

6º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Simulação Numérica de Escoamentos Simplificados, com Oscilação Forçada, Presentes em Engenharia de Perfuração

AUTORES:

Jonatas Emmanuel Borges, Elie Luis Martinez Padilla ¹, André Leibsohn Martins ², Aristeu da Silveira Neto ¹

INSTITUIÇÃO:

¹ Universidade Federal de Uberlândia, ² CENPES-PETROBRAS

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ESCOAMENTOS SIMPLIFICADOS, COM OSCILAÇÃO FORÇADA, PRESENTES EM ENGENHARIA DE PERFURAÇÃO

Abstract

Numerical solutions of simplified drilling processes flows in oil and gas industry, on effects of forced oscillation, are presented. This is the result of applications of in house numerical code developed on the base of solution of the Navier Stokes equations for incompressible and Newtonian fluids. Are analyzed several characteristics of the flow in concentric and eccentric configurations, that support the process of validation, of Taylor-Couette flow with variable eccentricity and Taylor-Couette spiral flow.

Introdução

Tradicionalmente, as experiências em campo ou laboratório foram as principais fontes de solução de muitos problemas, porém, nas últimas décadas, os importantes avanços tecnológicos e metodológicos permitiram que a chamada “experimentação numérica” seja uma alternativa confiável (Ferziger e Peric, 1999; Piomelli e Balaras, 2002) para estudar problemas de forma a complementar os estudos experimentais ou como única opção disponível. Nesse contexto, as ferramentas numéricas têm sido também uma boa alternativa na indústria de petróleo e gás nas diversas áreas, como por exemplo, na área de perfuração em águas profundas e ultra-profundas.

O processo de perfuração em águas profundas tem uma série de problemas associados que tornam o escoamento de fluido complexo, com características particulares que dificultam sua análise e compreensão. Entre essas, pode-se destacar a presença de partículas sólidas, a variação da viscosidade molecular do fluido, os efeitos de movimentação e vibração da coluna sobre os escoamentos interno e no espaço anular e o regime instável. Para efeitos de elaborar uma plataforma numérica que possibilite o estudo deste tipo de problemas, foi escolhida uma metodologia que contemple a representação de estruturas móveis rígidas e deformáveis interagindo com escoamentos instáveis. Assim, o método de fronteira imersa MFI (Peskin, 1997) foi considerado devido ao seu potencial de lidar com interfaces móveis.

Os desenvolvimentos de elaboração da referida plataforma numérica, na atualidade, encontram-se na terceira etapa, orientada a estender suas capacidades para aplicações em escoamentos com oscilação forçada e interação fluido estrutura. Na primeira etapa, foi elaborado um código numérico que resolve as equações de Navier-Stokes para fluidos newtonianos, isotérmicos e monofásicos usando a metodologia de simulação de grandes escalas SGE (Smagorinsky, 1963), para o tratamento de escoamentos em transição à turbulência e turbulentos, assim como, empregando o MFI com modelo físico virtual MFV (Lima e Silva et al., 2003). Os trabalhos de Padilla e Silveira Neto (2005), Padilla et al., 2006 e Padilla et al., 2007 reportam o processo de validação da plataforma numérica e de aplicações em problemas simplificados relacionados a engenharia de perfuração, como por exemplo, o escoamento Taylor-Couette e o Taylor-Couette espiral. Na segunda etapa, novos desenvolvimentos metodológicos e implementações permitiram aprimorar o MFI, sendo possível a realização de aplicações em escoamentos não newtonianos, como apresentado em Padilla et al. (2009).

No presente trabalho apresentam-se aplicações em problemas simplificados presentes em sistemas de perfuração sobre os efeitos de movimentos de rotação e translação e oscilação forçada.

