



MODELAGEM COMPUTACIONAL DO FENÔMENO DE *LOCK-IN* EM UM CILINDRO EM VIBRAÇÃO LIVRE

Gabriel Freguglia Barros

Patricia Habib Hallak

gabriel.barros@engenharia.ufjf.br

patricia.hallak@ufjf.edu.br

Universidade Federal de Juiz de Fora

Rua José Lourenço Kelmer, S/n - Martelos, Juiz de Fora - MG, 36036-330, Brasil

Resumo. *O objetivo do presente estudo é observar o fenômeno aeroelástico de 'lock-in' relacionado ao desprendimento cadenciado de vórtices em um cilindro circular submetido a um escoamento de um fluido. A primeira análise feita apresenta o cilindro fixo, com condição de contorno 'no-slip', a fim de se extrair o número de Strouhal do sistema e os coeficientes aerodinâmicos para Re entre 60 e 120. As análises subsequentes são Interações Fluido-Estrutura, onde o cilindro agora apresenta um grau de liberdade não-restrito no sentido transversal ao fluido. As simulações são feitas para várias velocidades de incidência do fluido, na faixa correspondente à ressonância com o desprendimento dos vórtices. O escoamento apresenta Re entre 50 e 120, de forma que a frequência natural do cilindro fosse próxima à frequência de desprendimento de vórtices para $Re = 100$. As equações governantes para o fluido são as de Navier-Stokes para escoamentos incompressíveis e o cilindro tem comportamento elástico com baixo amortecimento estrutural. Utilizou-se o software comercial ABAQUS e seus pacotes CFD (Computational Fluid Dynamics) e Standard. Os resultados são comparados com os correspondentes valores obtidos em demais trabalhos, realizados em simulações computacionais ou em ensaios em túneis de vento.*

Keywords: *Interação Fluido-Estrutura, Lock-in, Dinâmica dos Fluidos Computacional*

1 INTRODUÇÃO

Os vórtices são turbilhões na esteira do escoamento do fluido causados pelo desprendimento da camada limite na superfície do corpo, a partir do gradiente de velocidades nesta camada e da geometria do corpo imerso no fluido. O desprendimento pode ser dado de forma cadenciada ou aleatória, dependendo diretamente do número de Reynolds do escoamento. Este comportamento, visualmente descrito na Fig. 1, é também conhecido por esteira de Van Kármán.

Uma importante consequência do desprendimento dos vórtices é que, se estes ocorrerem próximos a uma das frequências naturais da estrutura, vibrações indesejadas no sentido transversal ao vento podem surgir. Desta forma, este é um fenômeno que vem sendo amplamente estudado nas últimas décadas. Com o auxílio da dinâmica dos fluidos computacional, dos métodos numéricos e com o desenvolvimento de processadores e máquinas mais eficazes, esse fenômeno pode ser modelado, visualizado e estudado de forma computacional.



Figura 1: Desprendimento de vórtices já desenvolvidos para um cilindro fixo com coeficiente de Reynolds igual a 150. Retirada de Williamson (1996).

Um aspecto interessante desse comportamento é o fenômeno de sincronização de frequências (ou *lock-in*). Neste, a resposta da estrutura acontece em duas frequências, a de desprendimento de vórtices (f_s) e a natural da estrutura (f_n). Sabe-se ainda que, na faixa em que as duas frequências são próximas, ocorre a captura dos vórtices, que passam a descolar na própria frequência natural da estrutura. A Fig. 2, retirada e adaptada de Blevins (2001), é uma ilustração desse comportamento, onde, na figura superior, representa-se a variação das amplitudes das vibrações com a velocidade reduzida do fluido (gráfico adimensional) e na inferior, a relação f_s/f_n para a mesma faixa.

O objetivo deste trabalho é o de reproduzir computacionalmente este fenômeno para um cilindro circular com Re entre 50 e 120. As simulações foram feitas no programa ABAQUS e os resultados são comparados com a literatura.

2 Equações Governantes

Para a modelagem computacional do problema, deve-se compatibilizar o movimento da estrutura, em referencial lagrangeano, ao do fluido em referencial euleriano. Para tal, propõe-se uma descrição mista conhecida como referencial lagrangiano-euleriano arbitrário (*ALE - Arbitrary Lagrangean Eulerian*) proposto por Nomura and Hughes (1995).

O referencial *ALE* auxilia nas variações da estrutura da malha, impedindo que haja deformação excessiva e eventual distorção dos elementos.

