

ANÁLISE DINÂMICA DE UMA TORRE ESTAIADA SUBMETIDA À TORMENTA EPS¹

Vicente Bergamini Puglia², Letícia Fleck Fadel Miguel³ e Ignacio Iturriz⁴

Resumo: No presente trabalho faz-se uma análise dinâmica de uma torre treliçada estaiada submetida à tempestade EPS através de um registro de vento obtido a partir de sua componente média registrada experimentalmente *in loco* e da simulação numérica do espectro de sua componente flutuante. A torre estudada está localizada na Universidade de Passo Fundo, na cidade de Passo Fundo, RS, Brasil. Esta torre se encontra instrumentada, registrando velocidades de vento de forma contínua, sendo possível determinar, nos registros existentes, ventos característicos de tempestades TS e EPS. Conta-se também com a caracterização dinâmica desta torre para a qual foram determinadas suas frequências naturais de vibração. Para determinar um histórico de vento foi usado um registro anemométrico proveniente de uma tempestade do tipo EPS. A taxa de aquisição utilizada foi baixa, razão pela qual as flutuações do registro experimental foram perdidas. Utilizando expressões teóricas foi possível regenerar a componente flutuante a qual foi somada ao registro anemométrico. A metodologia empregada para realizar esta implementação é um aspecto original do presente trabalho.

Palavras chave: análise dinâmica, excitação devida ao vento, resultados experimentais, simulações numéricas, torres estaiadas.

DYNAMIC ANALYSIS OF A GUYED MAST SUBJECTED TO EPS WIND

Abstract: In the present paper it is carried out a dynamic analysis of a guyed mast subjected to EPS wind through a wind record obtained starting from its mean component experimentally registered *in loco* and from numerical simulation of the spectrum of its floating component. The studied tower is located at the University of Passo Fundo, in Passo Fundo city, RS, Brazil. This tower is instrumented and registering wind velocities in a continuous way, and thus becoming possible to determine, based on recorded data, representative winds of TS and EPS storms. It is also available the dynamic characterization of the tower from which their natural frequencies of vibration were obtained. In order to determine a wind record, an anemometric record deriving from an EPS storm was used. The acquisition rate of these records was very low, and for this reason the floating component was lost. Using theoretical expressions, the reconstruction of the floating component was possible, and this floating component was added to the anemometric record. The methodology used to carry out this implementation is an original aspect of the present paper.

Keywords: dynamic analysis, experimental results, guyed masts, numerical simulations, wind excitation.

INTRODUÇÃO

As torres estaiadas são torres verticais elevadas, muito esbeltas e são bastante utilizadas na área de transporte de energia elétrica em alta tensão e de telecomunicação em geral. Sua altura varia de uns poucos metros até mais de cem

¹ Artículo recibido el 1 de noviembre de 2010 y aceptado el 1 de diciembre de 2010.

² Estudante de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rua Sarmento Leite 425, 2º andar, CEP 90050-170, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: vicentebergamini@gmail.com

³ Profª. Drª., Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rua Sarmento Leite 425, 2º andar, CEP 90050-170, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: letffm@ufrgs.br

⁴ Prof. Dr., Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rua Sarmento Leite 425, 2º andar, CEP 90050-170, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: ignacio@mecanica.ufrgs.br

metros. Sua posição vertical e estabilidade são garantidas por meio de no mínimo três cabos oblíquos amarrados no corpo da torre em um ou vários níveis e ancorados em bases de concreto. As torres são construídas quase que exclusivamente de aço ou ligas leves. Usualmente possuem seções transversais circulares ocas (tipo tubo), triangulares ou quadradas, construídas mediante barras sólidas, tubos, cantoneiras, de modo a formar uma estrutura treliçada. O sistema estrutural depende das condições de construção, serviço, econômica e forma de produção.

Normalmente, devido a sua esbeltez e flexibilidade, a principal solicitação deste tipo de estrutura é a ação do vento, tanto a ação estática quanto os efeitos dinâmicos. As características particulares mencionadas fazem com que esse tipo de estrutura seja crítico do ponto de vista técnico, já que não só o colapso total ou parcial, mas também vibrações excessivas podem comprometer a qualidade e confiabilidade das transmissões, como diminuir a vida útil de outros componentes que trabalham relacionados à torre.

Neste sentido, é importante a escolha do modelo de vento ao qual este tipo de estrutura estará submetido. Existem diferentes formas de considerar o carregamento do vento. A forma mais simples consiste em considerar carregamentos estáticos equivalentes como é o caso do tratamento abordado em alguns códigos ou normas, como por exemplo a IASS (1981) ou a IEC (2003), entre outros. Outra forma é admitir que a ação do vento possa ser representada como um processo aleatório estacionário ou não. Este processo pode ser obtido a partir de medições experimentais ou a partir de simulações de registros das componentes da velocidade do vento, a partir de espectros de potência teóricos como os propostos por Davenport (1961) e Harris (1968).

Na literatura técnica não se encontram muitos trabalhos referentes à avaliação do comportamento dinâmico de torres estaiadas submetidas somente a cargas de vento. Grande parte dos trabalhos realizados mostra estudos feitos de ações combinadas de vento e carga de gelo. Muitos trabalhos também tratam de torres de linhas de transmissão de energia, por exemplo, Loredou-Souza et al. (2005) utilizaram três métodos para calcular a resposta de torres de linhas de transmissão à ação do vento, os quais foram: método estatístico usando linhas de influência (Loredou-Souza, 1996), método do fator de velocidade de rajada e método do fator de rajada, sugerido por Davenport (1979). Miguel et al. (2007) simularam um campo de ação de vento em 3D, considerando um campo de velocidade do tipo EPS, admitindo a velocidade média e flutuações do vento. Através deste método foi determinada a resposta dinâmica de uma torre de linha de transmissão e comparada com a resposta desta estrutura utilizando o código IEC (2003). Zampiron (2008), estudando uma torre de telecomunicações, apresenta um modelo numérico para determinação da resposta da estrutura sob diversas condições de vento, além de descrever as formas de obtenção destes ventos e aplicação das forças dinâmicas na estrutura. São avaliadas também as incertezas de modelo inseridas pela forma de determinação do vento turbulento.

Neste contexto, o presente trabalho trata da análise dinâmica de uma torre metálica treliçada estaiada, localizada na Universidade de Passo Fundo, submetida a uma tempestade EPS (“Extended Pressure System”) ocorrida no dia 9 de novembro de 2007. Como ação dinâmica, além do registro de tempestade EPS medido *in loco*, foi proposta neste trabalho uma metodologia para gerar as flutuações da velocidade do vento e acrescentá-las ao registro experimental. Como os registros obtidos *in loco* foram adquiridos com baixa frequência, as flutuações correspondentes a altas frequências dos registros foram filtradas na hora da aquisição. Por isso, se propõe neste trabalho uma metodologia para reconstruir o registro completo utilizando a informação registrada experimentalmente adicionada de uma componente flutuante calculada empregando modelos teóricos conhecidos na área de engenharia do vento. Com este registro de vento reconstruído foi calculado um estado de carregamento que foi aplicado na torre em análise. Após a presente introdução, é apresentada a descrição do problema estudado, bem como a metodologia utilizada para resolver cada etapa. Na sequência apresentam-se os resultados e faz-se uma discussão dos mesmos. Finalmente, são expostas as principais conclusões obtidas.

APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA E METODOLOGIA

Deseja-se determinar a resposta dinâmica de uma torre metálica treliçada estaiada, localizada na Universidade de Passo Fundo, submetida a uma tempestade EPS ocorrida no dia 9 de novembro de 2007. A fim de se realizar tal análise, inicialmente é necessário determinar o carregamento dinâmico ao qual a estrutura estará submetida. Com isso, para gerar um registro de vento, foi utilizada uma soma das componentes de velocidade média provenientes de um registro anemométrico obtido *in loco* com as componentes flutuantes geradas por simulação numérica.

Descrição do modelo físico da torre

A estrutura analisada é uma torre metálica treliçada estaiada localizada na Universidade de Passo Fundo, Rio Grande do Sul, Brasil. Esta torre pertence ao laboratório anemométrico da Universidade e tem como função coletar registros

meteorológicos como velocidade do vento, temperatura, irradiação solar, pressão atmosférica, umidade do ar, entre outros. Os anemômetros estão colocados em três níveis de altura na estrutura da torre, 20m, 30m e 40m, como mostra a Figura 1.

A torre é um pórtico espacial composto por 12 segmentos de 3m e um segmento de 4m totalizando 40m de altura. A estrutura é amarrada por cabos pré-tensionados do tipo trançado com 7 fios e diâmetro nominal de 1/4", dispostos em seis níveis de altura, sendo que estes são presos na estrutura por meio de olhais (Figura 2) e fixados ao solo através de chumbadores (Figura 3), assim como a base da estrutura da torre é fixada por quatro chumbadores (Figura 4).

Os módulos são compostos por cantoneiras de abas iguais e barras redondas de aço laminado SAE 1020, sendo que os segmentos são fixados entre si com parafusos M6x18 (Figura 5). Cada segmento, por sua vez, é dividido em seções de 500mm de altura e seção transversal triangular equilátera de 0,3m de lado (Figura 6). Na Figura 7 é mostrada em detalhe a estrutura de um módulo da torre.

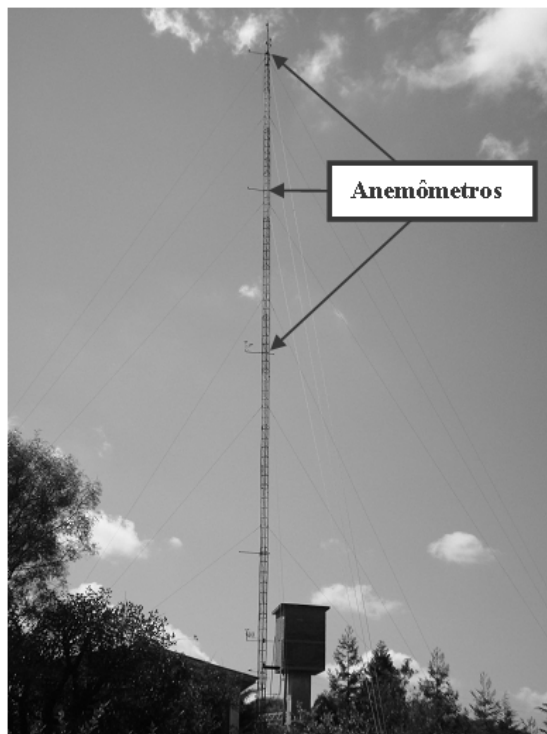


Figura 1: Visão geral da torre e disposição dos anemômetros ao longo da estrutura.

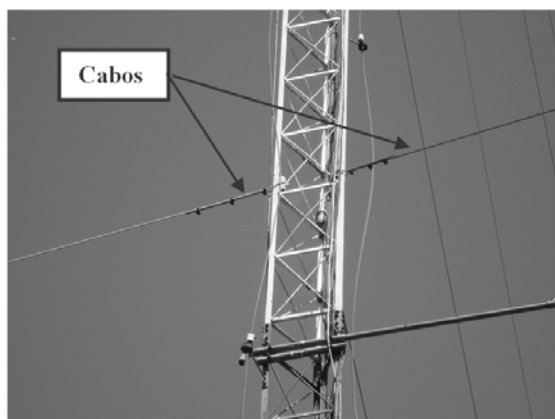


Figura 2: Fixação dos cabos na estrutura da torre.

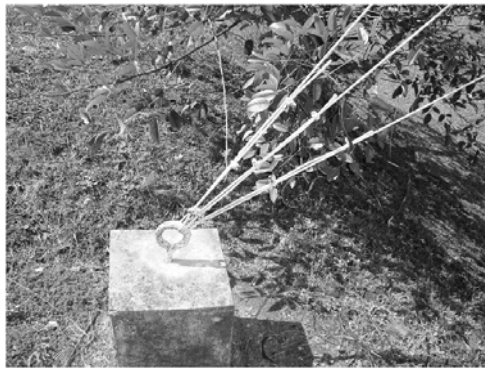


Figura 3: Chumbadores responsáveis pela fixação dos cabos.

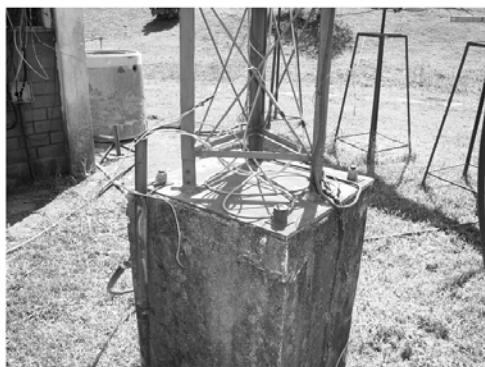


Figura 4: Fixação da base da estrutura da torre.



Figura 5: Fixação entre segmentos da estrutura.

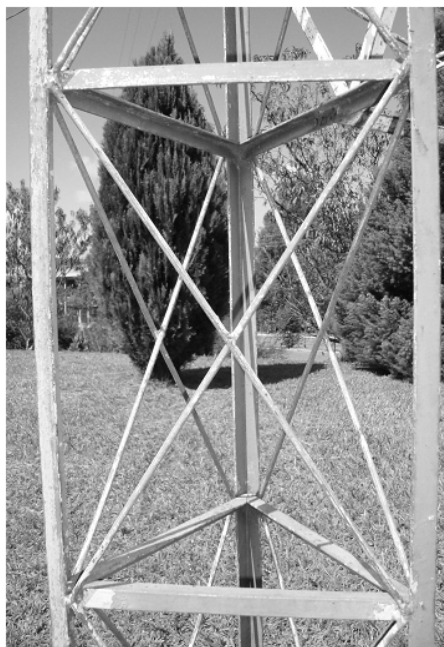


Figura 6: Módulo da estrutura.

