

Estudo do escoamento de fluidos não-Newtonianos em seções anulares excêntricas

Rodrigo Simões Maciel^{1*}, Felipe Simões Maciel², Fábio de Assis Ressel Pereira³

¹Aluno do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, campus São Mateus

²Aluno do curso de Graduação em Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, campus São Mateus

³Professor do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, campus São Mateus

*Autor para correspondência, E-mail: rodrigossimoesrsm@gmail.com.

Article history:

Received: 1 March 2016

Accepted: 10 May 2016

Available online: 19 September 2016

Resumo: O transporte de cascalhos através de fluidos de perfuração tradicionalmente tem grande destaque na indústria petrolífera. Isto devido às técnicas de perfuração direcional e horizontal, aprimoradas no fim da década de 80, apresentando uma nova perspectiva para a exploração de hidrocarbonetos, mas também trazendo um cenário mais desafiador. É frequente o uso de fluidos não-Newtonianos como agentes carreadores das partículas sólidas, devido as suas características reológicas. Este fluido atua na limpeza do poço, contribuindo para a redução do desgaste da broca e limpeza da frente de avanço. Neste estudo a estratégia para a investigação dos fenômenos envolvidos é simulação numérica, através de *softwares* de dinâmica de fluidos computacional (CFD). Os principais objetivos são: avaliar a influência de variáveis operacionais sobre os perfis de velocidades durante o escoamento de fluidos Newtonianos e não-Newtoniano, bem como a influência da vazão e rotação da coluna de perfuração na fluidodinâmica do escoamento sólido-líquido. Uma modelagem tridimensional é empregada, envolvendo os principais aspectos de uma seção anular excêntrica. O equacionamento segue a estratégia de volumes finitos com base nas equações de Navier-Stokes e modelagem multifásica Euler-Euler Granular.

Palavras chave: CFD, carreamento de sólidos, escoamento multifásico, anular excêntrico.

1. Introdução

O escoamento multifásico de fluidos em espaços anulares representa situações industriais comuns de amplo interesse na engenharia. O escoamento bifásico sólido-líquido é de grande importância na indústria do petróleo, principalmente, com respeito à perfuração e estimulação de poços de petróleo. Nestas atividades é frequente o uso de fluidos Newtoniano e não-Newtonianos como agentes carregadores de partículas sólidas, como por exemplo, o transporte de cascalhos resultantes da perfuração de poços.

Os custos com perfuração significam grande parte dos gastos na exploração de um campo de petróleo. Com a crescente demanda de combustíveis, estudos e novas tecnologias têm sido desenvolvidos para solucionar problemas encontrados durante a perfuração dos poços de petróleo, tornando esta atividade mais atrativa. Como abordado por Yu *et al.* (2007), a remoção de cascalhos do poço é um dos fatores mais significativos que afetam o custo, tempo e qualidade, nas operações de perfuração de poços de petróleo. Uma limpeza pobre pode resultar em problemas como o aprisionamento da coluna de perfuração, perda de circulação do fluido, perfuração lenta, alto torque e arraste, perda de controle na densidade, problemas durante a cimentação, etc.

Nas operações convencionais de perfuração, a remoção dos cascalhos ocorre devido à circulação do fluido de perfuração pelo interior da coluna de perfuração, passando pela broca e fazendo seu resfriamento e limpeza da frente da broca, lubrificando o sistema e carreando os sólidos à superfície. Assim, entender as variáveis que interferem na eficiência de limpeza em poços é extremamente importante para determinar a configuração mais eficaz para o processo de perfuração (Thomas, 2001).

Segundo Martins (1990), a formação de um leito de sólido, em operação de perfuração de poços horizontais, configura um cenário de grande dificuldade para a limpeza de poço.

