



Thiago Galindo Pecin

Ações Mecânicas Tornádicas Globais sobre Torres de Linhas de Transmissão

Tese de Doutorado

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

Orientador: João Luis Pascal Roehl

Rio de Janeiro, agosto de 2008



Thiago Galindo Pecin

Ações Mecânicas Tornádicas Globais sobre Torres de Linhas de Transmissão

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

Prof. João Luis Pascal Roehl

Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof^a. Andréia Abreu Diniz de Almeida

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Paulo Batista Gonçalves

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. André Teófilo Beck

USP

D.Sc. Nelson Henrique Costa Santiago

Fluxo Engenharia

José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 19 de agosto de 2008

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

Thiago Galindo Pecin

Mestre em Engenharia Civil pela PUC-Rio em 2006.
Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Goiás em 2004. Atua na linha de pesquisa de Instabilidade e Dinâmica das Estruturas.

Ficha Catalográfica

Galindo Pecin, Thiago

Ações mecânicas tornádicas globais sobre torres de linhas de transmissão / Thiago Galindo Pecin; orientador: João Luis Pascal Roehl. – 2008.
179 f. : il. ; 30 cm

Tese (Doutorado em Engenharia Civil)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Tornado. 3. Torres de transmissão. 4. Efeitos globais. 5. Estruturas. 6. Vento. I. Roehl, João Luis Pascal. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Aos professores que tive durante a vida, sem os quais não me seriam
possíveis nem os primeiros passos.

Agradecimentos

Ao desconhecido. À dimensão da existência desobediente à relação causa-efeito que governa a razão humana, deixando nossas questões fundamentais sem respostas.

Aos meus pais, João e Alexânia, por me darem a vida e, cada um a seu modo, oferecerem-me boa parte de seus sentimentos e pensamentos.

Aos meus irmãos, Diego, Giselle, João Lucas, Guilherme e Fillipe, pela convivência e amizade, essenciais à constituição da minha personalidade.

A minha namorada, Érica, com quem muito aprendi, e continuo aprendendo, sobre coisas outras que tese alguma pode ensinar. Obrigado por estar ao meu lado e pelos maravilhosos momentos juntos. Te amo!

A minha vó, Eni, pelo amor e carinho; ao meu primo, Alex, amigo de toda uma vida.

Ao professor João Luis Roehl, pela valiosa orientação e pelo exemplo. Sinto muito orgulho em ter sido seu orientado. “Vamos em frente”, Mestre. Obrigado.

À professora Andréia, pela gentil colaboração.

Aos amigos da sala 609, que proporcionaram sempre enriquecedores debates: Fredão, Renata, Pantoja, Diegão, João, Igor e Paul. Sempre me lembrarei dos memoráveis intervalos do café. Meu grande abraço a todos vocês!

Aos amigos dos bares e da República Redonda: Diegão, Patrício, Magnus, Christiano, Joabson, Adriano, Zé, Tio Chico, Jean, Pekenó e Gigante. Valeu por tantas vezes atrapalharem meu trabalho com propostas tentadoras, geralmente relacionadas ao Baixo Gávea ou algo similar.

Ao CNPq, Eletronuclear e Fluxo Engenharia, pelo apoio financeiro.

Resumo

Pecin, Thiago Galindo; Roehl, João Luis Pascal. **Ações Mecânicas Tornádicas Globais sobre Torres de Linhas de Transmissão.** Rio de Janeiro, 2008. 179p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Tornados são fenômenos atmosféricos de pequena escala com grande poder de destruição ao longo de sua trilha e têm sido reportados com frequência crescente no território brasileiro. Do ponto de vista da engenharia de estruturas, atenção especial deve ser destinada a instalações sensíveis, como centrais nucleares e torres de transmissão de energia. Apesar do registro do colapso dessas últimas por conta da ação de tornados no território nacional, pesquisas brasileiras dessa natureza são incipientes. Neste contexto, estudam-se os efeitos mecânicos decorrentes da incidência de tornados sobre torres de transmissão, comparando-os com valores prescritos em normas para ventos usuais de projeto. Para isso, utiliza-se o modelo de campo de vento proposto por Wen (1975) a partir do trabalho de Kuo (1971) e simulações de torres de transmissão representativas da região das bacias hidrográficas do Sul e Sudeste, propícias a tornados. A partir desses estudos, propõe-se e exemplifica-se uma metodologia para avaliação dos efeitos globais tornádicos no projeto das torres de transmissão. O método é construído através da variação de diversos parâmetros envolvidos no problema, buscando-se situações críticas. Na sequência, realiza-se uma análise mais abrangente da demanda tornádica e sugere-se, a partir da mesma, uma metodologia para avaliação da probabilidade anual de falha de uma torre de transmissão a eventos dessa natureza, que é ilustrada ao final.