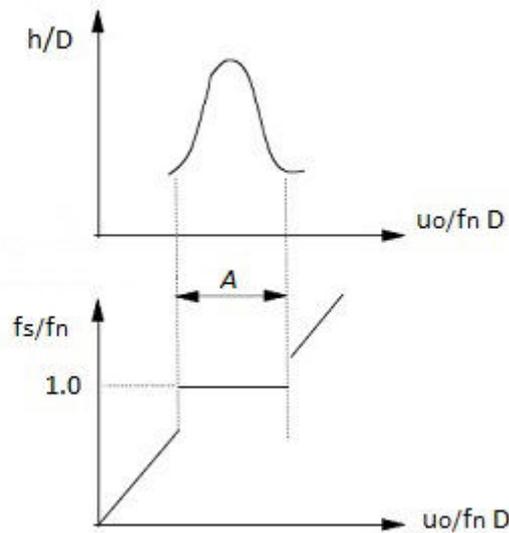


Figura 2: Descrição de um fenômeno de Lock-in através de gráficos relacionando a velocidade reduzida do escoamento com a amplitude adimensional (gráfico superior) e com a relação f_s/f_n (gráfico inferior). A faixa "A" indica a região onde a sincronização de frequências ocorre. No gráfico superior, nota-se um crescimento de amplitude ao se aproximar da velocidade reduzida cuja frequência de desprendimento de vórtices apresenta a relação $f_s/f_n = 1$ e uma redução de amplitude após este ponto. No gráfico inferior, nota-se que a frequência de desprendimento de vórtices passa a ser a frequência natural da estrutura na faixa em questão. Retirada e adaptada de Blevins (2001).

2.1 Equações do fluido

Sendo o escoamento modelado como incompressível e com viscosidade constante, o problema é regido pelas equações de Navier-Stokes (1) e (2). As equações são descritas no referencial lagrangiano euleriano arbitrário, onde as propriedades do fluido são consideradas funções do tempo e do espaço. O problema é modelado em um domínio ω e fronteira τ contendo nde dimensões no espaço Euclidiano.

Na forma não-conservativa, ou seja, considerando pressão e velocidades como variáveis primitivas, em coordenadas cartesianas e usando a notação de somatório: $a = 1, \dots, nde$ e $b = 1, \dots, nde$ as equações são:

- Equação de Conservação da Quantidade de Movimento (ALE):

$$\rho \left[\frac{du_a}{dt} + (v_b) \frac{\partial u_a}{\partial x_b} \right] - \frac{\partial \tau_{ab}}{\partial x_b} + \frac{\partial p}{\partial x_a} = 0 \quad (1)$$

- Equação da Conservação de Massa:

$$\rho \frac{\partial u_a}{\partial x_a} = 0 \quad (2)$$

Nessas equações, ρ é a massa específica do fluido, $\tau_{ab} = \mu \left(\frac{\partial u_a}{\partial x_b} + \frac{\partial u_b}{\partial x_a} \right)$ corresponde à tensão viscosa (com μ sendo a viscosidade do fluido), u_a são as componentes de velocidade do escoamento, p é a pressão e f_a são as componentes de forças inerciais por unidade de volume

no corpo. A velocidade $v_b = u_b - w_b$ é a velocidade convectiva aparente, onde w , que é a velocidade do observador (nó da malha computacional) é definida, convenientemente, para ajustar a transição entre os referenciais euleriano (fluido) e lagrangeano (contorno da estrutura).

As equações diferenciais apresentadas exigem condições de fronteira para a sua resolução. Para tal, são prescritas velocidades e tensões de superfície, nas fronteiras Γ_{ua} e Γ_{ta} , respectivamente, de forma que $\Gamma_{ua} \cup \Gamma_{ta} = \Gamma$ e $\Gamma_{ua} \cap \Gamma_{ta} = 0$.

2.2 Equações da Estrutura

O desprendimento de vórtices na camada limite gera forças periódicas, que podem ser decompostas em duas componentes, uma na direção do vento (arrasto) e outra na direção transversal ao vento (sustentação). No presente estudo, o corpo, o qual está sujeito a essas forças, é cilíndrico e rígido. Segundo Blevins (2001), a equação de movimento para o sistema amortecido é:

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = \frac{1}{2}\rho u_o^2 DC_L \text{sen}(\omega_s t) \quad (3)$$

Nessa equação, D é o diâmetro do cilindro, C_L , o coeficiente de sustentação, ω_s , a frequência angular de desprendimento de vórtices, t , o tempo, F_L , a força de sustentação por unidade de comprimento do cilindro, m é a massa do corpo, c o amortecimento e k a rigidez e \dot{y} e \ddot{y} a primeira e segunda diferenciações no tempo do deslocamento transversal, respectivamente.

