



Jean Rodrigo Ferreira Aguilera

Estruturas treliçadas esbeltas sob ação do vento

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: João Luis Pascal Roehl

Rio de Janeiro
Abril de 2007



Jean Rodrigo Ferreira Aguilera

Estruturas treliçadas esbeltas sob ação do vento

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

João Luis Pascal Roehl

Orientador

PUC-Rio - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Nelson Henrique C. Santiago

Fluxo Engenharia Ltda

Paulo Batista Gonçalves

PUC-Rio - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Raul Rosas e Silva

PUC-Rio - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Andréia Abreu Diniz de Almeida

PUC-Rio - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 12 de abril de 2007

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Jean Rodrigo Ferreira Aguilera

Graduado em Engenharia Civil Pela Universidade Federal do Pará em 2005. Participou de alguns projetos de pesquisa na universidade graduada. Iniciou o curso de mestrado na PUC-Rio em 2005. Área de pesquisa e interesse acadêmico: Dinâmica Estrutural e Instabilidades das Estruturas.

Ficha Catalográfica

Aguilera, Jean Rodrigo Ferreira

Estruturas treliçadas esbeltas sob ação do vento / Jean Rodrigo Ferreira Aguilera; Orientador: João Luís Pascal Roehl – Rio de Janeiro: PUC-Rio, Departamento de Engenharia Civil, 2007.

119f.:il.;30 cm

Dissertação de Mestrado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil – Tese. 2. Vento. 3. Torres Esbeltas, 4. Torres, 5. Linhas de Transmissão. 6 Torres de TV. I Roehl, João Luis Pascal. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

Dedico a meus pais e irmãos.
À minha mãe Raimunda Manuelina,
E à minha adorada Nice.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pelas oportunidades que resultaram em minhas conquistas.

Aos Meus Pais, Claudio Alberto Aguilera e Maria Antonia, pelos ensinamentos de berço, ajudando a formar a pessoa que sou.

Aos meus irmãos, Junior, Kewin, James e Taís, pelos incentivos que serviram de apoio nos momentos difíceis dessa caminhada, apesar da distância, sempre estiveram ao meu lado em pensamentos.

À minha adorada Nice por estar ao meu lado todos esses anos, sempre me incentivando e me dando forças para chegar cada vez mais longe.

Ao Professor Remo Magalhães de Souza da Universidade Federal do Pará - UFPA, pelo incentivo às atividades acadêmicas. Sendo, um dos responsáveis à minha opção de fazer mestrado, seus ensinamentos ultrapassaram a barreira de mestre-aluno.

Em especial, ao meu orientador e Professor João Luís Pascal Roehl, pela excelente dedicação e, sua disposição, independentemente dos dias normais de trabalho, abdicando de alguns finais de semana para estar presente na elaboração desta dissertação. Mostrando-se sempre disposto, o que me faz ver a verdadeira essência do educador, sinto-me abençoado, em encontrar mais uma pessoa dotada de tamanha simplicidade e motivação em contribuir na formação acadêmica e profissional das pessoas.

Aos professores e funcionários do departamento de engenharia civil da PUC-Rio. Em especial, ao professor Ney Dumont, Paulo Batista e Raul Rosas, pela atenção no decorrer do mestrado, sempre se mostrando prontos a servir.

Ao grupo de pesquisa NICAIE da UFPA, pelos materiais cedidos, que serviram como início de pesquisa em parte desta dissertação.

À empresa Fluxo Engenharia por ter cedido materiais, que possibilitaram um entendimento mais abrangente, sobre tópicos relacionados a um dos temas deste trabalho.

À empresa Sonda Engenharia pelos relatórios cedidos.

A todas as amizades que conquistei no decorrer do mestrado.

Ao meu amigo, Rafael Araújo de Sousa pelo seu companheirismo desde a época da graduação.

Aos amigos Klessis, Ygor, Adenilson, Silvio, Renato, Léo, Clebson e Plínio. Por compartilharem um lar familiar no decorrer do mestrado, mostrando-se verdadeiros amigos e irmãos.

Um agradecimento especial, a minha tia-mãe Raimunda Manuelina Ferreira Guimarães, uma pessoa muito especial, cuja existência é uma dádiva de Deus em minha vida. Sempre serei grato pelos seus ensinamentos e seu apoio materno, que sem eles acredito que não chegaria tão longe. Apesar de não ser minha mãe verdadeira, nunca faltou, ou agiu como não se fosse. A esse ser humano devo todas minhas conquistas, e jamais deixarei de citá-la em qualquer trabalho por mim publicado.

