

IMPORTÂNCIA DO NÚMERO DE REYNOLDS EM ESCOAMENTOS SOBRE CILINDRO UTILIZANDO METODOLOGIA IMERSPEC

Túlio Alves Rodrigues, Universidade Federal de Uberlândia, tulio.rodrigues@ufu.br

Fabrizio Soares Bezerra, Universidade Federal de Uberlândia, fabrizio.bezerra@ufu.br

Elie Luis Martínez Padilla, Universidade Federal de Uberlândia, epadilla@ufu.br

Resumo: Neste trabalho é apresentada a análise de escoamentos incompressíveis ao redor de um cilindro circular ancorado por um sistema mola-amortecedor, para valores do número de Reynolds de 100 e 200. Apresenta-se também a validação da metodologia pseudoespectral de Fourier combinada com o método de fronteira imersa. Os resultados incluem campos de vorticidade, histórico da posição do cilindro e identificação dos padrões presentes nos diversos casos. Por meio dos resultados, pôde-se analisar como o número de Reynolds interfere na formação de estruturas, ou seja, nos tipos de estruturas formadas e no momento em que as mesmas começam a modificar de amplitude, influenciando no fenômeno de sincronização da estrutura com o escoamento, que é muito importante para compreender seu funcionamento e também evita-lo.

Palavras-chave: Pseudoespectral, Vibração induzida por vórtices, Fronteira imersa, Sincronização, Escoamento sobre cilindro.

1. INTRODUÇÃO

Escoamentos sobre corpos imersos apresentam grande importância nos estudos de engenharia, onde podemos dar ênfase para pesquisas aerodinâmicas, em aeronaves e automóveis. Devido à complexidade do fenômeno, por muito tempo utilizaram-se experimentos controlados em túneis de vento e testes de campo. Nas últimas décadas, o uso da simulação numérica vem se intensificando bastante nesse campo de estudo (Nascimento, 2014).

Quando uma estrutura está em contato com um escoamento, a mesma encontra-se submetida a uma pressão fluido-dinâmica, à qual pode deformar ou iniciar seu movimento. Na medida em que ocorre movimentação e deformação, há alteração nos campos de pressão e velocidade do escoamento alterando, assim, as forças que incidem na estrutura. Este tipo de interação é denominado interação fluido-estrutura (IFE) (Nascimento, 2016).

Neste contexto, este trabalho apresenta a modelagem e simulação bidimensional de escoamentos sobre um corpo cilíndrico, para Reynolds 100 e 200 utilizando método de fronteira imersa (MFI), que basicamente utiliza uma malha euleriana fixa em todo o domínio, acoplada a uma malha lagrangeana, que representa a interface imersa, acoplado com o método pseudoespectral de Fourier (MPF), conjunto denominado de método IMERSPEC.

