



# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de  
maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

Realização:



COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

## Torres e Chaminés de Seção Circular sob Vibrações Induzidas por Vórtices

Marcela L. Santos<sup>1</sup>, Michèle S. Pfeil<sup>2</sup>

<sup>1</sup>COPPE/UFRJ / Programa de Engenharia Civil/ marcela.lsantos@coc.ufrj.br

<sup>2</sup>COPPE/UFRJ / Programa de Engenharia Civil / mpfeil@coc.ufrj.br

### Resumo

Estruturas esbeltas de torres e chaminés estão, recorrentemente, submetidas à ação do vento e podem apresentar vibrações induzidas pela turbulência do vento e pelo fenômeno de desprendimento cadenciado de vórtices, as quais devem ser previstas na fase de projeto. Para tanto, as normas de projeto recomendam procedimentos focados principalmente em estruturas com suaves variações de seção transversal sujeitas a certas condições atmosféricas. O presente trabalho está voltado para a análise de vibrações na direção transversal ao vento induzidas pelo desprendimento de vórtices. A análise consistiu em verificar o comportamento da resposta de estruturas esbeltas de seção circular segundo formulações de procedimentos normativos originários de modelos teóricos consagrados no meio científico. Para avaliação dos resultados, buscou-se verificar o comportamento da resposta para estruturas típicas de aço e de concreto armado quando aplicados os procedimentos de normas. Objetivando-se confrontar os métodos normativos por meio dos resultados obtidos. Este procedimento de análise permitiu verificar a existência de parâmetros fundamentais no comportamento da estrutura frente o fenômeno de desprendimento de vórtices, dentre os quais se destaca o número de Scruton ( $Sc$ ), que caracteriza a tendência de uma estrutura a sofrer vibrações. A comparação entre os resultados obtidos por meio dos procedimentos normativos mostrou diferenças importantes para estruturas com valores baixos de  $Sc$ .

### Palavras-chave

Ação do vento; Desprendimento de Vórtices; Torres de Seção Circular; Solicitações Dinâmicas.

### Introdução

A concepção de um projeto estrutural deve levar em consideração os efeitos provenientes de ações ambientais, às quais a estrutura poderá estar submetida. O vento corresponde a um fenômeno natural caracterizado como uma ação dinâmica e, como tal, é capaz de promover vibrações excessivas nas estruturas tanto na direção de atuação do vento, quanto transversalmente a esta direção. As vibrações transversais podem ser induzidas pela turbulência lateral e pelo fenômeno de desprendimento cadenciado de vórtices. Este último acomete uma ampla gama de estruturas, tais como: tabuleiros de pontes, torres, chaminés e cabos sob a ação de vento; cabos e dutos sob a ação de correntes marítimas.



# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



O fenômeno de desprendimento de vórtices é caracterizado como sendo uma ação aeroelástica (com interação fluido-estrutura) que pode promover vibrações significativas, contudo autolimitadas. Por isso, dificilmente levará ao colapso imediato da estrutura. Seu efeito pode promover uma amplificação dos deslocamentos provenientes das forças laterais, além de reduzir a vida útil por fadiga de estruturas metálicas.

Existem na literatura dois modelos matemáticos consagrados para estimativa das amplitudes de vibração induzida por vórtices:

- a) modelo de RUSCHEWEYH (1994), baseado no modelo analítico de força harmônica ressonante e no conceito de comprimento efetivo de correlação a ser calculado iterativamente em função de parâmetros ajustados experimentalmente.
- b) modelo de VICKERY e BASU (1983a, 1983b), baseado na modelo de força de auto-excitação não-linear, cujo termo proporcional à velocidade dá origem ao amortecimento aerodinâmico negativo.

As normas de projeto em geral propõem a utilização destes métodos em diferentes versões. O Eurocódigo 1, por exemplo, apresenta como Método 1 o modelo de Ruscheweyh e como Método 2 uma versão simplificada do modelo original de Vickery e Basu. Para a NBR 6123 existem propostas para utilização de cada um dos dois métodos. Já para o CICIND o procedimento normativo é desenvolvido com base no modelo de Vickery e Basu, com simplificações similares ao do Eurocódigo prevendo, porém, uma expressão para consideração da intensidade de turbulência.