Palavras-chave

Tornado, torres de transmissão, efeitos globais, estruturas, vento.

Abstract

Pecin, Thiago Galindo; Roehl, João Luis Pascal. **Global Tornadic Mechanical Actions on EETL Towers**. Rio de Janeiro, 2008. 179p. D.Sc. Thesis – Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Tornadoes are small-scale atmospheric phenomena that have large power of destruction along their path. Tornado occurrence has been reported with increasing frequency in Brazilian territory. From the point of view of engineering, special attention should be destined to sensible structures, such as nuclear power plants and towers for transmission of electric energy. In spite of observed collapses of these systems due to the action of tornadoes in national territory, Brazilian researches on this subject are incipient. In this context, the mechanical effects of tornado incidence on transmission towers are studied and compared with values prescribed by the usual standards for wind design. The wind field model proposed by Wen (1975) based on the work of Kuo (1971) and simulations of representative transmission towers of South and Southeast Brazilian river basins, favorable to such events, are used. From these studies, a methodology for evaluation of the tornadic global effects in the design of transmission towers is proposed and exemplified. The method is carried out through the variation of several parameters involved in the problem, seeking to critical situations. Finally, a broader tornadic demand analysis is made and a methodology for evaluation of transmission tower annual probability of failure due to tornado events is suggested and illustrated.

Keywords

Tornado, transmission towers, global effects, structures, wind.

Sumário

1	Introdução	26
2	Revisão bibliográfica	28
2.1	O evento meteorológico	28
2.1.1	Considerações gerais	28
2.1.2	Situações atmosféricas favoráveis à formação de tornados	30
2.1.3	Ocorrências	31
2.1.4	O movimento e a estrutura do tornado	36
2.1.5	A escala de Fujita	43
2.2	Considerações de projeto	48
2.2.1	Efeitos mecânicos sobre estruturas	50
2.2.2	Ações de tornados sobre torres de transmissão	55
2.2.3	Ações de tornados sobre usinas nucleares	56
2.2.4	Ações de tornados sobre outras estruturas	58
2.2.5	Análise não-determinística da solicitação tornádica	59
2.3	Linhas aéreas de transmissão e tipos usuais de torres	63
2.3.1	Tensões usuais e componentes de uma linha de transmissão	63
2.3.2	Tipos usuais de torres	66
2.3.3	Tipos usuais de fundações	69
3	Modelos gerais – ações mecânicas	71
3.1	Modelo de tornado segundo Kuo/Wen	71
3.2	Avaliação da pressão sobre a estrutura	75
4	Cenários	77
4.1	Modelo do tornado para os ensaios	77
4.2	Modelo dos sistemas estruturais	77
5	Análises preliminares	81
5.1	Modelo inicial	83

5.1.1	Estrutura tomada como eixo material	84
5.1.2	Efeitos da consideração da estrutura como corpo extenso	86
5.2	Modelo simplificado	89
5.2.1	Análise estática	90
5.2.2	Análise dinâmica	94
5.3	Torre SA	97
5.3.1	Torre isolada	98
5.3.2	Torre na linha de transmissão	102
5.4	Torre SE	107
5.4.1	Torre isolada	108
5.4.2	Torre na linha de transmissão	112
5.5	Conclusões parciais	117
6	Metodologia para avaliação da ação mecânica global de tornados no projeto de torres de transmissão	119
6.1	Ações horizontais de vento	120
6.1.1	Torre	120
6.1.2	Cabos condutores e pára-raios	128
6.2	Ações verticais de vento	130
6.2.1	Torre	130
6.2.2	Cabos condutores e pára-raios	132
6.3	Interação entre ações horizontais e verticais	134
6.4	Estudos complementares	136
6.4.1	Eixo material <i>versus</i> corpo extenso	136
6.4.2	Força de arrasto <i>versus</i> força de inércia	139
6.4.3	Análise estática <i>versus</i> análise dinâmica	141
6.5	Síntese e exemplo	144
7	Análise não-determinística da solicitação de tornados sobre torres de transmissão	152
7.1	Estudo da demanda tornádica	152
7.2	Metodologia para avaliação da probabilidade de falha de torres de transmissão a tornados	163
7.2.1	Metodologia	163

