

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

EFEITOS DA RUGOSIDADE EM ESCOAMENTOS ANULARES COM ROTAÇÃO DO CILINDRO INTERNO

CON-2016-0969

Resumo: Os escoamentos anulares correspondem a uma grande parcela de estudos relacionados à aplicações industriais modernas. Aplicações como a perfuração de poços horizontais para a extração de petróleo e gás, indústria alimentícia e química são ramos que frequentemente utilizam análises experimentais e numéricas de espaços anulares. A excentricidade, a rotação e a rugosidade da coluna de perfuração, a reologia do fluido, a granulometria do cascalho, a geometria e a rugosidade do poço e o escoamento axial são alguns dos parâmetros que podem influenciar no escoamento presente em um espaço anular. Aplicando estes parâmetros a determinadas situações práticas, suas influências podem determinar perdas de produtividade ou eficiência, como no caso da limpeza de poços de perfuração de petróleo e carreamento de cascalhos dos mesmos. A rugosidade superficial presente nas paredes externas de regiões anulares torna-se o foco do presente estudo, pois as alterações presentes na superfície externa do espaço anular podem gerar variações em relação ao comportamento do escoamento do fluido no anular, aumentando a perda de carga, alterando perfis de velocidade e viscosidade efetiva e prejudicando determinados processos. Através da técnica de Dinâmica dos Fluidos Computacional, baseado no método de volumes finitos, com a utilização do software Ansys CFX 16.0, o presente trabalho visa avaliar a influência da rugosidade presente no cilindro externo sobre o escoamento turbulento de um fluido Herschel-Bulkley. A geometria analisada consiste em um espaço anular concêntrico de raio interno igual a 25,4 mm e raio externo de 50,8 mm, com rotação da coluna interna $\omega = 100$ rpm. Com o objetivo de analisar o comportamento do fluido no regime turbulento, o número de Reynolds do escoamento é fixado em $Re=4000$. O presente trabalho apresenta a influência da rugosidade sobre os perfis de velocidade axial e tangencial do escoamento, perfis de viscosidade efetiva do fluido sob as condições analisadas e dados de perda de carga ao longo do anular. Os dados ajudam a compreender um pouco melhor quais os efeitos da rugosidade sobre os padrões de escoamento e consequentemente, sobre a eficiência do processo que ocorre no espaço anular.

Palavras-chave: Rugosidade, espaços anulares, CFD.

1. INTRODUÇÃO

O escoamento em espaços anulares possui diversas aplicações na indústria moderna, tais como indústrias alimentícia, petrolífera e química. Os trabalhos que utilizam escoamentos modelados em anulares vão desde trabalhos relacionados à perfuração de poços de petróleo (Wang *et al.*, 2009; Furini *et al.*, 2013; Zanete e Siqueira, 2015; Lídio e Siqueira, 2015) a trabalhos sobre concreto (De Larrard *et al.*, 1998) e outras áreas. Por se tratar de um estudo com diversas implementações práticas e grande motivação, faz-se necessário o melhor conhecimento a respeito dos efeitos de diversos fatores operacionais encontrados nessas aplicações sobre o comportamento do escoamento interno nesses espaços anulares.

A presença de parâmetros como a rotação de um dos cilindros do anular (Erge *et al.*, 2014), da excentricidade do cilindro interno (Lídio e Siqueira, 2015), do escoamento axial (Zanete e Siqueira, 2015), entre outros, tem sido foco de diversos estudos ao longo dos últimos anos. Erge *et al.* (2014), por exemplo, avaliaram as relações entre a deflexão e rotação do cilindro interno de um anular na perda de carga por atrito. Observou-se que a rotação da coluna interna do anular possui maior influência sobre o escoamento quando o mesmo se encontra no regime de transição. Lídio e Siqueira (2015) apresentaram dados de perfis de velocidade e viscosidade relacionados à influência da excentricidade do cilindro interno do anular, enquanto Zanete e Siqueira (2015) analisaram a relação entre o escoamento axial e o comportamento do escoamento anular. Furini *et al.* (2013) avaliaram a influência de uma obstrução no gap inferior de um anular nos perfis de velocidade do escoamento e no torque gerado sobre o cilindro interno do anular. Gabriel e Siqueira (2015) avaliaram a relação entre a reologia do fluido presente no anular e os perfis de velocidade do escoamento e viscosidade aparente. Trabalhos que apresentam dados a respeito da influência individual de cada um dos

parâmetros são sempre importantes para se entender o comportamento do todo e graças a grande quantidade de fatores que podem afetar um escoamento anular, diversos trabalhos podem ser encontrados na literatura.

