

## Estimativa da vida útil à fadiga de uma torre metálica sob ação do vento

(Fatigue life estimates for a telecommunication tower under wind action)

Ronaldo C. Battista

*Ph.D., Prof. Titular, COPPE/UFRJ. E-mail: battista@coc.ufrj.br*

Eliane M. L. Carvalho

*D.Sc., Prof. Adjunto, UFF. E-mail: eliane@coc.ufrj.br*

Michèle S. Pfeil

*D.Sc., Prof. Adjunto, COPPE-POLI/UFRJ. E-mail: mpfeil@coc.ufrj.br*

Wendell D. Varela

*D.Sc., Prof. Adjunto, FAU/UFRJ. E-mail: wendell@coc.ufrj.br*

### Resumo

A monitoração de uma torre metálica, típica do setor de telecomunicações, sob ação de ventos de baixa velocidade, registrou significativas oscilações e alertou para o risco de iniciação de fraturas em detalhes de ligações soldadas. O comportamento estrutural foi analisado a partir dos registros experimentais de aceleração e deformação, além de velocidade e direção do vento. Esse trabalho apresenta os resultados mais relevantes da monitoração dinâmica e a estimativa de vida útil à fadiga de detalhes de ligações soldadas efetuada por meio da regra de Palmgren-Miner, utilizando-se o algoritmo “rainflow” para contagem do número de ciclos. Para aumentar a reduzida vida útil encontrada nessa estimativa e para atenuar as oscilações da torre, foi projetado e instalado um sistema de controle dinâmico pendular, o qual teve sua eficiência demonstrada.

**Palavras-chave:** Fadiga, vento, controle dinâmico, vibrações, torre.

### Abstract

*The monitoring of a typical telecommunication tower under wind action of low mean velocity revealed significant amplitudes of oscillation, and raised concern about the risk of fracture initiation on welded joints. The structural behavior was analyzed with the aid of the experimentally obtained acceleration and strain signals plus measurements of the wind velocity and direction. This paper presents the results of the dynamic monitoring and the estimation of fatigue life, which was performed by using the Palmgren-Miner rule and the rainflow algorithm for cycles counting. To extend the predicted fatigue life and to attenuate the tower oscillations, a dynamic control system was designed and successfully installed, proving its efficiency.*

**Keywords:** Fatigue, wind, control system, vibrations, tower.

## 1. Introdução

Torres tubulares de seção circular em aço (chamadas também de postes) têm sido bastante utilizadas no setor de telecomunicações, especialmente o de telefonia móvel. Como uma imposição funcional, tais torres são altas e esbeltas (altura média em torno de 40 m), sendo, em geral, susceptíveis a vibrações excessivas induzidas pela ação do vento.

Possuindo um caráter essencialmente aleatório, a ação das forças devidas ao vento turbulento impõe a esse tipo de estrutura ciclos de variações de tensões, o que, a depender dos tipos de detalhes estruturais adotados, pode resultar em reduzidos tempos de vida útil para a estrutura.

O comportamento da estrutura de um poste de telecomunicações com 40 m de altura foi investigado experimentalmente por meio de medições da sua resposta dinâmica sob excitações mecânica e de vento (Battista, 2003a). Verificou-se que, para ação de vento com baixa velocidade média e de grande frequência de ocorrência na região, o poste apresentou significativas amplitudes de oscilação e severas variações de tensões em certos detalhes de ligações soldadas. Esse comportamento é indicativo de alto risco de iniciação de fraturas por fadiga nesses detalhes.

A variação das tensões obtidas dos registros experimentais de deformações foi utilizada para estimar a vida útil à fadiga através da regra de Palmgren-Miner, utilizando-se o algoritmo “rainflow” para contagem do número de ciclos. O cálculo do número de eventos da ação do vento por unidade de tempo em cidade costeira na região dos lagos fluminense, onde se encontra instalado o poste, foi efetuado a partir dos histogramas de frequência de ocorrência conjunta de velocidade e direção de vento com base em dados colhidos na bacia de Campos, Rio de Janeiro.

Estimada a pequena vida útil à fadiga do poste, um sistema de controle passivo do tipo pêndulo espacial foi projetado e instalado (Battista, 2003b), para atenuar as amplitudes de deslo-

camentos e variações de tensões e, por conseguinte, aumentar a vida útil da estrutura.

## 2. Descrição da estrutura

A torre de telecomunicações em questão, ilustrada na Figura 1, apresenta seção circular variável ao longo da altura e espessura de chapa (aço A36) constante de 4,8 mm, sendo constituída por módulos de seção constante de 5 m de comprimento, interligados por flanges anulares e parafusos de alta resistência ASTM A325. Discriminam-se, na Tabela 1, as dimensões gerais de cada módulo:

$t$  - espessura da chapa do módulo.

$d_{ext}$  - diâmetro externo do módulo.

$z$  - cota.

No topo da torre, há uma plataforma circular, na qual estão fixadas as antenas. Os cabos condutores, ao longo do poste, formam a esteira vertical fixada ao poste por meio de cantoneiras.

Os módulos tubulares são ligados por juntas flangeadas anulares. As chapas anulares de flange de cada dois módulos consecutivos não estão em contato entre si, encontrando-se afastadas por duas porcas, conforme ilustrado em um detalhe da Figura 1. A chapa do flange superior é externa ao tubo, enquanto a chapa do flange inferior se localiza no interior do tubo. As únicas exceções são as ligações dos dois módulos superiores que têm o mesmo diâmetro e, por isso, as ligações flangeadas são convencionais.