7.2.2 Exemplo	164
8 Conclusões e recomendações	167
9 Referências bibliográficas	169
10 Apêndice	178

Lista de figuras

Figura 2.1 - Exemplo de tornado na Flórida, EUA, 1991 (foto de Fred Smith)	29
Figura 2.2 – Funil rotativo de condensação em Xanxerê– SC (2005)	29
Figura 2.3 - Dias anuais com condições favoráveis à ocorrência de tornados no período de 1980 a 1999 – Brooks et al (2006)	32
Figura 2.4 – Ocorrência de tornados na Argentina – Goliger e Milford (1998).....	32
Figura 2.5 – Tornado ocorrido em Indaiatuba, SP, 2005 – Rodovia das Colinas S.A.	33
Figura 2.6 – Tromba d’água na Bacia de Campos, RJ, próximo à plataforma P-17, 2001	33
Figura 2.7 – Ocorrências de tornados e conformação das bacias hidrográficas –	35
Figura 2.8 – Ocorrência de tornados na América do Sul – Relatório 001/4 (2007).....	36
Figura 2.9 – Tornados ocorridos em 03/05/1999, em Oklahoma: sentido nordeste - <i>National Weather Service</i> , Norman, Oklahoma	37
Figura 2.10 – Trilhas de tornados hemisfério sul: sentido sudeste – Dyer (1991).....	37
Figura 2.11 – Mudança brusca na direção de movimento do tornado, Iowa, 1999 – <i>National Weather Service</i> (2003)	38
Figura 2.12 – Estrutura do tornado – adaptada de Lewellen (1976); foto: Willhelmsom e Wicker (2001)	38
Figura 2.13 - Ilustração esquemática de tipos de vórtice de canto - Lewellen (1993)	41
Figura 2.14 – Imagens do radar Doppler móvel, mostrando subvórtices no tornado de Oklahoma, em 1999 – Wurman (2002)	42
Figura 2.15 – Danos a construções em superfície causados pela velocidade radial dentro da camada limite - <i>Federal Emergency Management Agency, FEMA</i> , 1999.....	43

Figura 2.16 – A escala de Fujita (1971)	44
Figura 2.17 – Relação entre intensidade, largura (a) e comprimento (b) das trilhas tornádicas – adaptada de <i>National Weather Service</i> (2003).....	46
Figura 2.18 – Ruptura de torre na Bacia do Prata causada por tornado...	55
Figura 2.19 – Divisão do território americano para definição de parâmetros de projeto a tornados – Simiu e Scanlan (1986).....	57
Figura 2.20 – Curvas de ameaça tornádica para o território nacional – Relat. 001/4 (2007)	61
Figura 2.21 – Probabilidade de falha condicionada à ameaça – Almeida (2002).....	62
Figura 2.22 – Exemplos de torres autoportantes: circuito duplo (a), configuração horizontal (b) e configuração delta (c) – Santiago (1983).....	68
Figura 2.23 – Exemplos de torres estaiadas: tipo portal (a), tipo trapézio (b), tipo V (c) e tipo Y (d) – Santiago (1983).....	69
Figura 3.1 – Parcelas de velocidade no tornado – adaptada de Dutta et al (2002).....	71
Figura 3.2 - Representação esquemática do campo de vento tornádico proposto por Kuo – adaptada de Savory et al (2001)	72
Figura 3.3 – Geometria do problema – adaptada de Wen (1975)	75
Figura 4.1 – Torre SA.....	78
Figura 4.2 - Torre SE	79
Figura 4.3 – Modelo para análise numérica da torre SA	80
Figura 4.4 – Modelo para análise numérica da torre SE	80
Figura 5.1 – Sentidos vetoriais adotados para consideração dos efeitos globais.....	83
Figura 5.2 – Nó do topo, N_t , onde se analisam os efeitos da flexibilidade dos modelos.....	83
Figura 5.3 – Modelo inicial.....	84
Figura 5.4 – Forças cortantes globais para o modelo inicial	85
Figura 5.5 – Momentos globais para o modelo inicial.....	85
Figura 5.6 – Força cortante global na direção radial para o modelo inicial	86

