a se acumular com o avanço do processo de perfuração e pode acarretar na prisão da coluna de perfuração e perda do poço. Observa-se também o deslocamento da coluna de perfuração para a região inferior do poço devido aos efeitos da gravidade, o que gera uma excentricidade no espaço anular e tem o seu efeito estudado por diversos autores na literatura.

Durante o processo de perfuração os cascalhos gerados pela broca a partir da fragmentação da formação rochosa do reservatório precisam ser retirados do interior do poço e levados para a superfície. Embora o fluido de perfuração tenha

várias funções, a principal é o carregamento dos cascalhos. Para que tenha um melhor desempenho, um fluido precisa ter viscosidade suficiente para promover o arrasto das partículas sólidas ao mesmo tempo que deve promover a menor perda de carga possível, objetivando a redução do consumo energético com o bombeio do fluido e uma maior facilidade no controle da pressão de fundo de poço.

Diversos fatores podem influenciar na eficiência do transporte de cascalhos. De acordo com GhasemiKafrudi e Hashemabadi (2015), os principais fatores são: velocidade de rotação da coluna, diâmetro do poço e da coluna, excentricidade da coluna, taxa de penetração e características do fluido, tais como velocidade, regime de escoamento, tipo de lama e propriedades reológicas.

Os fluidos de perfuração são misturas complexas de sólidos, líquidos, produtos químicos e até mesmo gases, conferindo à maioria deles propriedades de fluidos não-Newtonianos (Thomas, 2001).

Autores como Gabriel e Siqueira (2015), Loureiro *et al.* (2006), Lídio e Siqueira (2015), Costa *et al.* (2013), Escudier *et al.* (2002) e Tardy e Bittleston (2015) mostraram que o escoamento de fluidos de perfuração em espaços anulares é dependente de uma série de parâmetros, tais como rotação da coluna, excentricidade, reologia do fluido e taxa de escoamento.

Escudier *et al.* (2000) constataram a forte influência da velocidade de rotação da coluna sobre a distribuição de velocidade axial em um anular excêntrico. Do mesmo modo, Loureiro *et al.* (2006) concluiu que a rotação da coluna prejudica a suspensão das partículas de cascalhos quando um leito sedimentado de grande espessura está presente.

Loureiro e Siqueira (2006) contataram que a tensão de cisalhamento mínima para iniciar um processo de erosão em um leito sedimentado depende da vazão do escoamento, e está diretamente relacionado ao tamanho médio das partículas.

Sun *et al.* (2014) avaliaram a influência da inclinação do poço e da velocidade de rotação da coluna para diferentes taxas de escoamento e verificaram que o efeito da taxa de escoamento sobre a concentração de cascalhos no fundo do poço é mais pronunciado para maiores velocidades de rotação.

Pereira *et al.* (2007) observaram um aumento na queda de pressão em anulares excêntricos a medida que a rotação do cilindro interno aumenta. Os autores também observaram a presença de zonas de fluxo preferencial e de zonas de estagnação de fluxo.

Akhshik *et al.* (2015) observaram que, para baixas taxas de escoamento, o efeito dominante da rotação da coluna pode aumentar a suspensão dos cascalhos e beneficiar o processo de limpeza do poço.

Muitos autores têm estudado a influência destes parâmetros sobre o desempenho do processo de limpeza de um poço. Uma breve busca bibliográfica permite encontrar muitos dos trabalhos citados, no entanto, são poucos os que tratam especificamente do efeito da taxa de escoamento axial.

Zanete e Siqueira (2015) mostraram a influência da taxa de escoamento axial sobre o escoamento de um fluido não-Newtoniano descrito pelo modelo reológico *Power-law* escoando em um espaço anular excêntrico. O presente trabalho tem como objetivo analisar a influência do número de Reynolds sobre a dinâmica do escoamento de um fluido não-Newtoniano em um espaço anular. Espera-se contribuir com a base de dados disponível atualmente provendo informações para os projetistas de poços.

2. EQUACIONAMENTO BÁSICO

As equações de governo do problema apresentado são as equações da continuidade e da conservação da quantidade de movimento, descritas respectivamente pelas Eqs. (1) e (2).

$$\nabla \vec{V} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla P + \rho g + \mu [\nabla^2 \cdot \vec{V}] \quad (2)$$

Nas equações acima, $\vec{V}$ representa o vetor velocidade, ρ a massa específica do fluido, P a pressão, g a aceleração da gravidade e μ a viscosidade dinâmica do fluido.

Quando se tratar de fluidos não-Newtonianos, a viscosidade dinâmica do fluido é substituída pela viscosidade efetiva que é determinada em função do modelo reológico escolhido para descrevê-lo (Pereira *et al.*, 2006).

