



## **AVALIAÇÃO DAS FORÇAS DEVIDAS AO VENTO EM CABOS DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO**

### **Evaluation of the wind forces in cables of overhead transmission lines**

Camila Cordeiro de Oliveira (1); Hermes Carvalho (2); Victor Roberto Verga Mendes (1)

(1) Mestranda (o) em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, Brasil.

(2) Dr. Prof., Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, Brasil.  
E-mail para Correspondência: camila.cordeiro.eng@gmail.com; (1) Apresentador

**Resumo:** Em geral, a análise de cabos submetidos à ação do vento é realizada usando uma análise estática equivalente. Entretanto, a ocorrência de inúmeros acidentes com sistemas estruturais compostos por cabos, 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. O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo do comportamento dinâmico de cabos submetidos ao vento, considerando a não linearidade geométrica, decorrente das grandes rotações dos cabos, e o amortecimento aerodinâmico. Para tanto, elaborou-se um modelo em elementos finitos utilizando o programa ANSYS®, sendo a ação do vento modelada através de um processo aleatório a partir das suas propriedades estatísticas. A interação fluido-estrutura (amortecimento aerodinâmico) é considerada através do procedimento proposto por Davenport (1988). A validação do modelo numérico desenvolvido é realizada por meio da comparação com resultados experimentais obtidos em túnel de vento por Loredou-Souza (1996). Por fim, apresenta-se uma comparação das respostas máximas obtidas nas análises dinâmicas com os resultados provenientes de análises estáticas equivalentes, conforme os procedimentos dispostos nas normas ABNT NBR 6123:1988, ABNT NBR 5422:1985 e IEC 60826:2003.

*Palavras chaves:* Análise dinâmica de cabos; cabos sujeitos ao vento; análise estática equivalente.

**Abstract:** In general, the analysis of cables submitted to the wind action is performed using an equivalent static analysis. However the occurrence of numerous accidents structural systems composed of cables without the design speed is reached, indicating that the collapse can be caused by dynamic action or errors in the estimates of wind forces. The objective of this work is to present a study of the dynamic behavior of cables subjected to wind, considering the geometric nonlinearity due to the large rotations of the cables and the aerodynamic damping. For this, a finite element model was developed using the ANSYS® program, the wind action is modeled through a random process from its statistical



properties. The interaction fluid structure (aerodynamic damping) is evaluated through the procedure proposed by Davenport (1988). The validation of the model is performed by comparison with cable experimental results for a wind tunnel tests by Loredou-Souza (1996). Finally, a comparison of the maximum results obtained for the dynamic analysis with the equivalent static analysis according to standards ABNT NBR 6123:1988, ABNT NBR 5422:1985 and IEC 60826:2003 is presented.

**Keywords:** *Dynamic analysis of cables; cables subjected to wind forces; equivalent static analysis.*

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico (informática, telefonia celular, etc.) aliado ao crescimento populacional em todo mundo, foram responsáveis pela ampliação das linhas de transmissão de energia elétrica e, conseqüentemente, pela intensa utilização de torres metálicas treliçadas. Essa demanda proporcionou aos projetistas estruturais uma grande experiência na análise desse tipo de torre. Entretanto, alguns colapsos associados, principalmente, à ação do vento ainda são comuns a essa tipologia estrutural (Oliveira e Silva, 2016).

Por serem essas torres estruturas esbeltas e de baixo peso, o principal agente dentre as ações a serem consideradas no projeto de LT's deve-se à ação do vento, que solicita dinamicamente a estrutura (Holmes, 2015). Além disso, em linhas aéreas com grandes vãos, o elemento estrutural mais afetado pelo vento são os cabos que, por sua vez, aplicam forças no topo das estruturas suporte, gerando solicitações preponderantes nessas estruturas (Carvalho, 2015).

No Brasil, as ações do vento em LT's podem ser determinadas conforme duas normas, à saber: ABNT NBR 5422:1985, que fixa as condições necessárias para o projeto completo de LT's de energia elétrica, e fornece procedimentos específicos para a determinação das forças de vento que atuam em estruturas treliçadas, cadeias de isoladores e cabos condutores, e a ABNT NBR 6123:1988, que fixa as condições exigíveis na consideração das forças estáticas e dinâmicas do vento para dimensionamento de edificações. A NBR 5422 considera somente cargas de vento estáticas equivalentes, admitindo que tais cargas não produzam forças de inércia significativas no sistema. Ao adotar essa simplificação, o movimento dos cabos é ignorado, levando-se em consideração somente as trações estáticas.

