



2º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS

Características da Formação e Desprendimento de Vórtices em Grupos de Cilindros

Surmas, R.¹, dos Santos, L. O. E.¹, Philippi, P. C.¹

¹ Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas dos Materiais (LMPT), Engenharia Mecânica, Campus Universitário, Trindade, Florianópolis, SC, CEP 88040 – 900, surmas@lmpt.ufsc.br, emerich@lmpt.ufsc.br, philippi@lmpt.ufsc.br

Resumo – Neste trabalho foram estudadas as forças induzidas por um escoamento sobre dois cilindros expostos a uma corrente livre. Dois conjuntos de simulações foram realizados: no primeiro os cilindros são colocados um após o outro, paralelamente ao escoamento. No segundo os dois corpos são colocados transversalmente ao escoamento, em todas as simulações os diâmetros dos dois cilindros são iguais. Bons resultados foram encontrados quando comparados a estudos recentes.

As distâncias entre os cilindros variam entre 1,5D e 4D. Procurou-se com isso identificar os diversos regimes de escoamento e as características principais das forças de arrasto e sustentação e do número de Strouhal (relacionado à frequência de formação dos vórtices de Von Karmann). Um Reynolds igual a 200 foi adotado.

O modelo utilizado (lattice Boltzmann) parte da discretização da equação de Boltzmann, recuperando a equação de conservação da massa e a equação de Navier-Stokes para fluidos incompressíveis. Este modelo apresenta como principais vantagens a sua estabilidade, facilidade de paralelização do algoritmo e facilidade de obtenção das forças atuantes em qualquer corpo, independentemente da complexidade de sua forma.

Palavras-Chave: lattice Boltzmann, cilindro, coeficiente de arrasto, vórtices de Von Karmann, vibração induzida por vórtices.

Abstract – In this work the induced forces produced by open flow around two circular cylinders are studied. Two sets of simulation had been carried through. In the first set the circular cylinders are placed in tandem, in the second the circular cylinders are placed side by side. The diameters of the two circular cylinders are equal. Good results had been found when compared with recent studies.

The distances between the cylinders vary between 1,5D and 4D. Diverse regimes of flow and the main characteristics of the forces of drag and lift and of the number of Strouhal (related to the frequency of formation of the vortices of Von Karmann) had been identified. Reynolds number equals to 200 was adopted.

The used model (lattice Boltzmann) is a discrete form of the Boltzmann continuous equation, recovering the equation of conservation of the mass and the Navier-Stokes equation for incompressible fluids. This model presents as main advantages its stability, easiness of parallelization of the algorithm and easiness of evaluation of the forces in any bluff body, independently of the complexity of its form.

Keywords: lattice Boltzmann, circular cilinder, riser, Von Karmann vortex, vortex induced vibration

1. Introdução

A extração de óleo em águas profundas utiliza grupos de tubos metálicos conectando os pontos de perfuração e as plataformas flutuantes na superfície. Estes tubos metálicos, chamados risers, têm muitas vezes vários metros de comprimento e estão sujeitos a vários tipos de regimes de escoamento ao longo de todo o seu comprimento. As forças induzidas na estrutura pelo movimento das águas do oceano podem causar vibrações indesejadas e até mesmo choques entre os tubos, levando a uma diminuição da vida média dos risers. O estudo da interferência das esteiras formadas pelo escoamento de um fluido ao redor de dois cilindros tem aplicação prática na previsão das principais forças atuantes em um pequeno grupo de tubos.

O escoamento sobre um cilindro em uma corrente livre, um problema clássico da Mecânica dos Fluidos (Lange et al., 1998), têm características oscilatórias. Isto se deve a formação de vórtices periódicos na esteira do escoamento, conhecidos como vórtices de Von Karmann (Williamson, 1985, 1997). Na presença de um outro cilindro a complexidade das forças agindo sobre os dois corpos aumenta e, em alguns casos, as características do escoamento são de transição para turbulência. Forças atrativas ou repulsivas entre os corpos podem surgir dependendo da posição relativa entre os tubos (Lima e Silva et al., 2002).

