

SIMULAÇÃO NUMÉRICA EM TRÊS DIMENSÕES DE ESCOAMENTOS LIVRES: UMA APLICAÇÃO NO CANAL DE FUGA DA USINA DE TRÊS MARIAS

Rhaíssa Soares Silva Figueiredo¹ ; Lucas Thadeu da Silva Ramos¹ ; Bernardo Alan de Freitas Duarte¹ ; Deborah Cardoso da Cruz¹ ; Abigail Paula Pinheiro¹ & Hersília de Andrade e Santos¹

Resumo – A simulação numérica em três dimensões é uma técnica que vem sendo empregada recentemente para estudar escoamentos do tipo superfície livre. Com o avanço dos métodos numéricos e das ferramentas computacionais, a simulação por CFD (Computational Fluid Dynamics) pode ser empregada em estudos de escoamentos de rios e modelos de interação água-ar podem ser aplicados para determinação da lâmina d'água. O presente trabalho apresenta a aplicação desta técnica no canal de fuga da Usina Hidrelétrica de Três Marias no rio São Francisco. Após o desenvolvimento digital da geometria do canal, foi produzida uma malha estruturada de 36.076 elementos. Aplicando-se o modelo de Volume de Fluido (VOF) para interação água-ar, foram obtidos os campos de velocidade do canal de fuga cuja velocidade máxima atingiu 2,4 m/s. Também foi possível verificar a formação de uma grande área de recirculação do escoamento, entre as turbinas três e seis do empreendimento.

Palavras-Chave – Volume de Fluido (VOF), Dinâmica computacional de fluidos (CFD), malha estruturada.

NUMERICAL FLOW SIMULATION OF FREE SURFACES IN THREE DIMENSIONS: AN APPLICATION OF TRES MARIAS TAILRACE

Abstract – The three-dimensional numerical simulation is a technique that has been used recently to study free surface flows. The advancement of numerical methods and computational tools allows simulation by CFD (Computational Fluid Dynamics) which can be used in studies of turbulent rivers and models of air-water interaction can be applied to determine the water depth. This paper presents the application of this technique on the tailrace of the Três Marias Hydropower plant in the São Francisco River. The digital model of this channel was created and a mesh of 36.076 structured elements was produced. The velocity fields are obtained by an application of Volume of Fluid as water-air interaction and the maximum water velocity of tailrace was 2,4 m/s. Information about recirculation flow between the third and the sixth turbines are also obtained in this study.

Keywords – Volume of Fluid (VOF), Computational Fluid Dynamics (CFD), Structured mesh

¹ Centro de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET MG). Av. Amazonas 7675, Cep: 30510-000. Belo Horizonte. E-mail: rhaissassf@gmail.com

INTRODUÇÃO

A aplicação da conservação da massa, da quantidade de movimento e energia no escoamento de fluidos gera equações diferenciais sem solução exata (White, 2002). A abordagem mais comum para modelar o escoamento turbulento de rios é resolver as equações de Navier-Stokes com as médias de Reynolds (Reynolds Averaged Navier-Stokes - RANS) incorporando um modelo de turbulência (Wang, 2009).

A aplicação de métodos numéricos permite a obtenção de soluções aproximadas de extrema precisão e é viável tendo em vista os avanços computacionais (Anderson, 1996). No caso da aplicação de métodos numéricos em escoamentos abertos, ou seja, em escoamentos onde a pressão atmosférica atua diretamente no fluido, a determinação da linha de interação água e ar é uma dificuldade adicional à solução computacional (Flow Science, 2011).

No caso da aplicação de métodos numéricos em escoamentos abertos, ou seja, em escoamentos onde a pressão atmosférica atua diretamente no fluido, a determinação da linha de interação água e ar é uma dificuldade adicional à solução computacional.

A maioria dos estudos computacionais com escoamentos em superfícies livres, tanto no Brasil como no mundo, trabalham com simulações em uma ou duas dimensões, de forma que a interação fluido-ar não é tratada neste tipo de análise (Arentz, 2007; Paz *et al.* 2005). A simulação em três dimensões permite a compreensão de fenômenos hidráulicos mais complexos, como cavitação, e permite obter resultados mais próximos dos verificados na prática (Sabbagh-Yazdi *et al.*, 2007).

