

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE VÓRTICES DISCRETOS PARA O ESTUDO DE ESCOAMENTOS COM INTERFERÊNCIA ENTRE FRONTEIRAS SÓLIDAS: EFEITOS DE RUGOSIDADE SUPERFICIAL E DE VIBRAÇÃO ESTRUTURAL (PARTE 1 – REGIMES DE FORMAÇÃO DE VÓRTICES COM BAIXA INFLUÊNCIA DO EFEITO SOLO)

Juliano de Souza Zarinello Júnior¹ (IC), Prof. Dr. Luiz Antonio Alcântara Pereira¹

¹Universidade Federal de Itajubá.

Palavras-chave: Corpo Rombudo. Vibração estrutural. Efeito Solo. Regime de *lock-in*. Método de vórtices discretos.

Introdução

O estudo da interação fluido-estrutura constitui uma área de grande interesse para projetos de engenharia envolvendo escoamentos. O presente trabalho aborda este tema por meio de um estudo numérico-computacional de escoamentos ao redor de um cilindro circular que vibra forçadamente na mesma direção do escoamento e próximo a uma superfície plana. A análise se concentra na investigação do fenômeno de atrelagem síncrona entre a frequência de vibração da estrutura e a frequência de emissão de vórtices. Os efeitos de rugosidade superficial estão em fase final de desenvolvimento e não serão apresentados neste trabalho. No entanto, assim que as análises forem concluídas os resultados serão registrados em pesquisa próxima do bolsista, uma vez que o mesmo continua trabalhando no grupo de pesquisa.

A compreensão aprofundada de tais fenômenos é de fundamental importância para diversas aplicações práticas da engenharia. Em projetos de dutos e cabos submarinos, por exemplo, a interação do escoamento com a estrutura vibratória próxima ao leito marinho pode induzir forças instáveis, levando à fadiga do material e a falhas estruturais. Do ponto de vista científico, a análise conjunta dos efeitos combinados de vibração, rugosidade e da proximidade de uma fronteira (efeito solo) ainda representa um campo com lacunas a serem preenchidas, o que motiva a realização desta pesquisa e a sequência do trabalho.

Neste contexto, o objetivo geral deste trabalho é analisar o comportamento do escoamento ao interagir com o cilindro em diferentes frequências de vibração próximo à fronteira sólida. Para tal, estabelece-se como objetivo específico principal a classificação dos diferentes regimes de formação e desprendimento de vórtices resultantes dessa interação.

Para alcançar os objetivos propostos, a metodologia

adotada baseia-se em simulação numérico-computacional via Método dos Vórtices Discretos para a análise do campo de vorticidades combinado ao Método dos Painéis para a representação das duas fronteiras sólidas utilizadas. O procedimento da pesquisa foi estruturado em quatro etapas principais: primeiramente, a implementação do modelo numérico; em seguida, a definição dos parâmetros para os casos a serem simulados, variando-se a frequência de vibração do cilindro; posteriormente, a execução das simulações computacionais, com o auxílio de processamento paralelo (OpenMP) para otimização do tempo de cálculo; e, por fim, a análise dos resultados obtidos para classificar os padrões de escoamento e os regimes de formação de vórtices e sugestões para trabalhos futuros

Metodologia

O modelo de vibração estrutural considera a superfície plana como sendo referencial inercial, a partir do qual força-se o cilindro de seção circular a vibrar forçadamente na mesma direção do escoamento incidente, veja a Figura 1.

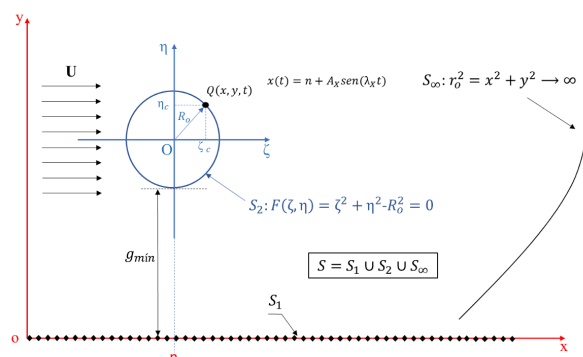


Figura 1. Geometria do problema

As fronteiras sólidas são discretizadas e representadas

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

por painéis planos com distribuição de fontes com densidade constante. A geração das fontes implica em satisfazer a condição de impenetrabilidade sobre cada ponto de controle dos painéis (Katz & Plotkin, 1991).