Dois casos foram estudados e comparados com resultados disponíveis na literatura (Meneghini et al., 2001). Os resultados comprovam a eficiência do modelo de Lattice Boltzmann. Nos dois casos os diâmetros dos dois cilindros são iguais. No primeiro eles são dispostos paralelamente ao escoamento. No segundo eles são dispostos lado a lado. A distância relativa entre os corpos varia entre 1,5D e 4D para todos os casos estudados. O número de Reynolds adotado é igual a 200 para todas as simulações realizadas.

Foi utilizado o modelo de Lattice Boltzmann, que é brevemente descrito na seção 2. Este modelo vem obtido sucesso em aplicações da mecânica dos fluidos envolvendo condições de contorno complicadas, como escoamentos em meios porosos ou escoamentos a número de Reynolds moderado sobre estruturas complexas. Este trabalho comprova a eficiência do modelo, que poderia ser utilizado para simulação de diferentes arranjos complexos de estruturas (grupos de diversos corpos de geometrias diversas).

2. Modelo Lattice Boltzmann

O modelo de Lattice Boltzmann surgiu no final da década de oitenta como uma extensão dos modelos de gás em rede. Nos modelos de gás em rede partículas movem-se com uma velocidade constante e discreta em uma rede discreta. A cada passo de tempo estas partículas saltam de um sítio para outro de acordo com a sua velocidade. Esta etapa é chamada de propagação. Quando estas partículas se encontram nos sítios, elas passam por um processo de colisão. Neste processo as direções de propagação são mudadas, conservando a massa, quantidade de movimento e energia cinética total do sítio. Através do uso de médias pode-se obter o comportamento de um fluido real. Um exemplo de um sítio comumente utilizado pode ser visto na figura 1. Cada velocidade nesta rede é representada por vetores de c_1 a c_9 e conecta cada sítio aos seus oito vizinhos mais próximos. Esta configuração é conhecida como D2Q9.

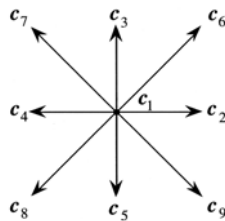


Figura 1. Sítio de uma rede D2Q9

O modelo de Lattice Boltzmann (McNamara e Zanetti, 1988) utiliza uma função distribuição de densidade em cada direção do sítio mostrado (da mesma forma que a equação de Boltzmann, utilizada na teoria cinética dos gases). Recentemente foi demonstrado por He e Luo (1997) que ele pode ser derivado diretamente desta equação. A equação de evolução do modelo é a seguinte:

$$N_i(\vec{X} + \vec{c}_i, T + 1) = N_i(\vec{X}, T) + \Omega_i(\vec{X}, T)$$

Sendo Ω o operador de colisão e i uma direção do sítio. No modelo utilizado, conhecido como BGK (Bhatnagar et al., 1954; Qian et al., 1992), o operador de colisão é escrito da seguinte forma:

$$\Omega_i = \frac{N_i^{eq} - N_i}{\tau}$$

Este operador de colisão leva a distribuição N_i a uma distribuição de equilíbrio de acordo com um tempo de relaxação τ relacionado à viscosidade. A densidade do fluido em determinado ponto e a velocidade do fluido neste ponto podem ser calculadas através dos momentos da distribuição de densidade:

$$\rho = \sum_i N_i$$

$$\rho \vec{u} = \sum_i N_i \vec{c}_i$$

A soma é realizada em todas as direções de determinado nó da rede.

Através da correta escolha da distribuição de equilíbrio pode-se chegar as equações de conservação da massa e da quantidade de movimento (equação de Navier-Stokes para um fluido incompressível) em nível macroscópico.

