

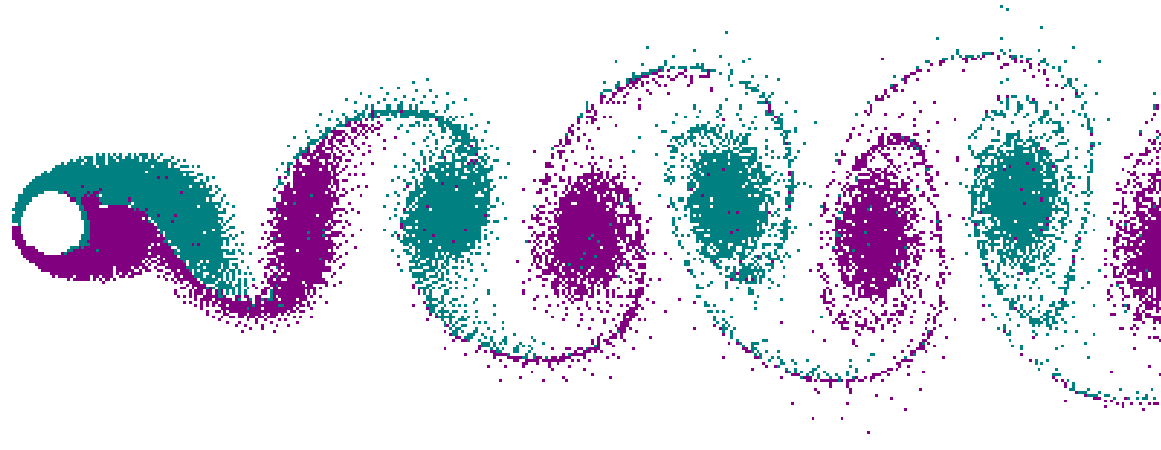
VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR VORTICIDADE (VIV)

Experimentos com tubo flexível em
água

Modelos dinâmicos baseados em
osciladores não-lineares

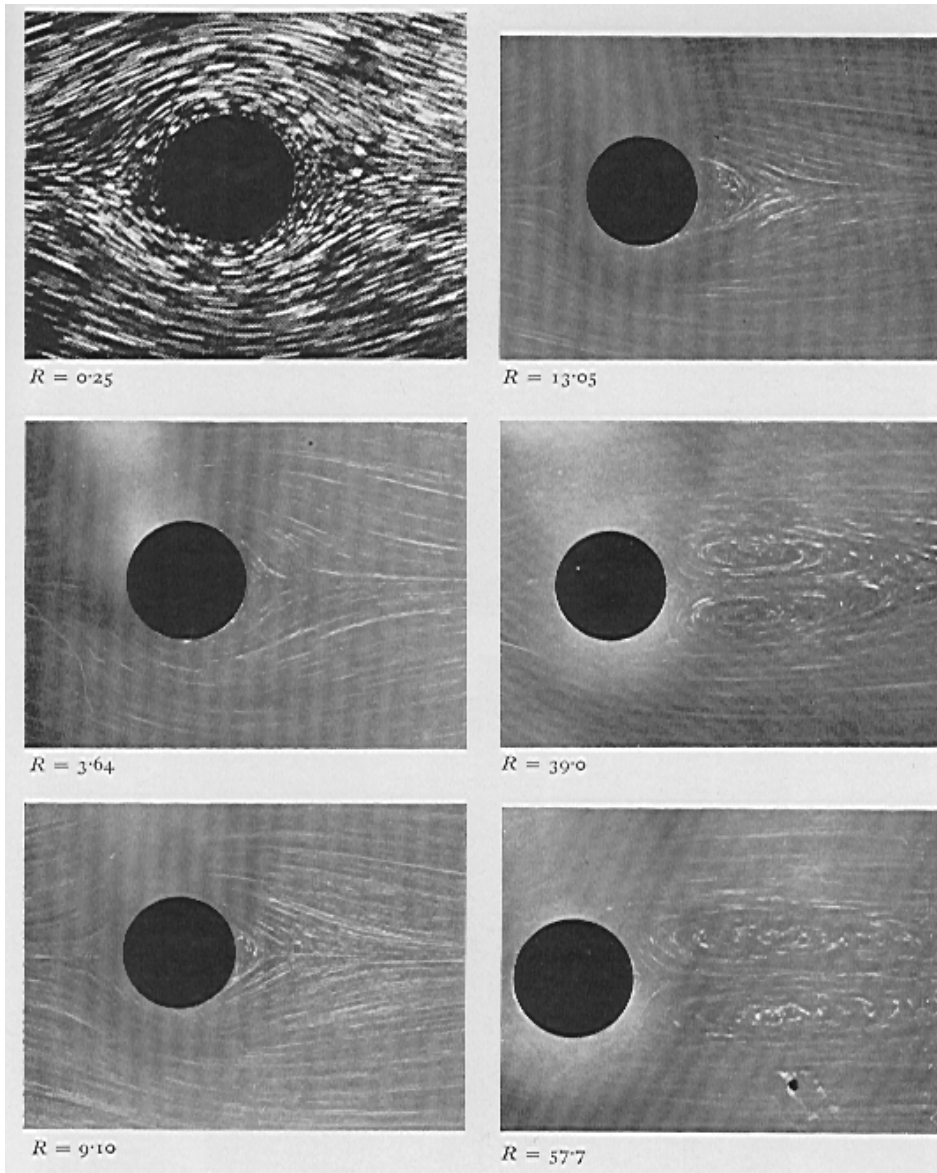
Celso Pupo Pesce

O FENÔMENO DE EMISSÃO DE VÓRTICES



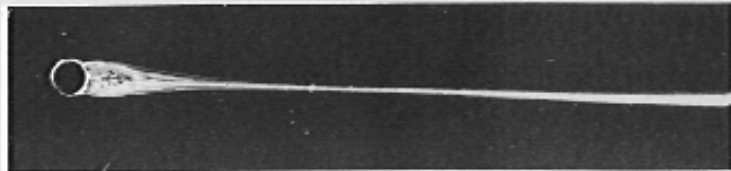
Esteira de Von Karman
Simulação por CFD, $Re=200$
(Meneghini, 1994)

Plate 1; extraída de Batchelor, 1967, pág. 365; primeira foto por Prandtl & Tietjens, 1934; demais fotos por Taneda, 1956..



Formação da esteira de von Karman

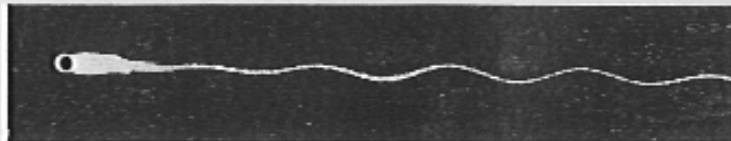
Plate2; extraída de Batchelor, 1967, pág. 366; fotos por Homann, 1936.



$R = 32$



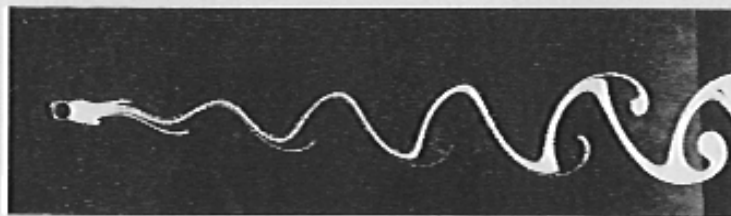
$R = 73$



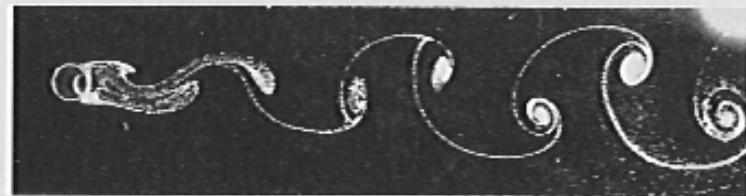
$R = 55$



$R = 102$

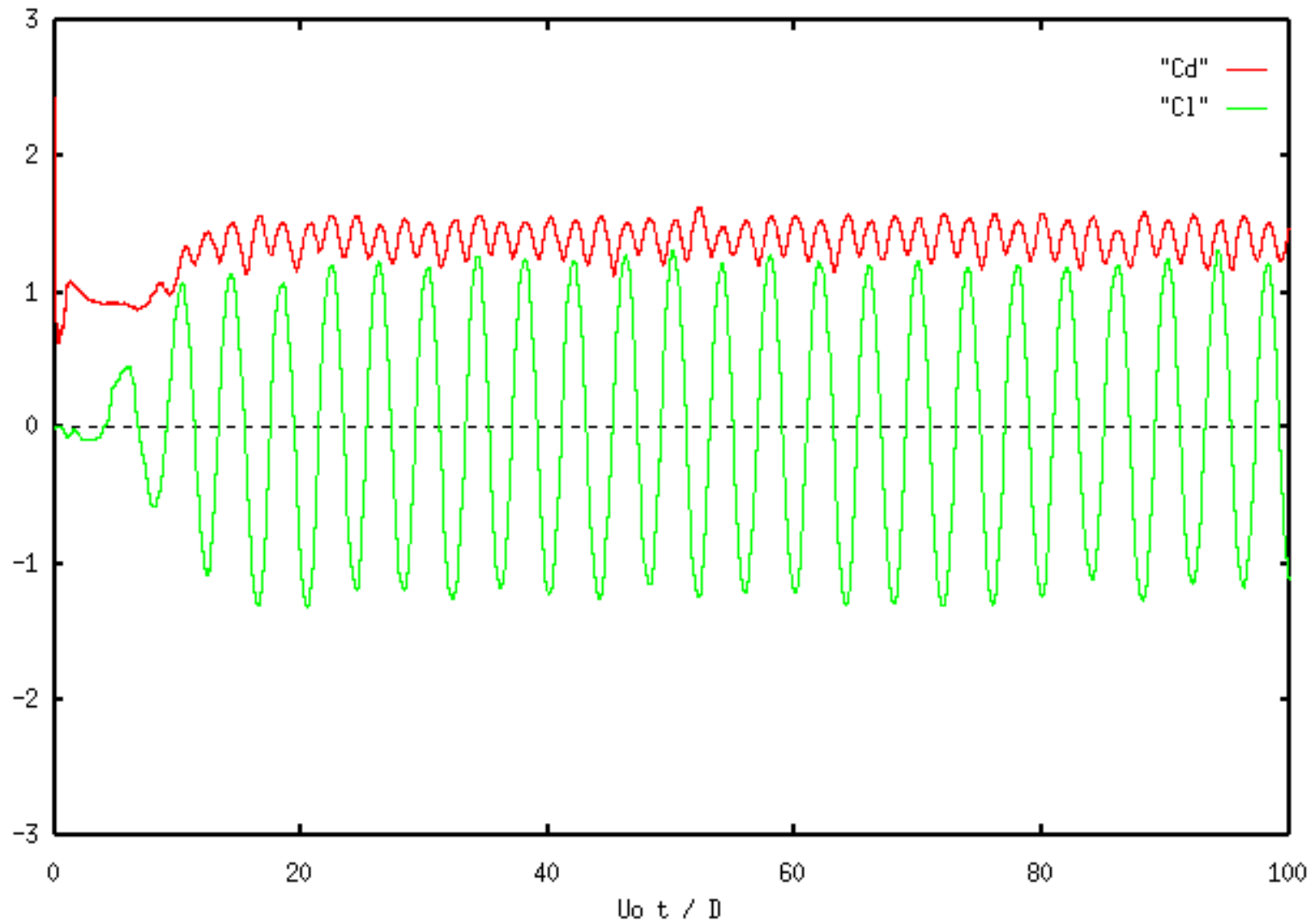


$R = 65$

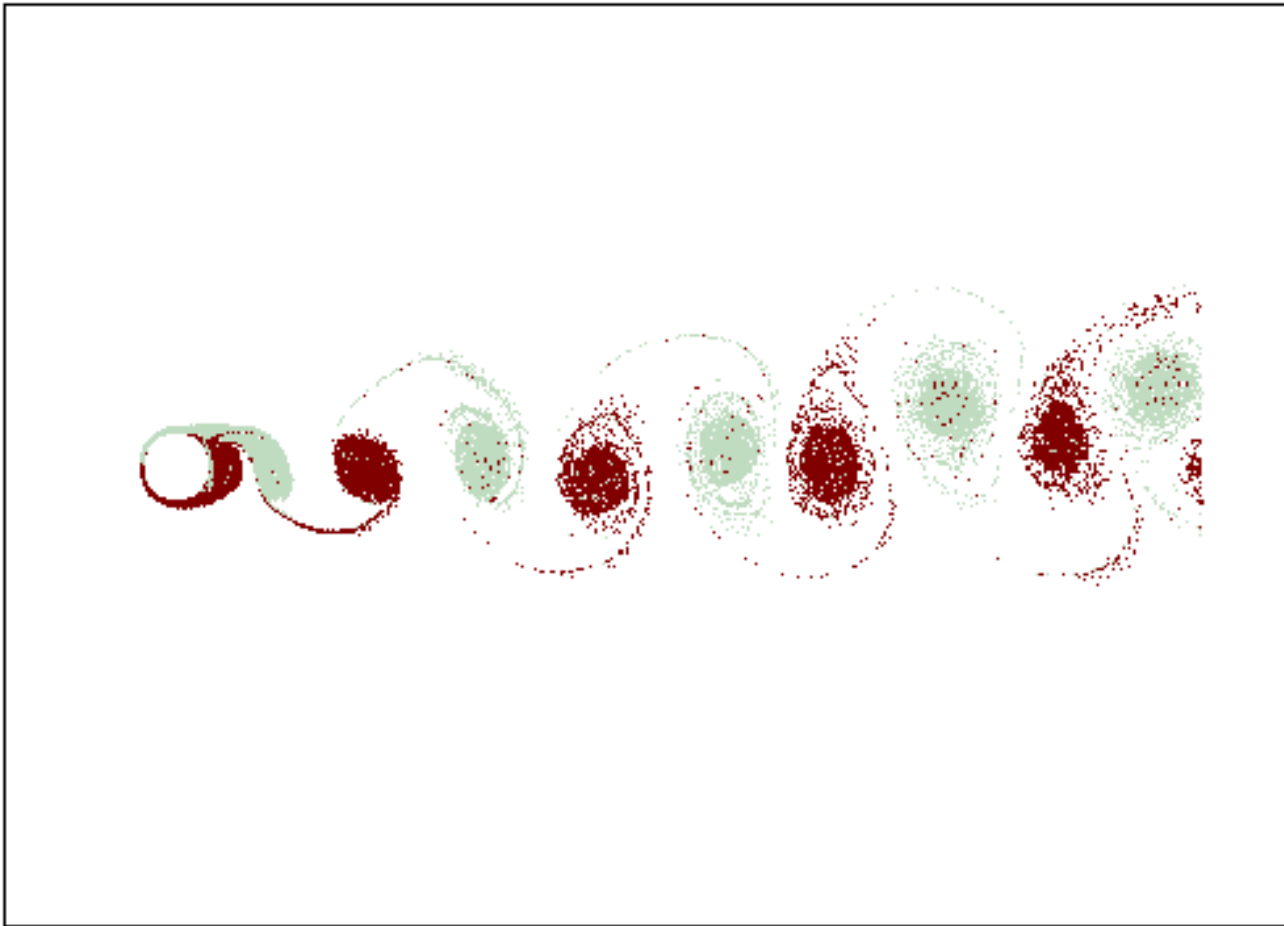


$R = 161$

Coeficientes de forças de arrasto ("drag") e sustentação ("lift") $Re = 1000$,
cilindro rígido e fixo;
(Simulação numérica: Saltara et al., 1998).



Estrutura da Esteira. $Re = 1000$, cilindro rígido e fixo;
(Simulação Numérica: Saltara et al., 1998).



Emissão alternada de vórtices

- Frequência de emissão: de Strouhal, correspondente à liberação de vórtices quando da ausência de oscilação.
- Experimentos indicam que:

$$f_s = S U / D$$

$$S \cong 0.20$$

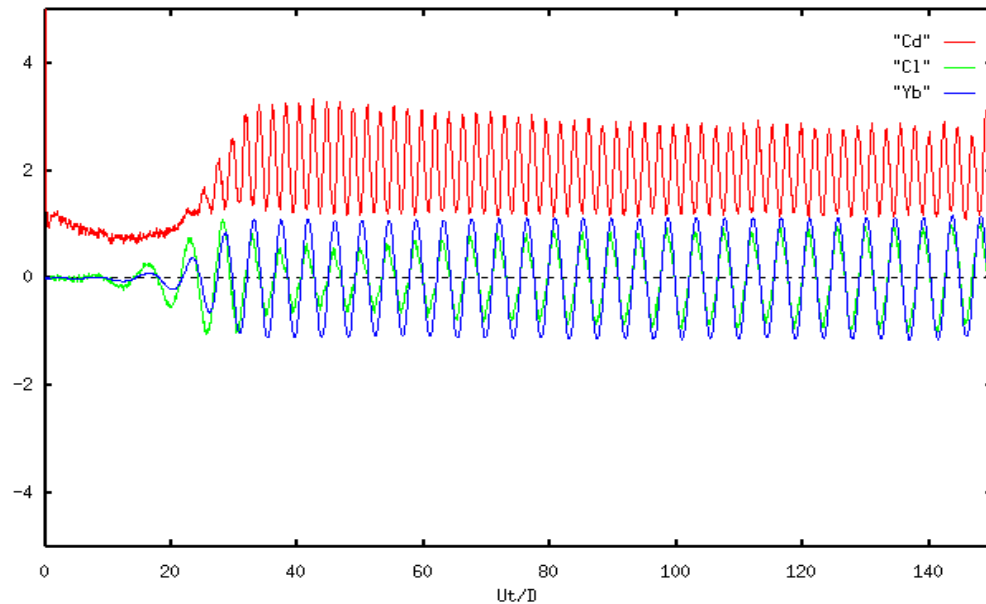
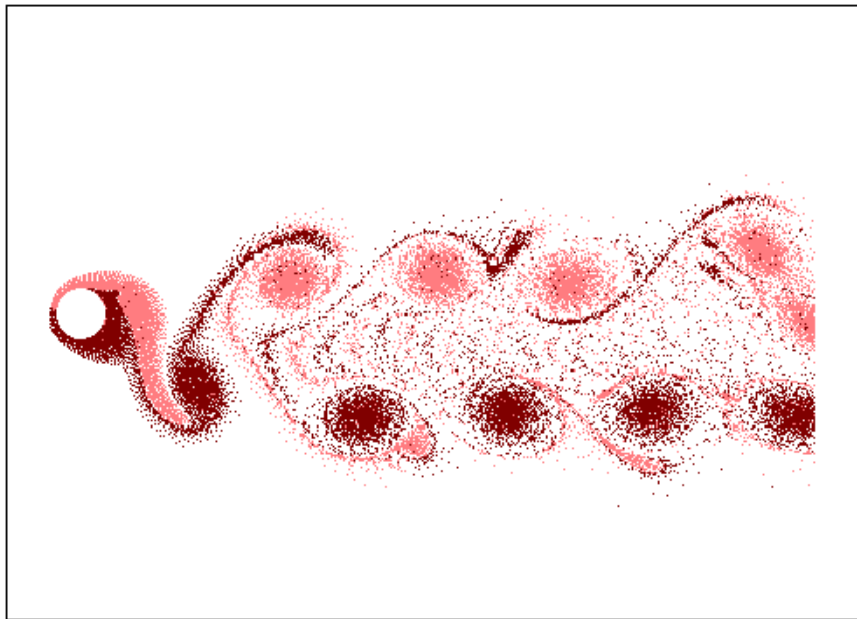
O Fenômeno de Lock-in