2. METODOLOGIA NUMÉRICA

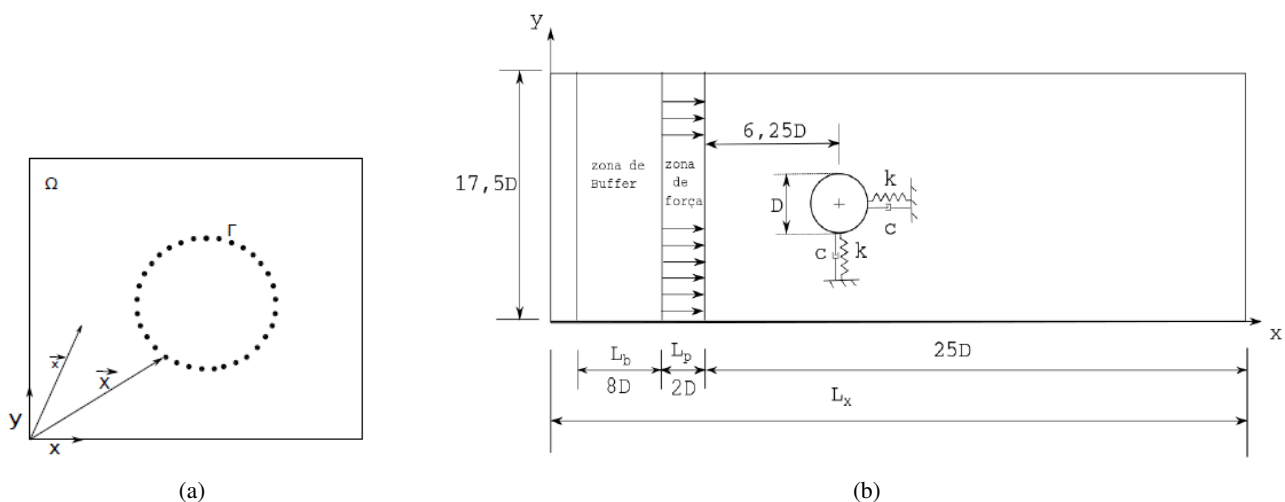


Figura 1: (a) esquema do método da Fronteira Imersa. (b) modelo físico do problema de interação fluido-estrutura com dois graus de liberdade (Nascimento, 2014).

Na solução da equação de Navier-Stokes foi utilizado o método pseudoespectral de Fourier, que consiste na transformação da mesma para o espaço espectral. Partindo disso, tem-se que o campo de velocidade pode ser escrito conforme a Eq. (1).

$$\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial t} + ik_j (\widehat{u_i * u_j}) = -ik_i \hat{P} - \nu k^2 \hat{u}_i + \hat{f}, \quad (1)$$

onde k é o número de onda, $k^2 = k_j k_j$, $\hat{u}_i$, é o vetor velocidade transformado para o espaço de Fourier, i é o número complexo $\sqrt{-1}$, P é a pressão, ν é a viscosidade cinemática e f é o termo de força. O produto de convolução $ik_j(\hat{u}_i * \hat{u}_j)$ é resolvido no espaço físico, segundo MPF. O método da projeção proposto por (Canuto et al., 2006), onde as variáveis são projetadas no plano de divergência nula, plano π , possibilita que o termo de pressão seja desacoplado da solução da velocidade. A interpolação temporal foi realizada utilizando o método de Runge-Kutta de quarta ordem otimizado de 6 passos, que une grande estabilidade a baixa dispersão e dissipação numérica. Tanto o algoritmo quanto os coeficientes associados ao método podem ser vistos em Allampalli et al. (2009).

O método da Fronteira Imersa segundo (Mittal and Iaccarino, 2005) utiliza dois domínios independentes: Lagrangiano Γ e o Euleriano Ω , sendo o lagrangeano responsável por modelar a superfície imersa e o euleriano responsável por resolver o fluido que a envolve, conforme pode-se ver na Fig.(1a). Nessa metodologia, a força é extraída diretamente da solução numérica, onde a mesma é determinada pela diferença entre as velocidade interpoladas e a velocidade física. Os domínios Lagrangeanos e Euleriano se relacionam através do termo de força f , que tem o valor máximo na interface e nulo fora dela, onde na prática utiliza-se funções de distribuição (Nascimento, 2014).

Assim, o conceito é aplicado na equação de Navier-Stokes como mostrado na Eq. (2),

$$\frac{u^{t+\Delta t} - u^* + u^* - u^t}{\Delta t} + rhs + f_x = 0, \quad (2)$$

onde rhs é a reorganização dos termos convectivos e difusivos em um tempo t , e u^* é a velocidade estimada.

O termo de força lagrangiano é dado pela função $F_x = (U_f - U^*)/(\Delta t)$, sendo U_f a condição de contorno do cilindro e U^* a velocidade interpolada. A última atualização da velocidade é dada por $u^{t+\Delta t} = u^* + f_x \Delta t = 0$.

3. PROBLEMA FÍSICO

O problema trata do escoamento sobre um cilindro rígido de diâmetro D , ancorado por um sistema mola-amortecedor com dois graus de liberdade (sendo k o coeficiente de rigidez da mola e c o coeficiente de amortecimento), Fig. (1b), onde a estrutura é composta pelo conjunto cilindro mola-amortecedor. O domínio de $35D \times 17.5D$ está composto por três subdomínios: a zona de buffer $L_b = 8.0D$, que possibilita amortecer os vórtices injetados devido ao uso da condição de periodicidade, próprio do MPF; a zona de força $L_p = 2.0D$, onde é imposta a condição de fluxo uniforme através de um campo de força, definindo a velocidade U_∞ e o domínio útil de $25D$.

