

# Dynamic analysis of a concrete chimney considering the aerodynamic damping

## Análise dinâmica de uma chaminé de concreto considerando o amortecimento aerodinâmico



H. CARVALHO <sup>a</sup>  
[hermes@dees.ufmg.br](mailto:hermes@dees.ufmg.br)  
<https://orcid.org/0000-0002-4652-8068>

G. QUEIROZ <sup>a</sup>  
[gilsonmaque@gmail.com](mailto:gilsonmaque@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0001-5341-8054>

P. M. L. VILELA <sup>a</sup>  
[paulinhamlvilela@gmail.com](mailto:paulinhamlvilela@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-7442-0601>

R. H. FAKURY <sup>a</sup>  
[fakury@dees.ufmg.br](mailto:fakury@dees.ufmg.br)  
<https://orcid.org/0000-0002-1884-5699>

### Abstract

Usually, the analysis of structures under wind loading is performed using an equivalent static analysis, where the influence of floating response is taken into account by the gust factor. This methodology can be used in case of rigid structures for not presenting a considerable dynamic response. More flexible structures, in particular those lightly damped, may show an important resonant response and their dynamic properties must be considered in the analysis. The aim of this paper is to present a methodology for dynamic analysis of structures under wind loading considering the geometric nonlinearity, the vibration caused by the kinetic energy of wind gusts and the aerodynamic damping due to the relative movement between this structure and the wind. The formulation proposed is applied to a 180-meter-high concrete chimney and the results were compared with those obtained through the recommendation given in the standard ABNT NBR 6123:1988 [2] for the dynamic structural analysis.

**Keywords:** structures subjected to wind loads, nonlinear dynamic analysis, fluid-structure interaction, aerodynamic damping.

### Resumo

Tradicionalmente, estruturas submetidas ao vento são avaliadas através de análises estáticas com carregamentos equivalentes, onde a influência da resposta flutuante é levada em conta por meio do fator de rajada. Essa metodologia é aplicável a estruturas suficientemente rígidas para não apresentarem resposta dinâmica ponderável [ ]. Estruturas mais flexíveis, em particular aquelas fracamente amortecidas, podem apresentar importante resposta ressonante e devem ter suas propriedades dinâmicas consideradas na análise. O objetivo deste artigo é apresentar uma metodologia para a análise dinâmica de estruturas submetidas ao vento considerando a não-linearidade geométrica, a vibração causada pela energia cinética das rajadas de vento e o amortecimento aerodinâmico devido ao movimento relativo entre a estrutura e o vento. A metodologia proposta é aplicada à estrutura de uma chaminé de concreto com 180 metros de altura, sendo os resultados comparados com os obtidos através das recomendações da norma ABNT NBR 6123:1988 [ ] para a análise dinâmica de estruturas.

**Palavras-chave:** estruturas sujeitas ao vento, análise dinâmica não-linear, interação fluido-estrutura, amortecimento aerodinâmico.

<sup>a</sup> Federal University of Minas Gerais, Structural Engineering Department, Belo Horizonte, MG, Brazil.

## 1. Introdução

A ocorrência de acidentes de estruturas submetidas ao vento, sem que a velocidade de projeto tenha sido atingida, indica que o colapso pode ter sido causado por ações dinâmicas ou erros nas estimativas das forças de vento. Mas quando é necessário considerar os efeitos dinâmicos do vento? Naturalmente não é possível apresentar uma resposta simples para o problema. Um modo de resolver essa dúvida seria simplesmente calcular os esforços devido ao vento com e sem a consideração dos efeitos dinâmicos, a fim de verificar a diferença entre as respostas. Uma vez indicada a diferença tolerável, o engenheiro poderá definir a metodologia de cálculo a ser empregada a cada tipologia estrutural.

A questão proposta significa verificar se uma estrutura pode ser considerada rígida (i.é, efeitos dinâmicos desprezáveis) ou flexível (i.é, os efeitos dinâmicos não devem ser desprezados). (Hirsch e Bachmann [3]) sugerem que uma estrutura submetida ao vento é definida como rígida se a resposta dinâmica aos efeitos de rajada ou turbulência não excede em até 10% da resposta estática. Os sistemas estruturais submetidos a forças de vento apresentam-se com variadas formas e comportamentos, por exemplo: cabos, edifícios baixos e altos, chaminés, torres, pontes, entre outros. Sendo assim, é uma tarefa complexa definir parâmetros para a avaliação da necessidade de realização de análises dinâmicas no projeto dos mais diversos tipos de estrutura. Diversos pesquisadores desenvolveram estudos envolvendo análises dinâmicas em diferentes tipologias de estruturas. Por exemplo, (Caracoglia et al. [4]) e (Bobby et al. [5]) avaliaram prédios esbeltos, (Ambrosini et al. [6]), (Belloli et al. [7]) e (John et al. [8]) avaliaram chaminés, (Tamura et al. [9]), (Henriques et al. [10]) e (Koss et al. [11]) avaliaram torres e mastros, (Ke et al. [12]) avaliaram torres de resfriamento e (Yang et al. [13]) estudaram o comportamento de torres de transmissão submetidas ao vento. (Franco [14]) desenvolveu um procedimento denominado por ele de método do “vento sintético” para o cálculo das rajadas, atuantes na posição do centro de rajada da estrutura, posição essa determinada de maneira determinística.

Admitindo que a velocidade média do vento mantém-se constante em um intervalo representativo de tempo, pode-se dizer que os efeitos sobre a estrutura são puramente estáticos (resposta média). Já as flutuações da velocidade podem produzir, em estruturas muito flexíveis, oscilações importantes na direção da velocidade média (resposta ressonante).

Na prática comum de projeto, estruturas submetidas ao vento são avaliadas através de análises estáticas com carregamentos equivalentes, onde a influência da resposta ressonante é levada em conta por meio do fator de resposta às rajadas, proposto por Davenport [15]. Essa metodologia é aplicável a estruturas com frequências naturais superiores a 2,0 hertz, suficientemente rígidas para não apresentarem resposta ressonante ponderável [1]. Estruturas com frequências inferiores a esse limite, em particular aquelas fracamente amortecidas, podem apresentar importante resposta ressonante e devem ter suas propriedades dinâmicas consideradas na análise estrutural. A norma brasileira ABNT NBR 6123:1988 [2] contempla o método do fator de rajada e,

para edifícios e chaminés com período natural da estrutura igual ou superior a 1 segundo, dois modelos para a análise dinâmica, a saber: o modelo contínuo simplificado, para edificações com seção constante e distribuição uniforme de massa; o modelo discreto, para edificações com propriedades variáveis. Para a avaliação dinâmica de outras tipologias estruturais não existem procedimentos ou diretrizes presentes nesta norma.

Este artigo tem por objetivo apresentar a uma metodologia para a avaliação dos efeitos dinâmicos causados pela energia cinética das rajadas de vento (turbulência atmosférica), considerando a interação entre o fluido e a estrutura e a não linearidade geométrica. Na avaliação das vibrações causadas pelo vento é de extrema importância a consideração dessa interação, ou seja, do amortecimento aerodinâmico, principalmente nos casos de estruturas que desenvolvem velocidades elevadas quando excitadas pelo vento [16] [17] ou apresentem mudança substancial de sua forma ou orientação durante a atuação das forças. A metodologia proposta limita-se a considerar a influência do amortecimento aerodinâmico devido ao movimento relativo entre a estrutura e o vento, ambos atuantes na mesma direção, não sendo considerados casos de vibração causados por vórtices de von Kármán, galope, martelamento e por drapejamento.