- Fenômeno de oscilação auto-excitada e auto-regulada, fruto do balanço de forças de excitação, provocadas pela emissão de vórtices, forças de inércia, forças de restauração elástica e forças de amortecimento fluido.
- O campo de vorticidade que causa a excitação é destruído à medida em que aumenta a amplitude de oscilação, o que determina um ciclo-limite de resposta;
- Durante o processo, a frequência de emissão de vorticidade é determinada pela frequência natural de oscilação da estrutura, num fenômeno de sincronia conhecido como *lock-in*;

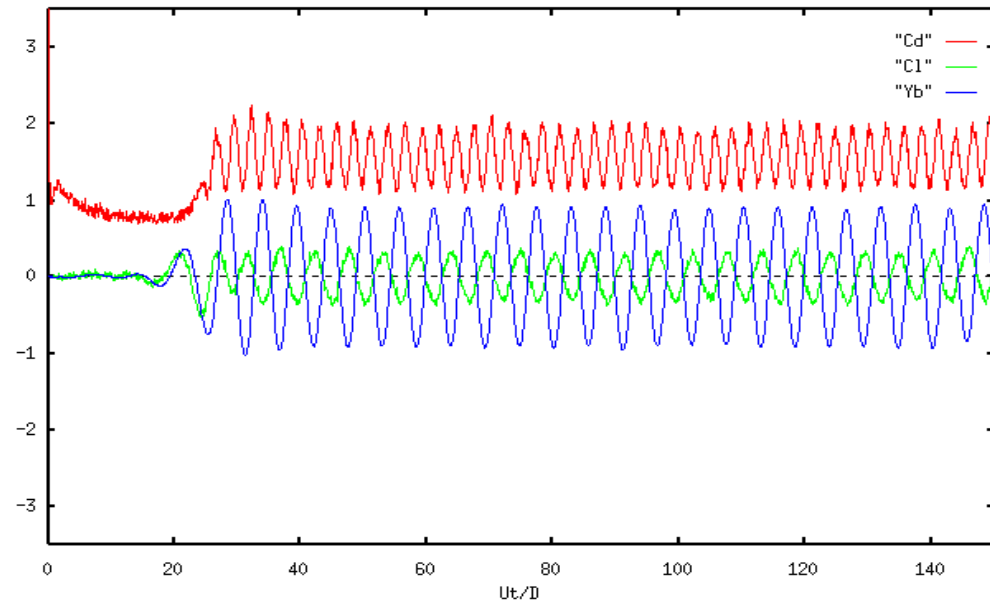
Parâmetros adimensionais relevantes

- Razão de massa:
$$m^* = \frac{m}{m_d} = \frac{m}{\rho L \pi d^2 / 4}$$
- Coeficiente de massa adicional:
$$C_a = \frac{m_a}{m}$$
- Razão de massa efetiva:
$$(m^* + C_a)$$
- Coeficiente de amortecimento:
$$\zeta_a = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{c}{2(m + m_a)\omega_n}$$
- Parâmetro massa-amortecimento:
$$(m^* + C_a)\zeta_a$$
- Amplitude de oscilação do cilindro:
$$\frac{A}{D} \approx \frac{1}{4\pi} \frac{V_r^2 F_0 \sin \phi}{(m^* + C_a)\zeta_a}$$

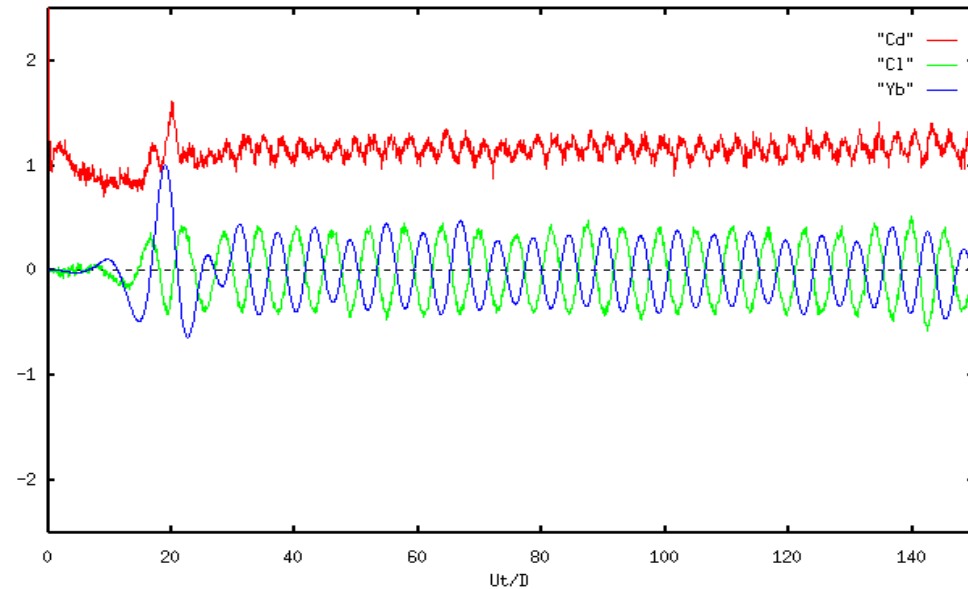
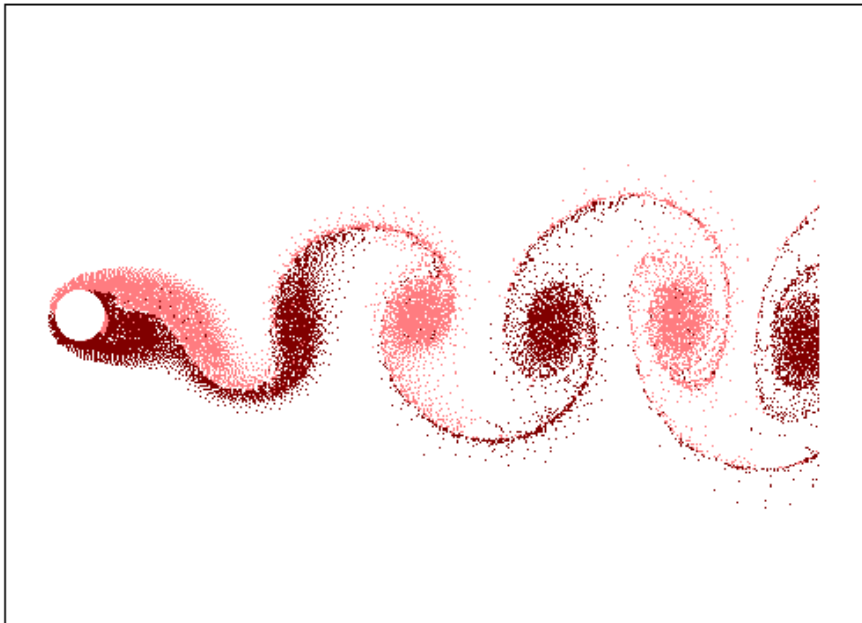
Esteira para $V_r = UT_\infty/D = 5.0$ e Coeficientes de "lift", "drag" e amplitude de oscilação transversal; cilindro rígido sobre apoio linearmente elástico
(Fujarra et al., 1998) DFC. $Re = 200$;



Esteira para $UT_n/D=7.5$ e Coeficientes de "lift", "drag" e amplitude de oscilação transversal; cilindro rígido sobre apoio linearmente elástico
(Fujarra et al., 1998) DFC. $Re=200$;



Esteira para $UT_n/D=12.5$ e Coeficientes de "lift", "drag" e amplitude de oscilação transversal; cilindro rígido sobre apoio linearmente elástico
(Fujarra et al., 1998) DFC. $Re=200$;



Tubos rígido montado sobre suporte elástico:

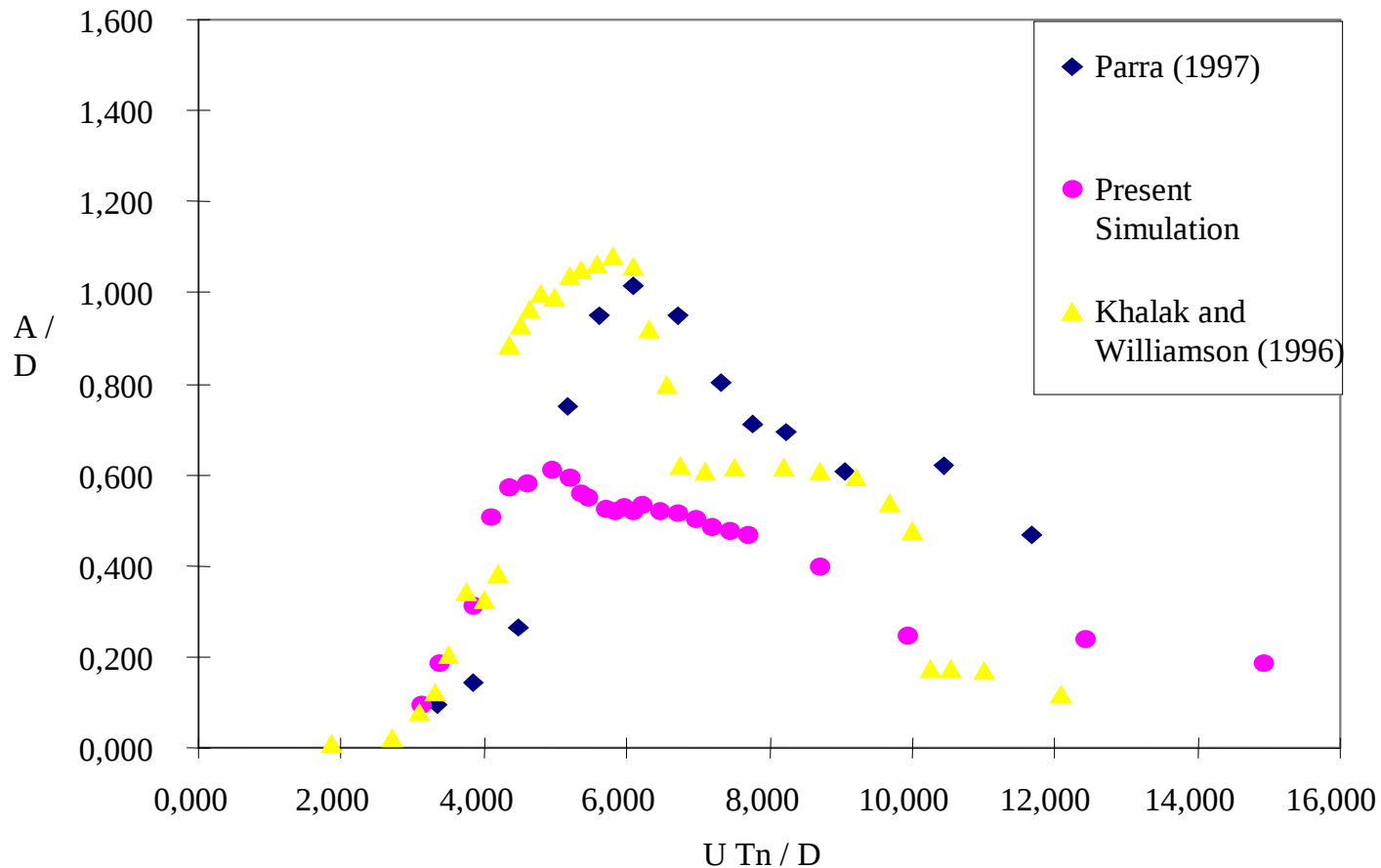
DOIS “RAMOS” DE RESPOSTA

Fujarra, Pesce, Meneghini & Parra,

Proceedings of FEDSM'98

1998 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting

June 21-25, 1998, Washington, DC

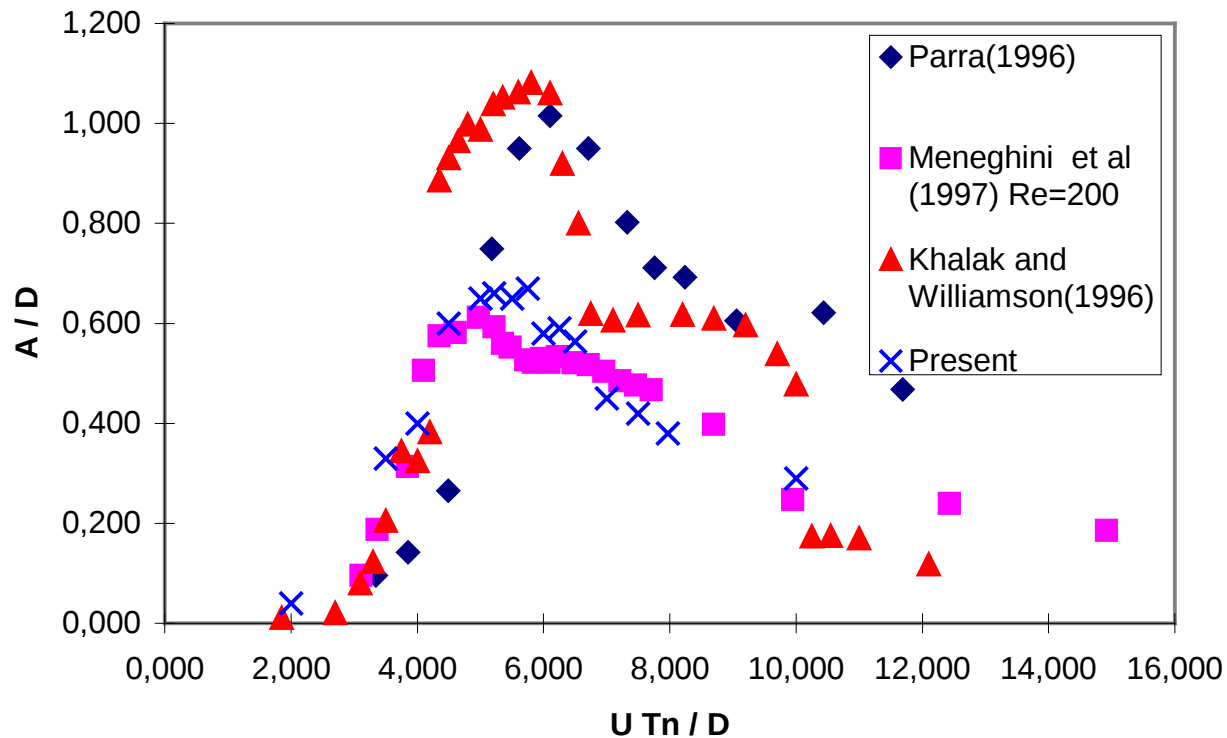


Tubos rígido montado sobre suporte
elástico:

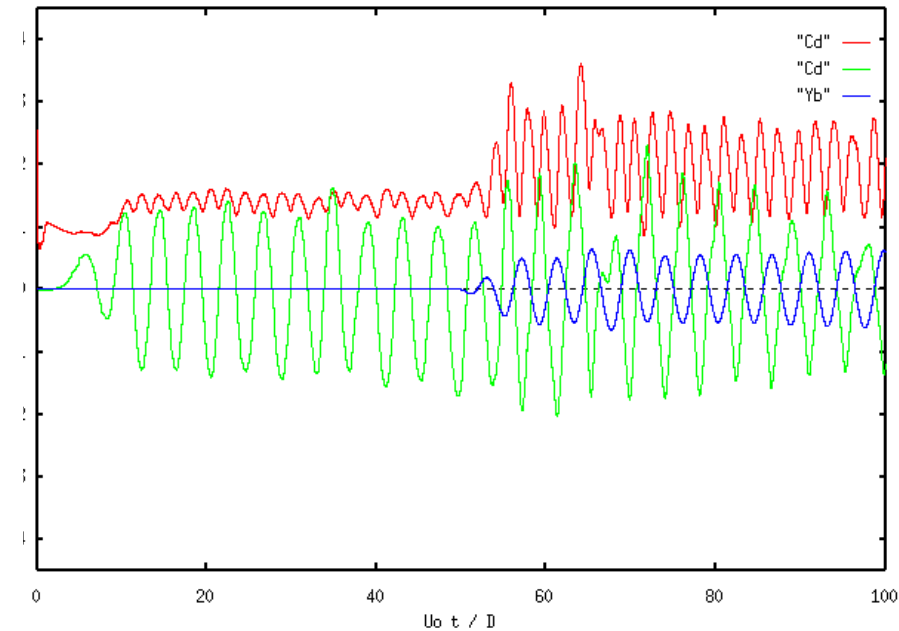
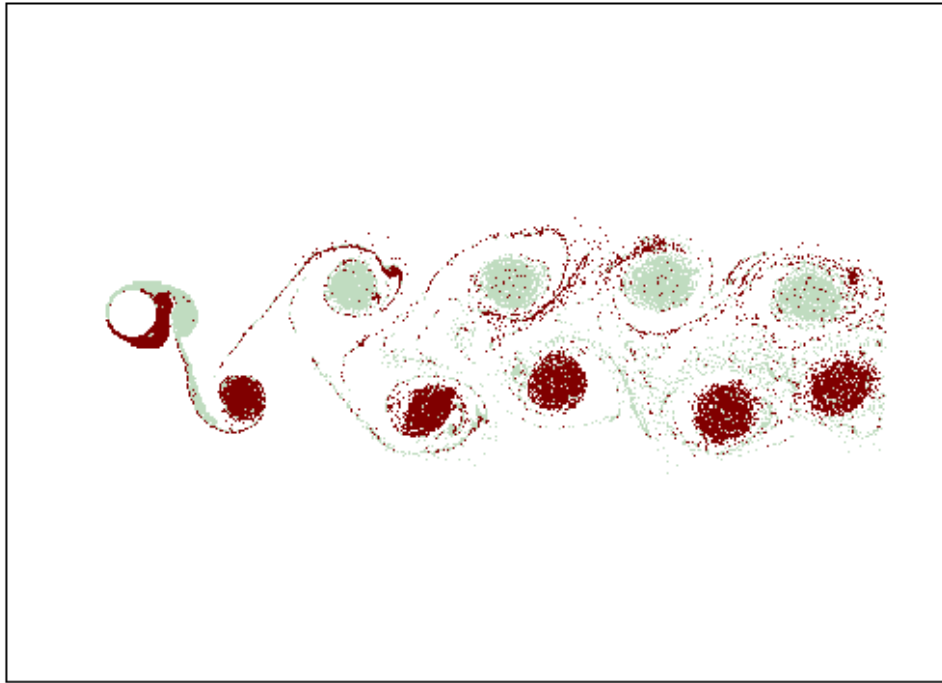
DOIS “RAMOS” DE RESPOSTA

