



Thiago Galindo Pecin

**Avaliação das Ações Mecânicas de Tornados sobre
Estruturas Aporticadas Flexíveis**

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.

Orientadores: João Luís Pascal Roehl
Andréia Abreu Diniz de Almeida

Rio de Janeiro, março de 2006



Thiago Galindo Pecin

Avaliação das Ações Mecânicas de Tornados sobre Estruturas Aporticadas Flexíveis

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 Luís Pascal Roehl

Orientador
PUC-Rio

José Eduardo Maneschy

Eletronuclear

Paulo Batista Gonçalves

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Raul Rosas e Silva

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Andréia Abreu Diniz de Almeida

CNPq

José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 03 de março de 2006

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

Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Goiás em 2003. Técnico em Edificações, formado pelo CEFET-GO, em 1999. Iniciou o curso de Mestrado na PUC-Rio em 2004, atuando na linha de pesquisa de Instabilidade e Dinâmica das Estruturas.

Ficha Catalográfica

Pecin, Thiago Galindo

Avaliação das ações mecânicas de tornados sobre estruturas aporticadas flexíveis / Thiago Galindo Pecin; orientadores: João Luís Pascal Roehl, Andréia Abreu Diniz de Almeida. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2006.

91 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Tornado. 3. Estruturas. 4. Efeitos globais. 5. Efeitos cinemáticos. 6. Vento. I. Roehl, João Luís Pascal. II. Almeida, Andréia Abreu Diniz de. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 621.3

Aos meus pais, João Pecin e Alexânia Dias Galindo.
A Diego Galindo Pecin, meu irmão e melhor amigo, cuja existência se confunde
com a minha própria. Sempre estarão vivas em minha memória imagens da nossa
infância e juventude.

Agradecimentos

Sobretudo, à minha mãe, Alexânia Dias Galindo, pela decência, dignidade, caráter e amor com que criou, e ainda cria, seus cinco filhos. Registre-se aqui o orgulho de um deles. A ela dedico, e sempre dedicarei, todas as minhas conquistas.

Ao meu pai, João Pecin, a quem muito admiro pelos exemplos de simplicidade, caráter e justiça; ainda pela inspiração intelectual.

Aos meus irmãos, Diego Galindo Pecin, Giselle Dias Galindo Pecin, João Lucas R. O. Pin e Pecin, Guilherme Galindo Rodrigues e Fillipe Galindo Rodrigues.

À minha avó, Eni Dias Galindo, pelo amor e consideração que me dedica.

Ao meu avô, Antônio Manoel Galindo, em memória, por tudo que sua existência representou a mim e minha família.

À Érica Braga de Pinho, minha namorada, meu amor, pelo exemplo inigualável de sensibilidade e bondade; por me ensinar a ser uma pessoa melhor a cada dia.

Ao meu primo, Alex Antônio Galindo Filho, pela convivência e amizade.

Aos meus tios, Alexsimone e Alex; aos demais tios e primos.

Ao Tio Marcão, cujo falecimento precoce tornou, indubitavelmente, algum outro lugar mais alegre, entristecendo este.

Ao professor João Luís Pascal Roehl, pelos ensinamentos, que ultrapassam os conhecimentos técnicos; pela seriedade, envolvimento e interesse demonstrados durante este trabalho.

Ao professor Maurício Martines Sales, da Universidade Federal de Goiás, pelo exemplo.

À professora Andréia, pelo apoio e disponibilidade.

Aos amigos de mestrado, em especial Adriano dos Santos, Christiano Teixeira, Diego Orlando e Ygor Netto, pelos momentos de alegria compartilhados. Que conste para a posteridade, se não por escrito, ao menos em memória, que houve uma turma de pós-graduação deste departamento que aliou seus estudos a diversas noites alcoólicas e divertidas.

Ao Pires e ao B.G., pessoas jurídicas de extrema importância e apêndices imprescindíveis da pós-graduação. Lá, os problemas mais complexos foram resolvidos.

Estudo desenvolvido no bojo do projeto de cooperação entre PUC-Rio e Eletronuclear.

Ao CNPq e à Faperj, pelo apoio financeiro.