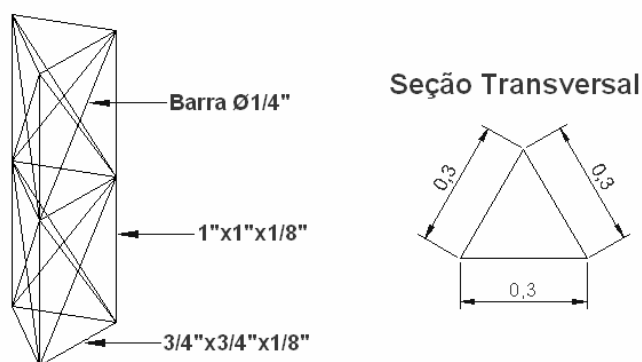


Figura 7: Representação geométrica da estrutura.

Descrição dos perfis de aço

São utilizados três tipos de perfis de aço laminado, que são responsáveis por dar forma geométrica e resistência à estrutura da torre estudada. Dois tipos são cantoneiras laminadas, sendo que uma delas possui dimensões de 19,05mm x 19,05mm x 3,175mm e a outra possui dimensões de 25,4mm x 25,4mm x 3,175mm. O terceiro perfil tem seção transversal circular com diâmetro de 1/4". As propriedades mecânicas consideradas para estes perfis são mostradas na Tabela 1, em que os valores apresentados foram definidos com base em tabelas de perfis comercializados.

Tabela 1: Propriedades mecânicas dos perfis laminados.

Propriedades mecânicas	
Densidade [kg/m ³]	7850
Coefficiente de Poisson	0,3
Módulo de Elasticidade [GPa]	210
Módulo de cisalhamento [GPa]	80

Descrição do modelo numérico da torre

Para modelagem dos casos estudados neste trabalho foi usado o “software” ANSYS (2006). Foram utilizados elementos de viga para modelar a estrutura metálica da torre e elementos de cabo para a modelagem dos estais. Será apresentada a seguir uma breve explicação teórica dos elementos usados para confeccionar os modelos numéricos.

O elemento de viga utilizado no modelo é o BEAM188, sendo baseado na teoria de vigas de Timoshenko. O BEAM188 é um elemento de barra quadrático em 3D. O elemento tem seis graus de liberdade em cada nó, sendo translações nas direções x , y e z e rotações ao redor dos eixos x , y e z . O eixo x do elemento é sempre o eixo longitudinal da viga com os eixos y e z formando a seção transversal. Este elemento pode possuir um sétimo grau de liberdade devido ao empenamento se esta opção for selecionada. A principal vantagem de se trabalhar com esse elemento é a facilidade em orientá-lo no espaço. As propriedades mecânicas necessárias são o módulo de Young, o coeficiente de Poisson e a massa específica do material (ANSYS, 2006).

Os cabos foram modelados com elementos que só trabalham quando solicitados à tração (LINK10), este elemento tem a propriedade de resistir a esforços unicamente axiais, sendo eles de tração (unicamente) ou compressão (unicamente). O elemento tem três graus de liberdade em cada nó, sendo estes os deslocamentos em x , y e z . As constantes requeridas para o elemento são a área da sua seção transversal e a tensão inicial no elemento (cabo). As propriedades dos materiais são as mesmas do elemento de viga (ANSYS, 2006). A discretização utilizada foi em elementos de 0,4m de comprimento. O módulo de elasticidade usado nos cabos foi de 108 GPa, coeficiente de Poisson de 0,27 e massa específica de 5685 kg/m³, sendo que as propriedades mecânicas dos cabos foram obtidas de manuais técnicos (CIMAF, Companhia industrial e mercantil de artefatos de ferro, 1995). A área da seção transversal considerada para os cabos foi de 3,2x10⁻⁵ m². Em relação às constantes dos elementos, a deformação inicial foi definida como sendo 10% da tensão de ruptura T_r do cabo, onde o valor da T_r é de 13500 N.

Foi representado em elementos finitos um pórtico espacial com as mesmas características geométricas da torre. Foi levada em consideração a orientação das seções transversais das cantoneiras, assim como sua geometria. Na Figura 8 pode ser vista a disposição dos elementos e suas medidas.

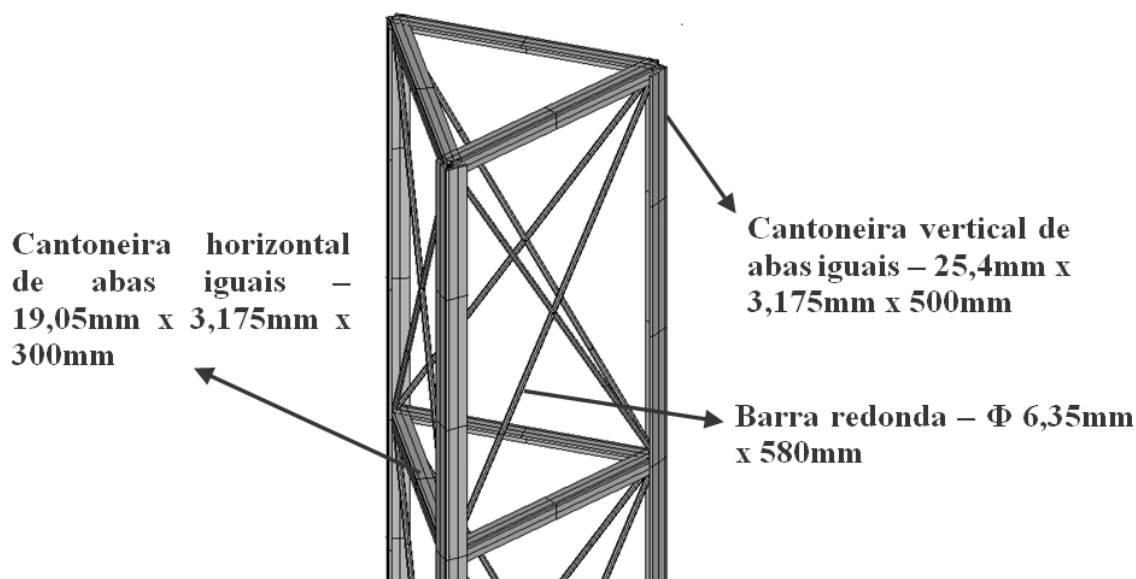


Figura 8: Disposição das seções geométricas da torre.

As cantoneiras horizontais, verticais e as barras redondas são representadas no modelo numérico com o mesmo tipo de elemento, BEAM188, e possuem as mesmas propriedades mecânicas, isto é, módulo de elasticidade de 210 GPa, coeficiente de Poisson de 0,3 e massa específica de 7850 kg/m³. O amortecimento da estrutura foi implementado considerando a matriz de amortecimento C como sendo proporcional à matriz de massa M , isto é, $C = \alpha M$. Sendo α

dados por $\alpha = 2\zeta\omega$, em que o valor da razão de amortecimento ζ é considerado como 1% e a frequência natural ω é referente ao primeiro modo de vibração da estrutura.

