

8º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

**ANÁLISE NUMÉRICA DO PROBLEMA DE VIBRAÇÃO INDUZIDA POR VÓRTICES
USANDO O MÉTODO PSEUDOSPECTRAL DE FOURIER**

AUTORES:

Andreia Aoyagui Nascimento¹, Felipe Pamplona Mariano¹, Elie L. Martínez Padilla²

INSTITUIÇÃO:

¹Escola de Engenharias Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás

²Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás - 8º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás - ABPG, no período de 20 a 22 de outubro de 2015, em Curitiba/PR. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 8º PDPETRO.

8º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS

ANÁLISE NUMÉRICA DO PROBLEMA DE VIBRAÇÃO INDUZIDA POR VÓRTICES USANDO O MÉTODO PSEUDOSPECTRAL DE FOURIER

Abstract

The pseudoespectral method of Fourier and immersed boundary method are applied to vibration problems vortex induced in a cylindrical rigid body anchored by two springs to flow. The motion of the rigid body, excited by the flow, is restricted by the elastic base and brackets damping properties. The dynamics of structural movement is represented by the equation of the second Newton's law and the modeling of fluid is realized using the Navier Stokes equations. The representation of the fluid - body interface was performed using the method of immersed boundary. Results as the amplitude of displacement of the rigid body and the frequency variation with increasing reduced velocity are presented and compared with the reference work, showing good agreement.

Introdução

O escoamento em torno de um cilindro circular tem sido um assunto de interesse para os engenheiros, sendo objeto de pesquisas de simulações numéricas (Lima e Silva, 2002; Bharti et al. 2006) e procedimentos experimentais (Govardhan e Williamson, 2001; Telkova, 2008). Este tipo de escoamento modela uma grande quantidade de problemas físicos como, por exemplo: estruturas como pontes e chaminés; oleodutos submersos no mar, os quais podem vibrar devido às correntes oceânicas, o que resulta em danos nos *risers* na produção de petróleo e gás.

O cilindro imerso em um escoamento gera uma esteira de vórtices, a partir da elevação da força de sustentação, o que conseqüentemente causa a vibração estrutural, ou seja, a vibração induzida por vórtices (VIV). Uma das características fundamentais de vibração induzida pelo vórtices é a capacidade de fazer a estrutura oscilar, na sua frequência natural (f_n). A medida que a frequência de liberação de vórtices (f_s) se aproxima da frequência natural e a razão (f_n / f_s) tender a 1,0 a amplitude de oscilação da estrutura se eleva, e a estrutura estará oscilando na frequência de "*lock-in*".

Vibrações induzidas por vórtices (VIV) tem sido considerada como uma das causas para as falhas por fadiga das estrutura. No entanto, este fenômeno pode ser muito útil em energia renovável, (Bernitsas et al., 2008).

O presente trabalho apresenta a solução do problema de escoamento em torno de um cilindro circular ancorado por molas na direção do escoamento e na direção transversal ao mesmo. O método numérico utilizado para predizer as características do escoamento e das respostas dinâmicas de VIV para um cilindro circular modelado é o método pseudoespectral de Fourier (Canuto, et al., 1988, 2006) juntamente, com o método da Fronteira imersa (Iaccarino, 2005), o qual é utilizado para modelar a geometria que está elasticamente ancorada. As características do escoamento são analisadas através da formação dos vórtices, os diagramas de trajetória, e modos das frequência de resposta para diferentes números de Reynolds.

8º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS

Metodologia

O estudo do escoamento sobre cilindro utilizou as dimensões apresentadas na Fig. 1, onde, L_x é domínio euleriano, o qual é segmentado pela zona de *buffer* ($8D$), L_b , zona de imposição direta da condição de fluxo uniforme ($2D$), L_p , e domínio útil.