Figura 5.7 – Força cortante global na direção radial para o modelo inicial	87
Figura 5.8 – Momento global na direção radial para o modelo inicial	87
Figura 5.9 – Força cortante global na direção tangencial para o modelo inicial	87
Figura 5.10 – Momento global na direção tangencial para o modelo inicial	88
Figura 5.11 – Força global na direção vertical para o modelo inicial	88
Figura 5.12 – Momento global de torção obtido para o modelo inicial discretizado	89
Figura 5.13 – Modelo simplificado, adaptada de Aguilera (2007)	90
Figura 5.14 – Forças globais para o modelo simplificado	91
Figura 5.15 – Momentos globais para o modelo simplificado	91
Figura 5.16 – Força cortante global na direção radial para o modelo simplificado	92
Figura 5.17 – Momento global na direção radial para o modelo simplificado	92
Figura 5.18 - Força cortante global na direção tangencial para o modelo simplificado	92
Figura 5.19 – Momento global na direção tangencial para o modelo simplificado	93
Figura 5.20 – Força global na direção vertical para o modelo simplificado	93
Figura 5.21 – Força cortante global na direção radial para o modelo simplificado,	94
Figura 5.22 – Força cortante global na direção tangencial para o modelo simplificado,	95
Figura 5.23 – Deslocamento do topo na direção radial para o modelo simplificado,	95
Figura 5.24 – Deslocamento do topo na direção tangencial para o modelo simplificado,	95
Figura 5.25 – Força global na direção vertical para o modelo simplificado	96

Figura 5.26 – Espectro de resposta do deslocamento do topo na direção tangencial para o modelo simplificado	97
Figura 5.27 – Forças cortantes globais para a torre SA.....	98
Figura 5.28 – Momentos globais para a torre SA	99
Figura 5.29 – Força global na direção vertical para a torre SA.....	99
Figura 5.30 – Força cortante global na direção radial para a torre SA, $f_o \times r_{max}/V = 19,82$	100
Figura 5.31 - Força cortante global na direção tangencial para a torre SA,	100
Figura 5.32 - Deslocamento do topo na direção radial para a torre SA, $f_o \times r_{max}/V = 19,82$	101
Figura 5.33 - Deslocamento do topo na direção tangencial para a torre SA,.....	101
Figura 5.34 – Esforço normal nas pernas da torre SA, $f_o \times r_{max}/V = 19,82$	102
Figura 5.35 - Forças cortantes globais para a torre SA na linha de transmissão.....	103
Figura 5.36 - Momentos globais para a torre SA na linha de transmissão	103
Figura 5.37 - Força global na direção vertical para a torre SA na linha de transmissão.....	104
Figura 5.38 - Força cortante global na direção radial para a torre SA na linha de transmissão, $f_o \times r_{max}/V = 6,63$	105
Figura 5.39 - Força cortante global na direção tangencial para a torre SA na linha de transmissão, $f_o \times r_{max}/V = 6,63$	105
Figura 5.40 - Deslocamento do topo na direção radial para a torre SA na linha de transmissão, $f_o \times r_{max}/V = 6,63$	106
Figura 5.41 - Deslocamento do topo na direção tangencial para a torre SA na linha de transmissão, $f_o \times r_{max}/V = 6,63$	106
Figura 5.42 - Esforço normal nas pernas da torre SA na linha de transmissão,.....	107
Figura 5.43 - Forças cortantes globais para a torre SE.....	108
Figura 5.44 – Momentos globais para a torre SE	108
Figura 5.45 - Força global na direção vertical para a torre SE.....	109