- *Qual é a origem dos dois "ramos" de amplitude de resposta?*
- *Por que a simulação numérica não recupera com maior acuidade o comportamento observado experimentalmente?*

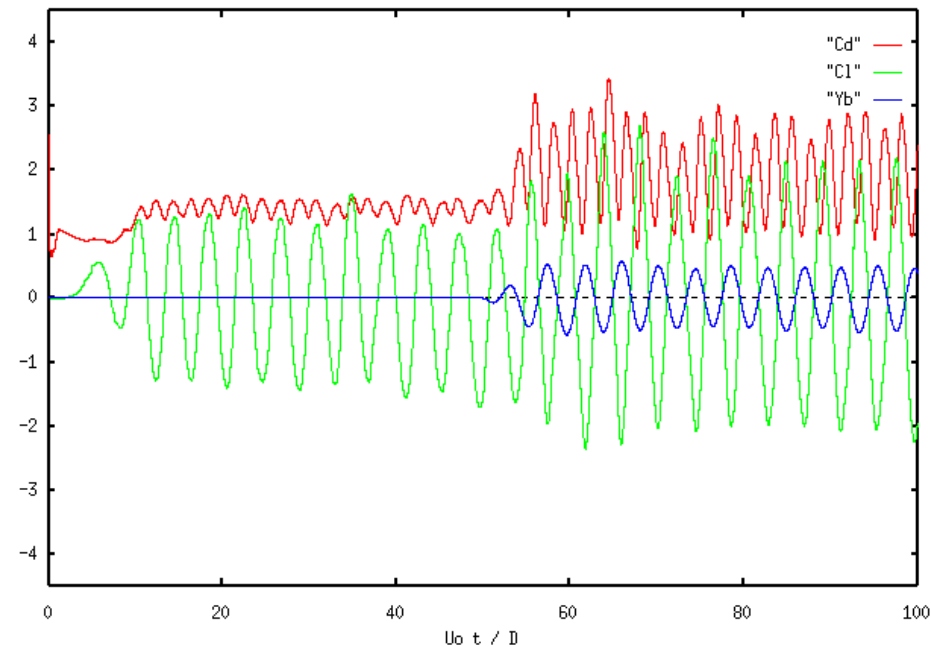
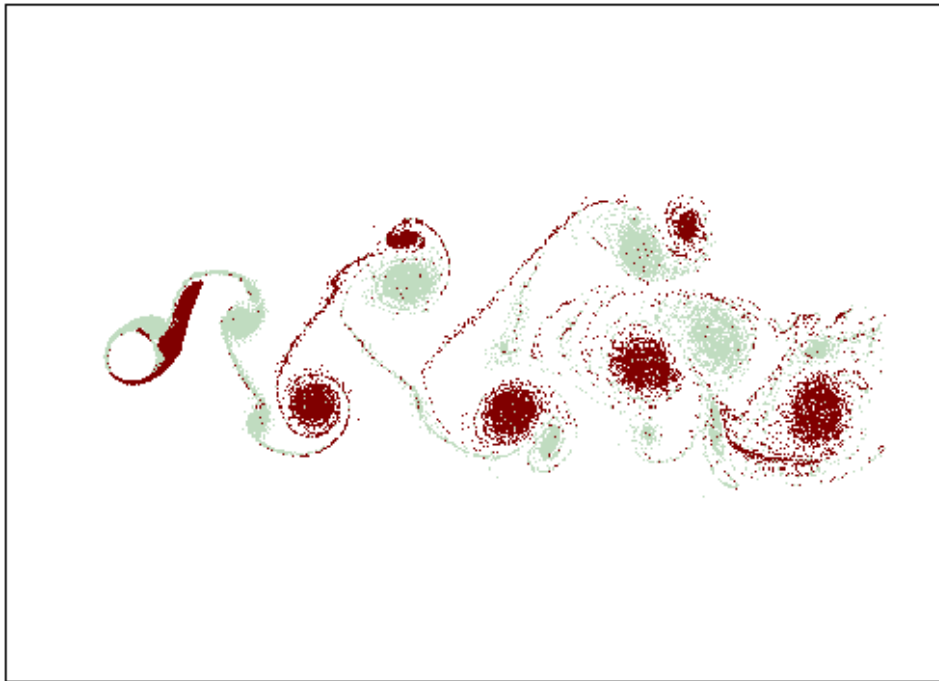
Tubos rígido montado sobre suporte elástico:
DOIS “RAMOS” DE RESPOSTA
Amplitude de Oscilação versus Velocidade Reduzida.
Simulações ($Re=1000$) são indicadas por ‘x’;
(Saltara et al., 1998).



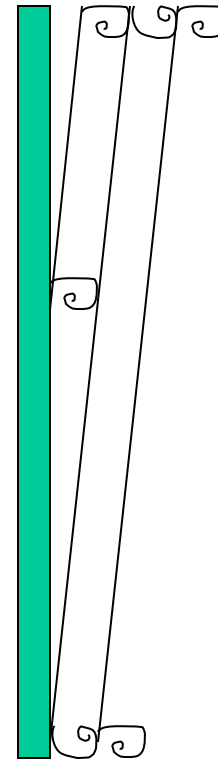
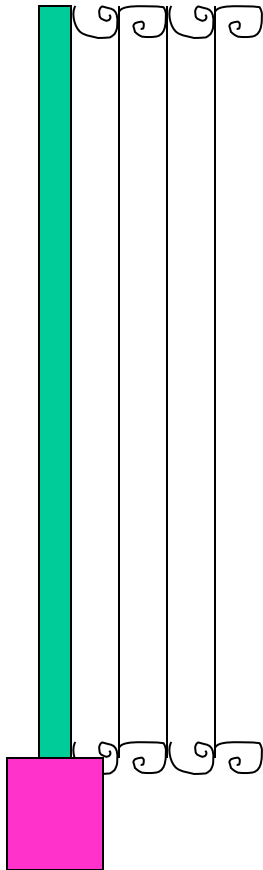
Esteira para $UT_n/D=5.75$ e Coeficientes de "lift", "drag" e amplitude de oscilação transversal; cilindro rígido sobre apoio linearmente elástico
(Saltara et al., 1998) DFC. $Re=1000$;



Esteira para $UT_n/D=6.0$ e Coeficientes de "lift", "drag" e amplitude de oscilação transversal; cilindro rígido sobre apoio linearmente elástico
(Saltara et al., 1998) DFC. $Re=1000$;



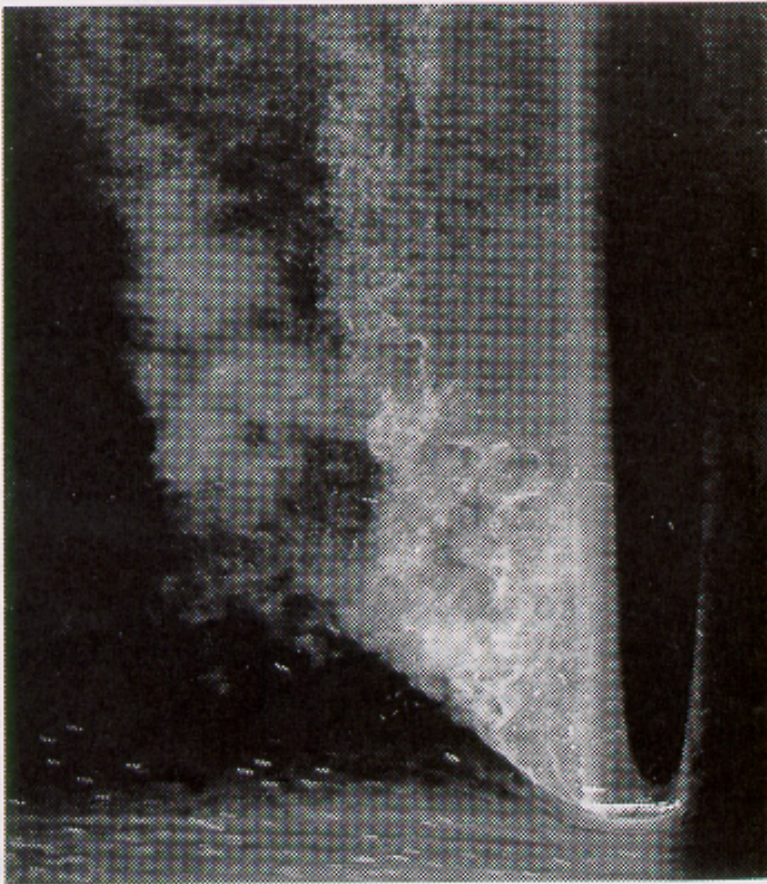
Emissões de vorticidade: “paralela” e “oblíqua”
hipótese aventada por Williamson, 1997 para co-existência de
dois “ramos de resposta” em *lock-in*



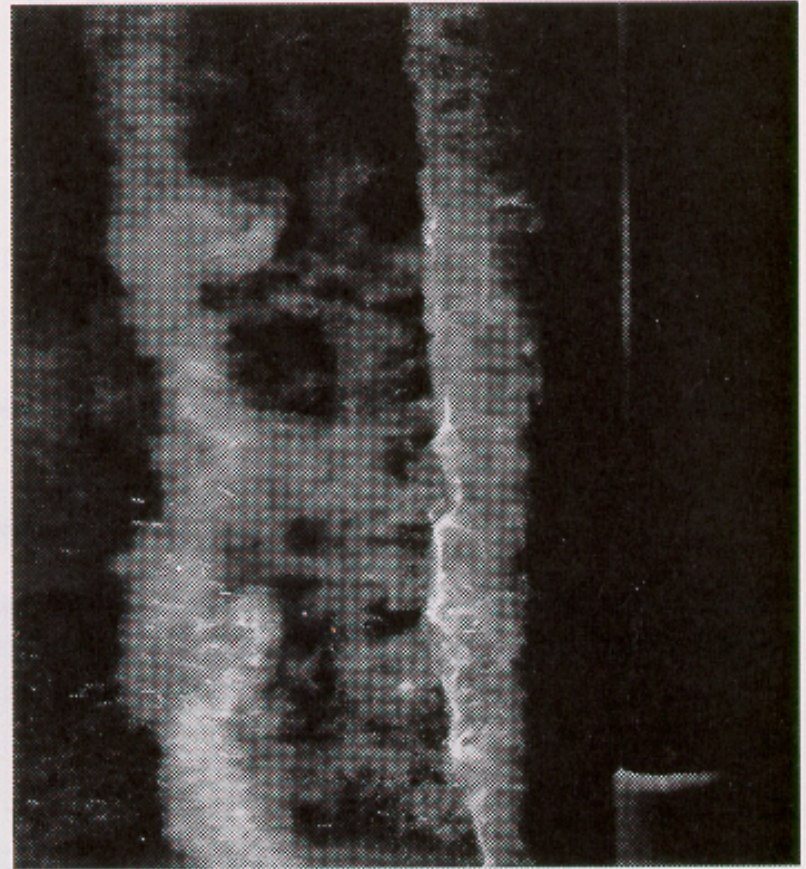
Visualização com bolhas de hidrogênio.

À esquerda, sem “controle de condição de contorno” a emissão é oblíqua.

À direita, com controle, através de da técnica de “cilindro de extremidade”, a emissão é paralela; Khalak & Williamson, 1996, fig. 3.



Free end
Oblique shedding

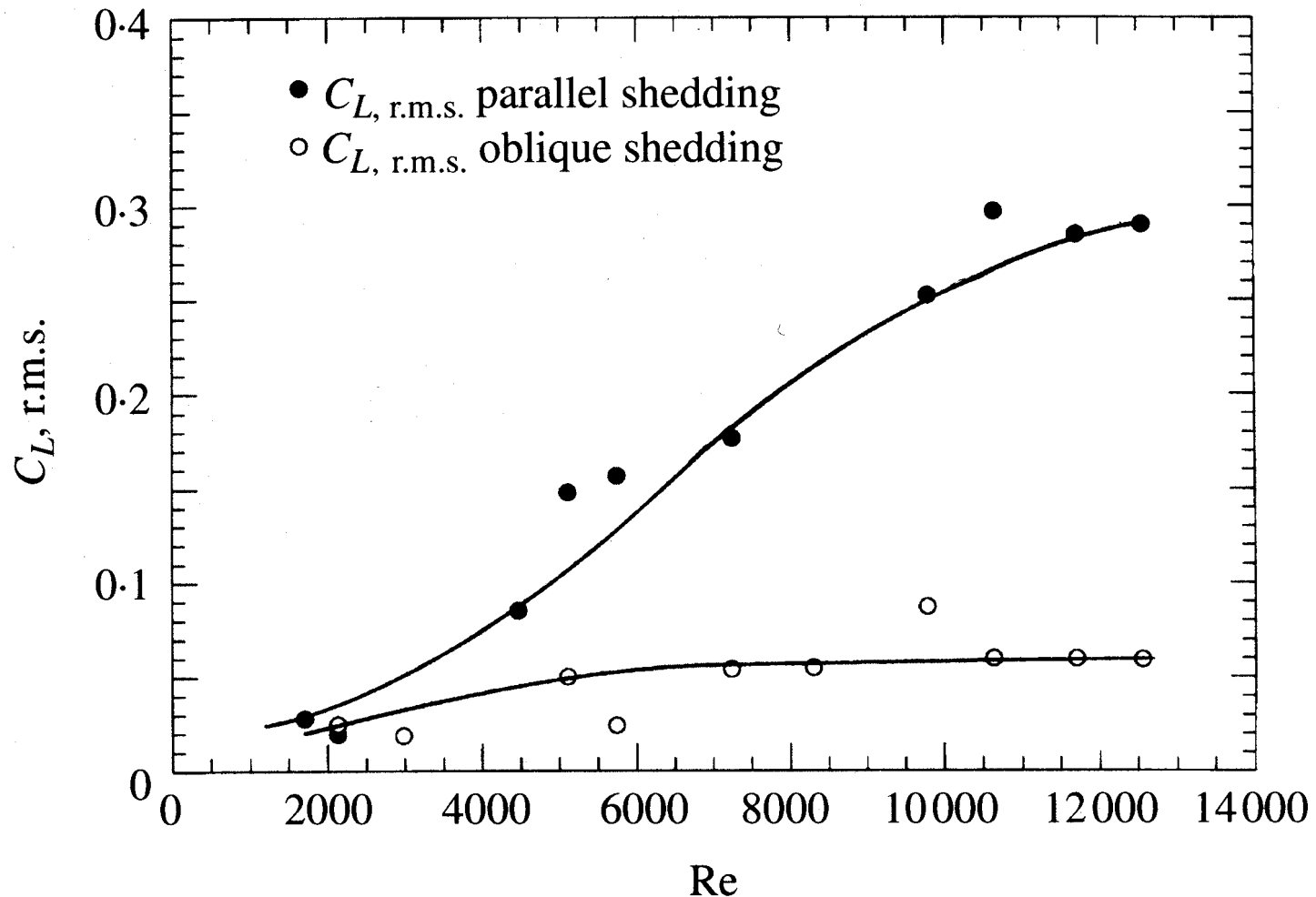


End cylinder
Parallel shedding

Valor eficaz do Coeficiente de Sustentação medido sobre um cilindro rígido (fixo) em função do número de Reynolds.

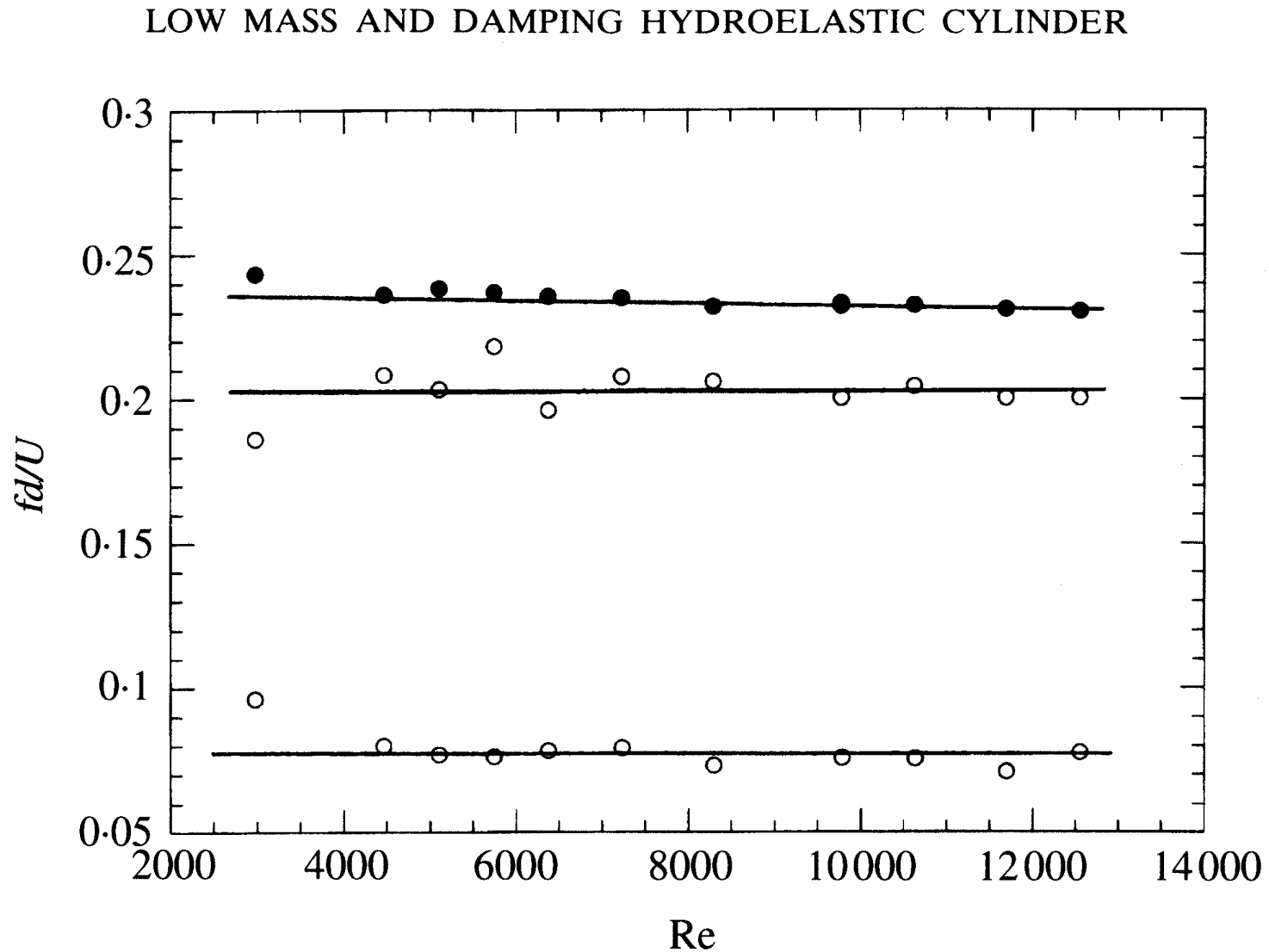
Note a existência de duas curvas ("ramos") correspondentes a dois modos distintos de emissão de vórtices: paralelo e oblíquo;

Khalak & Williamson, 1996; fig 5.