O campo de vorticidades é discretizado em uma nuvem de vórtices discretos de Lamb. A equação do transporte da vorticidade governa os mecanismos de advecção e difusão da vorticidade no espaço bidimensional da seguinte maneira (Chorin, 1973):

$$\frac{\delta\omega}{\delta t} + (\vec{u} \cdot \nabla)\omega = \frac{1}{Re}\nabla^2\omega \quad (1)$$

onde: “omega” é o único componente do vetor vorticidade no plano, \vec{u} é o vetor velocidade e Re é o número de Reynolds.

Os vórtices discretos de Lamb são gerados em cada instante de tempo apenas sobre a superfície discretizada do cilindro circular para satisfazer a condição de escorregamento nulo.

De acordo com o *Viscous Splitting Algorithm*, proposto por Chorin (1973), os mecanismos de advecção e difusão da vorticidade são resolvidos separadamente dentro de um mesmo incremento de tempo Δt .

Para a advecção da nuvem de vórtices discretos de Lamb torna-se necessário calcular o vetor velocidade total induzido sobre cada vórtice discreto, em cada instante de tempo. Este cálculo leva em consideração as contribuições do escoamento incidente, das fronteiras sólidas (método dos painéis) e da nuvem de vórtices discretos. A indução de velocidade da nuvem de vórtices discretos sobre ela mesma consome um elevado custo computacional, tornando-se necessária utilização do processamento paralelo via Fortran OpenMP. A solução da etapa da advecção de vorticidade é resolvida para cada vórtice discreto utilizando o esquema de avanço de primeira ordem de Euler da seguinte maneira:

$$\frac{d\vec{x}^{(i)}}{dt} = \vec{u}^{(i)}(\vec{x}^{(i)}, t) \quad (2)$$

Os efeitos viscosos são considerados através do número de Reynolds na etapa da difusão da vorticidade. A solução da difusão da vorticidade é obtida através do método de avanço randômico, onde para cada vórtice discreto em cada instante de tempo, devem ser gerados dois números randômicos P e Q entre 0 e 1, tal que:

$$\vec{x}^{(i)}(t + \Delta t) = \vec{x}^{(i)}(t) + \vec{u}^{(i)}(\vec{x}^{(i)}, t)\Delta t + \vec{Z}_d \quad (3)$$

$$x_d^{(i)} = \sqrt{\frac{4\Delta t}{Re} \ln\left(\frac{1}{P}\right)} [\cos(2\pi Q)] \quad (4)$$

$$y_d^{(i)} = \sqrt{\frac{4\Delta t}{Re} \ln\left(\frac{1}{P}\right)} [\sin(2\pi Q)] \quad (5)$$

Os carregamentos fluidodinâmicos atuantes sobre a superfície do cilindro circular são calculados utilizando uma formulação integral derivada de uma equação de Poisson para pressão. Os coeficientes de arrasto de forma e de sustentação são calculados da seguinte maneira:

$$C_D = \sum_{j=1}^M 2(p_j - p_\infty)\Delta S_j \sin(th_{pj}) = \sum_{j=1}^M C_p \Delta S_j \sin(th_{pj}) \quad (6)$$

$$C_L = - \sum_{j=1}^M 2(p_j - p_\infty)\Delta S_j \cos(th_{pj}) = \sum_{j=1}^M C_p \Delta S_j \cos(th_{pj}) \quad (7)$$