No contexto Europeu, a publicação do IEC 60826:2003 – *Design criteria of overhead transmission lines*, apresenta diretrizes para o cálculo das forças de vento em diferentes tipos de sistemas de transmissão de energia elétrica, incluindo estruturas treliçadas. De maneira geral, a norma especifica os carregamentos e as resistências requeridas para LT's, com base em conceitos de confiabilidade estrutural. Atualmente, essa norma é uma referência para embasamento de normas de diversos países.



Vários autores como Carvalho (2015), Stengel et al. (2017), Oliveira e Silva (2016) Carlos e Kaminski (2015) e Aboshosha et al. (2016) se dedicaram ao estudo do comportamento de sistemas estruturais de LT's submetidos os a ação dinâmica do vento. Entretanto, essa tarefa é complexa, em razão do número de variáveis envolvidas e da sua aleatoriedade. Deste modo, é fundamental que se tenham estudos focados neste tema, a fim de contribuir para desenvolvimento de métodos que resultem uma maior aproximação com a realidade.

Considerando que grande parte dos acidentes envolvendo LT's tem ocorrido para velocidades de vento inferiores às máximas recomendadas nas normas de projeto e, na maioria das vezes, sem apresentar ruptura dos cabos elétricos, acredita-se que essa problemática possa estar associada aos efeitos da não linearidade geométrica e ou efeitos dinâmicos devidos à turbulência atmosférica (Carvalho et al., 2016).

Neste contexto, o presente artigo visa investigar o comportamento estrutural de cabos de LT's, submetidos à ação dinâmica não determinística do vento, considerando o amortecimento aerodinâmico e a não linearidade geométrica. A metodologia numérica foi desenvolvida no programa de elementos finitos ANSYS<sup>®</sup>. As respostas máximas obtidas nas análises dinâmicas foram comparadas com os resultados provenientes de análises estáticas equivalentes, conforme os procedimentos dispostos nas normas ABNT NBR 6123:1988, ABNT NBR 5422:1985 e IEC 60826:2003.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Procedimento numérico para a análise dinâmica de cabos

#### 2.1.1 Descrição Geral

Para avaliar os efeitos dinâmicos da ação não determinística do vento em cabos foi desenvolvido um modelo numérico tridimensional de um cabo isolado, no programa comercial ANSYS<sup>®</sup>, na linguagem de design paramétrico ANSYS (APDL).

Na discretização do modelo, utilizou-se o elemento finito de treliça não linear (LINK180). Este elemento possui dois nós, com três graus de liberdade por nó, referentes às translações nas direções do eixo cartesiano ( $U_x$ ,  $U_y$  e  $U_z$ ). Utilizou-se uma malha com 10 elementos ao longo do comprimento do cabo. Suportes fixos foram usados em ambas as extremidades. Além disso, na modelagem dos cabos utilizou-se o *keyoption* 3 igual a 0, o que implica na possibilidade de existirem somente a forças normais de tração nestes elementos.

Para obter as respostas do cabo submetido à ação do vento realizou-se uma análise dinâmica em regime transiente, incluindo os efeitos de grandes gradientes de deslocamentos. Foi imposta uma deformação inicial nos elementos de treliça visando a estabilidade numérica do modelo.

A velocidade do vento foi expressa como uma função do tempo ( $V(t)$ ), composta por uma componente média ( $\bar{V}_z$ ) sobreposta a uma componente flutuante ( $v(t)$ ), conforme a Eq. (1). O valor médio foi obtido de acordo com ABNT NBR 6123:1988 e a velocidade flutuante foi determinada através de parâmetros estatísticos como será descrito no subitem 2.1.3.

$$V(t) = \bar{V}_z + v(t) \tag{1}$$

$$\bar{V}_z = \bar{V}_{10}(z/10)^p \tag{2}$$

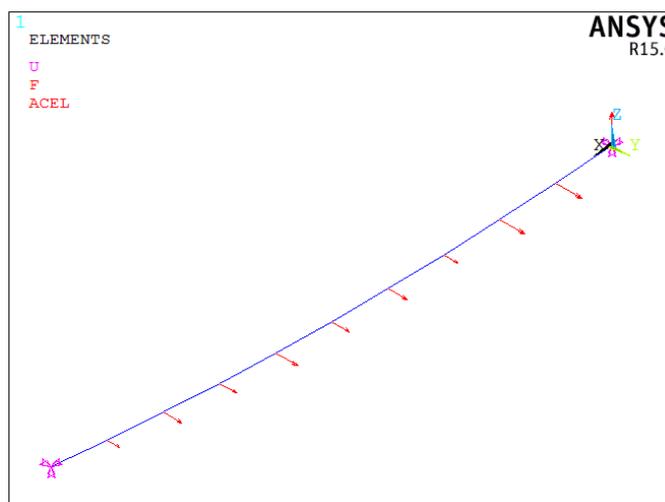
Onde:  $\bar{V}_{10}$  é a velocidade média de projeto a 10 metros de altura, com média em 10 minutos;  $z$  é a altura em relação ao solo do ponto em estudo;  $p$  é o coeficiente exponencial relativo à rugosidade do terreno.