Ao CNPq pelo apoio financeiro

Resumo

Aguilera, Jean Rodrigo Ferreira; Roehl, João Luis Pascal (Orientador). **Estruturas treliçadas esbeltas sob ação do vento**. Rio de Janeiro, 2007. 119p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

No projeto de estruturas treliçadas esbeltas, um ponto relativamente em aberto é quanto à resposta dinâmica dessas torres sob ação do vento. Já foram observadas várias ocorrências de queda de torres por tais efeitos no Brasil e ultimamente, essas incidências vêm aumentando, trazendo diversos transtornos e prejuízos significativos à sociedade e às empresas concessionárias. Nesse contexto, brotam dois aspectos centrais: a modelagem da estrutura e a discretização da ação do vento. A montagem desses dois cenários é feita com base em um modelo numérico, no SAP2000[®], de uma torre de 73,75 m de altura da linha de transmissão LT - 103, na Amazônia, e uma torre de TV com 192 m de altura, localizada em Brasília-DF, ambas no Brasil. Para avaliação da excitação do vento, é utilizada a norma brasileira NBR 6123. Em estudo preliminar, propõe-se uma forma de representação simplificada das forças do vento sobre a torre, de modo a serem utilizadas resultantes por módulos, convenientemente distribuídas por seus nós principais, visando-se quer a resposta estática, quer a dinâmica. A torre de TV é ensaiada sob a ação de pulsos isolados do vento de projeto e por sucessões diversas desses pulsos com o intuito de simular rajadas de vento. Investiga-se também, para a ação de ventos normalizados extremos, a resposta linear e não-linear P-Delta do sistema. Em consequência, identificam-se pontos de insuficiência estrutural e, para as ações extremas, ensaiam-se recursos mecânicos para controle dos deslocamentos e esforços máximos produzidos pela ação estática e dinâmica do vento.

Palavras-chave

Vento; Torres Esbeltas; Linhas de Transmissão; Torre de TV.

Abstract

Aguilera, Jean Rodrigo Ferreira; Roehl, João Luis Pascal (AAdvisor). **Light Lattice Structures Under Wind Action**. Rio de Janeiro, 2007. 119p. Msc. Dissertation – Department of Civil Engineering - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The dynamic response of slender latticed tower structures under wind excitation is still an open point in the design of such systems. In Brazil, an expressive number of accidents have been registered, in the last few decades, and a large number of material and financial losses have been equally reported, for both people and industrial plant owners. In the structural analysis scenario, two central points dominate the structural engineer concerns: the modeling of the structure and of the wind action. Two tower models are used, a 73,75m high transmission line trussed structure, LT 103, settled in the Brazilian Amazon Basin and a 193m tall trussed TV tower, built in Brasilia-DF. The wind action on the tower members is computed according to the brazilian recommendation, NBR-6123. In a preliminary study, a simplified procedure is proposed to evaluate the wind forces on the LT-103 tower sections and to conveniently distribute them on the main tower model nodes (joints). The TV Tower is evaluated under the static and dynamic action of the wind forces, either by isolated pulses or by a train of them to model a wind gust. The tower response is computed under a linear and non-linear P-Delta behavior; some faulting spots are identified in the response reports and a combined vibration control solution is proposed incorporating steel tendons conjugated with multiple tuned mass absorbers. A comparison is also made with the NBR 15307 recommendation and a couple of comments are addressed to those who may intend to apply this regulation to investigate the behavior of slender trussed tower structures.

Keywords

Wind; Dynamic; Towers; Transmission Lines; Tower of TV.

Sumário

1	Introdução	18
1.1.	Motivação	19
1.2.	Objetivo	21
1.3.	Escopo	22
2	Estudos complementares	24
2.1.	Efeitos do vento	24
2.1.1.	Consideração de ações dinâmicas do vento	25
2.1.2.	Determinação da velocidade do vento	28
2.1.3.	Parâmetros do vento	30
2.2.	Modelagem computacional	31
2.3.	Controle de vibração em estruturas	37
3	Cenário Geral	39
3.1.	Apresentação	39
3.2.	Classificação das estruturas	40
3.3.	Elementos de estrutura treliçadas	43
3.3.1.	Membros	43
3.3.2.	Conectores ou junções	44
3.3.3.	Classificação dos elementos	45
3.4.	Cargas e vulnerabilidades	46
3.5.	Normas nacionais e internacionais	47
3.5.1.	Dimensionamento de estrutura de aço	47
3.5.2.	Dimensionamento para efeito do vento	48
3.5.3.	Dimensionamento dos perfis	49
3.5.4.	Cálculo das forças do vento segundo a NBR 6123	53
3.5.5.	Aplicação nas faces da estrutura	56
3.5.6.	Aplicação das cargas nos nós da estrutura	56
4	Cenários particulares	57

