



A: XXXIX-0000

ANÁLISE COMPARATIVA DA RESPOSTA DE DUAS ESTRUTURAS ESBELTAS DE SEÇÃO CIRCULAR SUJEITAS AO DESPRENDIMENTO DE VÓRTICES DE ACORDO COM O EUROCÓDIGO EN 1991-1-4:2005 E A PROPOSTA DE REVISÃO PARA A NBR-6123:2021

COMPARATIVE ANALYSIS OF TWO SLENDER STRUCTURES WITH CIRCULAR CROSS-SECTION SUBJECTED TO VORTEX SHEDDING ACCORDING TO EUROCODE EN 1991-1-4:2005 AND THE CODE REVIEW PROPOSAL FOR NBR – 6123:2021

Emerson S. Almeida (P) (1); Remo M. de Souza (2); Acir M. Loredou-Souza (3); Pedro H. Gama Neiva (4)

(1) Eng. Civil, Mestrando, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

(2) PhD. Prof., Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Civil, Belém, Brasil

(3) PhD. Prof., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Civil, Porto Alegre, Brasil

(4) Eng. Civil, Mestrando, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil

Endereço para correspondência: emerson.sena.almeida@gmail.com; (P) Apresentador

Resumo

Um projeto adequado de uma estrutura esbelta exige o conhecimento dos fatores ambientais que possam influenciar a resposta da estrutura, tanto estática quanto dinâmica. Neste contexto, um fenômeno dinâmico importante relacionado à ação do vento nessas estruturas é o desprendimento de vórtices. No presente trabalho comparou-se a metodologia II do Eurocódigo 1 (EN 1991-1-4:2005) e a proposta para atualização da NBR-6123, que abordam o fenômeno de desprendimento de vórtices para estruturas de seção circular, aplicando-as na análise de duas estruturas esbeltas, sendo a primeira uma torre de linha de transmissão e a segunda uma chaminé, ambas em concreto armado. A partir da aplicação de cada método, foi possível a obtenção dos deslocamentos de pico no topo de cada estrutura, da carga equivalente por unidade de comprimento atuando no terço superior da estrutura, assim como o momento fletor atuante na base. Ao final, para as estruturas estudadas, foi possível concluir que as abordagens produzem resultados relativamente diferentes no que se refere a deslocamentos no topo, carga equivalente e, conseqüentemente, momento fletor na base, com maiores valores obtidos pelo método do Eurocódigo, o que pode ser justificado pela não consideração da influência da turbulência sobre os fatores K_{a0} e C na sua abordagem, enquanto a nova proposta da NBR-6123 leva esse fator em consideração.

Palavras-chave: Desprendimento de vórtices, Torres de seção circular, NBR – 6123, Eurocódigo I.

Abstract

A proper design of a slender structure requires knowledge of environmental factors that will impact the structure statically and dynamically. In this context, an important dynamic phenomenon related to wind action in structures is vortex shedding. Therefore, in this work, Eurocode 1 methodology II (EN 1991-1-4:2005) was compared to the proposal, for updating NBR – 6123, which addresses the phenomenon of vortex shedding for circular section structures, applying them for analysis of two slender structures, a transmission line tower and a chimney, both in reinforced concrete. From the application of each method, it was possible to obtain the peak displacements at the top of each structure, the equivalent load per unit of length acting on the upper third of the structure, as well as the bending moment acting at the base. In the end, for the analyzed structures, it was possible to conclude that both approaches produce relatively close results and that the NBR - 6123 methodology performs well in predicting the effects of the phenomenon of vortex shedding on structures, while the procedure II of the Eurocode can lead to higher results.

Keywords: Vortex shedding, Circular section towers, NBR – 6123, Eurocode I.



1. INTRODUÇÃO

Para um projeto adequado de estruturas esbeltas é necessário que sejam conhecidas as ações ambientais que causam efeitos estáticos e dinâmicos e que devem ocorrer em algum momento durante a vida útil da estrutura. Para esse tipo de estrutura, a ação do vento é um fator muito importante nas fases de análise e projeto e conhecer sua influência no comportamento estrutural é fundamental.

Um fenômeno importante relacionado à ação do vento e que acomete esse tipo de estrutura é o desprendimento de vórtices, os quais se formam no escoamento em torno de um corpo a partir da redução de pressão à barlavento e da conseqüente separação do escoamento e formação da zona de recirculação à sotavento do corpo (SANTOS, 2013). Nos casos em que a estrutura é excitada em frequências próximas a sua frequência natural de vibração devido ao fenômeno, ela poderá oscilar com grande amplitude na direção transversal à incidência do vento (GRALA, 2016).