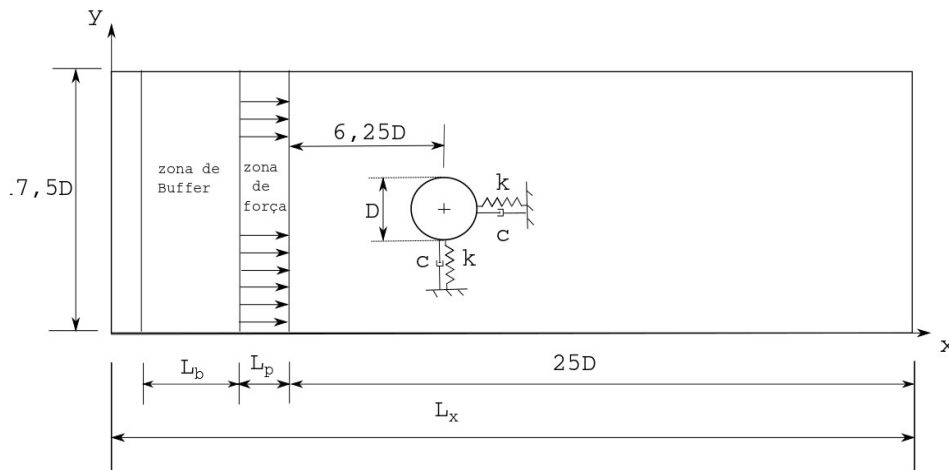


Figura 1. Visualização do domínio de cálculo do problema de VIV de um cilindro circular com dois graus de liberdade.

O escoamento é imposto através da condição de contorno de velocidade uniforme à montante do cilindro, como mostrado na Fig. 1. Dado o desprendimento de vórtices à jusante do cilindro, aparecem forças provindas da diferença de pressão e atrito do escoamento com o corpo imerso.

As equações da continuidade, e quantidade de movimento são utilizadas para modelar o escoamento incompressível de um fluido newtoniano, e o movimento da estrutura imersa é modelada como um corpo rígido, obedecendo a Segunda Lei de Newton, Eq. 1:

$$F_R = m a + c v + k s, \quad (1)$$

onde, k é rigidez da mola, c é o coeficiente de amortecimento estrutural, m é massa do cilindro, F_R é o somatório das forças resultantes, a , v e s são, respectivamente, aceleração, velocidade e deslocamento do centro de massa do cilindro em relação ao referencial fixo.

Método Pseudoespectral de Fourier

A solução a das equações de Navier-Stokes utilizando o método pseudospectral de Fourier consiste na transformação desta equação, para o espaço espectral utilizando a Transformada de Fourier, assim pode ser escrita como mostrado na Eq. 2:

8º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS

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

onde k é número de onda, e $k^2 = k_j k_j$, $\hat{u}_i$ é o vetor velocidade transformado para o espaço Fourier, i é o número complexo. O produto de convolução ($u_i * u_j$) é resolvido aplicando o método Pseudoespectral de Fourier (Canuto et al., 2006; Souza, 2005; Mariano, 2007, 2011; Canuto et al., 1988).

A fim de simplificar a solução da Eq. 2, foi utilizado o método de projeção, neste método as variáveis são projetadas no plano de divergência nula, definido pela transformação da equação da continuidade para o espaço espectral de Fourier (Canuto, et al., 2006), por consequência, desacopla-se o termo de pressão da solução dos campos de velocidades, Eq. 3.

$$\frac{\hat{u}_i^t - \hat{u}_i^0}{\Delta t} + \mathcal{P}(\widehat{TNL_m^t}) = -\nu k^2 \hat{u}_i^t + \mathcal{P}(\hat{f}), \quad (3)$$

onde $\mathcal{P}(\widehat{TNL_m^t})$ o termo não linear projetado.

Método da Fronteira Imersa

A geometria complexa foi possível pelo método da Fronteira Imersa (MFI) o qual utiliza dois domínios independentes: Lagrangiano, Γ , e o Euleriano, Ω , sendo o lagrangiano responsável por modelar a superfície imersa e o euleriano o fluido que a envolve.