O carregamento do vento é determinado através de métodos estatísticos, sendo as flutuações da velocidade representadas por um processo aleatório estacionário e ergódico. Como o procedimento proposto é baseado no cálculo instantâneo das velocidades, deve ser realizada uma análise no domínio do tempo, permitindo o cálculo das forças dinâmicas do vento a cada incremento de tempo.

## 2. Metodologia desenvolvida

Com o intuito de avaliar a vibração causada pela energia cinética das rajadas de vento em estruturas, foi elaborado um procedimento numérico para a análise dinâmica com forças de vento variáveis no tempo e no espaço. Sobreposto ao amortecimento estrutural foi considerado o amortecimento aerodinâmico diretamente na determinação das pressões dinâmicas do vento, por meio da utilização de velocidades relativas entre a estrutura e o vento. A não linearidade geométrica também teve sua influência avaliada no comportamento da estrutura.

A velocidade do vento pode ser expressa como uma função temporal composta por uma componente média e outra flutuante. No procedimento proposto, a parcela média é obtida a partir das isotopletas sugeridas pela norma ABNT NBR 6123:1988 [2] e a parcela flutuante é determinada por meio de parâmetros estatísticos, tais como: distribuição de probabilidade, espectro de potência e funções de correlação cruzada.

O procedimento proposto é aplicado à estrutura de uma chaminé de concreto com 180 metros de altura, sendo os resultados obtidos comparados com os apresentados no exemplo da norma ABNT NBR 6123:1988 [2] para a análise dinâmica com o modelo discreto. Por fim, com o objetivo de evidenciar algumas características do comportamento de chaminés de concreto com altura elevada sujeitas ao vento, uma estrutura de uma chaminé hipotética mais flexível foi avaliada.

### 3. Procedimento numérico proposto para a análise dinâmica

#### 3.1 Descrição geral

A análise dinâmica da estrutura submetida ao vento envolve as seguintes etapas [17]:

- 1ª Etapa: As forças gravitacionais são aplicadas gradualmente, sendo a configuração deformada da estrutura obtida a partir de uma análise não linear estática (os efeitos dinâmicos são desativados nessa etapa de carregamento no programa computacional utilizado).
- 2ª Etapa: As forças aerodinâmicas correspondentes à parcela média da velocidade do vento são aplicadas à estrutura como forças nodais. A análise já é dinâmica nessa etapa, o que implica em alguns cuidados. As forças devem ser introduzidas lentamente, em pequenos incrementos, de forma que as velocidades assumidas pela estrutura nessa etapa não sejam expressivas e, portanto, não interfiram nos resultados da etapa seguinte de carregamento.
- 3ª Etapa: As forças de vento, compostas pela parcela média e pela parcela flutuante, são incluídas, como uma função arbitrária do tempo, para cada nó do modelo computacional. É processada, então, a análise dinâmica em regime transiente.

O procedimento em questão foi implementado no programa comercial ANSYS® [18], na linguagem de programação ANSYS Parametric Design Language (APDL).

#### 3.2 Amortecimento Aerodinâmico

A formulação para o amortecimento aerodinâmico proposta neste trabalho é considerada diretamente no cálculo das pressões de vento, com a utilização das velocidades relativas entre a estrutura e o vento, ambas na mesma direção.

A formulação básica para o cálculo das pressões de vento e da velocidade relativa é apresentada nas equações a seguir:

$$q_{\text{wind}} = \frac{1}{2} \rho V_R^2 = 0,613 V_R^2 \quad (3.1)$$

$$V_R = (V(t) - V_{\text{str}}) \quad (3.2)$$

$$V(t) = \bar{V}(z) + v(t) \quad (3.3)$$

$$\bar{V}(z) = \bar{V}_{10}(z/10)^p \quad (3.4)$$

onde:

$q_{\text{vento}}$  é a pressão dinâmica do vento;

$\rho$  é a massa específica do ar em condições normais de pressão (101320 Pa) e de temperatura (15° C);

$V_R$  é a velocidade relativa entre o vento e a estrutura, no ponto considerado;

$V(t)$  é velocidade do vento na direção longitudinal;

$V_{\text{estr}}$  é velocidade da estrutura, na direção do vento, no ponto considerado;

$v(t)$  é a componente flutuante da velocidade do vento na direção longitudinal;

$\bar{V}(z)$  é a componente média da velocidade longitudinal de projeto, em 10 minutos;

$\bar{V}_{10}$  é a velocidade média de projeto a 10 metros de altura, com média em 10 minutos;

$z$  é a altura em relação ao solo do ponto em estudo, em m;

$p$  é o coeficiente exponencial relativo à rugosidade do terreno e intervalo de tempo.

A Equação 3.1 apresenta a formulação clássica para o cálculo da pressão dinâmica do vento, presente na norma ABNT NBR 6123:1988 [2], com a modificação da velocidade de referência adotada. Na versão clássica da expressão, utiliza-se a velocidade do vento, enquanto que no procedimento proposto considera-se a velocidade relativa entre o vento e a estrutura. Na maioria dos casos práticos, a velocidade desenvolvida pela estrutura excitada pelo vento é baixa ou nula, o que não altera os valores da pressão dinâmica. Porém, para estruturas mais esbeltas, as velocidades podem apresentar valores consideráveis e impactar consideravelmente nos valores da pressão dinâmica.

É importante salientar que a formulação ora proposta para o amortecimento aerodinâmico é válida para os casos em que o movimento da estrutura ocorre na mesma direção da velocidade do vento, com forças resultantes nessa direção. Assim, a Equação 3.2 representa a soma vetorial da velocidade longitudinal do vento e da velocidade assumida pela estrutura, na direção do vento. A pressão dinâmica do vento (Eq. 3.1) é o produto de um escalar pela velocidade relativa, tendo assim a mesma direção do vetor velocidade relativa (direção do vento longitudinal).

A Equação 3.3 apresenta a decomposição da velocidade do vento em parcela média e flutuante, presente na norma ABNT NBR 6123:1988 [2]. A parcela média da velocidade do vento é função da altura em relação ao solo e pode ser correlacionada com qualquer velocidade média em outra altura  $z$  através da lei de potência, apresentada na Equação 3.4. Segundo Blessmann [19], a formulação apresentada para a lei de potência apresenta boa concordância com dados experimentais e baseia-se no intercâmbio de quantidade de movimento em uma camada limite atmosférica turbulenta. Na prática, fixa-se uma das alturas em um valor padrão (velocidade a 10 metros de altura, com média em 10 minutos) e determinam-se as velocidades a qualquer altura  $z$ . O coeficiente exponencial é função da rugosidade do terreno e do intervalo de integração da velocidade do vento, tabelado para diversas categorias de terreno e faixas de tempo de integração na norma ABNT NBR 6123:1988 [2].

Utiliza-se em análises dinâmicas a velocidade média com intervalo de integração igual a 10 minutos [2], descrita na equação a seguir:

$$\bar{V}_{10} = 0,69 V_0 S_1 S_3 \quad (3.5)$$

onde:

$V_0$  é a velocidade de rajada, calculada sobre um intervalo de tempo igual a 3 segundos;

$S_1$  é o fator topográfico associado ao relevo, conforme a ABNT NBR 6123:1988 [2];

$S_3$  é o fator estatístico associado à probabilidade de ruína, conforme a norma ABNT NBR 6123:1988 [2].