Para um fluido pseudoplástico com tensão limite de escoamento, descrito pelo modelo reológico de Herschel-Bulkley, a relação entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento é dada de acordo com a Eq. (3) (Haciislamoglu e Langlinais, 1990).

$$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}_{xy}^n \text{ para } \tau > \tau_0 \quad (3)$$

Na equação acima, τ_0 representa a tensão limite de escoamento, K o índice de consistência, $\dot{\gamma}_{xy}$ a taxa de deformação e n é o índice de consistência do fluido.

O modelo reológico de Herschel-Bulkley é preferido em relação a outros modelos reológicos como *Power-law* ou Plástico de Bingham pois consegue ajustar o comportamento do fluido com maior precisão quando se dispõe de dados experimentais adequados (Hamed e Belhadri, 2009).

Para a determinação do regime de escoamento foi utilizado o número de Reynolds crítico para o escoamento laminar. De acordo com Pereira (2006), o número de Reynolds crítico para o escoamento em um anular está na faixa de 2000 a 2300.

A relação de Madlener *et al.* (2009), mostrada na Eq. (4), representa o número de Reynolds generalizado para fluidos não-Newtonianos caracterizados pelo modelo reológico de Herschel-Bulkley.

$$Re = \frac{\rho \bar{u}^{2-n} D_h^n}{(\tau_0/8)(D_h/\bar{u})^n + K[(3m+1)/(4m)]^n 8^{n-1}} \quad (4)$$

Onde o termo m representa o gradiente local de tensão de cisalhamento e é definido pela Eq. (5). A Eq. (6) apresenta a determinação do diâmetro hidráulico D_h .

$$m = \frac{nK(8\bar{u}/D_h)^n}{(\tau_0 + K(8\bar{u}/D_h)^n)} \quad (5)$$

$$D_h = D_e - D_i \quad (6)$$

Onde D_e é o diâmetro externo do e D_i é o diâmetro interno do anular.

3. METODOLOGIA

O problema de escoamento foi investigado utilizando uma simplificação de um espaço anular formado entre o poço e a coluna de perfuração. A geometria consiste em um espaço anular cujo diâmetro do cilindro externo $D_e = 0,1016 \text{ m}$ e o diâmetro do cilindro interno $D_i = 0,0508 \text{ m}$. O comprimento da tubulação é de $2,5 \text{ m}$. Foram analisadas configurações com excentricidade $\varepsilon = 0$ e $\varepsilon = 0,8$. Excentricidade é o deslocamento do centro do cilindro interno em relação ao centro do cilindro externo e é dada pela Eq. (6).

$$\varepsilon = \frac{2e}{D_e - D_i} \quad (6)$$

Onde e representa do deslocamento do centro de rotação da coluna em relação ao centro do poço e pode ser visualizado na Fig. 1. Figura 1 apresenta a representação esquemática da geometria analisada em um corte transversal.

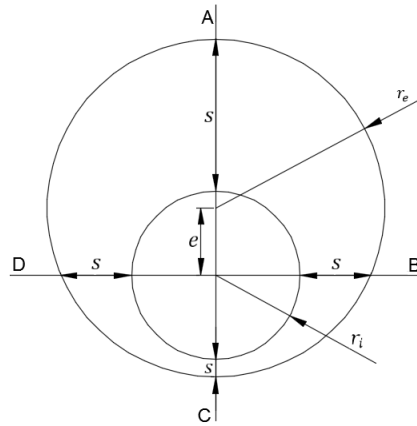


Figura 1. Representação esquemática do espaço anular e medidas de referência.

Todos os casos foram simulados no regime de escoamento laminar. Foram analisados cinco valores de número de Reynolds, variando de 200 a 1000. A rotação do cilindro interno foi fixada em 200 rpm. O fluido utilizado nas análises é um fluido padrão de atividades de perfuração e possui tensão limite de escoamento $\tau_0 = 17,81 \text{ Pa}$, índice de consistência $K = 0,26 \text{ Pa.s}$ e índice de comportamento $n = 0,74$. (Pereira, 2013).

O estudo foi conduzido utilizando a técnica da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) com o auxílio do *software* comercial Ansys® CFX – Versão 16.0.

Uma malha estruturada foi utilizada nas simulações. A estrutura da malha consiste em 90 divisões na direção radial, 108 na direção axial e 220 na direção azimutal. Um teste de malha foi realizado para verificar a independência dos resultados obtidos em relação ao tamanho dos elementos da malha. O critério de convergência utilizado para os resíduos foi de 10^{-4} .

4. RESULTADOS

4.1. Validação do Modelo Numérico

O modelo CFD foi validado através de uma análise comparativa entre os dados experimentais obtidos por Nouar *et al.* (1998) e os resultados simulados a partir dos mesmos parâmetros utilizados pelo autor. Os resultados obtidos apresentaram boa concordância com os dados obtidos experimentalmente por Nouar *et al.* (1998) garantindo a boa representatividade do modelo numérico. Figuras 2 e 3 apresentam a comparação entre os dados experimentais e numéricos.