4. RESULTADOS

A validação das simulações foi baseada nos parâmetros dos trabalhos de Chern et al. (2014): razão mássica $m^* = 10$; razão de amortecimento $\xi = 0$; velocidade reduzida $U_r^* = 4.0$ a 8.5 e número de Reynolds $Re = 100$, sendo 512×256 o número de nós de colocação. Da Fig. (2) observa-se a boa concordância dos resultados, para deslocamentos máximos a razão de frequências, para os dados numéricos de Chern et al. (2014) e teóricos de Roshko (1954).

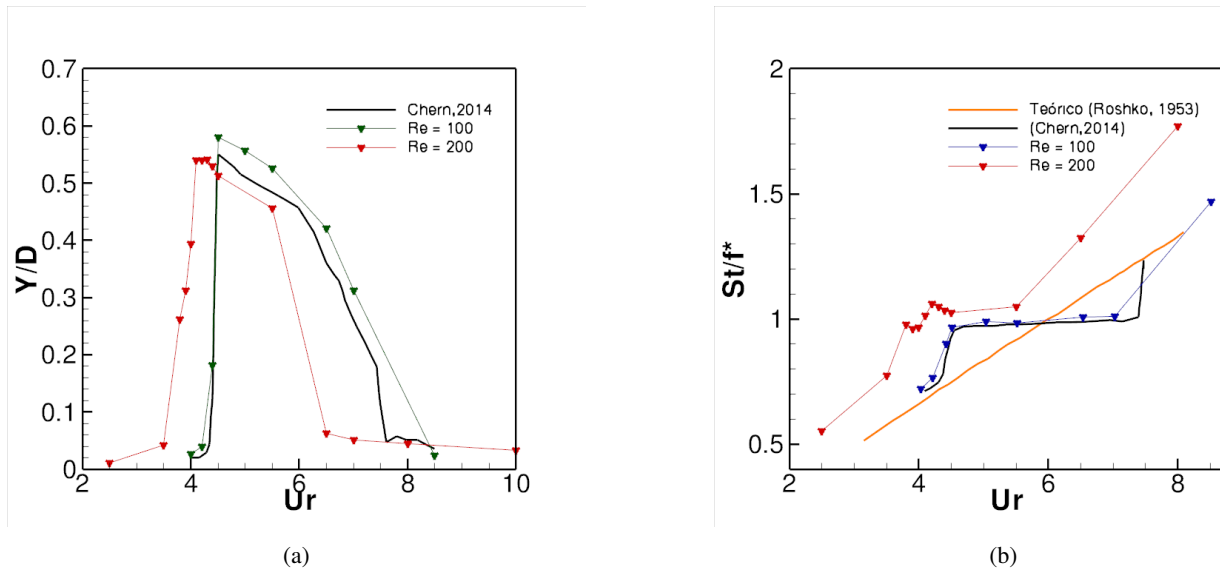


Figura 2: (a) deslocamentos máximos y versus velocidade reduzida. (b) razão de freequências versus velocidade reduzida.

Feita a validação, foi incrementado o Re , para 200. Novos parâmetros foram calculados: *Strouhal* $St = f_n D / U_\infty$ e frequência $f^* = f_n D / U_\infty$, onde o termo f_n se refere a frequência natural da estrutura e f_v é a frequência do escoamento. Pôde-se comprovar que na medida que o Re aumenta, a faixa de velocidade reduzida em que a sincronização acontece (fenômeno onde a frequência do escoamento e da estrutura se igualam) se estreita, conforme visto na Fig. (2a), além da

amplitude máxima diminuir. A diminuição da amplitude máxima também se manifesta claramente na Fig. (2b), onde a razão das frequências do escoamento (St) e da f^* indica sincronização para valores próximos de 1.