Metodologia

O modelo matemático, que representa a base da plataforma numérica, é composto pelas equações de Navier-Stokes, que representam a dinâmica dos escoamentos sobre as hipóteses simplificadoras de incompressíveis e isotérmicos. Tais equações (conservação da massa e de balanço da quantidade de movimento) para fluido newtoniano generalizado (Bird et al., 2002), ou seja, que representam escoamentos newtonianos e não newtonianos, tomam a forma:

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u}\vec{u}) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla \cdot [\eta(\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T)] + \frac{\vec{f}}{\rho}, \quad (2)$$

sendo que, os campos de velocidade, pressão e de força são expressos por u , p e f . As propriedades do fluido, massa específica e viscosidade aparente são representadas por ρ e η , sendo que nas aplicações deste trabalho η é igual à viscosidade cinemática. O termo de força adicional da eq. (2), próprio do MFI, representa a interface sólida imersa no escoamento, sendo esta equivalente à força que o fluido exerce sobre a interface. Evidentemente essa interface é virtual e deve representar as condições de contorno físicas para um corpo sólido estático ou em movimento, ou seja, condições de impenetrabilidade, deslizamento ou não deslizamento.

Segundo a MFI, o campo do escoamento é resolvido em um domínio euleriano e a representação da estrutura é resolvida em um domínio lagrangeano, sendo que o acoplamento de ambos os campos é realizada por meio do termo de força f da Eq. (2), obtido como resultado da distribuição do campo de força lagrangeano, como explicitado em Campregher (2005) e Padilla et al. (2007b). O campo de força lagrangiana é avaliado usando o MFV (Lima e Silva et al., 2003).

Quanto à metodologia numérica, é usado o método dos volumes finitos (Patankar, 1980), em coordenadas cartesianas, para discretizar as equações, com segunda ordem de aproximação no tempo e no espaço; para maiores detalhes ver Padilla et al. (2006).

Problemas Físicos

Trata-se de variações do escoamento Taylor-Couette (Taylor, 1932), presentes em espaços anulares formados por dutos concêntricos ou excêntricos com rotação imposta, caracterizado pela presença de vórtices contra-rotativos (vórtices de Taylor). No escoamento Taylor-Couette com excentricidade variável impõe-se um movimento de translação circular no duto interno, centrado no eixo central do duto externo. Por outro lado, o escoamento Taylor-Couette espiral a imposição é de velocidade axial sobre a superfície do duto interno.

A configuração geométrica associada aos problemas é definida pelo espaço anular entre as superfícies de raios R_i , R_o e comprimento axial L_a . A superfície interna tem velocidade de rotação ω e, na configuração excêntrica, aparece o raio de excentricidade R_{ex} e a velocidade de rotação excêntrica ω_{ex} . O parâmetro adimensional governante deste problema, número de Taylor, é definido como $Ta = \omega R_i (R_o - R_i) / \eta$.

Resultados e Discussões

Os parâmetros geométricos são definidos como $R_o = 0,4m$, $R_i = 0,125$, $C_c = 0,4m$ e $R_{exc} = 0,1m$. Esses valores determinam uma excentricidade de $\varepsilon = 0,36$. Inicialmente, o centro do canal interno

encontra-se na posição $0,6\text{m} \times 0,5\text{m} \times 0,3\text{m}$ e realiza um movimento cíclico em torno do centro $0,5\text{m} \times 0,5\text{m} \times 0,3\text{m}$ de 2π por segundo. O movimento de rotação-oscilação é imposto através da velocidade tangencial $v_{\tan} = \omega R_i = A \sin(2\pi f_c t) R_i$, onde A é a amplitude de oscilação, f_c é a frequência de oscilação do cilindro que é imposta e t o tempo; definidos como $A = \omega/100$, e três frequências, (a) $f_c = 0,463\text{s}^{-1}$, (b) $f_c = 0,923\text{s}^{-1}$ e (c) $f_c = 1,389\text{s}^{-1}$, segundo procedimento de He et al. (2000). O número de Taylor foi mantido constante no valor de 100.