O tamanho dos elementos com que se discretizou a torre são de um tamanho máximo de 0,25m. A Figura 9 mostra o modelo usando elementos de pórtico espacial, sendo que os estais estão representados com elementos que só trabalham à tração.

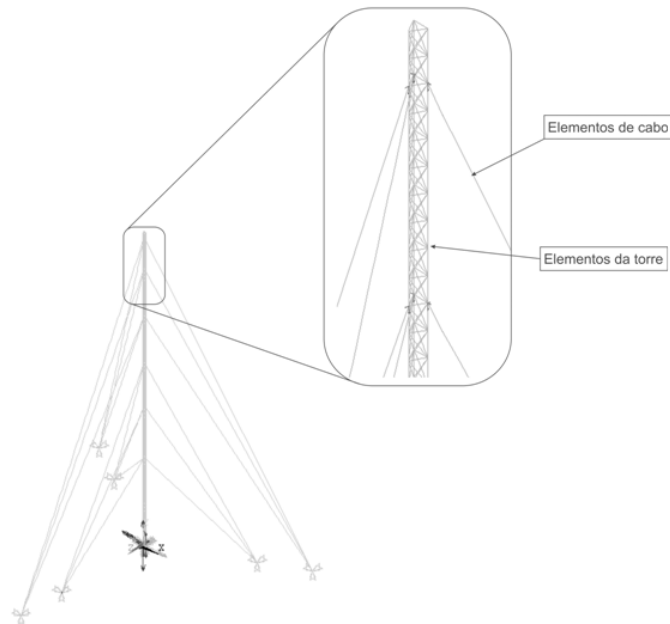


Figura 9: Modelo da torre completa.

Condições de contorno

Consideraram-se fixos todos os graus de liberdade da base da torre e dos pontos de união dos cabos com o solo. As condições de contorno são apresentadas na Figura 10.

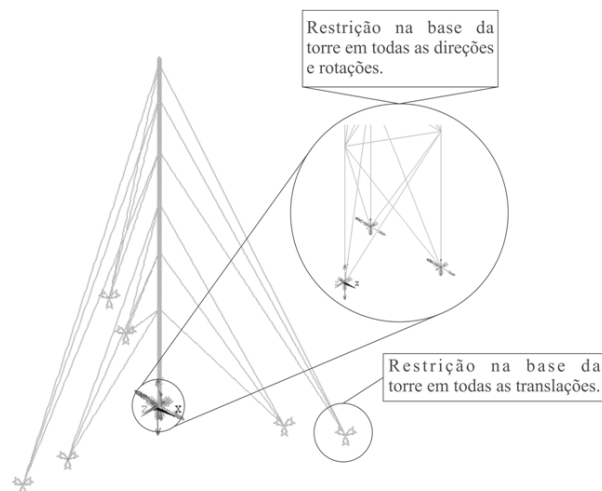


Figura 10: Detalhe das condições de contorno.

Descrição da análise transiente

A equação de movimento resultante da discretização espacial via método dos elementos finitos foi resolvida empregando o “software” ANSYS (2006). Dita equação de movimento foi integrada em forma direta no domínio do tempo utilizando um algoritmo implícito de integração (Método de Newmark).

Determinação das componentes flutuantes para tormenta EPS

Nesta seção se descrevem como foram calculadas teoricamente as componentes de alta frequência do registro do vento de uma tormenta EPS real que, como foi registrada com baixa taxa de aquisição, filtrou esta informação.

Em um sistema de coordenadas cartesiano (x,y,z) , no qual z denota a altura acima do solo e x a direção ao longo do vento, admite-se que a velocidade do vento $\vec{V}(x,y,z,t)$ é composta pela adição de duas parcelas, a parcela referente à componente média $\bar{\vec{V}}(z)$ e a parcela referente à componente flutuante $\Delta\vec{V}(x,y,z,t)$, a qual é considerada um processo aleatório estacionário com média zero. A componente da velocidade média é determinada a partir da lei logarítmica expressa pela equação (1), sendo que esta equação só é válida para perfis de ventos médios de tormentas do tipo EPS.

$$\bar{\vec{V}}(z) = \frac{1}{k} u_* \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (1)$$

sendo k a constante de Von Karman, igual a 0,4; z_0 o comprimento da rugosidade, e u_* a velocidade de corte do escoamento de vento. Este último valor pode ser obtido substituindo a velocidade média do vento conhecida $\bar{\vec{V}}(z_{ref})$ na altura de referência ($z_{ref} = 10\text{m}$), na equação (1), resultando:

$$u_* = 0,4 \frac{\bar{\vec{V}}(z_{ref})}{\ln \left(\frac{z_{ref}}{z_0} \right)} \quad (2)$$

Para determinar a componente flutuante $\Delta\vec{V}(x,y,z,t)$, Shinozuka e Jan (1972) propõem a série que se apresenta na equação (3) que consiste na superposição de funções harmônicas de amplitudes variando com a frequência de acordo com o espectro de potência utilizado.

$$\Delta\vec{V}(t) = \sum_{j=1}^N \sqrt{2S_w(f_j) \Delta f_j} \cos(2\pi f_j t + \phi_j) \quad (3)$$

Para aplicar a equação (3), a banda de frequência de interesse deve ser dividida em N intervalos, tal que $\Delta f_j = f_{i+1} - f_j$. ϕ_j é o ângulo de fase, o qual é uma variável aleatória com uma função distribuição de probabilidade uniforme entre 0 e 2π . S_w denota a *psdf* de Davenport da turbulência do vento, definida por:

$$\frac{f S_w(f)}{u_*^2} = \frac{4n^2}{(1+n^2)^{4/3}} \quad (4)$$

na qual $n = fL/\bar{V}_{10}$ e $L = 1200\text{m}$, conforme Blessmann (1995).

A velocidade média a 10m de altura $\bar{V}_{10}$ foi definida como a média do histórico do registro anemométrico da tormenta EPS. A Figura 11 mostra o gráfico do espectro de potência de Davenport. Deve-se deixar claro que neste trabalho $\bar{V}_{10}$ se refere à velocidade média do registro anemométrico.

