

Procedimento numérico para a avaliação do amortecimento aerodinâmico em cabos de linhas de transmissão

Hermes Carvalho¹, Gilson Queiroz² e Ricardo Hallal Fakury³

RESUMO

Tradicionalmente, a análise de cabos submetidos ao 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 artigo é apresentar uma metodologia para a análise dinâmica de cabos submetidos ao vento, considerando as não-linearidades geométricas e o amortecimento aerodinâmico. A validação do procedimento proposto é realizada por meio da comparação com resultados obtidos por outros pesquisadores e com resultados experimentais em túnel de vento. Paralelamente, apresenta-se a comparação das respostas obtidas para a análise dinâmica e a análise estática equivalente.

Palavras-chave: Análise dinâmica de cabos, cabos sujeitos ao vento, amortecimento aerodinâmico, linhas de transmissão.

¹ Doutor, Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, hermes@dees.ufmg.br

² Doutor, Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, gilson-marque@gmail.com (aposentado em março, 2015)

³ Doutor, Professor Titular do Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, fakury@dees.ufmg.br

1 Introdução

No Brasil, a crescente demanda de energia elétrica e a riqueza de recursos hídricos indicaram a necessidade da instalação de redes de distribuição de energia baseadas em linhas aéreas de transmissão (LT's), geralmente suportadas por torres metálicas treliçadas. Por serem essas torres estruturas esbeltas e de baixo peso, o vento representa o principal agente dentre as ações consideradas no projeto das LT's (Holmes, 2015). No entanto, observa-se um aumento do número de acidentes nas torres, muitos destes relacionados à incidência de ventos mais intensos (Blessmann, 2005). Dentro desse contexto, é de fundamental importância uma adequada avaliação dos efeitos do vento nessas estruturas.

Diversos pesquisadores desenvolveram trabalhos envolvendo análises de falhas em estruturas de linhas de transmissão, entre eles Lam et al. (2011) e Albermania et al. (2009). Para a observação do comportamento dessas estruturas submetidas ao vento, estudos em túnel de vento foram desenvolvidos por Wang et al. (2015), Yang et al. (2015), Henriques et al. (2015) e Loredou Souza et al. (2003).

Atualmente, no Brasil, existem duas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), ambas da década de 1980, que apresentam diretrizes para a estimativa de forças devidas ao vento: a 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. Verifica-se, então, que a primeira norma é específica para o projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica e trata, adicionalmente, da questão das forças causadas pelo vento nessas linhas. A segunda norma fornece diretrizes para determinar as forças de vento dentro de um contexto mais geral, com possibilidade de emprego em casos mais específicos, como em estruturas treliçadas e cabos.

A norma de referência ABNT NBR 5422:1985 considera somente ações de vento estáticas equivalentes, admitindo que tais ações não produzam forças de inércia significativas no sistema. Com essa simplificação, a movimentação dos condutores é ignorada, levando-se em consideração somente as trações estáticas. No entanto, um número significativo de acidentes 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, os quais caem apenas em virtude da queda das torres. Esse padrão de comportamento indica que esses sistemas estruturais podem ser susceptíveis aos efeitos dinâmicos da turbulência atmosférica.

Neste trabalho é apresentada uma metodologia para a análise dinâmica de estruturas submetidas ao vento, considerando o amortecimento aerodinâmico, com sua aplicação e aferição a cabos suspensos de linhas de transmissão aéreas.

2 Metodologia desenvolvida

Com o intuito de avaliar a premissa de utilização do carregamento de vento como forças estáticas equivalentes, foram realizadas análises dinâmicas em um modelo tridimensional de um cabo isolado, com a consideração das não-linearidades geométricas e do amortecimento aerodinâmico. Um trabalho semelhante foi desenvolvido por Batista et al. (2003), porém o amortecimento aerodinâmico não foi considerado. Outros autores já avaliaram a importância da consideração do amortecimento aerodinâmico no comportamento dinâmico de cabos suspensos e desenvolveram trabalhos experimentais, como Stengel et al. (2015).

Para a consideração do amortecimento aerodinâmico foi proposto um procedimento baseado em uma análise dinâmica no domínio do tempo (*“time-history”*) que considera o cálculo das pressões aerodinâmicas a partir de velocidades relativas entre o cabo e o vento (CARVALHO, 2015). O carregamento do vento foi modelado através de um processo randômico, a partir das suas propriedades estatísticas. Para que os efeitos dinâmicos se pronunciem, é importante avaliar casos em que os cabos assumam velocidades elevadas, próximas às do vento.

Para a validação do procedimento proposto com a consideração do amortecimento aerodinâmico no movimento dos cabos, foram realizadas comparações com resultados obtidos através da formulação proposta por Davenport (1988) e Vickery (1992), e com ensaios realizados em túnel de vento por Loredou-Souza (1996). O efeito da consideração do amortecimento aerodinâmico no movimento dos cabos foi avaliado por meio da comparação entre análises dinâmicas com e sem a consideração desse amortecimento.