Outro fator que pode interferir nos escoamentos anulares e que também possui vasto ramo de estudo são os diferentes tipos de fluidos encontrados em diversas aplicações. É possível encontrar na literatura aplicações com fluidos Newtonianos e não-Newtonianos à regiões anulares, principalmente para o regime laminar de escoamento. Escudier *et al.* (2002), por exemplo, analisaram o escoamento laminar de um fluido não-Newtoniano, modelado como *Power-Law*, em um anular excêntrico, apresentando resultados de velocidade e perda de carga para as situações analisadas. Kelessidis *et al.* (2011) ressaltaram a escassez de trabalhos que abrangem os regimes de transição e turbulento em anulares. Eles apresentaram um modelo para melhor avaliação do fator de atrito e do comportamento de um fluido Herschel-Bulkley em anulares concêntricos e excêntricos. A rugosidade de determinada superfície em contato com algum tipo de escoamento surge como um estudo promissor, tendo em vista que a análise da influência desta e de outras propriedades em escoamentos turbulentos pode ajudar no melhor conhecimento a respeito de situações onde este regime se faz presente.

Análises de escoamentos anulares com a presença de rugosidade na parede do cilindro externo são difíceis de serem encontrados na literatura. Estudos a respeito da influência deste parâmetro sobre o fator de atrito de superfícies internas de tubulações e correlações matemáticas para cálculos de perda de carga sobre a rugosidade vêm sendo analisadas por alguns estudos ao longo dos anos (Nikuradse, 1950; Farshad *et al.*, 2001; Mikhailov e Samoilova, 2012 e Huang *et al.*, 2012 e 2013), mas com pouca ênfase em espaços anulares, principalmente com o uso de fluidos não-Newtonianos.

Ahn e Kim (1998) analisaram experimentalmente um escoamento turbulento de ar a condições atmosféricas em um anular com e sem rugosidade da parede do cilindro externo. Trabalhos em que há a análise de um escoamento anular de um fluido Herschel-Bulkley vêm sendo desenvolvidos nos últimos anos graças à grande utilização deste modelo reológico em áreas industriais importantes, como a do petróleo. Contudo, grande parte destes trabalhos tem como foco de estudo o escoamento laminar em anulares (Haciislamoglu e Langlinais, 1990; Kelessidis *et al.*, 2006; Founargiotakis *et al.*, 2008; Ofei *et al.*, 2015). Kelessidis *et al.* (2011) apresentam resultados de análise de um escoamento anular nos três regimes de escoamento para um fluido Herschel-Bulkley, mas sem a análise dos efeitos da rugosidade sobre o mesmo.

Apesar de haver um interesse recente em se estudar os efeitos da rugosidade sobre um escoamento laminar, como apresentado no trabalho de Huang *et al.* (2012), o foco do trabalho será a influência da rugosidade sobre um escoamento anular turbulento, levando em consideração o conhecimento inicial de que o fator de atrito sofre maior influência da rugosidade quando o regime for turbulento.

O presente trabalho busca apresentar os resultados de uma simulação numérica, através da técnica da Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD), de uma região anular concêntrica, avaliando a influência da rugosidade da parede do cilindro externo sobre o escoamento turbulento de um fluido não-Newtoniano.