O escoamento Taylor–Couette com movimento de translação e oscilação forçada do duto interno atinge estado estacionário a partir dos 20 s, aproximadamente, como observado na Fig. 1(a). Nessa figura, que apresenta o sinal da velocidade horizontal no centro do espaço anular (em $z = 0,3\text{ m}$), observa-se também claramente a frequência do movimento excêntrico imposta sobre o duto interno. O efeito da oscilação sobre o sinal de velocidade, diferente do mesmo problema sem oscilação (caso d), tornou as amplitudes dos sinais oscilantes, fato não vidente na Fig. 1(a) devido à sobreposição dos sinais e à pequena magnitude do diferencial das amplitudes. Com o intuito de explicitar esses efeitos, foram extraídos os valores das amplitudes dos sinais e gerados, por interpolação, as tendências de oscilação para as diversas frequências, Fig. 1(b). O caso de menor frequência, caso (a), apresenta maior amplitude, no intervalo de tempo avaliado, contudo nos extremos do intervalo torna-se menor que para os outros casos.

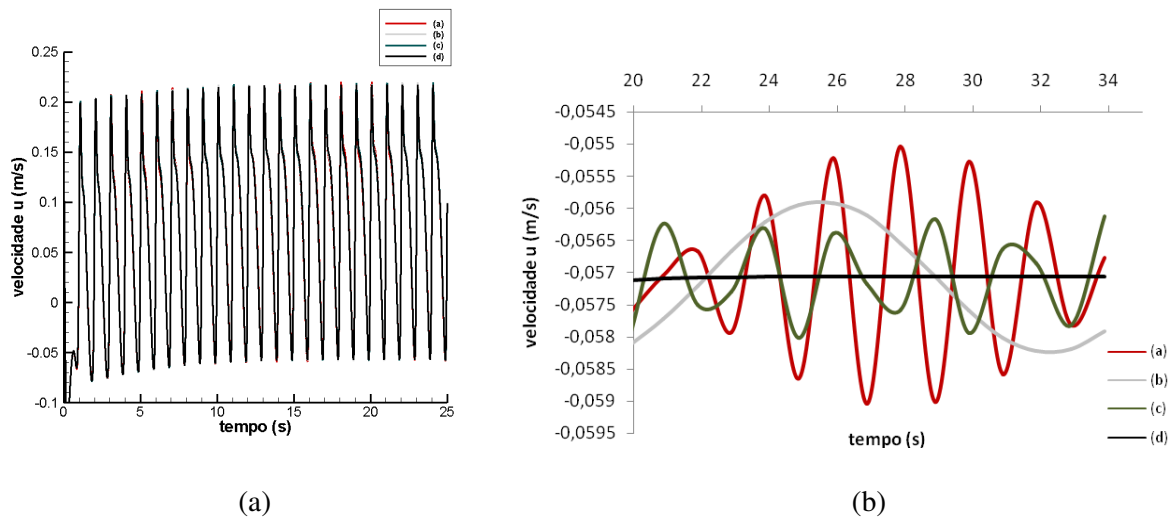


Figura 2. Escoamento Taylor-Couette com excentricidade variável; (a) distribuição temporal da componente horizontal da velocidade, (b) comportamento padrão das amplitudes do sinal de u .

Quando comparadas as estruturas contra-rotativas, que se deformam conforme o duto interno realiza o movimento de translação imposto, verifica-se que a topologia não é alterada, possivelmente devido à ordem de grandeza da amplitude da oscilação imposta. Localmente, comprova-se que os campos de velocidade se intensificam periodicamente, muito levemente, em concordância com a ordem de grandeza e feitos observados na Fig. (1).