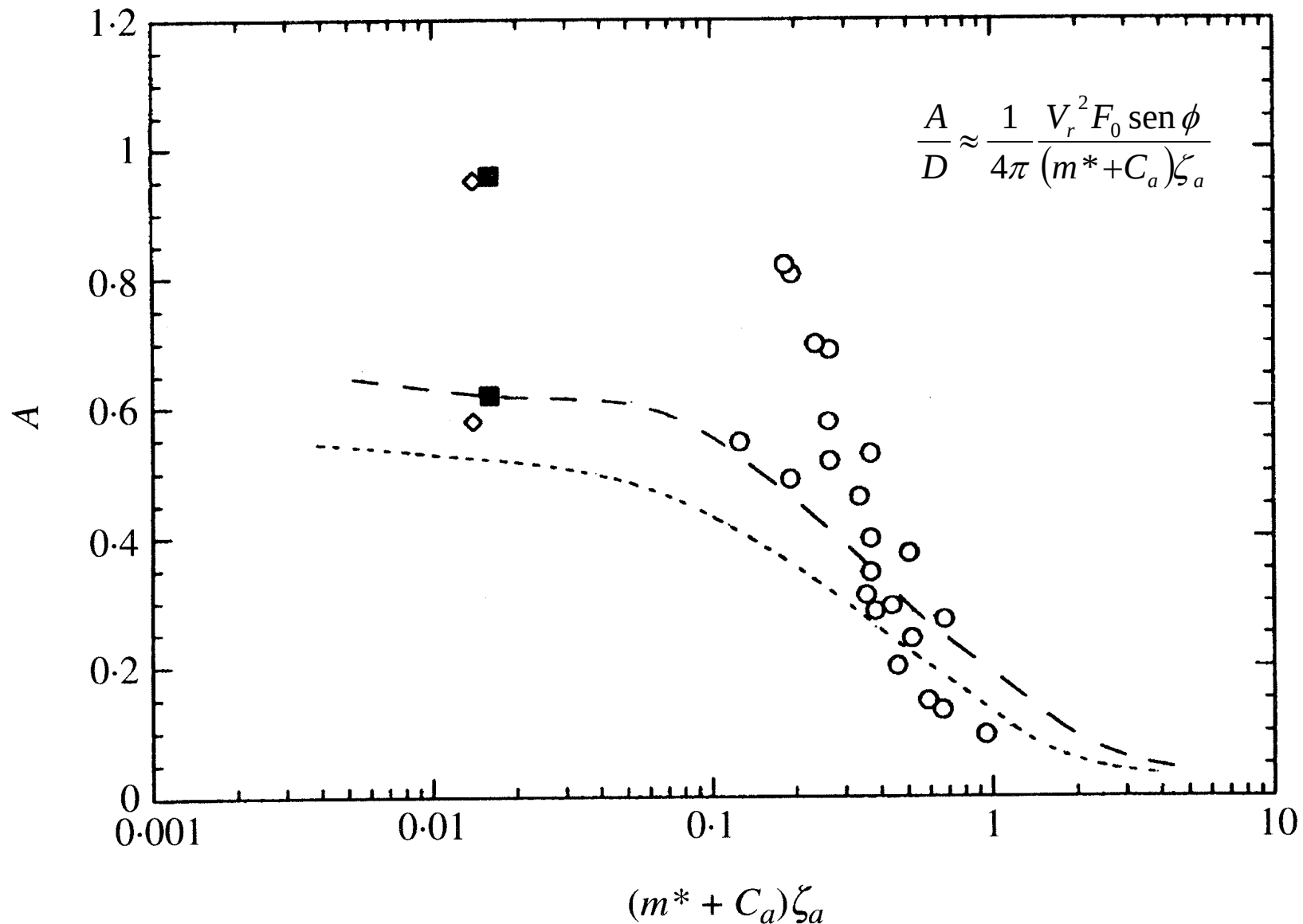
Frequências dominantes no espectro de força de sustentação,
adimensionalizadas pela velocidade e pelo diâmetro;
cilindro rígido (fixo)

Khalak & Williamson, 1996; fig. 8.



Máxima amplitude adimensional de resposta vs parâmetro massa-amortecimento;

Khalak & Williamson, 1996; fig. 15.



Newman & Karniadakis, JFM, 1997:
simulações numéricas tridimensionais com cabo
Re=100 e 200

- *Dois padrões de vibração observados:*
 - (i) *ondas estacionárias ("standing waves");*
 - (ii) *ondas propagantes ("travelling waves").*
- Para o caso de cabo sem restrição apenas o segundo padrão foi observado.
- Já, quando o cabo possuía restrição segundo o eixo x, os dois padrões foram observados, muito embora apenas o segundo, de ondas propagantes, apresentava persistência.
- Observaram que o padrão de ondas **propagantes** está associado à **emissão oblíqua** de vorticidade.
- Estas observações são claramente consistentes e complementares àquelas de Khalak & Williamson, 1996.

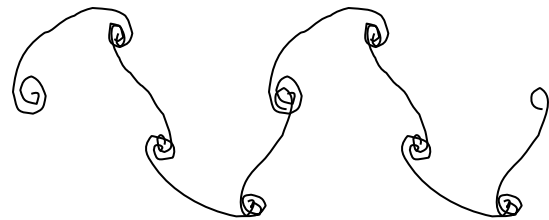
Padrões de emissão 2S e 2P

hipótese aventada por Williamson & Roshko, 1989 para co-existência de dois “ramos de resposta” em *lock-in*

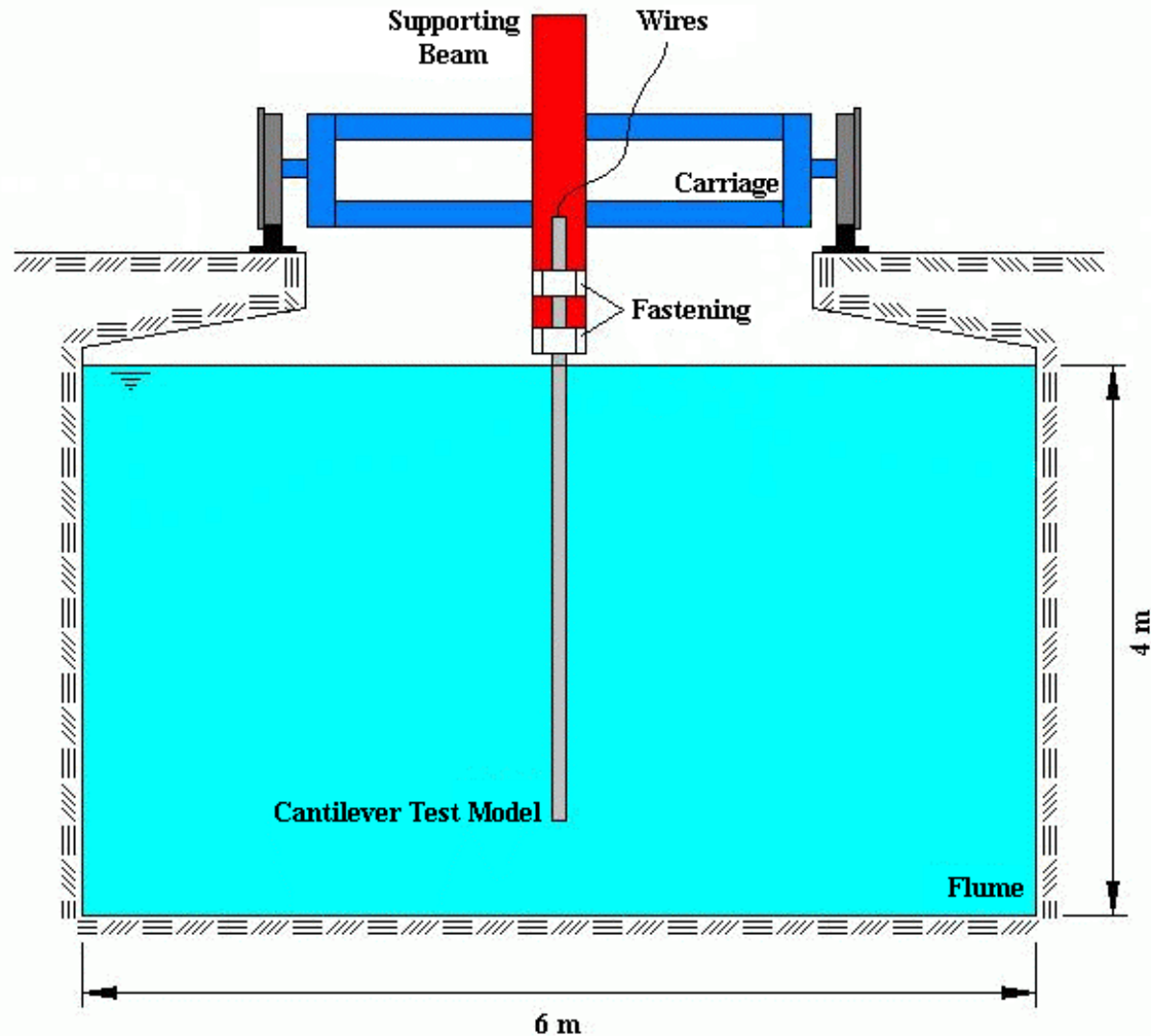
2-S



2-P

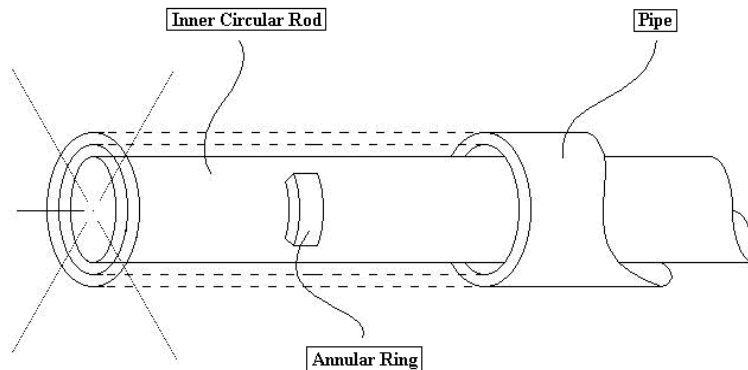


Ensaio com tubo flexível em água
Fujarra, Pesce & Parra, ISOPE'98;
Journal of Fluid and Structures (invited)
Arranjo Experimental e Eletrônica (IPT)

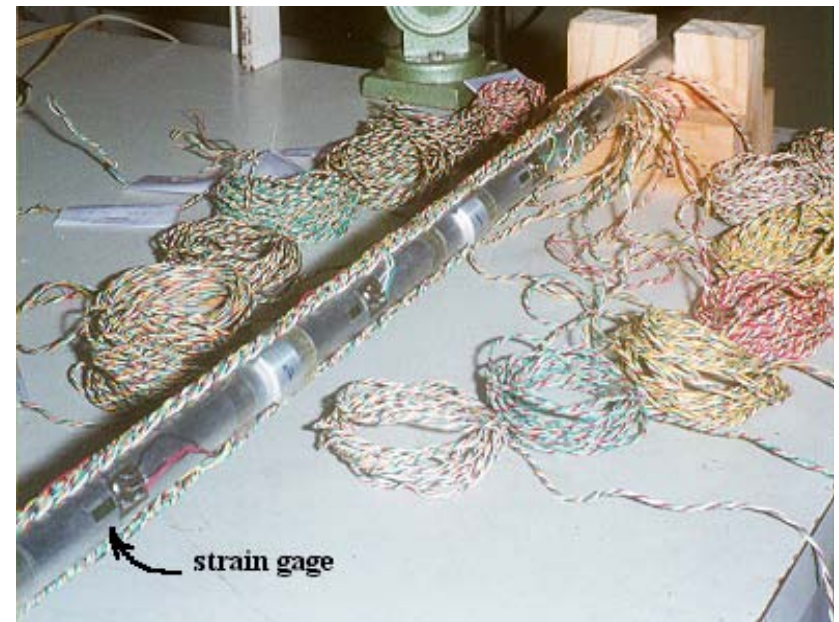


Ensaio com tubo flexível em água

Fujarra, Pesce & Parra, ISOPE'98;
Journal of Fluid and Structures (invited)



Pipe	Aluminum Alloy: Alcoa: TR-058
External diameter, D_{ec}	31,75 mm
Internal diameter, D_{ic}	25,40 mm
Mass density, ρ_c	2710 kg/m ³
Internal Solid Rod	Auminum Alloy: Alcoa: VR-016
Diameter, D_a	19,33 mm
Mass density, ρ_a	2710 kg/m ³



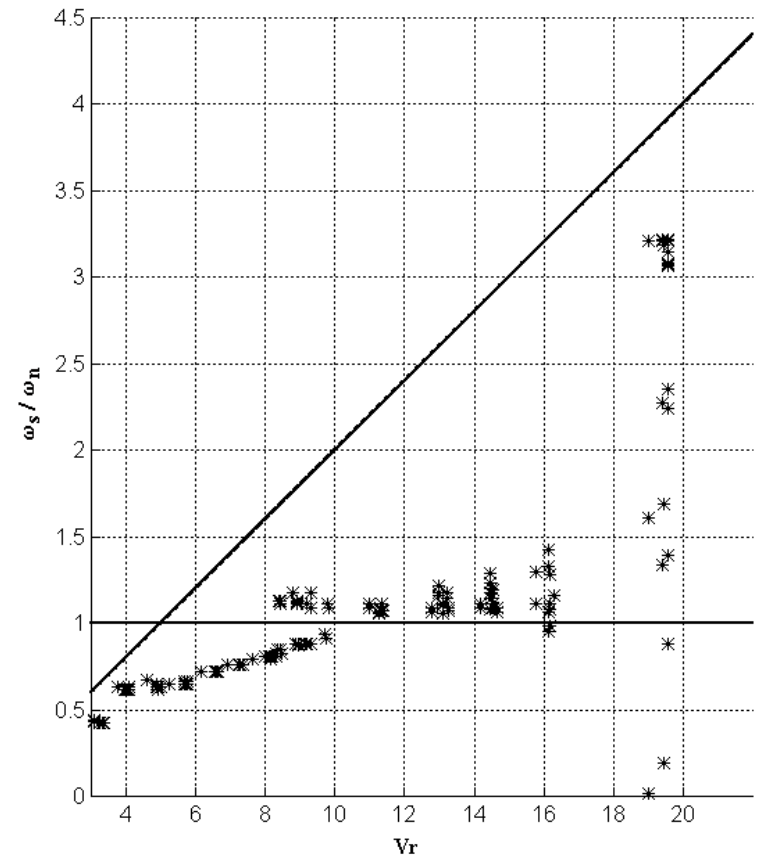
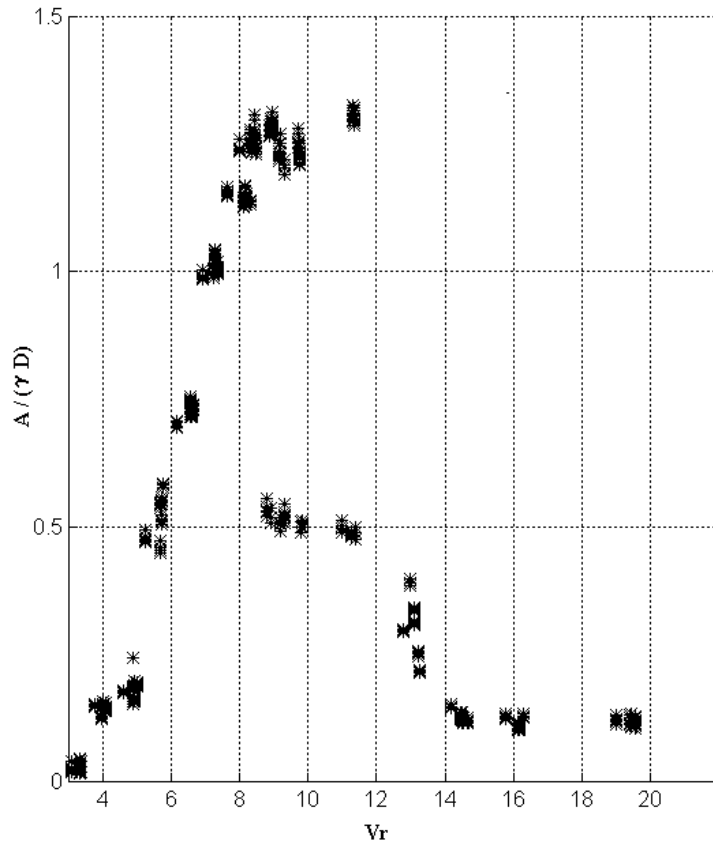
Instrumentação com Extensômetros Elétricos

Principais parâmetros do experimento; (Fujarra, Pesce & Parra, 1998)

$(EI)_{eq}$	2568.4 [Nm ²]
1 st mode, total damping coefficient in water, ζ_{1w}	1.25 %
1 st mode, structural damping coefficient in water, ζ_{1w}^S	0.46 %
1 st mode, structural damping coefficient in air, ζ_{1air}^S	0.57 %
1 st mode, natural frequency in water, f_{1w}	1.8915 [Hz]
1 st mode, natural frequency in air, f_{1air}	2.313 [Hz]
Structural mass, m_{struct}	1.568kg
Wiring mass, m_{wires}	0.300kg
Total system mass, m_{sys}	1.868kg
1 st mode, added mass, m_a	0.927kg
1 st mode, added mass coefficient, $C_a = m_a / (\rho \pi L D_{ec}^2 / 4)$	1.17
Mass ratio coefficient, $m^* = m_{sys} / (\rho \pi L D_{ec}^2 / 4)$	2.36
1 st mode, corrected mass ratio coefficient, $m^* + C_a$	3.53
1 st mode, mass-damping coefficient $(m^* + C_a) \zeta_{1w}$	0.016