O presente trabalho teve, portanto, como objetivo aplicar este tipo de simulação numérica ao escoamento de um canal de fuga de uma usina hidrelétrica. O conhecimento das condições hidráulicas desta região em barragens é extremamente importante para subsidiar manobras de abertura e fechamento de comportas, medidas de redução de mortandade de peixes e ações que visem o aumento da eficiência de geração energética. O estudo foi realizado na usina de Três Marias, localizada no rio São Francisco e dentro do estado de Minas Gerais.

CFD

Um modelo numérico é um método de estudo de escoamentos que utiliza recursos computacionais para resolver uma ou mais equações diferenciais que descrevem o escoamento (Gonçalves, 2007). No caso da dinâmica computacional de fluidos – Computational Fluid Dynamics (CFD) as equações parciais de Navier-Stokes (EQs. 1) são resolvidas por métodos numéricos.

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \\
 & \rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} - \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) \\
 & \rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} - \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g \\
 & \frac{\partial}{\partial t} u_i + \sum_j u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \nu \Delta u_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + f_i(x, t)
 \end{aligned}
 \tag{EQs. 1}$$

Modelos numéricos têm sido utilizados em substituição dos modelos experimentais, pelo recente desenvolvimento da capacidade tecnológica de computadores e outras ferramentas de processamento de dados (Fill, 2011).

A simulação computacional permite a visualização do escoamento, facilitando o conhecimento pleno das características do movimento do fluido (Neto *et al.*, 2008). Entretanto persiste a incerteza dos resultados obtidos via simulação matemática em função de aproximações na representação detalhada dos contornos, a formulação das condições de contorno e na discretização das equações (Fill, 2011).

O método numérico de simulação de escoamentos pode ser dividido em três etapas: pré-processamento, processamento e pós-processamento.

VOF (Volume of Fluid)

No caso da aplicação de métodos numéricos em escoamentos abertos, ou seja, em escoamentos onde a pressão atmosférica atua diretamente no fluido, a determinação da linha de interação água e ar é uma dificuldade adicional à solução computacional. Para tratar dos casos de escoamentos livres, algumas aproximações numéricas foram propostas (Flow Science, 2007): método de Lagrange, método da altura d'água, Marker-and-Cell (MAC), Surface Marker e Volume-of-Fluid (VOF).

O método VOF trabalha com uma parametrização para cada estrutura do domínio, denominada célula C, onde se representa o estado dessa célula, variando em três e são dados por valores, sendo estes (Politano *et al.*, 2009):

- $C = 0 \rightarrow$ Célula cheia de ar (vazia de água) – Fase 1;
- $C = 1 \rightarrow$ Célula cheia de água – Fase 2;
- $0 < C < 1 \rightarrow$ Mistura de ar e água – Fase 3.

O volume de cada uma das fases é controlado em todas as células, sendo que cada uma contém uma porção dos fluidos, separados ou juntos (caso onde está a interface). A fração de volume é definida, para um único tipo de fluido contido na célula, como o volume presente na mesma dividido pelo volume total desta célula. O volume total de fluido é mantido devido as condições dadas pelas equações de governo. No caso de simulações com líquidos, a manutenção desse volume é dada pela utilização da equação da conservação para frações de volume da fase líquida (Eq. 2). Ressalta-se que a conservação da massa exige que cada célula seja preenchida por apenas um único fluido ou uma mistura desses fluidos (Politano *et al.*, 2009).

METODOLOGIA

Para simular o escoamento na usina de Três Marias foi necessário gerar um modelo digital da estrutura em sólidos 3D representando o canal de fuga da usina (Figura 1). Para isto foram utilizadas plantas do projeto original (1960) e fotos da construção. O software utilizado para construção da geometria foi o Solid Works.