Neste trabalho, utiliza-se a dinâmica de fluidos computacional, através do *software* ANSYS Fluent® para investigar a influência do regime de escoamento de sólidos em uma seção anular excêntrica de uma

porção horizontal do poço. Resolvendo computacionalmente as equações de conservação, analisa-se qualitativa e quantitativamente o escoamento sólido-líquido e a variação de parâmetros operacionais na limpeza de poço.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é modelar e aplicar as ferramentas numéricas para investigação do campo de escoamento no espaço anular excêntrico e sua influência no transporte das partículas sólidas. Com a análise da fluidodinâmica, investiga-se o carreamento de partículas pelo anular e a eficiência de limpeza, com respeito à variação dos parâmetros operacionais tais como: vazão, reologia dos fluidos e a rotação da coluna de perfuração.

2. Revisão bibliográfica

2.1 Modelos reológicos simplificados

Fox (2011) define fluido como uma substância que se deforma continuamente sobre a ação de uma tensão de cisalhamento e na ausência desta não haverá deformação. Os fluidos podem ser classificados, de modo geral, de acordo com a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação como Newtonianos e não Newtonianos.

A Tabela 1 fornece um quadro resumido sobre as equações de estados, parâmetros reológicos, para alguns modelos reológicos simplificados de fluido Newtonianos e não-Newtoniano, usado neste trabalho.

Tabela 1: Equações, parâmetros reológicos e modelos não-Newtonianos. Fonte: Machado (2002).

Modelo reológico simplificado	Equação	Parâmetros
Newton	$\tau = \mu\dot{\gamma}$	Viscosidade dinâmica absoluta
Herschell Buckley	$\tau = K(\dot{\gamma})^n + \tau_o$	K, n e τ_o

2.2 Eficiência de transporte de sólidos

Define-se razão de transporte como a razão entre a velocidade de remoção e a velocidade média de fluxo. Este parâmetro representa a eficiência do transporte de sólido em uma corrente fluida.

$$R_t = \left(\frac{\bar{v}_r}{\bar{v}}\right) = \left\{1 - \left(\frac{\bar{v}_s}{\bar{v}}\right)\right\} \quad (01)$$

sendo R_t a razão de transporte, \bar{v}_s a velocidade de afundamento das partículas e \bar{v} velocidade média de fluxo. De acordo com a Eq. (1), R_t aumenta quando aumentamos a velocidade média do escoamento. Sendo que os principais parâmetros que afetam a remoção de sólidos do poço são: vazão do fluido e propriedades reológicas do fluido; velocidade de sedimentação das partículas; tamanho, distribuição, geometria, orientação e concentração das partículas; densidade do fluido (Machado, 2002).

2.3 Velocidade de sedimentação ou de queda

Segundo Machado (2002), em decorrência à diferença de densidade, uma partícula sólida imersa em um fluido tende a sedimentar a uma velocidade constante, uma vez estabelecido o equilíbrio dinâmico conhecido por velocidade terminal de sedimentação. A velocidade de sedimentação de qualquer partícula depende de sua densidade, tamanho e geometria e das propriedades do fluido.

Para partículas esféricas, por exemplo, em um regime de escoamento laminar e fluido Newtoniano, apresenta-se a equação de Stokes.

$$v_s = \frac{D_p^2(\rho_s - \rho)g}{18\mu} \quad (02)$$

Analisando esta equação, podemos inferir que velocidade de afundamento da partícula é proporcional ao quadrado de seu diâmetro, a diferença de massa específica entre o fluido e a partícula e inversamente proporcional à viscosidade do fluido em que esta imersa.

2.4 Equações de conservação

Durante o carreamento do cascalho pelo fluido de perfuração, há conservação de massa e da quantidade de movimento. A seguir serão expostas a equação da continuidade e a equação da quantidade de movimento que serão de extrema importância para uso e entendimento de outros fenômenos envolvidos no escoamento multifásico líquido-sólido.

2.4.1 Equação da continuidade

Fluent (2013) apresenta a forma geral da equação de conservação de massa, ou equação da continuidade, como se segue:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (03)$$

Esta expressão é válida para fluxo compressível e incompressível, o termo S_m representa uma fonte de massa adicionada à fase contínua vinda da fase secundária dispersa (vaporização do líquido em bolhas) ou qualquer outra fonte que pode ser definida no modelo físico.