Conhecendo-se os valores da velocidade do vento em função do tempo ( $V(t)$ ) determina-se a força de arrasto  $F(t)$  devida à ação dinâmica do vento sobre cabos conforme a Eq.(3):

$$F(t) = \frac{1}{2} \rho [V(t)]^2 C_D dL \tag{3}$$

Onde  $\rho$  é a massa específica do ar igual a  $1,225 \text{ (kg/m}^3\text{)}$  a temperatura  $15^\circ\text{C}$  e pressão atmosférica de  $101,3 \text{ (kPa)}$  ao nível do mar;  $C_D$  é o coeficiente de arrasto, igual a 1;  $d$  é o diâmetro do cabo;  $L$  é o comprimento do cabo.

A Figura 1 apresenta o modelo desenvolvido e o respectivo sistema de coordenadas utilizado. A força do vento é considerada positiva quanto atua na direção positiva do eixo Y.



**Figura 1. Modelo numérico com as forças do vento atuando na direção do eixo y.**

A análise dinâmica do cabo envolve as seguintes etapas:

**1ª Etapa:** As forças gravitacionais são aplicadas gradualmente, sendo a configuração final dos cabos obtida a partir de uma análise não linear estática (os efeitos dinâmicos são desativados).

**2ª Etapa:** As forças correspondentes à parcela média da velocidade do vento são aplicadas aos cabos como forças nodais. Nesta etapa a análise já é dinâmica, o que implica alguns cuidados. As ações devem ser introduzidas lentamente, de forma que as velocidades assumidas pelo cabo, nessa etapa, não sejam expressivas.

**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 cabo. É processada, então, a análise dinâmica em regime transiente.

## 2.1.2 Amortecimento Aerodinâmico

O amortecimento aerodinâmico é um parâmetro decisivo na avaliação da reposta dinâmica de cabos de LT's. Este pode ser definido como uma força retardadora derivada do movimento relativo entre a estrutura e o ar (Davenport, 1988). De acordo com Loredou-Souza (1996), o movimento de cabos é dominado pelo amortecimento aerodinâmico, sendo que o amortecimento mecânico ( $\zeta_s \approx 0,05\%$ ) é pouco expressivo, principalmente para altas velocidades do vento.

De acordo com Davenport (1988), o cálculo do amortecimento aerodinâmico, no caso de estruturas prismáticas tais como cabos, em escoamento uniforme e movimento na direção do vento (arrasto), pode ser realizado através da Eq. (4):

$$\zeta_{aj} = \left( \frac{C_D}{4\pi} \right) \left( \frac{\rho_a d^2}{m} \right) \left( \frac{V}{f_j d} \right) \quad (4)$$

Onde:  $\zeta_{aj}$  é o amortecimento aerodinâmico do j-ésimo modo;  $C_D$  é o coeficiente de arrasto;  $\rho_a$  é a densidade do ar;  $d$  é o diâmetro do cabo;  $m$  é a massa por unidade de comprimento do cabo;  $V$  é a velocidade do vento;  $f_j$  é a j-ésima frequência natural do cabo em Hz.

O amortecimento aerodinâmico pode ser incorporado na análise transiente através da matriz amortecimento de Rayleigh (C), proporcional a uma combinação linear da matriz de rigidez (K) e da matriz de massa (M), conforme a Eq.(5) (Craig e Kurdila, 2006).

$$C = \alpha M + \beta K \quad (5)$$

A Eq. (5) pode ser reescrita em termos da taxa de amortecimento ( $\zeta_i$ ) e da frequência natural circular ( $\omega_i$ ), associada ao modo de vibração (i), conforme a Eq. (6).

$$\zeta_i = \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha}{\omega_i} + \beta \omega_i \right) \quad (6)$$

Assim, conhecendo-se os valores das frequências naturais da estrutura e o amortecimento aerodinâmico (Eq. (4)), utiliza-se Eq. (6) para determinar o valor dos parâmetros ( $\alpha$ ) e ( $\beta$ ).

### 2.1.3 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 de funções temporais para a parcela flutuante da velocidade longitudinal do vento. O método mais utilizado para a geração de um sinal aleatório de média igual a zero, a partir de um dado espectro de energia, é o da série de Fourier. Sendo assim, o processo  $v(t)$  pode ser gerado segundo a Eq. (7), conforme Pfeil (1993):

$$v(t) = \sqrt{2} \sum_{i=1}^N \sqrt{S^v(f_i) \Delta f} \cos(2\pi f_i t + \theta_i) \quad (7)$$

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 proceder à divisão do espectro, deve-se ter a precaução de incluir nas frequências as frequências naturais da estrutura de modo a não subestimar sua resposta.