Quando as partículas encontram um sítio aonde deve existir uma parede elas são refletidas na direção inversa. Deste modo a condição de não escorregamento é obedecida. As forças que agem sobre o cilindro podem ser calculadas através da quantidade de movimento trocada em cada colisão das partículas com a parede, em cada passo de tempo. A força total que age sobre o cilindro é dada então por:

$$F = \sum_{\text{sítios}} \sum_i 2N_i c_i$$

A soma é realizada sobre todos os sítios que se conectam a determinada parede por alguma direção i (neste caso a soma é realizada somente nas direções que apontam para parede). Utilizando este método pode-se calcular a força de arrasto e sustentação em qualquer geometria com precisão.

3. Resultados

Três parâmetros principais foram medidos nas simulações. O coeficiente de arrasto é relacionado à força que atua no cilindro na direção paralela a direção do escoamento (F_D), e pode ser definido:

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho V^2 A}$$

O coeficiente de sustentação é relacionado à força que atua na direção transversal ao escoamento (F_L), sendo calculado de forma análoga ao coeficiente de arrasto. O número de Strouhal mede a frequência de formação dos vórtices de Von Karmann na esteira do corpo:

$$St = \frac{fD}{V}$$

A frequência f foi medida com base na transformada de Fourier da evolução do coeficiente de sustentação no tempo. A é a área projetada do corpo na direção da força (que é numericamente igual ao diâmetro). O diâmetro adotado foi igual a 40 unidades de rede, velocidade (igual a 0,1 unidades de rede por passo de tempo) e densidade foram impostas nos quatro limites da simulação. Recentemente algum esforço foi aplicado na utilização de redes irregulares (He et al., 1996) ou de tamanhos diferentes (Bouzidi et al., 2001) em modelos de Lattice Boltzmann, mas os avanços, até agora, foram muito limitados. Neste trabalho foram utilizadas somente redes regulares.

3.1. Escoamento ao redor de dois cilindros dispostos paralelamente ao escoamento

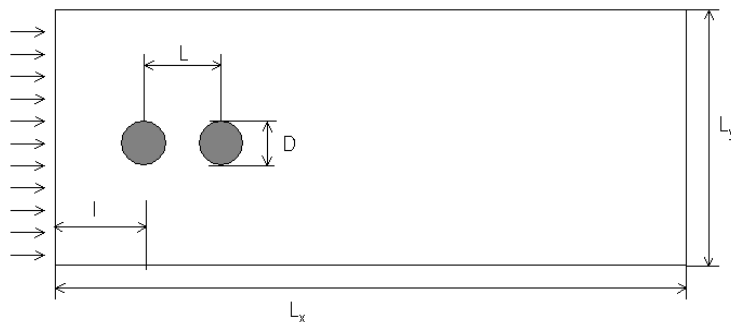


Figura 1. Parâmetros de rede utilizados na simulação do escoamento sobre dois cilindros dispostos paralelamente ao escoamento. $L_x = 33D$, $L_y = 15D$, $l = 11D$, $D = 40$ unidades de rede, $Re = 200$. L varia entre $1,5D$ e $4D$.

Quando a distância entre o cilindro à montante e à jusante é menor do que quatro vezes o diâmetro, a força de arrasto que age no cilindro à jusante é negativa, devido a zona de baixa pressão formada na esteira do cilindro à montante. Em outras palavras, os cilindros têm tendência a se atraírem. Se a distância entre os cilindros é aumentada acima de $3,5D$, a força torna-se positiva. Neste caso os vórtices têm espaço suficiente para se formarem e se desprenderem entre os dois cilindros como pode ser visto na Figura 2. A figura 3 mostra a evolução das forças que agem no cilindro em função da distância entre eles. Os resultados foram comparados com Meneghini et al. (2001).