Para a realização das avaliações e comparações foi elaborado um modelo numérico com um vão real de linha de transmissão, composto por um condutor simples, apoios nivelados e vão igual a 400 metros. O cabo é do tipo Linnet 336,4 MCM, com diâmetro nominal igual a 18,3 milímetros, peso linear igual a 0,688 quilogramas força/metro (kgf/m) e componente horizontal da tração igual a 11600 N. Os apoios do cabo foram considerados indeslocáveis, uma vez que os movimentos das cadeias de isoladores apresentam valores muito inferiores aos observados ao longo do cabo. Tal simplificação foi avaliada e considerada aceitável em Carvalho (2015), com base em comparações entre os resultados obtidos nesse trabalho e resultados de análises dinâmicas realizadas por Oliveira (2006), com apoios flexíveis para os cabos. Mesmo as avaliações sendo realizadas em um vão simples de cabo, o procedimento proposto é geral e pode ser estendido a vãos múltiplos de linhas de transmissão, aplicando a correlação espacial correspondente na determinação das cargas de vento.

Os valores máximos das respostas dinâmicas foram comparados com as respostas obtidas através da análise estática realizada conforme as prescrições da ABNT NBR 6123:1988, com a utilização de forças equivalentes.

Para a comparação com os resultados experimentais apresentados por Loredou-Souza (1996), foi elaborado um modelo numérico semelhante, porém com vão de 150 metros, e demais características conforme o protótipo utilizado no trabalho.

3 Procedimento numérico para a análise dinâmica de cabos

3.1 Descrição geral

Um cabo suspenso, como no caso de linhas aéreas de transmissão, apresenta a forma de uma catenária. Para suportes de mesma altura, essa catenária será simétrica em relação ao eixo central onde se localiza o vértice e onde se mede a flecha. A flecha depende do peso próprio do cabo, do comprimento do vão, da temperatura e da tração aplicada ao cabo quando este é fixado aos suportes.

Neste trabalho, a modelagem dos cabos foi realizada utilizando o elemento de treliça não linear (link 10) do programa comercial ANSYS®, com a utilização do keyoption 3 igual a 0, impondo assim aos elementos somente a possibilidade de forças normais de tração.

A formulação de grandes gradientes de deslocamentos e valores de deformação inicial para os elementos de treliça devem ser considerados no cálculo dos deslocamentos. Foram utilizados apoios fixos em ambas as extremidades do cabo. 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 nessa etapa de carregamento no programa computacional utilizado).
- 2ª Etapa:** As forças aerodinâmicas correspondentes à parcela média da velocidade do vento são aplicadas aos cabos como forças nodais. A análise já é dinâmica nessa etapa, o que implica alguns cuidados. As cargas devem ser introduzidas lentamente, em pequenos incrementos, de forma que as velocidades assumidas pelo cabo, 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 cabo. É processada, então, a análise dinâmica em regime transiente.

3.2. Amortecimento Aerodinâmico

Conforme Loredou-Souza (1996), o movimento de cabos é dominado pelo amortecimento aerodinâmico, sendo que o amortecimento mecânico ($\zeta \approx 0,0005$), conforme Backmann et al. (1995) e Macdonald (2002), não é tão expressivo, especialmente para ventos elevados. Já para o movimento da torre, ambas as fontes de amortecimento são de igual importância. O amortecimento aerodinâmico é definido como uma força retardadora derivada do movimento relativo entre a estrutura e o ar. Para o cálculo desse amortecimento, no caso de estruturas prismáticas tais como cabos, em escoamento

uniforme e movimento na direção do vento (arrasto), foi proposta uma formulação por Davenport (1988) e Vickery (1992), conforme apresentado na equação a seguir.

$$\zeta_{aj} = \left(\frac{C_D}{4\pi} \right) \left(\frac{\rho_a d^2}{m} \right) \left(\frac{V}{f_j d} \right) \quad 3.1$$

onde:

ζ_{aj} é o amortecimento aerodinâmico do j-ésimo modo;

C_D é o coeficiente de arrasto;

ρ_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.

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

$$q_{vento} = 0,613 V_R^2 \quad 3.2$$

$$V_R = (V(t) - V_{estr}) \quad 3.3$$

$$V(t) = \bar{V}_z + v(t) \quad 3.4$$

$$\bar{V}_z = \bar{V}_{10} (z/10)^p \quad 3.5$$

onde:

q_{vento} é a pressão dinâmica do vento;

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

V_T é velocidade do vento;

V_{estr} é velocidade da estrutura, na direção do vento, no nó considerado;

$V_{(t)}$ é a componente flutuante da velocidade do vento;

$\bar{V}_z$ 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.