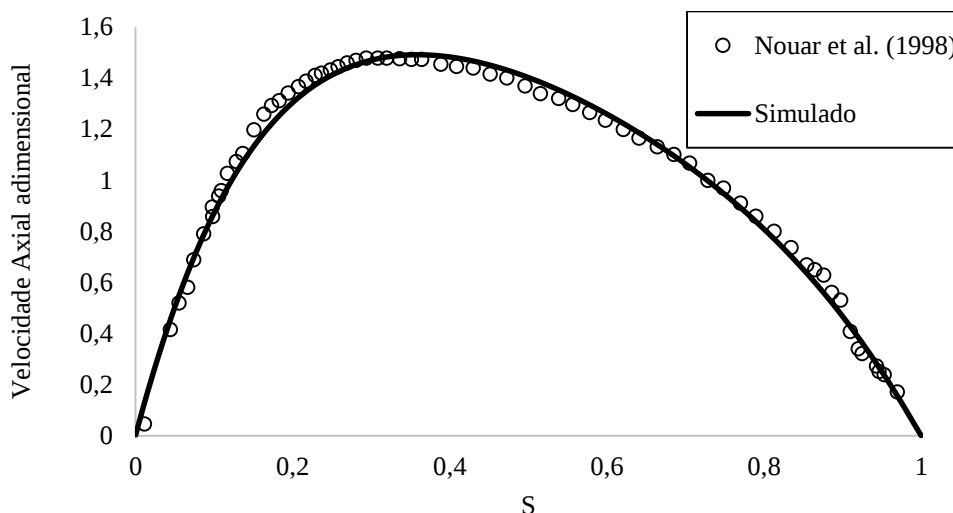


Figura 2. Perfis adimensionais de velocidade axial ($U=0,0728$ e $\omega=268,18$ rpm).

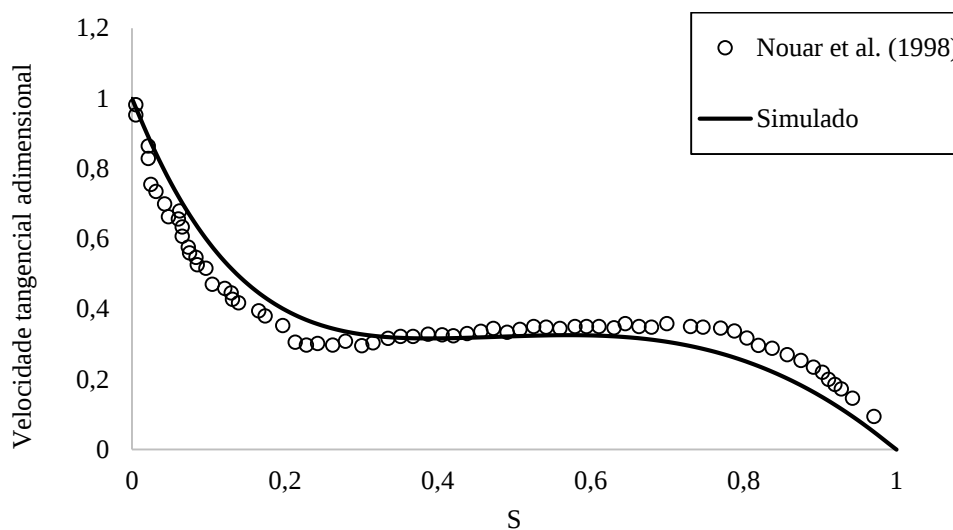


Figura 3. Perfis adimensionais de velocidade tangencial ($U=0,0728$ e $\omega=26,5$ rpm). Perfis de Velocidade

Figura 4 apresenta os perfis de velocidade axial e tangencial adimensionais para o caso concêntrico em função do número de Reynolds do escoamento. Os casos com $Re = 400$ e $Re = 800$ foram suprimidos do gráfico para facilitar a visualização do efeito da variação do número de Reynolds. Os perfis de velocidade axial na Fig. 4 mostram que a velocidade do escoamento permanece praticamente constante na região central do espaço anular. Esta característica evidencia o comportamento pseudoplástico do fluido, assim como reportado por Vieira Neto (2011).

Os fluidos pseudoplásticos tem como principal característica o decréscimo da viscosidade efetiva com o incremento da taxa de deformação. Sendo assim, o achatamento característico desse tipo de fluido na região central do espaço anular torna-se benéfico ao processo de limpeza de poços. Os maiores gradientes de velocidade nas proximidades das paredes do espaço anular proporcionam uma redução da viscosidade do fluido nesta localidade, acarretando menor atrito com as paredes e, conseqüentemente, redução significativa da perda de carga e do torque sobre a coluna. Na região central do espaço anular, os pequenos gradientes de velocidade geram maior viscosidade do fluido, o que pode significar maior capacidade de transporte de partículas pelo fluido.