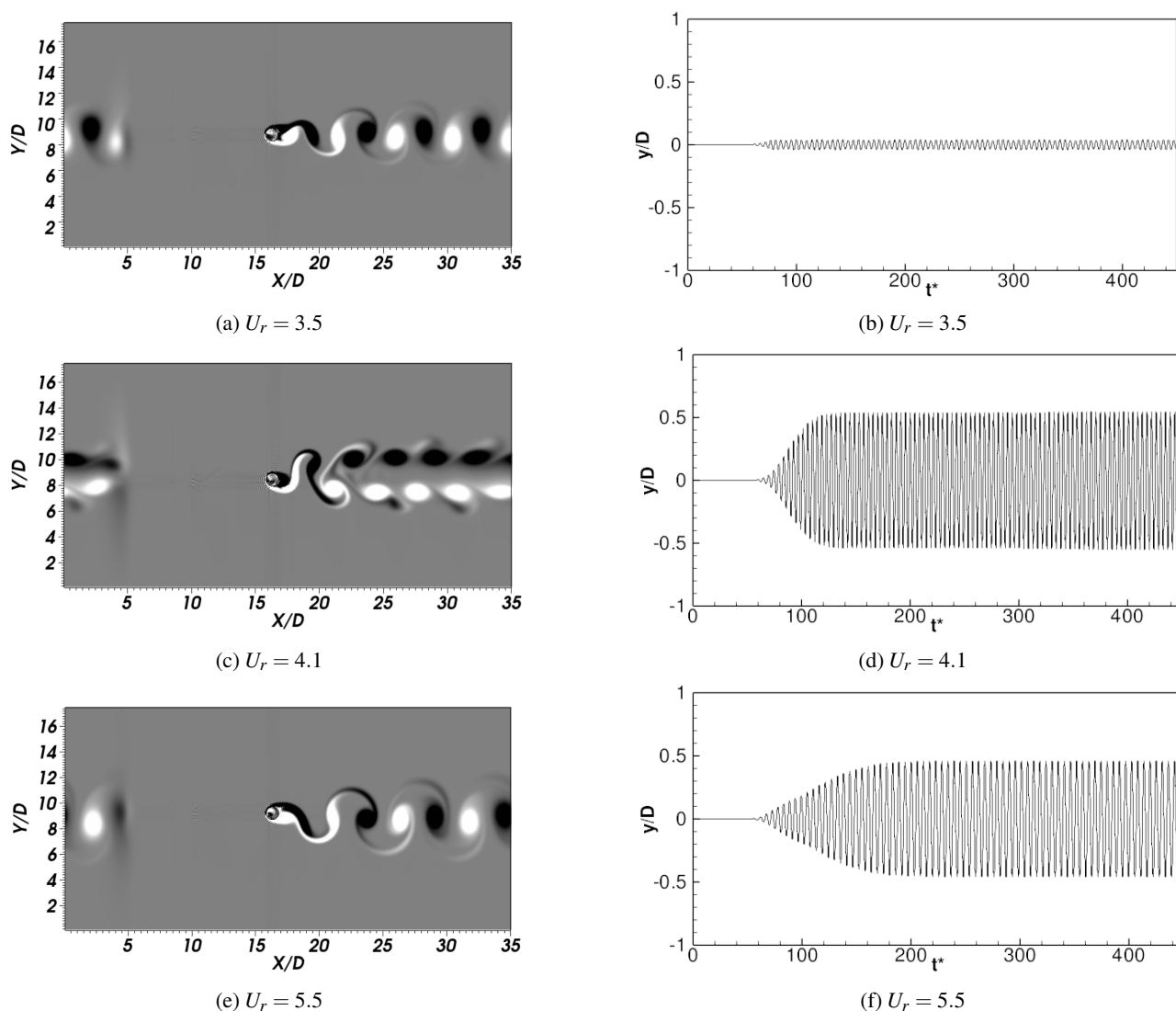


Figura 3: Campos de vorticidade para $Re = 200$ [a), c) e e)] e deslocamentos em y ao longo do tempo t^* [b), d) e f)].

