

SIMULAÇÃO NUMÉRICO-COMPUTACIONAL VIA MÉTODO DE VÓRTICES DISCRETOS DE EFEITOS DE PAREDE DE UM TÚNEL DE VENTO SOBRE ESCOAMENTOS AO REDOR DE UM CORPO DE PAREDE HIDRAULICAMENTE RUGOSA

Luis Felipe Barbosa Pereira (IC), Luiz Antonio Alcântara Pereira (PQ)
¹Universidade Federal de Itajubá

Palavras-chave: Confinamento de paredes. Método dos painéis. Força de arrasto. Processamento paralelo. Dinâmica lagrangiana

Introdução

Este trabalho consiste em uma série de experimentos computacionais que objetivam entender o comportamento aerodinâmico de uma estrutura cilíndrica quando o escoamento ao redor dela se desenvolve nas imediações de uma parede plana ou confinado entre duas paredes planas (efeito de túnel de vento). A análise envolve o estudo do comportamento aerodinâmico de um cilindro de seção circular sob efeito(s) de confinamento de parede(s). Esta pesquisa foi realizada em nove meses e houve avanço significativo do plano de trabalho proposto. A obtenção do caso final e inclusão de efeitos de rugosidade superficial se encontram em fase de desenvolvimento, logo, os resultados obtidos serão registrados na jornada de Iniciação Científica.

A solução numérico-computacional de problemas de Mecânica dos Fluidos pode ser basicamente realizada através de duas descrições, a euleriana e a lagrangiana. Neste trabalho utilizou-se o Método dos Vórtices Discretos (M.V.D.), na sua versão puramente lagrangiana. A metodologia empregada é importante para investigar fenômenos de hidrodinâmica não linear, tais como, separação da camada limite, formação de esteiras de vórtices de Von Kármán, transição para turbulência na esteira e na camada limite e efeitos de rugosidade superficial. A ideia central desta pesquisa é simular o comportamento do campo de vorticidades originário de um corpo rombudo (uma estrutura cilíndrica) e dos carregamentos fluidodinâmicos atuantes sobre sua superfície. Esta aerodinâmica é investigada com efeitos de interferência de paredes planas (Oliveira et al., 2020); o que valoriza o código computacional desenvolvido no sentido de simular efeitos de um túnel de vento ou de um canal de recirculação de água sobre a aerodinâmica de um corpo. As estruturas cilíndricas estão presentes em diferentes problemas de engenharia envolvendo escoamento de fluidos, tais como, *risers* e dutos submarinos utilizados na indústria do petróleo, trocadores de calor do tipo casco e tubos, cabos de torres de transmissão de energia elétricas e altos edifícios (geometria e comportamento aproximado). O estudo

também aponta para futuras pesquisas na linha da aerodinâmica de corpos rombudos, tais como, vibração e torção estrutural e transferência de calor por convecção mista.

Metodologia

A Figura 1 ilustra a geometria do problema onde há a presença de três fronteiras sólidas no caso mais geral S1, S2 e S3. O domínio fluido Ω é identificado pela união destas fronteiras sólidas mais uma fronteira fluida no infinito, S_∞ . As fronteiras sólidas são discretizadas e representadas por painéis planos com distribuição de fontes com densidade constante (condição de contorno de Neumann). Cada painel plano possui um ponto de controle (ponto central) onde é imposta a condição de impenetrabilidade, resultando na geração instantânea de fontes. Esta técnica constitui-se no Método dos Painéis (Katz & Plotkin, 1991).

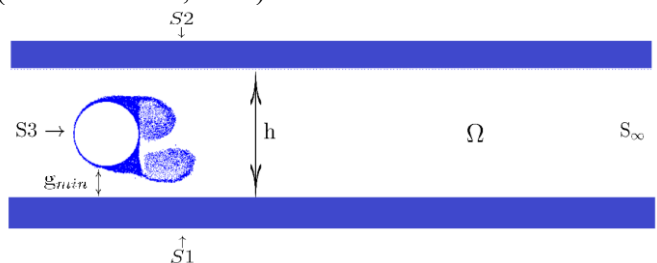


Figura 1 – Geometria do problema e definições

A vorticidade gerada a partir do cilindro circular é discretizada e representada por vórtices discretos de Lamb. Sobre o ponto de controle de cada painel é imposta a condição de escorregamento-nulo para a geração instantânea destes vórtices discretos. No plano, a dinâmica do campo de vorticidades é simulada pela seguinte versão da equação do transporte da vorticidade:

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

onde Ω é o único componente não nulo do vetor vorticidade na direção normal ao plano do escoamento e Re é o número de Reynolds. Esta equação simula os mecanismos de advecção e de difusão da vorticidade. De