Dentre os vários métodos existente para o cálculo da fronteira imersa, este trabalho fez uso do Método Direct-Forcing (MDF), desenvolvido por Mohd-Yusof (1997). Este método, extrai a força diretamente da solução numérica, a qual é determinada pela diferença entre as velocidade interpoladas e a velocidade física (Mariano, 2011; Souza, 2005).

A relação entre os domínios euleriano e lagrangiano é feita através do termo fonte de força, o qual aparece na Eq.3 é modelado como pela seguinte expressão:

$$f_i = \begin{cases} F_i(\vec{X}, t) & \text{se } \vec{x} = \vec{X} \\ 0 & \text{se } \vec{x} \neq \vec{X} \end{cases}, \quad (4)$$

onde f é a força euleriana e F é a força lagrangiana, sendo que o termo fonte de força só será diferente de zero na interface imersa. Uma observação importante é quando não ocorre coincidência entre os pontos do domínio, a força lagrangiana deve ser distribuída para o domínio euleriano. Aplicando à Eq. 3, obtém-se a Eq. 5,

$$\frac{\hat{u}_i^t - \hat{u}_i^* + \hat{u}_i^* - \hat{u}_i^0}{\Delta t} + \widehat{rhs} + \hat{f}_x = 0 \quad (5)$$

onde rhs é o agrupamento dos termos advectivos e difusivos em um tempo t , e termo u^* é denominado parâmetro temporário. Tal equação é decomposta nas Eqs. 6 e 8, as quais permitem a estimativa e a correção dos campos de velocidade.

$$\frac{\hat{u}_i^* - \hat{u}_i^0}{\Delta t} + \widehat{rhs} = 0. \quad (6)$$

O termo de força lagrangiano é dado pela Eq. 7, assumindo que as equações decompostas são válidas em ambos os domínios:

8º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS

$$F_x = \frac{U^t - U^*}{\Delta t}, \quad \forall X_l \quad (7).$$

Na Equação 7, U^t é a condição de contorno, U^* é a velocidade de interpolação, a última atualização da velocidade é dada pela Eq. 8.

$$\hat{u}^t = \hat{u}^* + \hat{f}_x \Delta t, \quad (8)$$

O MDF tem como vantagem a forma de obter o termo força de forma automática, ou seja, sem utilizar os ajustes de constantes manipulados pelo usuários, (Mittal e Iaccarino 2005).

Modelagem do movimento de corpo rígido

A modelagem do corpo rígido fixado por duas mola, permite deslocamentos na direção vertical e horizontal. Esta movimentação é similar ao movimento descrito por um problema massa-mola, e pode ser escrita matematicamente pela Eq. 9 e 10:

$$F_{yl} = m a_y + c v + k y, \quad (9)$$

$$F_{xl} = m a_x + c v + k x, \quad (10)$$

onde F_{yl} e F_{xl} , representa a força hidrodinâmica oriunda do cálculo da fronteira imersa. Estas equações pode ser reescrita adimensionalmente de acordo com os trabalhos de Chern, *et al.* (2014), como mostrado:

$$\frac{d^2 Y}{dt^2} + \frac{4\pi\zeta}{U_r^*} \frac{dY}{dt} + \left(\frac{2\pi}{U_r^*} \right)^2 Y = \frac{2C_l t^*}{\pi m^*}, \quad (11)$$

$$\frac{d^2 X}{dt^2} + \frac{4\pi\zeta}{U_r^*} \frac{dX}{dt} + \left(\frac{2\pi}{U_r^*} \right)^2 X = \frac{2C_d t^*}{\pi m^*}, \quad (12)$$

onde Y e X , é a variável de deslocamento normalizado do centro do cilindro, U_r^* , é a velocidade reduzida, ζ , é o amortecimento estrutural, C_l e C_d , o coeficiente de sustentação e coeficiente de arrasto e m^* , a razão mássica.