Neste trabalho, serão adotadas as prescrições da norma ABNT NBR 6123:1988, que sugere a utilização da velocidade média calculada em um intervalo de tempo igual a 10 minutos para a realização de análises dinâmicas, conforme descrito pela equação a seguir:

$$\bar{V}_{10} = 0,69 V_0 S_1 S_3 \quad 3.6$$

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;

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

Com essa formulação, o procedimento para o cálculo do amortecimento aerodinâmico torna-se genérico, independente das características dinâmicas da estrutura, podendo, basicamente, ser aplicado a qualquer tipo de estrutura excitada pelo vento.

Deve-se observar que o coeficiente de arrasto, para o cálculo das forças devidas ao vento, deve ser adequado para cada tipo de estrutura e posição em relação à direção do vento. Além disso, considerações especiais são necessárias quando pontos da estrutura tiverem velocidades elevadas em direções transversais ao vento.

Alguns estudos, entre eles o de Nagao et al. (2003), avaliaram a correlação espacial entre as pressões aerodinâmicas e mostraram que as correlações para o processo “flutuação da velocidade longitudinal” não coincidem com as do processo “flutuação da pressão aerodinâmica”. 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, não sendo consideradas funções de densidade espectral e correlação cruzada específicas para a flutuação de pressões.

Como os valores das forças dependem das velocidades assumidas pela estrutura, a solução dinâmica transiente tem que ser finalizada a cada incremento de tempo, para possibilitar o armazenamento dos valores de velocidade de cada nó e cálculo das novas forças de vento, considerando a velocidade relativa. A finalização da solução deve ocorrer obrigatoriamente, pois, a aquisição dos valores das velocidades instantâneas da estrutura só é possível através do módulo de pós-processamento do programa. Posteriormente, reinicia-se a solução do modelo na posição deformada e com todas as suas condições correntes preservadas (velocidades, acelerações, forças internas, etc.), aplicando as novas pressões aerodinâmicas.

O processo de interromper a solução numérica e aplicar novo carregamento a cada passo de tempo torna a solução complexa e é sujeito a limitações. O número de paralisações permitidas pelo programa utilizado é limitado a mil. Na verdade, a cada suspensão da solução, é criado um arquivo de resultados e não se pode exceder mil arquivos. Assim, se o passo de tempo (“timestep”) for igual a 0,1 segundo, o tempo máximo de solução seria de 100 segundos.

O procedimento proposto neste trabalho atende também à análise dinâmica sem a consideração do amortecimento aerodinâmico. Nesse caso, basta anular o vetor de velocidades instantâneas do cabo a cada instante de tempo.

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 de funções temporais para a parcela flutuante da velocidade longitudinal do vento. Neste trabalho 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, o processo $v(t)$ pode ser gerado segundo a equação abaixo, conforme Pfeil (1995):

$$v(t) = \sqrt{2} \sum_{i=1}^N \sqrt{S^v(f_i) \Delta f} \cos(2\pi f_i t + \theta_i) \quad 3.7$$

onde:

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

N é o número de intervalos Δf de frequências considerado no espectro;

f_i é a frequência i , em Hz;

t é o tempo, em segundos;

Δf é o incremento de frequência, em Hz;

θ_i é o ângulo de fase aleatório, compreendido entre 0 e 2π .

Ao proceder à divisão do espectro, deve-se ter a precaução de incluir nas frequências f_i as frequências naturais da estrutura de modo a não subestimar a resposta desta. 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 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, conforme Blessmann (2005), mostrada na equação a seguir:

$$\frac{f S^v(z, f)}{u_*^2} = \frac{200 x}{(1 + 50x)^{5/3}} ; x(z, f) = \frac{z f}{\bar{V}_z} \quad 3.8$$

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 como:

$$u_* = \frac{k \bar{V}_z}{\ln(z/z_0)} \quad 3.9$$

onde:

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

z_0 é a medida de rugosidade do terreno.

3.4 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.

Conforme Davenport (1979) 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, respectivamente:

$$S^{v_1, v_2}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} C^{v_1, v_2}(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad 3.10$$

$$C^{v_1, v_2}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S^v(f) e^{-F} e^{i2\pi f\tau} df \quad 3.11$$

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;

τ é um intervalo de tempo arbitrário.

A função F é expressa por:

$$F = \frac{f[C_{1x}^2(x_1 - x_2) + C_{1z}^2(z_1 - z_2)]^{1/2}}{\bar{V}(10)} \quad 3.12$$

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 horizontal transversal ao vento e vertical.

