



INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE REYNOLDS EM ESCOAMENTOS SOBRE UM CILINDRO COM VIBRAÇÃO INDUZIDA POR VÓRTICES

Túlio Alves Rodrigues

Elie Luis Martínez Padilla

tulio.rodrigues@ufu.br

epadilla@ufu.br

Laboratório de Mecânica dos Fluidos - MFlab, Faculdade de Engenharia Mecânica - FE-MEC, Universidade Federal de Uberlândia - UFU

Av. João Naves de Ávila, 2121, Uberlândia - MG, 38408-196, Brasil

Resumo. *O presente trabalho apresenta a análise de escoamentos incompressíveis ao redor de um cilindro circular ancorado por um sistema mola-amortecedor, considerando valores do número de Reynolds de 100, 200 e 400. Apresenta-se também a validação dos resultados através de comparação com dados da literatura. A metodologia utilizada combina os métodos pseudoespectral de Fourier e o método de fronteira imersa, sendo este último método utilizado para representar o cilindro. Na discretização temporal foi utilizado o método de Runge-Kutta otimizado de quarta ordem com 6 passos e um modelo de multifocalização para análise do campo de força do método da fronteira imersa. Os resultados, baseados na solução das equações de Navier-Stokes, incluem campos de vorticidade, histórico da posição do cilindro, deslocamento máximo em função da velocidade reduzida, faixas de velocidade reduzida em que acontece o fenômeno de sincronização e identificação dos padrões presentes nos diversos casos. Por meio dos resultados, pôde-se analisar a interferência do número de Reynolds na formação de estruturas, ou seja, nos tipos de estruturas formadas e no momento em que as mesmas começam a modificar a amplitude, influenciando no fenômeno de sincronização da estrutura com o escoamento, que é de suma importância para compreender o funcionamento e também evita-lo.*

Palavras-chave: *Vibração induzida por vórtices, Pseudoespectral, Sincronização, Fronteira imersa.*

1 INTRODUÇÃO

Uma estrutura, quando em contato com um escoamento, esta submetida a uma pressão fluidodinâmica, à qual pode deformar ou iniciar o movimento da mesma. 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).

Dentro desse tipo de interação, temos o fenômeno de vibração induzida por vórtices (VIV) de uma estrutura, que consiste na interação de estruturas com o escoamento de fluidos externos a mesma. Este tem sido objeto de pesquisa em várias áreas de engenharia, como por exemplo, aeroespacial, civil e de petróleo. Para engenharia aeroespacial é de suma importância evitar que as asas das aeronaves submetidas a flutter alcancem grandes amplitudes, levando a falha dessas estruturas. Na engenharia civil, pode resultar na vibração de pontes e chaminés, graças à interações com o vento. Na de petróleo, pode ser aplicada à risers, que graças às correntes oceânicas podem levar os oleodutos a falha (Chern et al., 2014).

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). Neste contexto, este trabalho apresenta a modelagem e simulação bidimensional de escoamentos sobre um corpo cilíndrico, para Reynolds 100, 200 e 400, utilizando método de fronteira imersa (MFI), para a modelagem da geometria imersa, acoplado com o método pseudoespectral de Fourier (MPF), conjunto denominado de método IMERSPEC.

2 METODOLOGIA NUMÉRICA

2.1 Método Pseudoespectral de Fourier

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, temos que o campo de velocidade pode ser escrito da seguinte forma:

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

onde k é o número de onda, $k^2 = k_j k_j$, \widehat{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 $ik_j(\widehat{u_i * u_j})$ é resolvido no espaço físico, segundo MPF. O método da projeção (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 além de grande estabilidade, também baixa dispersão e dissipação numérica (Allampalli et al., 2009).

Temos que essa discretização possui o seguinte algoritmo:

$$\widehat{AUX}_{i-1} = \alpha_i \widehat{AUX}_{i-1} + \Delta t \widehat{AUX}_i^t, \quad (2)$$

$$\widehat{u}_{i+1} = \widehat{u}_{i+1} + \beta_i \quad (3)$$

onde $i = 1, 2, \dots, 6$ é o passo do Runge-Kutta, AUX é uma variável auxiliar e α_i e β_i são constantes, cujos valores podem ser encontrados em (Allampalli et al., 2009).