O presente trabalho tem como principal objetivo a comparação e análise entre os resultados obtidos para estruturas isoladas de seção circular, como torres e chaminés, no que se refere a deslocamento no topo, força equivalente e distribuição de momento fletor ao longo da estrutura, a partir dos procedimentos normativos baseados em Vickery e Basu encontrados no procedimento II do Eurocódigo 1 (2010) e na proposta para a atualização da NBR – 6123 presente em Grala (2019). Para tanto, serão analisadas separadamente duas estruturas de concreto armado de seção circular já estudadas anteriormente. Uma delas consiste em uma torre de linha de transmissão, estudada por Paluch (1999) e Santos (2013), e a outra uma chaminé, estudada por Vickery e Basu (1983b) e Santos (2013).

Para consideração desse fenômeno na norma brasileira para ação do vento em edificações, NBR – 6123, a proposta mais recente foi estudada por Grala (2016, 2019), para a verificação desse fenômeno no caso da seção circular, sendo o procedimento baseado no modelo de Vickery e Basu consolidado na década de 1980. Essa proposta simplifica o modelo base e cria novos coeficientes, os quais são comparados e calibrados a outros estudos e normas, levando em consideração parâmetros de influência que são ignorados por outros procedimentos, tais como a influência do número de Reynolds e a intensidade de turbulência nos coeficientes C e Ka , sendo C o coeficiente que depende de parâmetros aerodinâmicos, propriedades aerodinâmicas e estruturais e Ka o parâmetro de amortecimento aerodinâmico, o que proporciona coeficientes mais precisos e seguros.

2. VELOCIDADE CRÍTICA DO VENTO E NÚMERO DE STROUHAL

O conceito de velocidade crítica é o mesmo tanto para a NBR – 6123 quanto para o Eurocódigo, sendo que ambas as normas a definem como a velocidade do vento em que a frequência de desprendimento de um par de vórtices é igual a uma das frequências naturais da estrutura ou de um elemento estrutural. Essa velocidade é calculada a partir da seguinte expressão:

$$V_{cr} = \frac{f_n L}{St} \quad 1$$

em que f_n é a frequência natural da estrutura associada ao modo de vibração considerado na verificação e L é a dimensão característica da seção transversal da estrutura em análise, onde no caso de estruturas de seção circular $L=d_0$, sendo d_0 o diâmetro médio do terço superior. Os valores



para o número de Strouhal (St), de acordo com cada tipo de seção transversal, são tabelados em cada procedimento.

3. PROCEDIMENTO II DO EUROCÓDIGO

A abordagem dessa seção, preconizada no procedimento II do Eurocódigo, é aplicada para casos em que a variação de diâmetro ao longo da estrutura alteada é pequena. Para este procedimento é mantida a consideração do movimento da estrutura como fator redutor do amortecimento aerodinâmico, assim como na formulação que o baseia. É importante ressaltar que esse método é aplicável para o cálculo das respostas para o primeiro modo de vibração da estrutura. As simbologias diferentes entre o Eurocódigo e a proposta da NBR – 6123, que representam os mesmos parâmetros, foram adequadas à simbologia proposta para o procedimento do projeto da norma brasileira de forma a facilitar o entendimento dos procedimentos.

O deslocamento característico máximo $\hat{y}_{m\acute{a}x}$, no topo da estrutura, é dado pela equação a seguir:

$$\frac{\hat{y}_{m\acute{a}x}}{d} = g_y \sigma_y \quad 2$$

onde g_y é o fator de pico, dado pela Eq. (3), e σ_y é o desvio padrão do deslocamento, dado pela Eq. (4).

$$g_y = \sqrt{2} \left\{ 1 + 1,2 \arctan \left(0,75 \left(\frac{Sc}{4 \pi K_a} \right)^4 \right) \right\} \quad 3$$

$$\left(\frac{\sigma_y}{d} \right)^2 = c_1 + \sqrt{c_1^2 + c_2} \quad 4$$

Os valores para c_1 e c_2 são definidos como:

$$c_1 = \frac{a_l^2}{2} \left(1 - \frac{Sc}{4 \pi K_a} \right) \quad 5$$

$$c_2 = \frac{\rho \cdot d^2}{m_e} \frac{a_l^2}{K_a} \frac{C}{St^4} \frac{d}{h} \quad 6$$