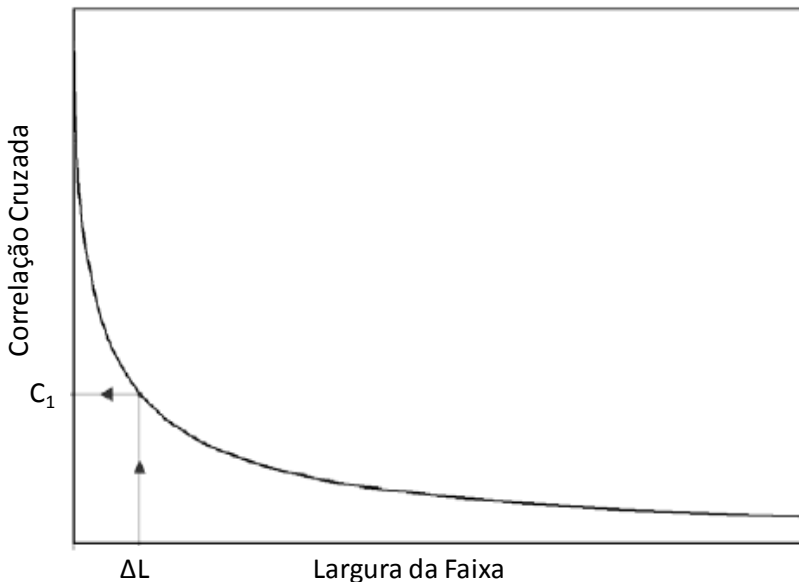
Ensaios em túnel de vento indicaram que os valores dos coeficientes de decaimento são função de vários fatores, dentre eles a velocidade média, a rugosidade do terreno e a altura acima da superfície. Simiu e Scanlan (1986) sugerem valores de $C_{1x} = 16$ e $C_{1z} = 10$ para a prática usual de projetos.

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 :

$$C_1 = C^{v_1, v_2}(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} S^v(f) e^{-F} df \quad 3.13$$

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) assim obtidos com as larguras de faixa (ΔL), conforme Figura 1.

Figura 1: Função de correlação cruzada C_1 ($\tau = 0$) para diferentes larguras de faixa

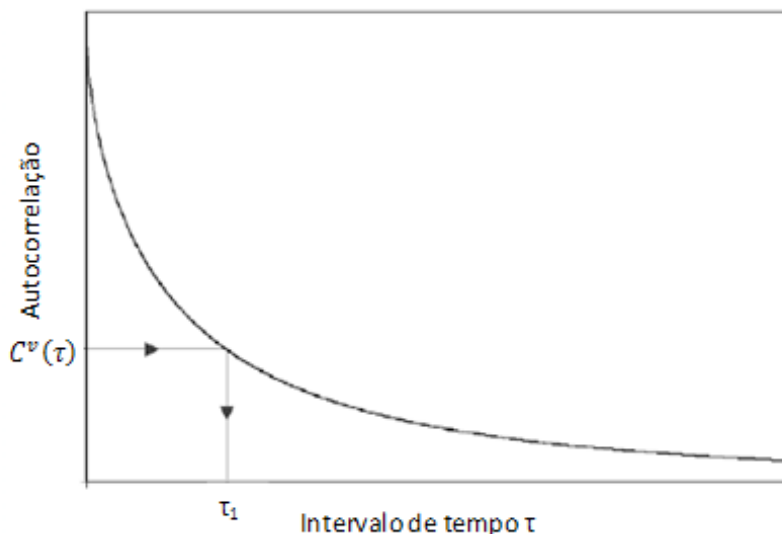


A função de autocorrelação dos processos (no mesmo ponto) é dada por:

$$C^v(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S^v(f) e^{i2\pi f\tau} df = \int_{-\infty}^{+\infty} S^v(f) \cos(2\pi f\tau) df \quad 3.14$$

Conhecendo o valor da função de autocorrelação dos processos, é possível determinar o tempo τ_1 para o qual a autocorrelação se iguale à correlação cruzada calculada considerando τ nulo (valor de C_1 mostrado na Figura 1), conforme ilustrado na Figura 2. 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 τ_1 .

Figura 2: Função de autocorrelação.



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 ΔL das séries temporais;
- b) determinação do valor da correlação cruzada C_1 ;
- c) determinação do intervalo de tempo τ_1 ;
- d) geração das séries temporais conforme o subitem 3.3, defasadas entre si de um intervalo de tempo igual a τ_1 .

4 Resultados

4.1 Procedimento proposto versus formulação de Davenport e Vickery

As figuras 1 e 2 apresentam a evolução temporal dos deslocamentos do nó central do cabo com 400 metros de vão e das reações de apoio na direção transversal ao cabo (direção do vento) para a metodologia proposta neste trabalho, a metodologia proposta por Davenport (1988) e Vickery (1992) e a simulação sem a consideração do amortecimento aerodinâmico (sem interação entre fluido e estrutura), para uma velocidade de rajada igual a 32 m/s. Considera-se o eixo x como o eixo longitudinal ao cabo, o eixo y como o transversal horizontal (na direção do vento) e o eixo z como o eixo vertical.

Figura 3: Evolução temporal dos deslocamentos do nó central do cabo com e sem a consideração do amortecimento aerodinâmico, por diferentes metodologias, para o vão de 400 metros.