O avanço temporal utilizado na discretização das equações fluidodinâmicas e estrutural, se restringe ao método Runge-Kutta Otimizado com 6 passos (Allampalli et al. 2006). Os parâmetros utilizados para a simulação estão sugeridos no trabalho de Dettmer e Peric (2006): razão mássica de 149,1, razão de amortecimento $\zeta=0$, frequência natural $f_n=7,016$ hz e $Re/U_r^*=14,96$.

Para a simulação foi utilizado, a malha de 512 x 256 nós de colocação, CFL de 0,1.

Resultados e Discussão

Nesta seção são apresentados os resultados qualitativos para a simulação de um cilindro oscilando em frequência de ressonância, ou seja, “lock-in”, com número de Reynolds 100, sendo o fluido de análise água. Resultados quantitativos também estão apresentados nas tabelas 1 e 2, o qual permite a comparação com os valores numéricos obtidos por Chern, *et al.* (2014), o qual, em seu trabalho compara, com os resultados teórico obtidos por Roshko.

8º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS

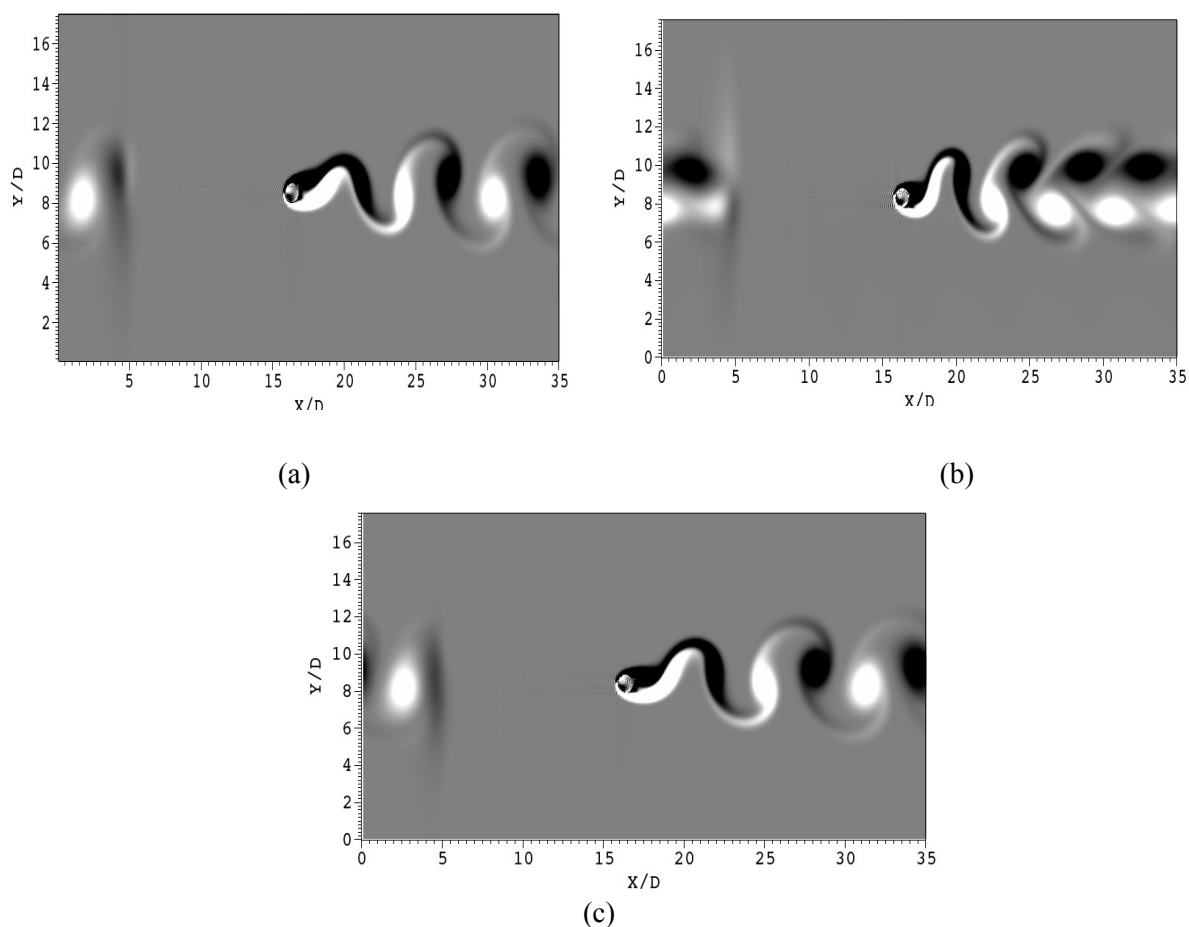


Figura 2. Campo de vorticidade do escoamento sobre cilindro $Re=100$. (a) Velocidade reduzida de 4,0 , (b) Velocidade reduzida de 4,5 e (c) velocidade reduzida de 6,5.

A Figura 2 apresenta os campo da magnitude da vorticidade, para simulações com velocidades reduzidas: $Ur=4,0$, Fig.2 (a), e $Ur=6,5$, Fig.2(c), é possível notar que a esteira de vórtices gerada, apresenta a configuração (2S), ou seja, dois vórtices únicos contra rotativos alinhados (Williamson and Roshko, 1988). Os resultados para o caso com $Ur=4,5$, Fig. 2 (b), apresenta formação da esteira com configuração C2S. Estes resultados apresentaram-se conforme relatado por Singh e Mittal (2005) e Chen et. al. (2014), sendo obtido para os valores de velocidade reduzida entre 4,5 à 5,0.