Alguns estudos, entre eles o de (Nagao et al. [20]), avaliaram a

correlação espacial entre as pressões dinâmicas e mostraram que as correlações para o processo de “flutuação da velocidade longitudinal” não coincidem com as do processo de “flutuação da pressão dinâmica”. Apesar disso, no presente trabalho, assume-se que as pressões atuantes na estrutura são funções diretas da velocidade, conforme modelo clássico de Davenport adotado na norma ABNT NBR 6123:1988 [2], não sendo consideradas funções de densidade espectral e correlação cruzada específicas para a flutuação de pressões.

Como os valores das forças devidas ao vento dependem das velocidades assumidas pela estrutura, o vetor de forças é atualizado a cada incremento de tempo, sendo os novos valores função da velocidade relativa calculada no incremento anterior. A programação dessa rotina foi desenvolvida utilizando o comando *\*vget*, disponível na linguagem de programação *APDL*, e não foi necessária a interrupção da simulação e reinício a cada incremento de tempo e atualização do de forças.

### 3.3 Simulação, no tempo, da componente flutuante da velocidade do vento

Para a realização da análise dinâmica não determinística no domínio do tempo é necessária a geração das funções temporais da parcela flutuante da velocidade longitudinal do vento. Utiliza-se para a geração do sinal aleatório de média igual a zero, a partir de um dado espectro de energia, o método da série de Fourier. Sendo assim, a função  $v(t)$  pode ser obtida conforme a equação a seguir [21]:

$$v(t) = \sqrt{2} \sum_{i=1}^N \sqrt{S^v(f_i)} \Delta f \cos(2\pi f_i t + \theta_i) \tag{3.6}$$

onde:

$S^v(f_i)$  é a função densidade espectral;

$N$  é o número de intervalos  $\Delta f$  de frequências considerado no espectro;

$f_i$  é a frequência  $i$ , em Hz;

$t$  é o tempo, em segundos;

$\Delta f$  é o incremento de frequência, em Hz;

$\theta_i$  é o ângulo de fase aleatório, compreendido entre 0 e  $2\pi$ .

Ao realizar a divisão do espectro deve-se ter o cuidado de incluir nas frequências  $f_i$  as frequências naturais da estrutura, de modo a não subestimar a resposta da estrutura. O modelo ora adotado é bastante dispendioso computacionalmente pois, para cada instante de tempo, é considerada a divisão do espectro e realizado o somatório da equação anterior.

### 3.4 Espectro de potência da componente longitudinal da turbulência

A principal aplicação do espectro de potência é para a determinação da composição, em frequência, de um processo aleatório. Para a definição da função densidade espectral  $S^v$  (*PSDF – Power spectral density functions*), utiliza-se a formulação proposta por Kaimal, apresentada na equação a seguir [1]:

$$\frac{f S^v(z, f)}{u_*^2} = \frac{200 x}{(1 + 50x)^{5/3}} ; x(z, f) = \frac{z f}{V_z} \tag{3.7}$$

onde:

$f$  é a frequência, em Hz;

$u_*$  é a velocidade de fricção ou tangencial, em m/s;

$z$  é a altura em relação ao solo do ponto em estudo, em m.

A velocidade de fricção pode ser descrita como:

$$u_* = \frac{k \bar{V}_z}{\ln(z/z_0)} \tag{3.8}$$

onde:

$k$  é a constante de Kármán, aproximadamente igual a 0,4;

$z_0$  é a medida de rugosidade do terreno.

### 3.5 Características estatísticas da interdependência entre processos aleatórios

Para estruturas com grandes dimensões faz-se necessária a geração de não somente uma série temporal, mas de várias, correlacionadas entre si no espaço.

Considera-se que a distribuição probabilística das velocidades de vento seja uma distribuição normal [22]. Tomando-se dois processos aleatórios  $v_1$  e  $v_2$ , representando, por exemplo, as flutuações de velocidade de vento em dois pontos 1 e 2 de uma estrutura, pode-se medir a sua interdependência pelas funções densidade espectral cruzada e correlação cruzada, apresentadas a seguir:

$$S^{v_1, v_2}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} C^{v_1, v_2}(\tau) e^{-i2\pi f \tau} d\tau \tag{3.9}$$

$$C^{v_1, v_2}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S^v(f) e^{-F} e^{i2\pi f \tau} df \tag{3.10}$$

onde:

$S^{v_1, v_2}(f)$  é a função densidade espectral cruzada para os pontos 1 e 2;

$C^{v_1, v_2}(\tau)$  é a correlação cruzada para os pontos 1 e 2;

$\tau$  é um intervalo de tempo arbitrário.

A função  $F$  é expressa por:

$$F = \frac{f [C_{1x}^2(x_1 - x_2) + C_{1z}^2(z_1 - z_2)]^{1/2}}{V(10)} \tag{3.11}$$

onde:

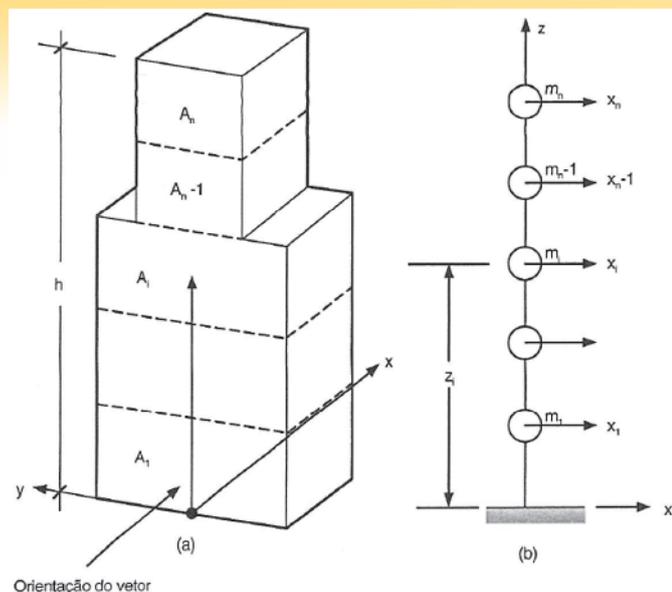
$x_1, x_2, z_1$  e  $z_2$  são as coordenadas horizontais e verticais dos pontos 1 e 2, respectivamente;

$C_{1x}$  e  $C_{1z}$  são os coeficientes de decaimento nas direções horizontal transversal ao vento e vertical.

Ensaio em túnel de vento indicaram que os valores dos coeficientes de decaimento são função de vários fatores, dentre eles a velocidade média, a rugosidade do terreno e a altura acima da superfície. Valores de  $C_{1x} = 16$  e  $C_{1z} = 10$  são utilizados na prática usual de projetos [23]. Considerando duas séries temporais ( $v_1(t)$  e  $v_2(t)$ ) ocorrendo nos pontos 1 e 2 simultaneamente, ou seja  $\tau = 0$ , obtém-se a função de correlação cruzada  $C_1$ :

$$C_1 = C^{v_1, v_2}(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} S^v(f) e^{-F} df \tag{3.12}$$

Calculando o valor de  $C_1$  para diferentes larguras ( $\Delta L = (x_1 - x_2)$  ou  $(z_1 - z_2)$ ) de faixas de atuação, é possível construir um gráfico que relaciona os coeficientes ( $C_1$ ) obtidos com as larguras de faixa ( $\Delta L$ ).