A torre está ancorada em um bloco de concreto armado com 1,95 m de largura, o qual apresenta, em sua base, uma placa quadrada de 5,50 m de largura e 45 cm de espessura.

A Figura 2 mostra a ligação do módulo de base (M1) com a fundação; a chapa do módulo tubular é soldada a um flange anular recortado para receber os chumbadores ancorados no concreto da fundação.

## 3. Medições experimentais dinâmicas

O comportamento da estrutura da torre de telecomunicações foi investigado, experimentalmente, por meio de medições da resposta dinâmica desse poste sob excitação mecânica e de vento.

A Figura 3 mostra, esquematicamente, o plano global de instrumentação da estrutura. Nessa figura, estão ilustradas as posições e direções dos sensores para medição de acelerações por meio de microacelerômetros resistivos instalados no topo do poste e no bloco de fundação; a medição de deformações, através de extensômetros elétricos de resistência ao longo do perímetro na base do poste; e as medições da variação da velocidade e direção do vento (anemômetro) acima do topo da torre. Essa figura ilustra, também, por meio de detalhes, as posições e direções relativas dos vários sensores segundo os eixos cardeais N-S e L-O.

A Figura 2 mostra um detalhe de dois extensômetros (EB8 e EB8A) instalados na base do poste, alinhados numa região de forte concentração de tensões: junto à borda superior de uma chapa rígida, soldada à parede da casca e do flange anular, para suporte do cabo de aterramento elétrico. Situação idêntica ao EB8 pode ser descrita para o extensômetro EB9.

Tabela 1 - Dimensões dos módulos da torre.

Módulo	$z$ (m)	$d_{ext}$ (mm)	$t$ (mm)
M1	0 – 5	1286	4.8
M2	5 – 10	1138	4.8
M3	10 – 15	990	4.8
M4	15 – 20	842	4.8
M5	20 – 25	728	4.8
M6	25 – 30	614	4.8
M7	30 – 35	500	4.8
M8	35 – 40	500	4.8

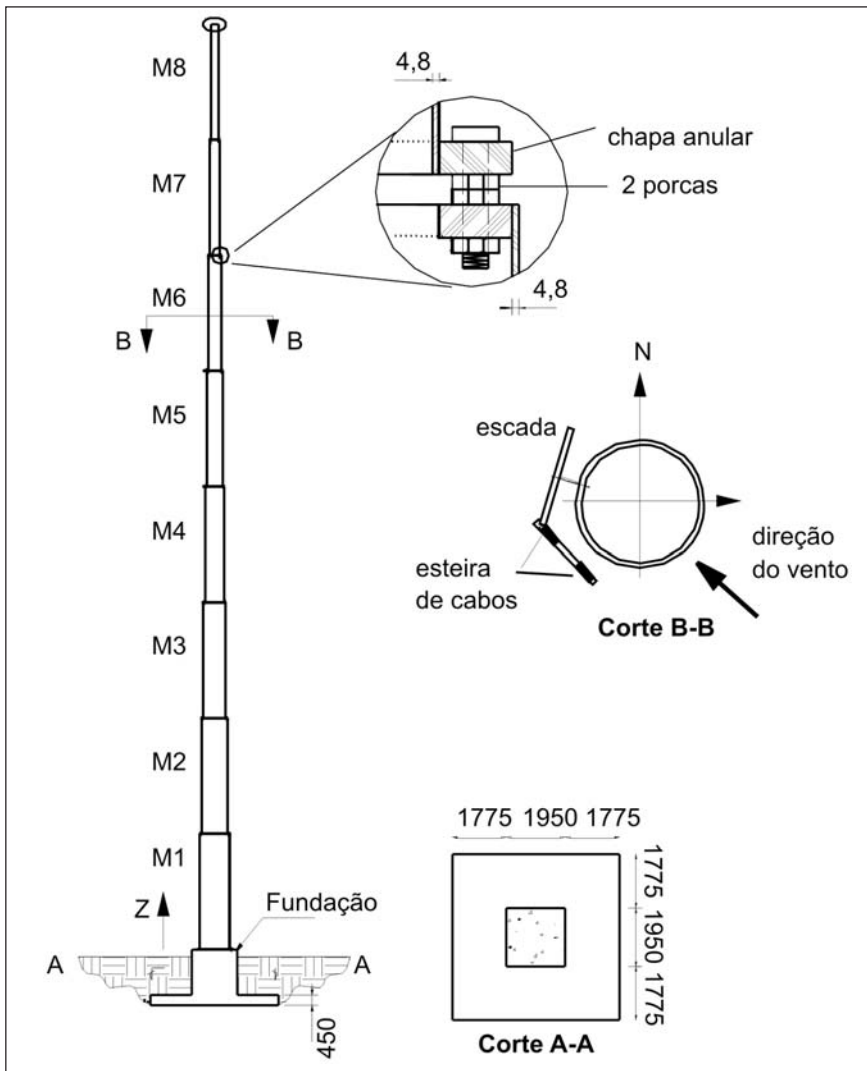


Figura 1 - Torre para telecomunicações: Elevação e detalhes típicos.