Figura 5.46 - Força cortante global na direção radial para a torre SE, $f_o \times r_{\max}/V = 10,04$	110
Figura 5.47 - Força cortante global na direção tangencial para a torre SE,	110
Figura 5.48 - Deslocamento do topo na direção radial para a torre SE, $f_o \times r_{\max}/V = 10,04$	110
Figura 5.49 - Deslocamento do topo na direção tangencial para a torre SE,.....	111
Figura 5.50 - Esforço normal nos mastros da torre SE, $f_o \times r_{\max}/V = 10,04$	112
Figura 5.51 – Esforço normal de tração nos estais da torre SE, $f_o \times r_{\max}/V = 10,04$	112
Figura 5.52 - Forças cortantes globais para a torre SE na linha de transmissão.....	113
Figura 5.53 - Momentos globais para a torre SE na linha de transmissão	113
Figura 5.54 - Força global na direção vertical para a torre SE na linha de transmissão.....	114
Figura 5.55 - Força cortante global na direção radial para a torre SE na linha de transmissão, $f_o \times r_{\max}/V = 5,74$	114
Figura 5.56 - Força cortante global na direção tangencial para a torre SE na linha de transmissão, $f_o \times r_{\max}/V = 5,74$	115
Figura 5.57 - Deslocamento do topo na direção radial para a torre SE na linha de transmissão, $f_o \times r_{\max}/V = 5,74$	116
Figura 5.58 - Deslocamento do topo na direção tangencial para a torre SE na linha de transmissão, $f_o \times r_{\max}/V = 5,74$	116
Figura 5.59 - Esforço normal nos mastros da torre SE na linha de transmissão,.....	116
Figura 5.60 - Esforço normal de tração nos estais da torre SE na linha de transmissão,.....	117
Figura 6.1 – Relação entre a força cortante global resultante máxima e a força global máxima atuante em uma face do modelo SA50, $\delta_0 = 500$ m.....	122

Figura 6.2 - Relação entre a força cortante global resultante máxima e a força global máxima atuante em uma face do modelo SE42, $\delta_0 = 500$ m.....	123
Figura 6.3 – Variação de C_{rh} no modelo SA50 para diferentes valores de δ_0	123
Figura 6.4 - Variação de C_{rh} no modelo SE42 para diferentes valores de δ_0	124
Figura 6.5 - Variação de C_{rh} em função de δ_0 para modelos autoportantes	124
Figura 6.6 - Variação de C_{rh} em função de δ_0 para modelos estaiados..	125
Figura 6.7 - Variação de C_{rh} para diversas posições torre-tornado na face transversal do modelo SA50, $\delta_0 = 100$ m.....	126
Figura 6.8 - Variação de C_{rh} para diversas posições torre-tornado na face transversal do modelo SE42, $\delta_0 = 100$ m.....	126
Figura 6.9 – Valores máximos de C_{rh} para os modelos autoportantes, $\delta_0 = 100$ m	126
Figura 6.10 - Valores máximos de C_{rh} para os modelos estaiados, $\delta_0 = 100$ m.....	127
Figura 6.11 – Variação de C_{rh} na face transversal do modelo SA50 para diferentes velocidades de translação, $\delta_0 = 100$ m	127
Figura 6.12 – Velocidade tangencial atuante no cabo de uma linha de transmissão.....	128
Figura 6.13 - Velocidade radial atuante no cabo de uma linha de transmissão.....	129
Figura 6.14 – Velocidade radial equivalente nos cabos da linha de transmissão.....	129
Figura 6.15 – Variação de C_{rv} em função de δ_0 para modelos autoportantes	131
Figura 6.16 - Variação de C_{rv} em função de δ_0 para modelos estaiados	131
Figura 6.17 – Velocidade vertical ao longo do cabo para diferentes valores de z/δ_0	133
Figura 6.18 – Perfil aproximado da pressão vertical tornádica sobre cabos condutores e pára-raios	133

