



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

ESTABILIDADE E CONTROLE AERODINÂMICO DA TORRE TELECOM DE BRASÍLIA

Ronaldo C. Battista^{1,2}, Redescar J.V. Rivero², Michèle S. Pfeil³

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro / Programa de Engenharia Civil – COPPE / redescar@coc.ufrj.br

²Controllato – Projeto, Controle e Monitoração de Estruturas / controllato1@gmail.com

³Universidade Federal do Rio de Janeiro / POLI – COPPE / mpfeil@coc.ufrj.br

Resumo

Projetada em 1958 pelo Eng. Paulo Fragoso, a estrutura treliçada metálica da Torre Telecom de Brasília com 192 metros de altura foi posta em pleno serviço em 1967 e, ao longo dos anos, um grande número de acessórios e antenas foi instalado no terço superior da torre, alterando a distribuição das massas concentradas e a magnitude das forças aerodinâmicas. O efeito de tais alterações foi avaliado por meio de modelo teórico-computacional 3D da estrutura, validado por medições experimentais dinâmicas da torre sob a ação do vento. As forças aerodinâmicas sobre a estrutura treliçada foram descritas com base em modelo matemático disponível na literatura técnica, levando em conta os perfis verticais de velocidade média e de turbulência do vento de acordo com a norma ABNT - NBR 6123. As forças aerodinâmicas sobre as antenas UHF e VHF incluíram nas suas expressões os coeficientes de arrasto obtidos de ensaios de modelos em escala reduzida em túnel de vento.

Resultados da análise aerodinâmica mostram que o grande número de antenas causa aumento considerável das forças de vento e conseqüente grande acréscimo dos esforços solicitantes. Mas, devido ao alto custo e dificuldades práticas de execução do reforço estrutural extensivo, uma solução alternativa foi proposta: a instalação de um sistema de controle dinâmico concebido e projetado exclusivamente para a estrutura em foco. Estudos realizados com auxílio de modelagem matemático-computacional demonstram que o controlador proposto reduz substancialmente as amplitudes dos deslocamentos e dos esforços solicitantes, eliminando a necessidade de reforço estrutural extensivo.

Palavras-chave: Aerodinâmica de torres; Estrutura metálica; Estabilidade e Controle dinâmico.

1 - Introdução

A estrutura treliçada de aço que caracteriza a Torre Telecom de Brasília tem dimensões e seções transversais variáveis ao longo da altura. Ao longo dos muitos anos em serviço, um número considerável de antenas e acessórios foram instalados no terço superior da sua altura, modificando a distribuição da massa e as forças exercidas pelo vento na estrutura.

Este artigo apresenta os resultados mais relevantes obtidos do estudo do comportamento aeroelástico e da estabilidade aerodinâmica da estrutura da torre, levando em conta as alterações mencionadas. O sistema estrutural e os principais aspectos relacionados com a instrumentação monitoração dinâmica são brevemente descritos.

O modelo computacional 3D é validado por meio de correlações entre valores teóricos e experimentais de acelerações e deslocamentos, assim como das frequências de vibração. O modelo matemático das forças

aerodinâmicas, produzidas por vento turbulento, atuando na estrutura da torre e nas antenas, leva em conta os perfis verticais da velocidade média do vento e da intensidade da turbulência, descritos de acordo com a norma brasileira NBR 6123 (ABNT, 1988). Os coeficientes de arrasto obtidos de ensaios em túnel de vento de modelos em escala reduzida de estruturas treliçadas com antenas VHF foram incluídos nas expressões matemáticas das forças aerodinâmicas (MARTÍN *et al*, 2016).

As respostas no domínio do tempo da estrutura da torre submetida à ação do vento obtidas com o auxílio do modelo computacional 3D são usadas para analisar a influência das antenas e os seus suportes no comportamento aerodinâmico e estabilidade da estrutura. Demonstra-se que as antenas existentes causam um acréscimo considerável das forças aerodinâmicas e consequente aumento das amplitudes de resposta. Duas alternativas para reestabelecer a condição requerida de segurança estrutural são brevemente discutidas: o reforço dos elementos estruturais e a instalação de dispositivos de controle dinâmico.

2 - Descrição Sumaria do Sistema Estrutural

A estrutura treliçada é composta por elementos sólidos e perfis tubulares de seção circular formando seções transversais que variam em forma e dimensões ao longo da altura. Os elementos que compõem a base da torre estão fixados no topo de uma edificação rígida de concreto armado cujas colunas têm seção trapezoidal dispostas em um perímetro circular, como ilustrado na Figura 1(a).

