

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Implementação de Modelos para Escoamentos não Newtonianos em Canais Anulares Concêntrico-Excêntricos

AUTORES:

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

INSTITUIÇÃO:

¹ Universidade Federal de Uberlândia, ² CENPES-PETROBRAS

IMPLEMENTAÇÃO DE MODELOS PARA ESCOAMENTOS NÃO-NEWTONIANOS EM CANAIS ANULARES CONCÊNTRICO-EXCÊNTRICOS

Abstract

Results of applications of models for non-Newtonian fluid for the three-dimensional annular flow, Taylor-Couette, are presented. The power-law and Carreau-Yasuda models are implemented in a numerical code base, developed using conventional methods and the immersed boundary method, which enables the analysis of flow in annular-cylindrical configurations. Are analyzed several characteristics of the flow in concentric and eccentric configurations that support the process of validation.

Introdução

Nas últimas décadas, a importância da exploração e exploração de petróleo e gás em águas profundas e ultraprofundas tem aumentado significativamente (www.petrobras.com.br) e como consequência, as necessidades que sustentem esse desafio tecnológico também aumentaram. Especificamente, na área de engenharia de perfuração, o emprego de novas técnicas de perfuração e completação e o aumento na profundidade de água normalmente elevam os riscos, nesse contexto, diversos projetos estão sendo desenvolvidos, no CENPES e em parceria com diversas instituições e empresas, visando perfurar e produzir de forma segura em cenários de águas ultraprofundas. Assim, foi iniciado um projeto de desenvolvimento de uma ferramenta numérica para análise de escoamentos transicionais no interior de canais cilíndrico-anulares.

Os problemas associados à tecnologia de perfuração em águas profundas têm uma série de características particulares (propriedades variáveis do fluido, superposição de escoamentos e interação fluido-estrutura) que dificultam sua análise e compreensão, nesse sentido, surge a necessidade de iniciar os desenvolvimentos para constituir uma plataforma numérica específica que permita a análise deste tipo de problemas. Uma primeira etapa foi concluída (Padilla e Silveira Neto, 2006; Padilla e Silveira Neto, 2007), na qual foi desenvolvido um código numérico tridimensional para análise de escoamentos 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, acoplada com a metodologia de fronteira imersa MFI (Peskin, 1997), que permite modelar e tratar numericamente a presença de corpos imersos estáticos e em movimento. Inicialmente, foi validado o código numérico de base (Padilla e Silveira Neto, 2005; Padilla et al., 2005), em coordenadas cartesianas e sem MFI, e a continuação foram realizadas aplicações para escoamentos simplificados com e sem interface móvel, entre eles Taylor-Couette e Taylor-Couette espiral (Padilla et al., 2006; Padilla et al., 2007a; Padilla et al., 2007b).

O presente trabalho trata sobre novas implementações, testes preliminares e validação qualitativa realizadas com a finalidade de incrementar a funcionalidade de uma ferramenta computacional em desenvolvimento, sendo uma de suas características a aplicação de metodologias numéricas convencionais combinadas com técnicas relativamente novas (como o caso do método de fronteira imersa), no sentido de que elas, nos últimos anos, têm sido constantemente aprimoradas para diversificar seu campo de aplicação. Dando sequência aos desenvolvimentos, nesta segunda etapa,

novas implementações foram realizadas com a finalidade de possibilitar a análise de escoamentos não newtonianos.