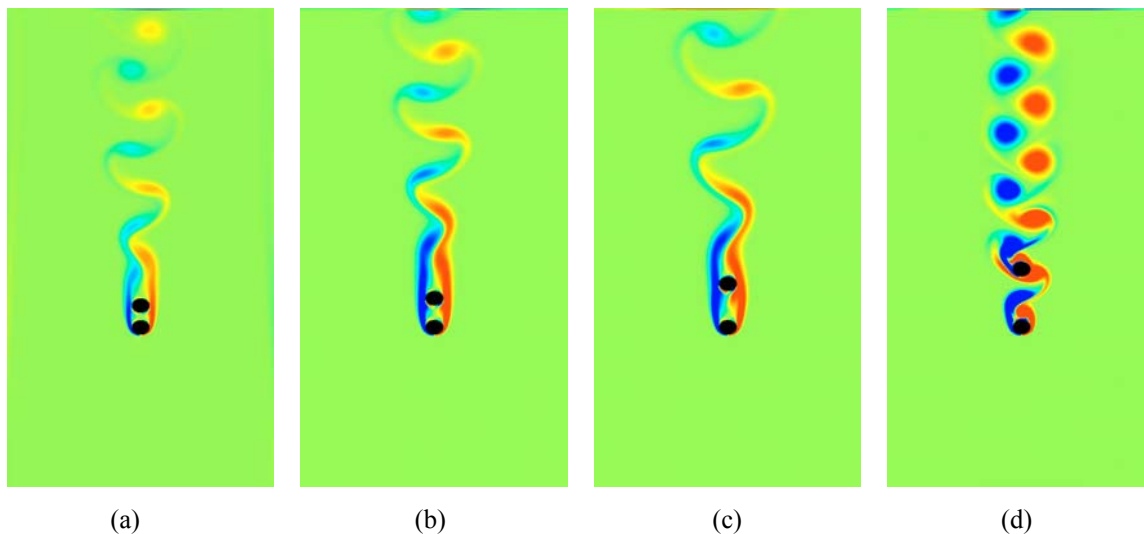


Figura 2. Vorticidade, a) 1.5D, b) 2D, c) 3D, d) 4D

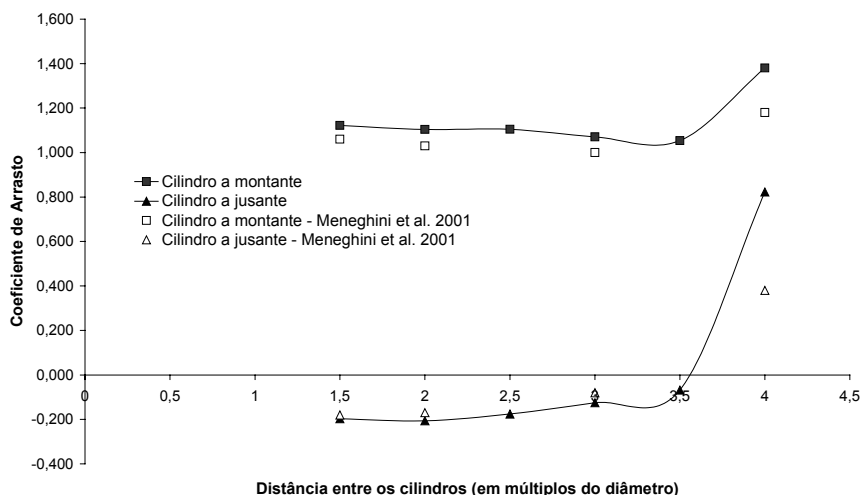


Figura 3. Coeficiente de arrasto em função da distância entre os dois cilindros

3.2. escoamento ao redor de dois cilindros dispostos lado a lado em relação ao escoamento

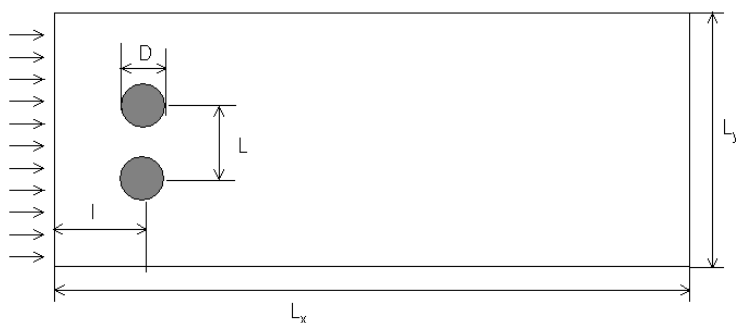


Figura 4. Parâmetros de rede utilizados na simulação do escoamento sobre dois cilindros dispostos lado a lado em relação ao escoamento. $L_x = 30D$, $L_y = 21D$, $l = 10D$, $D = 40$ unidades de rede, $Re = 200$. L varia entre $1,5D$ e $4D$.