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

acordo com *Viscous Splitting Algorithm* (Chorin, 1973) a Equação 1 é resolvida em duas etapas tal como:

$$\frac{D\Omega}{Dt} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{1}{Re} \nabla^2 \omega \quad (3)$$

A Equação 2 é a versão lagrangiana do problema da advecção da vorticidade e deve ser resolvida para cada vórtice discreto em cada instante de tempo. A solução desta equação é obtida utilizando o esquema de avanço de primeira ordem de Euler (Ferziger, 1991). Para este cálculo é necessário calcular a velocidade total induzida sobre cada vórtice discreto de Lamb em cada instante de tempo. As contribuições para este cálculo são devidas ao escoamento incidente, às fronteiras sólidas e à nuvem de vórtices discretos. A contribuição da nuvem de vórtices discretos consome elevado tempo computacional, o que exige utilização de processamento paralelo no ambiente Fortran OpenMP.

A Equação 3 resolve o problema da difusão da vorticidade e é resolvida utilizando o Método de Avanço Randômico, onde devem ser gerados dois números randômicos, P e Q, entre 0 e 1 para cada vórtice discreto em cada instante de tempo. (Chorin, 1973)

Assim, a solução numérica da Equação 1 para cada vórtice discreto (i) é dada pela seguinte equação:

$$\vec{x}^{(i)}(t + \Delta t) = \vec{x}^{(i)}(t) + \vec{u}^{(i)}(\vec{x}^{(i)}, t)\Delta t + \vec{Z}_d \quad (4)$$

Os carregamentos fluidodinâmicos atuantes sobre a superfície do cilindro circular são obtidos utilizando-se uma formulação integral derivada de uma equação de Poisson para a pressão (Shintani&Akamatsu, 1994). Os coeficientes de arrasto de forma e de sustentação são calculados de acordo com as seguintes equações, respectivamente: (Oliveira et al., 2020)

$$C_D = - \sum_{j=1}^M 2(p_j - p_\infty) \Delta S_j \sin \theta_j = - \sum_{j=1}^M C_P \Delta S_j \sin \theta_j \quad (5)$$

$$C_L = - \sum_{j=1}^M 2(p_j - p_\infty) \Delta S_j \cos \theta_j = - \sum_{j=1}^M C_P \Delta S_j \cos \theta_j \quad (6)$$

Resultados e discussão

As simulações numéricas realizadas contemplam quatro casos distintos. O caso 1 trata de um escoamento sobre um cilindro sem a interferência de qualquer parede. A Figura 2 apresenta a esteira de vórtices próxima após 1000 avanços no tempo. O restante da esteira continua, entretanto foi cortado.

Os parâmetros geométricos principais utilizados foram o diâmetro do cilindro (d), sendo este adimensional no valor de 1, o g_{\min} , o qual refere-se a distância entre o chão e a superfície cilíndrica, e a distância de separação entre as duas paredes (h), a qual foi adotada valor de 2 quando

há o efeito de parede. Com relação aos parâmetros referentes ao tempo foram utilizados 1000 avanços temporais (com exceção do caso 2 que foram 800) com incremento de tempo de 0,05. Com isso, o tempo médio de realização das simulações foi de 90 (para o caso mais simples) a 120 horas (para os casos mais completos). O computador utilizado contava com processador 13th Gen Intel(R) Cote (TM) i9-13900KF, 128 GB de memória ram e uma placa de vídeo NVIDIA GeForce RTX 4090. As simulações foram todas realizadas em computadores do laboratório (LMAML). Outro ponto importante a ser destacado é que a simulação contou com um número de Reynolds (Re) de 10^5 , ainda sem modelagem de turbulência.

Ao final da simulação foram gerados um total de 300000 vórtices discretos que formaram uma esteira, a qual nas figuras a seguir também são apresentadas na forma de esteira próxima.

A Figura 3 apresenta as curvas levantadas referentes aos coeficientes de sustentação e de arrasto, os quais possuem valores médios, calculados após o transiente numérico ($t=20,00$), de -0,0570 e 1,1570, respectivamente. Destaca-se o comportamento oscilatório das curvas no em torno destes valores médios.