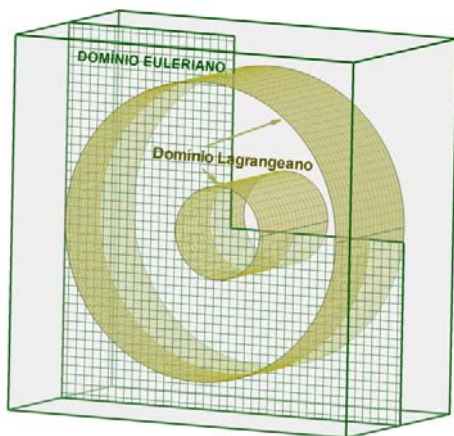
Metodologia

A metodologia de fronteira imersa MFI (Peskin, 1988) é considerada para a representação do problema em questão. Os desenvolvimentos precedentes (Padilla et al., 2006; Padilla et al., 2007a) representam a dinâmica dos escoamentos newtonianos, isotérmicos e incompressíveis, através das equações da conservação da massa e de balanço da quantidade de movimento. Na presente abordagem, a segunda das equações passa a ser modificada, no sentido de serem representativas de escoamentos newtonianos e não newtonianos, assim, as equações para fluido newtoniano generalizado (Bird et al., 2002) são expressas como:

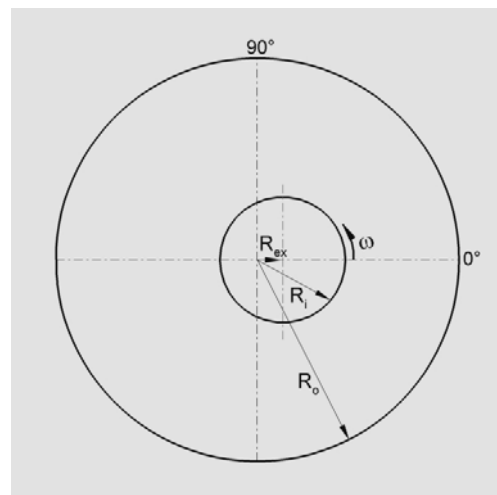
$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

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

$\mathbf{u}$ e p representam os campos da velocidade e pressão, ρ é a densidade do fluido e η é a viscosidade do fluido, que não é mais uma constante, denominada de função viscosidade ou viscosidade aparente, e $\mathbf{f}$ é o campo de força euleriano. O termo de força adicional da eq. (2), próprio do método de fronteira imersa, 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 (ver fig. 1) e a representação da interface resolvida em um domínio lagrangeano, sendo que o acoplamento dos domínios se dá por meio do campo de força $\mathbf{f}$ (Campregher, 2005; Padilla et al., 2007b). O campo de força euleriana $\mathbf{f}$ é obtido através de um processo de distribuição da força lagrangiana, sendo esta avaliada usando o modelo físico virtual (Lima e Silva et al., 2003).



(a)



(b)

Figura 1. Representação esquemática; (a) dos domínios considerados no método de fronteira imersa, (b) canais com excentricidade.

A função viscosidade, que depende da taxa de deformação, deve ser modelado para fechar o sistema de equações representativos do problema. Assim, os modelos power-law e Carreau-Yasuda

são usados. O primeiro dos modelos (Ostwald, 1923) avalia a viscosidade com a expressão $\eta = k S^{n-1}$, onde k é o índice de consistência e n é o índice de comportamento ou expoente power-law. No modelo Carreau-Yasuda (Yasuda, 1979) a expressão depende de mais parâmetros predefinidos, $\eta - \eta_{\infty} / (\eta_0 - \eta_{\infty}) = [1 + (\lambda S)^a]^{(n-1)/a}$, onde $\eta_{0,\infty}$ é a viscosidade a taxa de cisalhamento nula e muito alta, respectivamente, λ é tempo (constante) e a é o parâmetro adimensional que descreve a transição entre a região com taxa de deformação nula e a região power-law.

Quanto à metodologia numérica, é usado o método dos volumes finitos (Patankar, 1980) para discretizar as equações governantes, com segunda ordem de aproximação, para maiores detalhes ver Padilla et al., 2006 e Padilla et al., 2007a.