2. EQUACIONAMENTO BÁSICO

O fluido utilizado nos escoamentos analisados no presente trabalho segue o modelo reológico de Herschel-Bulkley, cuja equação reológica é dada pelas Eq. (1) e Eq. (2) (Chhabra e Richardson, 2008).

$$\tau = \tau_0 + K(\dot{\gamma}_{xy})^n \quad \text{para } \tau > \tau_0 \quad (1)$$

$$\dot{\gamma} = 0 \quad \text{para } \tau \leq \tau_0 \quad (2)$$

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

Para determinação do número de Reynolds crítico do escoamento estudado, foi utilizada a Eq. (3), que apresenta a relação de Madlener *et al.* (2009) para cálculo do número de Reynolds generalizado para fluidos caracterizados pelo modelo de Herschel-Bulkley.

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

O termo m , ou gradiente local de tensão de cisalhamento, é definido pela Eq. (4) e a Eq. (5) apresenta a determinação do diâmetro hidráulico D_h , onde r_e é o raio do cilindro externo do anular e r_i corresponde ao raio do cilindro interno.

$$m = \frac{nK(8\bar{u}/D_h)^n}{(\tau_0 + K(8\bar{u}/D_h)^n)} \quad (4)$$

$$D_h = 2(r_e - r_i) \quad (5)$$

A distância adimensional entre o cilindro interno e a parede externa é definida pela Eq. (6), onde r é a posição no espaço anular.

$$\sigma = \frac{r_e - r}{r_e - r_i} \quad (6)$$

3. METODOLOGIA

A análise realizada no presente estudo consiste em uma análise CFD através do software Ansys CFX 16.0. A geometria consiste em um espaço anular concêntrico de raio externo $r_e = 0,0508 \text{ m}$ e interno $r_i = 0,0254 \text{ m}$. O comprimento da tubulação é de 2,5 m. Figura 1 apresenta uma representação gráfica de um corte transversal da geometria analisada.

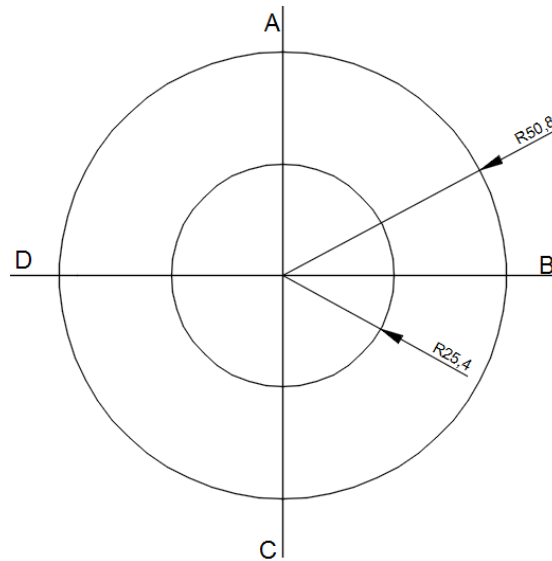


Figura 1. Representação da geometria analisada.

O fluido Herschel-Bulkley utilizado no estudo possui os parâmetros reológicos $\tau_0 = 17,81 \text{ Pa}$, $K = 0,26 \text{ Pa.s}$ e $n = 0,74$. Os demais parâmetros utilizados no estudo são apresentados na Tabela 1. Foram realizadas seis análises relacionadas à rugosidade, o caso sem rugosidade e cinco valores de rugosidade absoluta. Os valores utilizados para a rugosidade foram baseados na rugosidade absoluta de superfícies de tubulações de concreto (Guiteras, 2003).

Tabela 1. Parâmetros utilizados no estudo realizado.

Rotação da coluna interna ω (rpm)	Número de Reynolds Re	Rugosidade absoluta e (pol)
100	4000	0,012
		0,039
		0,066
		0,093
		0,120

A malha estruturada utilizada nas simulações consiste em uma malha com 90 divisões na direção radial, 108 divisões na direção axial e 220 divisões na direção azimutal. O controle do tamanho dos elementos da malha foi realizado com o tamanho máximo das faces em $0,001 \text{ m}$. A escolha da malha ideal se deu quando os resultados obtidos se tornaram independentes da malha analisada.

As simulações foram realizadas em regime permanente e o critério de convergência foi o valor quadrático médio dos resíduos (RMS) igual a 1×10^{-4} . O modelo de turbulência escolhido para a realização das simulações foi o *shear stress transport*. A condição de saída foi com pressão relativa fixada no final da tubulação em 0 Pa .