2.2 Método da Fronteira Imersa

O método da Fronteira Imersa (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. 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. (4),

$$\frac{u^{t+\Delta t} - u^* + u^* - u^t}{\Delta t} + rhs + f_x = 0, \quad (4)$$

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

O termo de força lagrangiano é dado pela seguinte função:

$$F_x = \frac{U_f - U^*}{\Delta t}, \quad (5)$$

onde U_f é a condição de contorno do cilindro, U^* é a velocidade interpolada. A última atualização da velocidade é dada pela Eq. (6), como vemos:

$$u^{t+\Delta t} = u^* + f_x \Delta t = 0. \quad (6)$$

3 PROBLEMA FÍSICO

O problema trata do escoamento sobre um cilindro rígido, de diâmetro D , ancorado por um sistema mola-amortecedor de dois graus de liberdade (definido pe rigidez k e o coeficiente de amortecimento c), Fig. 1, 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 U_∞ ; finalmente, o domínio útil de $25D$.

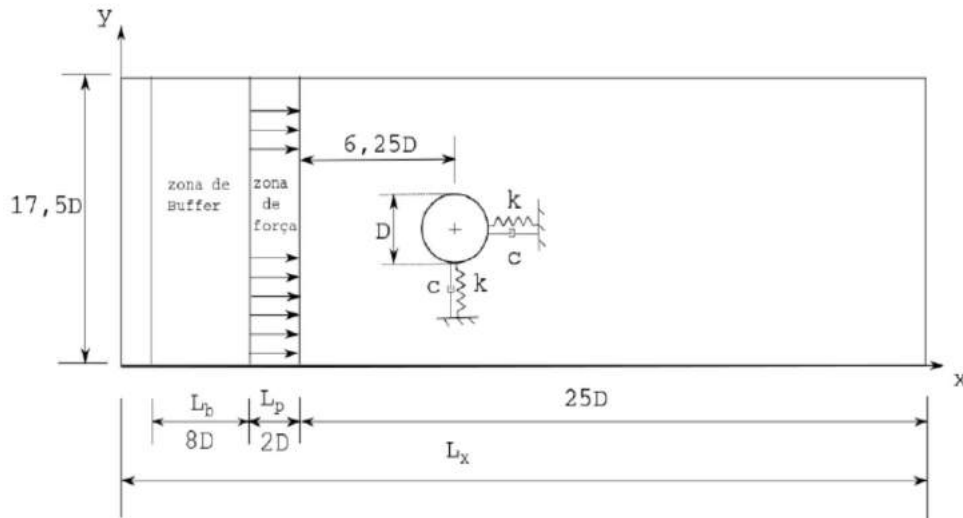


Figura 1: Esquema do problema de interação fluido-estrutura com dois graus de liberdade.

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. Vale ressaltar que o acoplamento da fronteira imersa com o método pseudoespectral, acarreta na queda da ordem de convergência de ambas as metodologias (Nascimento, 2016), obtendo para o presente trabalho quarta ordem de convergência. Da Fig.2 observa-se a boa concordância dos resultados, para deslocamentos máximos e razão de frequências, em relação aos dados numéricos de Chern et al., (2014) e teóricos de Roshko, (1954).