Figura 6.19 – Forças globais horizontais e verticais, $D/r_{\max} = 0$	135
Figura 6.20 - Forças globais horizontais e verticais, $D/r_{\max} = 0,5$	135
Figura 6.21 – Forças globais horizontais e verticais, $D/r_{\max} = 1$	135
Figura 6.22 – Relação entre forças globais verticais de eixo material e corpo extenso	136
Figura 6.23 – Relação entre forças cortantes globais de eixo material e corpo extenso	137
Figura 6.24 - Relação entre momentos globais de eixo material e corpo extenso	137
Figura 6.25 – Momentos globais de torção no modelo SA50.....	138
Figura 6.26 – Relação entre força horizontal de torção e força cortante global.....	139
Figura 6.27 - Relevância da força de inércia em função da espessura média da estrutura	140
Figura 6.28 – Espectros de resposta a tornados para o modelo SA50 ..	142
Figura 6.29 - Espectros de resposta a tornados para o modelo SE42 ...	142
Figura 6.30 – Espectro de resposta para projeto a tornados	143
Figura 6.31 – Hipótese de projeto 1	147
Figura 6.32 – Hipótese de projeto 2	147
Figura 6.33 – Hipótese de projeto 3	148
Figura 6.34 – Hipótese de projeto 4	149
Figura 6.35 – Hipótese de projeto 5	149
Figura 6.36 – Hipótese de projeto 6	150
Figura 6.37 – Hipótese de projeto 7	150
Figura 6.38 – Hipótese de projeto 8	151
Figura 6.39 – Hipótese de projeto 9	151
Figura 7.1 – Funções de distribuição acumulada de C_{rh} para a força cortante global nos modelos autoportantes.....	153
Figura 7.2 – Funções de distribuição acumulada de C_{rh} para a força cortante global nos modelos estaiados	153
Figura 7.3 - Funções de distribuição acumulada de C_{rh} para o momento global nos modelos autoportantes	154
Figura 7.4 - Funções de distribuição acumulada de C_{rh} para o momento global nos modelos estaiados.....	154

Figura 7.5 – Funções de distribuição acumulada para C_{rv} nas torres autoportantes	155
Figura 7.6 - Funções de distribuição acumulada para C_{rv} nas torres estaiadas	155
Figura 7.7 - Funções de distribuição acumulada para C_{rc} nas torres autoportantes	157
Figura 7.8 - Funções de distribuição acumulada para C_{rc} nas torres estaiadas	157
Figura 7.9 - Funções de distribuição acumulada para C_{rt} nas torres autoportantes	158
Figura 7.10 - Funções de distribuição acumulada para C_{rt} nas torres estaiadas	158
Figura 7.11 - Funções de distribuição acumulada para C_{rtmast} nas torres estaiadas	159
Figura 7.12 – Funções de distribuição propostas para C_{rh} (momento global) e C_{rt}	160
Figura 7.13 - Funções de distribuição propostas para C_{rh} (força cortante global) e	160
Figura 7.14 - Funções de distribuição propostas para C_{rc} nas torres estaiadas	161
Figura 7.15 - Funções de distribuição propostas para C_{rt} nas torres estaiadas	161
Figura 7.16 - Funções de distribuição propostas para C_{rv} nas torres autoportantes	162
Figura 7.17 - Funções de distribuição propostas para C_{rv} nas torres estaiadas	162
Figura 7.18 – Funções de densidade de probabilidade da demanda, V_{max} = 85 m/s, e da capacidade para força cortante global na torre SA50	165
Figura 7.19 – Curva de fragilidade a tornados para força cortante global na torre SA50.....	165

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Escala de Fujita	45
Tabela 2.2 - Escala Fujita-Pearson	47
Tabela 2.3 – Escala de F ujita Aprimorada	48
Tabela 2.4 – Parâmetros de projeto para tornados nos Estados Unidos..	58
Tabela 2.5 – Parâmetros de pressão para tornados nos Estados Unidos	58
Tabela 4.1 - Freqüências naturais, em Hz, dos modelos de torre analizados	80
Tabela 6.1 – Parâmetro r_{max}/V	143
Tabela 7.1 – Ajuste das funções de distribuição dos coeficientes de demanda tornádicos	163