4. RESULTADOS

4.1. Validação do modelo numérico

Com o objetivo de se validar o modelo numérico utilizado no trabalho, foi realizada uma validação baseada nos dados experimentais de Nouar *et al.* (1998). A Figura 2 apresenta a comparação entre os resultados de velocidade axial obtidos a partir da análise CFD e dos dados obtidos no referido trabalho. O perfil apresenta boa concordância entre os dados obtidos.

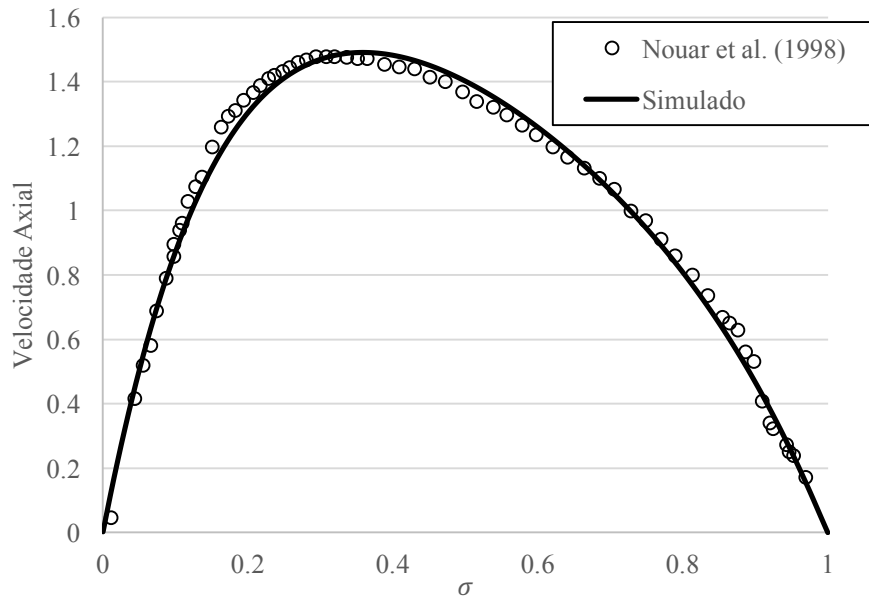


Figura 2. Comparação do modelo numérico com dados experimentais. $V = 0,0728$ m/s, $\omega = 268,2$ rpm.

A análise numérica realizada pelo presente trabalho conseguiu se fazer validada pelos dados experimentais usados como base de comparação, o que dá credibilidade aos futuros dados obtidos.

4.2. Perfis de Velocidade

A Figura 3 apresenta os perfis de velocidade axial obtidos a partir de três situações analisadas. Percebe-se que a rugosidade presente na parede externa do anular provoca um deslocamento do patamar de velocidade axial em direção ao cilindro interno. Nota-se também uma ligeira redução da largura do patamar do perfil de velocidade. Isto implica que o transporte advectivo do fluido ocorre mais próximo ao cilindro interno quando se aumenta a rugosidade do cilindro externo e o patamar de velocidade máxima também é diminuído.