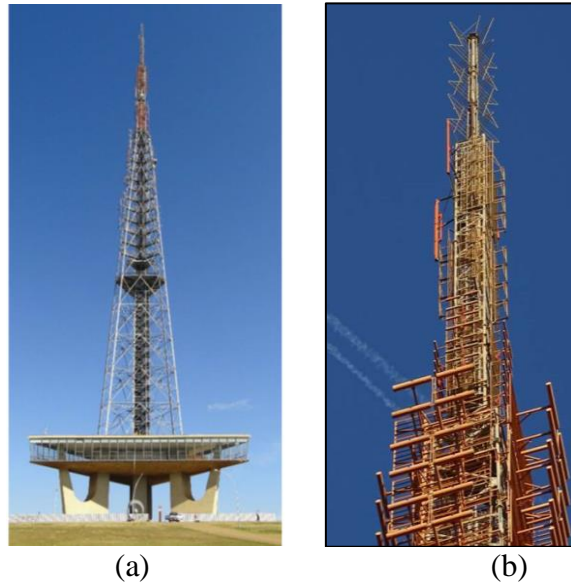
A estrutura da torre é composta por três módulos principais, como indicado na Figura 2(a). O primeiro módulo tem 120m de altura e a seção transversal tem forma hexagonal com dimensões variáveis ao longo da altura, como mostrado na Figura 2 (b-c). Neste módulo, as traves e diagonais são elementos tubulares enquanto as pernas são elementos sólidos. O segundo módulo tem 47m de altura e tem seção transversal retangular com dimensões variáveis ao longo da altura. O terceiro módulo, de grande esbelteza, tem 25m de altura e tem seção transversal quadrada de 1,0m x 1,0m composta por elementos tubulares. Por último, no topo da torre se encontra uma antena convencional tubular de aproximadamente 12m de altura. O segundo e o terceiro módulo da torre têm instaladas múltiplas antenas VHF na estrutura treliçada, além de um certo número de antenas de outros tipos, como pode ser visto na Figura 1(b). A localização dessas antenas foi determinada durante tarefas de manutenção e por meio de registros fotográficos.

3 - Breve descrição da monitoração dinâmica e resultados experimentais

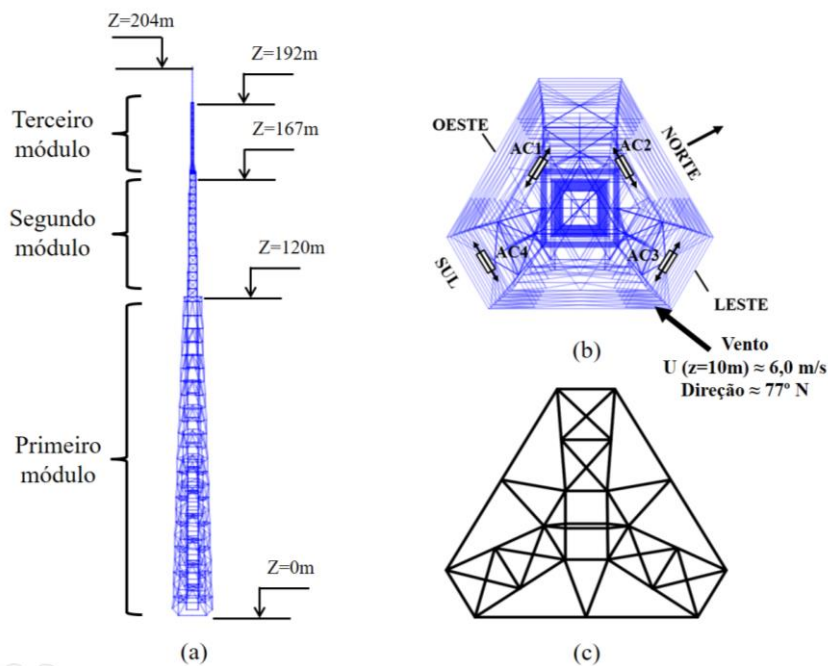
A Figura 2(b) ilustra o plano simplificado de instrumentação dinâmica com dois pares de acelerômetros instalados em direções ortogonais em uma plataforma localizada a 85m de altura medida desde a base da estrutura metálica. Os acelerômetros foram colocados diametralmente aos pares, a diferentes distâncias do eixo da torre para possibilitar o registro de acelerações associadas aos modos de vibração acoplados de flexão e torção. As acelerações horizontais foram registradas durante a campanha de monitoração dinâmica da estrutura da torre sob a ação do vento em baixa turbulência com velocidade média aproximada de 6,0m/s na direção mostrada na Figura 2 (b).

3.1 - Resultados das medições dinâmicas

As Figuras 3(a,b) mostram, respectivamente, para o par AC1 e AC3 (quase na direção transversal à incidência do vento), as densidades espectrais de potência (com picos marcados com valores das frequências de vibração), correspondentes aos dos registros com 30 minutos das acelerações.



Figuras 1 – Vistas (a) da torre e (b) das antenas instaladas no 2º e 3º módulos da torre.



Figuras 2 – (a) Modelo da estrutura da torre e módulos, (b) Acelerômetros instalados no nível de 85m para monitoração dinâmica, (c) Seção transversal típica do primeiro módulo.