A hipótese assumida de escoamento bidimensional é bastante consistente para este problema, uma vez que quando a estrutura cilíndrica vibra sincronizada com a emissão de vórtices, há um forte componente bidimensional ao longo do comprimento do cilindro (Bearman, 1984)

Resultados e discussão

Nesta seção, são apresentados e discutidos os principais resultados numéricos obtidos por meio das simulações. O foco da análise é compreender a influência da proximidade de uma fronteira sólida, conhecida como efeito solo, no padrão de desprendimento de vórtices de um cilindro com oscilação transversal forçada. As simulações foram realizadas para um escoamento com Número de Reynolds $Re=100.000$ e uma amplitude de oscilação transversal do cilindro mantida constante em $A=0,13$. A análise se concentra em dois cenários principais, definidos pela razão adimensional de distância ao solo, g_{min} : um caso de referência com $g_{min} = 1000$, que representa um cilindro efetivamente isolado, e um caso com $g_{min} = 0,5$, para investigar a forte interferência da fronteira. Para cada um destes cenários, foram testadas três frequências de oscilação adimensionalizadas. A frequência de $fe=0,04$ foi escolhida por corresponder ao modo de sincronização de

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

referência A-I (Antissimétrico); a frequência de $f_e=0,2$ corresponde ao modo A-IV (Antissimétrico); e a frequência de $f_e=0,4$ ao modo S (Simétrico).

Antes de prosseguir com a análise, é importante definir tais regimes de sincronização de referência. O modo A-I (Antissimétrico) resulta na formação da clássica esteira de Von Kármán, com vórtices contrarrotativos desprendendo-se de maneira alternada na parte de trás do cilindro.

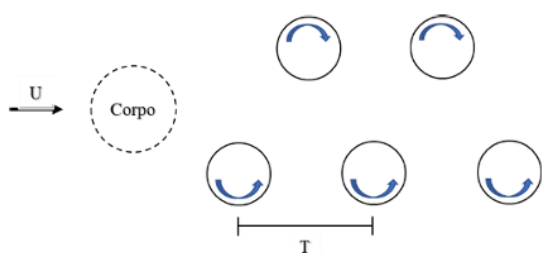


Figura 2. Modo Antissimétrico AI

O modo A-IV (Antissimétrico), por sua vez, exibe um período de desprendimento que é o dobro do modo A-I, caracterizado pela formação de pares de estruturas vorticosas contrarrotativas.

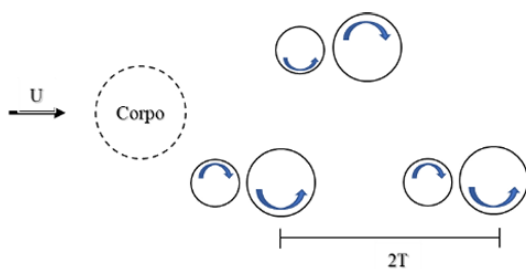


Figura 3. Modo antissimétrico AIV

Por fim, o modo S (Simétrico) é marcado pelo desprendimento simultâneo de um par de vórtices na parte de trás do cilindro durante um ciclo de oscilação.

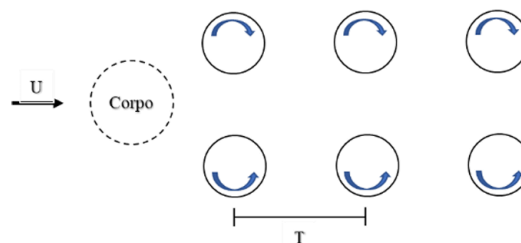


Figura 4. Modo simétrico

Um resultado central desta investigação emergiu da análise dos casos com forte efeito solo ($g_{min} = 0,5$). A intensa interferência hidrodinâmica entre a esteira de vórtices do cilindro e a camada limite desenvolvida na fronteira sólida impediu a formação de padrões de desprendimento que pudessem ser claramente classificados. Consequentemente, para esta condição de baixa altura, não foi possível identificar os modos de sincronização de referência. A Tabela abaixo apresenta os dados recolhidos das 6 simulações:

Caso	f_0	g_{min}/D	\bar{C}_d	\bar{C}_l	f_{cd}	$\frac{f_0}{f_{cd}}$
1	0,04	1,00 0	1,2270	-0,0056	0,0394	1,015
2	0,2	1,00 0	1,3568	-0,0232	0,2008	0,996
3	0,4	1,00 0	1,4889	-0,0179	0,3987	1,003
4	0,04	0,5	1,5167	0,3698	0,5497	0,072
5	0,2	0,5	1,2580	0,0809	0,5503	0,363
6	0,4	0,5	1,0988	0,1423	0,5485	0,729

Tabela 1 – Dados referentes da simulação

Conclusões

O presente trabalho apresentou um estudo numérico-computacional do escoamento ao redor de um cilindro circular submetido a oscilações transversais forçadas, com foco na investigação da influência do efeito solo. Utilizando uma metodologia baseada na combinação do Método dos Vórtices Discretos com o Método dos Painéis, buscou-se analisar como a proximidade de uma fronteira sólida altera os regimes de

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

sincronização de vórtices para um Número de Reynolds de 100.000.

Os resultados para o caso de referência, com o cilindro distante da fronteira ($g_{min} = 1000$), permitiram reproduzir com sucesso os padrões de sincronização clássicos da literatura. Para as frequências de oscilação testadas, foram observados os modos A-I, A-IV e S, caracterizados por esteiras de vórtices bem definidas e periódicas. Em contrapartida, o resultado mais significativo da pesquisa emergiu da análise do caso com forte efeito solo ($g_{min} = 0,5$). Constatou-se que a intensa interferência hidrodinâmica entre a esteira do cilindro e a camada limite da fronteira sólida descaracterizou completamente os regimes de desprendimento, suprimindo a formação de uma esteira organizada.

Dessa forma, o trabalho cumpriu seu objetivo de analisar o comportamento do fluido sob a influência combinada da vibração do corpo e da proximidade do solo. No que tange ao objetivo específico de classificar os tipos de formação de vórtices, conclui-se que, para uma distância ao solo de $g_{min} = 0,5$ nas condições estudadas, os padrões clássicos de sincronização não se sustentam. A própria impossibilidade de classificação constitui uma conclusão fundamental sobre a dominância do efeito solo sobre o fenômeno de sincronização, um resultado de grande relevância para aplicações práticas como o projeto de dutos e cabos submarinos.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se a investigação de distâncias intermediárias ao solo para identificar um possível ponto crítico de desestabilização dos regimes de sincronização.

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Agradeço especialmente ao meu orientador, Professor Dr. Luiz Antônio A. Pereira, pela orientação dedicada, pelo conhecimento compartilhado e pela confiança depositada ao longo de toda a pesquisa. Aos meus colegas de trabalho, meu muito obrigado pelo companheirismo e pelas discussões produtivas que enriqueceram este estudo.

Aos meus pais, agradeço por todo o amor, apoio incondicional e incentivo que foram fundamentais em todos os momentos desta jornada.

Por fim, registro meus agradecimentos à Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) pela estrutura e pelo

ambiente acadêmico que tornaram esta pesquisa possível, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro, indispensável para o desenvolvimento deste projeto.

Referências

BEARMAN, Peter W. Vortex shedding from oscillating bluff bodies. Annual review of fluid mechanics, v. 16, n. 1, p. 195-222, 1984.

CHORIN, Alexandre Joel. Numerical study of slightly viscous flow. Journal of Fluid Mechanics, v. 57, n. 4, p. 785-796, 1973.

KATZ, Joseph; PLOTKIN, Allen. Low-Speed Aerodynamics—From Wing Theory to Panel Models. Int. edn. 1991.

MARTINS, Daniel Spinola; Regimes de Formação de Vórtices em um Cilindro Circular que Oscila Forçadamente com até Dois Graus de Liberdade. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017.