### 2.1.4 Espectro de potência 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, utiliza-se a formulação proposta por Kaimal, conforme Blessmann (2005), mostrada na Eq. (8) a seguir:

$$\frac{f S^v(z, f)}{u_*^2} = \frac{200 x}{(1 + 50x)^{5/3}} ; \quad x(z, f) = \frac{z f}{\bar{V}_z} \quad (8)$$

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 de acordo com Eq. (9):

$$u_* = \frac{k \bar{V}_z}{\ln(z/z_0)} \quad (9)$$

Onde  $k$  é a constante de Kármán, aproximadamente igual a 0,4;  $z_0$  é a medida de rugosidade do terreno.

### 2.1.5 Características estatísticas da interdependência entre processos aleatórios

Para estruturas com grandes dimensões, como os cabos de LT's, faz-se necessária a geração de não somente uma série temporal, mas de várias, correlacionadas entre si no espaço. Conforme Davenport (1962) considera-se que a distribuição probabilística das velocidades de vento seja uma distribuição normal. 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 nas seguintes Equações (10) e (11), respectivamente:

$$S^{v_1, v_2}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} C^{v_1, v_2}(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad (10)$$

$$C^{v_1, v_2}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S^v(f) e^{-F} e^{i2\pi f\tau} df \quad (11)$$

Onde  $S^{v_1, v_2}(f)$  é função de densidade espectral cruzada para os pontos 1 e 2;  $C^{v_1, v_2}(\tau)$  é a correlação cruzada;  $\tau$  é um intervalo de tempo arbitrário.

A função  $F$  é expressa de acordo com a Eq.(12).

$$F = \frac{f[C_{1x}^2(x_1 - x_2) + C_{1z}^2(z_1 - z_2)]^{1/2}}{\bar{V}(10)} \quad (12)$$

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 vertical e transversal a direção de atuação do vento .

Os coeficientes de decaimento são função de vários fatores, dentre eles a velocidade média, a rugosidade do terreno e a altura acima da superfície. Simiu e Scanlan (1986) sugerem valores de  $C_{1x} = 16$  e  $C_{1z} = 10$  para a prática usual de projetos.



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  $C_1$  apresentada na Eq.(13):

$$C_1 = C^{v_1, v_2}(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} S^v(f) e^{-F} df \quad (13)$$

O valor da correlação cruzada  $C_1$  pode ser calculado para diferentes larguras de faixas de atuação ( $\Delta L=(x_1-x_2)$  ou  $(z_1-z_2)$ ).

A função de autocorrelação dos processos (no mesmo ponto) é dada pela Eq.(14).

$$C^v(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S^v(f) e^{i2\pi f\tau} df = \int_{-\infty}^{+\infty} S^v(f) \cos(2\pi f\tau) df \quad (14)$$

Conhecendo o valor da função de autocorrelação dos processos, é possível determinar o tempo  $\tau_1$  para o qual a autocorrelação se iguale 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:

- a) definição da largura da faixa  $\Delta L$  das séries temporais;
- b) determinação do valor da correlação cruzada  $C_1$ ;
- c) determinação do intervalo de tempo  $\tau_1$ ;
- d) geração das séries temporais conforme o subitem 2.1.3, defasadas entre si de um intervalo de tempo igual a  $\tau_1$ .

### **3 PRESCRIÇÕES NORMATIVAS PARA A DETERMINAÇÃO DAS FORÇAS DE VENTO**

#### **3.1 ABNT NBR 6123:1988**

Segundo a ABNT NBR 6123:1988 a força de arrasto  $F_a$  devida à incidência do vento em cabos pode ser determinada através da Eq. (15):

$$F_a = C_a q_0 L d \quad (15)$$

Onde  $C_a$  é o coeficiente de arrasto determinado em função do número de Reynolds;  $d$  é o diâmetro do cabo;  $L$  é o comprimento do cabo.

A pressão dinâmica do vento  $q_0$ , correspondente à velocidade característica  $V_k$ , é dada pela Eq. (16):

$$q_0 = \frac{1}{2} \rho V_k^2 = 0,613 V_k^2 \quad (16)$$

Onde  $\rho$  é a massa específica do ar em condições normais de pressão (101,3 kPa) e temperatura (15° C);  $V_k$  é velocidade característica do vento calculada de acordo com item 4.2(b) da ABNT NBR 6123:1988.