**Figura 1**  
Esquema para modelo dinâmico discreto [1]

A função de autocorrelação dos processos (no mesmo ponto) é dada por:

$$C^v(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S^v(f) e^{i2\pi f\tau} df = \int_{-\infty}^{+\infty} S^v(f) \cos(2\pi f\tau) df \quad (3.13)$$

Conhecendo o valor da função de autocorrelação dos processos, é possível determinar o tempo  $\tau_1$  para o qual a autocorrelação se iguala à correlação cruzada calculada considerando  $\tau$  nulo. Assim, as funções temporais nos pontos 1 e 2, correlacionadas espacialmente, podem ser expressas através de uma mesma série temporal, com defasagem de um intervalo de tempo igual a  $\tau_1$ .

A seguir, uma breve descrição das etapas que devem ser seguidas para obtenção da correlação espacial entre séries temporais vizinhas:

- definição da largura da faixa  $\Delta L$  entre os pontos de análise das séries temporais;
- determinação do valor da correlação cruzada  $C_{12}$ ;
- determinação do intervalo de tempo  $\tau_1$ ;
- geração das séries temporais conforme o subitem 3.3, defasadas entre si de um intervalo de tempo igual a  $\tau_1$ .

## 4. Procedimento da NBR 6123 para análise dinâmica

### 4.1 Descrição geral

A norma de cálculo de forças devidas ao vento, ABNT NBR 6123:1988

**Tabela 1**  
Características da chaminé, conforme a ABNT NBR 6123:1988 [2]

z (m)	Diâmetro externo (m)	Espessura da parede (m)	Massa (kg/m)	Momento de inércia (m <sup>4</sup> )
180	4,75	0,17	9400	6,4
130	5,9	0,17	10900	12,6
80	7,42	0,25	17400	36,2
35	8,82	0,6	38700	131,6
0	9,86	0,6	43600	187,9

[2], apresenta duas metodologias para o cálculo de estruturas submetidas a efeitos dinâmicos devidos à turbulência atmosférica, a saber:

- Modelo contínuo simplificado: recomendado para uma edificação com seção constante e distribuição uniforme de massa;
- Método discreto: recomendado para casos gerais de edificações, onde existem propriedades variáveis com a altura.

No presente trabalho emprega-se o modelo discreto para a análise de uma chaminé de concreto (exemplo presente no anexo I.2 desta norma), devido ao fato desta estrutura apresentar propriedades variáveis com a altura.

### 4.2 Formulação básica – modelo discreto

O modelo discreto pode ser representado conforme a Figura 1, onde:

- $x_i$  é o deslocamento correspondente à coordenada  $i$ ;
- $A_i$  é a área de influência correspondente à coordenada  $i$ ;
- $m_i$  é a massa discreta correspondente à coordenada  $i$ ;
- $z_i$  é a altura do elemento  $i$  sobre o nível do terreno;
- $n$  é o número de graus de liberdade ( $i = 1, 2, \dots, n$ ).

Uma vez estabelecida a discretização da estrutura devem ser determinados, através da teoria de vibrações, as frequências naturais  $f_j$  e a forma modal  $\bar{x}_j$  correspondente ao modo  $j$ , para  $j = 1, 2, \dots, r$ , sendo  $r < n$ , e  $n$  o número de modos retidos na solução. Conforme as prescrições da norma brasileira ABNT NBR 6123:1988 [2], para edificações com altura inferior a 150 metros, a retenção só do primeiro modo de vibração na solução é suficiente, conduzindo a erros máximos de 10%. Tal recomendação está relacionada ao fato de que edificações com seção constante e distribuição de massa aproximadamente uniforme apresentam resposta ressonante preponderante no primeiro modo de vibração. No caso de edificações muito esbeltas e/ou com rigidez fortemente variável, devem ser computadas sucessivamente as contribuições dos modos 1, 2, etc., até que as forças equivalentes ao último modo calculado sejam desprezáveis.

Para cada modo de vibração  $j$ , a força total  $F_j$  devida ao vento na direção da coordenada  $x$  é dada por:

$$F_j = \sum_{i=1}^n F_{ij} = \sum_{i=1}^n \bar{F}_i + \hat{F}_i \quad (3.14)$$

na qual a força média  $\bar{F}_i$  é igual a:

$$\bar{F}_i = \bar{q}_0 b^2 C_{ai} A_i (z_i/z_{ref})^{2p} \quad (3.15)$$

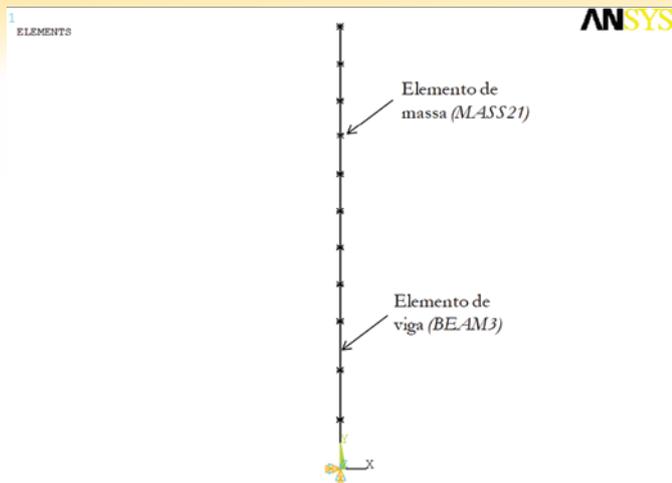
sendo:

$C_{ai}$  é o coeficiente de arrasto correspondente à coordenada  $i$ ;

**Tabela 2**

Propriedades e discretização da estrutura, conforme a ABNT NBR 6123:1988 [2]

$z_i$ (m)	$x_i$	$m_i$ (kg)	$A_i$ (m <sup>2</sup> )	$C_{ai}$
20	1	1254	282,5	0,6
40	0,83	750	173,2	0,6
60	0,68	463,8	141,4	0,6
75	0,56	292,5	114	0,6
90	0,46	232,5	107,2	0,6
105	0,36	195	99,9	0,6
120	0,28	174,4	93	0,6
135	0,2	163,1	86,9	0,6
150	0,14	153,7	81,6	0,6
165	0,07	146,2	76,4	0,6
180	0,03	70,9	36,3	0,6



**Figura 2**  
Modelo numérico desenvolvido no Ansys®

$z_{ref}$  é a altura de referência, tomada igual a 10 metros;  
 $b$  e  $p$  são coeficientes dependentes do tipo do terreno, indicados pela ABNT NBR 6123:1988 [2];  
 $C_{ai}$  são os coeficientes de arrasto correspondentes à coordenada  $x$ .  
 A pressão média é dada por:

$$\bar{q}_0 = 0,613 (\bar{V}_p)^2 \quad (\bar{q}_0 \text{ in } N/m^2 \text{ e } \bar{V}_p \text{ in } m/s) \tag{3.16}$$

onde  $\bar{V}_p$  é a velocidade de projeto.  
 A componente flutuante  $\hat{F}_i$  é dada por:

$$\hat{F}_i = F_H \psi_i x_i \tag{3.17}$$

sendo:

$$\psi_i = m_i / m_0 \tag{3.18}$$

$$F_H = \bar{q}_0 b^2 A_0 \frac{\sum_{i=1}^N \beta_i x_i}{\sum_{i=1}^N \psi_i x_i^2} \xi \tag{3.19}$$

$$\beta_i = C_{ai} (A_i / A_0) (z_i / z_{ref})^p \tag{3.20}$$

Nas equações anteriores,  $m_0$  e  $A_0$  denotam valores arbitrários de referência de massa e de área, respectivamente;  $\xi$  é o coeficiente de amplificação dinâmica, proposto para as cinco categorias de terreno;  $\zeta$  é a razão de amortecimento crítico, proposto para diversos tipos de estruturas na ABNT NBR 6123:1988 [2].