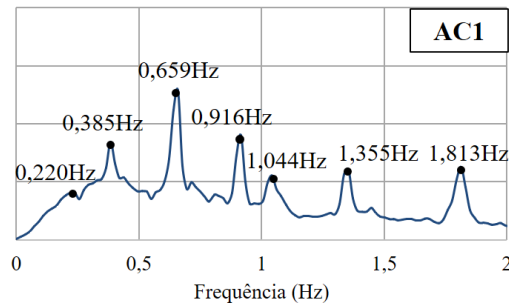
Taxas de amortecimento

Os valores médios das taxas de amortecimento associadas aos modos de flexão e torção foram estimados através da aplicação da técnica de decaimento logarítmico a amostras de trechos dos sinais experimentais de aceleração filtrados (técnica passa faixa) com amplitudes em decaimento, entre sucessivas rajadas de vento. As taxas de amortecimento associadas aos demais modos de vibração foram estimadas com dois pares de valores obtidos experimentalmente para frequências de vibração e taxas de amortecimento ξ (%) e segundo a hipótese de Raleigh para amortecimento viscoso proporcional à massa e a rigidez (Figura 4):

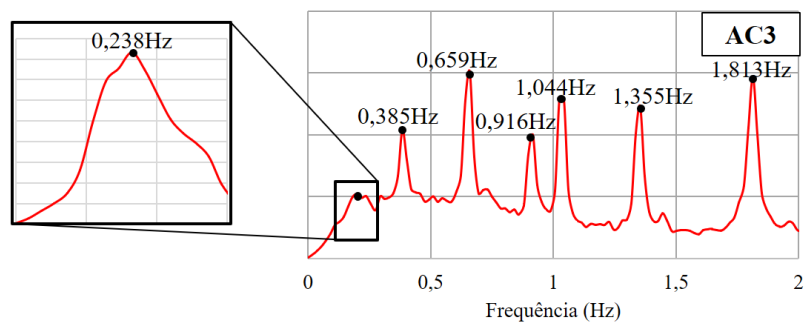
$$\xi = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2} \quad (1)$$



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual



(a) Acelerômetro AC1



(b) Acelerômetro AC3

Figuras 3(a,b) – Densidade espectral de potência das acelerações e frequências de vibração.

4 – Modelagem da estrutura

4.1 – Modelagem computacional 3D da estrutura

Um modelo computacional 3D da estrutura da torre (Figura 2.a) foi construído com o auxílio do programa SAP2000 v20. Os elementos tubulares e sólidos foram modelados com elementos de pórtico conectados por juntas rígidas. Massas concentradas foram adicionadas nos nós do segundo e terceiro módulos da estrutura para simular as massas das múltiplas antenas e estruturas de suporte.

4.2 - Validação do modelo computacional 3D

O modelo computacional 3D foi validado por meio da correlação dos resultados teóricos com os experimentais para frequências de vibração e, também, para acelerações horizontais e amplitudes de deslocamento referidas ao nível 85m acima da base da torre, ou 110 m acima do solo. Todos esses resultados são referidos a velocidade do vento de 6,0 m/s a 10 m de altura, na direção indicada na Figura 2(b). Os dados do vento utilizados na análise aerodinâmica são baseados em medições realizadas durante o intervalo de tempo da campanha de monitoração dinâmica por meio de anemômetros das estações meteorológicas próximas ao local da torre.

A Figura 5 mostra as três primeiras formas modais teóricas e a Tabela 1 apresenta para estes modos uma correlação favorável entre frequências teóricas e experimentais, validando o modelo computacional 3D para a análise aerodinâmica da estrutura.

Tabela 1 – Correlação entre valores teóricos e experimentais das frequências modais de vibração.

Nº do modo	Frequência de vibração		Taxa ξ (%)	Descrição da forma modal
	Teórica (Hz)	Exp. (Hz \pm 0,005Hz)		
1	0,231	0,238	4,6	1 ^{ro} modo de flexão
2	0,409	0,385	3,7	2 ^{do} modo de flexão
3	0,663	0,659	3,8	1 ^{ro} modo de torção



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

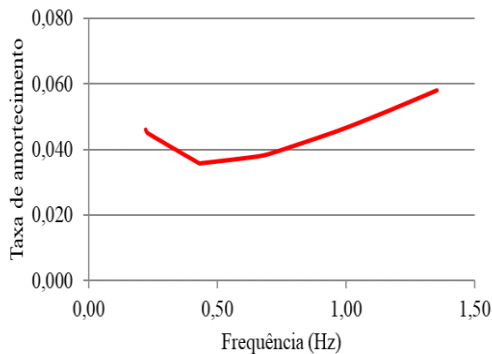


Figura 4 - Taxa de amortecimento x frequência

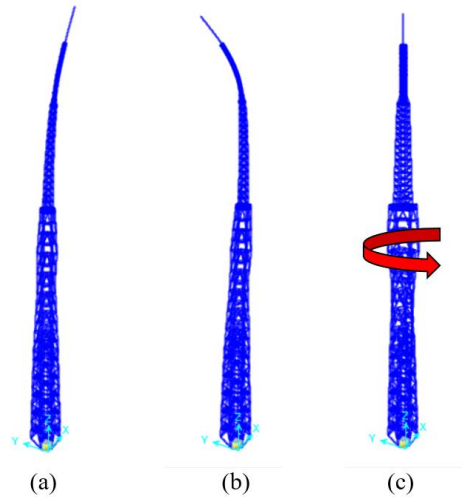


Figura 5 - Formas modais de vibração.
(a) 1^o flexão; (b) 2^o flexão; (c) Torção axial.