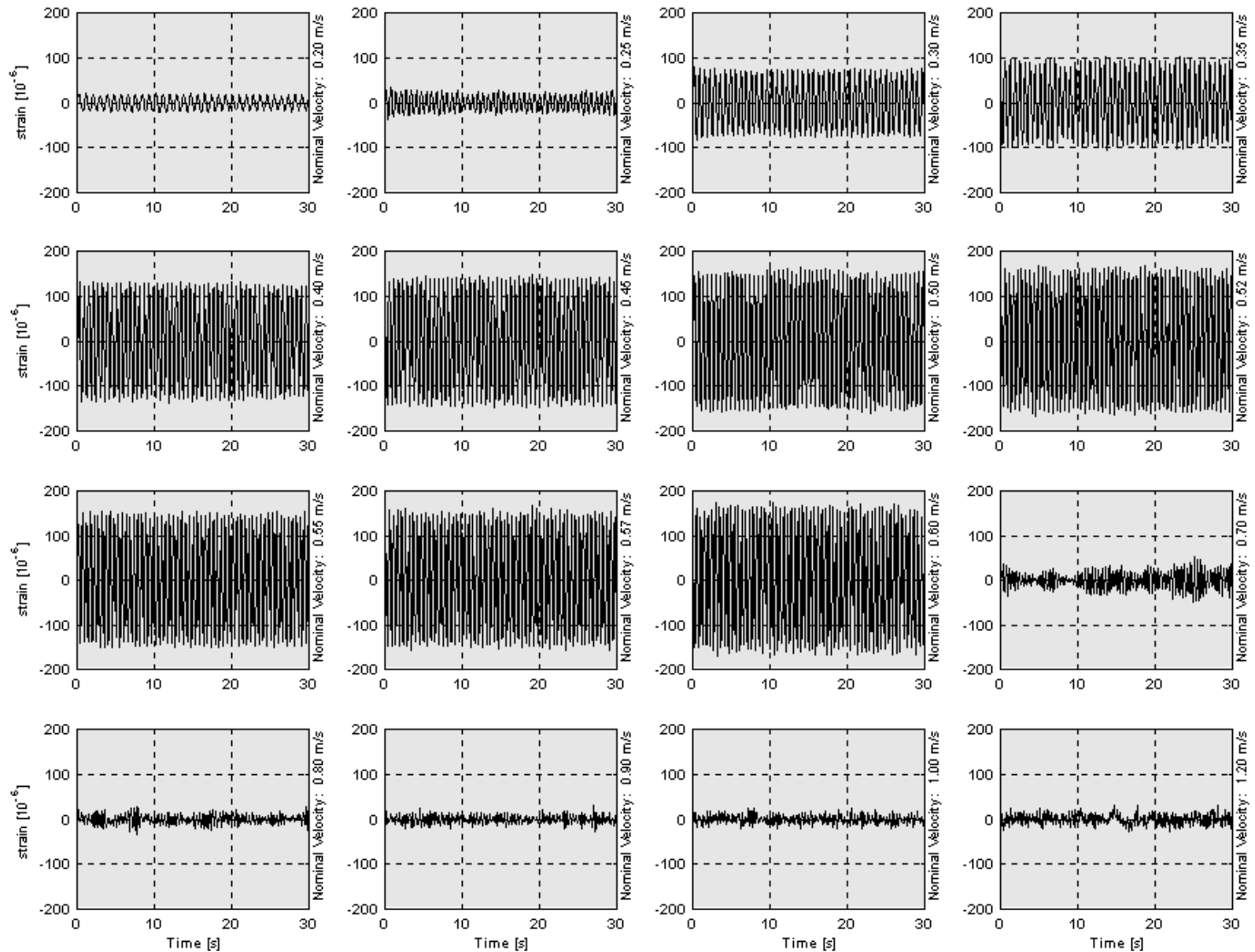
Ensaio com tubo flexível em água

Fujarra, Pesce & Parra,
Journal of Fluid and Structures (invited)



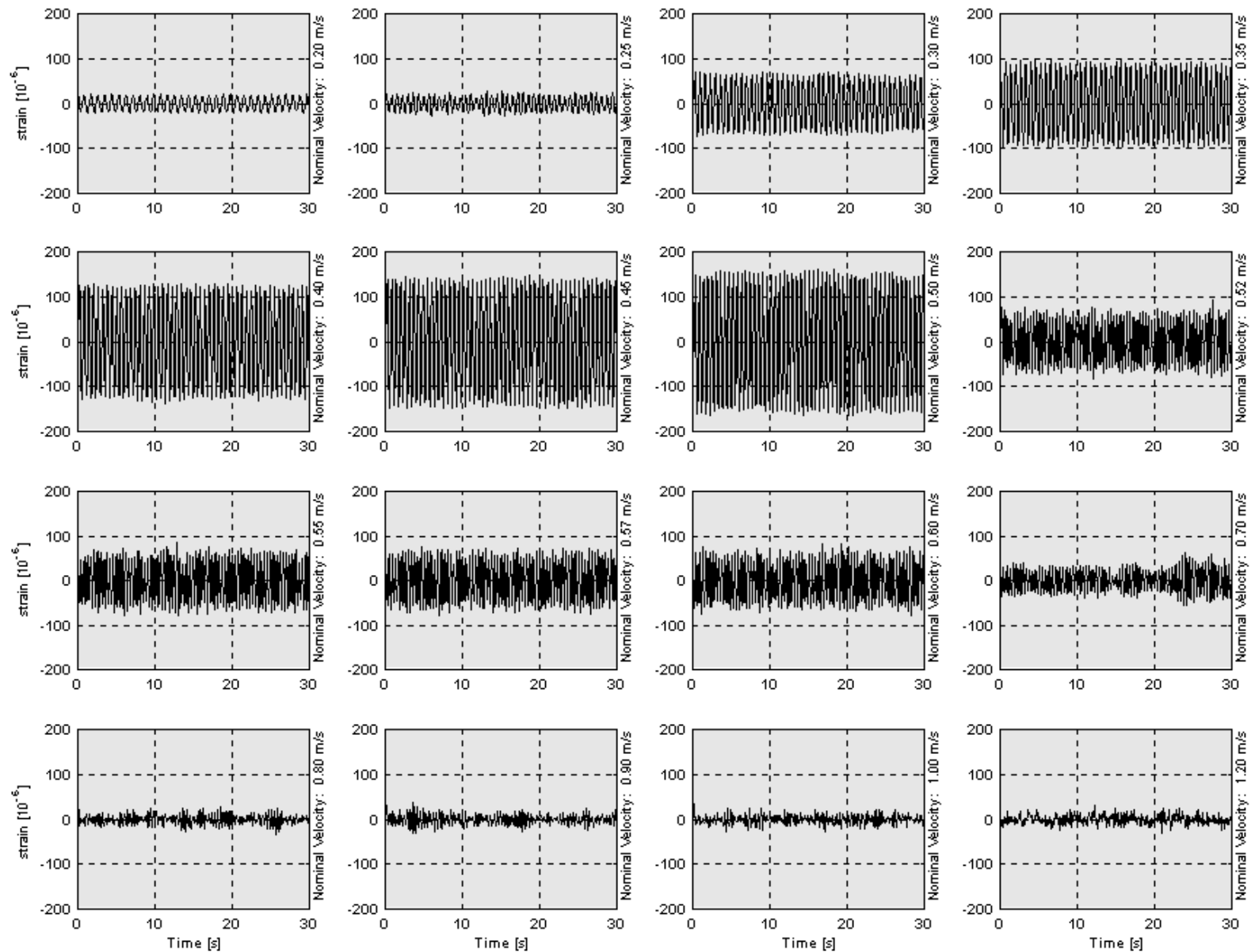
Amplitude e frequência adimensionais de
oscilação auto-excitada

TIME HISTORIES



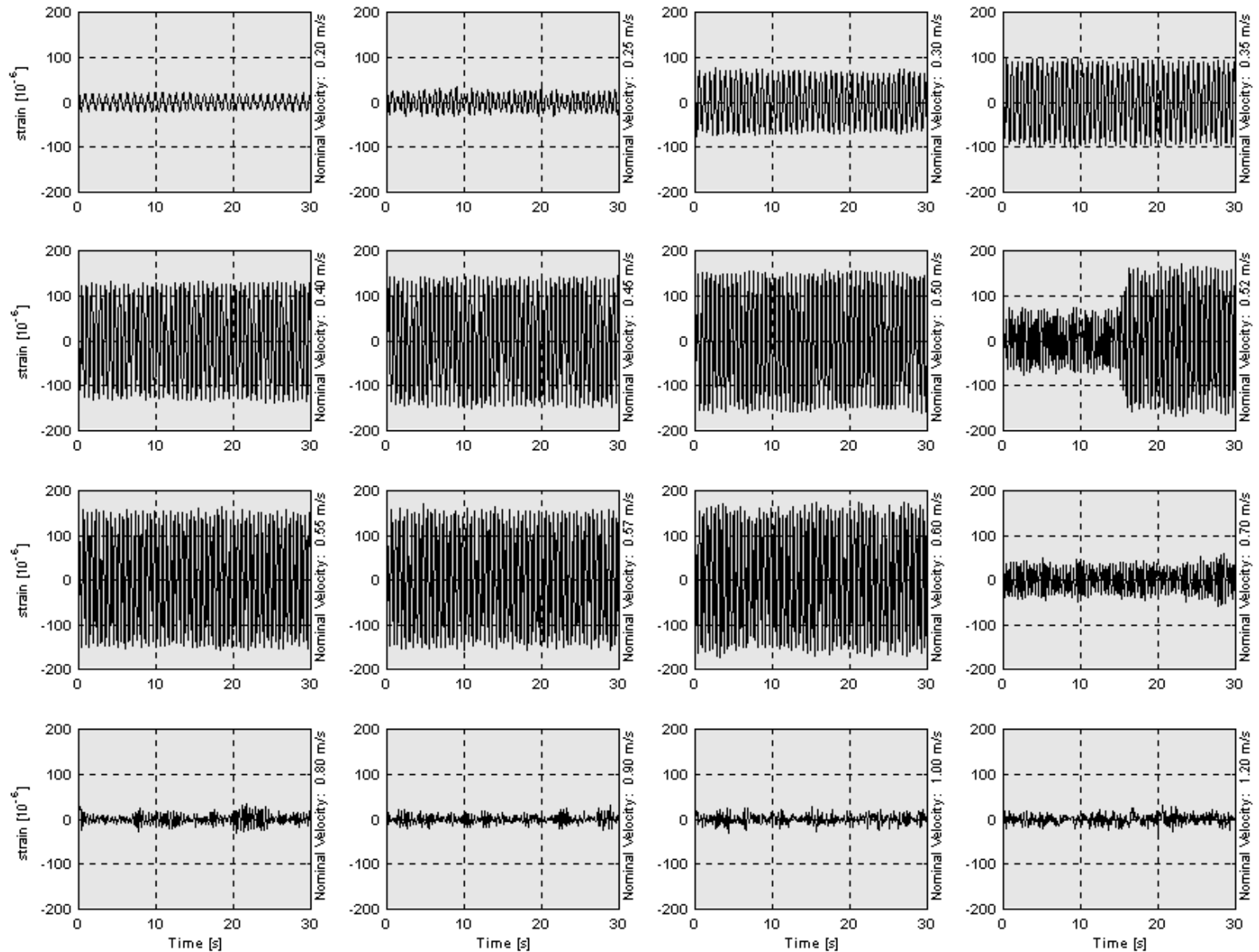
Séries Temporaires, “Upper Branch”

TIME HISTORIES



Séries Temporaires, “Lower Branch”

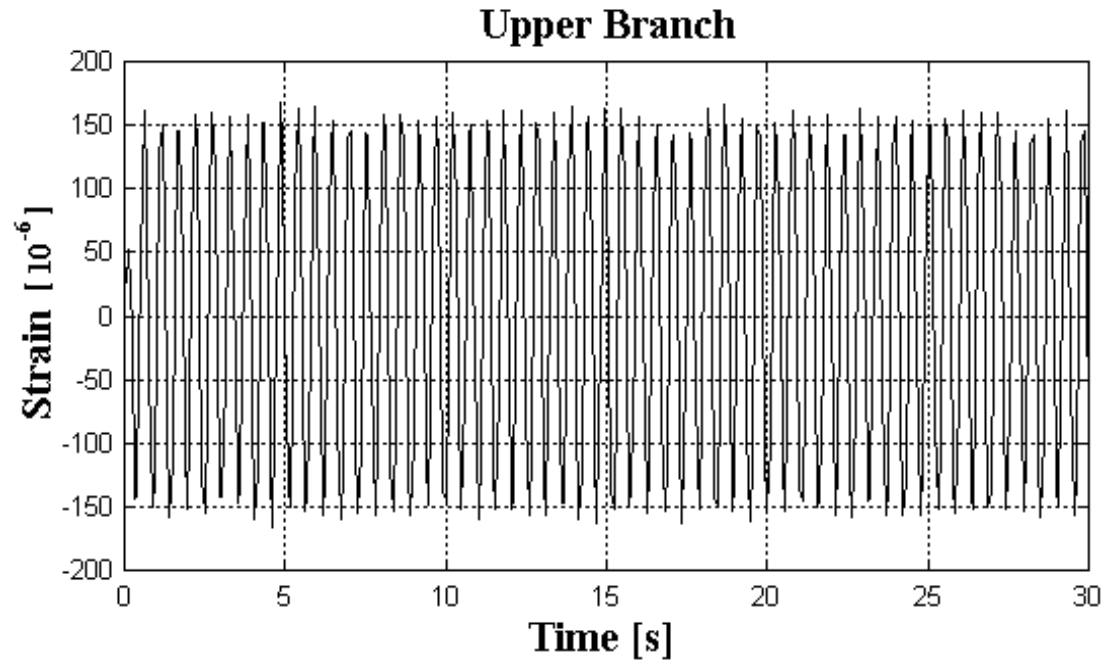
TIME HISTORIES



Séries Temporaires, “Jump phenomenon”

Ensaio com tubo flexível em água

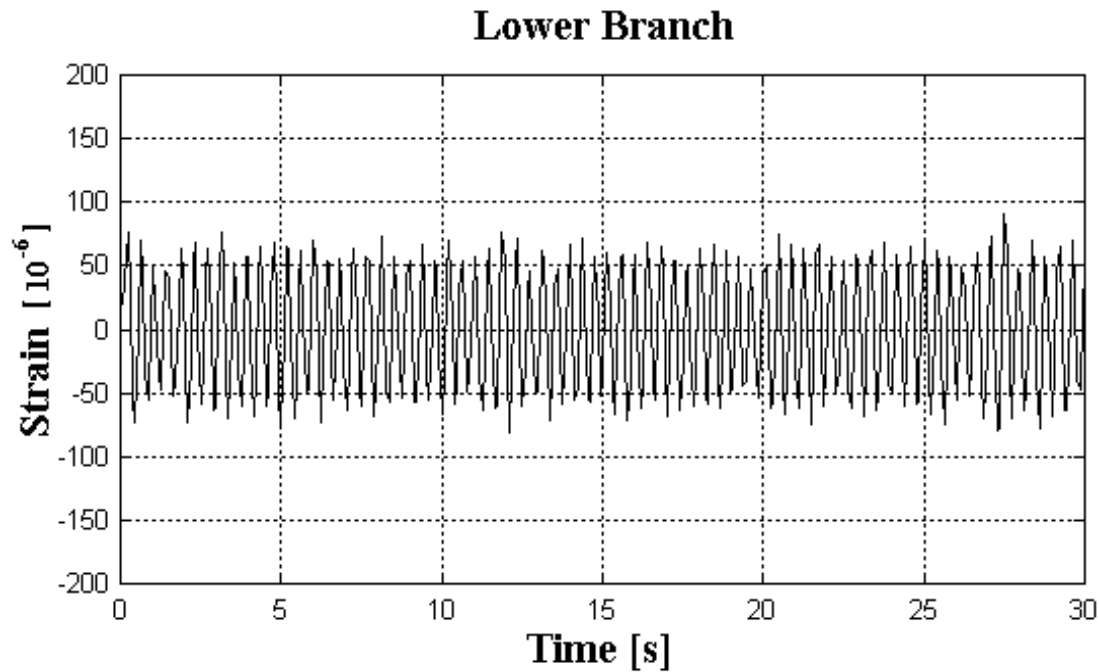
Fujarra, Pesce & Parra, ISOPE'98;
Journal of Fluid and Structures (invited)



“Upper Branch”

Ensaio com tubo flexível em água

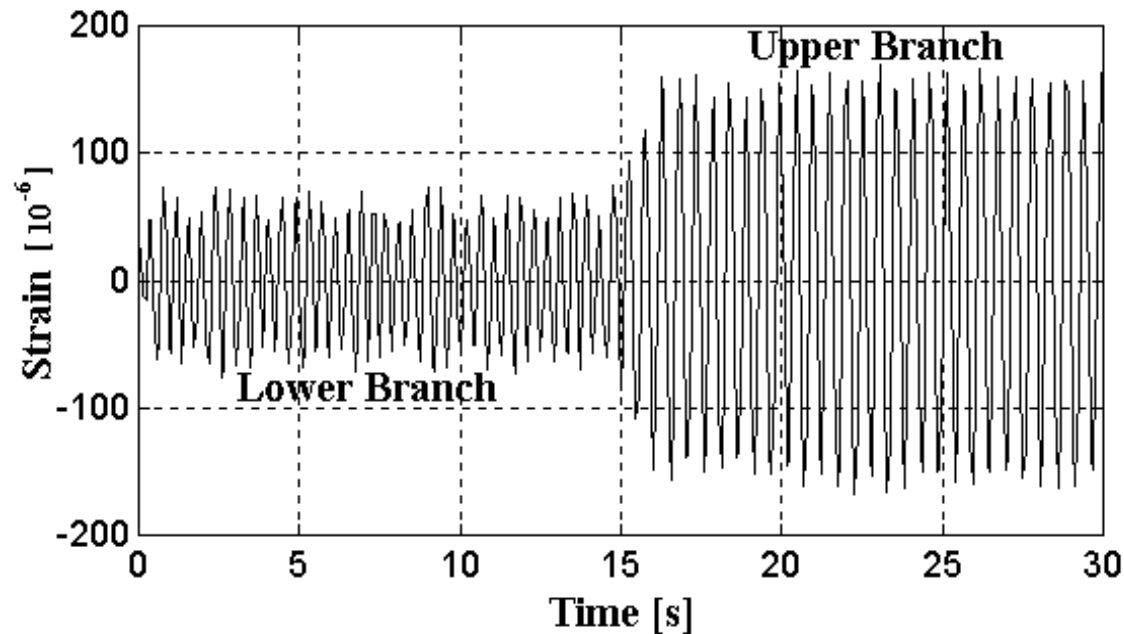
Fujarra, Pesce & Parra, ISOPE'98;
Journal of Fluid and Structures (invited)



“Lower Branch”