Para um fluido incompressível, $\rho = \text{constante}$, a Eq. (03) é reduzida à:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (04)$$

2.4.2 Equação da quantidade de movimento

A equação diferencial para quantidade de movimento é obtida aplicando a conservação do movimento à uma partícula fluida infinitesimal (Fox e McDonald, 2011). Assim a equação de conservação de *momentum* para um quadro de referência inercial e não acelerado é apresentado a baixo.

$$\frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (05)$$

onde p é a pressão termodinâmica local; $\bar{\tau}$ é o tensor de tensão (será descrito abaixo); $\rho \vec{g}$ e \vec{F} são as forças de corpo gravitacionais e as forças de corpo externas (que aumentam devido à interação com a fase dispersas). O termo \vec{F} pode estar relacionado com outros modelos de fonte tais como meio poroso ou fontes definidas de acordo com o problema (Fluent, 2013).

O tensor de stress $\bar{\tau}$ é dado por:

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (06)$$

onde μ é a viscosidade molecular, I é o tensor unitário e o segundo termo da direita representa o efeito da dilatação volumétrica.

2.5 Escoamento multifásico

Um fenômeno comum na natureza e na indústria é quando mais de uma fase escoam juntas, este tipo de fenômeno é chamado de escoamento multifásico e é geralmente dado pela relação de fluxo entre as fases sólidas, líquidas e gasosas, variando a comutação entre elas.

Santo (2011) salienta que no processo de modelagem de um sistema multifásico, é necessário levar em consideração a conservação das propriedades envolvidas, assim como contabilizar a interação entre elas. Para melhor modelar o escoamento multifásico, duas aproximações são apresentadas na literatura: a aproximação de Euler-Lagrange e a aproximação de Euler-Euler. Na realização deste trabalho a aproximação Euler-Euler é usada como parte da metodologia.

2.5.1 Abordagem Euler-Euler

Na aproximação Euler-Euler as fases são tratadas, independentemente de sua composição e características físicas, como fluidas e interpenetrantes, introduzindo desta forma o conceito de fração volumétrica, definida como uma função contínua no espaço e no tempo em que sua soma é igual a uma unidade. Assim, as equações de conservação, são aplicadas para ambas as fases e o fechamento destas obtidos por relações constitutivas e de informações empíricas (Fluent, 2013).

Para uma fase q , a equação da continuidade generalizada é escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_q, \quad (07)$$

onde \vec{v}_q é a velocidade da fase q , e \dot{m}_{pq} representa a transferência de massa entre da fase p^{th} para a fase q^{th} , e \dot{m}_{qp} representa a transferência da fase q^{th} para a fase p^{th} .

O termo α_q representa a fração volumétrica da fase q e S_q pode representar qualquer fonte de massa para cada fase.

A equação da quantidade de movimento para uma fase q é escrita na seguinte forma:

$$\frac{\partial (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = \alpha_q \nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}_q) + \alpha_q \rho_q \vec{g} - I_{p,q}, \quad (08)$$

onde $I_{p,q}$ representa a força de interação de transferência de quantidade de movimento de uma fase p para q , e $\bar{\tau}_q$ é o tensor de tensão para a fase q , e pode ser definido como segue:

$$\bar{\tau}_q = \alpha_q \mu_q \left(\nabla \vec{v}_q + \nabla \vec{v}_q^T \right) + \alpha_q \left(\lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q \right) \nabla \cdot \vec{v}_q \bar{I}, \quad (09)$$

onde μ_q e λ_q são a viscosidade cisalhante e volumétrica para a fase q , \bar{I} é a matriz unitária, e o segundo termo da direita representa a efeito da dilatação volumétrica. Os termos $\alpha_q \rho_q \vec{g}$ e \vec{F}_q são as forças de corpo gravitacionais e força de corpo externa devido a interação com a fase dispersa. Deve-se ressaltar que para cada fase acrescentada, um par de equações é acrescentado ao sistema.