Apesar do efeito benéfico do comportamento pseudoplástico do fluido, a variação do número de Reynolds não provocou alterações significativas nos perfis de velocidade do escoamento para o caso concêntrico. A pequena variação dos perfis de velocidade pode ser explicada pela pequena variação provocada no número de Reynolds. De acordo com a tendência observada da Fig. 4, espera-se que maiores taxas de escoamento provoquem maiores picos de velocidade axial na região central do escoamento.

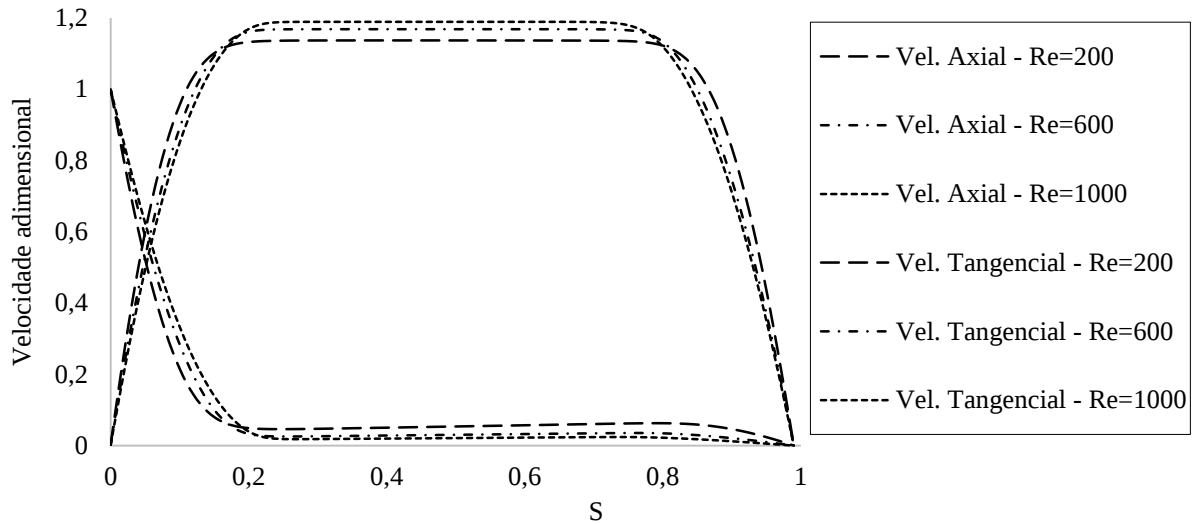


Figura 4. Perfis de velocidade axial e tangencial ($\epsilon = 0$ e $\omega = 200$ rpm).

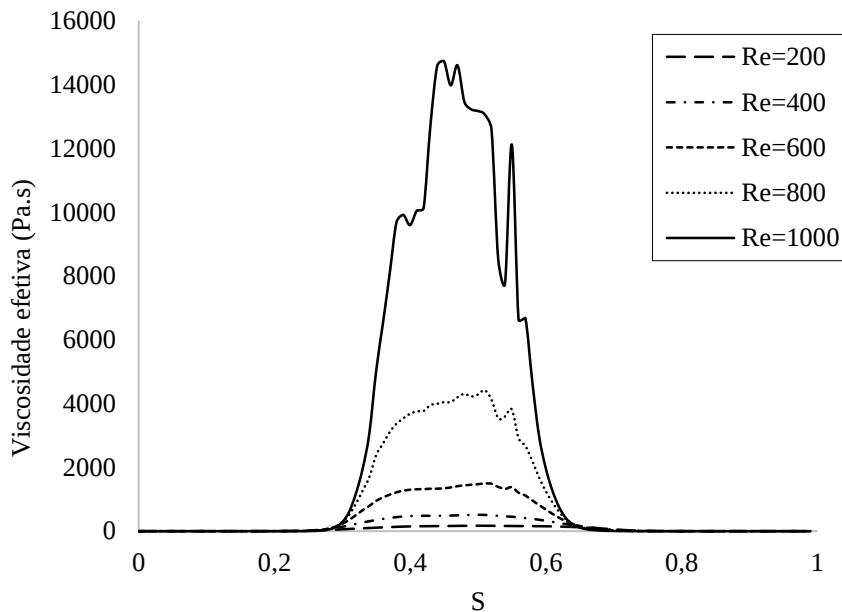


Figura 5. Perfis de viscosidade efetiva ($\epsilon = 0$ e $\omega = 200$ rpm).

Figura 5 apresenta os perfis de viscosidade efetiva para o caso concêntrico. É possível observar o comportamento pseudoplástico do fluido assim como observado nos perfis de velocidade. A baixa viscosidade do fluido nas proximidades das paredes gera baixo atrito e a alta viscosidade na região central do anular beneficia o processo de carregamento dos cascalhos. Observa-se que o aumento do número de Reynolds provoca um aumento significativo da viscosidade na região central do espaço anular. Ao mesmo tempo, a viscosidade nas proximidades das paredes permanece baixa e é praticamente independente do número de Reynolds. Este comportamento se mostra benéfico ao processo de limpeza de poços uma vez que o aumento do número de Reynolds pode melhorar a capacidade de carregamento de cascalhos com pequena alteração do torque sobre a coluna.