Figura 2 - Formação da esteira de vórtices no caso 1: sem efeitos de paredes

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

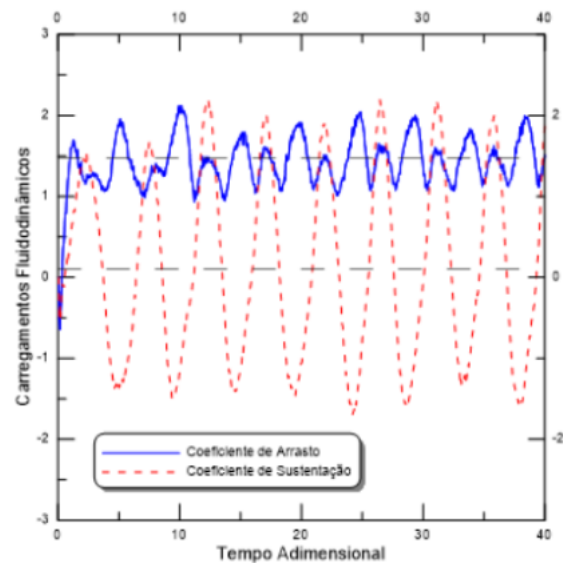
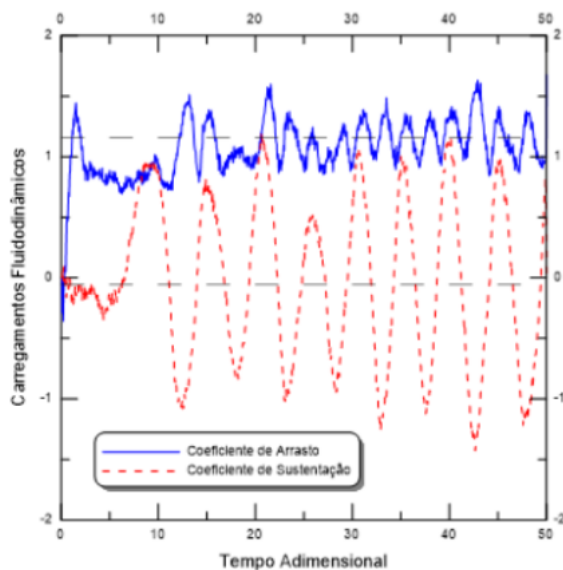


Figura 3 - História temporal dos coeficientes de força: caso 1
O caso 2 verificou a interferência causada por uma parede plana inferior de dimensão 10 diâmetros. A Figura 4 ilustra o comportamento que é descrito pela esteira de vórtices formada a jusante do cilindro. Observa-se que a parede plana inferior é responsável por impedir a passagem da esteira de vórtices, inibindo sua formação livre, opondo-se ao caso 1 e a figura 2.

A Figura 5 mostra as curvas de carregamentos fluidodinâmicos integrados do caso 2. Os valores médios dos coeficientes de sustentação e de arrasto, também aferidos após o transiente numérico, são de 0,1032 e 1,4734, respectivamente. Interessante observar que a dinâmica de oscilação da sustentação manteve-se oscilando perto de zero, entretanto, os valores de arrasto aumentaram significativamente, aumento esse que pode ser atribuído ao efeito solo criado colocação da parede inferior.

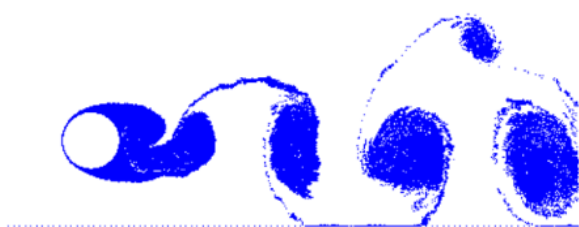


Figura 4 – Formação da esteira de vórtices no caso 2: efeito de parede inferior

Figura 5 - História temporal dos coeficientes de força: caso 2
O caso 3, em oposição ao 2, simulou o efeito de uma parede plana superior. A Figura 6 mostra o comportamento da esteira de vorticidade gerada e, assim como o caso 2, é possível notar que a parede também inibe a formação livre da nuvem, confinando-a. Estes mecanismos de inibição foram discutidos por Oliveira et al., (2020).

A Figura 7 refere-se as curvas de sustentação e arrasto que foram levantadas, as quais tiveram valores médios de 0,1560 para a sustentação e 0,8858 para o coeficiente de arrasto. Novamente, os valores atribuídos ao coeficiente de sustentação oscilam em torno do zero. Com relação ao coeficiente de arrasto seu comportamento é oposto ao observado no caso 2, tendo seus valores oscilando em torno de um valor mais baixo do que o que é observado no caso sem a presença de parede, mostrando um “efeito solo reverso”.