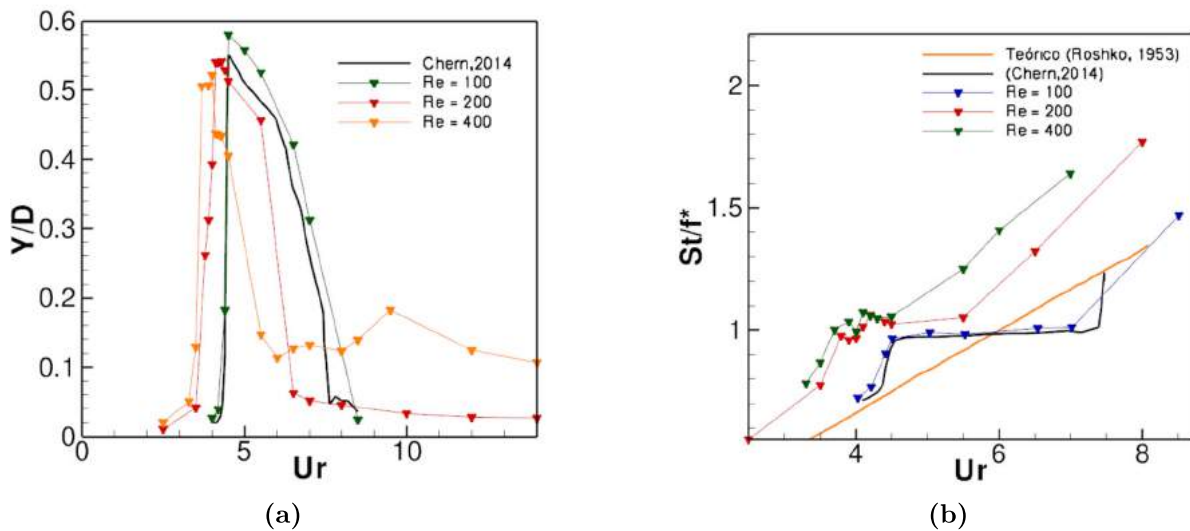


Figura 2: Deslocamentos máximos y: (a), Razão variação das frequências pela velocidade reduzida: (b).

Realizada a validação, foi incrementado o número de Re para 200 e 400. Novos parâmetros foram calculados: *Strouhal* $S_t = f_v D / u_\infty$ 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. 2(a), além da amplitude máxima diminuir. A característica comentada antes também se manifesta claramente na Fig. 2(b), onde a razão das frequências do escoamento (St) e da f^* indica sincronização para valores próximos de 1.