2.6 Transferência da quantidade de movimento fluido-sólido

A transferência da quantidade de movimento entre a fase fluida e a fase sólida, também chamada de força de interação, é representada na Eq. (10) pelo termo $I_{p,q}$.

Johnson, Massoudi e Rajagopal (1990), realizaram revisão sobre os mecanismos de interações das fases no escoamento fluido-sólidos e identificaram sete diferentes mecanismos de interação. São eles: força de arrasto, flutuação, efeito da massa virtual, força de sustentação de Saffman, força de Magnus, força de Basset, força de Faxen e forças causadas pelas diferenças de temperatura e massa específica.

No presente trabalho, são considerados somente os efeitos de arrasto, ou seja, $I_{p,q}$, que é representado pela relação matemática:

$$I_{p,q} = \alpha_q \nabla \cdot P_s + \beta_{pl} (v_p - v_q). \quad (10)$$

Segundo Zinani *et al.* (2011) a força de arrasto é modelada em função do coeficiente da quantidade de movimento na interface, ou função de arrasto β_{pl} , e da velocidade relativa entre as fases. Correlações para β_{pl} podem ser formuladas a partir de correlações para a queda de pressão no escoamento de gás através de um leito empacotado, como a correlação de Ergun (1952), que dá origem à correlação de Ding e Gidaspow para β_{pl} (Ding e Gidaspow, 1990). Outro modo é a obtenção do modelo de arrasto a partir de correlações para a velocidade terminal em um leito fluidizado, expresso como função da fração de vazio e do número de Reynolds. Desse modo foi obtida a correlação de Syamlal e O'Brien (1993).

3. Metodologia

Para a solução do problema, é utilizada a metodologia da dinâmica de fluido computacional - CFD, a qual é composta por um conjunto de modelos matemáticos e métodos numéricos para solucionar as equações de conservação das grandezas físicas.

Para a realização deste estudo segue-se os passos da tradicional da simulação numérica, sendo eles: pré-processamento, processamento e pós-processamento.

Na etapa de pré-processamento, define-se a geometria como um sistema de tubos em arranjo anular horizontal com as seguintes dimensões: comprimento de 17,5 m, diâmetro externo de 0,1463 m, diâmetro interno de 0,0889 m e excentricidade de 0,54. Sendo a excentricidade definida com a diferença entre os diâmetros externos e internos pela distância entre os centros dos mesmos. O domínio foi definido por malha estruturada, que utiliza elementos que seguem um padrão definido para preencher o domínio segundo Yu *et al.* (2007). Para esta fase, a construção da geometria e geração da malha, Fig. 1, usa-se o *software* Gambit. A malha foi modelada e testada por Carvalho (2013) com 61600 elementos. O vetor gravidade está orientado na direção $-y$.

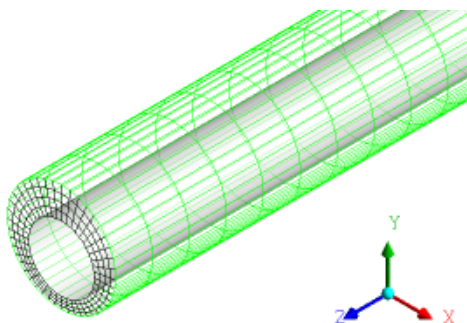


Figura 1: Geometria e malha.

São definidas as características reológicas do fluido, velocidade da rotação da coluna de perfuração, vazão volumétrica total e fração volumétrica da fase sólida (vazão de sólido pela vazão total), mantendo uma taxa de perfuração constante de 40 ft/h (YU *et al.*, 2007). Esta etapa foi realizada com *software* ANSYS Fluent®, onde as equações de conservação são resolvidas para a geometria 3D no espaço e no tempo, para o escoamento laminar, multifásico em regime transiente. Inicialmente para casos apresentados na Tabela 3.