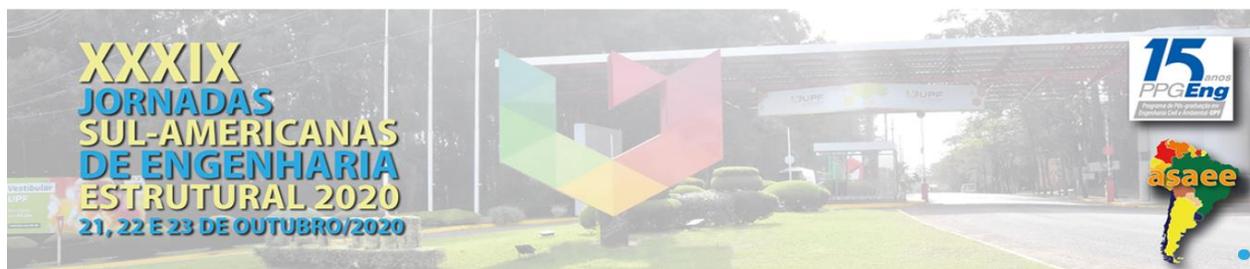
Sendo a_l a amplitude limite normalizada; ρ a massa específica do ar (sob condições de desprendimento de vórtices); C o coeficiente aerodinâmico, dependente da forma da seção transversal; h a altura da estrutura acima do terreno, medida até o topo; d a dimensão característica da estrutura no ponto de maior deslocamento, em caso de seção variável; Sc o número de Scruton que representa a susceptibilidade de uma estrutura sofrer vibrações ou instabilidades devida a uma excitação dinâmica como o desprendimento de vórtices; m_e é a massa equivalente (ou efetiva) por unidade de comprimento da estrutura, calculada a partir da Eq. (9).

O número de Scruton é dado pela equação a seguir:

$$Sc = \frac{2 \delta_s m_e}{\rho d^2} \quad 7$$

Onde δ_s é o amortecimento estrutural expresso pelo decremento logarítmico, o qual pode ser calculado de forma simplificada a partir da Eq. (8), quando a razão de amortecimento estrutural crítico ξ for muito menor que 1.

$$\delta_s = \xi 2\pi \quad 8$$



$$m_e = \frac{\int_0^h m(s) \varphi^2(s) ds}{\int_0^h \varphi^2(s) ds} \quad 9$$

onde $m(s)$ é a massa por unidade de comprimento e $\varphi(s)$ é a forma modal da estrutura para o 1º modo de vibração. Para a forma modal o Eurocódigo recomenda utilizar a seguinte equação:

$$\varphi(s) = \left(\frac{s}{h}\right)^\zeta \quad 10$$

Onde ζ assume o valor de 2,0 para o caso de torres e chaminés, de acordo com o Eurocódigo. De acordo com o Eurocódigo, para estruturas do tipo “cantilevered” (engastadas na base e livres no topo) com uma distribuição de massa variável, a massa equivalente pode ser aproximada pelo valor médio no terço superior da estrutura. O desprendimento de vórtices em um cilindro circular depende no número de Reynolds Re na velocidade crítica do vento V_{cr} . O número de Reynolds é dado pela Eq. (11):

$$Re = \frac{V_{cr} d}{\nu} \quad 11$$

Onde ν é a viscosidade cinemática do ar ($\nu \approx 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).

A força de inércia $F_w(s)$, atuante na direção perpendicular à direção do vento na posição s da estrutura, causada pelo efeito das vibrações induzidas pelo desprendimento de vórtices, é calculada a partir da seguinte expressão:

$$F_w(s) = m(s) (2 \pi n_{i,y})^2 \varphi_{i,y}(s) \hat{y}_{F,max} \quad 12$$

onde $n_{i,y}$ é a frequência própria da estrutura e $\varphi_{i,y}(s)$ é a função de forma modal normalizada da estrutura (com valor 1 no ponto de máximo deslocamento). Neste procedimento do Eurocódigo é possível encontrar os valores para as constantes C e K_a fornecidos em função do número de Reynolds (Re), no quadro E.6 da norma, apresentado neste trabalho na Tabela 1.

Tabela 1. Coeficientes para a determinação dos efeitos do desprendimento de vórtices.

Coeficientes	Seção Circular $Re \leq 10^5$	Seção Circular $Re = 5 \cdot 10^5$	Seção Circular $Re \geq 10^6$	Seção transversal quadrada
C	0,02	0,005	0,01	0,04
$K_{a \text{ máx}}$	2	0,5	1	6
a_l	0,4	0,4	0,4	0,4

Observação: Para seções circulares, admite-se que os coeficientes C e $K_{a \text{ máx}}$ variam linearmente com o logaritmo do número de Reynolds para $10^5 < Re < 5 \cdot 10^5$ e para $5 \cdot 10^5 < Re < 10^6$.