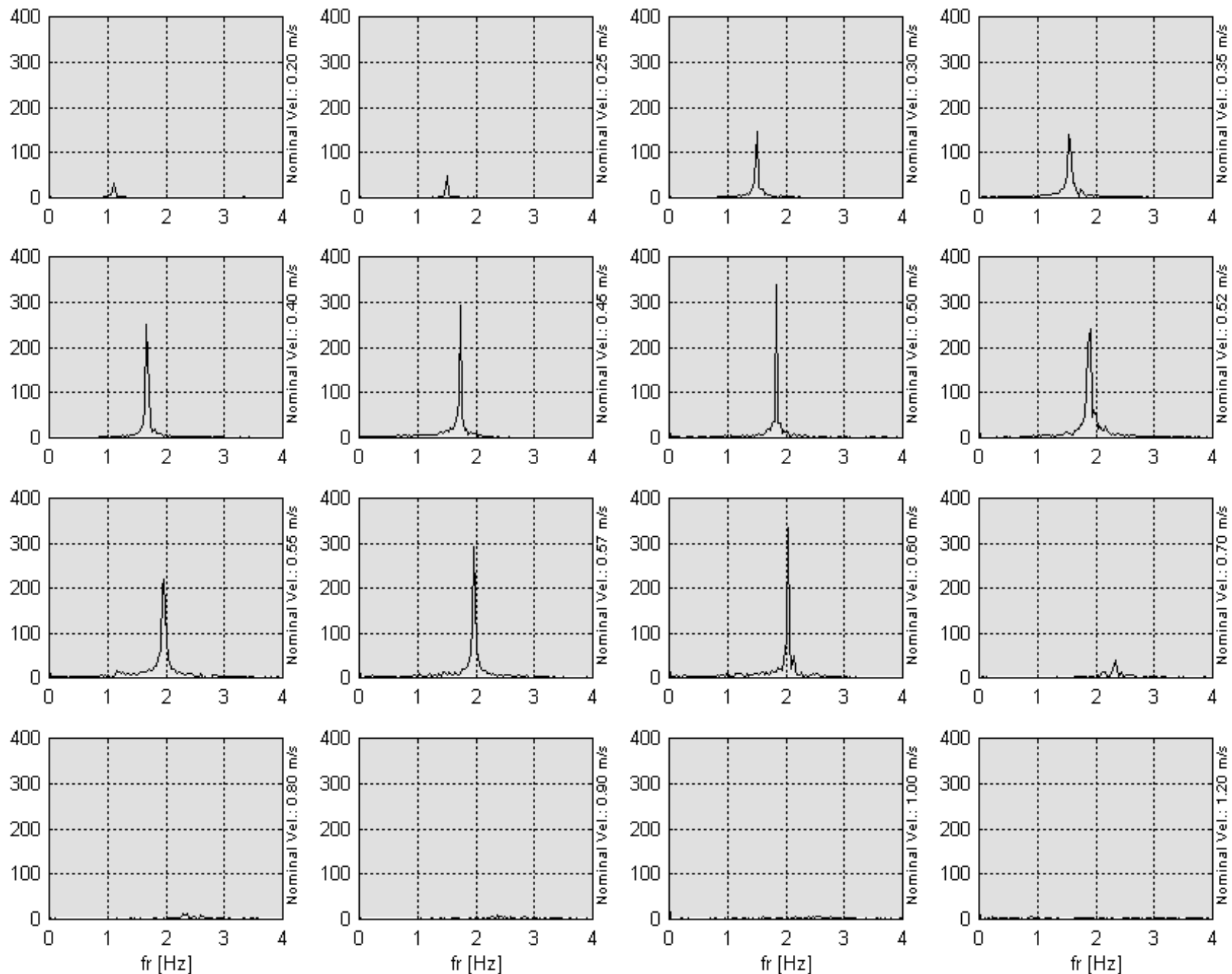
Ensaio com tubo flexível em água

Fujarra, Pesce & Parra, ISOPE'98;
Journal of Fluid and Structures (invited)

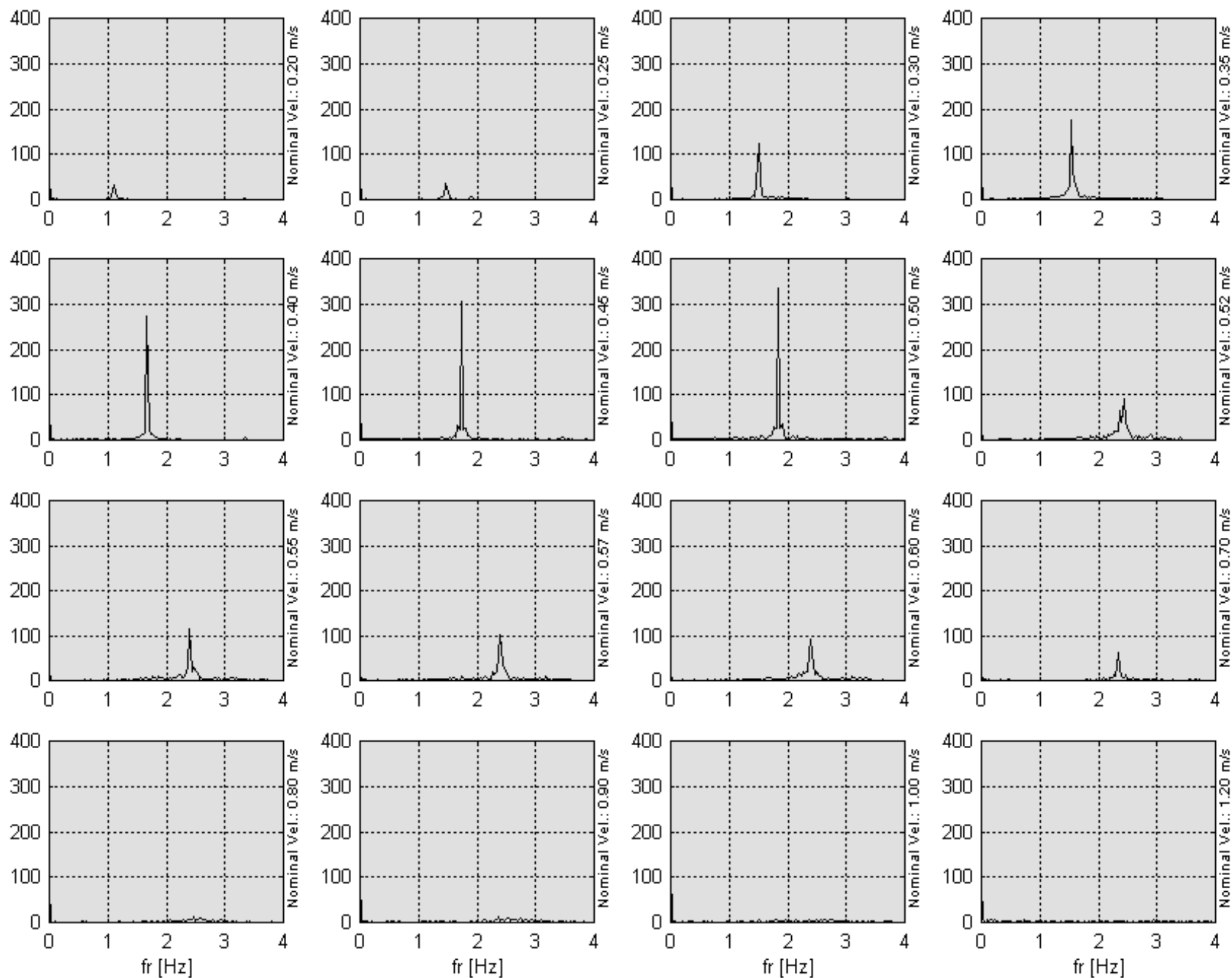


“Jump phenomenon”

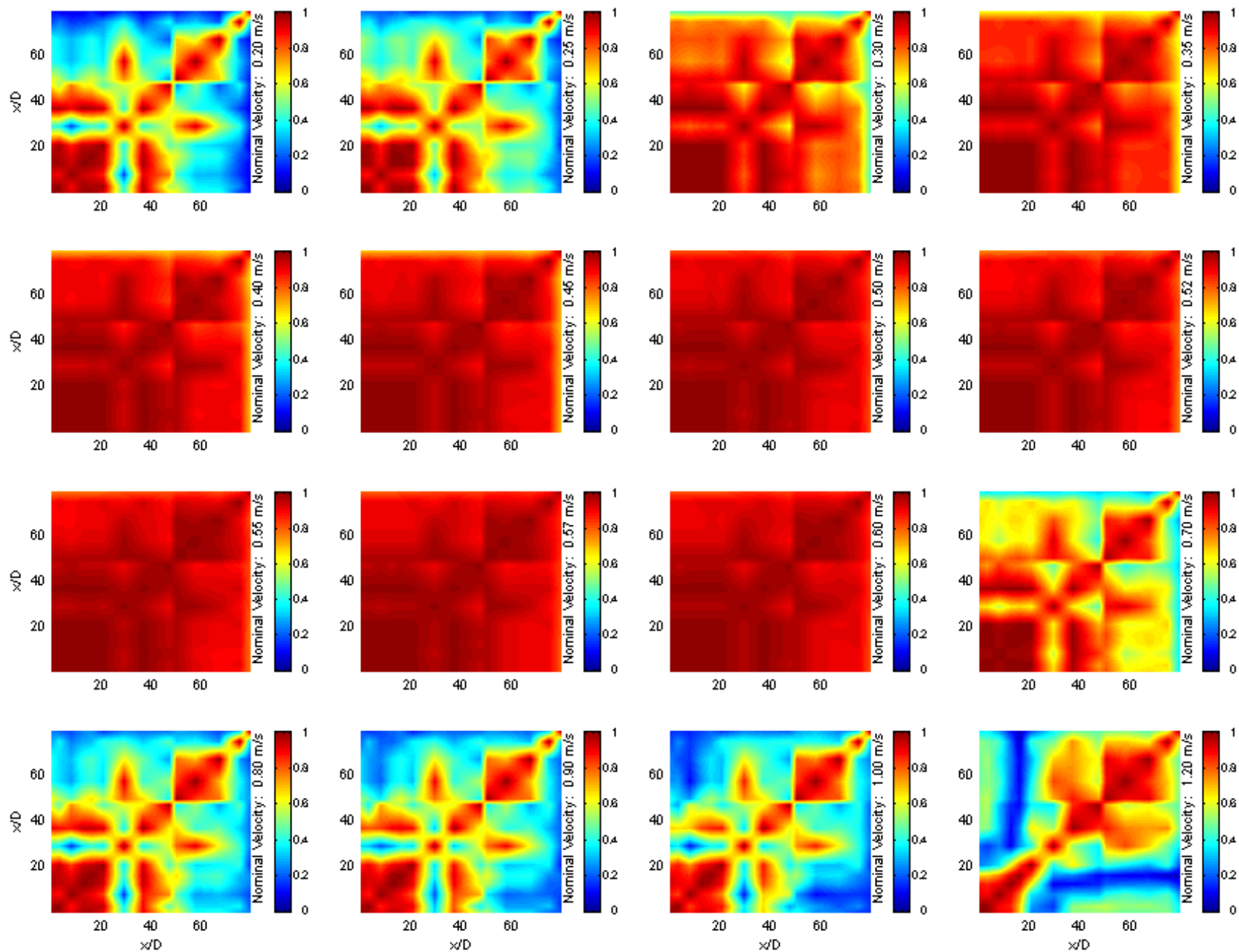
Power Spectrum - Upper Branch



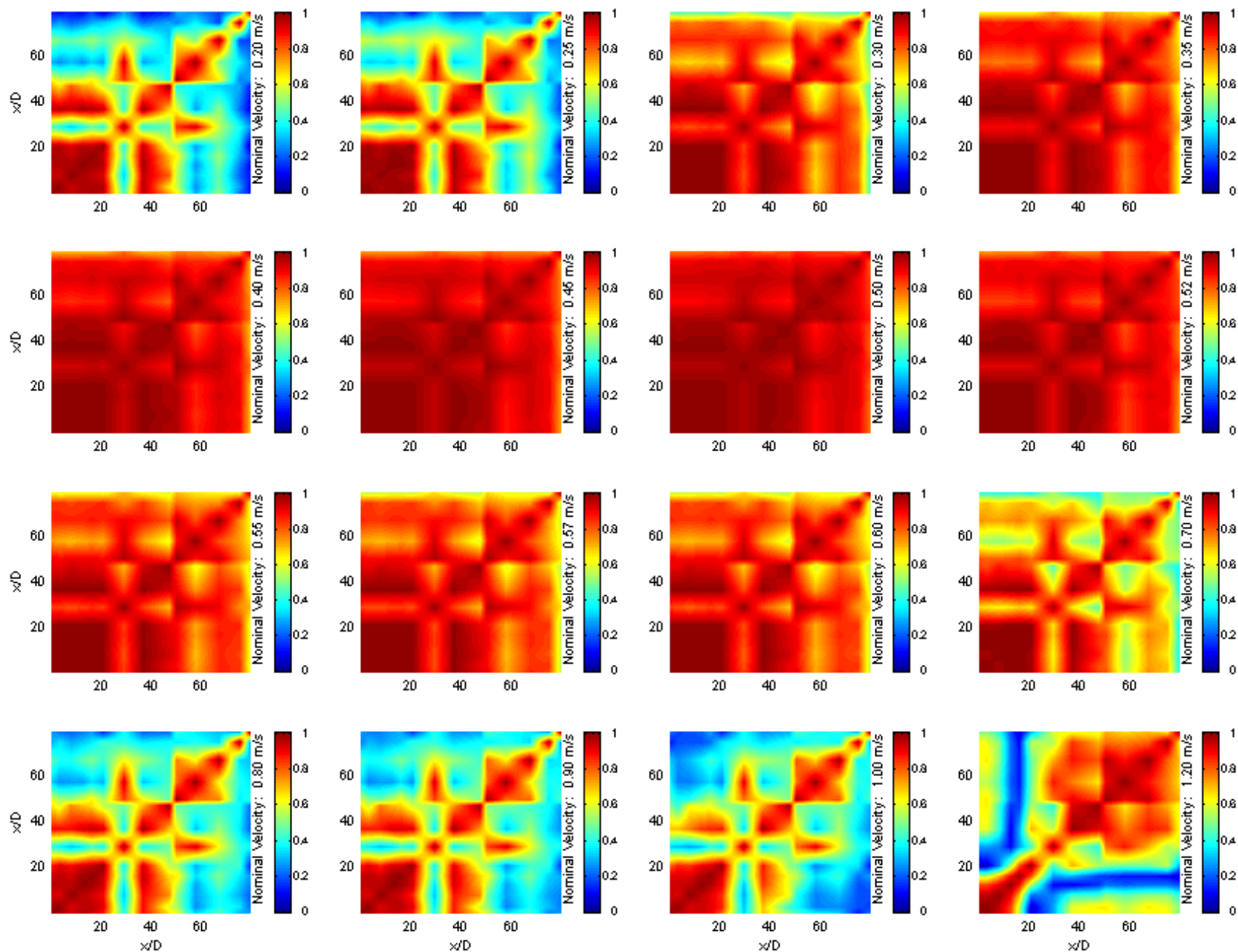
Power Spectrum - Lower Branch



Correlation Coefficients - Upper Branch



Correlation Coefficients - Lower Branch



Modelo fenomenológico através de osciladores do tipo Van der Pol

- Fenômeno de Lock-in apresenta caráter auto excitado e auto-regulado
- Iwan & Blevins, 1974: modelo baseado em dois osciladores acoplados;
- O “oscilador fluido” é do tipo van der Pol;
- O “oscilador estrutural” é linear;
- Hipótese: sincronia ao longo do cilindro.

$$m_f \ddot{w} - 2m_f \omega_s \alpha_1 \left(1 - \frac{4}{3} \frac{\alpha_2}{\gamma_n^2} \frac{\dot{w}^2}{U^2} \right) \dot{w} + (m_f \omega_s)^2 w = \frac{1}{2} \rho U D \alpha_4 \dot{y}$$

$$m \ddot{y} + 2m \omega_n \zeta_s \dot{y} + m \omega_n^2 y = \frac{1}{2} \rho U D \alpha_4 (\dot{w} - \dot{y})$$

Histórico de Modelos fenomenológicos

- Hartlen & Currie (1970): Oscilador Linear e Van der Pol
(Iwan & Blevins é análogo)

$$\ddot{Y} + 2\beta\dot{Y} + Y = C_Y U^2$$

$$\ddot{C}_Y - A\Omega_s \dot{C}_Y + \frac{B}{\Omega_s} \dot{C}_Y^3 + \Omega_s^2 C_Y = Q\dot{Y}$$

Conduz aos mesmos resultados.

- Skop & Griffin (1973): acrescentam termo de restauração cúbica no oscilador fluido: análogo ao Iwan & Blevins estendido.
- Oey et al. (1975): propõem técnica de oscilações combinadas com pulsação em duas frequências Ω_{se}, Ω_n
- Wood (1976) perseguiu a idéia, mas não encontrou, porém sem conseguir recuperar duas soluções estáveis em uma faixa suficientemente larga de velocidades.

Histórico de Modelos fenomenológicos

- Wood (1976) acrescenta, então, termos ímpares na “velocidade” do oscilador fluido, com sucesso relativo, sem, contudo, conseguir recuperar formas detalhadas da curva de resposta, tampouco o fenômeno de histerese na fase.
- Berger (1978, 84, 87), propõe modificar oscilador fluido, considerando um polinômio par no coeficiente de sustentação como fator multiplicativo no termo de velocidade: equação ainda é do tipo Van der Pol.

$$\ddot{C}_Y + p((C_Y)^{2k})\dot{C}_Y + \Omega_s^2 C_Y = Q\dot{Y}$$

Consegue bons resultados.

- Berger (87) melhora seu modelo incluindo outro polinômio de ordem par no termo forçante do oscilador fluido, na forma,

$$\ddot{C}_Y + p((C_Y)^{2k})\dot{C}_Y + \Omega_s^2 C_Y = p_f((\dot{Y})^{2j})\dot{Y}$$

recuperando o padrão de histerese.