5. Modelo matemático das forças aerodinâmicas

As componentes da força aerodinâmica que atuam na direção de incidência do vento ao longo da altura do primeiro módulo da torre (Fig. 2.a) é descrita pela expressão:

$$F(z, t) = \frac{1}{2} \rho U^2 C_D A \quad (2)$$

onde $F(z, t)$ é a força atuante sobre a estrutura, sendo dependente da altura z e do tempo t ; ρ é a densidade do ar, C_D e A são o coeficiente de arrasto e a área de exposição, respectivamente. U é a velocidade do vento, que é composta pela velocidade média e o componente flutuante (Eq. 3), sendo $\overline{U(z)}$ a velocidade média em 10 minutos (Eq.4) e onde U_0 é a velocidade básica do vento, associada à velocidade média em 3s a 10 m de altura em terreno aberto.

$$U(z, t) = \overline{U(z)} + u(t) \quad (3) \quad \overline{U(z)} = 0,69 U_0 S_1 S_2 S_3 \quad (4) \quad S_2 = b \left(\frac{z}{10} \right)^p \quad (5)$$

Na (Eq.4), de acordo com a norma NBR 6123, S_1 é um fator topográfico, S_3 é o fator de importância e S_2 (Eq.5) representa o fator de rugosidade variável com a altura z , onde b e p são parâmetros dependentes da categoria do terreno. No local da torre o terreno pode ser classificado como aberto ou urbano (Categorias de rugosidade II e IV segundo a NBR 6123), dependendo da direção do vento. As respostas aeroelásticas nos estados limite de serviço (ELS) e último (ELU) foram obtidas em termos de deslocamentos. O perfil vertical de velocidade média $U(z)$, definido com os parâmetros dados na Tabela 2, foi utilizado para modelagem das forças aerodinâmicas $F(z, t)$.

Tabela 2 – Parâmetros para definição do perfil vertical de velocidade média do vento

Parâmetro	U_0	S_1	S_3	b	p
Valores	35 m/s	1.0	1.0 (ELU) / 0.6 (ELS)	0.71	0.23

(ELU – Estado Limite Último; ELS – Estado Limite de Serviço)

Para o primeiro módulo da torre os coeficientes de arrasto (C_D) foram extraídos da NBR 6123 em função do número de Reynolds e da área de exposição. No segundo e terceiro módulo da torre, o efeito das antenas sobre a força aerodinâmica foi simulado com os coeficientes de arrasto e fatores de interferência obtidos de

ensaios em túnel de vento de modelos em escala reduzida estruturas treliçadas com antenas VHF fixadas, para um escoamento de baixa turbulência (MARTÍN *et al.*, 2019; LOREDO-SOUZA A. M, 2018). Para o segundo e terceiro módulo da torre as forças do vento são dadas por:

$$F(z, t) = \frac{1}{2} \rho U^2 (C_T A_T + C_a f_a A_a) \quad (6)$$

onde C_T e A_T são o coeficiente de arrasto da torre e a área de exposição, enquanto que C_a e A_a são o coeficiente de arrasto da antena VHF e a área de exposição, sendo f_a um fator de interferência que leva em conta o efeito das antenas na estrutura treliçada. Os valores desses coeficientes são dados na Tabela 3. Para a direção transversal à incidência do vento os coeficientes de arrasto foram obtidos com o mesmo procedimento e a força do vento expressa em função da componente de velocidade flutuante transversal $v(t)$. As componentes flutuantes da velocidade do vento $u(t)$ e $v(t)$ ao longo da altura da torre foram obtidas com um gerador de históricos de velocidade na direção de incidência do vento e na direção transversal que consideram, respectivamente, as funções de densidade espectral de Harris e de Kaimal e as funções de correlação espacial (PFEIL *et al.*, 2004).

Tabela 3 – Coeficientes de arrasto utilizado nas expressões do carregamento do vento.

Módulos da torre	Coeficientes de arrasto	
	C_T estrutura)	C_a (antenas)
1º módulo (até 120m de altura)	0,90 – 1,20	- -
2º e 3º módulos (120m a 192m de altura)	1,10 – 1,75	1,76

6. Correlação entre amplitudes das respostas teórica e experimental para a torre com antenas

As Figuras 6(a,b) mostram, respectivamente, respostas teóricas no domínio do tempo dos deslocamentos horizontais na direção de incidência do vento, ou dos acelerômetros AC2 e AC4 instalados no nível de 85m acima da base da torre ou 110m acima do terreno (ver Figura 2(b)).