Este trabalho apresenta uma descrição dos fundamentos dos dois modelos mencionados e dos métodos normativos do Eurocódigo e da NBR que deles se originam, além de uma comparação entre os resultados dos mesmos quando aplicados a exemplos típicos de torres ou chaminés de seção circular.

## Conceitos Gerais

A frequência de desprendimento de um par de vórtices ( $f_v$ ) na esteira de um cilindro de seção circular com diâmetro  $D$ , em repouso, é dada por meio do número de Strouhal definido como:

$$St = \frac{f_v \cdot D}{\bar{U}} \quad (1)$$



onde  $\bar{U}$  é a velocidade média do vento. Da Eq. (1), obtém-se a velocidade crítica para ressonância igualando-se a frequência  $f_v$  à frequência  $f_s$  de vibração da estrutura.

Outra grandeza de grande importância na análise de estruturas submetidas ao desprendimento de vórtices se trata do número de Scruton, medida que verifica qual a tendência de uma estrutura sofrer vibrações, ou instabilidade, significativa devida a uma excitação dinâmica, e é definido pela relação:

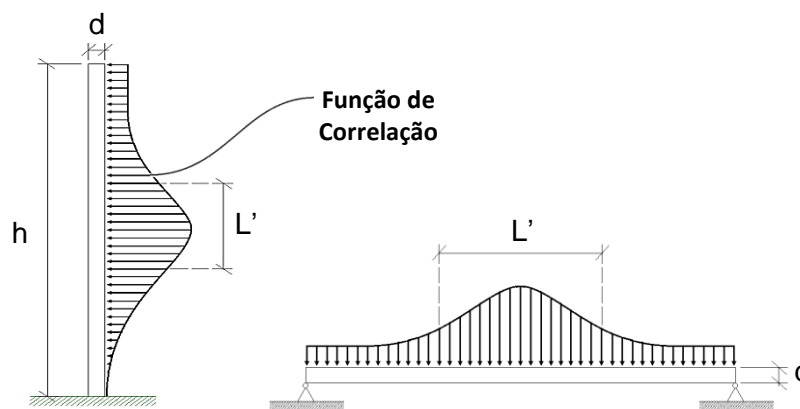
$$Sc = \frac{4\pi \cdot me \cdot \eta_s}{\rho \cdot D^2} \quad (2)$$

onde  $\rho$  é a massa específica do ar,  $\eta_s$  é a taxa de amortecimento estrutural,  $me$  é a massa equivalente por unidade de comprimento definida por:

$$m_e = \frac{\int_0^h m(z) \phi^2(z) dz}{\int_0^h \phi^2(z) dz} \quad (3)$$

## Modelo de Ruscheweyh

O modelo de Ruscheweyh (RUSCHEWEYH, 1994; DYRBYE e HANSEN, 1997) prevê que a força de excitação é de natureza senoidal e sua amplitude varia ao longo de toda estrutura. Existe uma região de comprimento  $L'$  na qual essas forças são mais expressivas e determinantes na resposta da estrutura (Fig. 1).



**Figura 1 – Definição do comprimento de correlação (traduzido de DYRBYE e HANSEN, 1997).**

A amplitude máxima de deslocamento ( $y_{m\acute{a}x}$ ) pode ser definida como:

$$y_{m\acute{a}x} = \frac{\bar{F}_m}{2K \eta_s} = \frac{\bar{F}_m}{8\pi^2 f_s^2 M \eta_s} \quad (4)$$

onde  $M$  é a massa modal,  $K = (2\pi f_s)^2 M$  é a rigidez modal e  $\bar{F}_m$  corresponde à constante multiplicativa da função senoidal definida por:



$$\bar{F}_m = \frac{1}{2} \rho \tilde{C}_L D \bar{U}^2(z_e) \int_{z_1}^{z_2} \phi(z) dz \quad (5)$$

No cálculo de  $\bar{F}_m$  a velocidade de vento que irá dominar a ocorrência do fenômeno é definida a partir de uma altura efetiva ( $z_e$ ) para a qual a frequência de desprendimento de vórtices coincide com a frequência da estrutura. Além disso, incorpora-se o fator de pico na definição do comprimento de correlação, por meio do intervalo de integração  $[z_1, z_2]$  em  $\bar{F}_m$ . O fator de pico permite considerar o efeito do amortecimento aerodinâmico  $\eta_a$ , caracterizando que  $g$  é variável com a razão  $\eta_s/\eta_a$ , de maneira que para valores de  $\eta_s/\eta_a < 1$  o comportamento da resposta se aproxima da forma senoidal e para valores superiores a 2 a resposta é tipo banda estreita de Gauss.