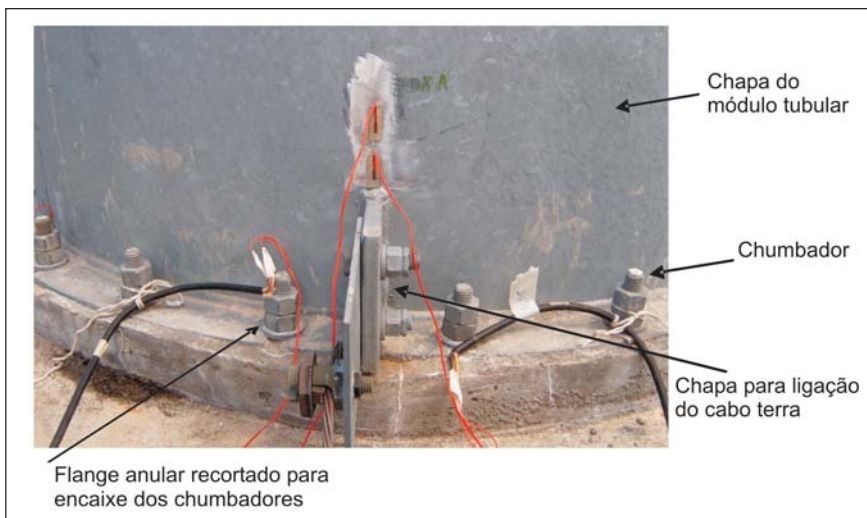


Figura 2 - Detalhe da ligação do módulo M1 com a fundação; vêem-se, também, os extensômetros elétricos de resistência - eers, denominados EB8 e EB8A, instalados numa seção próxima à base do poste, acima de uma chapa para ligação do cabo terra.

Foram realizadas sete campanhas de medições de oscilações dinâmicas induzidas pelo vento.

A Tabela 2 apresenta, para as diversas campanhas de medições, as velocidades médias, as direções do vento e os valores das amplitudes máximas de deslocamento horizontal, no topo da torre, oscilando sob ação de ventos fracos incidentes com proveniência marcante do quadrante sudeste. O anemômetro foi instalado para zero grau coincidente com a direção norte. O ângulo da direção de vento é marcado a partir dessa referência, sendo positivo, quando no sentido horário. O anemômetro foi posicionado, no topo da torre, a uma altura de 45,0 metros acima do nível do terreno.

A Tabela 3 apresenta um resumo dos modos e frequências naturais de vibração obtidas da aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT - Fast Fourier Transform) aos sinais experimentais de aceleração.

A Figura 4 mostra o espectro de frequências obtido da resposta experimental do acelerômetro AC2 (campanha de medição 6), para a estrutura da torre sob ação do vento. Observa-se que estas respostas são caracterizadas pela combinação dos dois primeiros modos de flexão, respectivamente com frequências de oscilações  $f \sim 0,4$  Hz e  $f \sim 1,95$  Hz, sendo o primeiro modo dominante. Essa campanha foi realizada sob vento com velocidade média de 34,2 km/h e flutuações entre 10 e 50 km/h apresentadas no registro de 10 minutos, ilustrado na Figura 5. A direção média do vento, proveniente do quadrante S-E, foi de 131 graus com o Norte. A intensidade de turbulência registrada foi de 24%, compatível com terreno de categoria IV da Norma NBR 6123, forças devidas ao vento em edificações (Blessmann, 1995).

A Figura 6 mostra as respostas dinâmicas da estrutura sob ação de vento em termos de tensão x tempo, obtidas com os extensômetros EB1, EB8 e EB8A (ver Figura 3, para locação dos extensômetros), para a campanha de medição 06. Observa-se que as tensões, na parede da casca cilíndrica, junto ao cordão de

solda com o flange anular da base do poste (EB1), têm variações ao longo do tempo, que atingem  $\Delta\sigma = 40$  MPa (i.e., -20 a +20 MPa), para um vento turbulento com velocidade média baixa  $v = 30$  a 35 km/h. Variações ainda mais severas de tensões são observadas nos pontos de concentração de tensões (EB8), alcançando valores  $\Delta\sigma = 80$  MPa a 90 MPa. A comparação entre as respostas obtidas com os extensômetros EB8 e EB8A ressalta a forte concentração de tensão provocada pela chapa para suporte de cabo terra (ver Figuras 2 e 3 para localização dos extensômetros).

A Figura 7 apresenta, para essa mesma campanha de medição, as respostas de flutuações de deslocamentos horizontais, no topo do poste, obtidas por integração das respostas dos sensores AC1 e AC2. Observa-se que as amplitudes dos deslocamentos alcançaram valores de  $\pm 35,0$  mm (ou pico a pico de 70,0 mm), associados aos dois primeiros modos de oscilação por flexão do poste.

Observa-se, também, na Figura 7, que as maiores amplitudes de oscilação se deram na direção normal à direção predominante do vento (SE). Isto pode ser explicado pela presença da esteira de cabos e sua posição em relação à seção circular do poste e à direção do vento (ver corte BB da Figura 1). Sem a presença de apêndices, um poste de seção circular estaria sujeito somente a forças de arrasto devidas ao vento turbulento. A seção do conjunto poste + esteira de cabos não é simétrica em relação à direção do vento e, por isso, surge uma resultante de força lateral flutuante.

O fenômeno de desprendimento cancelado de vórtices foi descartado como origem das oscilações na direção transversal ao vento, após verificar-se que as velocidades críticas associadas aos dois primeiros modos de vibração e para os diâmetros dos módulos superiores estão fora da faixa de velocidades registradas. Além disso, a presença de apêndices à seção circular do poste e a turbulência já seriam suficientes para atenuar, ou mesmo impedir, a ocorrência do fenômeno.