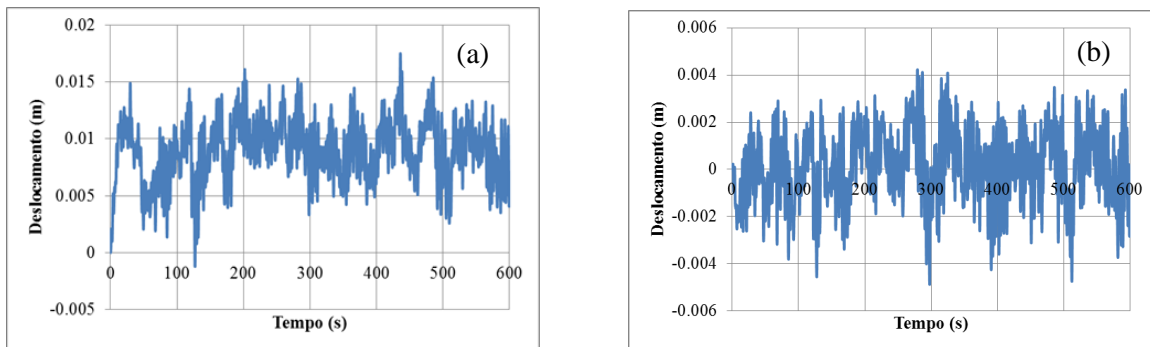
A Tabela 4 apresenta correlações entre os valores teóricos e experimentais para os picos médios de aceleração e de deslocamentos na direção dos acelerômetros AC2 e AC4. Nota-se nesta tabela a boa correlação teórico - experimental dos picos de aceleração correspondentes na direção dos AC2 e AC4 e, também, dos picos de deslocamentos correspondentes a direção do AC2. Por outro lado, na direção do AC4 a correlação, aparentemente, não é favorável. Mas deve-se observar, com auxílio da Figura 7(a), que essa falsa aparência se deve a contribuição da rotação por torção axial da torre, que resulta da parcela quase-estática da força aerodinâmica associada à velocidade média do vento. Observa-se também que a componente tangencial de deslocamento teórico devido a torção axial é muito mais pronunciada na direção do acelerômetro AC4 mais afastado do eixo da torre que o acelerômetro AC2. Esse pico de deslocamento estático teórico ($drift \approx 10,8$ mm) na direção do acelerômetro AC4 resulta, então, aparentemente muito maior que o correspondente pico experimental estimado por dupla integração do sinal de aceleração.

Tabela 4 – Comparação entre picos de aceleração e deslocamento teóricos e experimentais $h = 85m$.

Acelerômetro	Pico de aceleração médio		Pico de deslocamento (mm)	
	Teórico (m/s^2)	Experimental ($m/s^2 \pm 0,005$)	Teórico (mm)	Experimental ($mm \pm 0,05$)
AC2	0,018	0,021	4,2	4,3
AC4	0,020	0,025	$5,6 + (drift \approx 10,8)$	4,9



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual



Figuras 6(a,b) – Deslocamento teórico x tempo (a) na direção do AC4 (b) na direção do AC2

6 – Resistência estrutural e estabilidade aerodinâmica

6.1 – Avaliação da resistência estrutural dos elementos que compõem a estrutura da torre

A avaliação da resistência da estrutura da torre com antenas VHF, foi realizada para a combinação das cargas de gravidade e das forças aerodinâmicas, segundo os critérios do Estado Limite Último (ELU) prescritos na norma AISC 360-10 (2010). A Figura 7 mostra em vista frontal os três módulos da torre, indicando em vermelho os componentes tubulares deficientes para os quais a relação Demanda/Capacidade é superior a 1,0. Observa-se nessa figura que a maioria dos componentes deficientes se encontram no terceiro módulo; enquanto no segundo e primeiro módulos mostram alguns poucos componentes deficientes.