Resultados e Discussão

O código numérico desenvolvido para escoamentos newtonianos (Padilla et al., 2005; Padilla et al., 2006; Padilla et al., 2007a) foi reestruturado conforme a modificação da eq. (2), onde a viscosidade passa a ser mais uma variável, que muda basicamente em função da taxa de deformação. Em seqüência, foram implementados os modelos para escoamentos não newtonianos. Como é de praxe, uma série de simulações foram realizadas com a finalidade de confirmar a correta implementação dos modelos e, posteriormente, para validar o código numérico como um todo. Nesse sentido, o escoamento Taylor-Couette em diversas configurações, concêntrica e excêntrica, foi reproduzido.

A configuração geométrica associada ao problema, como usado nos trabalhos precedentes para escoamento newtoniano, está definida pelo espaço anular entre as superfícies de raios R_i , R_o e comprimento axial L_a (fig. 1). A superfície interna tem velocidade de rotação ω . Na configuração excêntrica, aparece o R_{ex} e a velocidade de rotação excêntrica ω_{ex} . O parâmetro adimensional governante deste problema, número de Taylor, é definido como $Ta = \omega R_i (R_o - R_i) / \eta_c$, onde η_c é a viscosidade característica (Escudier et al., 2002). Para as simulações, as seguintes definições foram realizadas: R_i , R_o , L_a , $R_{ex} = 0,125, 0,4, 0,4, 0,05$ m, $\omega_{ex} = 4\pi$ s⁻¹; para modelo power-law, $k = 0,221$ Pa.sⁿ, $n = 0,704$ (Loureiro, 2004); para o modelo Carreau-Yasuda, $\eta_{0,\infty} = 0,004, 0,0001$ Pa.s, $\lambda = 0,1$ s, $a = 2$ e $n = 0,704$ (Coronado-Matutti et al. 2004; Loureiro, 2004); malha euleriana de 42x42x24 (x, y, z).

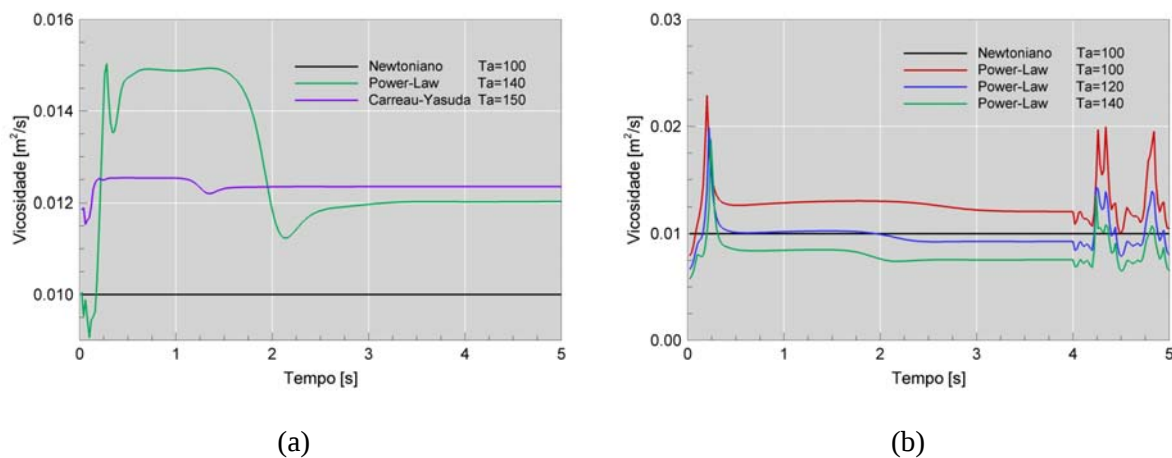


Figura 2. Distribuição temporal da viscosidade cinemática para fluidos newtonianos e não newtonianos; (a) configuração concêntrica, (b) configuração excêntrica.