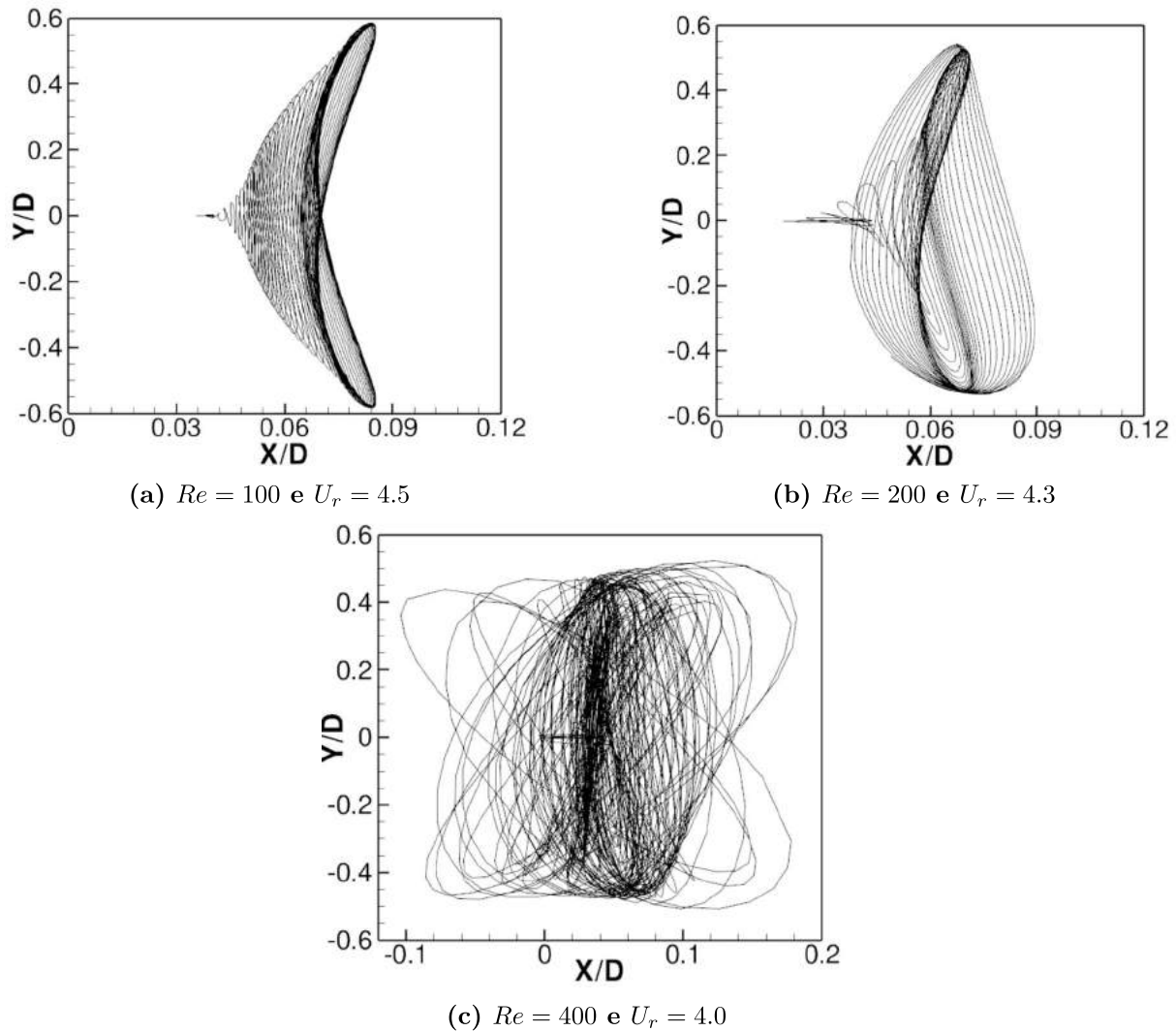


Figura 3: Histórico dos deslocamentos do centro do cilindro para diversos Re e U_r .

Outra forma de avaliarmos 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. 3(a), 3(b) e 3(c), 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 não é mais observada para $Re = 400$ (Fig. 3c), possivelmente devido ao

surgimento de outros modos que acompanham a frequência fundamental do escoamento (ver Fig. 7).