## Modelo de Vickery e Basu

O modelo de VICKERY e BASU (1983a) é fundamentado no método de auto-excitação expresso por:

$$m(\ddot{y} + 2\eta_s \omega_s \dot{y} + \omega_s^2 y) = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 D H_1(K) \left(1 - \varepsilon \frac{y^2}{D^2}\right) \dot{y} \bar{U} \quad (6)$$

O modelo proposto por estes autores baseia-se na solução no domínio da frequência e, como tal, tem seu valor de amplitude máxima  $y_{m\acute{a}x}$  dado por:

$$y_{m\acute{a}x} = g \sigma_y \quad (7)$$

onde a variância do deslocamento  $\sigma_y^2$  é determinado por meio da expressão:

$$\sigma_y^2 = \frac{S_w(f_s)}{(4\pi f_s)^3 (\eta_s + \eta_a) M^2} \quad (8)$$

A função de densidade espectral da força modal de sustentação ( $S_w(f_s)$ ) é responsável por reproduzir o efeito de desprendimento de vórtices, e é definida pelos autores como a força atuante no cilindro parado.

A determinação de  $\eta_a$  recai num processo iterativo com o deslocamento da estrutura. A fim de simplificar o procedimento para determinação da resposta, VICKERY e BASU (1983b) eliminaram o processo iterativo entre o amortecimento aerodinâmico, representado pelo parâmetro denominado  $K_a$ , e a resposta da estrutura tomando a variância da resposta como sendo nula, restringindo a análise a condições de pequenos deslocamentos.

Os referidos autores observaram, ainda, que a forma de variação do diâmetro apresenta grande importância na determinação dos deslocamentos. Nessa perspectiva, foram



desenvolvidas duas expressões aproximativas para o deslocamento conforme a razão entre o diâmetro no topo  $D(h)$  e o diâmetro na base  $D(0)$ . O presente trabalho focaliza o estudo a cerca de estruturas de seção transversal constante ou com pouca variação caracterizada por  $D(h)/D(0) > 0,5$ .

## Eurocódigo 1

### Método 1 – Modelo de Ruscheweyh

Este procedimento prevê que a amplitude máxima de deslocamento adimensionalizada em função do diâmetro, obtida como:

$$\frac{y_{m\acute{a}x}}{D} = \frac{1}{St^2} \cdot \frac{1}{Sc} \cdot K \cdot K_w \cdot C_{lat} \quad (9)$$

onde  $K_w$  é o fator de comprimento efetivo de correlação, definido por meio de processo iterativo com o deslocamento,  $K$  é o fator de forma, igual a 0,13 para a forma modal do tipo  $\phi = (z/h)^2$ ,  $C_{lat}$  é o coeficiente de força lateral. O Eurocódigo 1 acrescenta ao modelo de Ruscheweyh uma limitação para o termo associado ao comprimento de correlação, o qual não pode exceder de 0,6.

### Método 2 – Modelo de Vickery e Basu

A segunda abordagem baseia-se na formulação do modelo simplificado de Vickery e Basu para pequena variação de diâmetro, introduzindo algumas considerações não contempladas por este modelo.

A amplitude máxima de deslocamento é obtida tal como expressa pela Eq. 7, onde o fator de pico é obtido por meio da expressão:

$$g_y = \sqrt{2} \cdot \left( 1 + 1,2 \cdot \arctan \left( 0,75 \cdot \left( \frac{Sc}{4 \cdot \pi \cdot K_a} \right)^4 \right) \right) \quad (10)$$

O processo iterativo é dispensado ao obter a solução da equação iterativa, de forma tal que a variância do deslocamento seja definida como:

$$\left( \frac{\sigma_y}{D} \right)^2 = c_1 + \sqrt{c_1^2 + c_2} \quad (11)$$

onde

$$c_1 = \frac{0,4^2}{2} \cdot \left( 1 - \frac{Sc}{4 \cdot \pi \cdot K_a} \right) \quad \text{e} \quad c_2 = \frac{\rho \cdot D^2}{m_e} \cdot \frac{0,4^2}{K_a} \cdot \frac{C_c^2}{St^4} \cdot \frac{D}{h} \quad (12)$$

O Eurocódigo 1 fornece os valores a serem adotados para  $C_c$  e  $K_a$  em função de  $Re$ . Em particular, apresenta valores de  $K_a$  associados a  $I_u = 0$ .