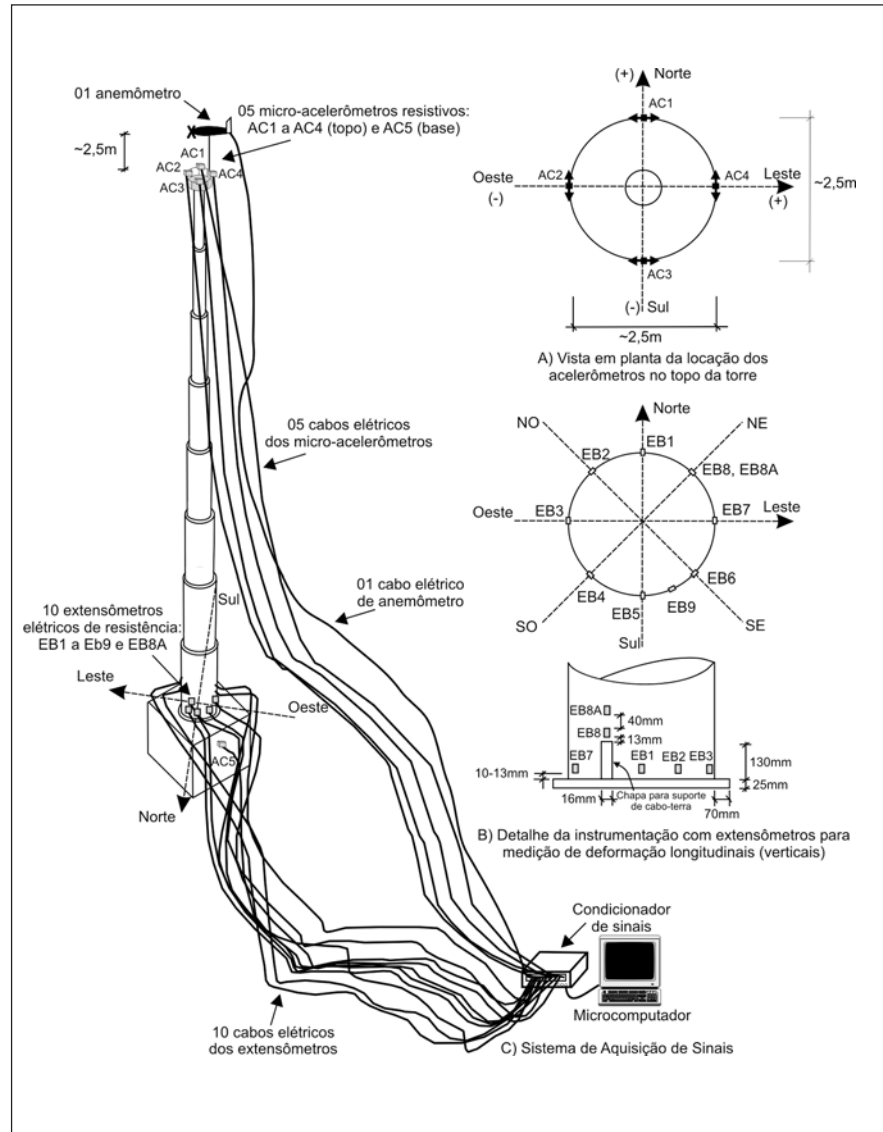


Figura 3 - Representação esquemática da instrumentação da estrutura.

Tabela 2 - Resumo das velocidades e direções médias do vento e das amplitudes máximas de deslocamento no topo da torre para as diversas campanhas de medição.

Campanha de medições	Vento		Deslocamento máximo (mm)
	Velocidade média (km/h)	Direção média (graus)	
1	22,57	142,75	19,8
2	29,01	141,05	22,6
3	30,31	131,09	32,4
4	28,51	128,20	29,6
5	31,72	128,81	29,7
6	34,19	130,95	37,8
7	30,84	131,37	31,8

## 4. Análise de fadiga da estrutura

As estimativas da vida útil à fadiga das juntas e detalhes soldados críticos da estrutura do poste foram feitas fazendo uso dos registros experimentais das variações de deformações (tensões) em pontos de concentração de tensões próximos à junta soldada circunferencial da casca cilíndrica do módulo M8 com o flange anular da base do poste, conectando ao pedestal do bloco de fundação por meio de parafusos/chumbadores.

Estimativa de vida útil à fadiga foi feita para dois pontos críticos em regiões de concentração de tensões das juntas soldadas. Observa-se que foram selecionados, como pontos críticos, aqueles das juntas próximas às locações dos extensômetros EB1 e EB8 (ver detalhes (b) da Figura 3). A locação de EB1 representa todas as outras posições próximas da junta soldada chapa - flange anular.

O cálculo da vida útil à fadiga pode ser determinado pela regra de Miner-Palmgren, a qual estabelece que a porcentagem de danos provocada por uma quantidade de ciclos de variação de tensão é acumulada linearmente. Assim, o dano total causado pela ação dos eventos de vento turbulento, para as diversas faixas de variação de tensão, é determinado pelo somatório de todos os danos parciais - Eq. (1):

$$D = \sum_{j=1}^m \frac{n_j}{N_j} \leq 1 \quad (1)$$

Tabela 3 - Freqüências e períodos experimentais associados aos modos de vibração por flexão da torre num plano vertical N-S.