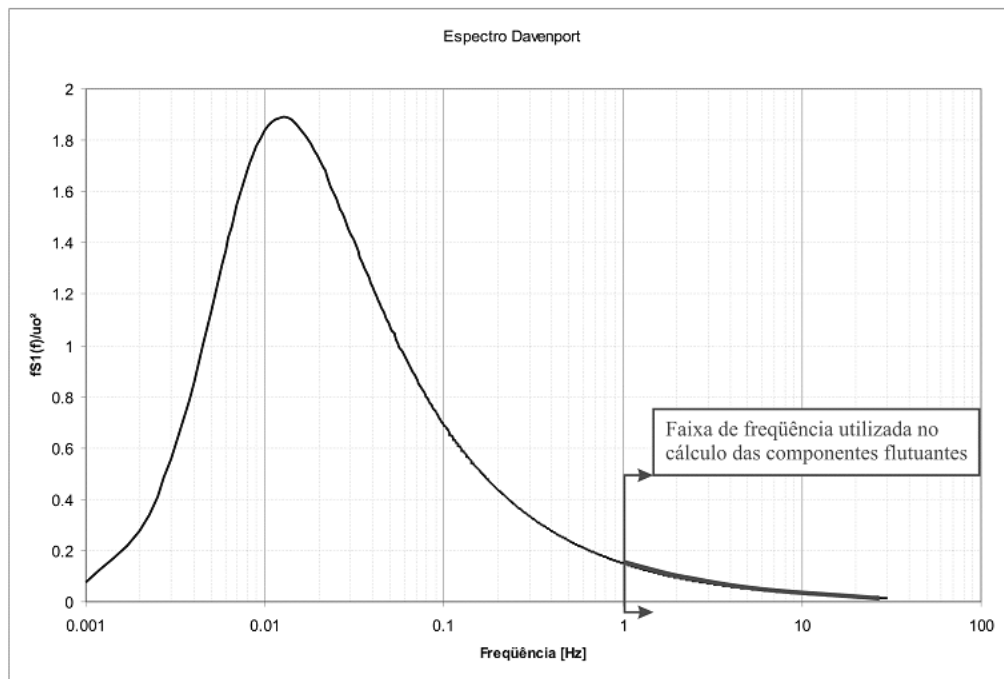


Figura 11: Espectro de Davenport gerado para a componente flutuante utilizada na tormenta EPS, faixa de frequência utilizada de 1 à 30Hz.

Determinação da velocidade do vento

Para determinar um histórico de vento foi usado um registro anemométrico proveniente de uma tormenta do tipo EPS (“Extended Pressure System”). Esse registro foi obtido durante uma tempestade que ocorreu na região de Passo Fundo, RS, Brasil, no dia 09 de novembro de 2007. Estima-se que o vento ocorrido na região foi do tipo EPS por ser um vento que ocorre com maior frequência e por ter ocorrido em uma região ampla, de grande extensão. Além disso, as características apresentadas no registro anemométrico, como por exemplo, vento com velocidade e direção relativamente constantes por um longo período de tempo, confirmam que se trata de uma tormenta EPS. Durante essa tempestade a torre de televisão pertencente à Universidade de Passo Fundo entrou em colapso. Devido a este fato foi usado este registro para obter a resposta da torre estudada. A taxa de aquisição destes registros era muito baixa, em torno de um dado por segundo e isso faz com que as flutuações de velocidade de vento não sejam expressivas. Para contornar este problema foi criada de forma teórica uma componente flutuante, a qual foi somada ao registro anemométrico. A taxa de pontos por segundo da componente flutuante foi definida como 30 pontos por segundo. Para determinar a componente flutuante foi usada a equação (3). O espectro de potência utilizado na equação (3) foi o espectro de Davenport definido pela equação (4). A faixa de frequência utilizada para gerar as componentes flutuantes para o registro variou de 1 até 30Hz, como mostrado na Figura 11.

A Figura 12a mostra uma tormenta do tipo EPS, onde é apresentada a componente da velocidade do vento proveniente do registro anemométrico e a Figura 12b apresenta o registro de vento da tormenta EPS com a adição da componente flutuante gerada a partir do espectro de Davenport. Como critério simplificador, a componente flutuante foi adicionada somente na direção da velocidade média.

Na Figura 13 é mostrada uma FFT da combinação do registro anemométrico com a adição das componentes flutuantes geradas em função do espectro de Davenport utilizando o procedimento descrito na seção anterior.

Salienta-se mais uma vez que neste trabalho a velocidade média foi substituída pelo registro anemométrico com uma taxa de um ponto por segundo onde cada valor de velocidade corresponde a uma média durante o intervalo de um segundo. A velocidade flutuante foi adicionada em função das velocidades referentes ao registro. O período de simulação do vento da componente referente à velocidade flutuante para uma tormenta EPS ocorreu durante o intervalo de 100s.

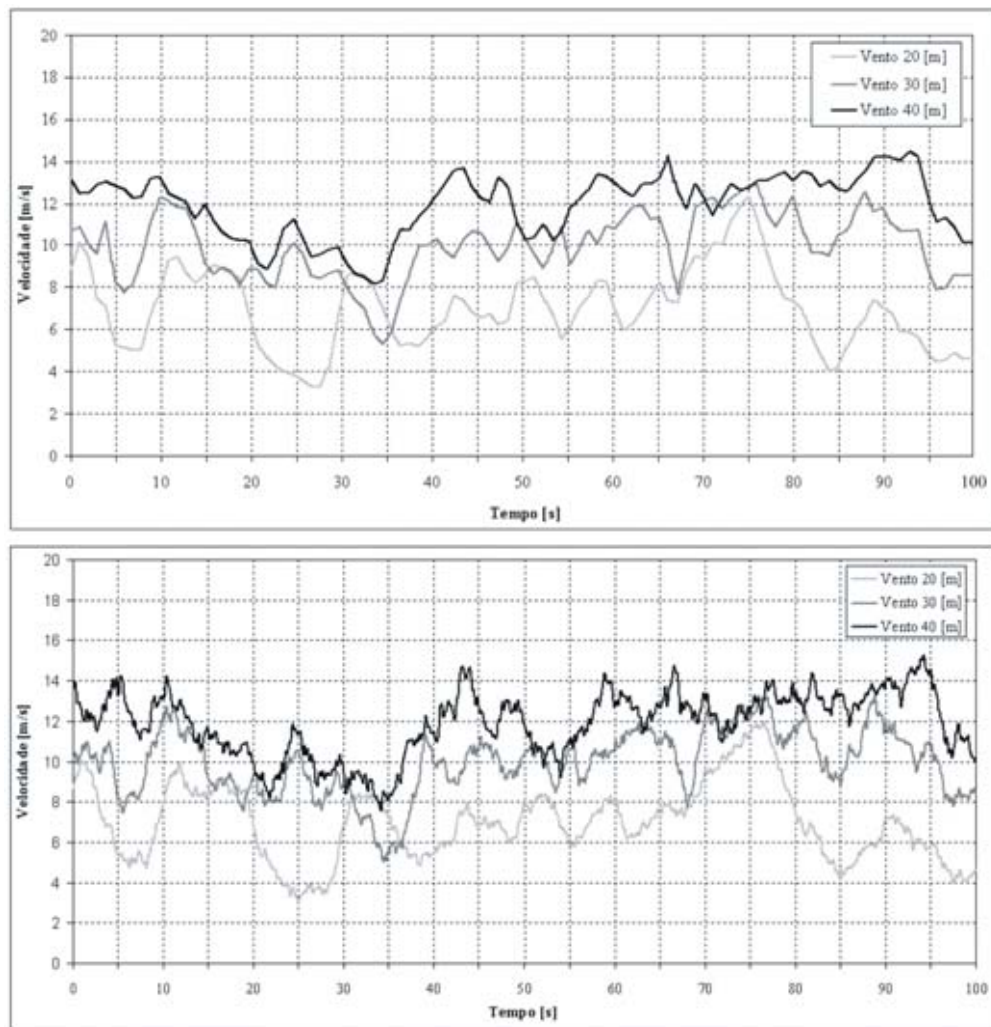


Figura 12: a) Velocidade do vento de um trecho da tormenta do tipo EPS proveniente do registro anemométrico; b) Registro de vento da tormenta EPS com a adição da componente flutuante.