## Propostas para NBR 6123

Existem duas propostas para estimativa dos deslocamentos induzidos pelo fenômeno de desprendimento de vórtice. A primeira proposta foi apresentada inicialmente por BLESSMANN (1998), e modificada posteriormente por PALUCH (1999), sendo esta nova versão foco do presente trabalho. PALUCH (1999) propõe ainda um segundo procedimento para a norma brasileira que permite determinar a amplitude máxima de deslocamento proveniente do fenômeno de desprendimento de vórtices.

### *Proposta 1 – Modelo de Ruscheweyh*

A primeira proposta apresenta uma alternativa de determinação das amplitudes máxima de vibração capaz de representar com segurança a resposta de estruturas cuja magnitude de deslocamento não supere em 5% do valor de seu diâmetro. Considerando a forma modal do tipo  $\phi = (z/h)^\gamma$ . Para  $\gamma = 2$ , a amplitude máxima de deslocamento é dada pela expressão:

$$y_{m\acute{a}x} = \frac{\rho \cdot 1,67}{2} \cdot \frac{(\bar{U}_{cr})^2 D}{8\pi^2 f_s^2 \eta_r} \cdot \frac{\tilde{C}_L C_R}{me} = \frac{1}{St^2} \cdot \frac{1}{S_c} \cdot \tilde{C}_L \cdot 0,133 \cdot C_R \cdot D \quad (13)$$

onde  $C_R$  é o coeficiente de correlação longitudinal obtido por meio de processo iterativo com o deslocamento, através de expressões empíricas derivadas do modelo de Ruscheweyh. Comparada à Eq. (9), a Eq. (13) apresenta como única diferença a formulação do parâmetro  $C_R$ , equivalente ao parâmetro  $K_w$  da Eq. (9), uma vez que o parâmetro  $\tilde{C}_L$  equivale ao  $C_{lat}$ .

### *Proposta 2 – Modelo Simplificado de Vickery e Basu*

O parâmetro de amortecimento aerodinâmico  $K_a$  é definido em função do número de Reynolds, considerando fluxo suave e fluxo turbulento, e da relação de variação de diâmetro, de forma direta, isto é, que quanto menor a variação do diâmetro menor o valor deste parâmetro, estando limitado inferiormente por 0,6.

A condição de estabilidade prevista pela proposta de norma, para qual a determinação da amplitude máxima é possível de ser obtida, define que para estruturas de seção transversal constante ou com pouca variação, a amplitude máxima de deslocamento é dada por:

$$\frac{y_{m\acute{a}x}}{D_0} = \frac{0,70}{\sqrt{\lambda} \frac{me}{\rho D_0^2} \left( \eta_s - \frac{\rho D_0^2}{me} K_a \right)^{1/2}} \quad (14)$$

onde  $K_a$  é o parâmetro de amortecimento aerodinâmico, definido como 1,2 para  $Re < 3 \times 10^6$  e 0,6 para  $Re \geq 3 \times 10^6$ .



## Análise para Estruturas Típicas de Aço e Concreto Armado

Apresenta-se um estudo comparativo entre os resultados obtidos por meio da aplicação dos Métodos 1 e 2 do Eurocódigo 1 e das Propostas 1 e 2 para NBR 6123, para cinco exemplos de estruturas, sendo duas de concreto e três de aço. A forma modal considerada corresponde a  $\phi = (z/h)^2$ , as demais características das estruturas são apresentadas na Tab. 4.