**Tabela 3**  
Frequências naturais da estrutura da chaminé

Modo	Frequência natural [Hz]	Descrição
1°	0,257	Primeiro modo de flexão
2°	0,909	Segundo modo de flexão
3°	2,163	Terceiro modo de flexão
4°	3,834	Quarto modo de flexão
5°	6,319	Quinto modo de flexão
6°	10,567	Sexto modo de flexão
7°	16,188	Sétimo modo de flexão

### 5. Descrição da estrutura da chaminé de concreto

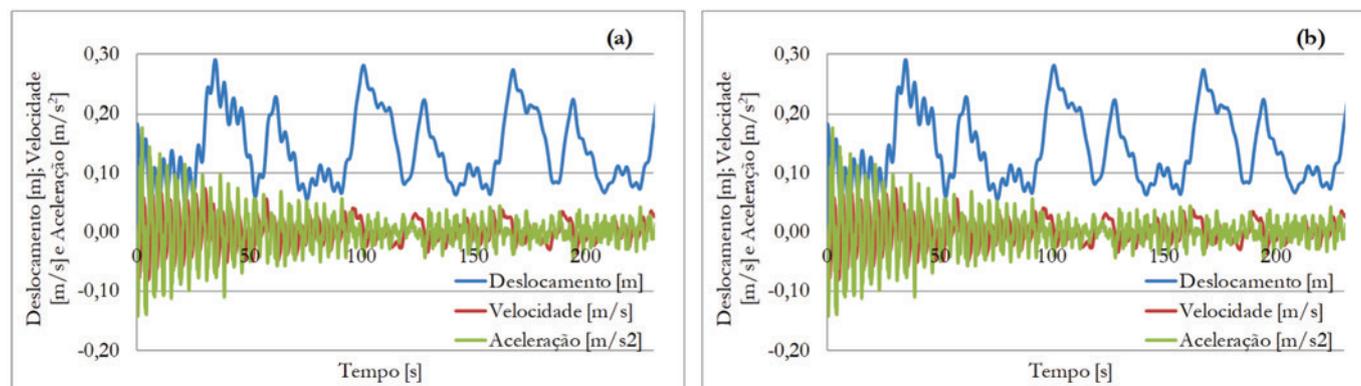
A estrutura da chaminé avaliada no presente trabalho é a apresentada no exemplo do Anexo I da norma ABNT NBR 6123:1988 [2]. As tabelas 1 e 2 apresentam as características da chaminé e as propriedades do modelo adotado.

O módulo de elasticidade considerado para o concreto foi de 26,22 GPa e coeficiente de Poisson igual a 0,2. O terreno foi considerado do Tipo III e a razão de amortecimento crítico igual a  $\zeta = 0,01$  (amortecimento intrínseco do material estrutural concreto armado). Os fatores  $S_1$  e  $S_3$  foram tomados como iguais a 1,0 e a velocidade  $V_0$  igual a 39,4 m/s.

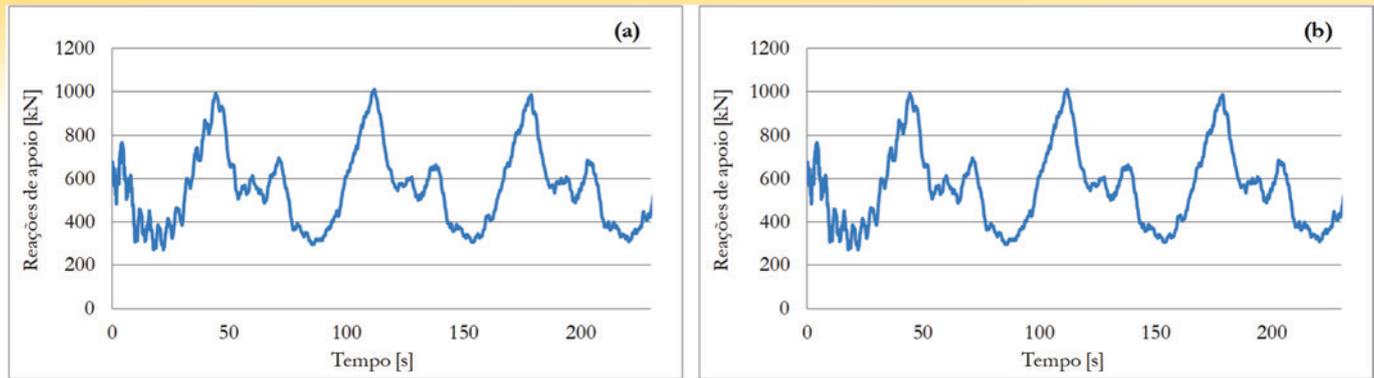
Os detalhes da aplicação do procedimento para o modelo discreto conforme a ABNT NBR 6123:1988 [2] à estrutura da chaminé podem ser obtidos no Anexo I dessa norma. Já o detalhamento do modelo numérico desenvolvido e a aplicação do procedimento proposto serão apresentados a seguir.

### 6. Descrição do modelo numérico e aplicação do procedimento proposto

Para a aplicação do procedimento proposto à estrutura da chaminé foi elaborado um modelo em elementos finitos utilizando elementos de viga (BEAM3). As massas foram consideradas concentradas nos nós do modelo numérico, através de elementos MASS21. As propriedades geométricas bem como a distribuição de massa foram modeladas conforme apresentado nas Tabelas 1 e 2. A base da estrutura teve as translações e rotação impedidas (engaste) e as forças de vento foram aplicadas no sentido do eixo X positivo. A Figura 2 apresenta o modelo desenvolvido com os eixos coordenados considerados.



**Figura 3**  
Séries temporais dos deslocamentos, velocidades e acelerações com (a) e sem (b) a consideração da não linearidade geométrica



**Figura 4**  
Séries temporais da reação de apoio na direção da velocidade do vento com (a) e sem (b) a consideração da não linearidade geométrica

**Tabela 4**  
Valores máximos de deslocamento, velocidade, aceleração e reação de apoio com e sem a consideração da não linearidade geométrica

	Com linearidade geométrica	Sem linearidade geométrica	Diferença [%]
Deslocamento [m]	0,2936	0,2918	0,60
Velocidade [m/s]	0,0840	0,0809	3,70
Aceleração [m/s <sup>2</sup> ]	0,1784	0,1763	1,17
Reação de apoio $F_x$ [kN]	1011,7	1008,5	0,31
Momento no apoio $M_z$ [kN.m]	79315,0	78092,8	1,54