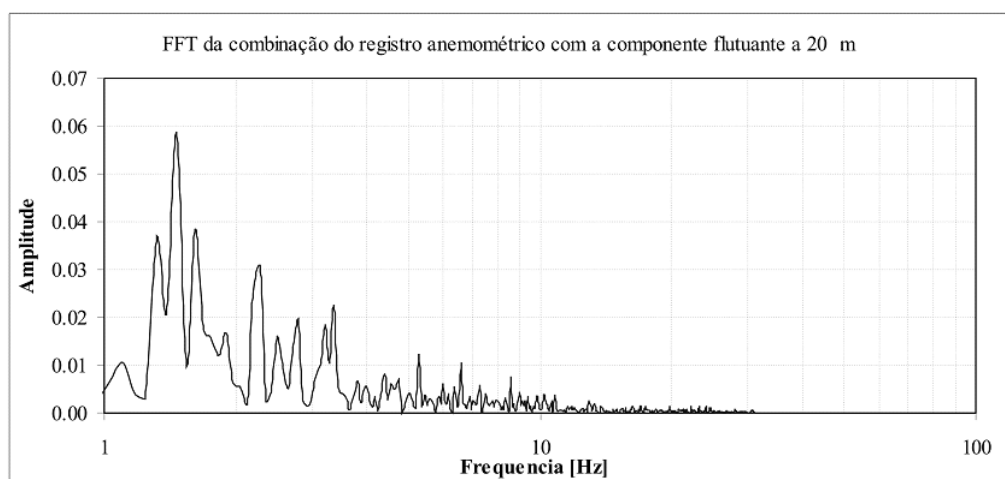


Figura 13: FFT do registro anemométrico juntamente com a componente flutuante.

Aplicação do carregamento na estrutura

Utilizando o histórico de vento da tormenta EPS, já com sua componente flutuante adicionada, pode-se determinar as pressões dinâmicas e conseqüentemente definir as forças que atuam ao longo da estrutura. Para definir essas forças é necessário determinar alguns coeficientes. Como coeficiente de arrasto para estrutura estudada é definido com o valor de 2,4 e a área de sombra da torre foi definida como 0,2266 m². Em função dos registros de velocidade são obtidas as pressões dinâmicas referentes à tormenta utilizada. Definidas as pressões dinâmicas pode-se determinar as forças atuantes nos nós dos elementos da estrutura. Este critério foi adotado com base na NBR 6123/1988. A Figura 14 mostra um gráfico com as forças oriundas da tormenta EPS em consideração.

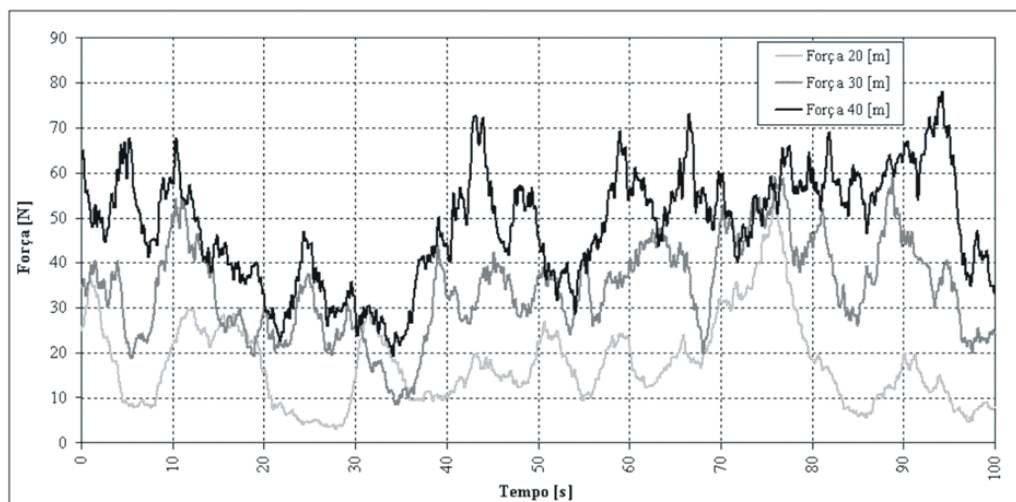


Figura 14: Histórico de força de uma tormenta EPS.

RESULTADOS E ANÁLISES

Análise dinâmica da torre submetida à ação da tormenta EPS

O objetivo desta análise é obter a resposta da estrutura quando submetida ao histórico de força apresentado na Figura 14. Na Figura 15 é mostrada a forma do carregamento que foi imposto à torre. Como pode ser visto, os carregamentos foram divididos em três partes, nas quais foram definidas suas áreas de influência, sendo que cada área de influência corresponde a um carregamento em função da altura.

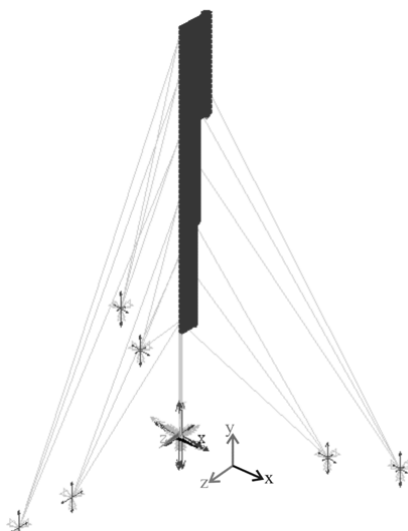


Figura 15: Forma de carregamento aplicado.

A resposta do modelo numérico da torre sob ação da tormenta EPS é mostrada na Figura 16, onde a mesma mostra a FFT da resposta da estrutura para três pontos distribuídos ao longo do modelo utilizado para análise. Esses pontos foram escolhidos com o propósito de serem regiões ao longo do comprimento da torre que apresentaram maiores deslocamentos durante a análise. Na Figura 17 é mostrado o deslocamento máximo sofrido pela torre durante o processo de análise.