4. PROPOSTA PARA A NBR – 6123

A proposta apresentada por Grala (2019), permite a estimativa da resposta em termos de deslocamento máximo, assim como a determinação da correspondente força estática equivalente que atua no terço superior da estrutura esbelta de seção circular constante ou com pequena variação de diâmetro d , sendo $1,0 \geq d(h)/d(s) \geq 0,5$, onde $d(s)$ é o diâmetro na cota s acima da base e h a altura total da estrutura. A resposta da estrutura em termos de deslocamento é obtida a partir da formulação encontrada na Eq. (2). No que se refere à obtenção do termo σ_y , temos a equação geral



para qualquer K , sendo esse o parâmetro que relaciona os amortecimentos estrutural e aerodinâmico, apresentada a seguir:

$$\frac{\sigma_y}{d_0} = \sqrt{\frac{\alpha_l^2}{2}(1-K) + \sqrt{\frac{\alpha_l^4}{2}(1-K)^2 + \frac{\alpha_l^2 C^2 \rho d_0^3}{m_0 h K_{a0} St^4}}} \quad 13$$

Para essa equação, tem-se: α_l , que é definido como a amplitude limite normalizada, o qual apresenta o valor de 0,4 para estruturas como torres e chaminés, m_0 é o valor médio da massa por unidade de comprimento no terço superior da estrutura e os valores de C , K_{a0} e o número de Reynolds Re podem ser encontrados na Tabela 2. O número de Reynolds para a NBR – 6123 é obtido a partir da seguinte expressão:

$$Re = 70000 d_0 V_{cr} \quad 14$$

Tabela 2 – Valores de C e K_{a0} em função de Re , V_{cr} (m/s), d_0 (m).

Re	C		K _{a0}	
	V _{cr} < 11 m/s	V _{cr} > 11 m/s	V _{cr} < 11 m/s	V _{cr} > 11 m/s
Re = 70.000 d ₀ V _{cr}				
Re ≤ 2x10 ⁵	0,0554	0,0261	2	1,1
2x10 ⁵ ≤ Re ≤ 10 ⁶	0,1840 – 0,0286.log(Re)	0,0867 – 0,0135.log(Re)	1,2	0,6
Re > 10 ⁶	0,0208	0,0098		

O parâmetro K é dado por:

$$K = \frac{m_0 \zeta_e}{\rho d_0^2 K_{a0}} \quad 15$$

em que ζ_e é a razão de amortecimento estrutural crítico. Existem ainda duas simplificações que podem ser adotadas para a Eq. (13) a partir de determinados valores para K , onde para $K \leq 0,95$ temos a Eq. (16) e para $K \geq 1,05$ a Eq. (17), ambas apresentadas a seguir:

$$\frac{\sigma_y}{d_0} = \sqrt{\alpha_l^2(1-K)} \quad 16$$

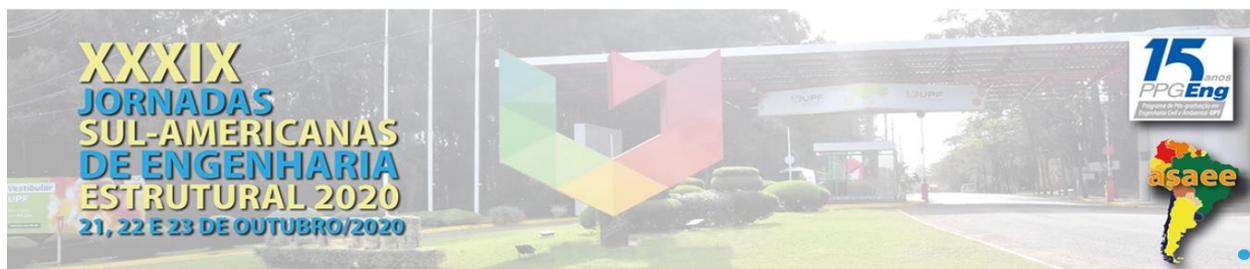
$$\frac{\sigma_y}{d_0} = \sqrt{\frac{C^2 \rho d_0^3}{m_0 h K_{a0} St^4 (K-1)}} \quad 17$$

Assim como ocorre no procedimento do Eurocódigo, é necessário multiplicar o desvio padrão do deslocamento pelo fator de pico g_y , que para a proposta normativa da NBR – 6123 é obtido por meio da seguinte equação:

$$g_y = 1,4 + 1,6 \arctan(0,75K^4) \quad 18$$

Após o cálculo do deslocamento de pico no topo da estrutura e do desvio padrão do deslocamento é possível a obtenção da carga equivalente estática por unidade de comprimento F_L , que atua de forma distribuída sobre o terço superior da estrutura por meio da seguinte equação:

$$F_L = (2\pi f_n)^2 m_0 \hat{y}(h) \quad 19$$



Em que f_n é a frequência natural de vibração, em Hz.

5. CHAMINÉ

A primeira estrutura consiste em uma chaminé em concreto armado com 193,6 metros de altura e já foi estudada por Vickery e Basu (1983b) e Santos (2013). A chaminé em questão apresenta geometria cilíndrica de seção circular com o diâmetro da base igual a 18,40 metros, com uma variação linear até a cota de 46,5 metros, onde a partir desse ponto o diâmetro se mantém constante igual a 17,63 metros, como mostra a Fig. 2. Foram consideradas as seguintes propriedades obtidas a partir dos estudos anteriormente citados: massa específica do concreto 2500 kg/m^3 e módulo de elasticidade igual a $29,50 \text{ GPa}$, massa específica do ar $1,26 \text{ kg/m}^3$ e taxa de amortecimento estrutural igual a $1,00\%$.