Quando a distância entre os dois cilindros é maior do que duas vezes o diâmetro observa-se que o escoamento sobre um cilindro é pouco influenciado pelo escoamento sobre o outro. Quando esta distância é menor ou igual a $2,0D$, o escoamento passa do regime laminar para o regime de transição para turbulência. Em todos os casos existe uma força de repulsão entre os cilindros que cresce com a diminuição da distância entre eles.

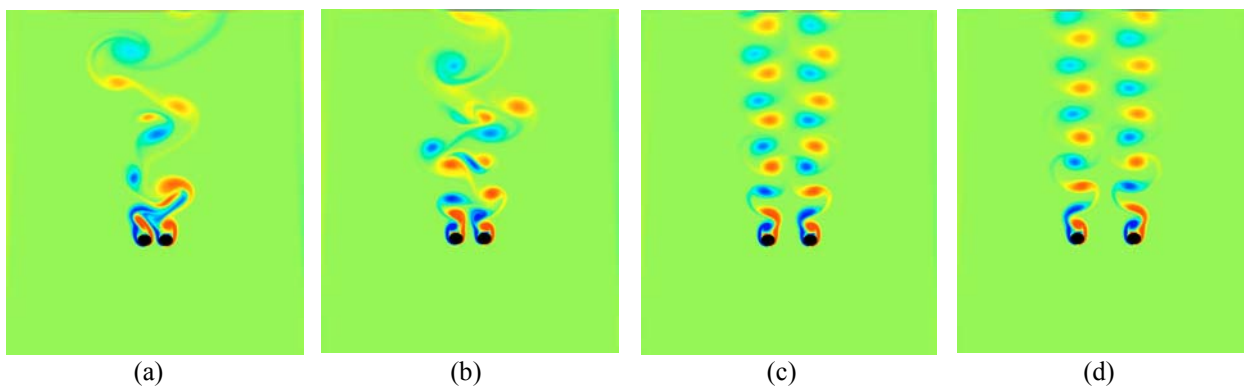


Figura 5. Vorticidade, a) 1.5D, b) 2D, c) 3D, d) 4D

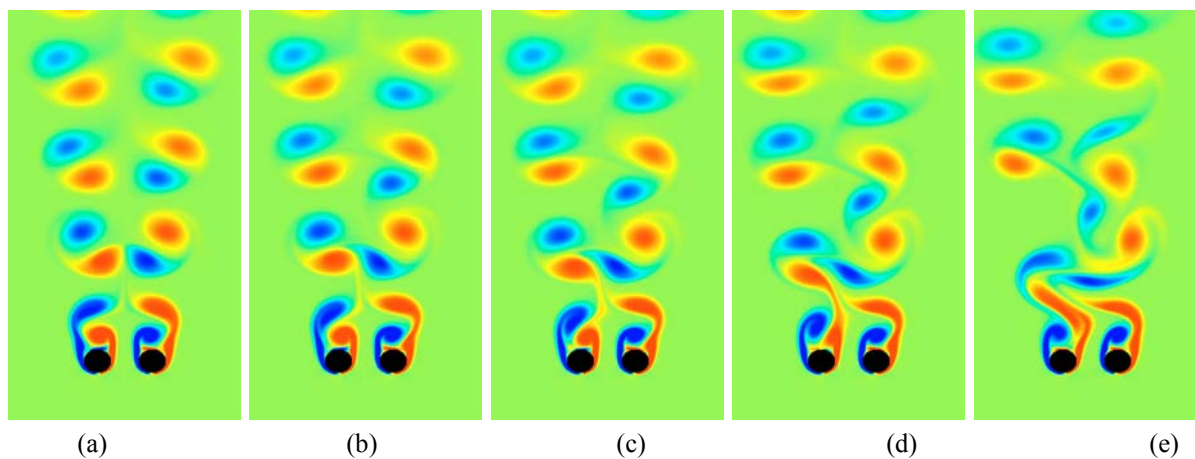


Figura 6. Evolução da vorticidade no tempo, mostrando a formação da interferência entre as esteiras. $L = 2.0D$, a) 17000, b) 33500, c) 35250, d) 37000, e) 38750 passos de tempo