Figura 6 - Formação da esteira de vórtices no caso 2: efeito de parede superior

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

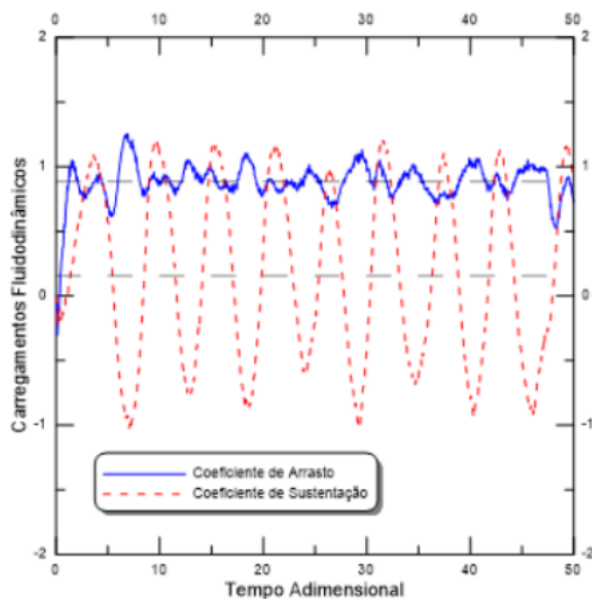


Figura 7 - História temporal dos coeficientes de força: caso 3

Por fim, a implementação e montagem do túnel de vento encontra-se em processo de testes. É esperado que a presença das duas paredes limite o desenvolvimento da nuvem de vórtices num espaço restrito e que o comportamento das curvas a serem levantadas apresente maior efeito de bloqueio.

É importante destacar que os parâmetros adotados, h e g_{min} , para estas simulações configuram uma curta distância entre as paredes e o cilindro, fato este que contribui para uma maior restrição da formação da nuvem de vórtices discretos, conseqüentemente alterando os valores médios dos coeficientes de forças adimensionais calculados.

O número de Strouhal diminui, caracterizando redução da força de arrasto e interrupção parcial ou total do mecanismo de formação de vórtices a partir da superfície do cilindro circular e este será futuramente calculado para uma melhor validação dos resultados.

Conclusões

O estudo numérico-computacional realizado permitiu avaliar os efeitos de confinamento de paredes em escoamentos ao redor de um cilindro circular. As simulações mostraram que a presença de paredes altera significativamente o comportamento aerodinâmico da estrutura, com destaque para o aumento do coeficiente de arrasto no caso de parede inferior e para a redução do mesmo no caso de parede superior, configurando um efeito solo e um efeito solo reverso, respectivamente. Esses resultados evidenciam a relevância da consideração de condições de contorno em análises aerodinâmicas de corpos rombudos, aproximando o modelo computacional de situações reais de engenharia.

Adicionalmente, verificou-se que a formulação utilizada pelo Método de Vórtices Discretos (M.V.D.) em sua versão lagrangiana, aliada ao processamento paralelo, mostrou-se eficaz na simulação da formação e evolução de esteiras de vórtices, permitindo obter dados consistentes para a análise das forças de arrasto e sustentação. Os próximos resultados do caso com confinamento duplo (túnel de vento) indicam um maior efeito de bloqueio e seus resultados serão exibidos no banner exigido para o simpósio.

Uma abordagem adicional a este projeto pode ainda incluir a geração de vorticidade nas paredes, a presença da rugosidade nas superfícies e vibração estrutural. A partir do programa do túnel de vento em desenvolvimento será possível incluir outros efeitos de interferência para controle de força de arrasto, as quais serão responsáveis por resultados mais completos e relacionados às situações reais.

Agradecimentos

Agradeço ao professor Luiz Antônio Alcântara Pereira pela oportunidade de aprendizado e sua disposição em me auxiliar durante todo o processo de trabalho, juntamente com meus colegas do LMAML. Agradeço também a UNIFEI e ao CNPq (PIBIC 2024) pelo financiamento da pesquisa através da disponibilização uma bolsa.

Referências

- BLEVINS, R. D. (1984)** Applied Fluid Dynamics Handbook Van Nostrand Reinhold Co.: Washington, DC, USA.
- CHORIN, A. J. (1973)**, “Numerical Study of Slightly Viscous Flow”, Journal of Fluid Mechanics, v57, pp 785-796.
- FERZIGER, J. H. (1991)**, Numerical Methods for Engineering Application; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA.
- KATZ, J., PLOTKIN, A. (1991)**, Low Speed Aerodynamics: from Wing Theory to Panel Methods, McGraw Hill Inc..
- LEWIS, R.I. (1991)**, Vortex Element Method for Fluid Dynamic Analysis of Engineering Systems, Cambridge Univ. Press, Cambridge, England, U.K.
- Oliveira, M. A., Moraes, P. G., Andrade, C. L., Bimato, A. M., Alcântara Pereira, L. A. (2020)**, “Control and Suppression of Vortex Shedding from a Slightly Rough Circular Cylinder by a Discrete Vortex Method” Energies 13, no. 17: 4481. <https://doi.org/10.3390/en13174481>
- SHINTANI, M., AKAMATSU, T. (1994)**, “Investigation of Two Dimensional Discrete Vortex Method with Viscous Diffusion Model”, Computational Fluid Dynamics Journal, v 3, n 2, pp 237-254.