3 Modelagem

A modelagem consiste em um domínio computacional contendo fluido em escoamento e um cilindro rígido em seu interior. O domínio computacional apresenta as dimensões de 28 m x 16 m, e o cilindro, um diâmetro unitário, conforme indica a Fig. 3. A malha utilizada apresenta a discretização de 53180 nós e 26291 elementos e a configuração não-estruturada.

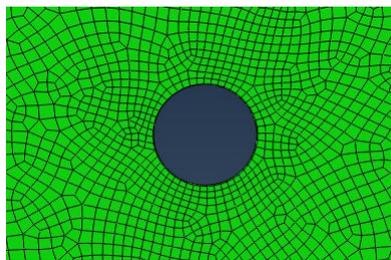


Figura 3: Representação dos arredores do cilindro posicionado no domínio computacional preenchido com fluido, já discretizado por uma malha não-estruturada.

O trabalho é dividido em dois grupos de simulações. O primeiro consiste na simulação com o cilindro restrito em todos os seus graus de liberdade, a fim de se obter seus coeficientes aerodinâmicos. Após esta etapa, o segundo grupo de simulações é iniciado, através de interações fluido-estrutura, acoplando o movimento da estrutura ao do fluido sobre uma superfície comum. Nessas, o cilindro tem seu deslocamento transversal liberado e variam-se as velocidades de incidência do fluido, de forma a garantir o fenômeno de sincronização de frequências.

O sistema dinâmico apresenta massa de 153,3524 kg, rigidez de 175,5818 kg/s² e coeficiente de amortecimento de 1,92 kg/s.

4 Resultados

4.1 Análise Aerodinâmica

Na análise aerodinâmica, o cilindro permanece fixo (todos os graus de liberdade restritos), a fim de se obter os coeficientes de arrasto médio (\bar{C}_D), as flutuações do coeficiente de sustentação (C'_L) e o de Strouhal (St). Estes resultados são apresentados e comparados com os da literatura na Tabela 1. O histórico do coeficiente de sustentação (Cl) e o seu espectro de frequências para $Re = 100$ estão ilustrados nas Fig. 4. Nota-se a presença, única e exclusiva, da frequência de desprendimento de vórtices, e com isso, o valor do número de Strouhal.

Tabela 1: Comparação dos coeficientes da análise aerodinâmica com os resultados de Placzek et al. (2009) e demais resultados da literatura. Legenda: ⁽¹⁾ Franke et al. (1990), ⁽²⁾ Engelman and Jamnia (1990).

Re	Presente trabalho			Placzek et al. (2009)			Demais resultados da literatura
	St	C'_L	\bar{C}_D	St	C'_L	\bar{C}_D	\bar{C}_D
60	0,14	0,11	1,45	0,139	0,1	1,45	-
80	0,15	0,31	1,62	0,16	0,25	1,41	1,35 ⁽¹⁾
100	0,17	0,35	1,45	0,17	0,35	1,38	1,41 ⁽²⁾
120	0,18	0,45	1,4	0,18	0,42	1,36	-

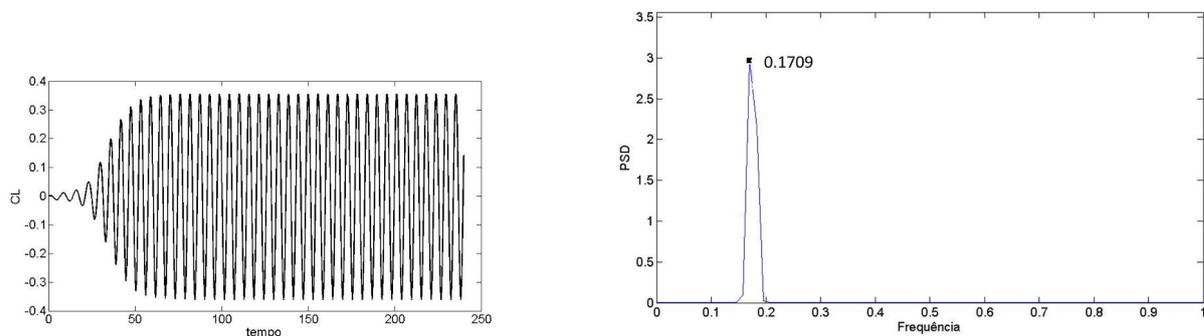


Figura 4: Análise do sinal da força de sustentação no domínio do tempo e da frequência na análise aerodinâmica para $Re = 100$.