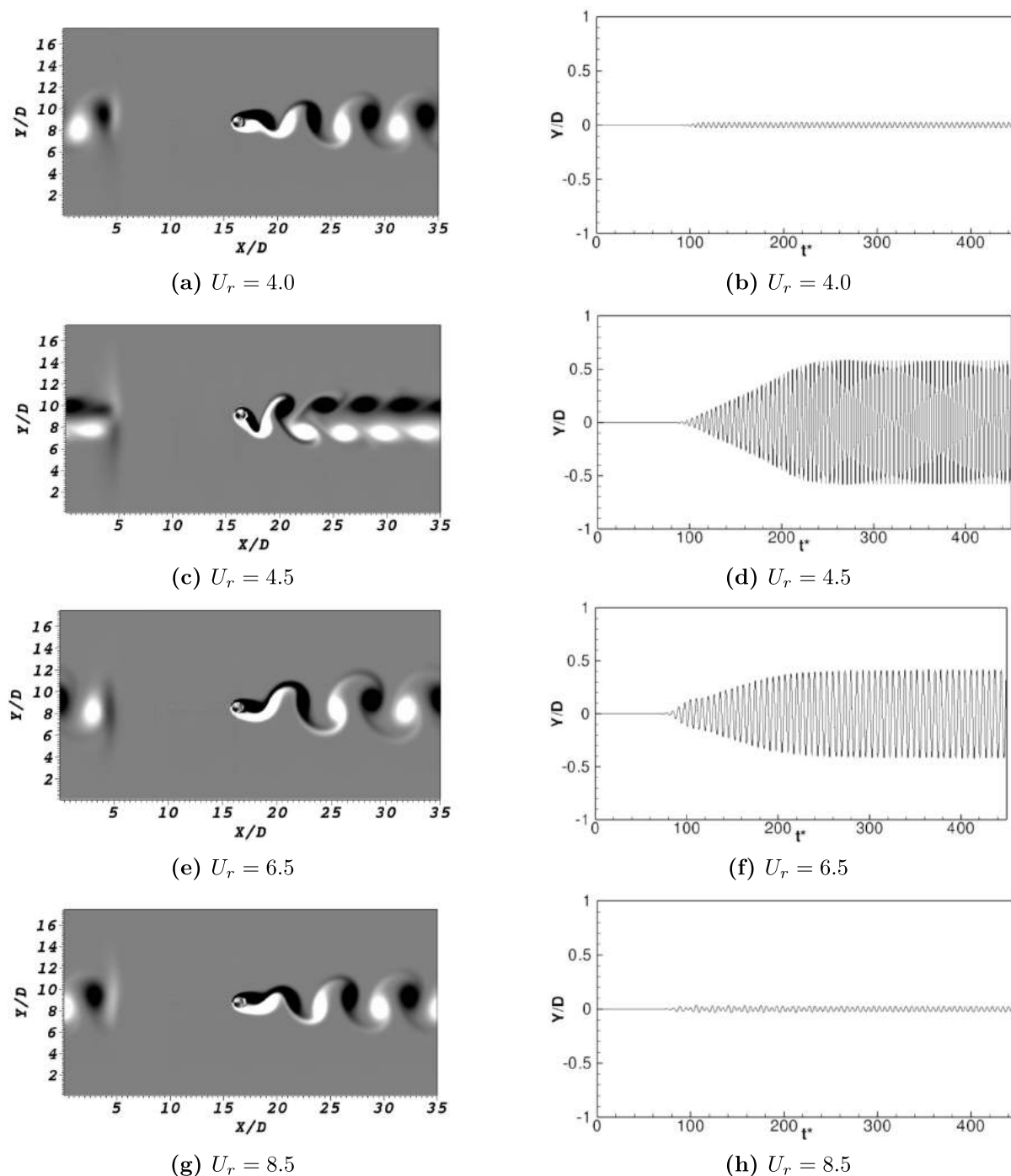


Figura 4: Campos de vorticidade para $Re = 100$ [a), c), e) e f)] e deslocamentos em y ao longo do tempo t^* [b), d), f) e h)].

Para analisarmos o padrão dos escoamentos, foi utilizado o campo de vorticidade, onde a coloração branca representa valores positivos e a coloração preta representa valores negativos de vorticidade. Pode-se perceber que é possível identificar três tipos de padrões de escoamento, segundo Williamson (1988), que são os tipos $2S$, $C2S$ e $P + S$. O padrão

$2S$ geralmente se apresenta para casos de U_r que precedem a faixa de sincronização, como observado para valores de $Re = 100, 200, e 400$, nas Figs. 4(a), 5(a) e 6(a) respectivamente.