No escoamento Taylor-Couette espiral, resolvido para três valores de número de Reynolds $Re_w = w(R_o - R_i)/\eta = 10, 17$ e 25 , que é uma composição dos escoamentos devido à rotação e deslocamento do duto interno, existe a presença de dois tipos de estruturas, os vórtices de Taylor e estruturas espiraladas (ao longo do comprimento do duto interno). Na Fig. 2 visualizam-se tais estruturas por meio do campo de vetores velocidade, sobre planos y, z em $x = 0,5$, em instantes com intervalo de $0,5\text{ s}$. À medida que o Re_w é incrementado o escoamento axial, passa a ser dominante e mais intenso, como consequência, um dos vórtices do par contra-rotativo é extinto, como acontece

para $Re_w = 25$. Outro detalhe observado é que, os vórtices de Taylor são transportados pela estrutura espiralada, com frequências maiores à medida que o Re_w aumenta. O padrão dos escoamentos preditos concorda com os resultados experimentais e numéricos de Wereley e Lueptow (1999) e Hwang e Yang (2004), respectivamente.

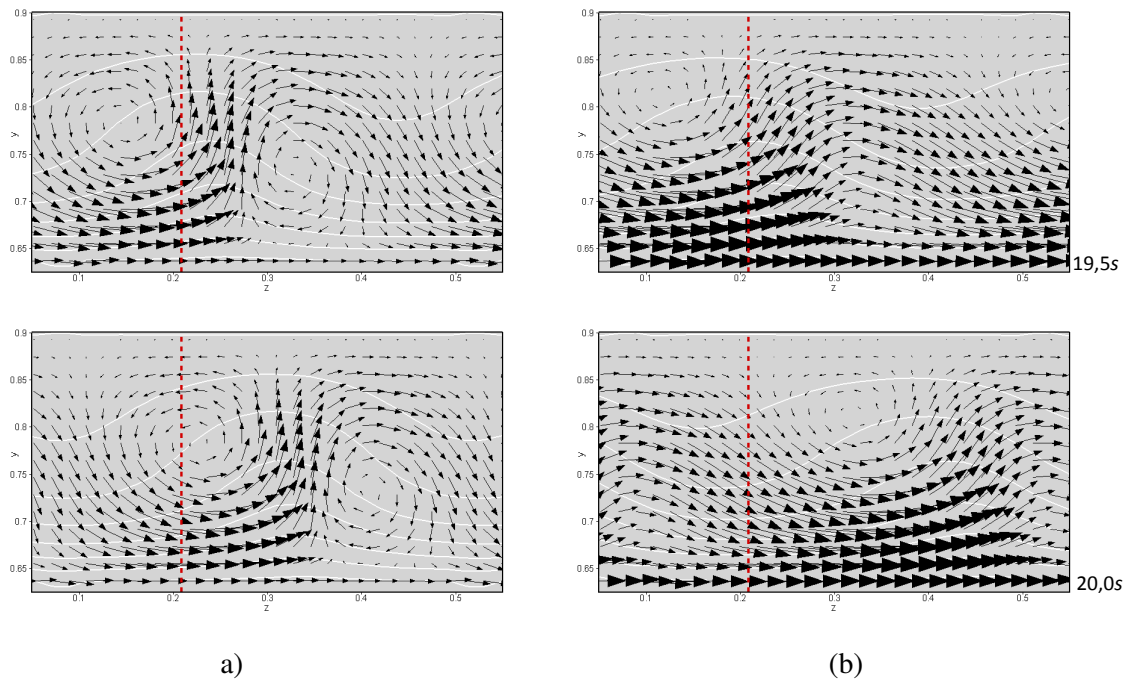


Figura 2. Escoamento Taylor-Couette espiral, dinâmica dos vórtices de Taylor explicitado com o campo de vetores velocidade; (a) $Re_w = 10$, (b) $Re_w = 25$.