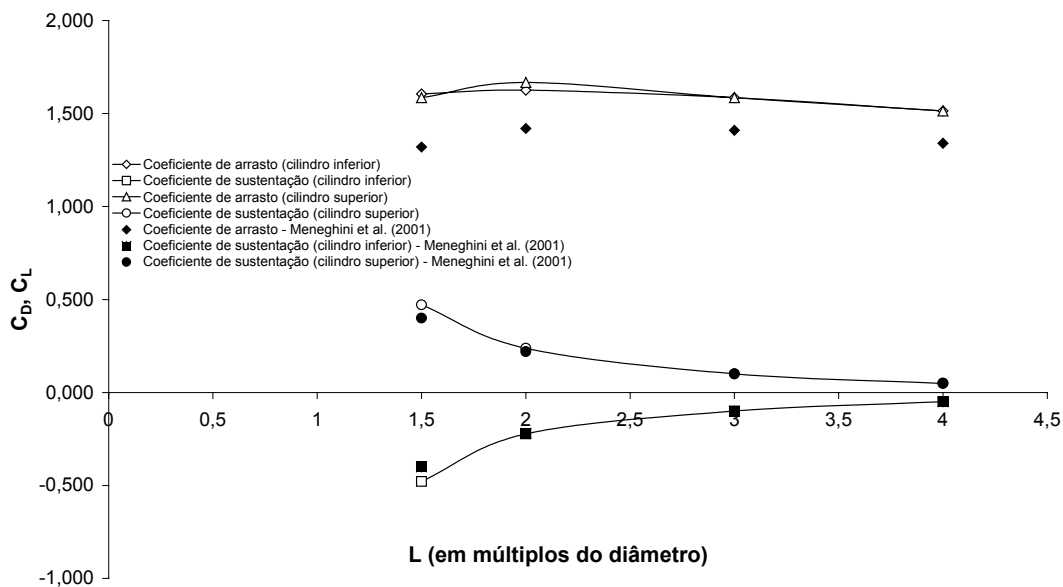


Figura 7. Coeficiente de arrasto e sustentação em função da distância entre os dois cilindros

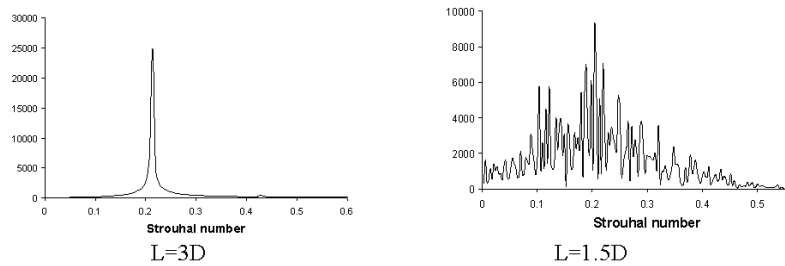


Figura 8. A transformada de Fourier do coeficiente de sustentação apresenta somente um pico bem definido quando o escoamento é laminar. Quando a distância entre os dois cilindros diminui a complexidade do sistema aumenta e o escoamento passa para um regime de transição para turbulência.

4. Conclusão

Neste trabalho o modelo de Lattice Boltzmann foi utilizado no estudo da interferência das esteiras formadas pelo escoamento sobre dois cilindros em posições próximas. As simulações realizadas foram comparadas com resultados recentes, apresentando bons resultados neste número de Reynolds (igual a 200).