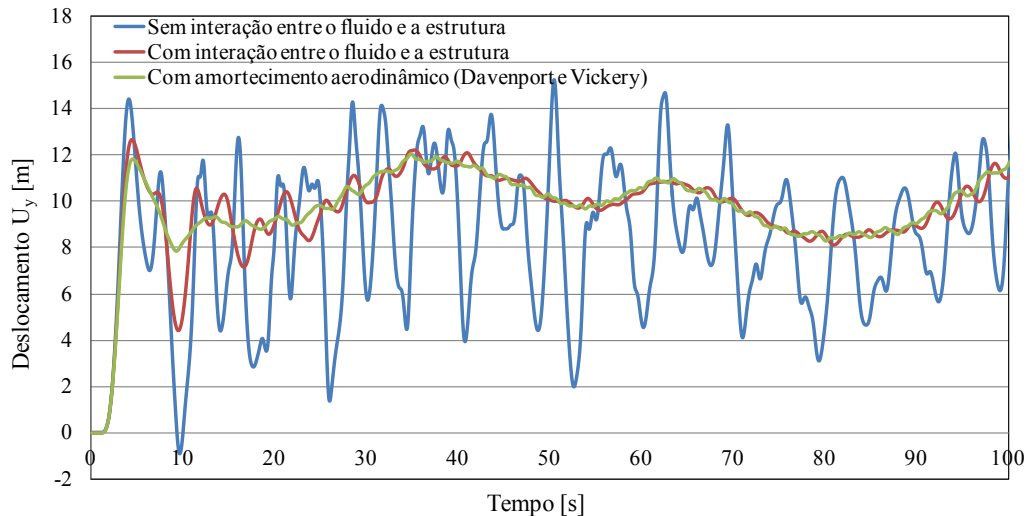
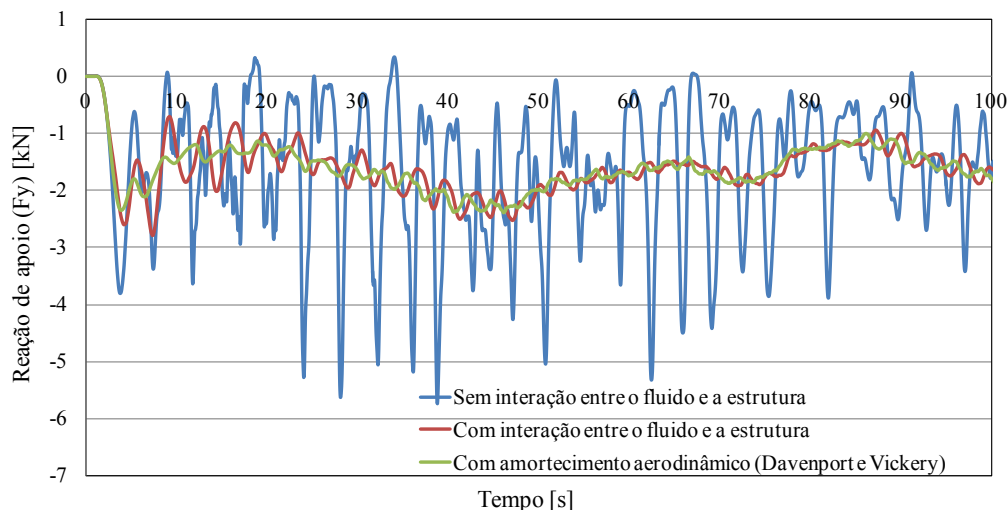


Figura 4: Evolução temporal das reações transversais com e sem a consideração do amortecimento aerodinâmico, por diferentes metodologias, para o vão de 400 metros.



4.2 Procedimento proposto versus análise estática conforme ABNT NBR 6123:1988

A Tabela 1 apresenta a comparação das reações máximas do cabo com 400 metros de vão para uma velocidade de rajada igual a 50 m/s, obtidas através da análise dinâmica com a metodologia proposta para o amortecimento aerodinâmico e as obtidas com o uso da análise estática com forças equivalentes, realizada conforme as prescrições da ABNT NBR 6123:1988.

Tabela 1: Comparação entre as reações obtidas com o procedimento proposto e com a análise estática conforme ABNT NBR 6123:1988

Reações	Procedimento proposto	ABNT NBR 6123 1988
Fx [kN]	55,51	48,52
Fy [kN]	7,82	7,34
Fz [kN]	1,26	1,35

4.3 Procedimento proposto versus resultados experimentais por Loredou-Souza

A Figura 5 apresenta a evolução temporal das reações transversais ao cabo, na direção do vento, para o procedimento proposto, aplicado ao modelo testado em túnel de vento por Loredou-Souza (1996). A Tabela 2 apresenta a comparação dos valores obtidos nas simulações com os obtidos nos ensaios de túnel de vento.