Também do estudo experimental de Yu *et al.* (2007), o cascalho foi considerado perfeitamente esférico com diâmetro de 3 mm e massa específica de 2610 kg/cm³. O modelo de Syamlal e O'Brien (1993) é usado para modelar o arraste entre as fases e a vazão de sólido que entra no sistema é dada pelo quociente entre o produto da taxa de penetração e a área da broca pela massa específica da partícula.

Na fase de processamento, as equações de conservação e empíricas são resolvidas no espaço e no tempo de acordo, o simulador ANSYS Fluent®.

Na etapa de pós-processamento, os resultados obtidos na fase anterior, são avaliados com auxílio do CFD-Post®. Estuda-se os seguintes itens: Efeito da vazão volumétrica e da rotação da coluna de perfuração na limpeza do poço e da reologia do fluido de perfuração na limpeza de poço.

4. Resultados e discussões

Analisa-se nesta etapa o perfil de velocidade da fase fluida e variação da fração volumétrica em algumas seções transversais disposta ao longo do poço, esta análise é feita em seções perpendiculares ao anular onde o escoamento estaria desenvolvido. As características reologias dos fluidos simulados são apresentadas Tabela 2 e se assemelham aos usados nas operações de perfuração (Yu *et al.* 2007). Na Tabela 3 tem-se os parâmetros e condições de simulação.

O regime de escoamento é definido de acordo com as diferentes metodologias para fluido Newtoniano e não-Newtoniano. No caso do fluido Newtoniano, é calculado o Número de Reynolds, sendo a fronteira que delimita o regime de escoamento laminar em $Re = 2000$ (Fox *et. al.* 2011). Para o modelo reológico de Herschell Bulckley (não-Newtoniano) o número de Reynolds crítico é $Re_c = 2247$, obtido segundo a correlação de Slatter e Wasp (1976) *apud* Gomes (2012), sendo que para $n=1$, este modelo de se reduz ao de Bingham. Quando o fluido passa a ter um comportamento não-Newtoniano, o conceito de

número de Reynolds se mantém, contudo, a viscosidade dinâmica é substituída pela viscosidade equivalente apresentada por Fluent (2013) para o modelo de Herschell-Bulckley. Para o cálculo do Número de Reynolds, na configuração de anular excêntrico, usa-se o diâmetro equivalente proposto por Yu *et al.* (2007).

Tabela 2: Propriedades do fluido (Fonte: Yu *et al.* 2007).

Modelo	Densidade, kg/m ³	Viscosidade absoluta, Pa.s	n -	k , kg.s ^{(n-2)/m}	τ_0 , Pa	Γ , 1/s
Newtoniano	996,24	0,48	-	-	0	-
Herschell-Buckley	996,24	-	1	0,01	9,57	40

Tabela 3: Parâmetros e condições de simulação.

Caso	Vazã, gpm	Rotação, rpm	Fração de sólido, %	Tempo de simulação, s	Re, -	LE, m	Modelo reológico
1	150	0	0,00598	60	84,9	4,9	Herschell-Buckley
2	150	80	0,00598	60	84,9	4,9	Herschell-Buckley
3	200	0	0,00449	45	113,3	6,5	Herschell-Buckley
4	200	80	0,00449	45	113,3	6,5	Herschell-Buckley
5	200	80	0	45	113,3	-	Newtoniano
6	200	80	0	45	113,3	6,5	Herschell-Buckley

Define-se comprimento de entrada, LE, como o comprimento necessário para desenvolver o escoamento, a partir deste numa tubulação, a partir deste valor o perfil de escoamento da fase contínua não varia, permitindo a análise do problema. Langhaar (1942) *apud* Pereira (2006) e Durst *et al.* (2005) *apud* Barbosa (2012) apresentam correlações para a determinação do comprimento de entrada no escoamento de fluidos Newtonianos e não-Newtonianos respectivamente. Assim as análises serão feitas considerando seções localizada em posições à jusante do comprimento de entrada.

É importante salienta que o caso de rotação 0 rpm não é operacional, visto que a rotação é fundamental para a alimentação de sólidos no sistema.