**Tabela 4 – Características das Estruturas Analisadas.**

| Exemplo | Material | $h$ (m) | $D$ (m)* | $h/D$ | $f_s$ (Hz) | $\frac{me}{\rho D^2}$ | $\eta_s$ (%) | $Scr$        |
|---------|----------|---------|----------|-------|------------|-----------------------|--------------|--------------|
| 1       | Aço      | 100,0   | 2,860    | 35    | 0,650      | 66,02                 | 0,2 – 1,5    | 1,7 – 12,4   |
| 2       | Aço      | 60,00   | 1,600    | 37,5  | 0,480      | 116,0                 | 0,2 – 1,5    | 2,9 – 21,9   |
| 3       | Aço      | 40,00   | 0,560    | 71    | 0,650      | 223,1                 | 0,2 – 1,5    | 5,6 – 42,0   |
| 4       | Concreto | 193,6   | 17,63    | 11    | 0,352      | 112,6                 | 1,0 – 4,0    | 14,1 – 56,6  |
| 5       | Concreto | 120,0   | 4,77     | 25    | 0,541      | 259,1                 | 1,0 – 4,0    | 32,6 – 130,2 |

\* O diâmetro refere-se ao diâmetro médio atuando no terço superior da estrutura.

Além disso, foram adotados, para todos os modelos, os seguintes valores:

$$St = 0,20; \tilde{C}_L = C_{lat} = 0,20; C_c = 0,006 \text{ e } K_a = 0,6.$$

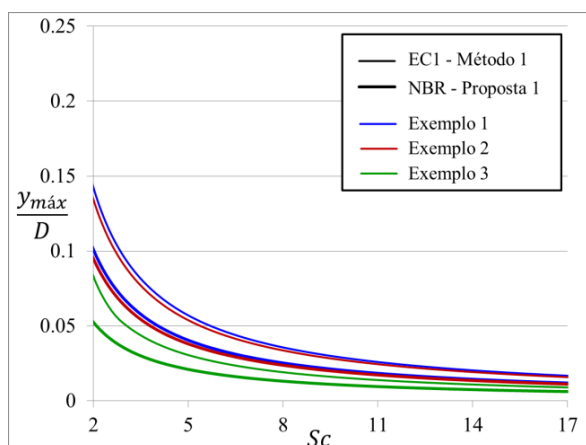
As análises foram desenvolvidas em termos do número de Scruton (Eq. 2). As Figuras 2 e 3 ilustram os resultados para os exemplos adotados, apresentados para o intervalo de  $Sc$  compatível com as características dessas estruturas.

As Figuras 2 se referem aos exemplos 1, 2 e 3 de estruturas de aço, sendo a solução pelos procedimentos baseados no modelo de Ruscheweyh mostrados na Figura (a), enquanto que a Figura (b) apresenta as soluções pelos procedimentos baseados no modelo de Vickery e Basu. Avaliando os procedimentos baseados no modelo de Ruscheweyh (Fig. 2.a), verifica-se uma proximidade entre os resultados para os exemplos 1 e 2. Esse fato é caracterizado pela influência da relação  $h/D$ , uma vez que os demais parâmetros determinantes da resposta são preservados para todos os exemplos. Em contrapartida, as respostas dos procedimentos originários do modelo de Vickery e Basu para os exemplos 1 e 2 (Fig. 2.a) não são tão próximas já que as respostas dependem não apenas da relação  $h/D$ , como também da relação  $me/(\rho D^2)$ .

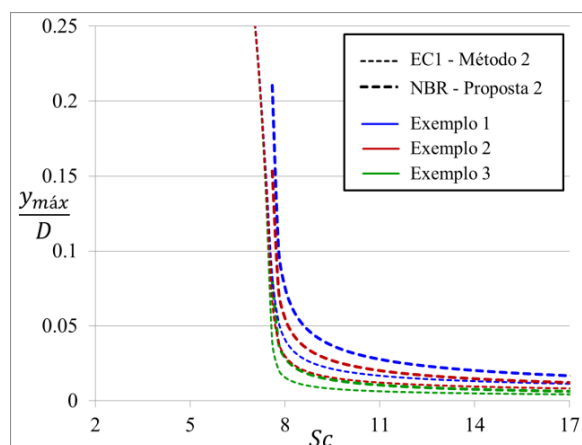
Da Figura 3, onde são mostrados os resultados para as estruturas de concreto, observa-se que estas apresentam pequenos deslocamentos, inferiores a  $4\%D$ . Para esta região, existe certa



proximidade entre os métodos, os procedimentos baseados no modelo de Vickery e Basu fornecem resultados inferiores ao do modelo de Ruscheweyh para as hipóteses consideradas, para valores de  $S_c < 40$  para o exemplo 4 e  $S_c < 70$  para o exemplo 5.