A Figura 6 apresenta os perfis adimensionais de velocidade axial para o caso com excentricidade $\epsilon = 0,8$ nos setores A e C, respectivamente o maior e menor espaço anular. É possível observar um deslocamento da velocidade de escoamento no sentido do maior espaço anular do poço. Este deslocamento pode ser prejudicial ao processo de limpeza pois as baixas velocidades no menor espaço anular diminuem a capacidade de transporte de cascalhos e podem até mesmo formar zonas de estagnação de fluxo, causando a acumulação de partículas sólidas no fundo do poço. O aumento do

número de Reynolds provocou um aumento dos picos de velocidade axial na região central de ambos os setores da geometria analisada.

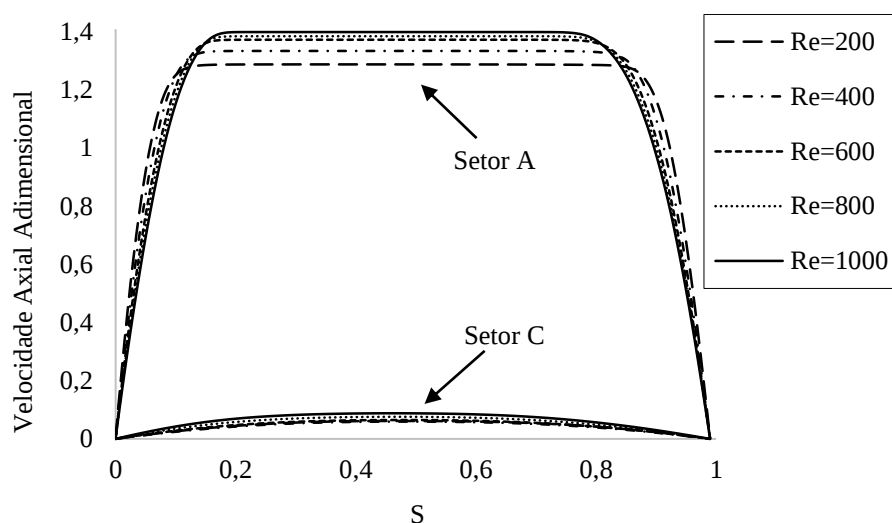


Figura 6. Perfis adimensionais de velocidade axial nos setores A e C.

Os perfis de velocidade tangencial mostrados na Fig. 7 indicam a dominância da velocidade tangencial no setor de menor espaço anular. É possível observar que ocorre uma redução gradativa da velocidade tangencial à medida que se afasta do cilindro interno. Ao contrário do observado por Zanete e Siqueira (2015) essa redução ocorre de maneira ligeiramente menor quanto maior for a taxa de escoamento. O aumento do número de Reynolds provocou maiores velocidades tangenciais nas proximidades das paredes da coluna, o que pode indicar uma maior capacidade de suspensão dos cascalhos.

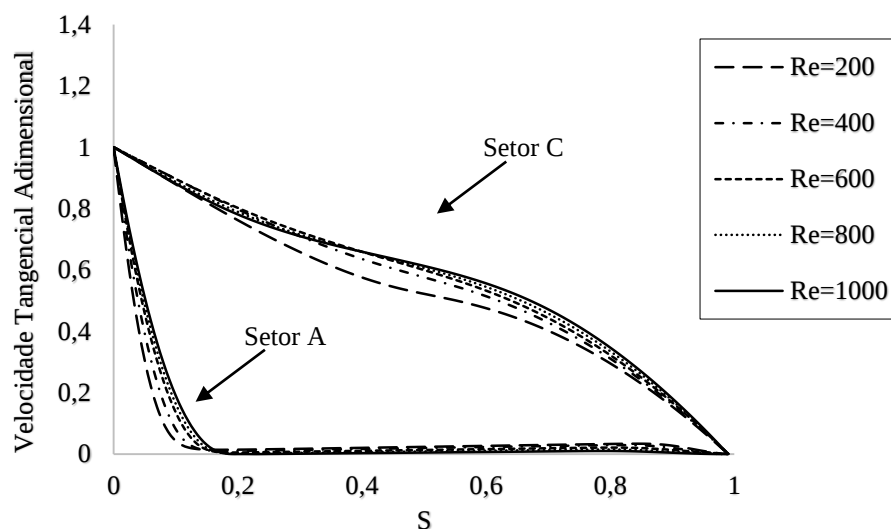


Figura 7. Perfis adimensionais de velocidade tangencial nos setores A e C.

Os perfis de viscosidade efetiva no setor de maior espaço anular (setor A) para o caso excêntrico são apresentados na Fig. 8. O comportamento pseudoplástico do fluido também é evidenciado neste caso. A região central do espaço anular apresenta maior viscosidade enquanto nas proximidades das paredes a viscosidade do fluido tende a zero devido aos elevados gradientes de velocidade.