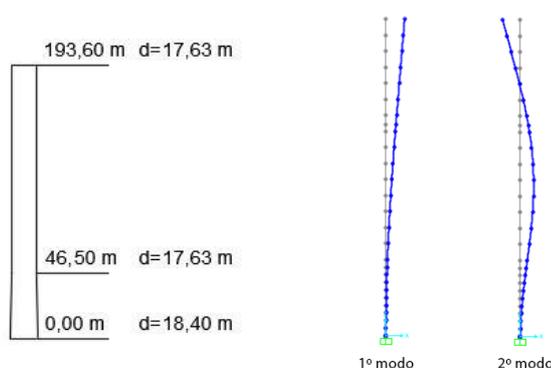


Figura 2. Geometria da Chaminé e modos de vibração (adaptado de Santos (2013)).

A estrutura apresenta uma pequena variação linear de diâmetro, a qual se enquadra dentro dos limites propostos por cada metodologia que será aplicada. A chaminé apresenta uma estrutura de casca, com a espessura variável linearmente da base, com valor de 50 centímetros, até a cota de 46,5 metros, com valor de 30 centímetros, a partir da qual assume valor constante até o topo. Os valores de frequências para os dois primeiros modos de vibração por flexão obtidos neste estudo são denominados como “calculados” e são comparados com os valores dos estudos anteriores na Tabela 3.

Tabela 3 – Frequências naturais para os dois primeiros modos de vibração para a Chaminé de concreto armado.

Referência	Valor Adotado		Erros Relativos entre Calculados - Estudos de referência (%)	
	1º modo	2º modo	1º modo	2º modo
Vickery e Basu (1983b)	0,364Hz	-	6,04	-
Santos (2013)	0,353Hz	2,109Hz	3,12	8,49
Calculados	0,342Hz	1,930Hz	-	-

Os resultados apresentaram boa correlação com os estudos de referência, com erros relativos de 3,12% e 6,04%, em relação aos trabalhos de Santos (2013) e Vickery e Basu (1983b), respectivamente, para o 1º modo de vibração, e 8,49%, em relação ao estudo de Santos (2013),



para o 2º modo de vibração. As diferenças podem ser explicadas por não serem conhecidas todas as hipóteses, de fato, adotadas nos outros trabalhos para a modelagem da estrutura, bem como não se sabe as ferramentas numéricas adotadas para resolução do problema de autovalores e autovetores característico do problema de vibrações livres, o que pode inserir diferenças nos resultados. Com isso, considera-se o modelo com boa capacidade de representação do comportamento da estrutura. A Fig. 2 apresenta também as formas modais para os dois primeiros modos de vibração por flexão obtidas para o modelo numérico, as quais estão em conformidade com os estudos anteriores e com os resultados analíticos para uma estrutura engastada e livre.

6. TORRE DE LINHA DE TRANSMISSÃO – TECON

A Torre de concreto armado estudada por Paluch (1999) e Santos (2013), apresenta altura total de 130,95 metros e está localizada na BR 604, no porto da TECON, na cidade do Rio Grande, RS, como mostra a Fig. 4. A torre de linha de transmissão é formada por uma casca de concreto armado de 120m de altura com 9,5 metros de diâmetro na base e espessura de 25 centímetros variando linearmente até atingir a cota de 84 m, com o valor de 20 centímetros, sendo constante até o topo, onde o diâmetro é de 4,5 metros. No topo da torre está presente uma torre de treliça metálica de 10,95m de altura, que não foi considerada no presente estudo do fenômeno de desprendimento de vórtices, seguindo o que foi considerado pelos autores anteriores, pois as respostas teóricas obtidas são apenas da estrutura de concreto armado.

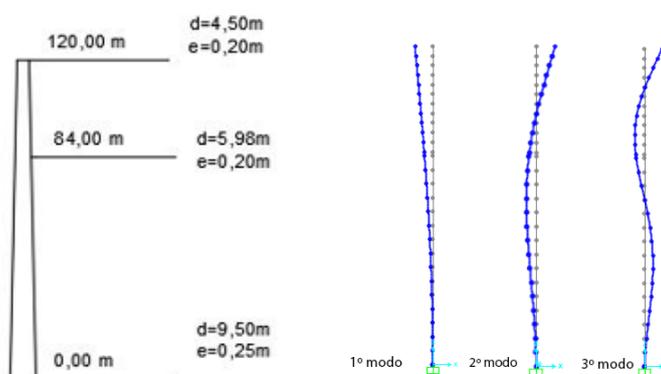


Figura 4. Torre de linha de Transmissão da TECON, sua geometria de interesse e modos de vibração.