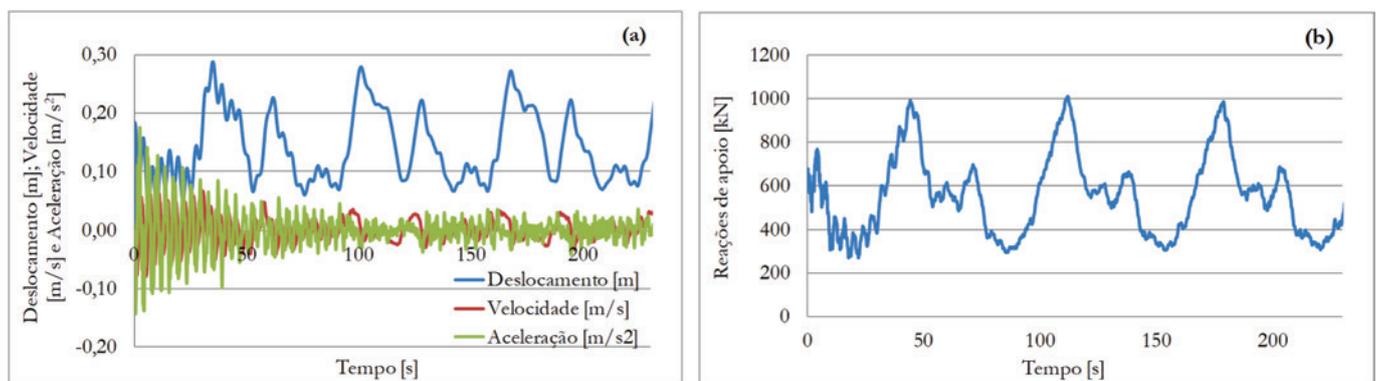
A rotina do procedimento foi concebida inicialmente considerando a velocidade média constante para todos os nós do modelo numérico, considerando que esses se encontram na mesma altura. Porém, no problema em análise, a velocidade varia consideravelmente ao longo de toda a altura da estrutura. Sendo assim, foi realizada uma média ponderada do produto entre as pressões e áreas de cada nó, com intuito de determinar um valor de velocidade média a ser utilizado no procedimento proposto. A velocidade média adotada na análise, proveniente da média ponderada, foi igual a 33,45 m/s. Obviamente,

a rotina desenvolvida para altura constante pode ser generalizada para  $z$  variável, o que será objeto de um próximo trabalho. O intervalo calculado de tempo  $\tau_i$ , utilizado na defasagem das séries temporais entre os nós, foi igual a 1,77 segundos. O incremento de tempo ("timestep") utilizado na solução foi igual a 0,1 segundos.

A razão de amortecimento crítico igual a  $\zeta = 0,01$  resultou em coeficientes multiplicativos das matrizes de massa e rigidez,  $\alpha$  e  $\beta$ , iguais a 0,032 e 0,00021, respectivamente.

**Tabela 5**  
Valores máximos de deslocamento, velocidade, aceleração e reação de apoio com e sem a consideração do amortecimento aerodinâmico (não linearidade geométrica incluída)

	Com amortecimento aerodinâmico	Sem amortecimento aerodinâmico	Diferença [%]
Deslocamento [m]	0,2899	0,2936	1,28
Velocidade [m/s]	0,0822	0,0840	2,24
Aceleração [m/s <sup>2</sup> ]	0,1767	0,1784	0,95
Reação de apoio $F_x$ [kN]	1008,9	1011,7	0,27
Momento no apoio $M_z$ [kN.m]	78338,5	79315,0	1,24



**Figura 5**  
(a) Séries temporais dos deslocamentos, velocidades, acelerações (a) e reações de apoio (b) com a consideração do amortecimento aerodinâmico e da não linearidade geométrica

**Tabela 6**

Comparação das reações máximas entre as metodologias avaliadas

ABNT NBR 6123:1988 [kN]	Procedimento proposto [kN]	Diferença [%]
180	4,75	0,17

## 7. Resultados

### 7.1 Análise modal da estrutura da chaminé

Através do modelo numérico desenvolvido foram determinadas as primeiras frequências naturais da estrutura da chaminé, apresentadas na Tabela 3.

O valor encontrado para a primeira frequência natural foi próximo ao valor determinado através da formulação aproximada presente na norma ABNT NBR 6123:1988 [2], onde a primeira frequência natural é dada por  $f_1 = 1/(0,02 \times h) = 0,28$  Hz, sendo h a altura da chaminé em metros.

### 7.2 Análise dinâmica da estrutura da chaminé e comparação com os resultados da ABNT NBR 6123:1988 [2]

Após o desenvolvimento da análise dinâmica, foi possível obter as séries temporais dos deslocamentos, velocidades e acelerações

do nó do topo da chaminé, e as reações de apoio do nó da base da estrutura, apresentadas nas Figuras 3 e 4, respectivamente. A Tabela 4 apresenta os máximos para cada uma destas séries temporais. Os valores apresentados foram obtidos com e sem a consideração da não linearidade geométrica, sendo ambos os casos sem a consideração do amortecimento aerodinâmico.

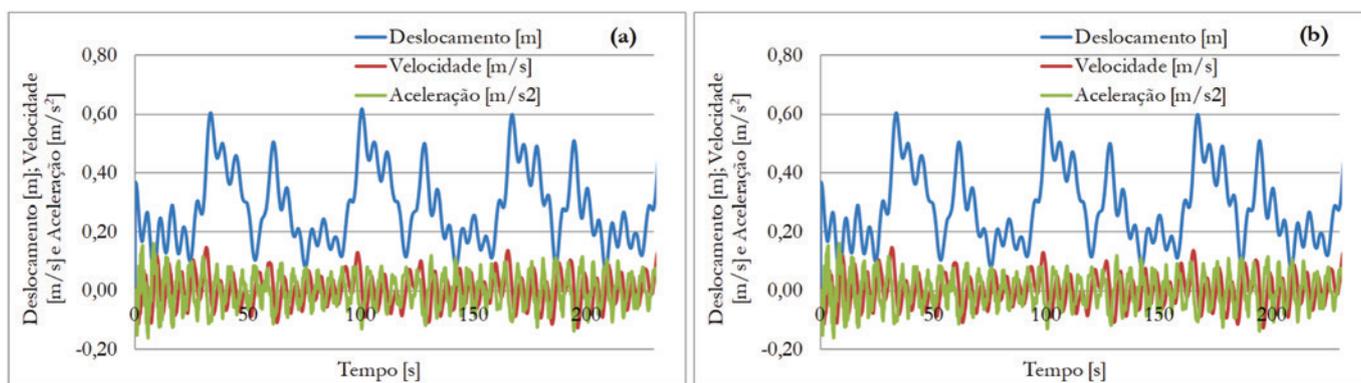
Os valores iniciais das respostas foram desprezados devido ao fato de estarem compreendidos no período transiente de introdução das forças correspondentes à parcela média da velocidade do vento.

Comparando as séries temporais e os valores máximos é possível concluir que a consideração da não linearidade geométrica na análise dinâmica da chaminé em estudo não influenciou significativamente nos resultados, sendo a diferença percentual máxima

**Tabela 7**

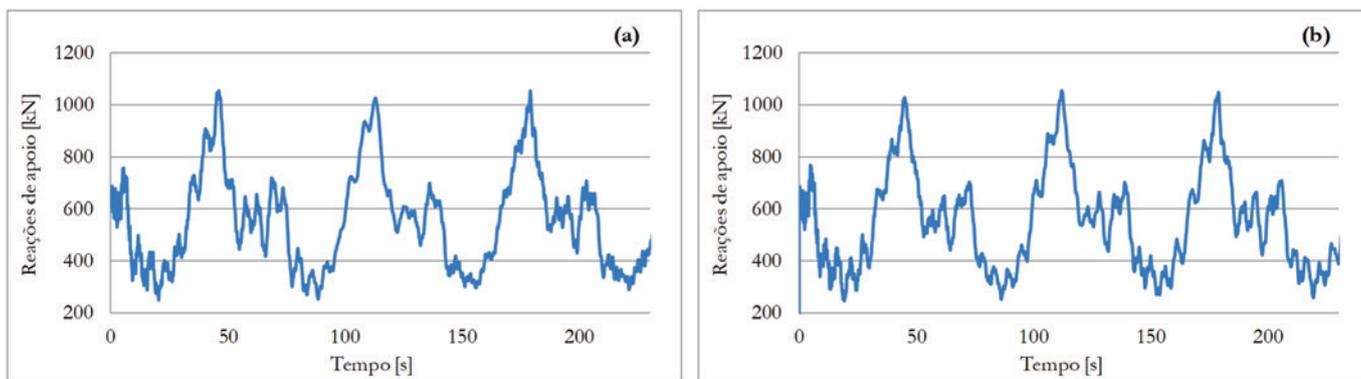
Frequências naturais da estrutura da chaminé com inércia reduzida