4.1 Influências da reologia

As Figs. 2 e 3 representam respectivamente os Casos 5 e 6 da Tabela 3. Com elas é possível comparar os perfis de velocidade para um escoamento monofásico em uma seção transversal à 15 m da entrada do sistema. A partir destes resultados é possível observar que usando fluido não-Newtoniano (Fig. 3), o perfil de escoamento da fase fluida é mais homogêneo formando menos regiões isoladas de altas velocidades, quando comparado como o caso com fluido Newtoniano (Fig. 2). Isso mostra, para este caso, que a remoção de sólidos na limpeza de poço seria mais eficiente quando utilizado fluido de reologia não-Newtoniana pois o perfil de velocidade de escoamento é mais homogêneo.

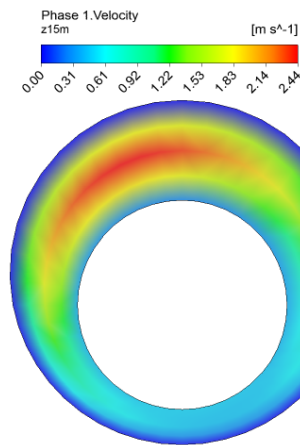


Figura 2: Caso 5 (Tabela 3).

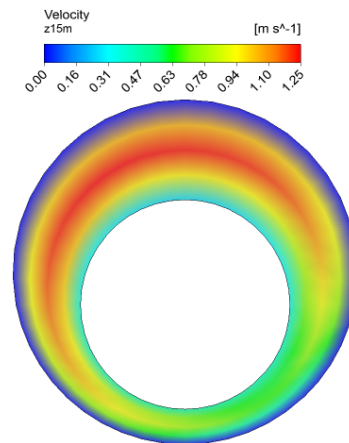


Figura 3: Caso 6 (Tabela 3).

4.3 Influência da vazão e da rotação na eficiência de limpeza do poço

O comportamento gráfico da Fig. 4a permite a observação comparativa das simulações referentes aos Casos 1, 2, 3 e 4 apresentados na Tabela 3. Esta figura mostra o desenvolvimento do escoamento da fase fluida na parte inferior da seção anular. Com ele concluímos que acima de 10 m no comprimento da tubulação o perfil de escoamento é aproximadamente constante. Então escolhemos para análise as seções verticais localizadas a 10, 12, 14 e 16 m.

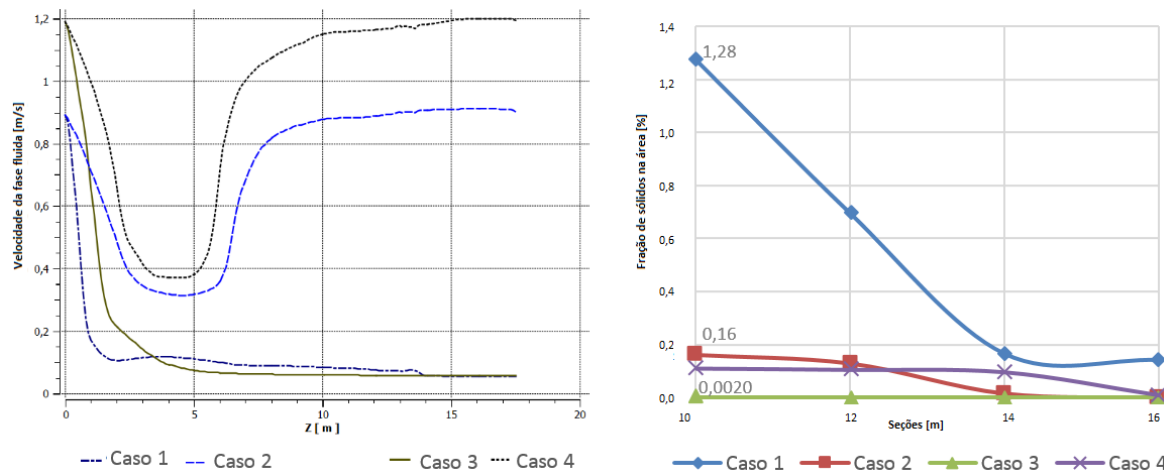


Figura 4: Análise dos perfis de velocidade: A) velocidade da fase fluida nos casos 1 a 4 (Tabela 3) na parte inferior do anular para o comprimento do poço; B) Fração de sólidos nas seções verticais 10, 12, 14 e 16 m, para os casos de 1 a 4 (Tabela 3).