4.2 Análise Aeroelástica

Tomando o valor do St obtido da análise aerodinâmica, afere-se o valor da velocidade crítica para a ressonância com o desprendimento cadenciado de vórtices. Nas análises aeroelásticas, a simulações foram feitas para a velocidade crítica, o que corresponde ao valor de $Re = 100$ e para valores próximos a velocidade crítica, ou seja, $Re = 50, 60, 80$ e 120 . A Fig. 5 apresenta os resultados das simulações em termos das amplitudes de deslocamento do cilindro para os propostos valores de Re . Observa-se maiores amplitudes na ressonância, ou seja, para $Re = 100$ e uma boa correlação com o primeiro gráfico da Fig. 2

Na Tabela 2 apresentam-se as frequências observadas nos espectros dos deslocamentos verticais em função dos valores de Re . Nota-se que próximo à ressonância ($Re = 80$ e $Re = 100$) há uma única frequência dominante, que é a natural da estrutura ($f_n = 0,17Hz$). Para a faixa das outras velocidades observa-se o surgimento concomitante de duas frequências na resposta; a natural da estrutura e a relacionada ao desprendimento de vórtices (f_s) e, conseqüentemente, ao número de St . Na Fig.6 é possível ver os espectros de frequência para as respostas de $Re = 50, 100$ e 120 , respectivamente. Nesses espectros, a frequência de desprendimento de vórtices é apresentada na forma dimensional.

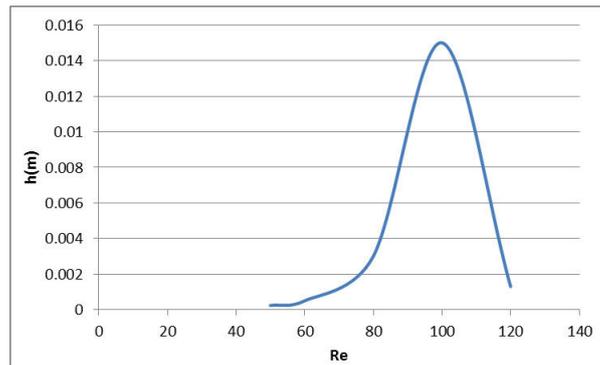


Figura 5: Variação das amplitudes dos deslocamentos verticais (h) em função de Re .

Tabela 2: Frequências dos sinais de deslocamentos verticais.

Re	f_n	f_s
50	0,17	0,14
60	0,17	0,12
80	0,17	-
100	0,17	-
120	0,17	0,19

5 Considerações finais

O presente trabalho teve por objetivo a simulação computacional do fenômeno de lock-in em um cilindro circular com Re entre 50 e 120. Para tal, o programa comercial Abaqus foi utilizado.

Os resultados obtidos para as simulações aerodinâmicas apresentaram similaridade com os da literatura. Nas simulações aeroelásticas, nota-se uma boa correlação dos resultados em termos das amplitudes de vibração, ficando o deslocamento vertical máximo próximo à ressonância. Observa-se também que, pra velocidades próximas à ressonância, ocorre uma frequência dominante no espectro das respostas em deslocamentos, enquanto que para velocidades mais afastadas da ressonância, isto é, para $Re = 50, 60$ e 120 , há duas frequências dominantes, uma referente ao desprendimento dos vórtices e outra a da estrutura. Tal comportamento caracteriza o fenômeno de *lock-in*.