Sondas numéricas localizadas no interior do domínio possibilitam monitorar as principais variáveis do escoamento, entre elas a viscosidade cinemática, como mostrado na fig. 2. Na distribuição temporal para a configuração concêntrica (fig. 2a), observam-se algumas características importantes dos escoamentos não newtonianos, como por exemplo, que o escoamento Taylor-Couette com ambos os modelos (Power-law e Carreau-Yasuda) atingem regime permanente pouco antes dos 4 s e, as variações locais no transiente da viscosidade são mais intensos com modelo power-law. Por outro lado, a distribuição temporal para a configuração excêntrica (fig. 2b, com modelo power-law) apresenta variações da viscosidade até atingir regime com excentricidade fixa (na posição da fig. 1b), para três valores de Ta , a partir dos 4 s as rápidas mudanças correspondem a os dois ciclos completos de movimento circular com excentricidade variável entorno do eixo do canal externo.

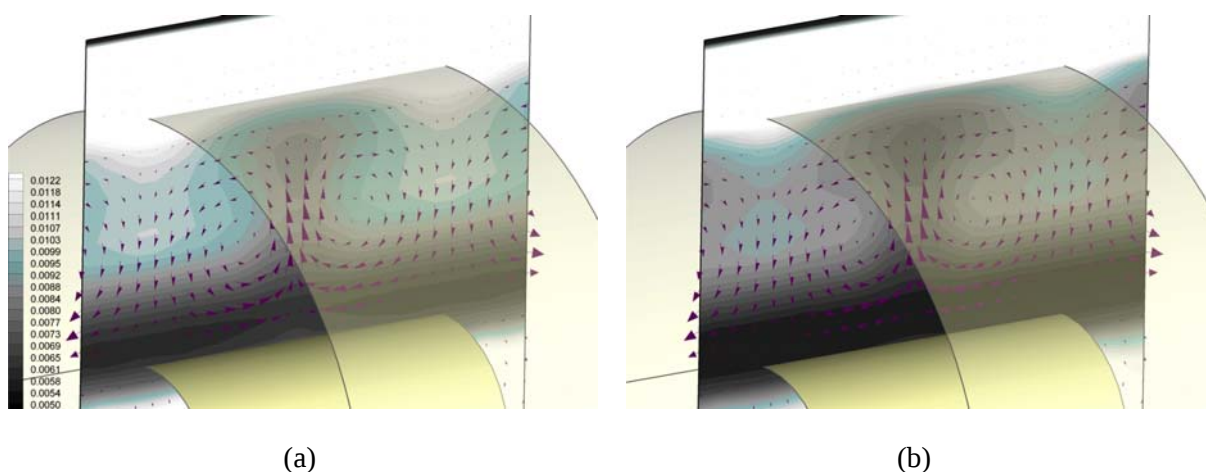


Figura 3. Campos de vetores velocidade e viscosidade cinemática, modelo power-law e configuração concêntrica; (a) $Ta = 120$, (b) $Ta = 140$.

Todos os casos simulados, usando configuração concêntrica, evidenciaram a presença de vórtices de Taylor, apresentando campos das componentes da velocidade similares aos do escoamento newtoniano (Kupferman, 1998; Padilla et al, 2005; Padilla et al, 2007b). Os vórtices de Taylor se apresentam estáveis, os quais à medida que o Ta é incrementado tornam-se mais intensos (vetores velocidade maiores, como observado na fig. 3) e os seus núcleos são deslocados de forma a aproximar mais os pares de vórtices contra-rotativos, como também, a afastá-los das proximidades da superfície do canal interno. Quando comparados com os resultados de escoamentos newtonianos, tabela 2, os vórtices de Taylor têm sempre distâncias menores entre seus núcleos, assim como, entre os núcleos e a superfície do canal interno, que as encontradas em escoamentos newtonianos. O posicionamento dos núcleos como função do Ta , para os escoamentos newtonianos, está influenciado basicamente pelos efeitos de inércia; já nos escoamentos não newtonianos há influência de efeitos de inércia e de efeitos derivados da variação da viscosidade, como observado nas figs. 3 e 4.