Lista de símbolos

A_i	área de exposição ao vento do módulo i ;
A_{exp}	projeção da área do corpo ortogonalmente ao vento incidente;
A_0	área de uma dada região local de interesse;
A_1	área, do lado do compartimento 1, da parede entre os compartimentos 1 e 2;
A_2	área que conecta os compartimentos 1 e 2;
B	projeção da largura do corpo no sentido da velocidade ou aceleração incidente;
$C(t)$	grandeza aleatória referente à capacidade da estrutura;
C_c	coeficiente de compressibilidade;
C_d	coeficiente de arrasto;
C_i	coeficiente de arrasto de norma para o módulo i ;
C_m	coeficiente de inércia;
C_p	coeficiente de pressão externa;
C_{pi}	coeficiente de pressão interna;
C_{rc}	coeficiente de redução à compressão;
C_{rh}	coeficiente de redução horizontal;
C_{rt}	coeficiente de redução à tração;
C_{rtmast}	coeficiente de redução à tração no mastro;
C_{rv}	coeficiente de redução vertical;
C_{sf}	coeficiente de redução da pressão externa básica;
C_{sm}	coeficiente de redução da pressão interna básica;
D	distância do centro da estrutura ao caminho do tornado;
$D(t)$	grandeza aleatória referente à demanda causada pela solicitação;
F	força;
F_A	força de arrasto;
F_b	força cortante global de projeto;
F_{blong}	força cortante global de projeto na direção longitudinal;
F_{btrans}	força cortante global de projeto na direção transversal;
F_D	função de distribuição de probabilidade da demanda;

F_h	força global na direção horizontal;
F_{hce}	força global horizontal, tomando a estrutura como corpo extenso;
F_{hem}	força global horizontal, tomando a estrutura como eixo material;
F_I	força de inércia;
F_{max}	força global máxima em uma face da torre;
F_N	referência à classificação de tornados na Escala Fujita;
F_n	força normal em um elemento do modelo devida ao tornado;
F_{nb}	força normal em um elemento do modelo devida ao vento de projeto;
F_q	força cortante global;
F_{ql}	força cortante global para vento na direção longitudinal;
F_{qt}	força cortante global para vento na direção transversal;
F_{q45}	força cortante global para vento a 45°;
F_r	força cortante global na direção radial;
F_{res}	força global resultante máxima;
F_t	força cortante global na direção tangencial;
F_v	força global na direção vertical;
F_{vce}	força global vertical, tomando a estrutura como corpo extenso;
F_{vem}	força global vertical, tomando a estrutura como eixo material;
FA_{max}	fator de amplificação de resposta máximo;
G	taxa de fluxo de massa;
$G_{N(in)}(t_j)$	massa de ar por unidade de tempo que entra no compartimento N no instante t_j ;
$G_{N(out)}(t_j)$	massa de ar por unidade de tempo que sai do compartimento N no instante t_j ;
K	constante de proporcionalidade da velocidade horizontal;
M	momento global;
M_b	momento global de projeto;
M_{blong}	momento global de projeto devido ao vento na direção longitudinal;
M_{btrans}	momento global de projeto devido ao vento na direção transversal;
M_{ce}	momento global, tomando a estrutura como corpo extenso;
M_{em}	momento global, tomando a estrutura como eixo material;
M_{Pto}	momento de torção de projeto a tornados;
M_r	momento global na direção radial;

M_t ,	momento global na direção tangencial;
M_{Tlong}	momento global de torção para vento na direção longitudinal;
M_{Ttrans}	momento global de torção para vento na direção transversal;
M_{T45}	momento global de torção para vento a 45°;
M_{to}	momento global de torção;
P	peso próprio da torre;
P_f	probabilidade de falha anual;
$P_{f/h}$	probabilidade de falha condicionada a um valor da ameaça;
$P_{f/V_{max}}$	probabilidade de falha condicionada a V_{max} ;
$P_H(V_{max})$	probabilidade da ameaça tornádica;
P_{total}	peso próprio da torre somado ao peso dos outros elementos da linha;
$P(S)$	probabilidade anual de um tornado atingir um ponto;
$P(V_s)$	probabilidade de a velocidade máxima de vento superar o valor V_s em determinado tornado;
$P(V > V_s)$	probabilidade anual de um ponto na área de interesse superar um determinado valor V_s ;
R	velocidade radial;
R_{COND}	velocidade radial no condutor;
R_{eq}	velocidade radial equivalente no cabo;
S	parâmetro de giro tornádico;
S_0	distância entre os centros do tornado e da estrutura no início da análise;
T	velocidade tangencial;
T_{COND}	velocidade tangencial no condutor;
T_{max}	velocidade tangencial máxima;
U	deslocamento do topo;
U_b	deslocamento do topo devido ao vento de projeto;
U_r	deslocamento do topo na direção radial;
U_{long}	deslocamento do topo na direção longitudinal;
U_t	deslocamento do topo na direção tangencial;
U_{trans}	deslocamento do topo na direção transversal;
U_{ven}	velocidade de vento incidente;
U_0	vento prevalecente da região;