### 3.2 ABNT NBR 5422:1985

Segundo a ABNT NBR 5422:1985, as cargas de vento sobre os cabos, aplicadas perpendicularmente ao cabo no seu ponto de fixação em cada suporte, são dadas pela Eq. (17).

$$A_c = q_0 C_{XC} \alpha d \frac{z}{2} \text{sen}^2 \theta \quad (17)$$

$C_{XC}$  é o coeficiente de arrasto, igual a 1;  $\alpha$  é o fator de efetividade que varia conforme o comprimento do vão;  $d$  é o diâmetro do condutor;  $z$  é o comprimento da vão considerado;  $\theta$  é o ângulo de incidência do vento ( $< 90^\circ$ ) em relação a direção do vento.

A pressão dinâmica de referência  $q_0$  é definida conforme a Eq. (18).

$$q_0 = \frac{1}{2} \rho V_p^2 \quad (18)$$

O valor da massa específica do ar ( $\rho$ ) é dado conforme a Eq. (19).

$$\rho = \frac{1,293}{1 + 0,00367T} \left( \frac{16000 + 64T - ALT}{16000 + 64T + ALT} \right) \quad (19)$$

Onde  $T$  é a temperatura (°C);  $ALT$  é a altitude média da região de implantação da linha de transmissão (m). Para este estudo adotou-se a temperatura de 15°C e altitude ao nível do mar.

A velocidade do vento de projeto ( $V_p$ ) deve ser determinada conforme a Eq. (20).

$$V_p = K_R K_D \frac{H^{\frac{1}{n}}}{10} V_B \quad (20)$$

Onde  $K_R$  é coeficiente de rugosidade;  $K_D$  é o coeficiente de correção do período de integração para 10 minutos;  $H$  é a altura para correção da velocidade do vento (m);  $n$  é o fator para correção da velocidade do vento em função da altura e que depende do período de integração;  $V_B$  é a velocidade básica do vento.

### 3.3 IEC 60826:2003

De acordo com o IEC 60826:2003, as forças de vento sobre os cabos, aplicadas perpendicularmente ao cabo no seu ponto de fixação em cada suporte, são dadas pela Eq. (21).

$$A_c = q_0 C_{XC} G_c G_L d L \sin^2 \omega \quad (21)$$

Onde  $C_{XC}$  é o coeficiente de arrasto;  $G_c$  é o fator relacionado ao vento combinado para condutores;  $G_L$  é o fator relacionado ao comprimento do vão;  $d$  é o diâmetro do condutor (m);  $L$  é o vão de vento do suporte, igual à metade da soma dos comprimentos dos vãos adjacentes ao suporte (m);  $\omega$  é o ângulo formado entre a direção de incidência do vento e do comprimento do condutor.

A pressão dinâmica de referência do vento é definida conforme a Eq. (22).

$$q_0 = \frac{1}{2} \tau \mu (V_R)^2 \quad (22)$$

Onde  $\mu$  é a massa específica do ar igual a 1,225 (kg/m<sup>3</sup>) a temperatura 15°C e pressão atmosférica de 101,3 (kPa) ao nível do mar;  $\tau$  é o fator de correção da massa específica do ar,  $V_R$  é velocidade de referência do vento (m/s);

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Análise dinâmica versus resultados experimentais obtidos por Loredo-Souza (1996)

Para a validação do modelo numérico desenvolvido foram feitas comparações com resultados obtidos em ensaios realizados em túnel de vento por Loredo-Souza (1996). O modelo numérico foi elaborado com as características do protótipo ensaiado em túnel de vento, conforme a Tabela 1.

**Tabela 1. Características do modelo em escala real ensaiado por Loredo-Souza (1996).**

Propriedades	Valores
Diâmetro (mm)	30,00
Módulo de Elasticidade (GPa)	70,00 (Estimado)
Coefficiente de Arrasto	1,00
Massa Linear (kg/m)	1,00
Vão (m)	150,00
Flecha Vertical (m)	7,50
Velocidade média do vento (m/s)	45,00

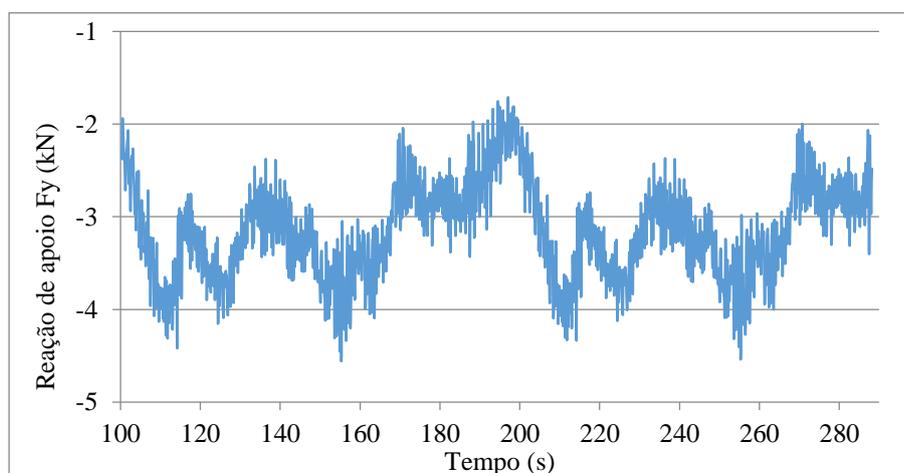
Para a construção das séries temporais do vento, a partir da formulação apresentada, foram utilizadas as seguintes variáveis:

- Altura em relação ao solo:  $z = 27$  metros;
- Comprimento de rugosidade:  $z_0 = 0,025$  metros;
- Coeficiente exponencial:  $p = 0,15$ ;
- Largura da faixa:  $\Delta L = 15$  metros.

Na Tabela 2 são apresentadas as diferenças percentuais entre os resultados obtidos através da simulação numérica e os resultados experimentais. A Figura 2 apresenta a evolução temporal das reações transversais ao cabo ( $F_y$ ), na direção do vento, para a simulação numérica. 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.

**Tabela 2. Comparação dos resultados obtidos na simulação numérica com os obtidos nos ensaios de túnel de vento.**

$F_y$ (kN)	Valores experimentais obtidos por Loredou-Souza (1996)	Modelo Numérico	Erro (%)
Mínima	1,75	1,71	1,98
Média	2,95	3,15	6,93
Máxima	4,52	4,56	0,79



**Figura 2. Evolução temporal da reação de apoio  $F_y$  (kN)**



## 4.2 Análise dinâmica versus análise estática equivalente

Para avaliar a premissa da utilização da ação vento como forças estáticas equivalentes, elaborou-se um modelo numérico de um vão real de linha de transmissão, composto por um condutor simples do tipo Linnet 336,4 MCM, apoios nivelados e demais características descritas na Tabela 3. Este modelo foi avaliado para as velocidades básicas do vento ( $V_o$ ) de 20, 32 e 50 m/s.

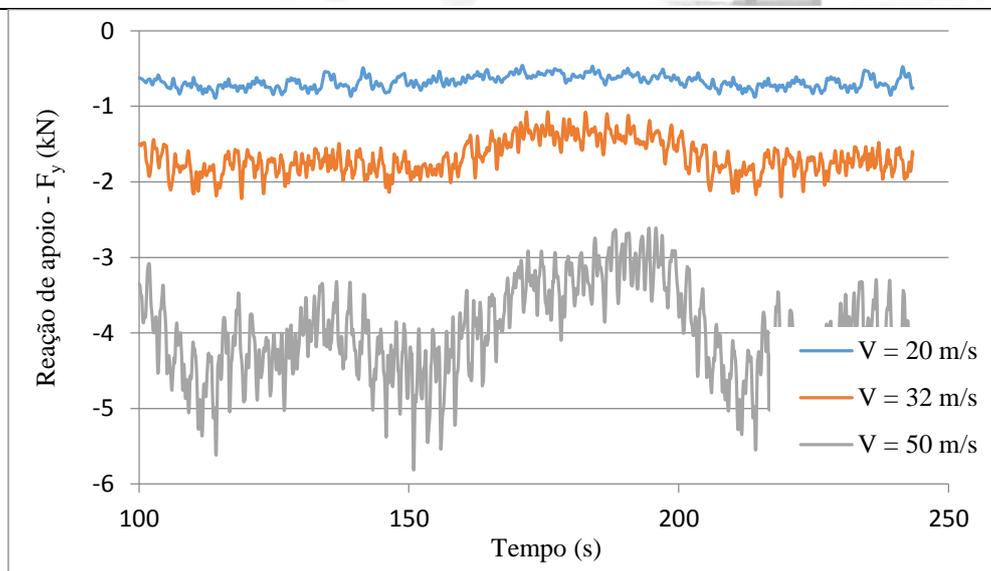
**Tabela 3. Propriedades do cabo – vão 400 metros.**

Propriedades	Valores
Área (mm <sup>2</sup> )	198,38
Diâmetro (mm)	18,31
Material	Alumínio com alma de aço
Módulo de Elasticidade (GPa)	75,93
Carga de Ruptura (kgf)	6393,00
Massa Linear (kg/m)	0,6899
Vão (m)	400,00
Flecha Vertical (m)	11,67

Para a construção das séries temporais do vento, foram utilizadas as seguintes variáveis:

- Altura em relação ao solo:  $z = 22,8$  metros;
- Comprimento de rugosidade:  $z_0 = 0,07$  metros;
- Coeficiente exponencial:  $p = 0,15$ ;
- Largura da faixa:  $\Delta L = 40$  metros.