Figura 5: Evolução temporal da reação transversal obtida com o procedimento proposto

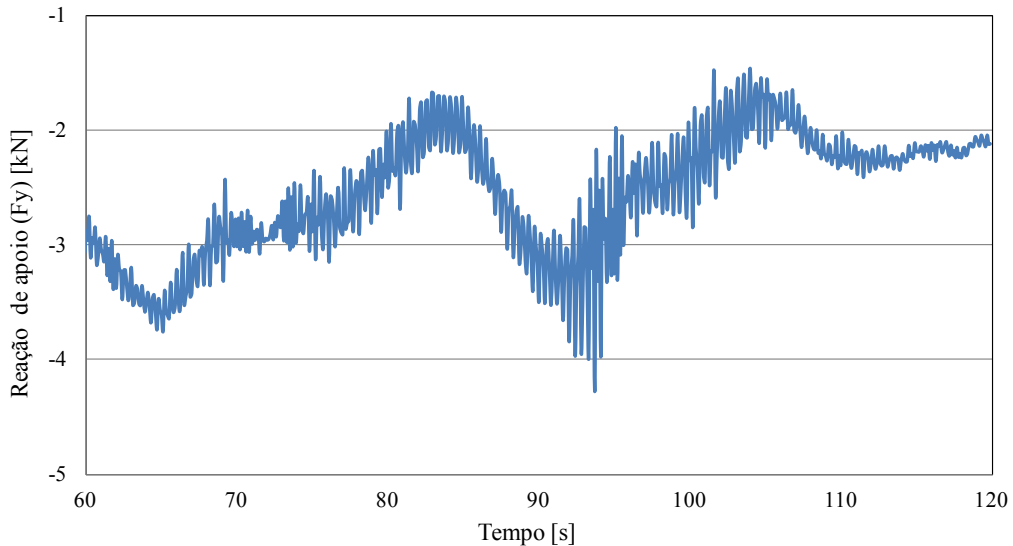


Tabela 2: Comparação entre as reações transversais ao cabo obtidas por meio do procedimento proposto com as obtidas em túnel de vento por Loredou-Souza (1996)

Fy	Valores experimentais obtidos por Loredou-Souza	Valores obtidos com o procedimento proposto	Erro [%]
Mínima [kN]	1,7	1,5	11,8
Média [kN]	3,0	2,9	3,3
Máxima [kN]	4,5	4,3	4,4

5 Conclusões

Foi proposto um procedimento para a consideração do amortecimento aerodinâmico em cabos submetidos aos efeitos dinâmicos do vento. Este procedimento é baseado no cálculo das pressões aerodinâmicas a partir das velocidades relativas entre o vento e o cabo. Os resultados obtidos com a utilização desse procedimento foram comparados

com os resultados obtidos com a formulação proposta por Davenport (1988) e Vickery (1992) e por ensaios em túnel de vento, realizados por Loredo-Souza (1996). Ambas as comparações apresentaram-se satisfatórias.

Foram avaliadas também as respostas dos cabos com a consideração do amortecimento aerodinâmico, onde se observou uma grande redução da magnitude das respostas em relação à situação de quando se considera esse amortecimento. Isso indica que análises dinâmicas de cabos submetidos ao vento não devem ser realizadas sem a consideração do amortecimento, por se apresentarem muito conservadoras.

Mesmo com a redução dos valores devido ao amortecimento aerodinâmico, os valores máximos das reações de apoio nas direções horizontais apresentaram-se um pouco superiores aos valores obtidos por meio da análise estática com forças equivalentes conforme a ABNT NBR 6123:1988. Por essa razão, para o projeto das estruturas suporte, que no caso são as torres metálicas treliçadas de transmissão de energia, sugere-se a revisão das práticas usuais considerando-se a análise dinâmica do conjunto estrutural formado por torres, cadeias de isolares e cabos.

6 Referências

- ALBERMANIA, F.G.A.; KITIPORNCHAIB, S.; CHANB, R.W.K. Failure analysis of transmission towers. *Engineering Failure Analysis*, v. 16, p. 1922-1928, 2009.
- ANSYS-12.1. Release 1.0 Documentation for Ansys. Canonsburg, United States, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 5422: Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica. Rio de Janeiro, 1985
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 6123: Forças devidas ao Vento em Edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- BACKMANN H. et al. "Vibration problems in stretchers: practical guidelines", Birkhauser Verlag Basel, 1995.
- BATTISTA, R.C., PFEIL, M.S., RODRIGUES, R.S. Dynamic behavior and stability of transmission line towers under wind forces. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 91, p. 1051-1067, 2003.
- BLESSMANN, J. Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento, 2. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/ UFRGS, 2005.
- CARVALHO, H. Efeitos do vento em linhas de transmissão. 2015. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- DAVENPORT, A. G. Gust Response Factors for Transmission Line Loading. In: *Proceedings of the fifth international conference on wind engineering*, Colorado State University: Pergamon Press, 1979.
- DAVENPORT, A.G. The response of tension structures to turbulent Wind: the role of aerodynamic damping. In: *1st International Oleg Kerensky Memorial Conference on Tension Structures*, London, June, 1988.
- HENRIQUES, J.; PAIVA, F.; BARROS, R. Wind action in the tower testing station. *International Conference on Wind Engineering*, Porto Alegre, 2015.