Resumo

Pecin, Thiago Galindo; Roehl, João Luís Pascal; Almeida, Andréia Abreu Diniz de. **Avaliação das Ações Mecânicas de Tornados sobre Estruturas Aperticadas Flexíveis**. Rio de Janeiro, 2006. 91p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A consideração dos efeitos da incidência de tornados sobre estruturas é prática corrente em vários países, principalmente no que diz respeito a instalações industriais sensíveis, nas quais as conseqüências de uma eventual ocorrência de tal fenômeno são de maior risco. No Brasil, a despeito de múltiplos registros em algumas regiões ao longo dos últimos anos, tais estudos são ainda incipientes. Objetiva-se, em particular, a avaliação de efeitos mecânicos de tornados sobre sistemas estruturais. Para isso, utiliza-se o modelo de campo de vento proposto por Wen (1975), baseado na solução qualitativa de Kuo (1971), e três modelos de pórticos tridimensionais, de alturas 20, 60 e 100 m. Através de ensaios numéricos, apresentam-se as respostas estática, cinemática e dinâmica dessas estruturas quando atingidas pelo tornado modelado. Análise comparativa entre os efeitos de inércia e arrasto é feita e é proposto um espectro de resposta cinemática a tornados. Os efeitos globais são também avaliados, a fim de se inferirem informações gerais sobre os efeitos mecânicos do fenômeno sobre sistemas estruturais. Comparações com a norma brasileira de vento são apresentadas e a simplificação de se considerar a estrutura como ponto material perante o sinistro é avaliada.

Palavras-chave

1. Tornado. 2. Estruturas. 3. Efeitos globais. 4. Efeitos cinemáticos. 5. Vento.

Abstract

Pecin, Thiago Galindo; Roehl, João Luís Pascal; Almeida, Andréia Abreu Diniz de. **Evaluation of Tornado Loads over Flexible Framed Structures.** Rio de Janeiro, 2006. 91p. MSc Dissertation – Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The consideration of the effects of the incidence of tornadoes on structures is common in many countries, mainly in sensible industrial installations, in which the consequences of an eventual occurrence of such phenomenon are of large risk. In Brazil, in spite of multiple registers in some regions during the last couple of years, such studies are still incipient. A methodology for the evaluation of tornado mechanical effects on structural systems is presented. For this, the wind field model proposed by Wen (1975), based on the qualitative solution of Kuo (1971) is used, and three models of 3-D framed structures, 20, 60 and 100 m high, are analyzed. Through numerical tests, the static and dynamic response of these structures to a sampling tornado are evaluated and analyzed. Comparative analysis of the inertia and drag effects is made and a tornadic response spectrum is presented. Global effects are also evaluated, in order to infer general information on the mechanical actions of the phenomenon on structural systems. Comparisons with the Brazilian wind code provisions are presented and the simplification of considering the structure as a material point during the analysis is criticized.

Keywords

1. Tornado. 2. Structures. 3. Global effects. 4. Kinetic effects. 5. Wind.

Sumário

1 Introdução	21
2 Revisão bibliográfica	23
2.1. O evento meteorológico	23
2.2. Considerações de projeto	28
2.2.1. Efeitos mecânicos sobre estruturas	31
2.2.1.1. Pressão direta de vento	31
2.2.1.2. Efeito de sucção	33
2.2.1.3. Impacto de projéteis	35
2.2.2. Ações de tornados sobre usinas nucleares	35
2.2.3. Ações de tornados sobre outras estruturas	38
3 Modelos gerais – ações mecânicas	40
3.1. Modelo de tornado segundo Kuo/Wen	40
3.2. Avaliação da pressão sobre a estrutura	45
4 Cenários	46
4.1. Modelo do tornado para os ensaios	46
4.2. Modelo do sistema	54
5 Desenvolvimento	56
5.1. Resultados cinemáticos	56
5.1.1. Efeitos da flexibilidade	56
5.1.2. Avaliação relativa dos efeitos de inércia e arrasto	63
5.2. Efeitos globais	66
5.2.1. Momentos e cortantes totais na base	66
5.2.2. Simplificação da discretização da estrutura	74
5.3. Avaliação e proposta de espectro de resposta para tornados	77
6 Conclusões e recomendações	81