No escoamento Taylor-Couette, a oscilação forçada é imposta sobre a velocidade axial mantendo o critério anterior (1% de w) e o número de Reynolds é mantido fixo em 17, correspondendo um valor de $w = 0,6182 \text{ m/s}$. As frequências de oscilação são as mesmas aplicadas nos itens anteriores. Com o auxílio da sonda temporal posicionada entre os cilindros numa posição intermediária do domínio, é possível avaliar a dinâmica do escoamento através da distribuição temporal das componentes da velocidade. As amplitudes no local da sonda são maiores à medida que f_c decresce para as componentes de velocidades u . As amplitudes de oscilação da velocidade u (Fig. 3b) são de aproximadamente 0,11, 0,05 e 0,03% do valor do caso (d) para as frequências (a), (b) e (c), respectivamente. Já as amplitudes de oscilação da velocidade v são de aproximadamente 0,087, 0,034 e 0,010% do valor do caso (d) para as frequências (a), (b) e (c), respectivamente. Para as amplitudes de oscilação da velocidade w são de aproximadamente 1,16, 0,12 e 0,43% do valor do caso (d) para as frequências (a), (b) e (c), respectivamente.

Na componente de velocidade w é verificado que as amplitudes não seguem o padrão observado para as componentes u e v , ou seja, não é evidenciado que amplitudes no local da sonda são maiores à medida que f_c decresce, uma vez que a resposta da frequência $f_c = 0,923 \text{ s}^{-1}$ apresentou valor menor que a maior frequência imposta $f_c = 1,389 \text{ s}^{-1}$ (Fig. 12). Comparando todas as respostas das componentes de velocidade no tempo que a sonda apresentou, os valores das amplitudes das componentes são menores que os 1% da velocidade imposta da componente axial do duto interno. Ainda, analisando-se os vórtices de Taylor através do vetor velocidade para o instante 20 segundos,

verifica-se que os centros das estruturas não são modificados com a imposição da velocidade axial no duto interno.

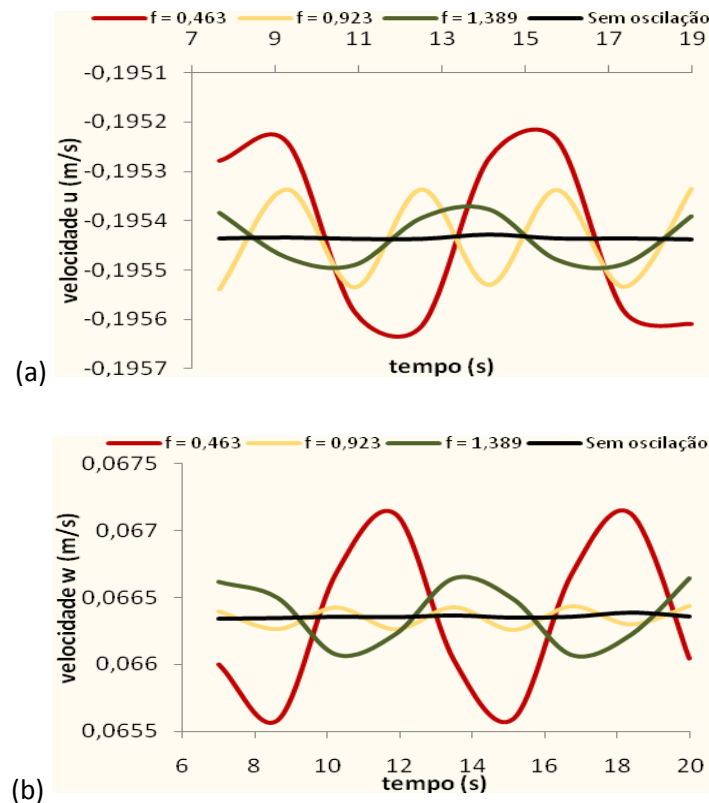


Figura 3. Escoamento Taylor-Couette espiral com oscilação forçada, comportamento padrão da amplitude máxima dos sinais de velocidade, $Re_w = 17$; (a) componente horizontal, (b) componente axial.