É possível identificar padrões do escoamento dos tipos $2S$ e $C2S$, onde $C2S$ se apresenta geralmente para casos U_r dentro da faixa de sincronização, como observado para $Re = 200$ e $U_r = 4.1$ na Fig. (3c). Ainda na faixa de sincronização, para $Re = 200$ e $U_r = 5.5$, os padrões voltam para o tipo $2S$, característica dos casos com U_r fora da faixa de sincronização. Na figura (3), apresenta-se também o histórico do deslocamento na direção y , onde as amplitudes crescem exageradamente para o fenômeno de sincronização, em comparação com os casos em que a razão de frequências é menor que 1 (Fig. (2b)).

Outra forma de avaliar a interferência do número de Re é observando o comportamento da estrutura ao longo do tempo. Para isso, foi plotada a posição do centro do cilindro para respectiva velocidade reduzida, onde foi identificada a maior amplitude, ou seja, amplitude máxima na região de sincronização, para os respectivos valores de Re analisados. Conforme pode-se observar nas Figs. (4a) e (4b), percebe-se a característica já comentada anteriormente, onde as amplitudes máximas se reduzem na medida em que se incrementa o Re . Na faixa de sincronização, os deslocamentos do centro do cilindro descrevem trajetória cíclica no formato de 8, quando o escoamento atinge regime. Esta característica ainda é observada para $Re = 200$ (Fig. (4b)), porém apresentando um histórico de deslocamento mais aleatório, possivelmente devido ao surgimento de outros modos que acompanham a frequência fundamental do escoamento (ver Fig. (5)).

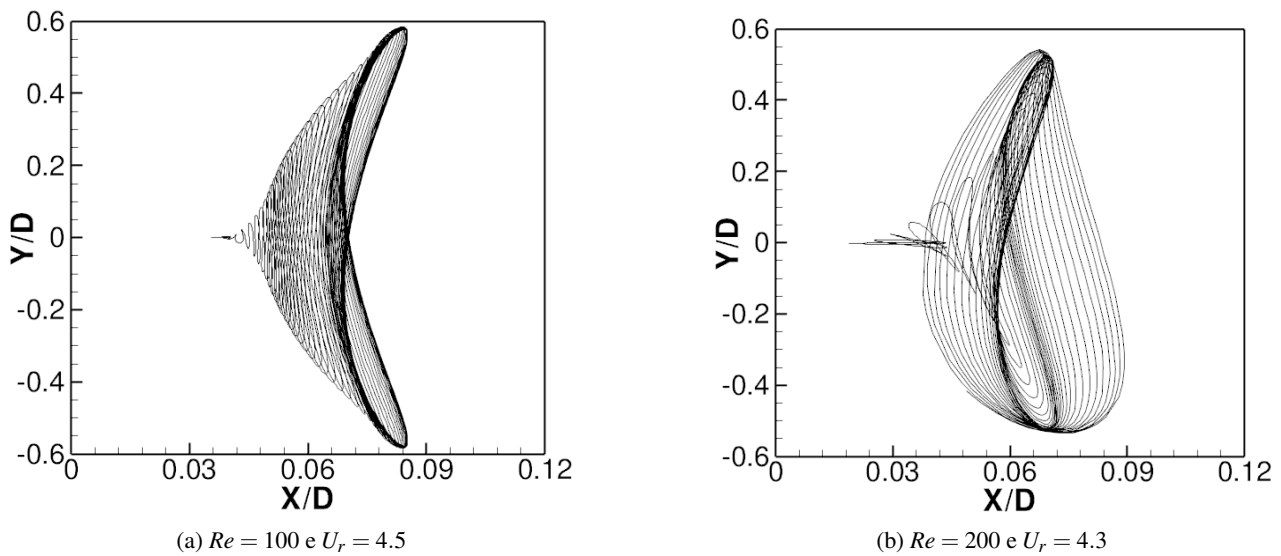


Figura 4: Histórico dos deslocamentos do centro do cilindro para diversos Re e U_r .