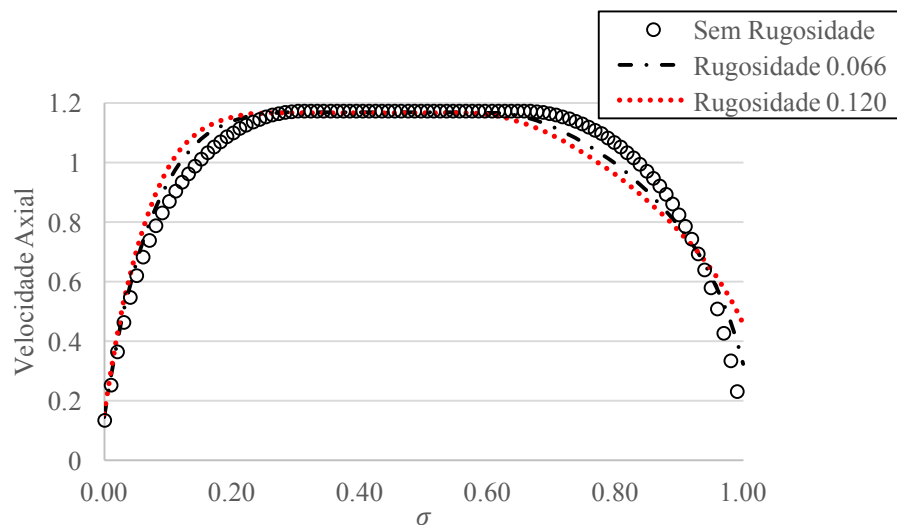


Figura 3. Perfis de velocidade axial adimensional para os casos com e sem rugosidade no cilindro externo.

Na Fig. 4 é possível observar que a influência da rotação do cilindro interno, representada pela velocidade tangencial do gráfico, diminui com a rugosidade. Nota-se um deslocamento do perfil de velocidade tangencial para mais próximo do cilindro interno, reduzindo a área de influência da rotação no escoamento principal presente no espaço anular.

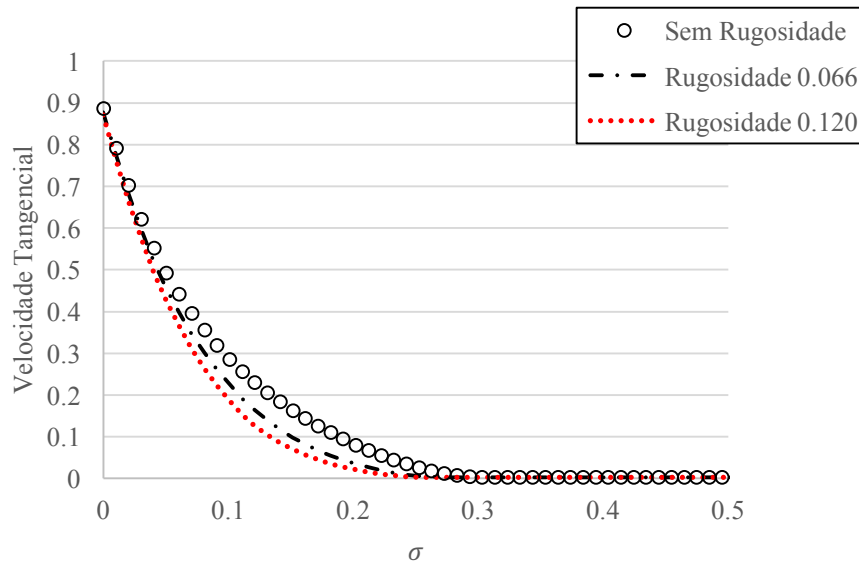


Figura 4. Perfis de velocidade tangencial adimensional para os casos com e sem rugosidade no cilindro externo.

4.3. Perfis de Viscosidade efetiva

A Figura 5 apresenta os perfis de viscosidade efetiva encontrada dentro de determinada região do anular. O perfil corresponde a dados retirados a partir de uma linha transversal que corta a parte superior do anular. É possível observar que a rugosidade do cilindro externo torna menor a região de alta viscosidade presente no escoamento. Percebe-se que além da diminuição da região de alta viscosidade, há um ligeiro deslocamento desta zona para uma região mais distante do cilindro externo. As regiões de alta viscosidade estão de acordo com as regiões onde se verificar valores de velocidade constante.