A Figura 3 apresenta a evolução temporal das reações transversais ao cabo ( $F_y$ ), na direção do vento, para a simulação numérica.

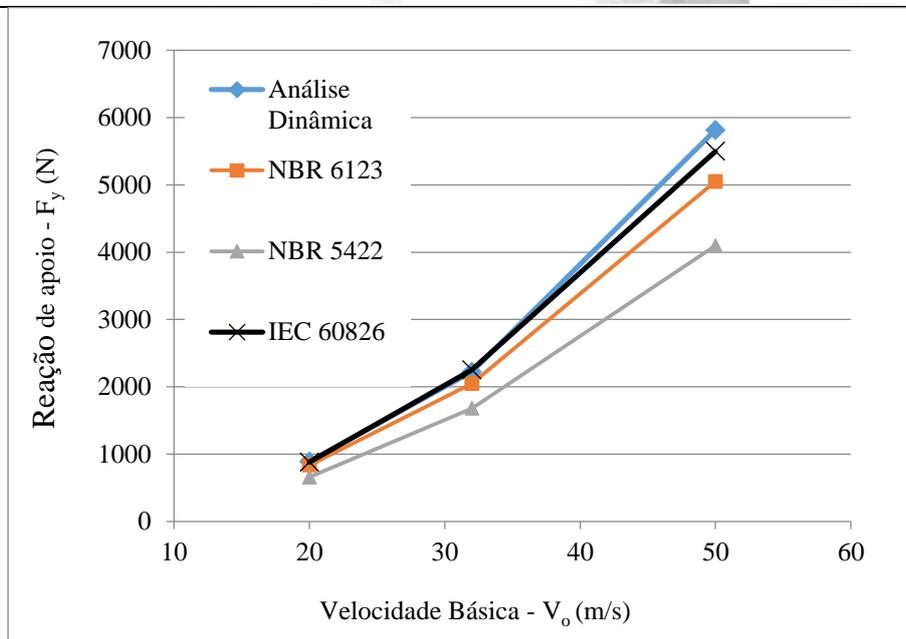


**Figura 3. Evolução temporal da reação de apoio  $F_y$  (kN).**

A Tabela 4 e Figura 4 apresentam as reações máximas para o vão de 400 metros, obtidas através da análise dinâmica e da análise estática com forças equivalentes, conforme as prescrições normativas.

**Tabela 4. Comparação entre as reações máximas ( $F_y$ ) obtidas com análise dinâmica e com a análise estática conforme as prescrições normativas.**

Velocidade Básica - $V_o$ (m/s)	Reação de apoio $F_y$ (N)			
	Análise dinâmica Modelo numérico	Análise estática equivalente		
		NBR 6123	NBR 5422	IEC 60826
20	890,03	834,60	655,45	879,67
32	2222,50	2046,00	1677,95	2251,97
50	5814,72	5050,06	4096,60	5497,97



**Figura 4. Comparação entre as reações máximas ( $F_y$ ) obtidas com análise dinâmica e com a análise estática conforme as prescrições normativas.**

Como pode ser observado na Figura 4, para a velocidade básica do vento  $V_o = 20$  m/s, os valores obtidos com a análise dinâmica (simulação numérica) foram próximos aos valores obtidos através das normas. Tal resultado não surpreende, uma vez que velocidades baixas de vento implicam em menor movimentação dos cabos, logo, os efeitos dinâmicos da atuação do vento sobre os cabos é relativamente pequeno, aproximando os resultados.

Avaliando somente as normas brasileiras, observa-se que a ABNT NBR 6123:1988 apresentou maiores valores de reação de apoio ( $F_y$ ). Tal fato justifica-se, principalmente, pelos maiores valores de coeficiente de arrasto de cabos, da não consideração do coeficiente de efetividade e dos menores tempos de integração de velocidades básicas sugeridos por essa norma. O valor das forças de vento para a norma ABNT NBR 6123:1988 foram, em média, 19% superior aos recomendados pela norma ABNT NBR 5422:1985.

Os resultados obtidos com norma IEC 60826:2003 ficaram mais próximos dos resultados da análise dinâmica e, dentre as normas avaliadas, foi a que apresentou os maiores valores de reação de apoio ( $F_y$ ). Para esta norma, o principal responsável por elevar o valor da força do vento sobre os cabos foi coeficiente de correção  $G_C$ , determinado conforme as características do terreno e a altura considerada acima do solo.



## 5 CONCLUSÕES

O presente artigo avaliou o comportamento estrutural de cabos de LT's submetidos ao vento. A força do vento foi modelada matematicamente através da geração de funções temporais para a parcela flutuante da velocidade do vento.