Modo	Frequência natural [Hz]	Descrição
1°	0,182	Primeiro modo de flexão
2°	0,643	Segundo modo de flexão
3°	1,529	Terceiro modo de flexão
4°	2,711	Quarto modo de flexão
5°	4,468	Quinto modo de flexão
6°	7,472	Sexto modo de flexão
7°	11,447	Sétimo modo de flexão



**Figura 6**

Séries temporais dos deslocamentos, velocidades e acelerações com (a) e sem (b) a consideração da não linearidade geométrica para a chaminé com inércia reduzida



**Figura 7**

Séries temporais das reações de apoio na direção da velocidade do vento com (a) e sem (b) a consideração da não linearidade geométrica para a chaminé com inércia reduzida

**Tabela 8**

Valores máximos de deslocamento, velocidade, aceleração e reação de apoio com e sem a consideração da não linearidade geométrica para a chaminé com inércia reduzida

	Com linearidade geométrica	Sem linearidade geométrica	Diferença [%]
Deslocamento [m]	0,6784	0,6179	8,92
Velocidade [m/s]	0,1419	0,1464	3,21
Aceleração [m/s <sup>2</sup> ]	0,1646	0,1629	1,04
Reação de apoio F <sub>x</sub> [kN]	1057,1	1055,8	0,11
Momento no apoio M <sub>z</sub> [kN.m]	84506,8	79615,3	5,79

inferior a 4%. Isso se deve principalmente a pequena deslocabilidade da estrutura.

A Figura 5 apresenta as séries temporais dos deslocamentos, velocidades e acelerações do nó do topo da chaminé e as reações de apoio, com a consideração do amortecimento aerodinâmico e do efeito da não linearidade geométrica. A Tabela 5 apresenta os máximos para cada uma destas séries temporais.

Os valores máximos calculados para os deslocamentos, velocidades, acelerações e reações de apoio obtidos com a consideração do amortecimento aerodinâmico apresentaram-se inferiores em até 2,24%, no máximo, aos valores obtidos sem a consideração desse amortecimento. Observa-se que o valor máximo de velocidade do topo da chaminé (0,08 m/s) é muito inferior aos valores adotados para a velocidade do vento. Sendo assim, a consideração do amortecimento aerodinâmico reduz os valores máximos obtidos, mas não é relevante no comportamento da estrutura em análise.

A Tabela 6 apresenta os valores máximos das reações de apoio (F<sub>x</sub>) obtidos através do procedimento presente na ABNT NBR 6123:1988 [2] e da metodologia proposta, considerando o efeito da não linearidade geométrica e o amortecimento aerodinâmico. Diante da diferença observada na comparação das respostas considera-se o resultado obtido com o procedimento proposto aceitável, tendo em vista que o resultado obtido através do procedimento da norma ABNT NBR 6123:1988 [2] é simplificado e foi determinado com a consideração somente do primeiro modo da estrutura. A

diferença apresenta a mesma ordem de grandeza do valor de erro esperado para esta simplificação, indicado na norma ABNT NBR 6123:1988 [2] e confirmado por Blessmann [1], igual a 10%.

É importante salientar que as diferenças encontradas (12,5%) não se devem ao fato da consideração da não linearidade geométrica e do amortecimento aerodinâmico, uma vez que a estrutura apresentou respostas semelhantes sem essas considerações.

A fim de verificar com mais detalhes a influência da não linearidade geométrica e do amortecimento aerodinâmico em estruturas de chaminés altas, propõe-se a avaliação de uma chaminé hipotética, com menor rigidez, cujos resultados encontram-se no item a seguir.

### 7.3 Análise dinâmica da estrutura da chaminé com inércia reduzida

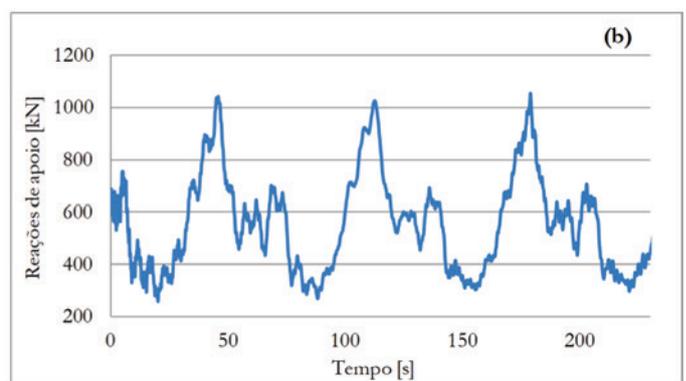
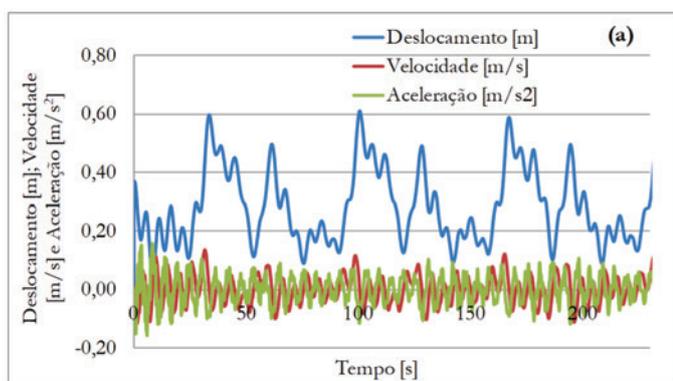
A fim de avaliar a relação dos resultados obtidos anteriormente com a rigidez da estrutura, foi analisado o comportamento dinâmico de uma chaminé hipotética com as mesmas propriedades da chaminé avaliada anteriormente, porém com a inércia reduzida pela metade. Os demais parâmetros e o carregamento do vento foram mantidos inalterados. A Tabela 6 apresenta as primeiras frequências naturais obtidas para a estrutura da chaminé com inércia reduzida.

As séries temporais dos deslocamentos, velocidades e acelerações do nó do topo da chaminé e as reações de apoio são

**Tabela 9**

Valores máximos de deslocamento, velocidade, aceleração e reação de apoio com e sem a consideração do amortecimento aerodinâmico para a chaminé com inércia reduzida (não linearidade geométrica incluída)

	Com amortecimento aerodinâmico	Sem amortecimento aerodinâmico	Diferença [%]
Deslocamento [m]	0,6679	0,6784	1,57
Velocidade [m/s]	0,1324	0,1419	7,17
Aceleração [m/s <sup>2</sup> ]	0,1649	0,1646	0,19
Reação de apoio F <sub>x</sub> [kN]	1053,3	1057,1	0,36
Momento no apoio M <sub>z</sub> [kN.m]	83458,5	84506,8	1,25



**Figura 8**

(a) Séries temporais dos deslocamentos, velocidades, acelerações (a) e reações de apoio (b) com amortecimento aerodinâmico e não linearidade geométrica para a chaminé com inércia reduzida

apresentadas nas Figuras 6 e 7, respectivamente. A Tabela 8 apresenta os máximos para cada uma destas séries temporais. Os valores apresentados foram obtidos com e sem a consideração da não linearidade geométrica, sendo ambos os casos sem a consideração do amortecimento aerodinâmico.