- HOLMES, J. D. Wind loading of structures. (3 Ed.) Florida: CRC Press. 2015. 384p.
- LAM, H.F.; TIN, T. Dynamic reduction-based structural damage detection of transmission towers: Practical issues and experimental verification. *Engineering Structures*, v. 33, p. 1459-1478, 2011.
- LOREDO-SOUZA, A.M. The Behaviour of Transmission Lines Under High Winds. 1996. Tese (Doutorado) - Faculty of Engineering Science Department of Civil Engineering, The University of Western Ontario, Ontário.
- LOREDO-SOUZA, A. M.; DAVENPORT, A. G. The influence of the design methodology in the response of transmission towers to wind loading. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 91, p. 955-1005, 2003.
- MACDONALD, J. H. G. "Separation of the Contributions of Aerodynamic and Structural damping in vibrations of inclined cables", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2002
- 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.
- OLIVEIRA, M.I.R. Análise estrutural de torres de transmissão de energia submetidas aos efeitos dinâmicos induzidos pelo vento. 2006. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- PFEIL, M. S. Comportamento aeroelástico de pontes estaiadas. 1993. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- SIMIU, E.; SCANLAN, R.H. Wind Effects on Structures: Na Introduction to Wind Enginnering, 2. ed. New York: John Wiley and Sons, 1986.
- STENGEL, D.; THIELE, K.; CLOBES, M.; MEHDIANPOUR, M. Aerodynamic damping of non-linear movement of conductor cables in laminar and turbulent wind flow. *International Conference on Wind Engineering*, Porto Alegre, 2015.
- VICKERY, B.J. Advanced structural dynamics I. (Engineering Science 610) Course notes. The University of Western Ontario, Canadá, 1992.
- WANG, D.; LI, K.; LIANG. S. Wind tunnel tests on aeroelastic dynamic tension effects of overhead transmission. *International Conference on Wind Engineering*, Porto Alegre, 2015.
- 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.

Numerical procedure to evaluate the aerodynamic damping on cables of overhead transmission lines

ABSTRACT

Traditionally the cables submitted to the wind analysis 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 paper is to present a methodology for dynamic analysis of cables subjected to wind, considering the geometric nonlinearity and the aerodynamic damping. The validation of the proposed procedure is performed by comparison with results obtained by other researchers and experimental results for a wind tunnel. It shows the comparison of the responses obtained for the dynamic analysis and the equivalent static analysis.

Key-words: Dynamic analysis of cables, Cables subjected to wind forces, aerodynamic damping, transmission lines.

1 Introduction

In transmission lines, the main load to be considered in the structural analyses is produced by wind, which acts dynamically on the system (towers, cables and insulator strings). Considering that several accidents involving towers of this type occurred, although the wind speed used in the project has not been reached, the collapse might have been caused by dynamic actions or by some mistake in the wind effect estimate.

For the dynamic behavior, a space model of an isolated cable is evaluated, considering the geometric non-linear effects and the aerodynamic damping, with a huge influence in cases in which the structure assumes speeds next to the wind speed. The wind loading is modeled as a random process from statistical properties.

A numerical procedure which takes in account the aerodynamic damping is proposed and validated by confrontation with the formulae proposed by Davenport and Vickery and with wind-tunnel tests presented by Loredou-Souza. The maximal values of the dynamic response obtained were compared with results produced by a static analysis in agreement with the prescriptions of the NBR 6123, with the application of the wind-gust coefficient.

2 Results

Figure 1 presents both the temporal evolution of the cable central node displacements and temporal evolution of the end support reaction in the wind direction (transversal to the cable). All the results are presented using the method proposed at this work, the Davenport's methodology and a simulation without the aerodynamic damping (with a wind gust of 32 m/s).

The x-axis is longitudinal to the cable, the y-axis is horizontal and transversal to the cable (direction of the wind) and the z-axis is the vertical axis.

