

ESTUDO DE EFEITOS DE INTERFERÊNCIA ENTRE CORPOS ROMBUDOS RUGOSOS E ALINHADOS UTILIZANDO O MÉTODO DE VÓRTICES DISCRETOS

Mohammad Sleiman Freitas (IC), Luiz Antonio Alcântara Pereira (PQ)

¹Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)

Palavras-chave: Confinamento de parede. Carregamentos fluidodinâmicos. Método dos painéis. Descrição lagrangiana. Simulação numérica.

Introdução

Desde os meados da segunda parte do século XX, a simulação numérica de escoamentos ao redor de corpos rombudos consolidou-se como um dos principais temas de investigação na área de mecânica dos fluidos dada a complexidade dos fenômenos associados à separação da camada limite e à formação de esteiras de vórtices. Citam-se, em geral, problemas de aerodinâmica de corpos rombudos, que são corpos que apresentam separação da camada limite. Nesse contexto, o presente trabalho tem como um dos objetivos principais realizar uma análise numérica da interferência entre dois corpos rombudos alinhados verticalmente e uma parede vertical posicionada à direita destes corpos. A técnica numérica utiliza o Método de Vórtices Discretos (MVD) para representação do campo de vorticidades gerado a partir da superfície dos dois cilindros circulares alinhados com efeito de bloqueio de parede. O principal foco é investigar o comportamento dos carregamentos fluidodinâmicos atuantes sobre os dois corpos com interferência da parede vertical.

O desenvolvimento desta pesquisa se encontra na fase de análise do comportamento fluidodinâmico de um cilindro circular nas imediações da parede. Os resultados incluindo-se a presença do segundo cilindro circular encontram-se em final de implementação, prevendo-se a apresentação destes resultados dentro da Jornada de Iniciação Científica; a sequência natural desta pesquisa irá também culminar com a defesa de um Trabalho Final de Graduação.

Metodologia

Para a simulação numérico-computacional do problema representando na Figura (1), emprega-se uma técnica puramente lagrangiana denominada Método de Vórtices Discretos (MVD). Esse método baseia-se na discretização do campo de vorticidades, o qual é representado por uma nuvem de vórtices discretos de

Lamb.

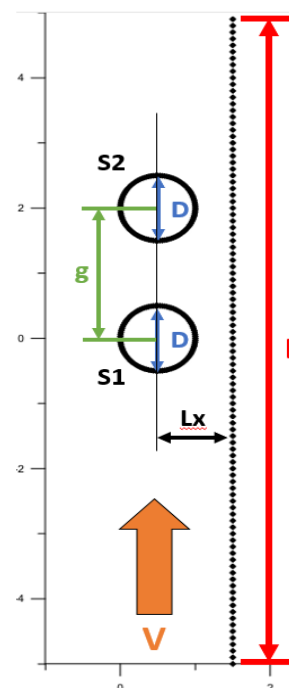


Figura 1 – Geometria do problema.

Neste trabalho, a geração de vorticidade ocorre apenas sobre a superfície dos cilindros circulares, embora se considere o efeito de bloqueio induzido pela presença da parede. Os vórtices discretos com raio do núcleo σ_0 são gerados a cada incremento de tempo Δt , de modo que sejam simultaneamente satisfeitas a condição de escorregamento nulo na superfície dos dois corpos e a conservação global da circulação.

A superfície dos dois cilindros, por sua vez, é discretizada e representada por painéis planos (Katz & Plotkin, 1991), sobre os quais é imposta a condição de impenetrabilidade. Mais precisamente, é no centro de cada painel plano, onde se localiza o ponto de controle, que as condições de escorregamento nulo e impenetrabilidade são satisfeitas.

A dinâmica da vorticidade gerada em cada instante de

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

tempo é simulada acompanhando-se individualmente o movimento de cada vórtice discreto de Lamb, através da Equação do Transporte de Vorticidade, tal como:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \omega = \frac{1}{Re} \nabla^2 \omega \quad (1)$$

onde ω representa o único componente não nulo do vetor vorticidade na direção normal ao plano do escoamento (o escoamento é assumido bidimensional) e Re representa o número de Reynolds.

De acordo com o algoritmo proposto por Chorin (1973), a Equação (1) é resolvida separadamente para os mecanismos de advecção e difusão da vorticidade, de modo que seja possível tratar numericamente cada mecanismo de forma mais adequada. Em primeiro lugar, a solução do termo de advecção da vorticidade é obtida por meio de um esquema de avanço temporal de primeira ordem, baseado no método de Euler explícito (Ferziger, 1991).