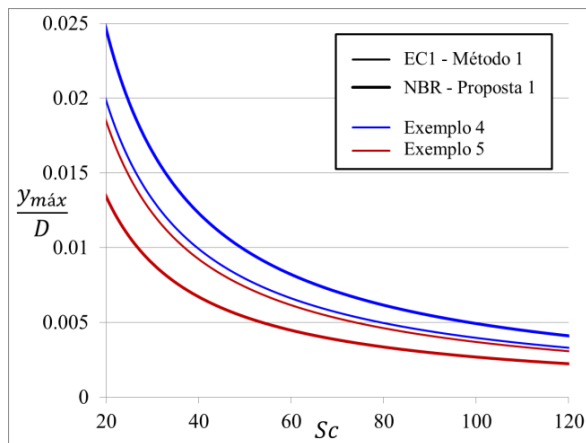


a) Ruscheweyh

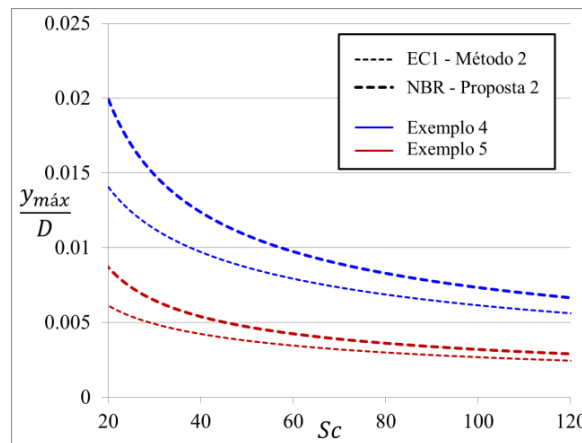


b) Vickery e Basu

**Figura 2 – Resposta de deslocamento – exemplos de estruturas de aço.**



a) Ruscheweyh



b) Vickery e Basu

**Figura 3 – Resposta de deslocamento – exemplos de estruturas de concreto.**

Das Figuras 2 e 3, pode-se concluir que os procedimentos das duas normas originadas dos mesmos métodos:

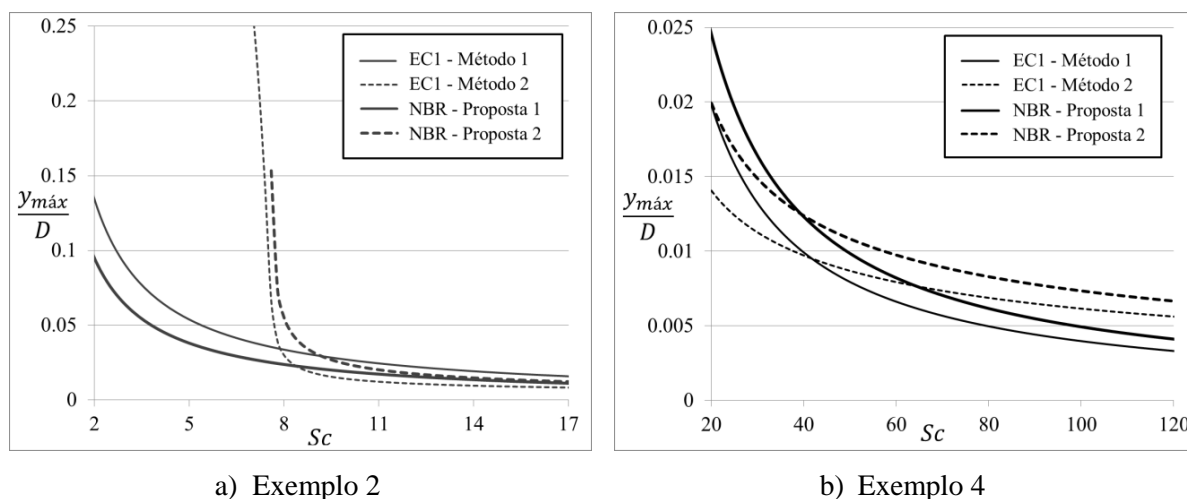
- ✓ Método 1 do Eurocódigo 1 e Proposta 1 da NBR-6123 e
- ✓ Método 2 do Eurocódigo 1 e Proposta 2 da NBR-6123

comparam-se muito bem para os casos típicos analisados.