Oscilador fluido

(técnica de escalas múltiplas; Parra & Aranha, 1996)

- *(i) cilindro estacionário:* amplitude do ciclo limite e do coeficiente de sustentação

$$w_{CL} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{2\pi S} D \quad C_L = \frac{\alpha_4}{\sqrt{\alpha_2}}$$

- *(ii) sob forçante monocromática:* largura da faixa de lock-in

$$\Delta\omega = \frac{\omega^+ - \omega^-}{\omega_s} = 2 \left[\frac{\frac{1}{\pi} \frac{\alpha_4 \sqrt{\alpha_2}}{\alpha_0} \frac{A_c}{D}}{1 - \left(\frac{1}{\pi} \frac{\alpha_4 \sqrt{\alpha_2}}{\alpha_0} \frac{A_c}{D} \right)^2} \right]$$

Oscilador fluido

(Parra & Aranha, 1996)

- (iii) *resposta ressonante: amplitude máxima e limite*

$$\left(\frac{A_c}{D}\right)_{MAX} = \pi \frac{\alpha_0 \alpha_1}{\alpha_4 \sqrt{\alpha_2}} (\Lambda^2 - 1) \Lambda$$

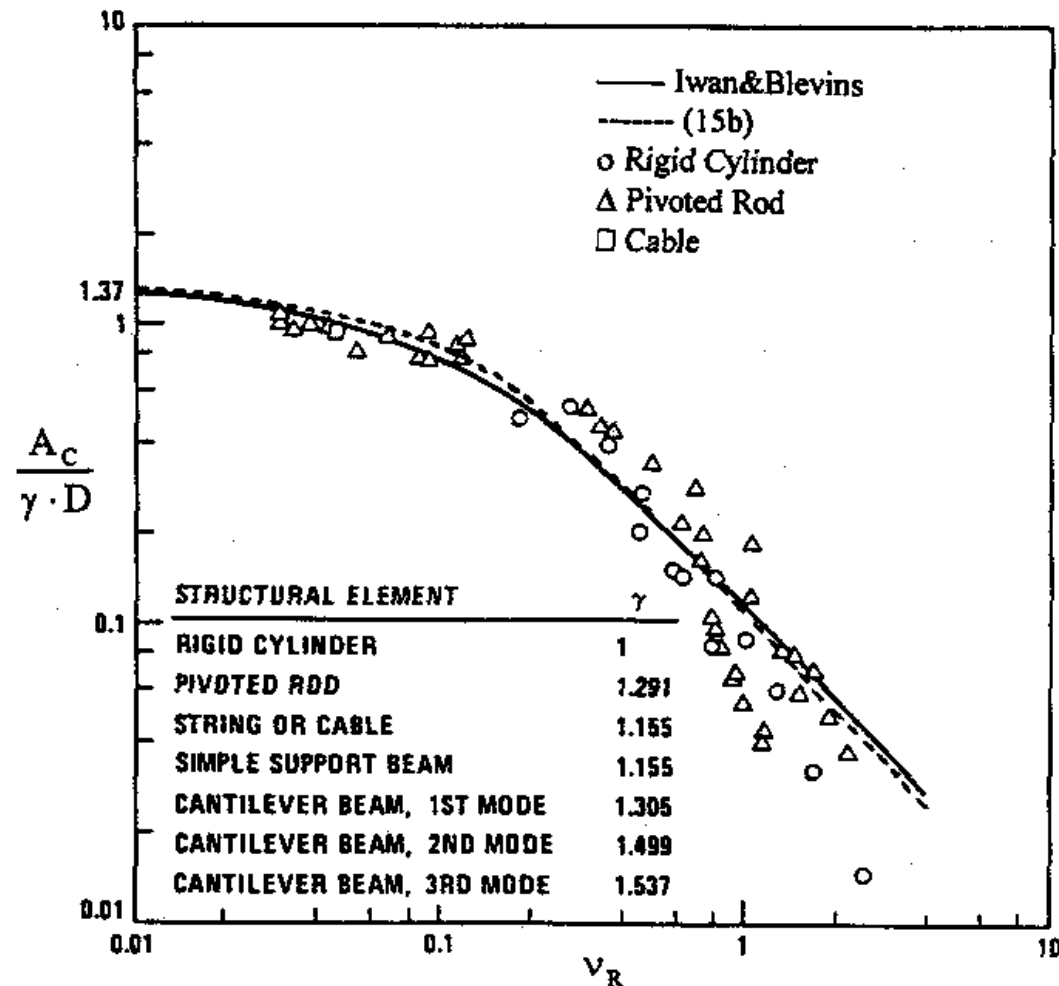
$$C_L^{MAX} = \frac{\alpha_4}{\sqrt{\alpha_2}} \left[\Lambda - 2\pi S \sqrt{\alpha_2} \left(\frac{A_c}{D}\right)_{MAX} \right]$$

$$\Lambda = \frac{\sqrt{3}}{3} \left[1 + \frac{1}{2\pi^2 S} \frac{\alpha_4}{\alpha_0 \alpha_1} \right]^{1/2}$$

$$\left(\frac{A_c}{D}\right)_{LIM} = \frac{\left(1 + \frac{1}{2\pi^2 S} \frac{\alpha_4}{\alpha_0 \alpha_1}\right)^{1/2}}{2\pi S \sqrt{\alpha_2}}$$

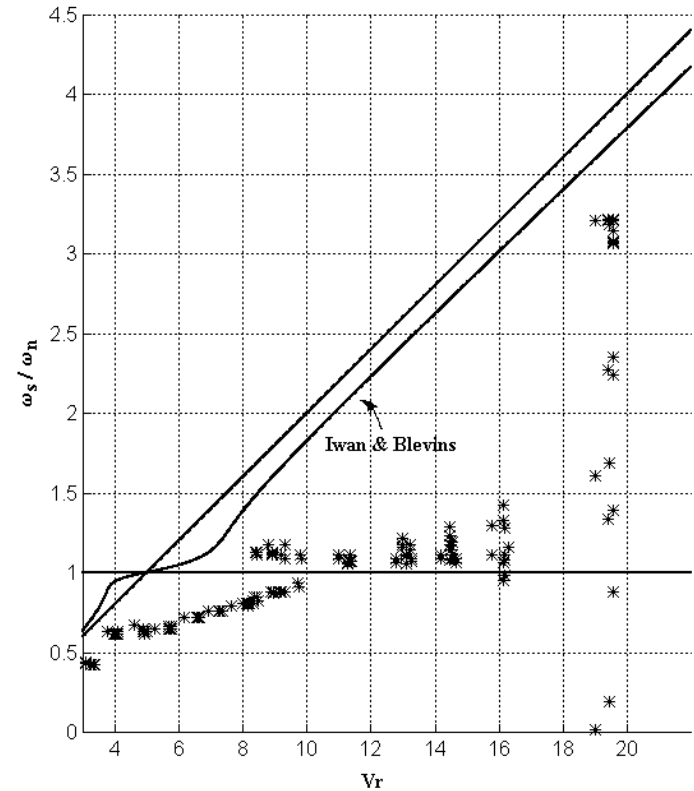
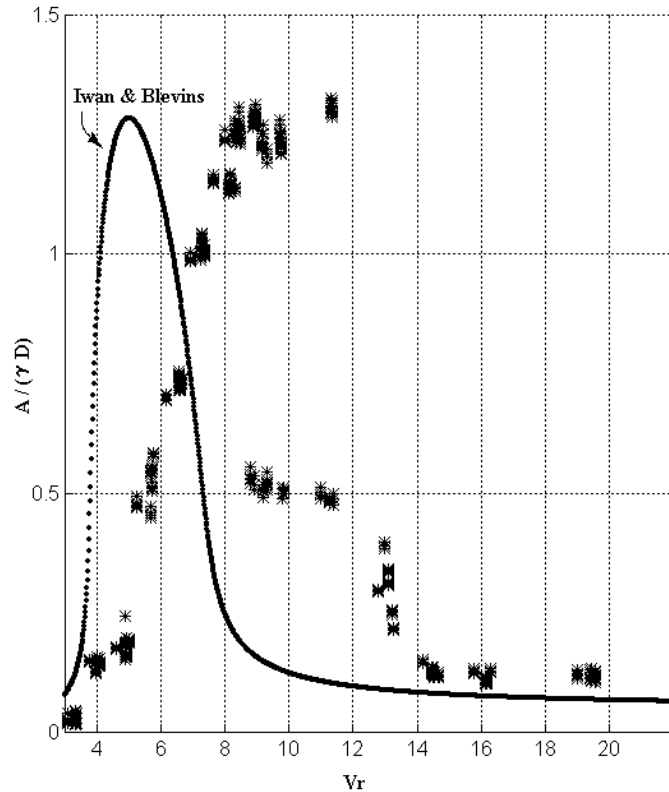
Resposta Ressonante ($\omega_n = \omega_s$) do Oscilador Hidro-elástico

Resultados Experimentais, Aproximação de Iwan & Blevins (1975) e Aproximação de Parra & Aranha(1996) (na figura original indicada por (15b)).



Ensaio com tubo flexível em água

Fujarra, Pesce & Parra,
ISOPE'98



Amplitude e frequência adimensionais de oscilação auto-excitada comparadas a modelo clássico baseado em oscilador de Van der Pol

***Modelo fenomenológico ampliado
(Parra & Aranha, 1996)***

Análise Através da técnica de escalas múltiplas

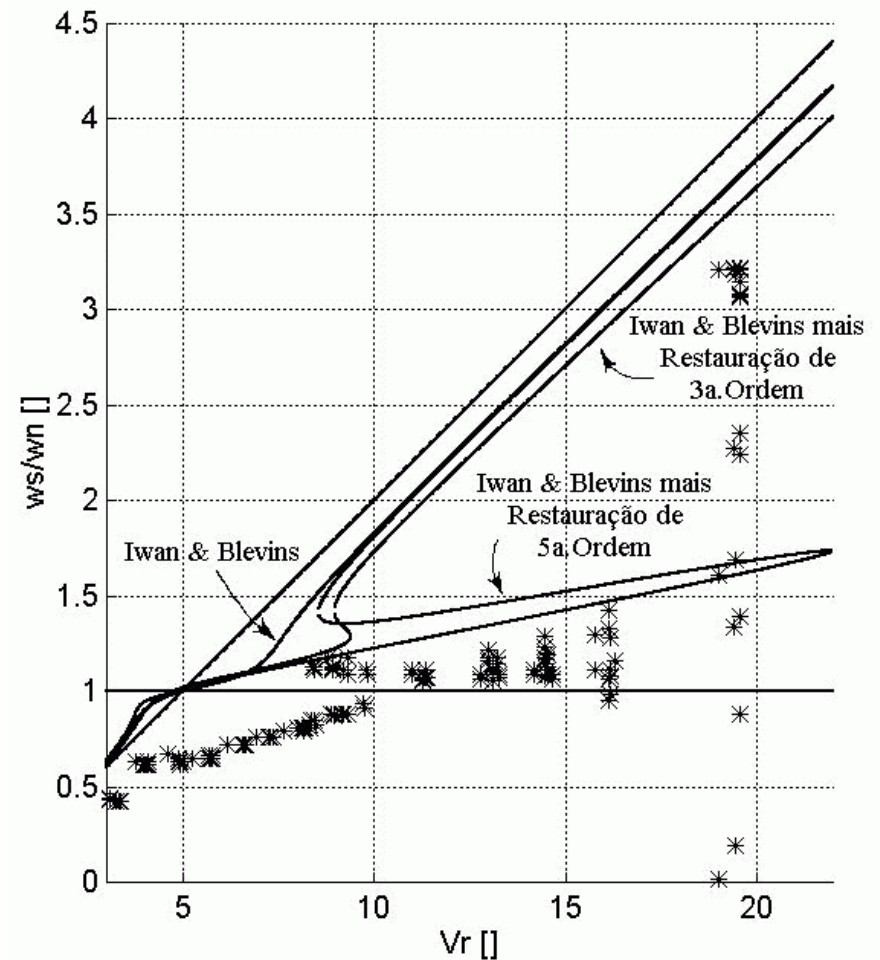
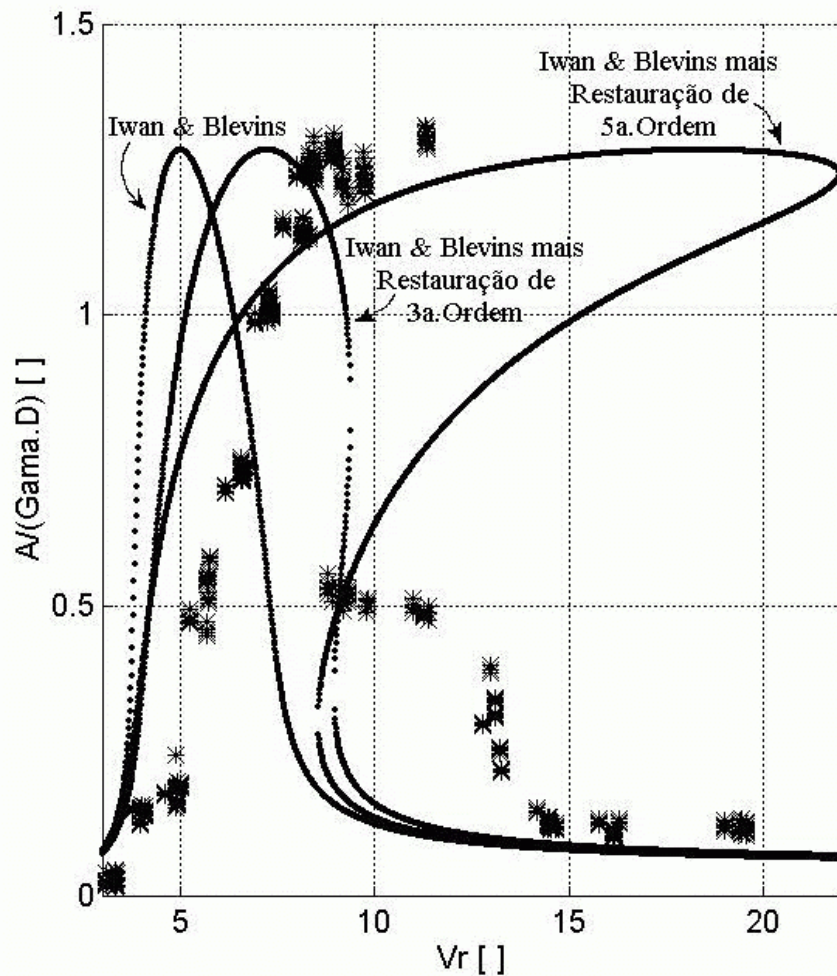
Cúbico:

$$\ddot{\hat{w}} - 2\alpha_1 \left(1 - \frac{4}{3} \dot{\hat{w}}^2 \right) \dot{\hat{w}} + \hat{w} - 2\alpha_1 \frac{4}{5} \alpha_5 \hat{w}^3 = 2\alpha_1 q_0 \dot{\hat{y}}$$

$$\ddot{\hat{y}} + 2\alpha_1 c_e \dot{\hat{y}} + (1 + 2\alpha_1 \sigma) \hat{y} = 2\alpha_1 \mu_r \dot{\hat{w}}$$

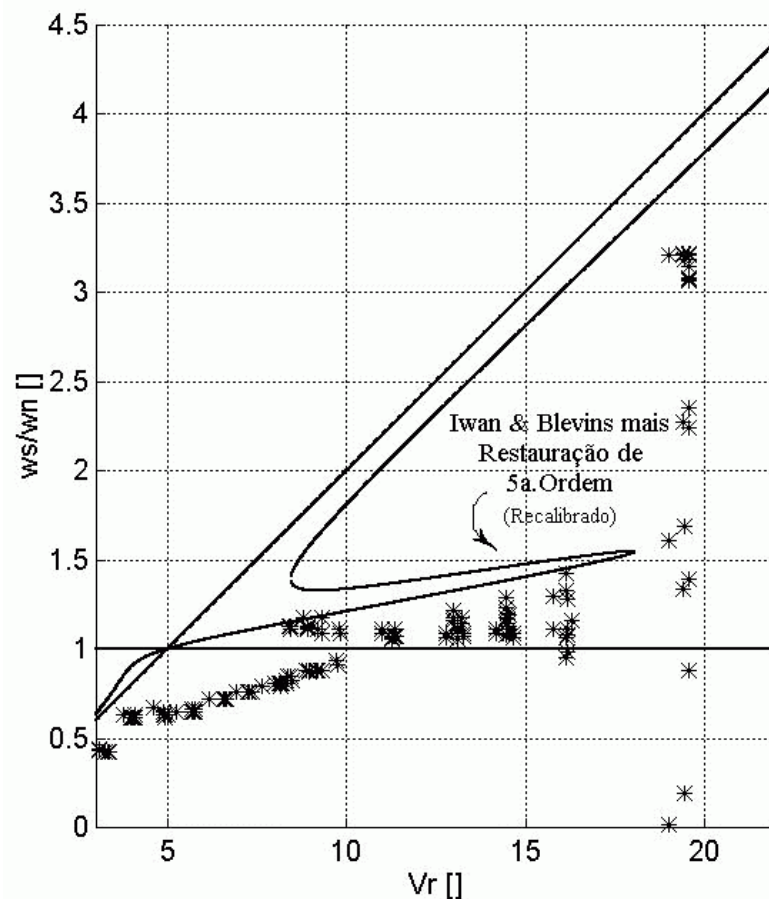
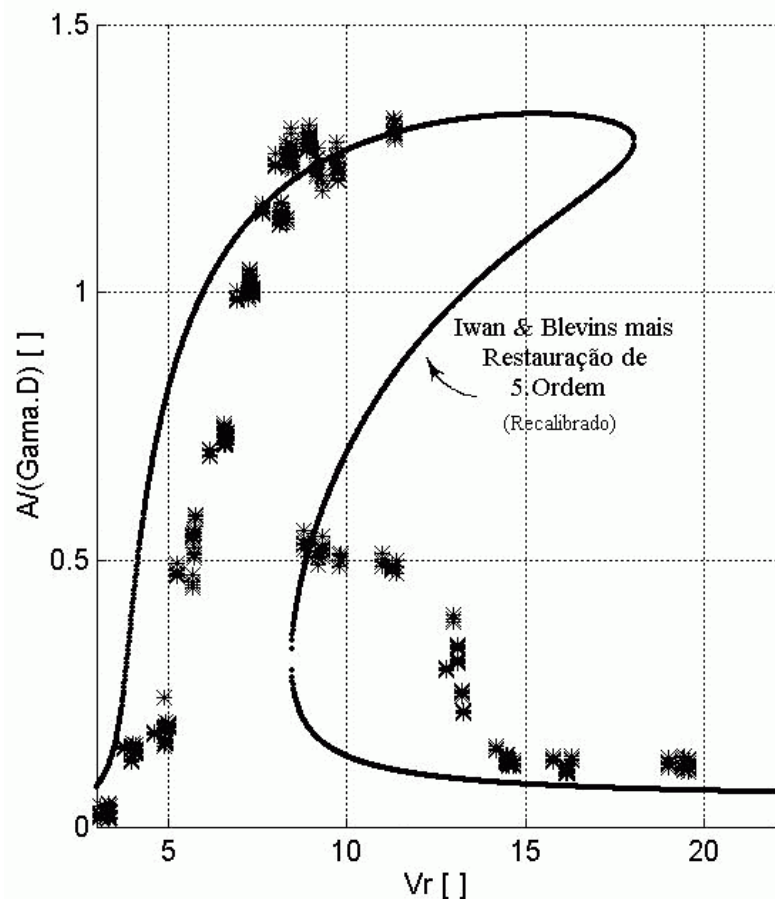
**Modelo fenomenológico original e ampliado (3a. e 5a. ordens) aplicado
ao experimento com tubo flexível
(Fujarra, 1997)**

Análise Através da técnica de escalas múltiplas



Cilindro flexível ensaiado engastado, em água.
Amplitude Adimensional e frequência de resposta
vs. Velocidade Reduzida.

Experimentos vs. modelo fenomenológico de quinta ordem; Fajarra, 1997



Experimentos e aferição (análogo a Iwan & Blevins)

$$(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_4)$$

- Parâmetros identificados: $((A_c/D)_{LIM}; (A_c/D)_{MAX}; C_L^{MAX}; C_{L0}; \Delta\omega/\omega_s; S)$

- Cilindro fixo:*

$$S \cong 0.2$$

$$C_{L0} \text{ e } \omega \Rightarrow \frac{\alpha_4}{\sqrt{\alpha_2}} \cong 0.43$$

- sob movimento harmônico imposto, com diversas amplitudes e frequências:*

$$\Delta\omega/\omega_s \Rightarrow \alpha_4 \sqrt{\alpha_2} / \alpha_0 \cong 2.70$$

Experimentos e aferição (cont.)