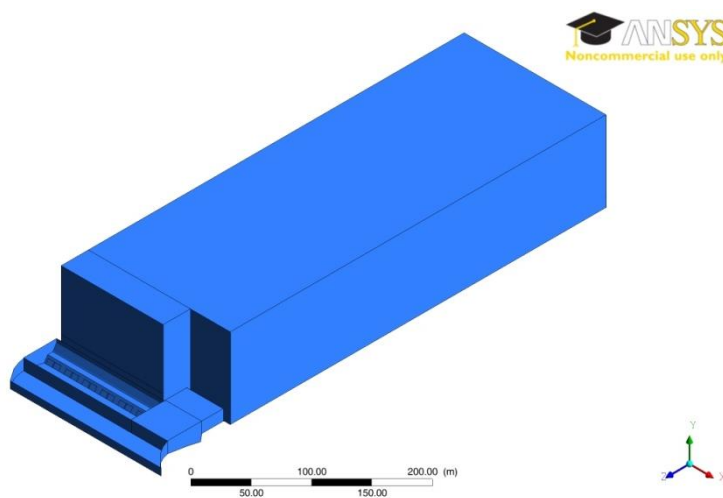


Figura 1 - Modelo digital do canal de fuga e do reservatório da Usina de Três Marias (software CFD Post).

Após a construção digital da geometria do canal de fuga, foi iniciado o processo de construção da malha e a definição das condições de contorno no software *Gridgen*. Foram criados 36.076 elementos no domínio que compreendeu um reservatório hipotético e o canal de fuga (Figura 2).

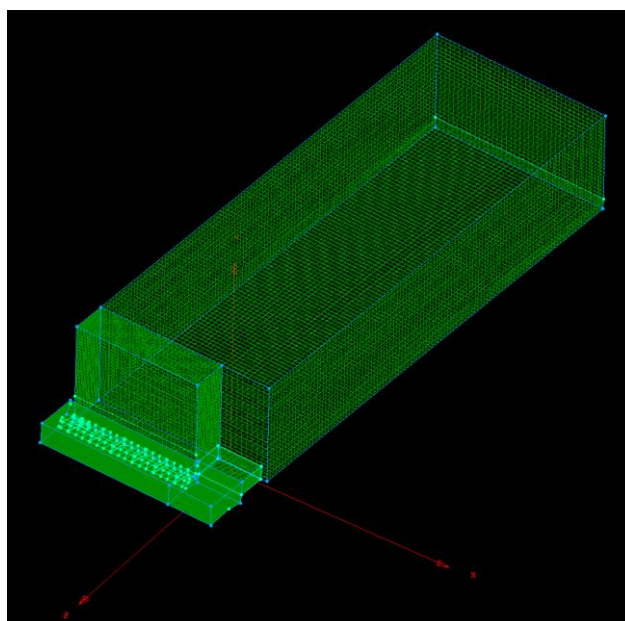


Figura 2 – Malha de todo o domínio

Quanto maior o refinamento de uma malha, menor será o tamanho do elemento da malha, o que favorece a maior qualidade de visualização de resultados pela maior precisão (Inoue, 2005; Gonçalves, 2007). Para a simulação em regiões críticas de interesse, como as turbinas, a malha é mais refinada.

A definição das condições de contorno ocorre ainda no software de geração da malha. A definição das condições de contorno da malha é essencial para a simulação numérica. As condições de contorno utilizadas foram:

- Entrada: Adotou-se a entrada de água na parte inferior do reservatório numa vazão de 426,20 m³/s.
- Paredes: Definiu-se faces imóveis e impermeáveis nas paredes do canal de fuga e do reservatório. Devido à operação de apenas três turbinas no cenário simulado, adotou-se a condição de contorno do tipo parede na abertura da quarta a sexta turbina.
- Saída: Definiu-se a lâmina de água de 4,5 m na seção de jusante.
- Topo: Pressão atmosférica
- Interface: Esta condição de contorno foi aplicada entre regiões de diferentes graus de refinamento.