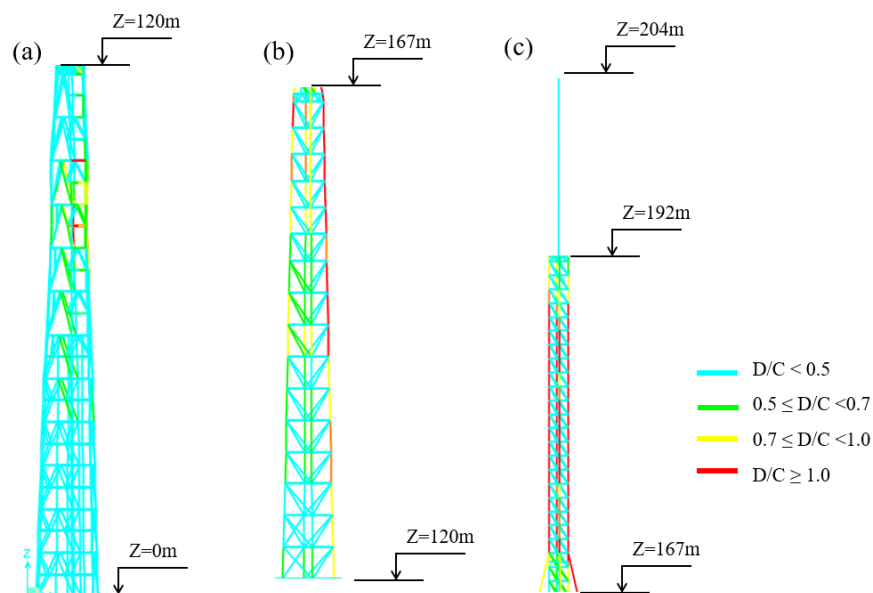


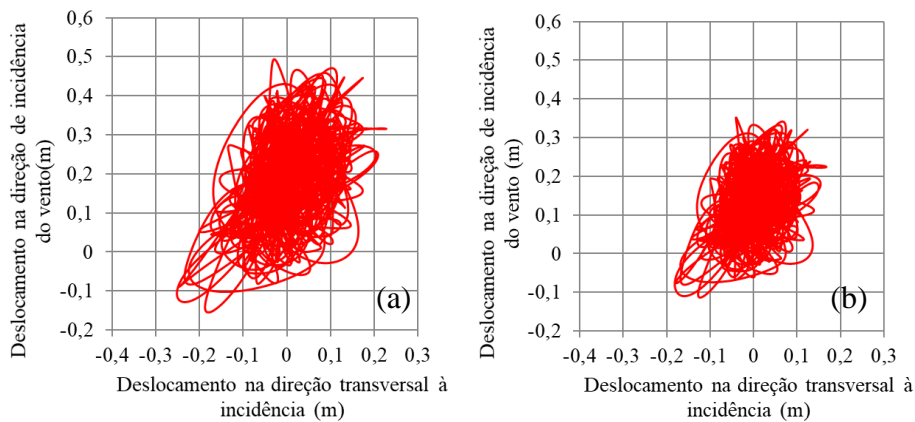
Figura 7 – Avaliação qualitativa da resistência estrutural (elementos deficientes em vermelho).

6.2 – Respostas aerodinâmicas da torre com e sem antenas

As Figuras 8 (a,b) apresentam uma comparação entre as amplitudes de deslocamento da torre com e sem antenas, calculados no Estado Limite de Serviço (ELS). Notam-se nestas figuras, que mostram as trajetórias de deslocamento no topo da torre com e sem antenas, que os picos de deslocamentos nas direções do vento e transversal para a torre com antenas são, respectivamente, 35% e 30% maiores que para a torre sem antenas.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual



Figuras 8(a,b) – Trajetórias deslocamento no topo da torre: (a) com antenas; (b) sem antenas.

6.3- Estabilidade Estrutural

Os resultados para esforços solicitantes nos elementos tubulares obtidos com a análise aerodinâmica no ELU para a torre com antenas foram comparados com os resultantes de uma análise estática de acordo com as especificações da AISC (1949) utilizadas no cálculo de projetos no final dos anos 1950s. Os edifícios eram, então, projetados para uma pressão de vento $\geq 20\text{psf}$ ($\approx 1,0\text{ kN/m}^2$) sobre a área A_V da projeção vertical da estrutura acabada. As recomendações normativas permitiam aos projetistas multiplicar a carga de vento pelo fator 0,75, quando combinada com as cargas de gravidade; mas no caso de estruturas treliçadas, as cargas de vento deviam ser calculadas considerando 1,5 vezes a área A_V da referida projeção vertical. No projeto estrutural da torre de Brasília foi utilizado o método das tensões admissíveis (BRESLER, 1960) para a avaliação da resistência estrutural da torre sem antenas, requerendo que a resistência R_a (Eq.7) fosse menor do que a resistência nominal R_n dividida pelo fator de segurança ($\Omega = 2,0$). A resistência requerida era obtida para a seguinte combinação de carregamentos (Eq.8):

$$R_a \leq \frac{R_n}{\Omega} \quad (7)$$

$$R_a = 1.0 CP + 0.75 CV \quad (8)$$

onde CP e CV são, respectivamente, as cargas permanentes e as cargas do vento calculadas multiplicando a área A_V da projeção vertical por um fator igual a 1,5.

A Tabela 5 mostra os esforços solicitantes em alguns dos componentes estruturais deficientes do terceiro módulo da torre para duas abordagens de projeto distintas : (i) realizando uma análise aerodinâmica para uma combinação de ações ($1,25CP+1,4CV$) no ELU de acordo com as normas de projeto da ABNT vigentes, para a torre com antenas VHF e (ii) realizando uma análise estática para a combinação de carga dada (Eq. 7) e de acordo com o método das tensões admissíveis, utilizado no final dos anos 1950, para a torre sem as antenas VHF. A última coluna da tabela mostra a razão Demanda/Capacidade (D/C).