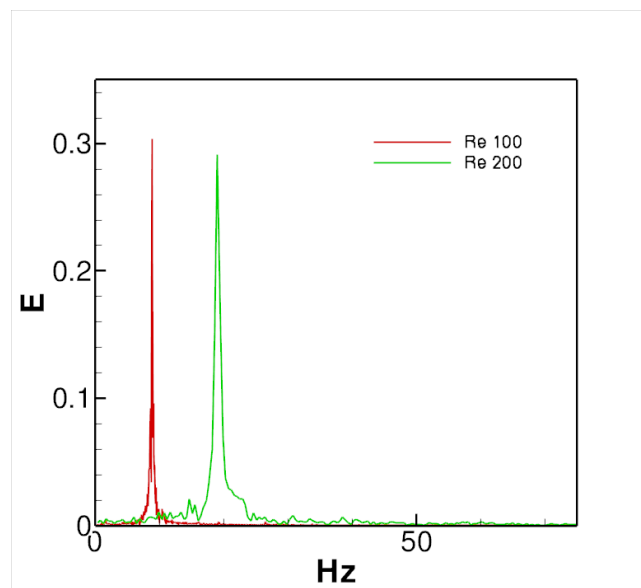


Figura 5: Frequência fundamental para diversos Re .

Outra maneira de comprovar as análises feitas neste trabalho, foi transformar os valores do coeficiente de sustentação de cada caso de sincronização, utilizando a *FFT* (*fast Fourier transform*). Observa-se na Fig. (5) que à medida que o Re foi incrementado, a amplitude máxima decai e a frequência cresce. Para o caso com $Re = 100$ e $U_r = 4.5$, observou-se uma frequência de 8.8729 Hz; para $Re = 200$ e $U_r = 4.1$, a frequência é de 19.3684 Hz.

5. CONCLUSÃO

Com base nos dados apresentados, pode-se perceber que o incremento do Re interfere diretamente na formação da esteira depois do cilindro, tanto no padrão de estruturas quanto no momento em que elas começam a surgir, conforme foi visto na Fig. (2a), ou seja, antecipando sua ocorrência e reduzindo sua amplitude máxima, à medida que o número de Reynolds aumenta.

6. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao apoio do meu orientador, professor Elie, ao meu colega Fabrizio e ao MFLAB e PETROBRAS que propiciaram o desenvolvimento desse trabalho.

7. REFERÊNCIAS

- Allampalli, V., Hixon, R., Nallasamy, M., and Sawyer, S. D. High-accuracy large-step explicit Runge-Kutta (HALE-RK) schemes for computational aeroacoustics. *Journal of Computational Physics*, 228(10):3837–3850, 2009. ISSN 00219991. doi: 10.1016/j.jcp.2009.02.015. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcp.2009.02.015>.
- Canuto, C., Hussaini, M. Y., Quarteroni, a., and Zang, T. a. *Spectral Methods Fundamentals in Single Domains*. 2006. ISBN 9783540307259. doi: 10.1007/978-3-540-30726-6.
- Chern, M. J., Kuan, Y. H., Nugroho, G., Lu, G. T., and Horng, T. L. Direct-forcing immersed boundary modeling of vortex-induced vibration of a circular cylinder. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 134: 109–121, 2014.
- Mittal, R. and Iaccarino, G. Immersed Boundary Methods. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 37(1):239–261, 2005.
- Nascimento, A. A. Escoamento sobre cilindro utilizando a metodologia IMERSPEC. (2006), 2014.
- Nascimento, A. A. *Métodos pseudoespectral de Fourier e fronteira imersa aplicados escoamentos presentes em engenharia de perfuração*. PhD thesis, Universidade Federal de Uberlândia, 2016.
- Roshko, A. On the development of turbulent wakes from vortex streets. *National Advisory Committee for Aeronautics*, page 27, 1954.
- Williamson, A. C. H K e Roshko. Vortex formation in the wake of an oscillating cylinder. *Journal of Fluids and Structures*, 2(4):355–381, 1988. ISSN 10958622. doi: 10.1016/S0889-9746(88)90058-8.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.