A figura 3 mostra o comportamento pseudoplástico do escoamento para $Ta = 120$ e 140, onde a viscosidade cinemática decresce com o incremento da taxa de deformação (ver fig. 4). A distribuição de viscosidade tem menores valores nas regiões próximas à superfície do canal interno e maiores valores nas proximidades da superfície do canal externo; na região intermediária observa-se a influência do escoamento radial entre os vórtices. É essa distribuição que explica o deslocamento dos núcleos dos vórtices em relação aos vórtices em escoamentos newtonianos.

Em relação aos vórtices característicos, à medida que o Ta aumenta estes mantêm o mesmo comportamento observado para quando usado modelo power-law. Os núcleos dos vórtices dos escoamentos com modelos Carreau-Yasuda (tabela 1) têm posicionamento intermediário entre a localização dos núcleos dos vórtices dos escoamentos newtonianos e dos escoamentos não

newtonianos com modelo power-law (tabela 2), devido às diferenças de valores dos campos de viscosidade cinemática e de taxa de deformação observadas na fig. 4.

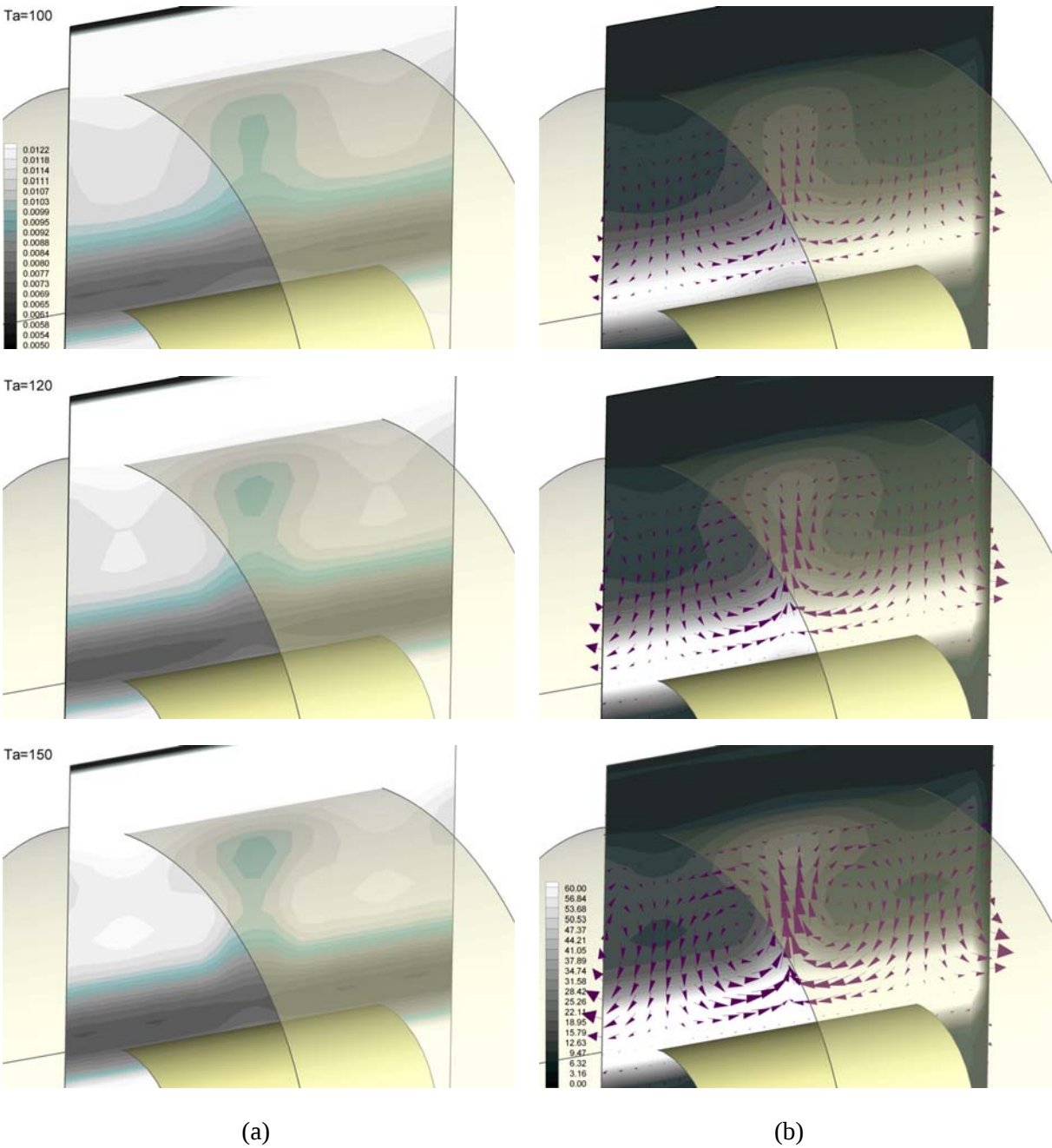


Figura 4. Escoamentos em configuração concêntrica, modelo Carreau-Yasuda; (a) viscosidade cinemática, (b) vetores velocidade e taxa de deformação.

Tabela1. Posição dos núcleos dos vórtices de Taylor para escoamentos não newtonianos, usando modelo Carreau-Yasuda.

Ta	Vórtice esquerdo		Vórtice direito	
	$r [m]$	$z [m]$	$r [m]$	$z [m]$
100	0,253	0,225	0,253	0,379
120	0,255	0,229	0,255	0,375

150	0,259	0,231	0,259	0,373
-----	-------	-------	-------	-------

Tabela2. Posição dos núcleos dos vórtices de Taylor para escoamentos newtoniano e não newtonianos.

$Ta=100$	Vórtice esquerdo		Vórtice direito	
	$r [m]$	$z [m]$	$r [m]$	$z [m]$
Newtoniano	0,259	0,220	0,259	0,386
Carreau-Yasuda	0,253	0,225	0,253	0,379
Power-law	0,247	0,229	0,247	0,376

Conclusões