Para a solução do problema da advecção, é necessário calcular o campo de velocidades induzido sobre cada vórtice discreto, levando-se em consideração as contribuições provenientes do escoamento incidente, das fronteiras sólidas (Método dos Painéis) e da nuvem de vórtices discretos. É importante destacar que esta última contribuição representa o maior custo computacional do método numérico, razão pela qual se faz necessária a implementação de paralelização no ambiente de desenvolvimento Fortran, com o uso de diretivas do padrão OpenMP.

A solução da difusão da vorticidade é resolvida mediante o Método de Avanço Randômico (Chorin, 1973), que simula os efeitos da viscosidade. Nesse contexto, a Equação (1), quando reescrita em sua forma discretizada, passa a representar numericamente o transporte e a dissipação da vorticidade ao longo do tempo, para cada vórtice discreto (i), da seguinte maneira:

$$\mathbf{x}^{(i)}(t + \Delta t) = \mathbf{x}^{(i)}t + \mathbf{u}^{(i)}(\mathbf{x}^{(i)}, t)\Delta t + \mathbf{Zd} \quad (2)$$

onde, os componentes x_d e y_d do vetor avanço randômico \mathbf{Zd} , na forma adimensional, são calculados como:

$$x_d^{(i)} = \sqrt{\frac{4\Delta t}{Re} \ln\left(\frac{1}{p}\right)} [\cos(2\pi Q)] \quad (3)$$

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

onde, P e Q são números randômicos pertencentes ao intervalo entre 0 e 1 gerados para cada vórtice discreto em cada instante de tempo.

Os carregamentos fluidodinâmicos atuantes sobre as superfícies das fronteiras sólidas são obtidos a partir de uma formulação integral derivada de uma equação de Poisson para Pressão (Shintani & Akamatsu, 1994). Os coeficientes de arrasto de forma e de sustentação são calculados da seguinte maneira, respectivamente:

$$\begin{aligned} C_D &= \sum_{j=1}^M 2 * (p_j - p_\infty) * \Delta S_j * \sin(th_{pj}) = \\ &= \sum_{j=1}^M C_p * \Delta S_j * \sin(th_{pj}) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} C_L &= - \sum_{j=1}^M 2 * (p_j - p_\infty) * \Delta S_j * \cos(th_{pj}) = \\ &= - \sum_{j=1}^M C_p * \Delta S_j * \cos(th_{pj}) \end{aligned} \quad (6)$$

No algoritmo desenvolvido, em um mesmo incremento de tempo, resolve-se o Método dos Painéis, que representa de forma discretizada as superfícies das fronteiras sólidas, cada uma discretizada em $Mb = 100$ painéis. Os vórtices discretos de Lamb são gerados sobre as superfícies discretizadas dos corpos rombudos. Desta maneira, dois sistemas lineares de equações algébricas são obtidos e resolvidos iterativamente pelo Método dos Mínimos Quadrados. Após a geração dos vórtices discretos de Lamb, calcula-se o campo de velocidades induzido sobre cada um deles. Em seguida, os carregamentos fluidodinâmicos atuantes sobre as fronteiras sólidas são calculado. Na sequência do algoritmo são resolvidos os mecanismos de Advecção e de difusão da vorticidade. Vórtices discretos que eventualmente migrarem para o interior das fronteiras sólidas devem ser refletidos, a fim de que um novo incremento de tempo possa ser resolvido.

Resultados e discussão

Para a simulação numérica envolvendo um cilindro circular e a presença de uma parede vertical com confinamento, apresentam-se os resultados para o caso de escoamento incidente vertical, adotando-se as velocidades adimensionais $U_\infty = 0$ e $V_\infty = V = 1$. Os problemas para o cilindro circular único, isto é, sem nenhum efeito de bloqueio de parede, e para o cilindro circular nas imediações de uma parede plana horizontal

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

ou vertical foram bem explorados e por Bimbato et al. (2009) e Roselli (2017); eles podem ser consultados na literatura. Os desenvolvimentos desta pesquisa, ainda em fase final de conclusão (como já mencionado), irão contribuir com a inclusão de um segundo cilindro circular alinhado e de efeitos de rugosidade superficial no algoritmo desenvolvido por Roselli (2017). A Figura 2 apresenta a história temporal dos coeficientes de arrasto de forma e de sustentação para o espaçamento adimensional $L_x = 1,0$.