Quando os cilindros estão alinhados com o escoamento os vórtices são formados em apenas uma frequência. Se a distância entre os centros dos dois cilindros é menor do que $4D$ existe uma força de atração entre os cilindros. Quando os cilindros estão colocados transversalmente ao escoamento existe uma força de repulsão entre eles. Foi verificada a transição de regime laminar para turbulento quando a distância entre os centros dos cilindros é menor ou igual a $2D$.

A interferência entre as esteiras produzidas pelo escoamento pode gerar efeitos tridimensionais (principalmente se o número de Reynolds for maior do que 200, Thompson et al., 2001). Trabalhos futuros neste caminho devem ser considerados. Outras configurações (agrupamentos de cilindros) podem ser adotadas, inclusive aumentando o número de cilindros.

5. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à ANP (Agência Nacional do Petróleo), ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), à Finep (Fundação Nacional de Estudos e Pesquisas) e ao CENPES/Petrobrás (Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo M. de Mello) pelo apoio dado.

6. Referências

- BHATNAGAR, P.L., GROSS, E.P., KROOK, M. A. Model for Collision Processes in Gases. I. Small Amplitude Processes in Charged and Neutral One-Component System. *Physical Review*, v. 94, p. 511-525, 1954.
- BOUZIDI, M., D'HUMIÈRES, D., LALLEMAND, P., LUO, L.S. Lattice Boltzmann Equation on a Two-Dimension Rectangular Grid. *Journal of Computational Physics*, v. 172, p. 704-717, 2001.
- HE, X., LUO, L.S., DEMBO, M. Some Progress in Lattice Boltzmann Method: Part I. Nonuniform Mesh Grids. *Journal Of Computational Physics*, v. 129, p. 357-363, 1996.
- HE, X., LUO, L.S. Theory of Lattice Boltzmann Method: from the Boltzmann Equation to the Lattice Boltzmann Equation. *Physical Review E*, v. 56, p. 6811-6817, 1997.
- LANGE, C. F., DURST, F., BREUER, M. Momentum and Heat Transfer from Cylinders in Laminar Crossflow at $10^4 \leq Re \leq 200$. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, v. 41, p. 3409-3430, 1998.
- LIMA E SILVA, A.L.F, SURMAS, R., DOS SANTOS, L.O.E., PHILIPPI, P.C., SILVEIRA NETO, A. Comparative Numerical Simulation of Two-Dimensional Flows Over a Pair of Circular Cylinders, Disposed in Tandem, Using Immersed Boundary and Lattice-Boltzmann Methods. In: *Conference On Bluff Body Wakes And Vortex Induced Vibrations*, Port Douglas, Australia, dec., 2002.
- MCMANARA, G.R., ZANETTI G. Use of the Boltzmann Equation to Simulate Lattice-Gas Automata. *Physical Review Letters*, v. 61, p. 2332-2335, 1988.
- MENEGHINI, J.R., SALTARA, F., SIQUEIRA, C.L.R., FERRARI JR, J. A. Numerical Simulation of Flow Interference Between Two Circular Cylinders in Tandem and Side-by-Side Arrangements. *Journal of Fluids and Structures*, v. 15, p. 327-350, 2001.
- QIAN, Y. H., D'HUMIÈRES D., LALLEMAND, P. Lattice BGK Models for Navier-Stokes Equation. *Europhys. Lett.*, v. 17, p. 479-484, 1992.
- THOMPSON, M.C., LEWEKE, T., WILLIAMSON, C.H.K. The Physical Mechanism of Transition in Bluff Body Wakes. *Journal of Fluids and Structures*, v. 15, p. 607-616, 2001.
- WILLIAMSON, C.H.K. Evolution of a Single Wake Behind a Pair of Bluff Bodies. *J. of F. Mec.*, v. 159, p. 1-18, 1985.
- WILLIAMSON, C.H.K. Advance in Our Understanding of Vortex Dynamics in Bluff Body Wakes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 69-71, p. 3-32, 1997.