O diagrama da movimentação do centro de massa do corpo rígido para $Ur=6,5$, é exibido na Figura 3. Foi observada a existência de um comportamento periódico. O diagrama indicam que a trajetória de fluxo e o movimento do cilindro são periódica, e o cilindro é submetido a um movimento ligeiramente oval, em forma dentro da região de *lock-in*.

8º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS

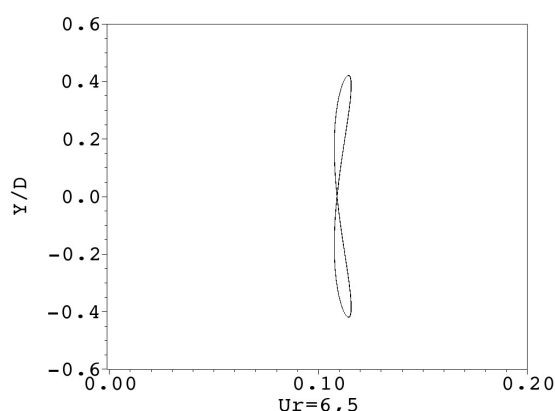


Figura 3. O diagrama da movimentação do centro de massa do corpo rígido para $Ur=6,5$.

Diagrama da movimentação do centro do corpo rígido para $Ur=6,5$, é exibido na Figura 3. Foi observada a existência de um comportamento periódico. O diagrama indica que a trajetória de fluxo e o movimento do cilindro são periódicos e o cilindro é submetido a um movimento ligeiramente oval, em forma, dentro da região de *lock-in*.

Observando a Tabela 1, pode-se afirmar que a resultados apresentados no presente trabalho, apresenta valores próximos de Chen et al (2014), atingindo regime de frequência de *lock-in* regime para $Ur = 6,5$, ou seja, aponta para a frequência liberação de vórtices muito próximos à frequência da estrutura.. Além disso, nota-se que a amplitude de deslocamento na direção transversal apresenta valores superiores ao valores obtidos para o deslocamento na direção horizontal.

Tabela 1: Razões de frequências (f_v^*/f_n^*) e deslocamento máximo (Y/D) e (X/D) para alguns Ur .