A simulação foi realizada no software *Fluent*, no qual o modelo VOF foi utilizado assumindo-se dois fluidos: ar e água. Foi criada a condição inicial de que o reservatório encontrava-se totalmente cheio de água. Esta favoreceu a estabilização do escoamento de maneira mais rápida, pois evitou a ocorrência de grandes ondas e turbilhonamentos.

Neste trabalho adotou-se o cálculo iterativo com critério de resíduo com valor de 0,001. Como a simulação se deu por regime transiente, adotou-se número de Courant de 0,44 e passo de tempo de 0,004 segundos para garantir convergência da solução.

RESULTADOS

Uma das regiões mais importantes para analisar as variáveis de interesse nesse trabalho é a região próxima às turbinas do canal de fuga. Com relação às velocidades, observou-se que próximo às saídas das turbinas, para o cenário descrito, obtiveram-se velocidades em torno de 2,4 m/s (Figuras 3 e 4).

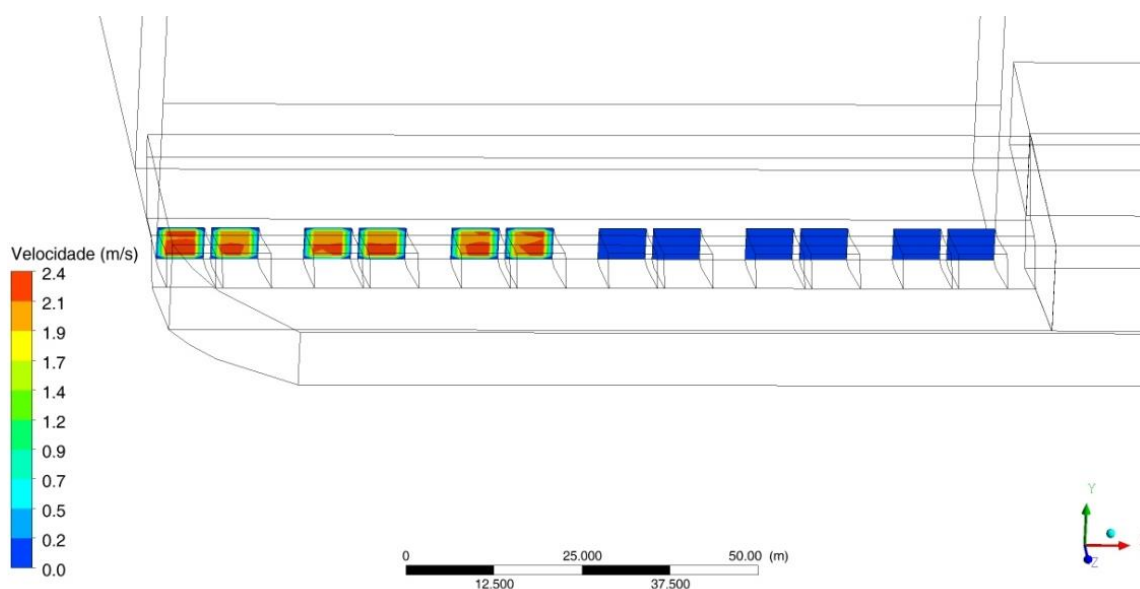


Figura 3 - Visualização da variável velocidade das seções de turbina do canal de fuga de Três Marias