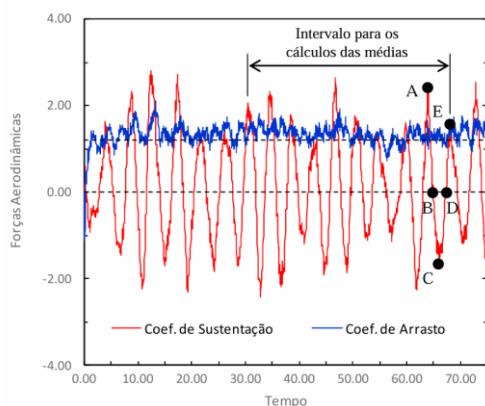


Figura 2 – Séries temporais dos coeficientes de forças para o cilindro circular com efeito de parede vertical ($t = 75, \Delta t = 0,05, \sigma_0 = 0,0032, Re = 10^5, Mb = 100$ e $L_x = 1,0$)

Na Figura 3, o sentido de orientação do ângulo θ corresponde à posição do ponto de controle de cada painel plano. Este ângulo indica a posição angular relativamente à superfície discretizada do corpo, onde o valor do coeficiente de pressão é calculado de maneira instantânea. Sendo assim, os pontos instantâneos A, B, C, D e E nas Figuras 2 e 3 foram escolhidos a partir de um tempo adimensional acima de $t = 25$, para que o escoamento apresentasse um comportamento de esteira oscilatória. Na Figura 3, estes pontos associados com instantes de tempo da simulação numérica apresentam as distribuições do coeficiente de pressão ao longo da superfície discretizada do cilindro circular. Ademais, na Figura 3, o parâmetro C_{pM} representa a distribuição do coeficiente de pressão médio que é calculado entre os instantes de tempo $t = 25$ e $t = 75$.

Para a validação dos resultados, a descrição do mecanismo de formação de vórtices a partir da superfície do cilindro circular com efeitos da parede vertical é interpretada com o suporte dos pontos de A até E (Figuras 2 e 3), isto é:

- **Ponto A – Pico máximo positivo para força de sustentação:** o valor para o coeficiente de sustentação atinge um pico positivo de

aproximadamente 2,4, enquanto o coeficiente de arrasto ainda aumenta. É possível observar uma zona de baixa pressão entre $\theta = 60^\circ$ e $\theta = 170^\circ$. A distribuição do coeficiente de pressão evidencia o início do desprendimento de um vórtice no sentido horário na parte superior do cilindro circular, o qual causa elevação no coeficiente de sustentação. Todavia, a força de arrasto, como mencionado antes, está em ascensão, já que o vórtice recém-formado ainda está influenciando o campo próximo.

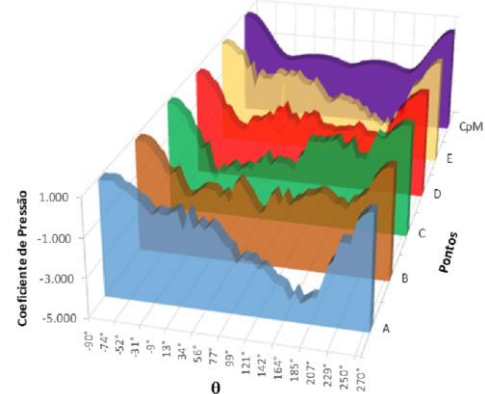


Figura 3 – Distribuição instantânea do coeficiente de pressão sobre a superfície discretizada do cilindro circular com efeito de parede vertical ($L_x = 1,0$)

- **Ponto B - Incorporação do vórtice horário à esteira viscosa:** o coeficiente de sustentação cruza o eixo zero, indicando inversão da direção da força de sustentação. A zona de baixa pressão se alarga e se redistribui, abrangendo desde a parte frontal até a parte inferior do cilindro (entre $\theta = 60^\circ$ a $\theta = 300^\circ$), mas com coeficiente de pressão C_p menos intenso que no ponto A. A estrutura vorticosa gerada próxima do instante representado pelo ponto A está sendo incorporada pela esteira viscosa, tornando a força de sustentação positiva.
- **Ponto C – Desprendimento do vórtice anti-horário:** a força de sustentação atinge seu valor adimensional mínimo negativo de aproximadamente 2,5 e a força de arrasto segue crescendo. A região de baixa pressão agora se desloca significativamente para a parte inferior do cilindro, com valores mínimos entre $\theta = 184^\circ$ a $\theta = 313^\circ$, atingindo novamente $C_p < -4,5$, como observado no ponto A. Um novo vórtice é formado, agora girando no anti-horário, na parte inferior do cilindro. Isso explica a inversão do sinal da força de

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

sustentação. A força de arrasto continua subindo devido à intensificação do escoamento e do campo de vorticidade.