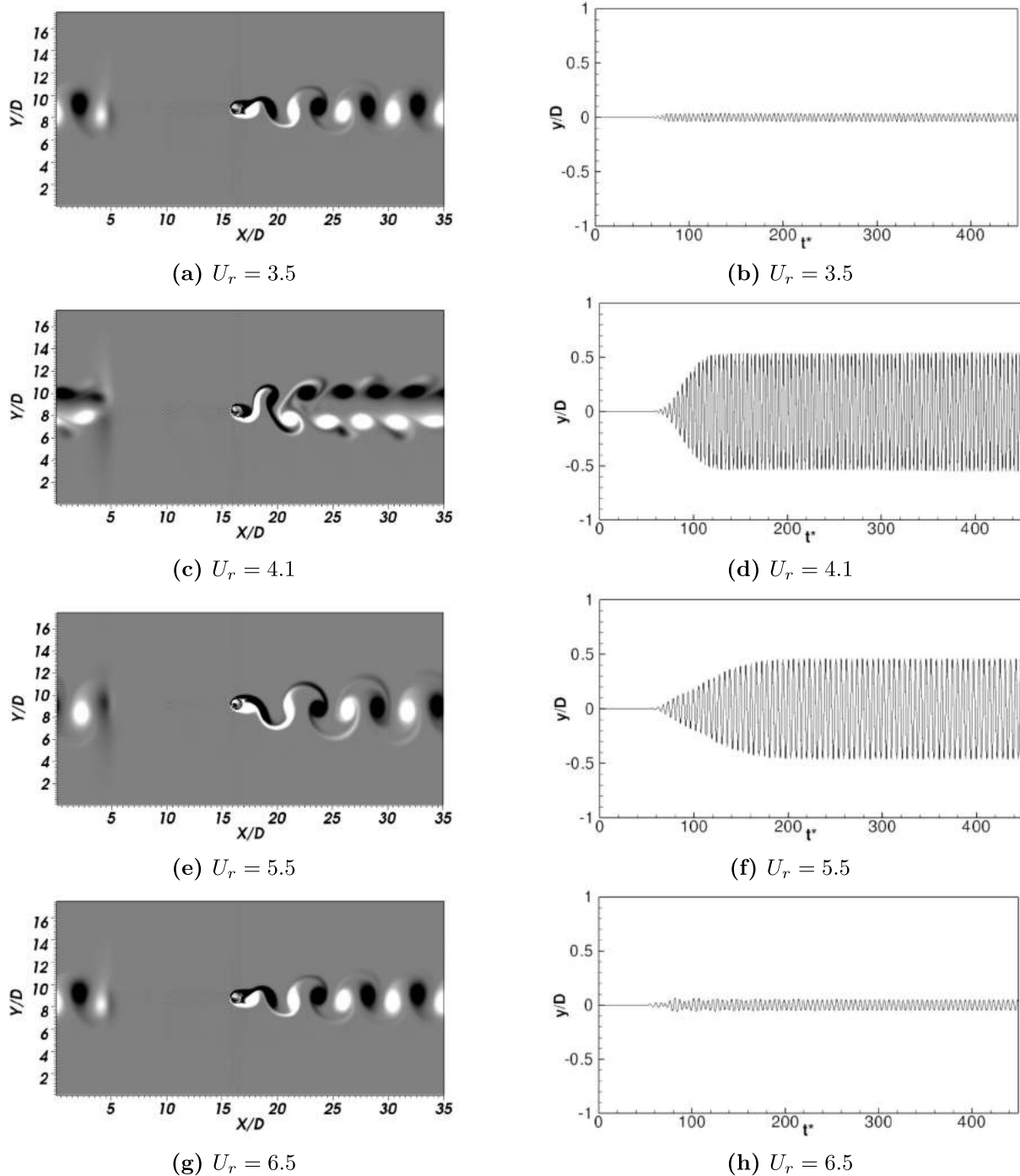


Figura 5: Campos de vorticidade para $Re = 200$ [a), c), e) e f)] e deslocamentos em y ao longo do tempo t^* [b), d), f) e h)].

O padrão $2S$ volta a aparecer dentro da faixa de sincronização para casos em que a amplitude começa a decair, como mostrado nas Figs. 4(e), 5(e) e 6(g), para $Re = 100, 200 e 400$ respectivamente. O padrão $C2S$ se apresenta geralmente para casos de

U_r dentro da faixa de sincronização e próximos do caso de máxima amplitude, como observado para $Re = 100, 200, e 400$, nas Figs. 4(c), 5(c), 6(c,d), respectivamente.

Os casos com $Re = 400$ apresentam padrão particular que muda ao longo do tempo, intercalando padrões $C2S$ e $P + S$ ($U_r = 3.9$ e 4.0), como registrado por Singh e Mittal (2005) para casos com $Re > 300$.