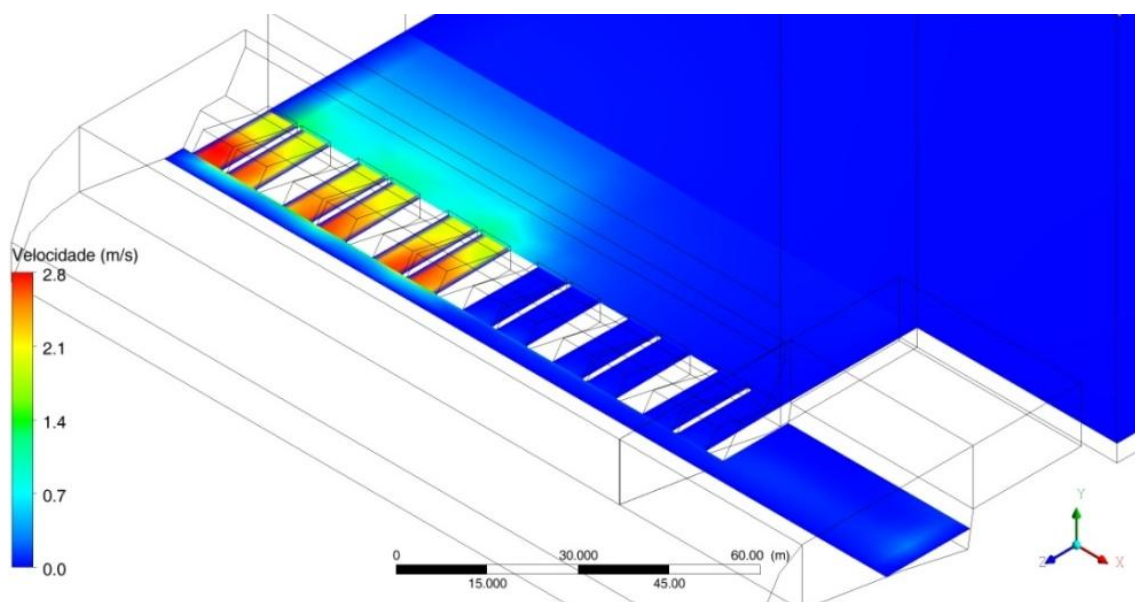


Figura 4 - Visualização da variável velocidade nos planos transversais às turbina do canal de fuga de Três Marias

Observou-se também a presença de regiões de turbilhonamento à jusante do canal de fuga. Este resultado corrobora para aplicação das pesquisas que determinam que o padrão de movimentação dos peixes é definido por fatores ambientais, como as alterações hidrodinâmicas do meio (Jackson *et al.*, 2001) (Figura 5).

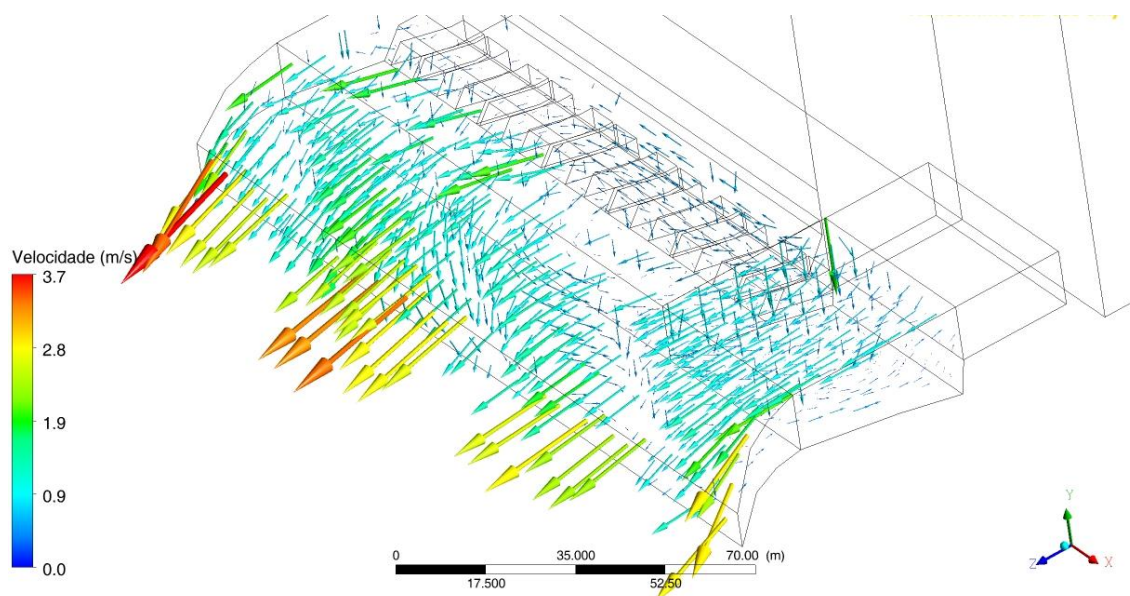


Figura 5 - Vetores de velocidade a jusante do canal de fuga

Por meio da análise de vetores localizados a jusante do canal de fuga, percebeu-se a formação de uma área de recirculação com sentido anti-horário, iniciando próxima à terceira turbina e se estendendo à sexta máquina. O padrão de recirculação é diferente ao longo da lâmina d'água, possuindo características mais homogêneas próxima ao fundo do canal (com menores velocidades rotacionais) e heterogêneas na superfície da lâmina d'água (vetores maiores e sem padrão de