A Tabela 4 mostra o comparativo entre os valores de frequências para os três primeiros modos de vibração obtidos para o modelo da torre nos estudos anteriores e no atual.

Referência	Valor Adotado			Erros Relativos entre Calculados - Estudos de referência (%)		
	1º modo	2º modo	3º modo	1º modo	2º modo	3º modo
Observado	0,53Hz – 0,548Hz	-	-	-	-	-
Paluch (1999)	0,54Hz	2,39Hz	6,02Hz	0,74	2,93	6,48
Santos (2013)	0,54Hz	2,22Hz	5,48Hz	0,74	4,50	2,74
Calculados	0,544Hz	2,32Hz	5,63Hz	-	-	-

Tabela 4 – Frequências para os 3 primeiros modos de vibração da Torre.



A partir das mesmas justificativas apresentadas para a estrutura da Chaminé, sobre as hipóteses consideradas nos estudos anteriores, os resultados apresentaram boa correlação. A partir dos resultados, considera-se também para esse modelo uma boa capacidade de representação do comportamento da estrutura.

A Fig.4 mostra os três primeiros modos de vibração obtidos para o modelo numérico, os quais estão de acordo com o que foi estudado pelos autores anteriores e com os resultados analíticos para uma estrutura engastada e livre.

7. APLICAÇÃO DAS METODOLOGIAS NORMATIVAS

Apresenta-se nesta sessão o comparativo de resultados entre as duas metodologias em estudo aplicadas às duas estruturas em análise, ou seja, não se fará uma análise comparativa com os resultados obtidos nos estudos que foram utilizados como referência nos exemplos de aplicação dos procedimentos normativos, pois não faz parte do escopo deste trabalho.

Na Tabela 5, estão presentes os parâmetros de entrada para cada estrutura utilizados nos procedimentos de cálculo das duas metodologias.

Tabela 5 – Parâmetros de entrada das estruturas para aplicação das metodologias.

Estruturas	h (m)	d^* (m)	f_n (Hz)	m_o (kg/m)	m_e (kg/m)	Taxa de amortecimento estrutural (%)
Chaminé	193,60	17,63	0,342	40832,851	40837,111	1,00
Torre TECON	120,00	4,77	0,544	8054,696	8148,483	1,00

* referente ao diâmetro médio do terço superior da estrutura.

No que se refere ao número de Strouhal, este foi fixado em 0,20 para a proposta da NBR – 6123 e em 0,18 para o procedimento II do Eurocódigo, de acordo com cada recomendação normativa.

O valor para a massa equivalente de cada estrutura foi calculado utilizando a Eq. (9) e a distribuição de massa ao longo da altura da estrutura estão presentes na Fig. 6 para a Torre e para a Chaminé.

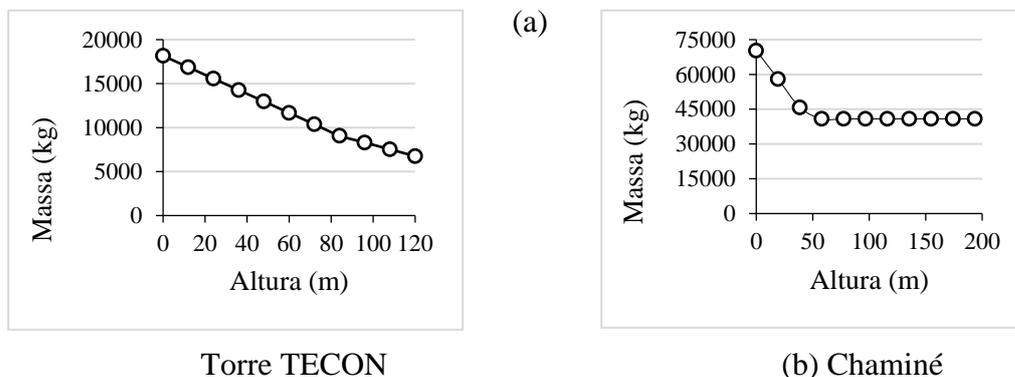


Figura 6. Distribuição de massa das estruturas ao longo da altura.



Na Tabela 6 pode-se observar os valores da predição dos deslocamentos de pico no topo e a carga equivalente estática por unidade de comprimento atuando no terço superior de cada estrutura, assim como os valores de velocidade crítica calculados e o número de Scruton.

Tabela 6. Parâmetros calculados a partir dos procedimentos normativos.