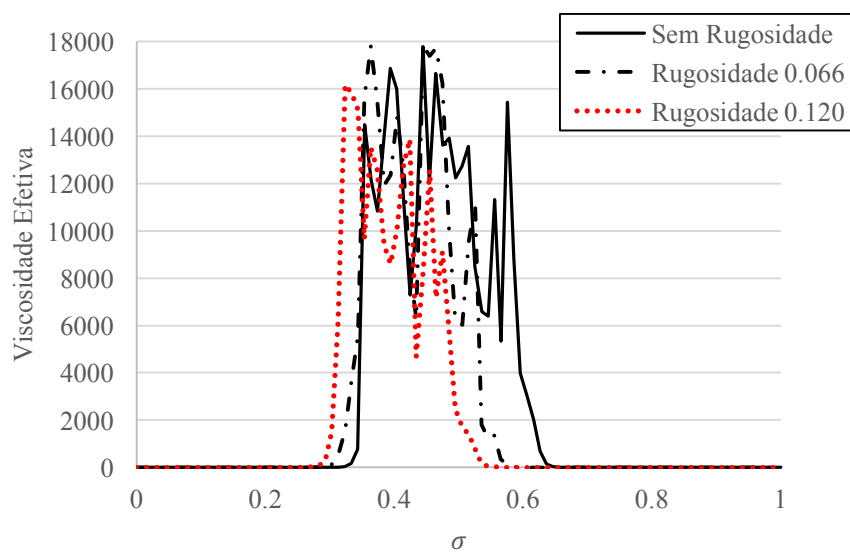


Figura 5. Perfis de viscosidade efetiva para os casos com e sem rugosidade no cilindro externo.

Através da Fig. 6 é possível perceber melhor o comportamento de redução da área de alta viscosidade e também deslocamento da mesma para uma região mais próxima ao cilindro interno. Aplicando a análise a uma situação prática, como por exemplo à limpeza de poços de perfuração de petróleo, uma redução desta área de alta viscosidade se faria negativa ao carregamento de cascalhos através do escoamento, tendo em vista que a alta viscosidade facilita o carregamento de partículas sólidas presentes no espaço anular.

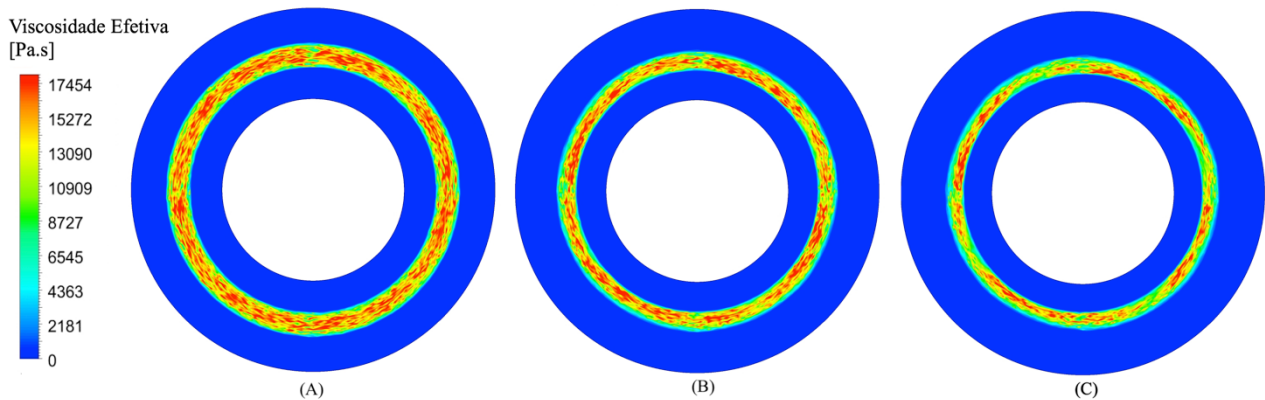


Figura 6. Perfis de viscosidade efetiva para os casos com e sem rugosidade no cilindro externo. (A) sem rugosidade; (B) rugosidade = 0,066 pol; (C) rugosidade = 0,120 pol.

4.4. Perfil de pressão ao longo do anular

Pode-se observar através da Fig. 7 que o aumento da rugosidade absoluta na parede externa do anular implica em um aumento na perda de carga ao longo da tubulação. O crescimento da perda de carga com o aumento da rugosidade do cilindro externo possui característica praticamente linear.