Observa-se pela análise dos perfis de velocidade, Fig. 4a, referentes aos resultados dos Casos 1 e 2, que a variável rotação da coluna de perfuração é um fator muito importante no aumento da velocidade na região inferior do anular. A introdução da rotação na coluna de perfuração faz com que a velocidade do escoamento na parte inferior do anular aumente aproximadamente em 9 vezes, comparando com o caso sem rotação. Este comportamento também é observado na análise do Caso 1 e 2 para a Fig. 4b, onde para na seção à 10 m a introdução da rotação da coluna diminui 8 vezes fração volumétrica de sólido média.

Realizando a mesma análise, contudo para o Casos 1 e 3 da Fig. 4b, observa-se que a vazão é a variável de maior efeito na diminuição da fração de sólidos na seção, quando comparado com o Caso 1 e 2 (influência da rotação). Analisando o Casos 3 e 4, observa-se uma tendência inversa. Ou seja, a variável rotação, para grandes vazões não interfere como para os Casos 1 e 3.

Na Fig. 5, analisa-se o problema do ponto de vista do perfil de velocidade no anular na seção à 10 m da entrada. Nestes casos que a influência da rotação atua de forma complementar à vazão, aumentando a velocidade média no anular (Caso 1 e 3). Assim, remove por meio do arraste as partículas que se depositariam na parte inferior do anular e introduzindo-as na parte superior do mesmo, onde a velocidade de fluxo é maior, permitindo o carreamento e aumentando a eficiência de limpeza do poço.

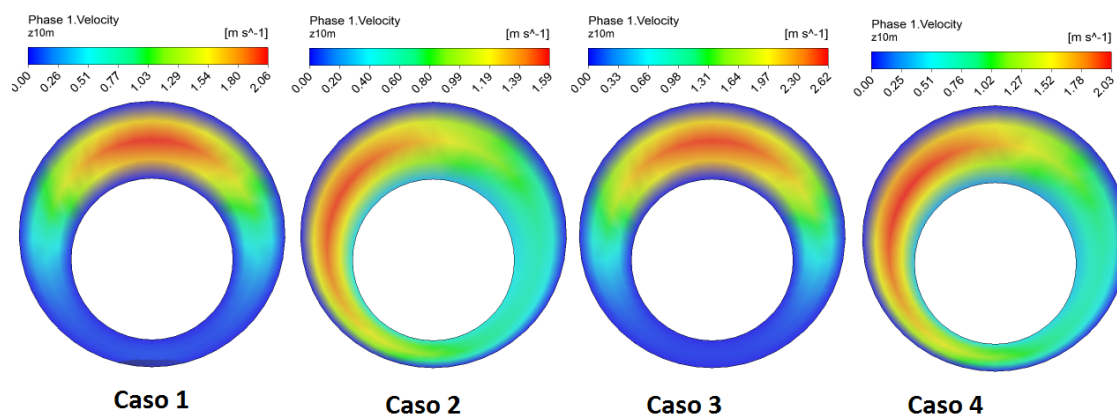


Figura 5: Perfis de velocidade no anular a 10 m da entrada para os casos 1 a 4 (Tabela 3).

5. Considerações finais

Foram realizadas simulações numéricas de um escoamento bifásico sólido líquido no anular excêntrico de uma coluna de perfuração. A geometria, parâmetros operacionais, e propriedade do sólido e do fluido foram obtidos no trabalho experimental de Yu *et al.* (2007).