Estrutura	Metodologia	V_{cr} (m/s)	$\hat{y}_{m\acute{a}x}/d$	F_L (kN/m)	Sc
Chaminé	NBR-6123	30,147	0,0400	133,10	13,104
Chaminé	II - Eurocódigo	33,497	0,1052	349,64	
Torre TECON	NBR-6123	12,974	0,0077	3,435	35,717
Torre TECON	II - Eurocódigo	14,416	0,0109	4,94	

Podemos observar que os valores calculados a partir do procedimento II do Eurocódigo são maiores, pois neste procedimento não é levada em consideração a influência da turbulência como fator redutor sobre o parâmetro K_{a0} , nem sobre o parâmetro C , diferente da abordagem da NBR – 6123 (GRALA, 2019). Nota-se que o valor do número de Scruton para a Chaminé é relativamente baixo e isso evidencia sua susceptibilidade em ser excitada pelo fenômeno de desprendimento de vórtices o que requer uma análise dinâmica mais detalhada para essa estrutura, nesse caso, estudos em túnel de vento. Para ambas estruturas o número de Reynolds calculado, tanto pela metodologia da NBR – 6123 quanto pelo procedimento II do Eurocódigo, foi superior a 10^6 , sendo que no caso da Chaminé atingiu o valor de $3,72 \times 10^7$ pela proposta da NBR – 6123 e $3,94 \times 10^7$ pelo Eurocódigo, caracterizando o regime ultracrítico onde o desprendimento de vórtices (vórtices de Kármán fortes) se estabelece regular e ordenado (LOREDO-SOUZA, 2019), enquanto para a Torre o maior valor para Re foi igual a $4,584 \times 10^6$ de acordo com o Eurocódigo e $4,33 \times 10^6$ a partir da proposta da NBR – 6123.

Na Fig.7 é apresentada a comparação entre as duas metodologias referente ao momento fletor ao longo da estrutura da Chaminé.

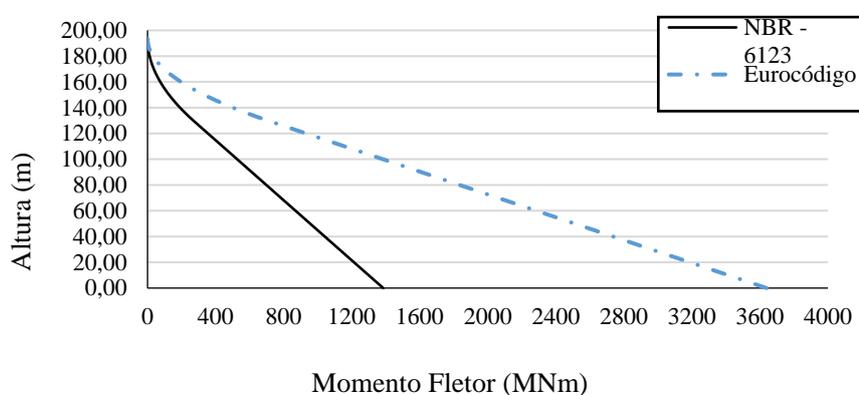


Figura 7. Comparação entre os momentos fletores obtidos pela abordagem proposta para a NBR – 6123 e o procedimento II do Eurocódigo para a Chaminé.

A partir da abordagem proposta para a NBR – 6123, a aplicação da carga equivalente no terço superior da estrutura produziu um momento fletor na base igual a 1385,70 MNm, enquanto que a



carga obtida pelo procedimento II do Eurocódigo gerou um momento fletor de 3640,10 MNm na base da Chaminé. Os deslocamentos relativos no topo da estrutura da Chaminé obtidos por meio do *SAP 2000* foram: 73 centímetros para a NBR – 6123 e 1,92 metros para o Eurocódigo, que representa mais que o dobro do 1º valor. A grande diferença entre os valores para cada abordagem em relação à Chaminé justifica a realização de estudos mais detalhados para a ação do fenômeno sobre essa estrutura, como ensaios em túnel de vento, por exemplo.

Para a Torre de linha de transmissão, a carga obtida através da metodologia proposta para a NBR – 6123 resultou no valor de 13740 kNm de momento fletor na base, valor próximo ao calculado através do procedimento II do Eurocódigo de 19760 kNm. No que se refere aos deslocamentos no topo da estrutura, calculados através do software *SAP 2000*, obteve-se o valor de 3,94 centímetros para a NBR – 6123 e 5,67 centímetros a partir do Eurocódigo.

A Fig. 8 mostra o comparativo de momento fletores calculados a partir de cada procedimento para a Torre de linha de transmissão da TECON.