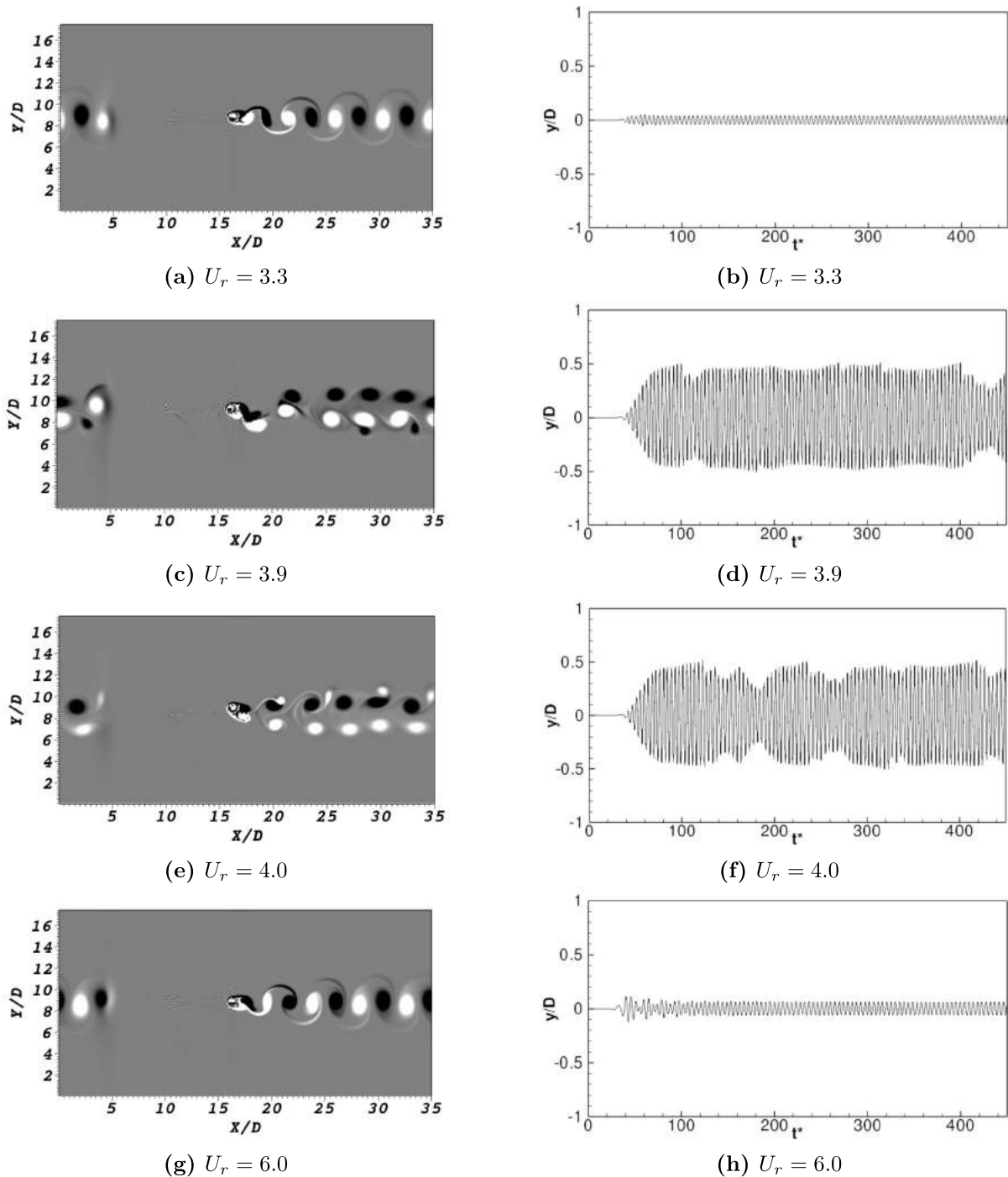


Figura 6: Campos de vorticidade para $Re = 400$ [a), c), e) e f)] e deslocamentos em y ao longo do tempo t^* [b), d), f) e h)].