- **Ponto D – Incorporação do vórtice anti-horário à esteira viscosa:** O coeficiente de sustentação cruza novamente o eixo zero, indicando nova inversão, agora de negativo para positivo. O campo de pressão se torna mais simétrico, com zonas de baixa pressão tanto no topo quanto na base, e menores amplitudes de C_p , em torno de -3.5 . A estrutura vorticosa gerada próxima do instante representado pelo ponto C está sendo incorporada pela esteira.

O **Ponto E** apresenta interpretação semelhante àquela do **Ponto A**.

Finalmente, a Figura 4 apresenta a posição da esteira próxima do cilindro para $t = 75$.



Figura 4. Posição dos vórtices formando a esteira próxima do cilindro ($t = 75$ e $L_x = 1,0$).

Conclusões

Os resultados apresentados para o caso de um cilindro com efeito de bloqueio de parede vertical representa o comportamento típico da formação da esteira de vórtices de von Kármán na presença de um escoamento vertical $V_\infty = 1$ com confinamento de parede vertical. À medida que ocorre a formação de uma estrutura vorticosa em um dos lados do cilindro, identifica-se uma queda de pressão estática local, gerando uma força de sustentação nessa direção. Ao longo de um ciclo completo de emissão de pares de vórtices contrarrotativos, a sustentação passa de um valor máximo positivo para um mínimo negativo e retorna ao máximo positivo, indicando alternância no lado de formação dos vórtices. As simulações numéricas também mostraram que o período de oscilação da força de sustentação coincide com o período de emissão desses pares de vórtices, chamado de número de Strouhal (Bimbato, 2009). Em contrapartida, a força de arrasto oscila com o dobro da frequência da força de sustentação, pois a cada ciclo

completo da força de arrasto, apenas um vórtice (superior ou inferior) é emitido.

Esta pesquisa, que ainda segue seu desenvolvimento, configura uma sequência de evolução do algoritmo desenvolvido por Roselli (2019); inclusão do segundo corpo e de efeitos de rugosidade superficial são os objetivos traçados.

Agradecimentos

Inicialmente, gostaria de expressar minha sincera gratidão ao PIVIC/UNIFEI pela valiosa oportunidade de participar deste projeto de iniciação científica, que foi fundamental para meu desenvolvimento acadêmico e pessoal. Agradeço, especialmente, ao professor Luiz Antonio Alcântara Pereira pelo constante suporte, orientação técnica, e incentivo, ao longo de toda essa jornada científica. A pesquisa oferecida é abrangente e me possibilitou avançar para o desenvolvimento de um Trabalho Final de Graduação.

Além disso, não poderia deixar de reconhecer o papel essencial da minha família, que sempre me ofereceu apoio incondicional e me transmitiu valores fundamentais para a convivência em sociedade. Em especial, presto uma homenagem carinhosa aos meus irmãos Fernanda, Amir, Adan e Marina, que são, sem dúvida, os verdadeiros alicerces da minha vida.

Referências

- Bimbato, A.M.; Alcântara Pereira, L.A.; Hirata, M.H. Simulation of viscous flow around a circular cylinder near a moving ground. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* **2009**, *31*, 243–252.
- Chorin, A.J. Numerical study of slightly viscous flow. *J. Fluid Mech.* **1973**, *57*, 785–796.
- Katz, J.; Plotkin, A. *Low Speed Aerodynamics: From Wing Theory to Panel Methods*; McGraw Hill, Inc.: New York, NY, USA, 1991.
- Ferziger, J.H. *Numerical Methods for Engineering Application*; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 1991.
- Roselli, Marcos Vinícius. *Estudo Numérico da Transferência de Calor por Convecção Mista a partir de um Corpo Rombudo e Efeitos de uma Parede Frontal*. 2017. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017.
- Shintani, M.; Akamatsu, T. Investigation of two-dimensional discrete vortex method with viscous diffusion model. *CFD J.* **1994**, *3*, 237–254.