4.1. Torre de linhas aérea de transmissão LT103	57
4.1.1. Descrição da torre	57
4.1.2. Participação e acompanhamento de estudo realizado na UFPa	58
4.1.3. Estudos a realizar sobre o modelo LT103	59
4.1.4. Resultados Experimentais	59
4.1.5. Descrição do monitoramento dinâmico	60
4.1.6. Resultados da análise	61
4.2. Torre de antenas de TV	64
4.2.1. Situação Geral	64
4.2.2. Situação particular	65
4.2.3. Resultados da monitoração dinâmica	66
5 Estudo da torre LT103	67
5.1. Modelagem da estrutura	67
5.2. Simplificação do carregamento do vento	69
5.2.1. Reações nas fundações	73
5.2.2. Deslocamentos máximos	76
5.2.3. Esforços nas barras	77
5.3. Síntese conclusiva	79
6 Estudo da torre de TV de Brasília	80
6.1. Modelagem da estrutura	80
6.2. Estratégia de Análise	85
6.3. Ação do vento sobre a estrutura	85
6.3.1. Forças do vento, conforme a NBR 6123	86
6.3.2. Funções temporais para o vento	86
6.4. Panorama da análise estática	87
6.5. Panorama da análise dinâmica	90
6.5.1. Deslocamentos e tensões máximas	90
6.5.2. Índice de Vibração – NBR 15307	92
6.6. Análise sob controle	93
6.6.1. Preliminares	93
6.6.2. Resultado sob carga estática	96
6.6.3. Resultado sob carga dinâmica	96

6.6.4. Níveis de dano em função do índice de vibração	102
6.7. Observações conclusivas	104
7 Comentários e Conclusões	106
8 Referências bibliográficas	109
Anexo A	114
Anexo B	118

Lista de figuras

Figura 1.1 - Prejuízos causados pelo vento (http://www.gazetadoparana.com.br, 03/09)	20
Figura 2.2 – Vórtice de Karman numa esteira. (Labegalini et al [27])	27
Figura 2.4 – Seção transversal de uma torre qualquer: (a) seção original, (b) seção com elementos de barra fictícios (Dummy).	32
Figura 2.5 – Barra engastada: (a) configuração indeformada; (b) configuração deformada.	34
Figura 2.6– Absorção de massa sintonizado em uma estrutura: (a) AMS1; (b) AMSM.	38
Figura 3.2 – Estruturas treliçadas esbeltas autoportantes.	41
Figura 3.3 – Tipos de torres quanto à disposição dos condutores.	42
Figura 3.4 – Conexões entre montante e outros membros. (a) perfil cantoneira; (b) perfil tubular.	44
Figura 4.1 – Localização da torre de linha de transmissão (Google Earth).	57
Figura 4.2 – Torre LT103 à margem do rio Guamá e seu modelo computacional.	59
Figura 4.3 – Fixação dos acelerômetros na torre.	60
Figura 4.4 – Localização dos acelerômetros.	61
Figura 4.5 – Resposta em deslocamento, acelerômetro longitudinal esquerdo número 2 (AEL02): (a) sinal completo do ensaio; (b) trecho de uma das amplitudes máximas de vibração.	62
Figura 4.6 - Auto-espectro correspondente aos acelerômetros 1 a 4, frequências de 1,78 Hz.	63
Figura 4.7 – Torre TV de Brasília: (a) vista geral; (b) vista do pavimento térreo da torre (museu)	64
Figura 4.8 – Torre de TV de Brasília modelada, vista frontal.	65
Tabela 4.2 – Frequência medida na monitoração.	66
Figura 5.1 – Carregamento do vento à 30 m/s, aplicado nos nós da estrutura	70
Tabela 5.4 – Força de arrasto por módulo nas torres.	71
Figura 5.3 – Vista aérea, faces da LT103.	72

Figura 6.1 – Subdivisão da torre em altura, trechos.	81
Figura 6.2 – Modos de vibração do modelo da estrutura da torre de TV: (a) modo 1 , (b) modo 3, análise modal.	84
Figura 6.3 – Modos de vibração do modelo da estrutura da torre de TV: (a) modo 5 , (b) modo 6, análise modal.	84
Figura 6.4 – Função temporal para a velocidade horizontal do vento, Pulso sucessivos.	87
Figura 6.5 – Análise das tensões axiais relativas máximas. Análise estática não-linear P-Delta, vento de 50 m/s, na direção x.	89
Figura 6.6 - Panorama das tensões axiais relativas máximas. Análise dinâmica, vento de 35 m/s, na direção x.	92
Figura 6.6 – Hipóteses preliminares de contraentamento.	95
Tabela 6.11 - Frequências do sistema, Hz, opção 1.	96
Figura 6.7 – Modo de vibração da torre com AMSM, Hipótese 2, análise modal, com controle de vibração.	98
Figura 6.8 – Verificação dos perfis com os AMS, velocidades de 35 m/s,Trecho II e III, análise dinâmica.	101