O modelo numérico em elementos finitos do cabo foi desenvolvido e analisado através da utilização do programa computacional ANSYS<sup>®</sup>. A validação do modelo desenvolvido foi realizada por meio da comparação com resultados experimentais obtidos em túnel de vento por Loredo-Souza (1996), que apresentou resultados satisfatórios. A metodologia de análise dinâmica apresentada nesse trabalho se mostra como uma ferramenta muito útil, principalmente para a análise de grandes vãos de cabos (travessias).

No que diz respeito aos resultados da análise dinâmica não determinística, verificou-se que o modelo numérico investigado (vão - 400m) apresentou valores de reação de apoio ( $F_y$ ) superiores aos determinados através das análises estáticas equivalentes conforme as normas de referência. As diferenças entre o resultado das análises dinâmicas e das análises estáticas equivalentes (normas) foram crescentes à medida que se aumentou a velocidade básica do vento  $V_0$ .

A norma ABNT NBR 5422:1985 foi, dentre as normas avaliadas, a norma que apresentou menores forças de vento resultantes. A diferença máxima encontrada foi da ordem de 25%, o que cria um alerta quanto à sua utilização. A norma que mais se aproximou dos valores numéricos foi a IEC 60826:2003, com diferenças máximas de 5%. Tais resultados demonstram a necessidade de revisão da norma brasileira aplicável a linhas de transmissão (ABNT NBR 5422:1985) e que, diante de análises preliminares, o procedimento de cálculo do IEC 60826:2003 é o mais apropriado para a determinação das forças devidas ao vento em cabos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da CAPES, Brasil.

## REFERÊNCIAS

- Aboshosha, H., Elawady, A., El Ansary, A., El Damatty, A., 2016. Review on dynamic and quasi-static buffeting response of transmission lines under synoptic and non-synoptic winds. *Engineering Structures*, v. 112, pp.23-46.
- ABNT, 1985. NBR 5422: *Projetos de linhas aéreas de transmissão*.
- ABNT, 1988. NBR 6123: *Forças devidas ao vento em edificações*.
- APDL, A. M., 2018. Release 14.0. *ANSYS Ltd*.



Blessmann, J. *Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento*. Porto Alegre, RS: Editora da UFRGS, 2005.

Carlos, T. B., Kaminski Jr., J., 2015. Rotina numérica para análise dinâmica de torres estaiadas de linhas de transmissão submetidas à ruptura de cabo. *CILAMCE 2015*. XXXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, November 22-25.

Carvalho, H., 2015. *Efeitos do vento em linhas de transmissão*. Tese (Doutorado) - Programa de pós-graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Carvalho, H., Queiroz, G., Fakury, R. H., 2016. Comportamento de sistemas estruturais de linhas de transmissão submetidos ao vento. *Revista da estrutura de Aço*, v. 5, n. 1, pp. 21-38.

Craig Jr., R. R., Kurdila, A. J. *Fundamentals of Structures Dynamics*. 2. nd. Ed. John Wiley & Sons, Inc., 2006.

Davenport, A.G, 1962. Buffeting of a suspension bridge by stormy winds. *Journal of the Structural Division*, ASCE, v. 88, n. ST3.

Davenport, A.G., 1988. The response of tensions structures to turbulent Wind: the role of aerodynamic damping. In: *1st International Oleg Kerensky Memorial Conference on Tension Structures*, London.

Holmes, J. D., 2015. *Wind loading of structures*. (3 Ed.) Florida: CRC Press. 384p.

International Electrotechnical Commission - IEC60826, 2003. *Design criteria of overhead transmission lines*. Switzerland: HIS.

Loredo-Souza, A. M., 1996. *The Behavior of Transmission Lines under High Winds*. Ph.D. Thesis, University of Western Ontario, Canada.

Oliveira, B. A. S., Silva, J. G. S., 2016. Modelagem do Comportamento Estrutural Dinâmico de Torres de Aço de Telecomunicações Submetidas à Ação Dinâmica Não Determinística de Cargas de Vento. *CILAMCE 2016*. XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, Brasília, DF, Brazil.

Pfeil, M. S., 1993. *Comportamento aeroelástico de pontes estaiadas*. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Simiu, E., Scanlan, R.H., 1986. Wind Effects on Structures: *Na Introduction to Wind Engineering*, 2. ed. New York: John Wiley and Sons.

Stengel D., Thiele K., Clobes M., Mehdiانpour M., 2017. Aerodynamic damping of nonlinear movement of conductor cables in wind tunnel tests, numerical simulations and full scale measurements. *Journal Of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics*, v. 169, pp.47-53.