Analisando a Figura 16 percebe-se que o primeiro pico de amplitude correspondente aos pontos 31m, 25m e 19m está localizado no entorno da frequência de 4,74 Hz. Já o segundo, terceiro e quarto picos de amplitude, também correspondentes aos pontos localizados a 31m, 25m e 19m de altura, estão posicionados na vizinhança da frequência de 5,42 Hz, 6,58 Hz, 7,85 Hz, respectivamente. Pode-se observar na Figura 16, que as amplitudes vão diminuindo à medida que se aumenta a frequência, isso acontece porque as amplitudes da componente flutuante do vento também diminuem à medida que se aumentam as frequências, como pode ser visto na Figura 13.

A distribuição dos deslocamentos ao longo da estrutura é mostrada na Figura 17, onde se percebe que o deslocamento máximo sofrido pela torre ocorreu na região superior da mesma com valor de 17,95mm.

O histórico de deslocamentos em função do tempo causados pela tormenta EPS pode ser visto na Figura 18. Pode-se observar que no início da resposta a estrutura sofre influência das flutuações do carregamento, porém, após os 20s de atuação das forças, a estrutura se comporta de forma estática mesmo sob influência das flutuações das forças provenientes da tormenta EPS. Isso ocorreu provavelmente devido à alta taxa das componentes flutuantes de velocidade do vento e também devido à esbeltez da estrutura, fazendo com que a mesma não fosse influenciada pelas flutuações do carregamento e conseqüentemente se comportando de forma estática.

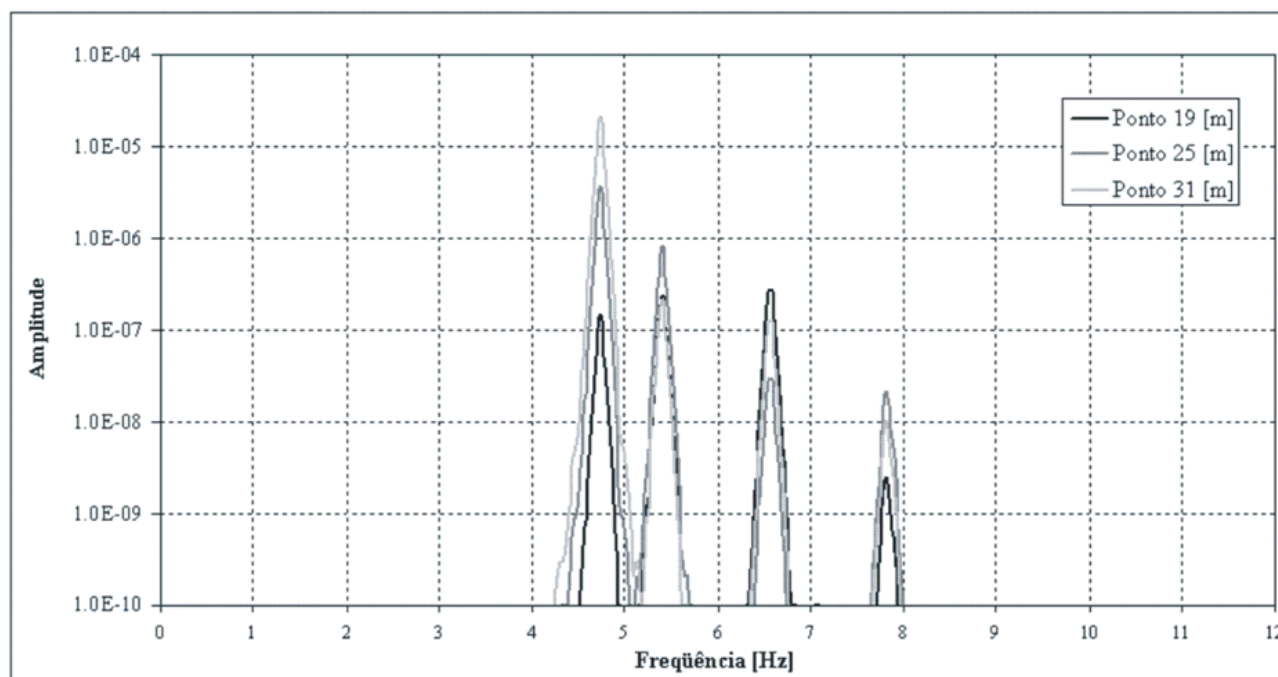


Figura 16: Resposta da torre submetida a vento EPS.

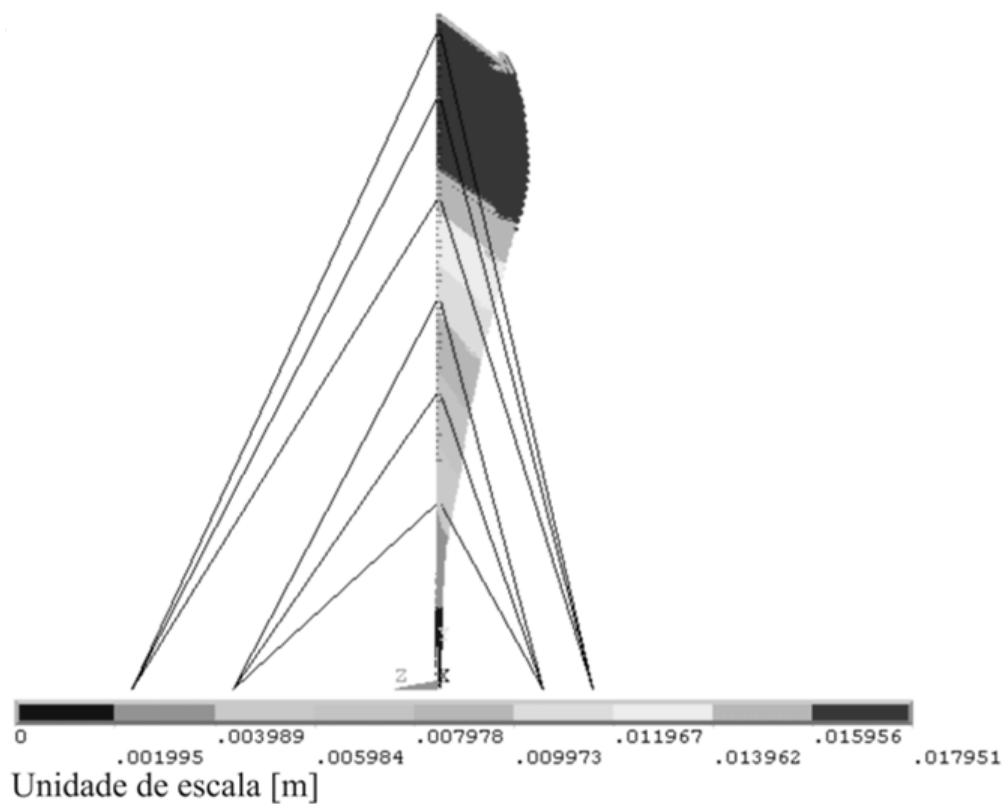


Figura 17: Deslocamentos ocorridos devido à tormenta EPS.