Modos de vibração por flexão	Experimental	
	Período, T(s)	Freqüência(Hz)
1º modo	2,63/2,50	0,38/0,40
2º modo	0,51/0,49	1,95/2,05
3º modo	0,21/0,20	4,87/4,94

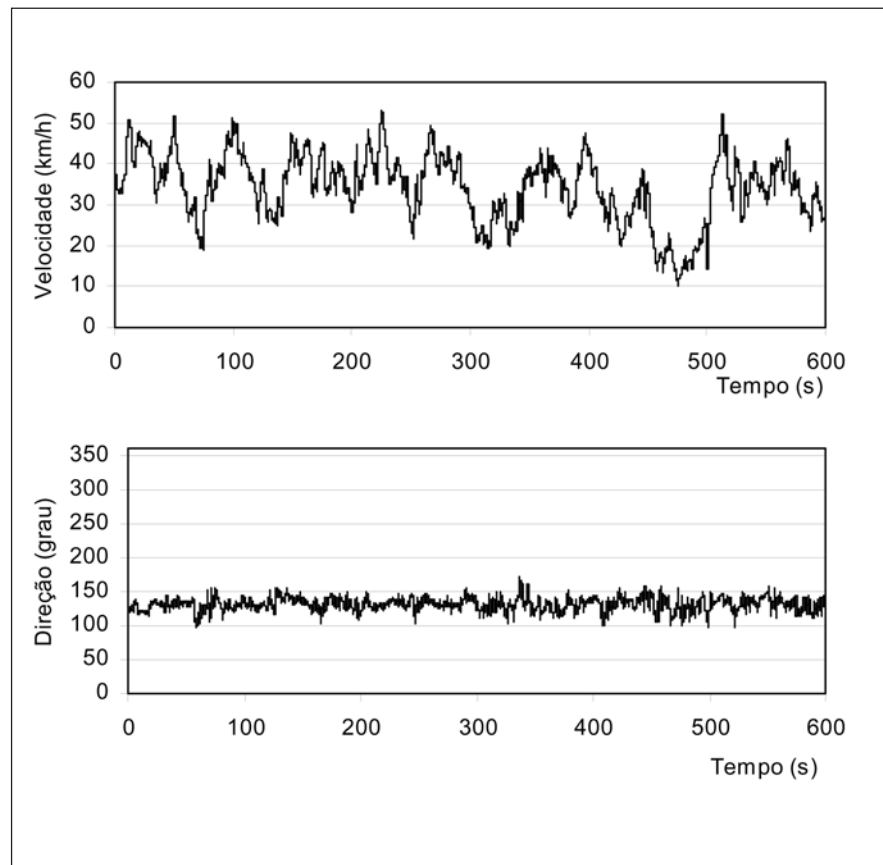


Figura 5 - Medidas experimentais de velocidade e direção do vento versus tempo, obtidas com anemômetro posicionado a 2,5 metros acima da torre (Figura 2) durante a campanha de medições nº 6 (Tabela 2).

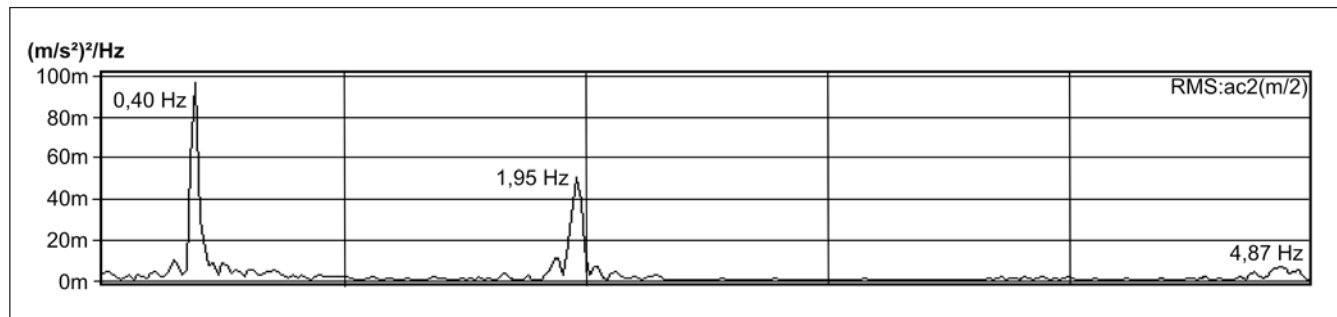


Figura 4 - Espectro de freqüências em termos de aceleração rms para a torre sob ação de vento.

onde  $n_j$  é o número de ciclos de uma determinada faixa de variação de tensão  $\Delta\sigma$ ,  $N_j$  é o número de ciclos necessário para ocorrer a fratura sob ação de uma variação de tensão constante  $\Delta\sigma$ , obtido das curvas experimentais S-N.