Tabela 5 – Esforços solicitantes em elementos estruturais deficientes do terceiro módulo da estrutura

Perfis tubulares D(mm) × t(mm) Aço SAC-41	Esforços solicitantes no ELU p/ torre com e (sem) antenas			Razão (D/C) p/ torre com e (sem) antenas
	N(kN)	M ₁ (kN.m)	M ₂ (kN.m)	
203.2×13.8	-2.134 (-395)	10,54 (0,99)	16,22 (1,61)	1,37 (0,43)
154.4×12.3	-1.865 (-274)	6,12 (0,98)	0,44 (0,01)	1,75 (0,46)
88.9×9.5	-936 (-91)	2,02 (0,20)	0,27 (0,00)	2,29 (0,40)
76.2×9.27	-1.029 (-71)	2,25 (0,11)	1,89 (0,11)	2,73 (0,33)



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

7 - Controle Dinâmico da Estrutura da torre submetida à ação do vento

As dificuldades práticas e elevado custo de execução do reforço estrutural são evitadas com a instalação, no topo da torre, de um dispositivo de controle dinâmico do tipo APNL - Atenuador Pendular Não-Linear, ilustrado na Figura 9, para reduzir as amplitudes de deslocamento e consequentes esforços solicitantes nos componentes da estrutura. A massa do APNL é calculada para fornecer a necessária força de controle, enquanto as amplitudes angulares são limitadas pelo amortecimento gerado na rótula. A razão $r = (f_p / f_{est})$ entre as frequências de oscilação pendular e do 1º modo de vibração da torre com antenas é calibrada na faixa $0,9 \leq r < 1,0$.

Modelos matemáticos e aplicações práticas pioneiras de dispositivos de controle pendular em torres altas e esbeltas são apresentadas por KORENEV e RESNIKOV (1993) e em outros artigos técnicos (BATTISTA, 2003) (BATTISTA *et al.*, 2008) que também fornecem detalhes do projeto mecânico e aplicação prática e medições de campo em estruturas controladas existentes. Alguns outros trabalhos importantes são: HE *et al.* (2007), NAGASE e HISATOKU (1992), KAREEM *et al.* (1999) e KWOK e SAMALI (1995).

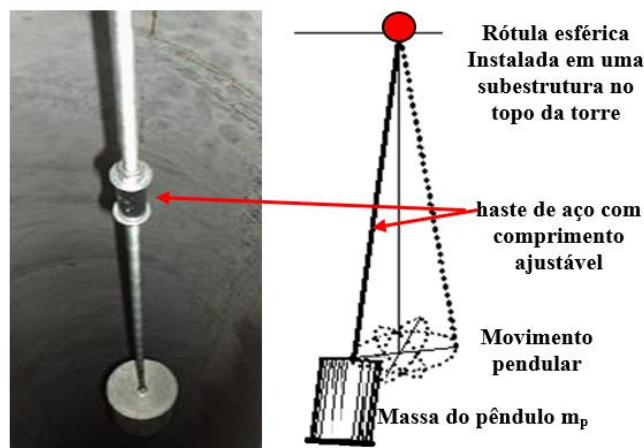
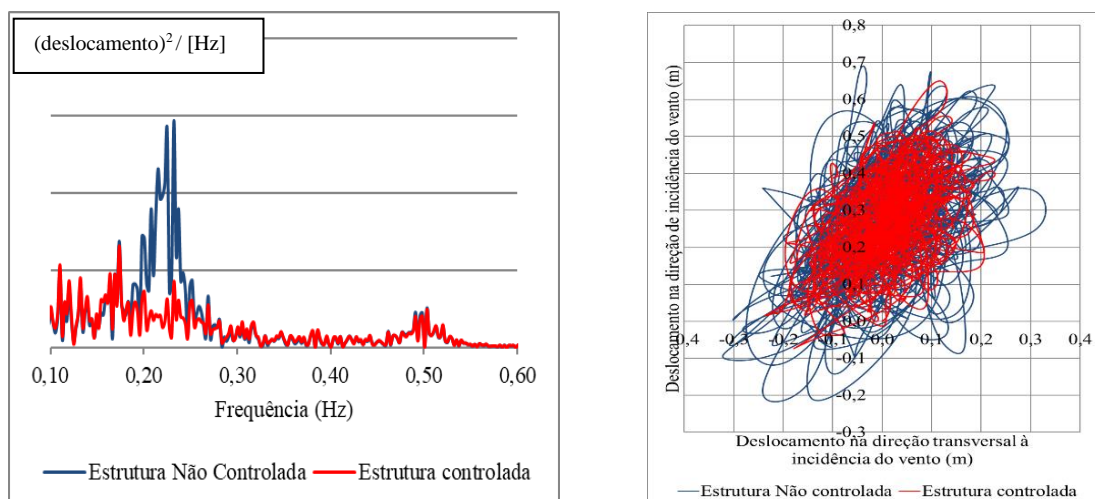


Figura 9 – Exemplo ilustrativo do projeto conceitual de um APNL

As respostas aerodinâmicas mostradas nas Figuras 10(a,b), para a estrutura não controlada e controlada, demonstram a efetividade do APNL na redução de deslocamentos e consequentes esforços solicitantes.