- *Cilindro sob movimento harmônico ressonante, com frequência , com diversas amplitudes:*

medida do espectro de potência da força de sustentação:

$$(A_c/D)_{MAX} \cong 0.20$$

$$C_{L_{MAX}} \cong 0.56$$

- *parâmetros:*

$$(\alpha_0; \alpha_1; \alpha_2; \alpha_4) \cong ((0.48; 0.05; 3.01; 0.75))$$

$$\left(\frac{A_c}{D}\right)_{LIM} \cong 1.37$$

Modelo fenomenológico

Análise Através da técnica de escalas múltiplas:

- Forma adimensional: $\ddot{\hat{w}} - 2\alpha_1 \left(1 - \frac{4}{3} \dot{\hat{w}}^2\right) \dot{\hat{w}} + \hat{w} = 2\alpha_1 q_0 \dot{\hat{y}}$

$$\ddot{\hat{y}} + 2\zeta_s(1 + \alpha_1\sigma)\dot{\hat{y}} + (1 + 2\alpha_1\sigma)\hat{y} = \frac{m_f}{m} 2\alpha_1 q_0 \left(\frac{w_{CL}}{D}\right)^2 (\dot{\hat{w}} - 2\pi S \sqrt{\alpha_2} \dot{\hat{y}})$$

$$\hat{t} = \omega_s t$$

$$\hat{\omega}_n = \frac{\omega_n}{\omega_s} = 1 + \alpha_1 \sigma$$

$$\hat{w} = \frac{w}{w_{CL}}$$

$$\hat{y} = \frac{y}{\gamma_n D}$$

$$q_0 = \frac{1}{\pi} \frac{\alpha_4 \sqrt{\alpha_2}}{\alpha_0 \alpha_1}$$

Modelo fenomenológico

Análise Através da técnica de escalas múltiplas:

Resposta ressonante ($\sigma = 0$):

$$\frac{A_c}{\gamma_n D} = \frac{0.46}{1 + 5.26\nu_r} \left[1 + \frac{7.92}{1 + 5.26\nu_r} \right]^{1/2}$$

$$\nu_r = \frac{4m\zeta_e}{\rho\pi D^2}$$

$$\gamma_n = \left(\frac{\int_0^L \psi_n^2(s) ds}{\int_0^L \psi_n^4(s) ds} \right)^{1/2}$$

Modelo fenomenológico

Análise Através da técnica de escalas múltiplas
resposta harmônica

$$\hat{w}(\hat{t}; \tau) = \frac{1}{2} \left[A(\tau) e^{i\hat{t}} + (*) \right] + \alpha_1 w_1 + (TOS)$$

$$\hat{y}(\hat{t}; \tau) = \frac{1}{2} \left[B(\tau) e^{i\hat{t}} + (*) \right] + \alpha_1 y_1 + (TOS)$$

$$\tau = \alpha_1 \hat{t}$$

evitando-se termos seculares

$$\frac{dA}{d\tau} - A(\tau) + |A(\tau)|^2 A(\tau) = q_0 B(\tau)$$

$$\frac{dB}{d\tau} + c_e B(\tau) - i\sigma B(\tau) = \mu_r A(\tau)$$

Modelo fenomenológico

Análise Através da técnica de escalas múltiplas resposta harmônica

- Soluções harmônicas: $A(\tau) = A_0 e^{i(\sigma+\lambda)\tau}$; $B(\tau) = B_0 e^{i(\sigma+\lambda)\tau}$

- se e só se:

$$\left[1 + \frac{\mu_r q_0}{c_e^2} \frac{1}{1 + (\lambda/c_e)^2} \right] \frac{\lambda(\sigma)}{c_e} = -\frac{\sigma}{c_e}$$

$$b(\sigma) = \frac{|B_0|}{(A_c/\gamma D)_{MAX}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\lambda/c_e)^2}} \left(\frac{1 + 5.26\nu_r + \frac{7.92}{1 + (\lambda/c_e)^2}}{8.92 + 5.26\nu_r} \right)^{1/2}$$

- oscilador elástico:

$$\hat{y}(t) = b(\sigma) \left(\frac{A_c}{\gamma D} \right)_{MAX} \sin(\omega_s t (1 + \alpha_1 (\sigma + \lambda(\sigma))))$$

Modelo fenomenológico

Análise Através da técnica de escalas múltiplas resposta harmônica

- Amplitude máxima quando,

$$b(0) = 1$$

- ou seja, quando,

$$V_r = U / f_n D = 5 \omega_s / \omega_n = 5$$

$$V_r = \frac{U}{f_n D} = \frac{5}{1 + \alpha_1 \sigma}$$

- Modelo de Iwan & Blevins prevê máximo de resposta à esquerda de resultados experimentais;
- Tampouco prevê dois “ramos” de amplitude.

Modelo fenomenológico ampliado (Parra & Aranha, 1996)

Análise Através da técnica de escalas múltiplas

- Evitando termos seculares:

$$\frac{dA}{d\tau} - A(\tau) + (1 + i\alpha_5)|A(\tau)|^2 A(\tau) = q_0 B(\tau)$$

$$\frac{dB}{d\tau} + c_e B(\tau) - i\sigma B(\tau) = \mu_r A(\tau)$$

- resposta periódica:

$$|A_0|^2 = 1 + \frac{\mu_r q_0}{c_e} \frac{1}{1 + (\lambda / c_e)^2};$$

$$|B_0| = \frac{\mu_r}{c_e} \frac{1}{\sqrt{1 + (\lambda / c_e)^2}} |A_0|;$$

$$\left[1 + \frac{\mu_r q_0}{c_e^2} \frac{1}{1 + (\lambda / c_e)^2} \right] \frac{\lambda}{c_e} = -\frac{\sigma}{c_e} - \frac{\alpha_5}{c_e} |A_0|^2.$$

- Máxima amplitude: ($\lambda = 0$)

$$\sigma|_{\lambda=0} = -a_5 \left(1 + \frac{\mu_r q_0}{c_e} \right)$$

$$\alpha_5 = \frac{1 - \frac{5}{V_r^{(p)}}}{\alpha_1 \left(1 + \frac{\mu_r q_0}{c_e} \right)}$$

- Experimentos de Feng ('68):

$$(\alpha_5)_{Feng} \cong 0.72$$

Modelo fenomenológico ampliado (cúbico)
(Parra & Aranha, 1996)

Análise Através da técnica de escalas múltiplas

- Amplitude e frequência de resposta

$$\left(\frac{A_n}{\gamma_n D} \right) = b(\sigma) \left(\frac{A_n}{\gamma_n D} \right)_{\max}$$

$$\frac{\omega}{\omega_n} = \frac{1 + \alpha_1 (\lambda(\sigma) + \sigma)}{1 + \alpha_1 \sigma}$$

- Com

$$\lambda(\sigma) = -c_e \frac{(\sigma + \alpha_5) + \alpha_5 a(\sigma)}{c_e + a(\sigma)};$$

$$b(\sigma) = \sqrt{\frac{a(\sigma)[a(\sigma) + 1]}{\mu_r q_0 / c_e (\mu_r q_0 / c_e + 1)}}.$$

$$a^3(\sigma) + c_1 a^2(\sigma) + c_2 a(\sigma) + c_3 = 0$$

$$c_1(\sigma) = \frac{2c_e + 2\alpha_5(\sigma + \alpha_5) - \mu_r q_0 / c_e}{(1 + \alpha_5^2)};$$

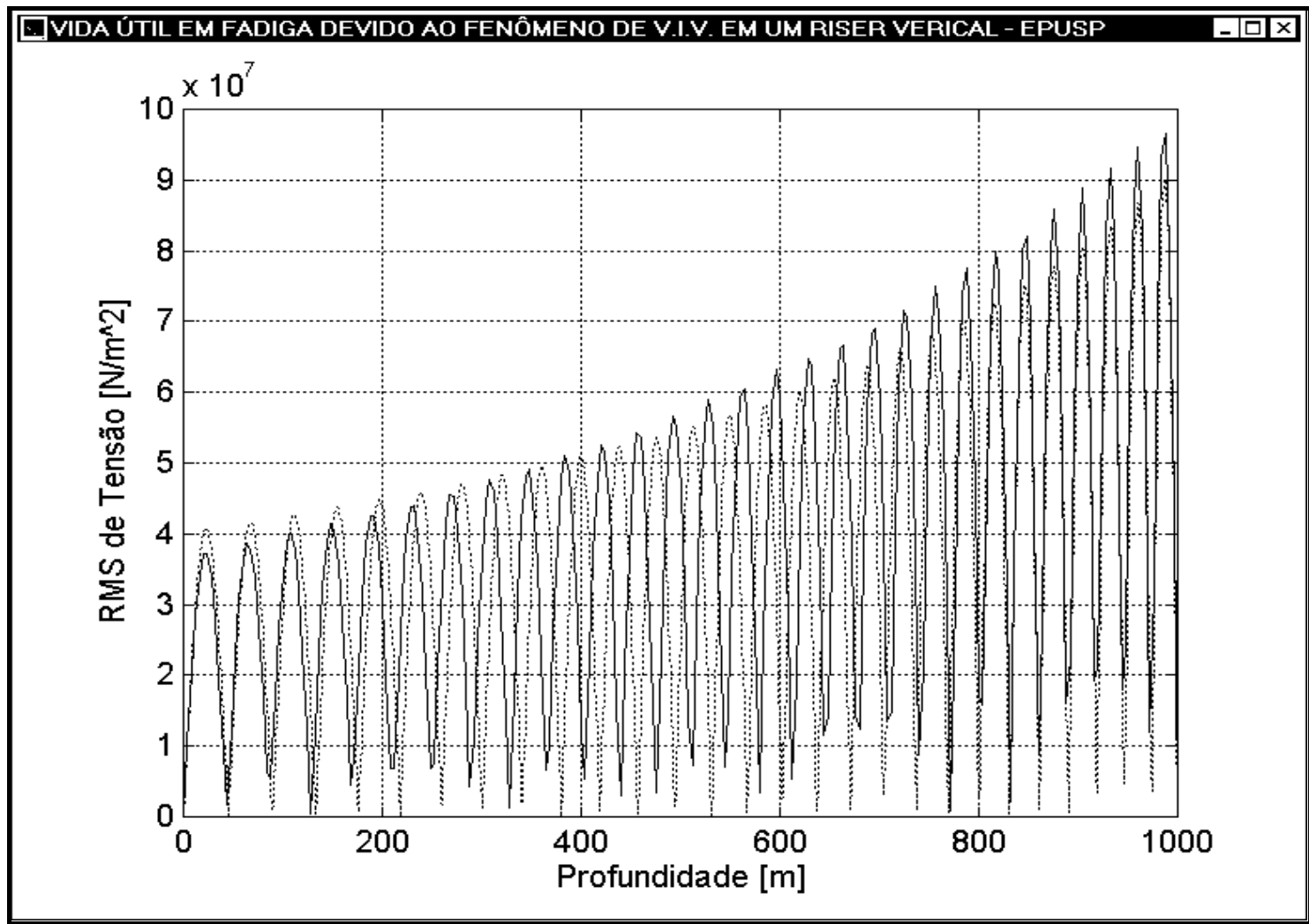
$$c_2(\sigma) = \frac{(\sigma + \alpha_5)^2 + c_e^2 - 2\mu_r q_0}{(1 + \alpha_5^2)};$$

$$c_3 = -\frac{\mu_r q_0 c_e}{(1 + \alpha_5^2)}.$$

Valor eficaz de tensão de flexão ao longo da profundidade.

RISER VERTICAL

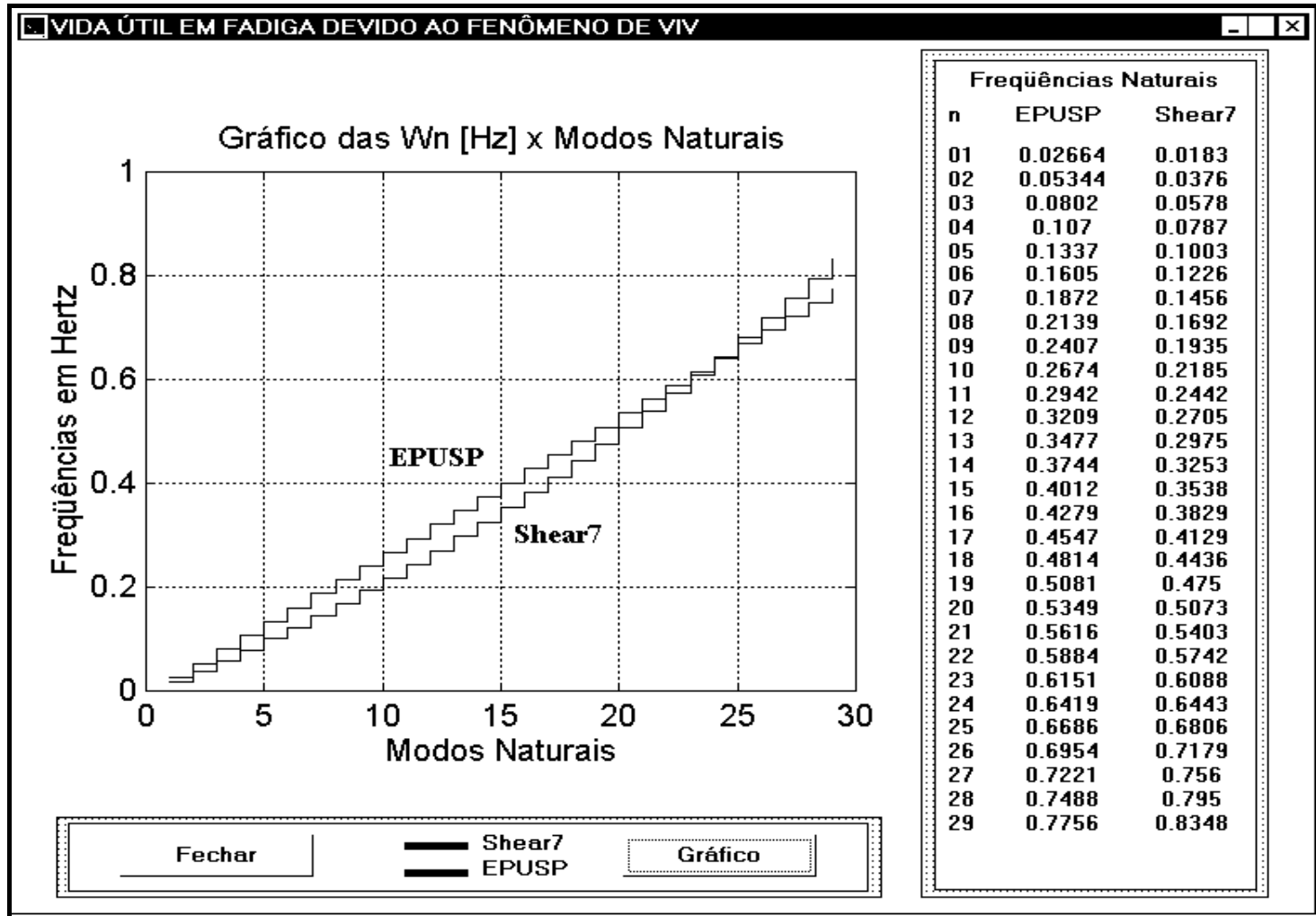
*Comparações entre modelo de Iwan & Blevins e programa
SHEAR7 (MIT)*



Valor eficaz de tensão de flexão ao longo da profundidade.

RISER VERTICAL

*Comparações entre modelo de Iwan & Blevins e programa
SHEAR7 (MIT)*



Referências

- Aranha, JAP & Parra, PHCC (1996) *Vortex Induced Vibrations: Phenomenological Model and Experiments.* Report, Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Escola Politécnica, University of São Paulo; (in portuguese).
- Bearman, PW (1984) *Vortex Shedding from Oscillating Bluff Bodies.* Ann Rev. Fluid Mech, Vol 6, 195-222.
- Blevins, RD (1990) *Flow-Induced vibrations.* 2.ed. Florida, Robert E. Krieger Publishing Company.
- Brika, D & Laneville, A, (1993) *Vortex Induced Vibrations of a Long Flexible Circular Cylinder.* J Fluid Mech, Vol 250, 481-508.
- Feng, CC (1968) *The Measurement of Vortex-Induced Effects in Flow Past Stationary and Oscillating Circular and D-Section Cylinders.* M.Sc. Thesis, University of British Columbia.
- Fujarra, AC (1997) *Experimental Studies with a Smooth and Long Flexible Circular Cylinder Subjected to Vortex Induced Vibrations in Water.* MSc Thesis, (in portuguese), University of S. Paulo, Dec., 1997.
- Griffin, OM (1981) *Universal Similarity in the Wakes of Stationary and Vibrating Bluff Structures.* J Fluid Eng. Vol 103, 52-58.
- Griffin, OM (1985) *Vortex Shedding from Bluff Bodies in a Shear Flow: A Review.* J Fluid Eng. Vol. 107, 298-306.
- Griffin, OM, Ramberg SE, (1982) *Some recents Studies of Vortex Shedding with Application to Marine Tubular and Risers.* Transactions, ASME. Vol. 104, 2-13.
- Iwan, WD (1975) *The Vortex Induced Oscillation of Elastic Structural Elements.* Journal of Engineering for Industry, p. 1378-1382.
- Iwan, WD; Blevins, RD (1974) *A Model for Vortex Induced Oscillation of Structures.* ASME - Journal of Applied Mechanics, p. 581-586, September, 1974.
- Khalak, A; Williamson, CHK (1996) *Dynamics of a Hydroelastic Cylinder with Very Low Mass and Damping,* Journal of Fluids and Structures, 1996.
- Meneghini, J.R., Saltara, F. & Bearman, P.W. *Numerical Simulation of Vortex Shedding from an Oscillating Circular Cylinder.* Computational Methods and Experimental Measurements; Computational Mechanics Publications, Southampton, UK, editors P. Anagnostopoulos, G.M. Carlomagno & C.A. Brebbia, 1997, 409-418.
- Newman, DJ & Karniadakis, GE (1995), *Direct Numerical simulation of Flow over a Flexible Cable.* Sixth Int. Conf. On Flow-Induced Vibrations. Imperial College, London, April, 10-12, 1995; editor PW Bearman, Balkema, 1995.
- Newman, DJ & Karniadakis, GE (1995), *Simulations of Flow over a Flexible Cable. A Comparison of Forced and Vortex Induced Vibration.* J Fluid and Structures. Vol 10, 439.
- Newman, DJ & Karniadakis, GE (1997), *A Direct Numerical Simulation Study of Flow Past a Freely Vibrating Cable.* J Fluid Mech., 1997, vol. 344, 95-136.
- Oey, HL, Currie, IG & Leutheusser, *On the Double-amplitude Response of Circular Cylinders Excited by Vortex Shedding.* 4th Int. Conf. on Wind Effects on Buildings and Structures, Ed. K.J.Eaton, Cambridge Universty press, 1975, 233-240.
- Parra, PHCC, (1996) *Semi-empirical Model for Vortex Induced Vibrations: Treoretical and Experimental Analysis.* MSc Thesis, (in portuguese), University of S. Paulo.
- Pesce, CP et all (1995), *Steel Catenary Risers for Deep Water Applications.* Fifth Int. Offshore and Polar Eng. Conf., The Hague, The Netherlands, Proceedings, Vol. II, 190-202.
- Rodriguez, O (1997) *Experimental Analysis of the Wake Instabilities of an Oscillating Cylinder near Synchronization: Influence of the Amplitude Parameter.* Seventh International Offshore and Polar Engineering Conference., Honolulu, May, 25-30, 1997. Proceedings, Vol III, 694-701.
- Williamson, CHK , Roshko, A, (1988) *Vortex Formation in the Wake of an Oscillating Cylinder.* J Fluid Structures, Vol 2, 355-381.