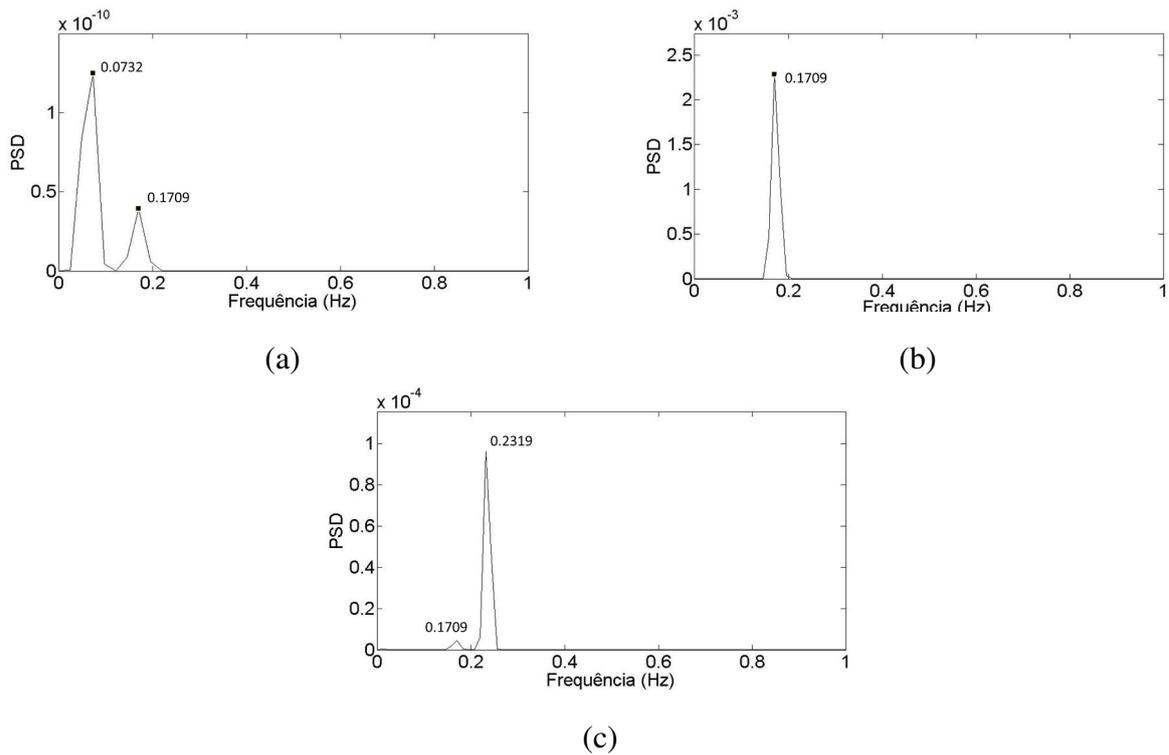


Figura 6: Espectros de frequência dos deslocamentos verticais.(a) $Re = 50$ (onde f_s é inferior ao valor de ressonância), (b) $Re = 100$ (onde f_s é igual ao valor de ressonância) e (c) $Re = 120$ (onde f_s é superior ao valor de ressonância)

Conclui-se o presente artigo apresentou os resultados esperados, seguindo de modo satisfatório a teoria ao qual foi confrontado, embora alguns aspectos inerentes à modelagem computacional adotada mereçam ser melhor estudados. Tal fato motiva os autores do presente trabalho a continuarem suas pesquisas na área.

Por fim, apesar de ocasionais erros provenientes da modelagem, é possível concluir que as simulações trazem resultados e comportamentos próximos aos da literatura, comprovando a eficácia do software para este tipo de modelagem.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem às agência da fomento Capes, CNPq (projeto de pesquisa 305175/2013) e Fapemig (projeto de pesquisa TEQ APQ 00103-12 e auxílio à participação no evento) pelos apoios financeiros.

7 Bibliografia

- Blevins, R.D. 2001. *Flow Induced Vibrations*. Malabar, Florida: Krieger Publishing Company.
- Engelman, M. S. and M.-A. Jamnia. 1990. Transient flow past a circular cylinder: A benchmark solution. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*,11(7):985-1000.

Franke, R., W. Rodi, and B. Schönung. 1990. Numerical calculation of laminar vortex shedding flow past cylinders. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 35(21):237 – 257.

Hallak, P. H. 2002. *Parâmetros Aeroelásticos para Pontes via Fluidodinâmica Computacional*. PhD thesis. Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE/UFRJ.

Nomura, T. and T. J. R. Hughes. 1995. An arbitrary lagrangian-eulerian finite element method for interaction of fluid and a rigid body. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 95(24):115 – 138.

Placzek, A., J. F. Sigrist, and A. Hamdouni. 2009. Numerical simulation of an oscillating cylinder in a cross-flow at low reynolds number: Forced and free oscillations. *Computers & Fluids*, 38(20):80 – 100.

Williamson, C. H. K. 1996. Vortex dynamics in the cylinder wake. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 28(63):477– 539.