Os resultados numéricos para avaliar o efeito vazão volumétrica e rotação da coluna de perfuração na limpeza do poço foram obtidos pelo simulador ANSYS Fluent®, a abordagem Euler-Euler é usada para modelar o escoamento multifásico sólido-líquido e o cálculo do número de Reynolds determinou que o escoamento está em regime laminar.

Observa-se, que a vazão volumétrica aparenta maior influência no aumento da eficiência de limpeza do poço quando comparada à velocidade de rotação da coluna de perfuração, pois esta atua de forma complementar a aquela. Outro fator observado é que o comportamento não-Newtoniano do fluido de perfuração auxilia na distribuição do escoamento em toda a seção transversal do anular, tornando mais homogêneo os perfis de escoamentos permitindo a remoção dos sólidos que se depositam em leitos na parte de inferior do anular em poços horizontais.

Referências bibliográficas

- Barbosa, R. M. S. Estudo numérico do comprimento de entrada para escoamentos de fluidos newtonianos e viscoelásticos entre placas paralelas. Relatório do Projeto Final / Dissertação do MIEM, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Janeiro, 2012.
- Benzarti, S.; Mhiri, H.; Bournot, H. *Drag models for simulation gas-solid flow in the bubbling fluidized bed of FCC particles*. Engineering and Technology [Book]. Vol. 61 : pp. 1138 – 1143, 2012.
- Carvalho, M. Modelagem e simulação de escoamento de fluido de perfuração com cascalho em regiões anular a partir de técnicas computacionais. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Espírito Santo / Ceunes, Engenharia Química. São Mateus, 2013.
- Fox, R. W.; Pritchard, P. J.; McDonald, A. T. Introdução à mecânica dos fluidos. 7.ed. Rio de Janeiro. LTC, 2011.
- Fluent 14.0. *Fluent TheoryGuide*, 2013.
- Gomes, A. G. Dimensionamento de mineroduto. Projeto de Graduação, Universidade Federal De Minas Gerais, Ceermin, Julho 2012.
- Johnson, G.; Massoudi, M.; Rajagopal, K.R. *A Review of Interaction Mechanisms in Fluid-Solid Flows*. DOE/PETC/TR-90/9, NTIS/DE91000941. National Technical Information Service, Springfield, VA, 1990.
- Yu, M.; Takach E. N.; Nakamura D. R.; Shariff, M. M. *An Experimental Study of Hole Cleaning Under Simulated Downhole Conditions*. SPE 109840. 2007.
- Machado, J. C. V. Reologia e Escoamento de Fluido. Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2002.

Martins, A. L. Modelagem e simulação do escoamento axial anular de mistura sólido-fluido não-newtoniano em dutos horizontais e inclinados. 1990. 122 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Petróleo) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1990.

Pereira, F. A. R. Escoamento laminar de líquidos não-Newtonianos em seções anulares: estudo de CFD e abordagem experimental. 225 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

Santos, D. A. Contribuições ao estudo da Fluidodinâmica em Leito de Jorro - Estudo Experimentais e de Simulação Vias CFD. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

Syamlal, M.; Rogers, W., O'Brien, T. J. *MFIX documentation: theory guide*. Technical Note DOE/METC-94/1004, DE94000087, U.S. Department of Energy, Morgantown, West Virginia, 1993.

Thomas, J. E. Fundamento de Engenharia de Petróleo. 1 ed, Editora Interciência, Rio de Janeiro, PETROBRAS, 2001

Williams, C. E.; Bruce, G. H. *Carrying Capacity of Drilling Muds*, AIME, v.192, 1951.

Wells, J. Effects of turbulence modeling on RANS simulations of tip vortices. 108 f. Dissertação (Mestrado). Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 2009.

Zinani, F.; Conceição, P.; Philippsen, C. G.; Indusiak, M. L. S. Estudo do Desempenho de Correlações de Arrasto Sólido-Gás na Simulação Numérica de um Leito Fluidizado Borbulhante. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2011.