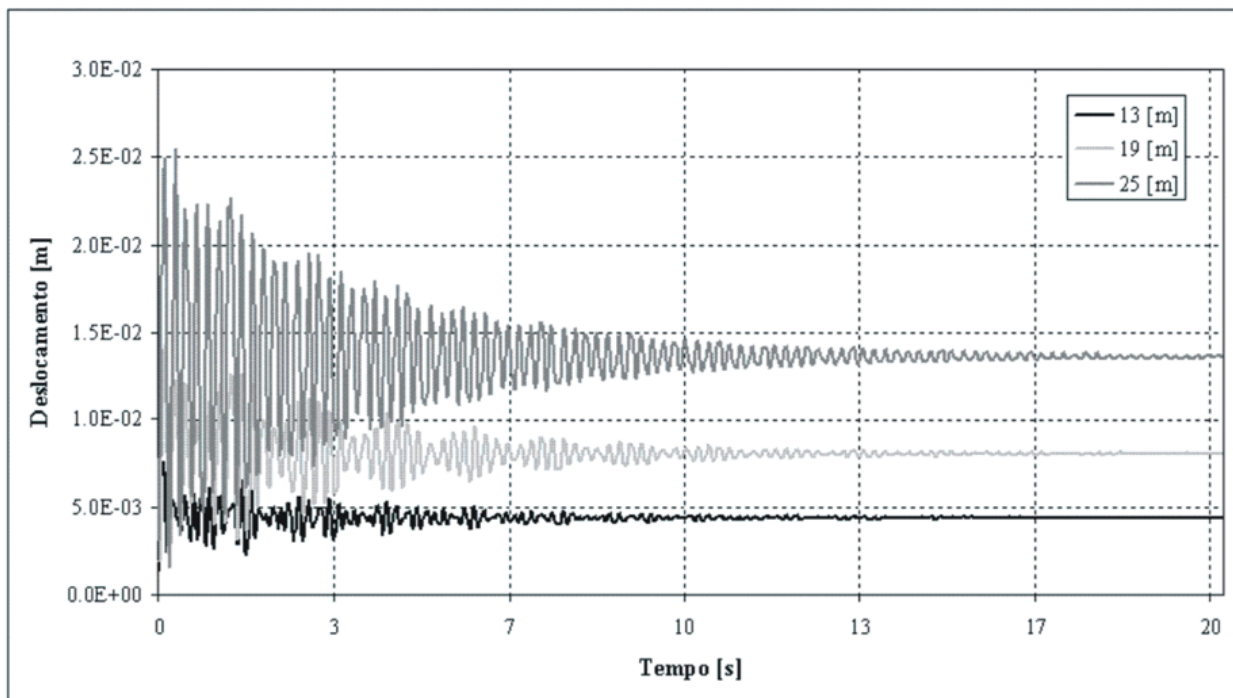


Figura 18: Reposta da estrutura em termos de deslocamento.

CONCLUSÕES

Neste trabalho se realizou uma análise dinâmica de uma torre metálica treliçada estaiada localizada no campus da Universidade de Passo Fundo, RS, Brasil. Esta torre serve de estação meteorológica registrando a velocidade do vento a diferentes alturas sobre a mesma. Foi feito um modelo completo que representasse todas as características geométricas e físicas da torre real.

Uma importante contribuição foi a abordagem de como avaliar numericamente a excitação dinâmica do vento sobre a torre, através da simulação de um registro de vento a partir de sua componente média medida experimentalmente *in loco* e do espectro de sua componente flutuante.

Os resultados da análise numérica em comparação com os valores medidos experimentalmente foram satisfatórios. Isso pode ser comprovado, apesar de não apresentado no trabalho, através da comparação entre as frequências naturais medidas experimentalmente e as obtidas através do modelo numérico. Outro indicativo disto são os valores experimentais obtidos como deslocamentos horizontais máximos, de aproximadamente 18mm.

O gráfico da resposta da torre em termos de deslocamento mostra que a estrutura sofre deslocamentos no início do tempo de análise. Após aproximadamente 20s a estrutura deixa de oscilar fazendo com que a excitação aplicada seja equivalente a uma carga estática. Isso provavelmente acontece devido ao alto conteúdo de frequência da componente flutuante, definida nos carregamentos da tormenta EPS e também pela esbeltez do modelo, fazendo com que a resposta da estrutura não flutue em função dos carregamentos aplicados. Levando em consideração essa ausência de oscilação na resposta da estrutura pode-se considerar satisfatório o cálculo da resposta somente através da análise estática.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), Brasil.

REFERÊNCIAS

- ANSYS, Inc. (2006). “Ansys Educational Resources - Online Tutorials”, disponível em: <http://www.ansys.com/academic/academic-ed-tutorials-popup.asp>. Acessado em janeiro de 2009.
- Blessmann, J. (1995). “*O Vento na Engenharia Estrutural*”, Editora da Universidade UFRGS, Porto Alegre, Brasil.
- CIMAF, (1995). “Companhia Industrial e Mercantil de Artefatos de Ferro”, Catálogo C-10, Manual técnico.
- Davenport, A. G. (1961). “The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds”, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, London, Vol. 87, No. 372, pp. 194-211.
- Davenport, A. G. (1979). “Gust response factors for transmission line loading”, International Conference on Wind Engineering, Colorado State University, Pergamon Press.
- Harris, R. I. (1968). “Measurement of wind structures at heights up to 598ft above ground level”, *Symposium on Wind Effects on Buildings and Structures*, Loughborough University of Technology, Vol. 1, Paper 1, Loughborough, UK.
- IASS (1981). “Recommendation for the design and analysis of guyed masts”, International Association for Shell and Spatial Structures, Madrid, Spain.
- IEC (2003). “Design Criteria of Overhead Transmission Lines”, International Electrotechnical Commission, IEC60826/2003.
- Loredo-Souza, A. M. (1996). “The Behavior of Transmission Lines Under High Winds”, PhD Thesis, University of Western Ontario, London, Ontario, Canada.
- Loredo-Souza, A. M., Davenport, A. L. e Paluch, M. J. (2005). “Determinação da resposta de torres de transmissão à ação do vento”, *Construção Metálica - Estudos e Pesquisas Recentes*. Passo Fundo: Editora Universidade de Passo Fundo, pp. 46-66.
- Miguel, L. F. F., Riera, J. D., Kaminski Jr., J.; Fadel Miguel, L. F. e Menezes, R. C. R. (2007). “Model uncertainty in the definition of EPS wind load in transmission line design”, ICWE12 - *Twelfth International Conference on Wind Engineering*, Cairns, Austrália.
- NBR 6123 (1988). “Forças devidas ao vento em edificações”, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

- Shinozuka, M. e Jan, C. M. (1972). "Digital simulation of random process and its applications", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 25, No. 1, pp. 111-118.
- Zampiron, I. (2008). "Avaliação das Características e Desempenho de Estruturas para Telecomunicações Visando o Projeto de Novo Modelo de Torre Autoportante", Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, Brasil.