Assim, o tempo de vida útil da estrutura, de acordo com a unidade de referência adotada, é definido pelo inverso do dano total:

$$T = \frac{1}{D} \quad (2)$$

As curvas S-N são determinadas, essencialmente, através da análise estatística dos dados experimentais de ensaios em peças submetidas a variações de tensões. Com esses dados, constrói-se um gráfico em escala logarítmica que resulta numa relação linear entre  $\text{Log } \Delta\sigma$  e  $\text{Log } N$ , dada por:

$$\log_{10}(N) = \log_{10}(a) - d \cdot \log_{10}(s) + m \cdot \log_{10}(\Delta\sigma) \quad (3)$$

onde, além de  $\Delta\sigma$  e  $N$  já definidos,  $s$  é o desvio-padrão abaixo da média;  $d = 1$  ou  $2$ , correspondentes a, aproximadamente, 16% e 2,5% de probabilidade de falha (adotado  $d=1$ );  $\log_{10}(a) = 12,09$ ,  $m = -3,0$  e  $\log_{10}(s) = 0,2279$ , para uma junta Classe F2 (Gurney, 1976), sendo a Classe F2 aquela de uma junta soldada (por um único lado) ao longo do perímetro da ligação por superposição de uma casca cilíndrica, numa chapa de flange anular; tal como nas juntas soldadas circunferenciais existentes nas bordas superior e inferior dos módulos M1 a M8.

Na presente análise de fadiga, os números de ciclos  $n_j$ , para distintas faixas de tensões  $\Delta\sigma_j$ , foram estimados por meio da aplicação de um algoritmo numérico de contagem de ciclos (RAINFLOW) (Branco, 1986) referentes às amostras experimentais relacionados aos históricos de variação de tensões nos pontos críticos considerados.

Na estimativa de vida útil à fadiga de uma estrutura, além da magnitude da variação de tensões em um ponto, importa, também, o número de ciclos. Este, por sua vez, é dependente do número de

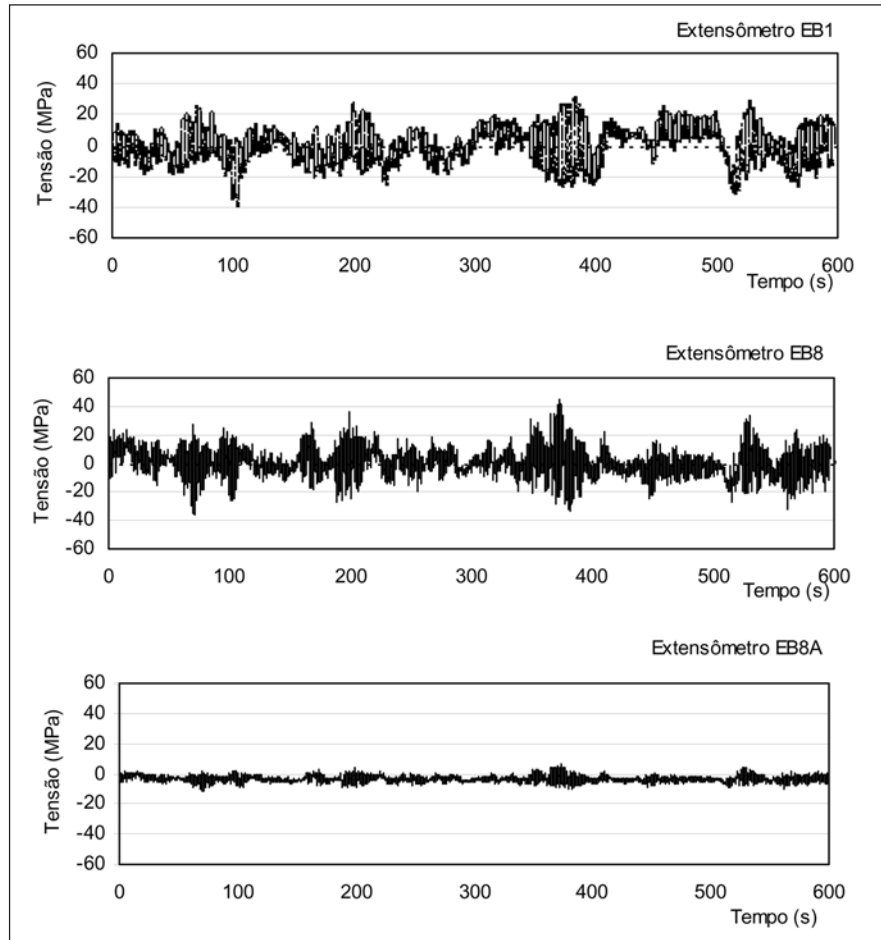


Figura 6 - Respostas experimentais dinâmicas da estrutura à excitação de vento (campanha nº 6), em termos de tensão x tempo, obtidas com os extensômetros EB1, EB8 e EB8A.

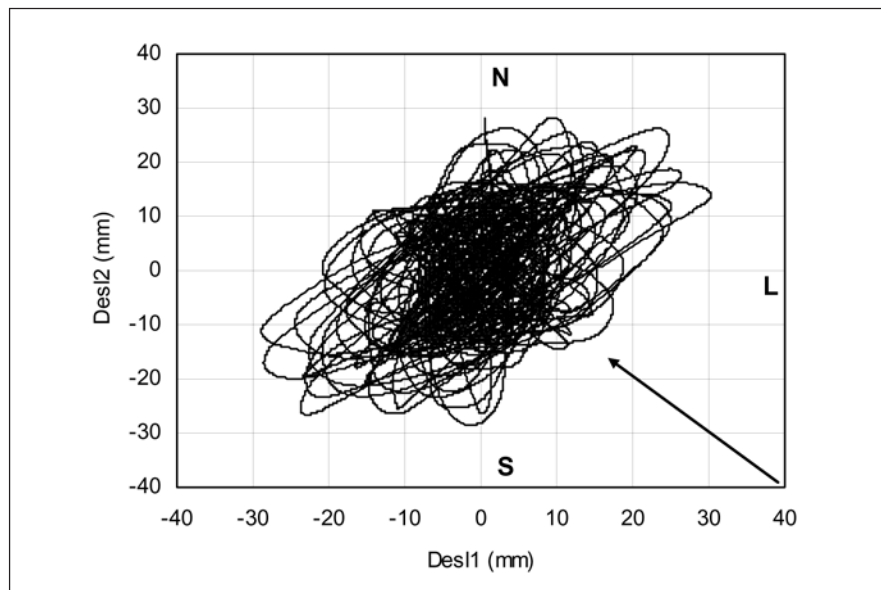


Figura 7 - Respostas experimentais dinâmicas da estrutura à excitação de vento (campanha nº 6, Tabela 2), em termos das flutuações de deslocamentos horizontais, no topo do poste, obtidas com os sensores AC1 e AC2 (ver Figura 2).