As Figuras 4 se referem às respostas obtidas por meio dos quatro procedimentos normativos avaliados para dois exemplos, a Figura (a) ilustra as resposta para o Exemplo 2 (Estrutura de Aço), já a Figura (b) mostra as resposta para o Exemplo 4 (Estrutura de Concreto Armado).



**Figura 4 – Resposta de deslocamento para os quatro procedimentos de norma avaliados.**

Observa-se nas Figuras 4 que, para  $Sc < 8$  (Fig. 4.a), os procedimentos normativos baseados no modelo de Ruscheweyh resultam em valores de deslocamento muito inferiores aos obtidos pelos métodos originários do modelo de Vickery e Basu. Valores reduzidos de  $Sc$  caracterizam a condição de instabilidade das vibrações, consequência de pequenos valores para a razão  $\eta_s/\eta_a$ , entre o amortecimento estrutural e o amortecimento aerodinâmico (VICKERY e BASU, 1983a e 1983b).

O método 2 do Eurocódigo 1 e a proposta 2 da NBR aplicam versões do modelo de Vickery e Basu considerando o fator  $K_a$  associado ao escoamento sem turbulência, o que, naturalmente, conduz a valores bastante conservadores de resposta. Já o modelo desenvolvido por Ruscheweyh foi calibrado, principalmente, com resultados experimentais de protótipos de estruturas de aço (caracterizadas por pequenos valores de  $Sc$ ) sob a ação do vento turbulento. Entretanto, DYRBYE e HANSEN (2005) mostram resultados experimentais que se situam acima da resposta do método 1 do Eurocódigo 1 e indicam para uma aplicação mais geral o método da norma CICIND, originado no modelo de Vickery e Basu, mas levando em conta a turbulência.



# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



## Conclusões

Para a gama de resultados analisados, pode-se concluir que os procedimentos normativos aplicados à estrutura com  $Sc > 8$  fornecem valores de resposta com pequenas variações. Já para as estruturas com  $Sc < 8$ , encontra-se valores bastante discrepantes, principalmente devido às hipóteses relacionadas à presença de turbulência, uma vez que o método 2 do Eurocódigo 1 e a proposta 2 da NBR consideram o parâmetro  $K_a$  sem turbulência e o método 1 do Eurocódigo 1 e a proposta 1 da NBR tem incluído o efeito da turbulência.

Nessa perspectiva, o procedimento normativo adotado pelo CICIND originado do modelo de Vickery e Basu, considerando a influência da turbulência na determinação da resposta, apresenta-se como uma caso mais geral de estimativa de deslocamentos para estruturas de seção circular frente o fenômeno de desprendimento de vórtices.

## Referências

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Norma Brasileira NBR-6123 (NB-599): Forças Devidas ao Vento em Edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- BASU, R. I., VICKERY, B. J., Across-wind vibrations of structures of circular cross-section. Part II development of a mathematical model for full-scale application, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 12, pp.: 75-97, 1983.
- BLESSMANN, J., Introdução ao Estudo das Ações Dinâmicas do Vento. 1ª edição. Porto Alegre. Editora da Universidade, UFRGS, 1998.
- CINCID. Model Code for Steel Chimneys. Zurich: CINCID 2002.
- DYRBYE, C., HANSEN, S. O., Wind Loads on Structures, New York: John Wiley & Sons, 1997.
- EUROCÓDIGO 1, Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions. EN 1991-1-4, The European Standard, 2005.
- PALUCH, M. J., 1999, Vibrações Transversais por Desprendimento de Vórtices de Torres e Chaminés de Concreto Armado de Seção Transversal Circular. Tese de D.Sc., Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.
- RUSCHEWEYH, H., Vortex-induced vibration of a water tank tower with small aspect ratio, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v.33, pp.: 211-218, 1990.
- RUSCHEWEYH, H., Vortex Excited Vibrations. In: SOCKEL, H. (ed), Wind-Excited Vibrations of Structures, International Centre for Mechanical Sciences, Courses and Lectures – N° 335, Milano, Italia, Springer-Verlag, 1994.
- VICKERY, B. J., BASU, R. I., Across-wind vibrations of structures of circular cross-section. Part I. development of a mathematical model for two-dimensional conditions, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 12, pp.: 49-73, 1983a.
- VICKERY, B. J., BASU, R. I., Simplified Approaches to the Evaluation of the Across-Wind Response of Chimneys, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 14, pp.: 153-166, 1983b.