Para todos os valores de Re analisados o histórico do deslocamento na direção y , como

por exemplo para $Re = 400$ nas Figs. 6(b) e 6(d), apresenta amplitudes que crescem exageradamente à medida que ocorre o fenômeno de sincronização. Para $Re = 400$ a amplitude das oscilações associadas ao fenômeno de sincronização não se apresentam uniformes, como para os outros Re , devido à modificação no transiente dos padrões, que leva a presença de outros modos de oscilação.

Outra forma 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 que à medida que o Re foi incrementado, a amplitude máxima decaiu 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; para $Re = 400$ e $U_r = 4.0$, a frequência é de 38,8575 Hz.

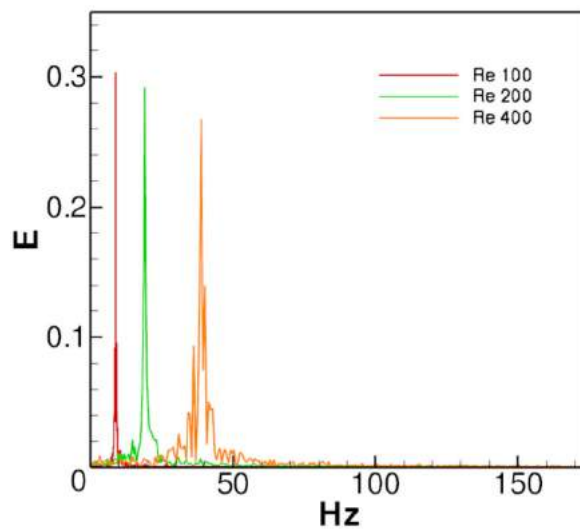


Figura 7: Frequência fundamental para diversos Re .

5 CONCLUSÃO

Podemos concluir que o incremento do número de Re tem papel fundamental na dinâmica do movimento do cilindro e nas estruturas que se formam após o mesmo. Conforme foi mostrado no trabalho, essa influência pôde-se ser comprovada por meio das estruturas formadas que altera o padrão das mesmas e incrementa a frequência de desprendimento à medida que o Re aumenta. A faixa em que o fenômeno de sincronização se manifesta se desloca para valores menores de U_r conforme o Re aumenta, resultando também em menores amplitudes de oscilação máxima.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao apoio dos professores Dra. Andreia Aoyagui Nascimento e Dr. Felipe Pamplona Mariano, autores do código computacional utilizado nesse trabalho, além da FAPEMIG, CAPES, UFU e PETROBRAS que direta e indiretamente propiciaram o desenvolvimento desse trabalho.

BIBLIOGRAFIA

- Vasanth Allampalli, Ray Hixon, M. Nallasamy, and Scott D. Sawyer. High-accuracy large-step explicit Runge-Kutta (HALE-RK) schemes for computational aeroacoustics. *Journal of Computational Physics*, 228(10):3837–3850, 2009.
- C. Canuto, M. Y. Hussaini, a. Quarteroni, and T. a. Zang. *Spectral Methods Fundamentals in Single Domains*. 2006. ISBN 9783540307259. doi: 10.1007/978-3-540-30726-6.
- Ming Jyh Chern, Yu Hao Kuan, Giri Nugroho, Guan Ting Lu, and Tzyy Leng Horng. Direct-forcing immersed boundary modeling of vortex-induced vibration of a circular cylinder. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 134:109–121, 2014.
- Rajat Mittal and Gianluca Iaccarino. Immersed Boundary Methods. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 37(1):239–261, 2005.
- Andreia Aoyagui Nascimento. Escoamento sobre cilindro utilizando a metodologia IMER-SPEC. (2006), 2014.
- Andreia Aoyagui Nascimento. *Métodos pseudoespectral de Fourier e fronteira imersa aplicados escoamentos presentes em engenharia de perfuração*. PhD thesis, Universidade Federal de Uberlândia, 2016.
- Anatol Roshko. On the development of turbulent wakes from vortex streets. *National Advisory Committee for Aeronautics*, page 27, 1954.
- A. Williamson, 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.