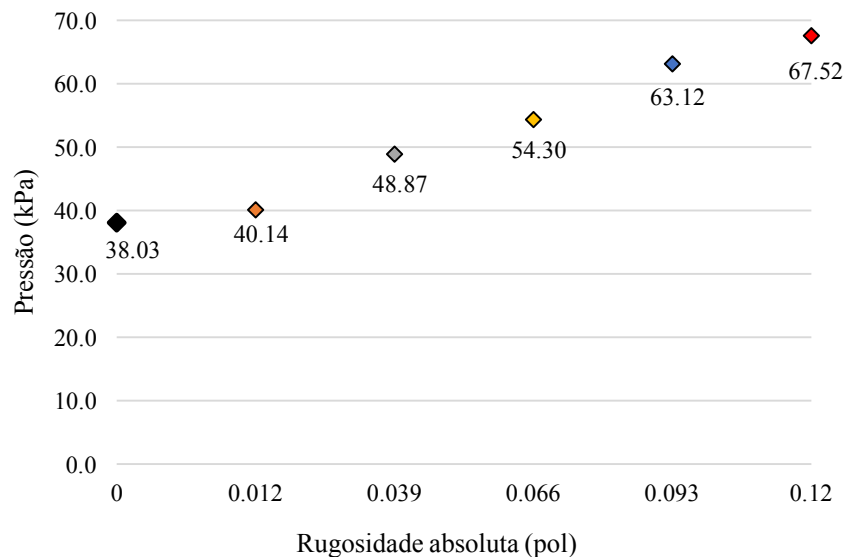


Figura 7. Efeito da rugosidade absoluta da parede externa do anular sobre a queda de pressão ao longo da direção axial.

5. CONCLUSÃO

Com o objetivo de se avaliar a influência que a rugosidade tem sobre o escoamento turbulento de um fluido Herschel-Bulkley em um anular, o presente trabalho avaliou numericamente e obteve resultados de alterações nos perfis de velocidade e viscosidade efetiva. Verificou-se que quando a superfície do cilindro externo de um anular é rugosa, esta rugosidade altera o perfil do escoamento do fluido, aproximando a zona de alta viscosidade efetiva para uma região próxima ao cilindro interno. No caso da rotação do cilindro interno, ainda é possível perceber que a presença da rugosidade na superfície externa do anular reduz a área de influência que a rotação causa no escoamento principal. A zona de alta viscosidade efetiva no escoamento sofre também uma redução com o aumento da rugosidade. Para casos práticos onde há a necessidade de carregamento de algum tipo de partícula através do fluido presente no anular, essa

redução da área de alta viscosidade pode prejudicar o carregamento desta substância, pois quando há a busca pelo carregamento de partículas é desejável que a viscosidade seja elevada.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Instituto Federal do Espírito Santo (IFES) pelo apoio financeiro e infraestrutura fornecida para realização deste e outros trabalhos e aos demais integrantes do Grupo de Pesquisa em Mecânica dos Fluidos do IFES – Campus São Mateus.