Conclusões

Resultados de simulações tridimensionais de escoamentos newtonianos em espaços anulares com efeitos de rotação, translação e oscilação forçada foram apresentados. Tais realizações foram executadas pela necessidade de aproximar melhor as aplicações aos problemas presentes em engenharia de perfuração. A metodologia empregada responde de maneira adequada à complicação de estruturas em movimento e com imposição de forças oscilatórias. Os efeitos da oscilação forçada alteram os campos de velocidade do escoamento, os quais se intensificam localmente com valores inferiores a 1% da velocidade imposta sobre a superfície do duto interno. Ressalta-se que não foi possível a validação quantitativa dos problemas por inexistência de dados na literatura.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais e ao Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo M. de Mello pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

- BIRD, R. B., STEWART, W. E. E LIGHTFOOT, E. N. Transport Phenomena, Ed. Jhon Wiley & Sons Inc., New York, USA, 2002.
- FOX, R. W., E MCDONALD, A. T. Introdução à Mecânica dos Fluidos. Ed. Guanabara, Rio de Janeiro, Brasil, 1985.

- KUPFERMAN, R. A Numerical Study of the Axisymmetric Couette-Taylor Problem Using a Fast Hig-Resolution Second-Order Central Scheme. **SIAM J. Sci. Comput.**, vol. 20, pp. 858-877, 1998
- LIMA E SILVA, A.L.F., SILVEIRA-NETO, A., DAMACENO, J.J.R. Numerical Simulation of Two Dimensional Flow over a Circular Cylinder Using the Immersed Boundary Method. **J. Comput. Physics**, 189, pp. 351-370, 2003.
- LOUREIRO, V. B. Escoamento Secundário em um Anular Parcialmente Obstruído com Rotação do Cilindro Interno, Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2004.
- PADILLA, E. L. M., MARTINS, A. L., SILVEIRA NETO, A. Large-Eddy Simulation of the Three-Dimensional Unstable Flow in a Lid-Driven Cavity. **18th International Congress of Mechanical Engineering**, Ouro Preto, COBEM, p.1-8, 2005.
- PADILLA, E. L. M. E SILVEIRA NETO A., 2006, Aplicações de Simulação Numérica para Análise de Escoamentos Transicionais em Canais Cilíndrico Anulares com Excêntricidade Variável, Relatório Técnico Final, UFU/FAPEMIG, p. 1-35.
- PADILLA, E. L. M., MARTINS, A. L., SILVEIRA NETO, A. Aplicação do Método de Fronteira Imersa à Tecnologia de Perfuração em Aguas Profundas. **Encontro Nacional de Hidráulica de Perfuração e Completação de Poços de Petróleo e Gás**, Vitória-Pedra Azul, ENAHPE 2006. p.1-7, 2006.
- PADILLA, E. L. M., MARTINS, A. L., SILVEIRA NETO, A. Escoamentos Anulares com Excentricidade Variável: Resultados Preliminares. **II Encontro Nacional de Hidráulica de Poços**, Teresópolis, ENAHP, p.1-6, 2007a.
- PADILLA, E. L. M., MARTINS, A. L., SILVEIRA NETO, A. Experimentação Numérica sobre Escoamentos em Canais Anulares. **4 Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, Campinas**, 4 PDPETRO. v.1. p.1-10, 2007.
- PATANKAR, S.V. Numerical Heat transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1980.
- PESKIN, C.S. Numerical Analysis of Blood Flow in the Heart. **Journal of Comp. Physics**, 25, pp. 220-252, 1977.
- SMAGORINSKY, J. Genenral Circulation Experiments with Primitive Equations. **Montly Weather Rev.**, 91, pp. 216-241, 1963.
- STONE, H. L. Iterative Solution of Implicit Approximations of Multidimensional Partial Differential Equations. **SIAMJ Numer. Anal.**, vol. 5, pp. 530-558, 1968.
- WERELEY, S. T. AND LUEPTOW, R. M. Velocity Field for Taylor-Couette Flow with an Axial Flow. **Phys. Fluids**, 11(2), pp. 3637-3649, 1999.