vezes que o evento se repete. Para a estrutura em questão, situada em cidade costeira da região dos lagos fluminense, foram utilizados os dados relativos às frequências de ocorrência conjunta de velocidades e direções dos ventos resultantes da campanha de medições realizadas pela Petrobras, no campo de Enchova, na bacia de Campos, durante um período de cerca de três anos. A Figura 8a apresenta a porcentagem de ocorrência por direção do vento, enquanto que a Figura 8b apresenta, para a direção com maior frequência de ocorrência (Nordeste), a porcentagem de ventos de acordo com a faixa de intensidade de velocidade média em 10 min, na altura de referência  $z = 10m$ .

A Tabela 4 apresenta um resumo das estimativas de vida útil à fadiga dessas ligações soldadas, considerando ou não os prováveis fatores de concentração de tensões FCT, já que os extensômetros são instalados sempre a uma certa pequena distância (cerca de 10 mm) do pé do cordão de solda (Ver Figura 3b).

Os valores elevados das variações de tensões (ver Figura 6) são responsáveis pela severidade das estimativas de vida útil à fadiga dessas juntas e detalhes soldados. Para a locação EB8, o problema foi resolvido, executando-se um corte na base da chapa para suporte do cabo terra, de modo a desligá-la do flange anular (ver a Figura 2).

### 5. Sistema de controle passivo

Dispositivos mecânicos de controle dinâmico foram, especialmente, projetados e instalados (Battista,2003b), para reduzir as amplitudes de oscilação por flexão da torre e, conseqüentemente, das variações de tensões em pontos críticos da estrutura. Com isto será estendida a vida útil à fadiga das juntas e detalhes soldados e das ancoragens da base do poste.

O sistema de controle dinâmico passivo instalado é constituído por um disco planar elástico não-linear (Battista et