Figuras 10(a,b) – (a) densidade espectral do deslocamento na direção de incidência do vento; (b) trajetória dos deslocamentos horizontais no topo da torre

8 - Conclusões

Algumas conclusões relevantes podem ser tiradas dos resultados das análises da estrutura metálica treliçada.

A avaliação de resistência estrutural da Torre Telecom de Brasília, baseada em análise estática e nos critérios normativos -vigentes no final dos anos 1950 e aplicados no projeto original - mostra uma reserva substancial de resistência que permitiria a instalação de algumas poucas antenas. Por outro lado, a avaliação da resistência estrutural baseada numa análise aerodinâmica e em critérios normativos atuais, mostra que a torre com o grande número existente de antenas VHF necessita de reforço estrutural extensivo, para atender as condições de estabilidade requeridos por normas de projeto vigentes. No entanto, o reforço estrutural extensivo de uma torre tão alta e esbelta apresenta grandes dificuldades práticas e alto custo para execução. Tais aspectos negativos são contornados com a instalação de um controlador dinâmico do tipo APNL. Este dispositivo mecânico de controle passivo tem sido aplicado com sucesso em torres altas e esbeltas sob ação do vento, consistindo em solução prática e econômica para reduzir os deslocamentos e consequentes esforços solicitantes, restabelecendo a requerida margem de segurança estrutural.

Os desenhos de projeto do APNL para a Torre Telecom de Brasília foram elaborados pela *Controllato Ltda* no final de 2019. O processo foi interrompido em 2020, mas espera-se que seja retomado quando oportuno.

Referências

- AISC-American Institute of Steel Construction; AISC 1949 - Specification for the design, fabrication and erection of structural steel for buildings; AISC 360-10 - Specifications for structural steel buildings, 2010.
- ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 6123 – Forças devidas ao vento em edificações, 1988.
- BATTISTA, R.C., CARVALHO, E.M.L., SOUZA, R.A. Hybrid fluid dynamic control devices to attenuate slender structures aeroelastic oscillations. *Engineering Structures*. 2008; 30:3513-3522.
- BATTISTA, R.C., PFEIL, M.S. Double controller of wind induced oscillations in telecom towers. *Int. Seminar on Modelling and Identification of Structures subjected to Dynamic Excitation. Emphasis on Transmission Lines*, Bento Gonçalves, Brasil. 2009.
- BATTISTA, R.C., PFEIL, M.S., CARVALHO, E.M.L., VARELA, W.D. Double controller of wind induced bending oscillations in telecom towers. *Journal of Smart Structures Systems*. 2018; 21(1):99-111.
- BRESLER, B., LIN, T.Y. *Design of steel structures*. John Wiley & Son; 1960.
- HE, M., MA, R., LIN, Z. Design of Structural Vibration Control of a Tall Steel TV Tower under Wind Load. *Steel Structures*. 2007; 7:85-92.
- KAREEM, A., KIJEWKY, T., TAMURA Y. Mitigation of motion of tall buildings with specific examples of recent applications. *Wind and structures*. 1999; 2(3):201-251.
- KORENEV, B.G., REZNIKOV, L.M. *Dynamic Vibration Absorbers: theory and technical applications*. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd; 1993.
- KWOK, K., SAMALI, B. Performance of tuned mass dampers under wind loads. *Engineering Structures*. 1995. 17(9):655-667.
- LOREDO-SOUZA A. M. Ensaio em túnel de vento de modelos em escala reduzida de torres treliçadas com antenas VHF, Relatório Interno – Laboratório de Aerodinâmica das Construções - LAC/UFRGS, 2018.
- MARTÍN P., ELENA, V.B., FERNÁNDEZ, I., LOREDO-SOUZA A. M. Drag coefficients of lattice towers with VHF antennas on wind tunnel. *Revista Técnica de Ingeniería de la Universidad del Zulia*. 2019; 42: 118-125.
- MARTÍN P., ELENA, V.B., LOREDO-SOUZA A. M., CAMAÑO, E. B. Experimental study: effects of dish antennas on wind loadings of telecom towers. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*. 2016; 149:40-47.
- NAGASE, T., HISATOKU, T. Tuned-pendulum mass damper installed in Crystal Tower. *The Structural Design of Tall Buildings*. 1992; 1:35-56. John Wiley & Sons Ltd.
- PINHEIRO, M.A.S. Non-linear pendulum absorber of the horizontal vibration in slender towers. MSc Dissertation, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1997.
- PINHEIRO, M.A.S., PFEIL, M.S., BATTISTA, R.C. Structural behaviour of a slender telecom tower under dynamic action of turbulent wind. *Anais XXXV Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural*, Rio de Janeiro, 2012.