Ainda de acordo com a Fig. 8, observa-se que, na região central do espaço anular, os picos de viscosidade decrescem com o aumento do número de Reynolds para a faixa de $Re = 400$ até $Re = 1000$. Para o caso em que $Re = 200$ o comportamento do perfil de viscosidade se mostrou diferente do padrão esperado quando comparado com os demais valores de Re . De acordo com Brondani *et al.* (2007), tal diferença pode ser explicada pela tendência das propriedades viscosimétricas do fluido diminuírem rapidamente com o aumento da taxa de deformação ($\dot{\gamma}$). Para pequenos valores de $\dot{\gamma}$ são necessárias malhas ainda mais refinadas, uma vez que pequenos erros na aproximação de $\dot{\gamma}$ causam grandes alterações nos valores de viscosidade. Ogugbue e Shah (2012) observaram tal divergência também para a variação da excentricidade do anular.

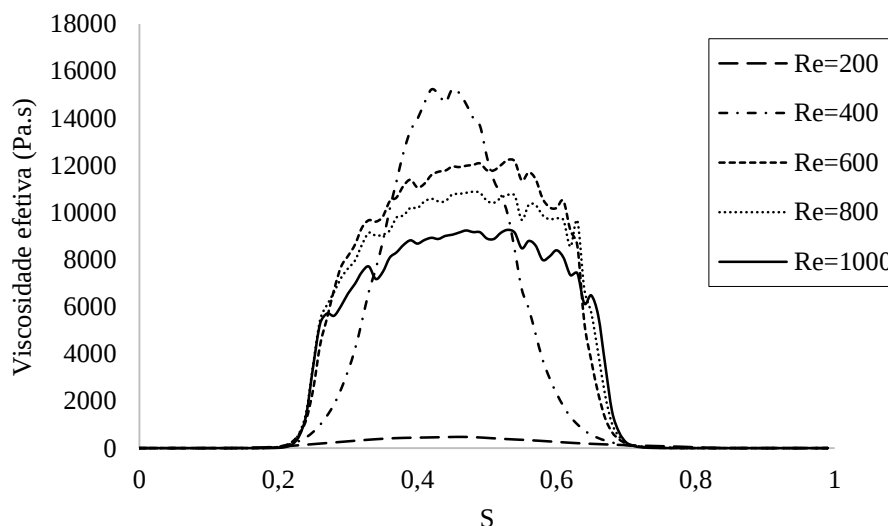


Figura 8. Perfis de viscosidade efetiva no setor A ($\varepsilon=0,8$ e $\omega=200$ rpm).

Na Fig. 9 é possível observar a tendência de aumento da queda de pressão com o aumento do número de Re . Nota-se que, para Re aproximadamente igual a 700, o caso concêntrico apresenta maior perda de carga. A partir deste valor, as curvas se invertem e o caso excêntrico passa a apresentar maior perda de carga. Tal fator demonstra que, para baixas taxas de escoamento, uma geometria excêntrica favorece o bombeio do fluido e, conseqüentemente, reduz os custos operacionais. A medida que a taxa de escoamento aumenta, uma geometria concêntrica passa a ser mais desejável para reduzir o consumo de potência no bombeio.

Além da preocupação com os custos de perfuração, uma série de outros parâmetros devem ser analisados antes da definição de uma boa estratégia de perfuração. O comportamento dos perfis de velocidade e viscosidade efetiva estão diretamente ligados a capacidade de suspensão dos cascalhos, e também devem ser levados em conta pelos projetistas de poços. O estudo numérico desses parâmetros tem se mostrado um excelente alternativa frente à experimentação, uma vez que os custos são extremamente reduzidos pela não necessidade de grandes instalações de perfuração e pela grande economia de tempo proporcionada pelo uso dos modernos computadores atuais.

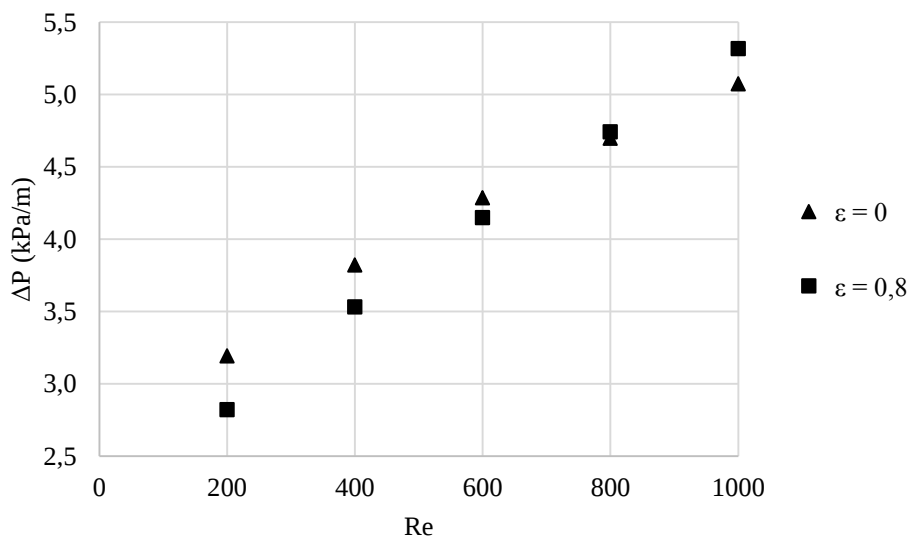


Figura 9. Queda de pressão x Re para ambos os casos.