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Escalas de intensidade da velocidade do vento. (www.blwtl.uwo.ca)	24
Tabela 2.2 – Esforços solicitantes de cálculo para um elemento de pórtico.	32
Tabela 2.3 - Esforços solicitantes de cálculo para elemento de treliça.	33
Tabela 3.1 – índice de esbeltez máximo.	50
Tabela 3.2 - Índice de esbeltez efetiva.	50
Tabela 4.1 – frequências medidas.	63
Tabela 5.1 – Frequências modeladas e frequências medidas, LT103.	68
Tabela 5.2 – Parâmetros dos condutores da LT103.	68
Tabela 5.3 – Frequências modeladas, medidas e ajustadas.	69
Tabela 5.5 – Esforços nas fundações em kN, LT103.	74
Tabela 5.6 – Esforços nas fundações, Hipótese/ Original, LT103.	75
Tabela 5.7 – Deslocamentos máximos (mm), LT103.	76
Tabela 5.8 – Deslocamentos máximos, Hipótese/ Original, LT103.	76
Tabela 5.9 – Tensões normais nas barras, em MPa, LT103.	78
Tabela 6.1 – Massa da Torre de TV por módulos.	82
Tabela 6.2 – Coeficiente de rigidez do modelo segundo x.	82
Tabela 6.3 – Comparação das frequências naturais do modelo e do protótipo.	83
Tabela 6.4 - Deslocamentos máximos (mm), vento direção x, análise estática.	88
Tabela 6.5 – Panorama das tensões axiais relativas máximas, análise estática não-linear P-Delta, vento na direção $x-x$.	88
Tabela 6.6 - Deslocamentos máximos (mm), vento direção x, análise dinâmica.	90
Tabela 6.7 - Panorama das tensões axiais relativas máximas, análise dinâmica não-linear P-delta.	91
Tabela 6.9 - Índice de vibração e níveis de danos, Análise dinâmica.	93
Tabela 6.10 - Deslocamentos máximos (mm), vento na direção x, análise estática, opção 1.	96
Tabela 6.12 - Deslocamentos máximos (mm), vento na direção x, análise dinâmica, Opção 1.	97
Tabela 6.13 - Frequências do sistema, Hz, opção 2.	97

Tabela 6.14 – Deslocamentos máximos (mm), análise dinâmica, opção 2.	98
Tabela 6.15 – Frequências do sistema, Hz, opção 3.	99
Tabela 6.16 - Deslocamentos máximos (mm), análise dinâmica, opção 3.	99
Tabela 6.17 – Comparação dos deslocamentos máximos da torre (mm), vento de 35m/s.	100
Tabela 6.18 - Panorama das tensões axiais relativas máximas, análise dinâmica, com controle de vibração.	101
Tabela 6.19 – Índice de vibração \bar{V} , para estrutura controlada, opção 3, análise dinâmica.	102

Lista de símbolos

A_{ef}	Área frontal da superfície limitada pelo contorno do reticulado
A_o	Área total de referência
A_g	Área da seção bruta
A_e	Área efetiva da seção transversal
C_{ai}	Coefficiente de arrasto
C	Matriz de amortecimento
D	Diâmetros da barra
D	Vetor de deslocamento da estrutura
E	Módulo de elasticidade do aço
$f(t)$	Função do tempo
F(x)	Vetor de força
F_y	Tensão de escoamento do aço
F_{cr}	Tensão crítica de flambagem
K	Comprimento efetivo de flambagem
K	Matriz de rigidez
K_E	Matriz de rigidez elástica
K_g	Matriz de rigidez geométrica da estrutura
l	Comprimento do perfil
m_o	Massa de referência
M	Matriz de massa da estrutura
M2	Momento menor em relação ao eixo 2
M3	Momento maior em relação ao eixo 3
T_o	Período fundamental do sistema
P_{nc}	Resistência à compressão ou limite de escoamento
P_u	Solicitação de cálculo
P_{cabo}	Peso próprio do cabo
p_{cabo}	Peso próprio do cabo por unidade de comprimento
P	Vetor de forças e Força axial

q	Pressão do vento,
r	Raio de giração da seção do perfil
t	Tempo
T	Torçor
Δt	Intervalo de tempo
V_1, V_2	Vãos laterais da torre
V2 e V3	Esforço cortante na direção 2 e 3
V	Velocidade
\bar{V}	Índice de Vibração
$\overline{X_i}$	Componente força média
\hat{X}	Componente da resposta média flutuante
x	Deslocamento
\dot{x}	Velocidade
\ddot{x}	Aceleração
ω_n	Frequência natural do sistema
z_{g1} e z_{g2}	Altura acima do terreno
α	Expoente que depende da rugosidade do terreno
ξ	Coefficiente de amplificação dinâmica
μ	Densidade do ar
λ	Índice de esbeltes
λ_e	Esbeltes efetiva
Φ_n	Modo de vibração