orientação). A formação dessas áreas turbulentas podem comprometer a capacidade de geração do empreendimento, bem como promover movimentos (atração ou repulsão) das populações de peixe.

Percebe-se que a operação de 3 turbinas e a parada de outras três máquinas (para manutenção) contribui para a formação dessa área de recirculação.

CONCLUSÕES

A implantação de empreendimentos hidrelétricos requer a condução de estudos detalhados sobre as alterações possíveis de ocorrer após a instalação e operação destas obras. Os estudos sobre as características do escoamento, por meio da avaliação de parâmetros hidráulicos como velocidade, são importantes para orientar a necessidade de interferências no projeto do empreendimento, pois de acordo com o posicionamento das estruturas do barramento e do canal de fuga, geram-se escoamentos que podem favorecer ou não as populações de peixe do local.

A simulação numérica mostrou-se uma ferramenta adequada à previsão do escoamento no canal de fuga de estudo, pois obteve-se de forma detalhada, a descrição do fluxo de água pela estrutura. A partir do conhecimento das características do escoamento apresentado, podem ser propostas interferências de engenharia, que permitam a melhoria da eficiência dos empreendimentos do ponto de vista de geração e do ponto de vista ambiental e ecológico.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, W. K. (1994). A Grid Generation and Flow Solution Method for the Euler Equations on Unstructured Grids. *Journal of Computational Physics* 110, pp. 23-38.

ARENTZ, M. F. R. (2009). A modelagem hidrodinâmica como auxílio à navegação no canal norte do estuário do Amazonas (Pós-Graduação em Engenharia Oceânica), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

FILL, G. C. (2011). *Modelagem heterodinâmica de escoamentos em vertedouros*. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Matemática). Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

FLOW SCIENCE, Disponível em: <http://www.flow3d.com/cfd101/cfd101_main.html> Acesso em: 10/02/2011.

GONÇALVES, N. D. F. (2007). *Método dos volumes finitos em malhas não-estruturadas*. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Matemática). Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto.

INOUE, F. K. (2005). *Modelagem matemática em obras hidráulicas*. Dissertação (Mestrado em engenharia de recursos hídricos e ambiental). Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

JACKSON, D. A.; PERES-NETO, P. R.; OLDEN, J. D. (2001). What controls who is where in freshwater fish communities – the role of biotic, abiotic and spatial factors. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, pp. 157-170.

NETO, H. J.; ALENCAR, H. S.; BERNARDES, M. E. C.; DA SILVA, F. G. B. (2008). Modelagem e simulação do comportamento de uma válvula de fluxo hidráulica com o uso de ferramenta de hidroinformática. *Revista Tecnológica*, v. 29, n. 2, pp.224-232.

POLITANO M.; CARRICA P. M. e WEBER L. (2009). A multiphase model for the hydrodynamics and total dissolved gas in tailraces. *Int. J. Multiphase Flow*. v. 35 (11), p. 1036-1050.

SABBAGH-YAZDI, R. S.; ZOUNEMAT-KERMANI, M.; KERMANI A. (2007). Solution of depth averaged tidal currents in Persian Gulf on unstructured overlapping finite volumes. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.55, pp 81-101.

WANG, Yushi (2009). *A multidimensional Eulerian-Lagrangian model to predict organism distribution*. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). The University of Iowa. Graduate College of The University of Iowa. Iowa City.

WHITE, F. M. (2002). *Mecânica dos Fluidos*. 4 ed., MacGraw Hill, Brasil, 880 p.