5. CONCLUSÕES

O presente estudo avaliou a influência do número de Reynolds sobre as características do escoamento em um espaço anular típico de operações de perfuração em campos de petróleo. A análise dos dados permitiu o melhor entendimento dos padrões de escoamento, possibilitando a identificação de condições mais favoráveis ao carreamento dos cascalhos durante o processo de perfuração de um poço horizontal.

Os dados mostraram que, em ambos os casos (concêntrico e excêntrico), o incremento do número de Reynolds aumenta a perda de carga no anular. Para números de Reynolds acima de 700, a geometria excêntrica passou a apresentar

maior perda de carga quando comparada com o caso concêntrico. Isso infere que a presença de excentricidade em condições de perfuração causa uma maior demanda energética para o bombeio do fluido nesta situação.

O incremento do número de Reynolds provocou pequenas alterações nos perfis de velocidade do escoamento, no entanto, os perfis de viscosidade apresentaram variação significativa justificada pela forte tendência pseudoplástica do fluido. De maneira geral, para o caso concêntrico, o incremento do número de Reynolds provocou um aumento dos picos de viscosidade enquanto para o caso excêntrico, o incremento do número de Reynolds provocou redução dos picos de viscosidade. Este fato pode ser explicado pela restrição ao fluxo provocada na região inferior do espaço anular. Esta restrição provoca uma zona de escoamento preferencial na região central do maior espaço anular que, consequentemente, fica submetida a maiores taxas de deformação, reduzindo a viscosidade do fluido.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal do Espírito Santo (IFES) pela estrutura e apoio à realização deste e outros trabalhos e aos demais integrantes do Grupo de Pesquisa em Mecânica dos Fluidos do IFES – Campus São Mateus.

7. REFERÊNCIAS

- Akhshik, S., Behzad, M., Rajabi, M., 2015, “CFD-DEM approach to investigate the effect of drill pipe rotation on cuttings transport behavior”, *Journal of Petroleum Science Engineering*, Vol. 127, pp. 229-244.
- Brondani, W.M., Coradin H. T., Mattiussi, E.M., Franco, A.T., Morales, R.E.M, Martins, A.L., 2007. “Estudo numérico do escoamento de um fluido de perfuração viscoelástico através de um anular concêntrico”, *Anais do 4º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás*, Campinas, Brasil, p.10.
- Costa, M. T. A. T. L., Rigato, S. F., Siqueira, R. N. 2013. Efeito da rotação sobre o torque da coluna de perfuração em poços horizontais, *Anais do V Encontro Nacional de Hidráulica de Poços de Petróleo e Gás*, Teresópolis-RJ.
- Escudier, M. P., Gouldson, I. W., Oliveira, P. J., Pinho, F. T. 2000. “Effects of inner cylinder rotation on laminar flow of a Newtonian fluid through an eccentric annulus”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 21, pp. 92-103.
- Escudier, M. P., Oliveira, P. J., and Pinho, F. T., 2002. “Fully developed laminar flow of purely viscous non-Newtonian liquids through annuli, including the effects of eccentricity and inner-cylinder rotation”. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 23, pp. 52-73.
- Gabriel, A.C., Siqueira, R.N., 2015, “Influência do índice de comportamento do modelo power-law na eficiência do processo de perfuração”, *Proceedings of the 6th Encontro Nacional de Hidráulica de Poços de Petróleo e Gás*, Rio Quente, Brasil.
- GhasemiKafroudi, E., Hashemabadi, S.H., 2016, “Numerical study on cuttings transport in vertical wells with eccentric drillpipe”, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 140, pp. 85-96.
- Haciislamoglu, M., Langlinais, J., 1990, “Non-Newtonian Flow in Eccentric Annuli”. *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 112, pp.163-169.
- Hamed, S. B., Belhadri, M., 2009, “Rheological properties of biopolymers drilling fluids”. *Journal of Petroleum Science Engineering*, Vol. 67, pp. 84-90.
- Lidio, M.S., Siqueira, R.N., 2015, “Drill pipe eccentricity effects on horizontal wells cleaning process”, *Proceedings of the 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering*, Rio de Janeiro, Brasil.
- Loureiro, B. V., Siqueira, R. N., Fontenelle, F. C. N., 2006. Efeito da rotação coluna de perfuração na suspensão de cascalhos sedimentados em poços horizontais, *Encontro Nacional de Hidráulica de Perfuração e Completação de Poços de Petróleo e Gás*, Domingos Martins-ES.
- Loureiro, B.V. and Siqueira, R.N., 2006. “Determinação da tensão de cisalhamento mínima para arraste de partículas de um leito sedimentado”. *Proceedings of the Encontro Nacional de Hidráulica de Perfuração e Completação de Poços de Petróleo e Gás – ENAHPE 2006*. Domingos Martins, Brasil.
- Madlener, K.; Frey, B. and Ciezki, H. K., 2009. “Generalized Reynolds number for non-Newtonian fluids”. *Progress in Propulsion Physics*, Vol. 1, pp. 237–250.
- Nouar, C., Desaubry, C., Zenaidi, H., 1998, “Numerical and experimental investigation of thermal convection for a thermodependent Herschel-Bulkley fluid in an annular duct with rotating inner cylinder”, *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, Vol. 17, n. 6, pp. 875–900.
- Ogugbue, C.E.C, Shah, S.N., 2012. “CFD modeling of non-Newtonian flow in eccentric annular geometries”, *International Journal of Petroleum Science and Technology*, Vol. 6, n. 1, pp. 9-34.
- Pereira, F.A.R, Ataíde, C.H. and Barrozo, M.A.S., 2007. “CFD predictions of drilling fluid velocity and pressure profiles in laminar helical flow”. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 24, n. 4, pp. 587-595.
- Pereira, M.S. 2013. Aplicação de secagem por microondas no tratamento de cascalho de perfuração. Ph.D. thesis, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.
- Sun, X., Wang, K., Yan, T., Shao, S. and Jiao, J., 2014. “Effect of drill pipe rotation on cuttings transport using computational fluid dynamics (CFD) in complex structure wells”. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, Vol. 4, pp. 255-261.