V	velocidade de translação do tornado;
V_c	projeção do volume do corpo ortogonalmente à aceleração incidente;
V_h	velocidade horizontal;
V_{\max}	velocidade horizontal máxima de vento;
V_p	velocidade de projeto a ventos usuais;
V_{PH}	velocidade horizontal de projeto a tornados;
V_{PHcabo}	velocidade horizontal de projeto a tornados no cabo;
V_{PHest}	velocidade horizontal estática de projeto a tornados;
V_{PV}	velocidade vertical de projeto a tornados;
V_{PVcabo}	velocidade vertical de projeto a tornados no cabo;
V_{PVest}	velocidade vertical estática de projeto a tornados;
V_{ro}	velocidade rotacional;
$V_{ro\max}$	velocidade rotacional máxima;
V_s	velocidade de vento genérica utilizada na análise probabilística;
V_{som}	velocidade do som;
W	velocidade vertical;
$W_N(t_j)$	massa de ar no compartimento N no instante t_j ;
$W_N(t_{j+1})$	massa de ar no compartimento N no instante t_{j+1} ;
a	área média da trilha de dano;
a_h	convergência horizontal do vento no ambiente;
b	parâmetro de flutuação das componentes de velocidade;
e_m	espessura média da estrutura;
f_C	função de densidade de probabilidade da capacidade da estrutura;
f_D	função de densidade de probabilidade da demanda;
f_H	função de densidade de probabilidade da ameaça;
f_0	frequência fundamental do sistema;
h	determinado valor de ameaça;
h'	altura até o topo do domínio;
k	razão entre os calores específicos do ar à pressão constante e a volume constante;
l_v	vão de vento da linha de transmissão;
n	frequência anual de tornados observada na área A_0 ;
p_a	queda de pressão atmosférica;

p_a^{\max}	queda de pressão atmosférica máxima;
p_i	mudança de pressão interna;
$p_{iN}(t_j)$	pressão no compartimento N no instante t_j ;
$p_{iN}(t_{j+1})$	pressão no compartimento N no instante t_{j+1} ;
p_{\max}	pressão de vento máxima;
p_v	pressão de vento vertical no cabo;
p_w	pressão de vento utilizada no projeto de estruturas;
p_1	pressão no compartimento 1;
p_2	pressão no compartimento 2;
q_f	pressão externa básica;
q_m	pressão interna básica;
r	distância ao centro do tornado dividida pelo raio do núcleo, r'/r_{\max} ;
r'	distância ao centro do tornado;
r_{\max}	raio do núcleo, onde ocorre a velocidade tangencial máxima;
u	velocidade incidente na estrutura na direção x;
v	velocidade incidente na estrutura na direção y;
w	velocidade incidente na estrutura na direção z;
w_0	velocidade vertical média no topo do domínio;
z	altura sobre o solo;
β	ângulo entre a trajetória do tornado e o eixo x;
γ_1	peso por unidade de volume no compartimento 1;
Δt	incremento de tempo;
$\delta(r)$	espessura da camada limite em função de r ;
δ_0	espessura da camada limite quando $r \gg 1$;
η	razão entre a altura sobre o solo e a espessura da camada limite, z/δ ;
θ	ângulo entre a trajetória do tornado e a reta que une os centros do tornado e da estrutura;
ρ	massa específica do ar;
ϕ	ângulo entre o eixo x e a reta que une os centros do tornado e da estrutura;
ω	vorticidade vertical do ambiente.

“A ciência não é uma ilusão, mas seria uma ilusão acreditar que poderemos encontrar noutro lugar o que ela não nos pode dar.”

Sigmund Freud