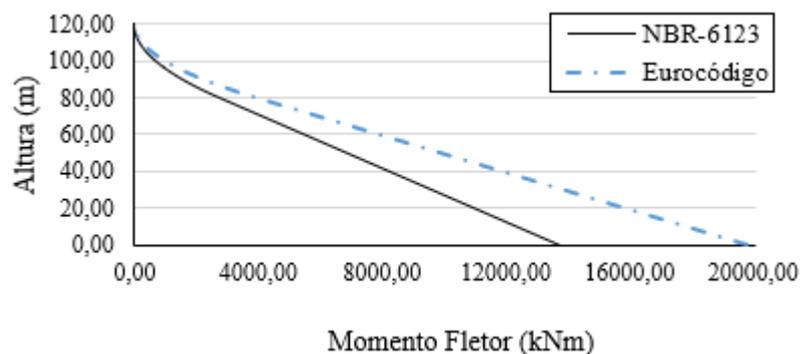
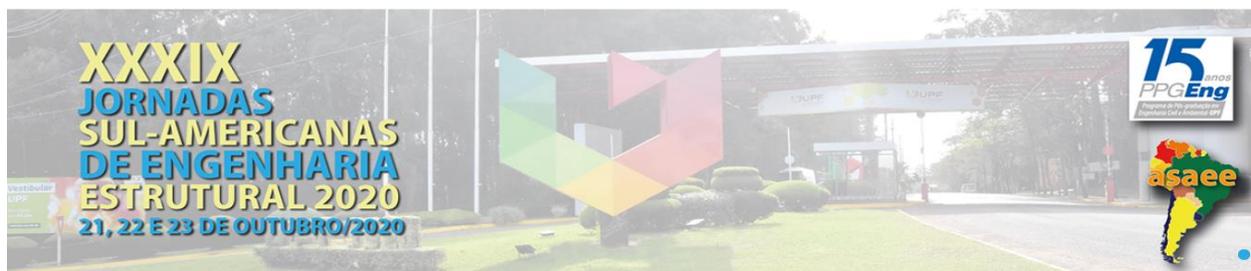


Figura 8. Comparação entre os momentos fletores obtidos pela abordagem proposta para a NBR – 6213 e o procedimento II do Eurocódigo para a Torre TECON.

método II do Eurocódigo 1 ao não considerar a influência sobre o fator K_{a0} , naturalmente, leva a valores maiores de respostas da estrutura ao fenômeno de desprendimento de vórtices, por isso deve-se conhecer todas as hipóteses que baseiam os procedimentos. Já a proposta da NBR – 6123 ao considerar a influência da turbulência sobre os parâmetros K_{a0} e C , conduzem a respostas de menor valor ao serem comparados com o Eurocódigo, assim como nos estudos de Santos (2013) e Grala (2016).

8. CONCLUSÕES

A partir da aplicação das metodologias foi possível a obtenção dos resultados de interesse quais sejam: deslocamento no topo, a força equivalente e distribuição de momento fletor ao longo da estrutura. A partir dos resultados analisados, pode-se concluir que o procedimento II do Eurocódigo e a proposta da NBR-6123, ambos baseados no modelo de Vickery e Basu, produziram valores relativamente próximos, para carga equivalente e deslocamento de pico gerando assim valores equivalentes para momento fletor na base para o caso da Torre da TECON. No que se refere à Chaminé, os valores obtidos entre os procedimentos justificam a realização de estudos mais detalhados para essa estrutura frente ao fenômeno de desprendimento de vórtices, devido a grande diferença nos resultados.



A não consideração da influência da turbulência sobre os fatores K_{a0} e C por parte da abordagem II do Eurocódigo podem levar a resultados com valores maiores ou não a favor da segurança como nos estudos de Santos (2013) e Grala (2016), dependendo dos casos, ao contrário da proposta da NBR-6123 que ao considerar tal influência nesses parâmetros evidencia sua total aplicabilidade dentro dos fatores que englobam o fenômeno de desprendimento de vórtices.

9. REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Forças devidas ao vento em edificações. NBR – 6123, 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, p.75-97. 1983.
- COMPUTER AND STRUCTURES INC. SAP2000 Integrated Software for Structural Analysis and Design. Computers and Structures Inc., Berkeley, California, 2017.
- EUROCÓDIGO 1, Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions. EN 1991-1-4, The European Standard, 2010.
- GRALA, P.; LOREDO-SOUZA, A. M.; ROCHA, M. M. **Method to predict vortex shedding response based on Vickery and Basu model: A proposal for the new Brazilian Wind Code.** Engineering Structures, v. 198, p. 109469, 2019.
- GRALA, P. **Estudo das metodologias para o cálculo da resposta de estruturas cilíndricas circulares frente ao fenômeno de desprendimento de vórtices: proposta atualizada para a NBR – 6123.** 2016. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- LOREDO-SOUZA, A. M. ROCHA, M. M.; OLIVEIRA, M. G. K.; GRALA, P. Aerodynamic effects on a high slenderness concrete chimney. **Rev. IBRACON Estruturas e Materiais, São Paulo**, v. 12, n. 6, p. 1353-1382, Dec. 2019.
- PALUCH, M. J. **Vibrações transversais por desprendimento de vórtices de torres e chaminés de concreto armado de seção transversal circular.** 1999. 215 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.
- SANTOS, M. L. **Vibrações induzidas por vórtices em torres de seção circular.** 2013. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- 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, p.153-166. 1983b.