- Tardy, P. and Bittleston, S., 2015. "A model for annular displacements of wellbore completion fluids involving casing movement". *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 126, pp. 105-123.
- Thomas, J.E., 2001, "Fundamentos de Engenharia de Petróleo". 2ª edição, PETROBRAS. Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2001.
- Viera Neto, J. L., Martins, A. L., Ataíde, C.H. and Barrozo, M. A. S., 2014. "The effect of the inner cylinder rotation on the fluid dynamics of non-Newtonian fluids in concentric and eccentric annuli". *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 31, n. 4, pp. 829-838.
- Zanete, H.Z., Siqueira, R.N., 2015, "Escoamento axial de fluidos não-newtonianos em anulares excêntricos com rotação do cilindro interno", *Proceedings of the 6th Encontro Nacional de Hidráulica de Poços de Petróleo e Gás*, Rio Quente, Brasil.

8. RESPONSABILIDADE AUTURAL

O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(is) pelo conteúdo deste trabalho.

REYNOLDS NUMBER EFFECTS ON HORIZONTAL WELLS CLEANING PROCESS.

CON-2016-1071

Abstract. *The well drilling process is a significant part of the total operational cost of an oil field. The horizontal drilling technique allows an increase of the contact area between the wellbore and the reservoir, improving the extraction efficiency and for this reason it has been widely used in the oil industry. Despite the benefits, some problems are generated from this technique. The main problems are the offset of the drillstring, resulting in an eccentricity between the internal and external walls of the annulus and the settling of the gravel particles, which form a solid bed, impairing the removal of the cuttings from the well. Among the parameters that can affect the performance of an oil well drilling process are: eccentricity, column rotation speed, axial-flow rate and the rheology of the drilling fluid. Although the drilling fluid has many functions, the main one is the cuttings transport. The present study examines the effect of the axial flow rate, by varying the Reynolds number, on the flow dynamics within the annular space. The computational fluid dynamics (CFD) technique, using the ANSYS® CFX 16.0 software, was used for the analysis of the flow. The geometry analyzed is composed of two cylinders with 2.5 m length (L), inner cylinder radius (r_i) equal to 0.0254 m and outer cylinder radius (r_e) equal to 0.0508 m. Two values of eccentricity were used ($\varepsilon = 0$ and $\varepsilon = 0.8$) and rotation of the inner cylinder (ω) was set at 200 rpm. The Reynolds number (Re) varied from 200 to 1000, assuring the condition of laminar flow. The drilling fluid has a specific mass (ρ) of 1000 kg/m³ and the fluid rheology was represented by the Herschel-Bulkley model with yield stress (τ_0) of 17.81 Pa, consistency index (K) of 0.26 Pa.s and behavior index (n) equal to 0.74. The data show that increasing the Reynolds number changes the flow field and viscosity profiles. These changes directly affect the cuttings transport capacity and understanding the flow field behavior is essential for defining a well drilling strategy.*

Keywords: *CFD, horizontal drilling, axial flow.*