Ur	St	Presente Trabalho f_v^*/f_n^*	Chen et. al. (2014) f_v^*/f_n^*	Presente Trabalho Y/D	Presente Trabalho X/D
4,0	0,18	0,72	0,72	0,03	0,04
4,4	0,21	0,91	0,88	0,18	0,05
4,5	0,22	0,97	0,96	0,58	0,09
5,0	0,20	0,99	0,98	0,56	0,09
6,5	0,16	1,01	1,00	0,42	0,12

Conclusões

No presente trabalho foi exposto resultados de cálculos computacionais para escoamento bidimensionais com interação fluido-estrutura, utilizando-se do método pseudo espectral de Fourier e do método da fronteira imersa. As amplitudes de oscilação de pico em ambas as direções aparecer no início da região de *lock-in*, a qual ocorre nas órbitas ligeiramente ovais e trajetória em forma de oito, como mostrado no diagrama de movimento do cilindro. Com relação a estrutura de esteira atrás de um cilindro livremente oscilante, foi possível obter o modo 2S, com amplitudes transversais inferiores do que o modo C2S.

8º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS

Agradecimentos

PETROBRAS, CAPES, CNPQ, FAPEG, FAPEMIG, Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia e a Escola de Engenharias Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás pelo suporte estrutural e financeiro.

Referências Bibliográficas

- ALLAMPALLI, V., HIXON, R., NALLASAMY, M., and SAWYER, S., 2009. High-accuracy large-step explicit Runge–Kutta (HALE-RK) schemes for computational aeroacoustics', *Journal of Computational Physics* , Vol. 228, No. 10, pp. 3837 -3850.
- BERNITSAS, M. M., et al , 2008. VIVACE (Vortex Induced Vibration Aquatic Clean Energy): A new concept in generation of clean and renewable energy from fluid flow. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, v. 130, ed. 4, pag. 041-101.
- CANUTO, C.; QUARTERONI, A.; HUSSAINI, M. Y.; ZANG, T. A. , 1988. *Spectral methods in fluid dynamics* 2nd. New York: Springer-Verlag.
- CANUTO, C.; QUARTERONI, A.; HUSSAINI, M. Y.; ZANG, T. A., 2006. *Spectral Methods-Fundamentals in Single Domains*. New York: Springer.
- CHERN,MING-JYH, 2014. Direct-forcing immersed boundary modeling of vortex-induced vibration of a circular cylinder. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 134 109–121
- GOVARDHAN, R.; WILLIAMSON, C. H. K. , 2001 Mean and fluctuating velocity fields in the wake of a freely-vibrating cylinder. *Journal of Fluids and Structures*, p. 489–501.
- LIMA-E-SILVA, A. L. F., 2002. Desenvolvimento e Implementação de uma Nova Metodologia para Modelagem de Escoamentos sobre Geometrias Complexas: Método da Fronteira Imersa como Modelo Físico Virtual. 162 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- MARIANO, F. P., 2011. Soluções Numéricas de Navier-Stokes Utilizando uma Hibridação das Metodologias Fronteira Imersa e Pseudospectral de Fourier. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia Mecânica - FEMEC, Uberlândia, MG, Brazil.
- MOHD-YUSOF, J., 1997. Combined immersed-boundary/b-spline methods for simulations of flow in complex geometries. *CTR Annual Research Breifs*, p. 317–327.
- SINGH, S.P. AND MITTAL,S., 2005. Vortex-induced oscillations at low Reynolds numbers: Hysteresis and vortex-shedding modes. *Journal of Fluids and Structures* vol. 20, 1085–1104.
- TELKOVA, J, 2008. Flow visualization around the two prismatic bodies. In: . Novosibirsk Russia: [s.n.].
- WILLIAMSON,C. H. K. AND ROSHKO,A. , 1988. Vortex Formation in the wake oscillating cylinder. *Journal of Fluids and Structures* vol. 2, 355-381
- WILLIAMSON,C.H.K. 1989. Oblique and parallel modes of vortex shedding in the wake of a circular cylinder at low reynolds numbers. *J.Fluid Mech.*, p. 579–627.