A consideração da não linearidade geométrica na estrutura da chaminé com inércia reduzida resultou no aumento dos deslocamentos e reações de apoio máximas de 9% e 6%, respectivamente.

A Figura 8 apresenta as séries temporais dos deslocamentos, velocidades e acelerações do nó do topo da chaminé e as reações de apoio, com a consideração do amortecimento aerodinâmico e da não linearidade geométrica. A Tabela 9 apresenta os máximos para cada uma das séries temporais.

Novamente, os valores máximos obtidos com a consideração do amortecimento aerodinâmico apresentaram-se inferiores aos obtidos sem a consideração desse amortecimento. Entretanto, mesmo com o aumento das velocidades assumidas pela estrutura modificada, o efeito do amortecimento aerodinâmico é desprezável e o comportamento global da estrutura não é alterado de forma significativa (1,25% de redução do momento máximo no apoio).

A redução da rigidez da estrutura implicou, em relação aos resultados obtidos para a estrutura original, no aumento de 130% do deslocamento máximo e 61% da velocidade máxima. Para as reações de apoio, o aumento foi de 4,40% da reação horizontal ( $F_x$ ) e 6,50% para o momento na base ( $M_z$ ). Os acréscimos foram decorrentes da consideração da não linearidade geométrica da estrutura, sendo que o amortecimento aerodinâmico não representou influência considerável nos resultados.

## 8. Conclusões

Nesse artigo foi proposto procedimento numérico para a análise do comportamento dinâmico de chaminés de concreto submetidas a forças de vento. A não linearidade geométrica e o amortecimento aerodinâmico tiveram suas influências quantificadas na resposta dinâmica da estrutura. Por fim, os resultados obtidos foram comparados com os determinados a partir do procedimento simplificado para a análise dinâmica de estruturas presente na ABNT NBR 6123:1988 [2].

Para a avaliação da metodologia proposta, foi considerada uma chaminé de concreto com 180 metros de altura, conforme exemplo da norma ABNT NBR 6123:1988 [2]. Para esta estrutura, as considerações da não linearidade geométrica e do amortecimento aerodinâmico não resultaram em alterações significativas da resposta dinâmica, devido à baixa deslocabilidade e aos valores ínfimos de velocidade assumidos pela estrutura.

Os esforços, quando comparados com os obtidos através do procedimento presente na ABNT NBR 6123:1988 [2], apresentaram-se 12,5% superiores. Diante da diferença observada considerase o resultado obtido com o procedimento proposto aceitável, tendo em vista que o procedimento da ABNT NBR 6123:1988 [2] é simplificado e foi determinado com a consideração somente do primeiro modo da estrutura. A diferença apresenta a mesma ordem de grandeza do valor de erro esperado para esta simplificação, indicado na norma ABNT NBR 6123:1988 [2] e confirmado por Blessmann [1], igual a 10%.

A fim de verificar o comportamento da estrutura frente à variação de sua rigidez, foi avaliada uma chaminé hipotética com inércia

igual à metade da inércia da estrutura original. A estrutura com inércia reduzida apresentou aumento dos deslocamentos em relação à estrutura original, devido a sua maior deslocabilidade. Em decorrência disso, os efeitos da não linearidade geométrica evidenciaram-se mais, implicando no aumento das reações na base da estrutura. Assim, para estruturas mais esbeltas, faz-se necessária a consideração das não linearidades geométricas na análise dinâmica.

Mesmo para os valores mais elevados de velocidade observados na estrutura com inércia reduzida, o amortecimento aerodinâmico não implicou em alterações mensuráveis na resposta da estrutura. Tal fato reforça que, para baixas velocidades estruturais, o amortecimento aerodinâmico apresenta-se irrelevante.

## 9. Referências bibliográficas

- [1] Blessmann, J. Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento, 2. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/ UFRGS, 2005.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 6123: Forças devidas ao Vento em Edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- [3] Hirsh, G.; Bachman, H. Wind induced vibrations. *Vibration Problems in Structures*. Zurich: Institut fur Baustatik und Konstruktion/Birkhauser Verlag Basel, 1995.
- [4] Caracoglia, L. A stochastic model for examining along-wind loading uncertainty and intervention costs due to wind-induced damage on tall buildings. *Engineering Structures*, v. 78, p. 121-132, 2014.
- [5] Bobby, S.; Spence, S.M.J.; Bernardini, E. Kareem. A. Performance-based topology optimization for wind-excited tall buildings: A framework. *Engineering Structures*, v. 74, p. 242-255, 2014.
- [6] Ambrosini, R.D.; Riera, J.D. Analysis of structures subjected to random wind loading by simulation in the frequency domain. *Probabilistic Engineering Mechanics*, p. 233-239, 2002.
- [7] Belloli, M.; Rosa, L.; Zasso, A. Wind loads and vortex shedding analysis on the effects of the porosity on a high slender tower. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 126, p. 75-86, 2014.
- [8] John, A.D.; Gairola, A., Ganju, E.; Gupta, A. Design wind loads on reinforced concrete chimney – An experimental case study. *Procedia Engineering*, v. 14, p 1252-1257, 2011.
- [9] Tamura, Y.; Kohsaka, R.; Nakamura, O., Miyashita, K. Modi, V. Wind-induced responses of an airport tower-efficiency of tuned liquid damper. *Journal Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 65:121-31, 1996.
- [10] Henriques, J.; Paiva, F.; Barros, R. Wind action in the tower testing station. *International Conference on Wind Engineering*, Porto Alegre, 2015.
- [11] Koss, H.H.H.; Srouji, R.G. Scaling issues in the determination of wind loads on lattice masts. *International Conference on Wind Engineering*, Porto Alegre, 2015.
- [12] Ke, S.T; Ge, Y.J. The influence of self-excited forces on wind loads and wind effects for super-large cooling towers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 132, p. 125-135, 2014.

- [13] Yang, F.; Yang, J.; Niu, H., Zhang, H. Design wind loads for tubular-angle steel cross-arms of transmission towers under skewed wind loading. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 140, p. 10-18, 2015.
- [14] Franco, M. Direct along-wind dynamic analysis of tall structures. *Boletim técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo BT/PEF/9303*, São Paulo, 1993.
- [15] Davenport, A.G. The prediction of the response of structures to gust wind. *International Research Seminar on Safety of Structures under Dynamic Loading, Trondheim*, v. 1, p. 257-284, 1978.
- [16] Davenport A.G. The response of tension structures to turbulent Wind: the role of aerodynamic damping. *1st International Oleg Kerensky Memorial Conference on Tension Structures*. London, 1988.
- [17] Carvalho, H. Efeitos do vento em linhas de transmissão. 2015. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- [18] ANSYS-12.1. Release 1.0 Documentation for Ansys. Canonburg, United States, 2009.
- [19] Blessmann, J. O vento na engenharia estrutural, 1. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/ UFRGS, 1995.
- [20] Nagao, F. et al. Basic study on spatial correlations of fluctuating lifts acting on plates. *Journal of Wing Engineering*, v. 91, p. 1349-1361, 2003.
- [21] Pfeil, M.S. Battista, R.C. Aerodynamic stability analysis of cable-stayed bridges. *Journal of Structural Engineering*, v. 121, p. 1784-1788, 1995.
- [22] Davenport, A.G. Buffeting of a suspension bridge by stormy winds. *Journal of the Structural Division, ASCE*, v. 88, n. ST3, 1962.
- [23] Simiu, E.; Scanlan, R.H. *Wind Effects on Structures: An Introduction to Wind Engineering*, 2. ed. New York: John Wiley and Sons, 1986.