7. REFERÊNCIAS

- Ahn, S.W., Kim, K.C., 1999, “Characteristics of Turbulent Flow in the Annuli with Smooth and Rough Surfaces”. KSME International Journal, Vol. 13, No. 2, pp. 183-190.
- Chhabra, R.P. and Richardson, J.F., 2008. “Non-Newtonian Flow and Applied Rheology”, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2nd edition.
- De Larrard, F., Ferraris, C.F., Sedran, T., 1998, “Fresh Concrete: a Herschel-Bulkley material”. Mater. Struct. 31, 494.
- Erge, O., Ozbayoglu, M.E., Miska, S.Z., Yu, M., Takach, N., Saasen, A., May, R., 2014, “Effect of Drillstring Deflection and Rotary Speed on Annular Frictional Pressure Losses”. Journal of Energy Resources Technology, 136(December).
- 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
- Farshad, F., Rieke, H., Garber, J., 2001. “New developments in surface roughness measurements, characterization, and modeling fluid flow in pipe”. Journal of Petroleum Science and Engineering, 29(2), 139–150.
- Founargiotakis, K., Kelessidis, V.C., Maglione, R., 2008, “Laminar, transitional and turbulent flow of Herschel-Bulkley fluids in concentric annulus”, Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 86, pp. 676–683.
- Furini, T.M.G., Gabriel, A.C., Siqueira, R.N., 2013, “Influence of obstruction rate on drill pipe torque in horizontal wells”. Anais do V Encontro Nacional de Hidráulica de Poços de Petróleo e Gás. Rio de Janeiro. Brazil. In: Anais...
- 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, Brazil.
- Guiteras, O.H.J., 2003, “Metodologia de Análise Global para o Desenvolvimento de um Campo de Gás Natural”. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro. Brazil.
- Haciislamoglu, M., Langlinais, J., 1990, “Non-Newtonian Flow in Eccentric Annuli”. Journal of Energy Resources Technology, Vol. 112 /163-169.
- Huang, K., Wan, J.W., Chen, C.X., Mao, D.F., Li, Y.Q., 2012, “Experiments investigation of the effects of surface roughness on laminar flow in macro tubes”. Experimental Thermal and Fluid Science, 45, 243–248.
- Huang, K., Wan, J.W., Chen, C.X., Li, Y.Q., Mao, D.F., Zhang, M.Y., 2013, “Experimental investigation on friction factor in pipes with large roughness”. Experimental Thermal and Fluid Science, 50, 147–153.
- Kelessidis, V.C., Maglione, R., Tsamantaki, C., Aspirtakis, Y., 2006, “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(3-4), 203–224.
- Kelessidis, V.C., Dalamarinis, P., Maglione, R., 2011. “Experimental study and predictions of pressure losses of fluids modeled as Herschel-Bulkley in concentric and eccentric annuli in laminar, transitional and turbulent flows”. Journal of Petroleum Science and Engineering, 77(3-4), 305–312.
- Lídio, M.S. and Siqueira, R.N., 2015, “Drill Pipe eccentricity effects on horizontal wells cleaning process”. Proceedings of 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering. December 6-11, 2015, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.
- 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.
- Mikhailov, V.V., Samoilova, N.V., 2012. Sand-grain roughness calculation for flows in pipes and in boundary”. TsAGI Science Journal, 43 (1): 101–110.
- Nikuradse, J., 1950. “Laws of Flow in Rough Pipes”. Journal of Applied Physics, 3(November), 399.
- 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, 17(6), 875–900.
- Ofei, T.N., Irawan, S., Pao, W., Osgouei, R.E., 2015, “Modified Yield Power-Law fluid flow in narrow annuli with inner rotating pipe”. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 93(1), 150–165.
- Wang, Z.M., Guo, X.L., Li, M., Hong, Y.K., 2009, “Effect of drillpipe rotation on borehole cleaning for extended reach well”. Journal of Hydrodynamics, 21(3), 366–372.

Zanete, H.Z. and Siqueira, R.N., 2013, “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, Brazil.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

EFFECTS OF ROUGHNESS IN ANNULAR FLOWS WITH ROTATION OF THE INNER CYLINDER

CON-2016-0969

Abstract. *Annular flows correspond to a large portion of studies related to modern industrial applications. Applications such as horizontal wells drilling for extraction of oil and gas, food and chemical industries are some of the groups that often use experimental and numerical analysis of annular spaces. Eccentricity, rotation and roughness of the drill string, rheology of the fluid, gravel size, geometry and roughness of the wellbore and axial flow are some of the parameters that may influence the flow in an annular space. Applying these criteria to certain practical situations, it is possible to determine their influences on losses of productivity or efficiency, such as in cleaning processes of wells drilling. The surface roughness present on the outer cylinder of annular regions is the focus of this study, since the alterations on the outer surface of the annular space can generate variations in the behavior of the fluid flow, increasing the pressure loss, changing speed and effective viscosity profiles and impairing certain processes. With the Computational Fluid Dynamics technique, based on the finite volume method, using the ANSYS CFX software 16.0, this study aims to evaluate the influence of outer cylinder roughness on a turbulent flow of a Herschel-Bulkley fluid. The geometry analyzed consists in a concentric annulus, with inner radius of 25.4 mm and external radius of 50.8 mm and rotation of the internal column $\omega = 100$ rpm. In order to analyze the fluid behavior in the turbulent flow, the Reynolds number is set at $Re = 4000$. This work shows the influence of roughness on the axial and tangential velocities and effective viscosity profiles of a fluid under the analyzed conditions and pressure drop along the geometry.*

Keywords: *Roughness, annular spaces, CFD.*