Figure 1: Temporal evolution of the cable's central node displacements and temporal evolution of the central support reaction in the wind direction for different methods

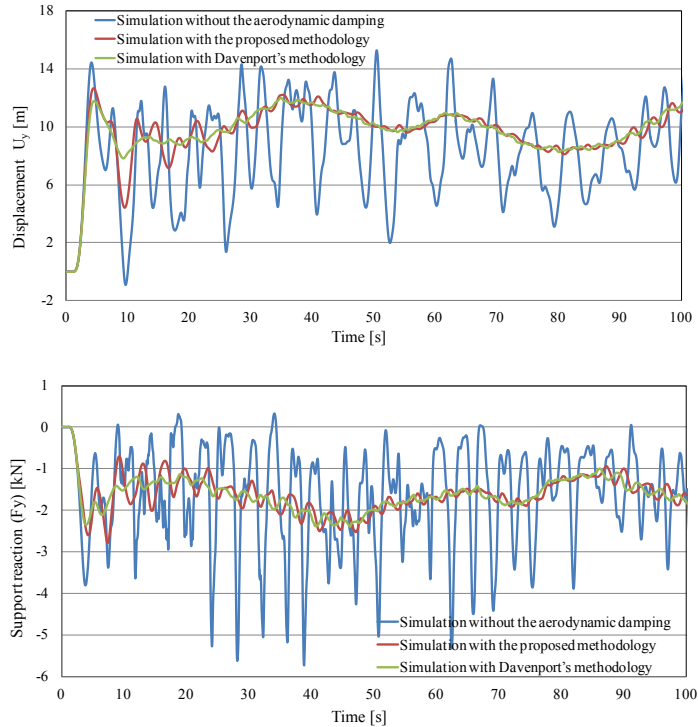


Table 1 presents the values of the cable's maximal reaction for a wind gust speed of 50 m/s for both dynamic and static analysis. The dynamic analysis is performed with the employ of the proposed procedure whereas the static analysis is performed using the wind gust factor, described at NBR 6123:1988.

Table 1: Proposed dynamic analysis versus static analysis.

Reactions	Proposed procedure	Static analysis
Fx [kN]	55,51	48,52
Fy [kN]	7,82	7,34
Fz [kN]	1,26	1,35

Figure 2 presents the temporal evolution of the support reaction, in the wind direction, obtained by the application of the proposed procedure model built according to Loredo-Souza (1996). Table 2 presents the comparison between the results of the simulation and those obtained from wind tunnel tests.

Figure 2: Temporal evolution of the support reaction obtained with proposed procedure.

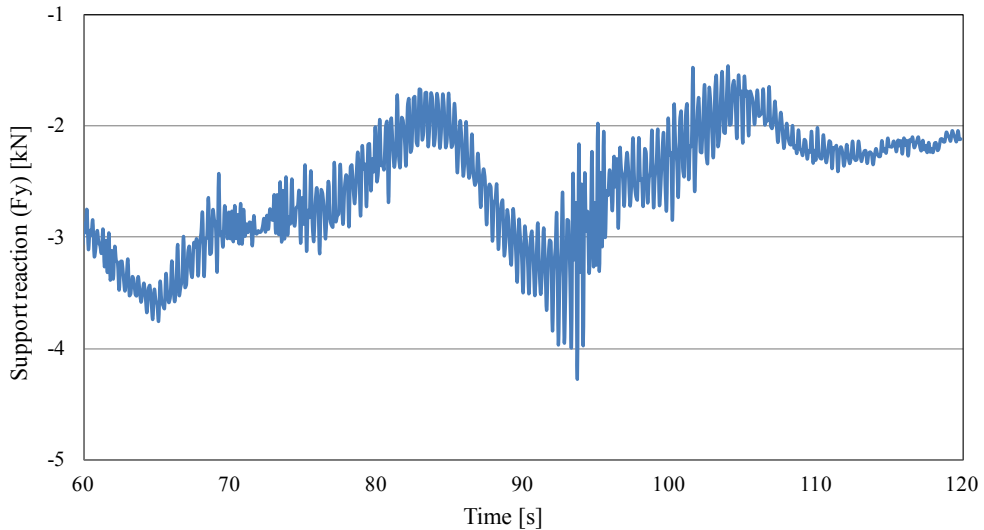


Table 2: Proposed dynamic analysis versus experimental analysis.

Fy	Experimental analysis – reduced scale model Loredo-Souza [3]	Experimental analysis – real scale model Loredo-Souza [3]	Dynamic analysis	Error [%]
Minimum [kN]	1,36 x 10 ⁻⁵	1,7	1,5	11,5
Average [kN]	2,40 x 10 ⁻⁵	3,0	2,6	13,0
Maximum [kN]	3,60 x 10 ⁻⁵	4,5	4,3	4,5

3 Conclusions

A method to take in to account the aerodynamic damping in cables subjected to wind dynamic effects was proposed in this work.

The proposed method consists of aerodynamic pressures calculations considering the relative speed between cable and wind. The proposed method results were compared with those based on the formulation proposed by Davenport (1988) and Vickery (1992). The results were also confronted with laboratory wind-tunnel results issued by Loredo-Souza (1996). Both comparisons showed good agreement.

It was showed by the results that cable response is reduced considerably when aerodynamic damping is considered. Even though cable response was reduced, maximal support reaction was above that obtained by the application of the wind gust factor in a static analysis (Loredo-Souza, 1996). Therefore, the usual engineering practice of using static analysis should be reconsidered and eventually substituted by a dynamic analysis of the structural assembly of tower, isolators and cables.