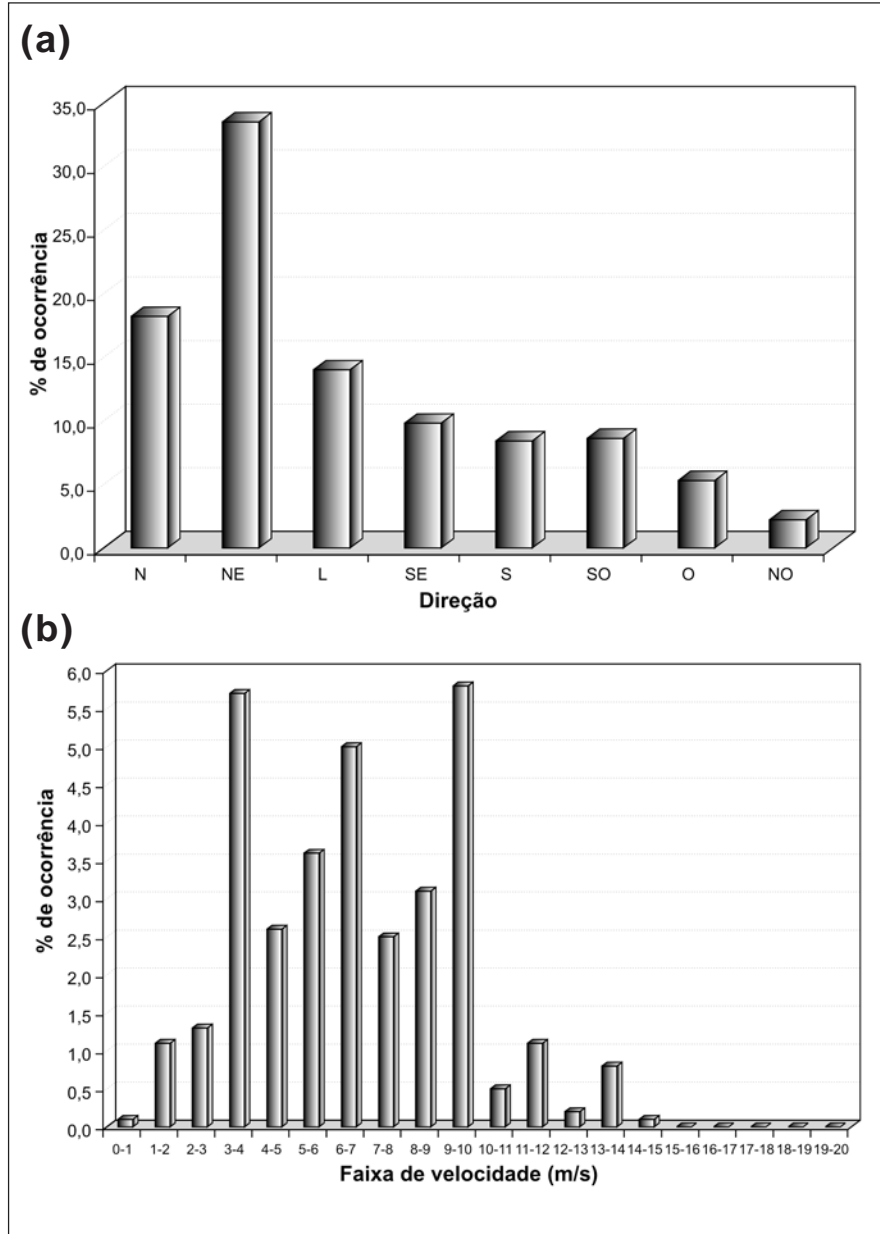


Figura 8 - Distribuição percentual das ocorrências de ventos. (a) Em várias direções e quadrantes. (b) Por faixas de magnitude da velocidade média para direção Nordeste (NE).

Tabela 4 - Estimativas de vida útil à fadiga.

Locação <sup>(*)</sup> / Junta Soldada	Curva S-N	Vida Útil (anos)	
		FCT = 1,0	FCT ≠1,0
EB1/filete	F2	6,7	5,1 (p/FCT = 1,10)
EB8	F2	3,2	2,1 (p/FCT = 1,15)

(\*) para locação dos eer's ver Detalhe (b) da Figura 3.

al, 2002) e por um pêndulo espacial não-linear (Pinheiro, 1997), que se mostraram bastante eficientes para atenuar oscilações (em baixa frequência) por flexão do poste, induzidas pela ação de vento. O princípio de funcionamento desses sistemas é o de desenvolver movimento contrário ao movimento da estrutura, de maneira que as forças de controle resultantes reduzam as forças de inércia geradas pela excitação externa.

Para o projeto desses dispositivos, é necessário se conhecerem as propriedades dinâmicas da estrutura (massa, amortecimento e rigidez modais), bem como as características das forças de excitação, no caso, geradas pelo vento.

Os detalhes do projeto, da instalação e das medições, para avaliação do desempenho desse sistema de controle, estão contidos em documento confidencial (Battista, 2003b), mas alguns aspectos e fotos podem ser encontrados em [www.controllato.com.br](http://www.controllato.com.br).

Pode-se relatar, aqui, que a eficiência desses dispositivos de controle dinâmico ficou demonstrada após a monitoração da torre controlada; o relato dessa etapa de solução do problema será objeto de um novo artigo a ser publicado num futuro breve.

## 6. Conclusões

A monitoração de uma torre metálica cilíndrica circular de 40m de altura sob ação de vento registrou oscilações excessivas e serviu de alerta para o risco de iniciação de fraturas em detalhes geométricos de ligações soldadas.

Os resultados experimentais obtidos demonstraram, claramente, o efeito indesejável, sob ações dinâmicas, das condições de apoio existentes, especificamente da ligação soldada/parafusada da base do poste com o bloco de concreto armado da fundação.

Observou-se que, mesmo para ventos com as baixas velocidades observadas nas campanhas de medição -  $V = 34,2$  km/h para 45 m de altura acima do terreno - as variações de tensões, nas regiões de concentração de tensões e próximas à junta soldada circunferencial, na base do poste, atingiram valores altos, entre 40 e 90 MPa. Esses valores elevados das variações de tensões são responsáveis pela severidade das estimativas de vida útil à fadiga dessas juntas e detalhes soldados.

A iniciação de fraturas, nesses pontos críticos de estruturas de aço, poderia levar à ocorrência de propagação e aumento de abertura de fraturas e, até mesmo, à perda da segurança estrutural e ao tombamento do poste.

Dispositivos mecânicos de controle dinâmico instalados na torre reduziram as amplitudes de oscilação por flexão e, conseqüentemente, das variações de tensões em pontos críticos da estrutura, o que aumentou, em muitos anos, a estimativa de vida útil à fadiga das juntas e detalhes soldados e das ancoragens da base do poste.

## 7. Referências bibliográficas

- BATTISTA, R.C. *Avaliação da estabilidade da estrutura do poste metálico para telecomunicações*. Rio de Janeiro: Fundação COPPETEC/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003a. (Relatório Técnico PEC-4317).
- BATTISTA, R.C. *Atenuação das oscilações aeroelásticas de poste metálico para telecomunicações*. Rio de Janeiro: Fundação COPPETEC/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003b. (Relatório Técnico PEC-4317).
- BATTISTA, R.C., RODRIGUES, R.S., PFEIL, M.S. Dynamic behavior and stability of transmission line towers under wind forces. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, Elsevier, Nov. 2002.
- BLESSMANN, J. *O vento na engenharia estrutural*. Editora da Universidade UFRGs, 1995. 166p.
- GURNEY, T. R. Fatigue design rules for welded steel joints. The Welding Institute; Research Bulletin, p. 115-124, may 1976.
- PINHEIRO, M.A.S *Absorção pendular não-linear para redução de vibrações em torres esbeltas*. Rio de Janeiro: COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1997. (Tese de Mestrado)
- BRANCO et al. *Fadiga de estruturas soldadas*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbekian, 1986. [www.controllato.com.br](http://www.controllato.com.br) - acesso em outubro de 2006.

Artigo recebido em 27/11/2006 e aprovado em 28/11/2006.



REM - Revista Escola de Minas  
[www.rem.com.br](http://www.rem.com.br)