Foram apresentados os resultados de simulações escoamentos não newtonianos em canais anulares concêntricos e excêntricos usando os modelos power-law e Carreau-Yasuda. Os resultados de todos os casos considerados evidenciaram a presença de vórtices de Taylor, o qual caracteriza estes como escoamentos Taylor-Couette. Assim, de forma geral, os resultados apresentados são fisicamente coerentes. A distribuição do campo de viscosidade e de taxa de deformação, entre outras características dos escoamentos, condizem com resultados encontrados na literatura, de forma que, pode-se considerar esses resultados como validados qualitativamente. Novas tarefas estão sendo executadas com a finalidade de concluir o processo de validação

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.
- ESCUDIER, M. P., OLIVEIRA, P. J. E PINHO, F. T. Fully Developed Laminar Flow of Purely Viscous non-Newtonian Liquids Through Annuli, Including the Effects of Eccentricity and Inner-Cylinder Rotation, **Int. J. of Heat and Fluid.** vol. 23, pp. 52-73, 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.
- CORONADO-MATUTI, O. C., SOUZA MENDES, P. R. CARVALHO, M. S. Instability of Inelastic Shear-Thinning Liquids in a Couette Flow Between Concentric Cylinders, **J. of Fluids Eng.**, vol. 126(3), pp. 385-390, 2004.
- OSTWALD, W. The Velocity Function of Viscosity of Disperse Systems. **Kolloid Zeitschrift** , vol. 36(2) , pp. 99-157, 1925.

- 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., SILVEIRA NETO, A. Desenvolvimento de um Código Computacional Tridimensional para Solução de Escoamentos em Transição e Turbulência. **XXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering**, Guarapari, CILAMCE, p. 1–12, 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. E SILVEIRA NETO A. Aplicações de Simulação Numérica para Análise de Escoamentos Transicionais em Canais Cilíndrico Anulares com Excêntricidade Variável, Relatório Final, UFU/CENPES, p. 1-43, 2007.
- 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. General Circulation Experiments with Primitive Equations. **Monthly 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.
- YASUDA, K. PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1979.