7 Referências bibliográficas	84
8 Apêndice	90

Lista de figuras

Figura 2.1 – Exemplo de tornado americano	24
Figura 2.2 – Dias anuais com condições favoráveis à ocorrência de tornados no período de 1980 a 1999 – Brooks et al (2006)	26
Figura 2.3 – Ocorrência de tornados na Argentina – Goliger e Milford (1998)	26
Figura 2.4 – Formação do tornado de Indaiatuba (SP) – foto 1	27
Figura 2.5 – Formação do tornado de Indaiatuba (SP) – foto 2	27
Figura 2.6 – Exemplo de dano causado pelo tornado de Indaiatuba (SP)	28
Figura 2.7 – Divisão do território americano para definição de parâmetros de projeto a tornados – Simiu e Scanlan (1986)	37
Figura 3.1 – Parcelas de velocidade no tornado – Adaptada de Dutta et al (2002)	40
Figura 3.2 – Representação esquemática do campo de vento tornádico proposto por Kuo – adaptada de Savory et al (2001)	41
Figura 3.3 – Geometria do problema – adaptada de Wen (1975)	44
Figura 4.1 – Variação das componentes de velocidade em relação à espessura da camada limite	47
Figura 4.2 – Avaliação do efeito relativo da força de inércia na direção da velocidade radial, $z = 20$ m	48
Figura 4.3 - Avaliação do efeito relativo da força de inércia na direção da velocidade radial, $z = 60$ m	48
Figura 4.4 - Avaliação do efeito relativo da força de inércia na direção da velocidade radial, $z = 100$ m	49
Figura 4.5 - Avaliação do efeito relativo da força de inércia na direção da velocidade tangencial, $z = 20$ m	49
Figura 4.6 - Avaliação do efeito relativo da força de inércia na direção da velocidade tangencial, $z = 60$ m	50
Figura 4.7 – Avaliação do efeito relativo da força de inércia na direção da velocidade tangencial, $z = 100$ m	50
Figura 4.8 – Forças nas direções radial e tangencial, $z = 20$ m	51
Figura 4.9 – Forças nas direções radial e tangencial, $z = 60$ m	51

Figura 4.10 – Forças nas direções radial e tangencial, $z = 100$ m	51
Figura 4.11 – Variação das forças na direção radial com altura	52
Figura 4.12 – Variação das forças na direção tangencial com altura	52
Figura 4.13 – Variação espacial das forças nas duas direções a 30 m do centro do tornado	53
Figura 4.14 – Variação espacial horizontal das componentes de força, $z = 100$ m	53
Figura 4.15 – Modelo estrutural – adaptada de Almeida et al (2005)	55
Figura 5.1 – Nó do topo, N_t , onde se analisam os efeitos de flexibilidade dos modelos	57
Figura 5.2 – Deslocamento na direção radial para o modelo de 20 m; $f_{0t1} = 5,10$	57
Figura 5.3 – Deslocamento na direção tangencial para o modelo de 20 m; $f_{0t1} = 5,10$	58
Figura 5.4 – Deslocamentos nas duas direções para o modelo de 20 m; $f_{0t1} = 5,10$	58
Figura 5.5 - Deslocamento na direção radial para o modelo de 60 m; $f_{0t1} = 0,75$	59
Figura 5.6 - Deslocamento na direção tangencial para o modelo de 60 m; $f_{0t1} = 0,75$	59
Figura 5.7 - Deslocamentos nas duas direções para o modelo de 60 m; $f_{0t1} = 0,75$	60
Figura 5.8 - Deslocamento na direção radial para o modelo de 100 m; $f_{0t1} = 0,35$	60
Figura 5.9 – Deslocamento na direção tangencial para o modelo de 100 m; $f_{0t1} = 0,35$	61
Figura 5.10 - Deslocamentos nas duas direções para o modelo de 100 m; $f_{0t1} = 0,35$	61
Figura 5.11 – Aceleração do topo na direção tangencial para o modelo de 20 m de altura	62
Figura 5.12 - Aceleração do topo na direção tangencial para o modelo de 60 m de altura	62
Figura 5.13 – Aceleração do topo na direção tangencial para o modelo de 100 m de altura	62
Figura 5.14 – Deslocamento na direção radial com e sem inclusão da parcela	

devida à inércia para o modelo de 20 m	63
Figura 5.15 - Deslocamento na direção tangencial com e sem inclusão da parcela devida à inércia para o modelo de 20 m	64
Figura 5.16 - Deslocamento na direção radial com e sem inclusão da parcela devida à inércia para o modelo de 60 m	64
Figura 5.17 - Deslocamento na direção tangencial com e sem inclusão da parcela devida à inércia para o modelo de 60 m	64
Figura 5.18 - Deslocamento na direção radial com e sem inclusão da parcela devida à inércia para o modelo de 100 m	65
Figura 5.19 - Deslocamento na direção tangencial com e sem inclusão da parcela devida à inércia para o modelo de 100 m	65
Figura 5.20 – Sentidos vetoriais adotados para consideração dos efeitos globais	66
Figura 5.21 – Força cortante na base para o modelo de 20 m de altura	67
Figura 5.22 – Momentos de tombamento e torção, na base, para o modelo de 20 m de altura	67
Figura 5.23 – Forças cortantes na base para o modelo de 60 m de altura	69
Figura 5.24 – Momentos de tombamento e torção, na base, para o modelo de 60 m de altura	69
Figura 5.25 – Forças cortantes na base para o modelo de 100 m de altura	70
Figura 5.26 – Momentos na base para o modelo de 100 m de altura	70
Figura 5.27 – Força cortante na base na direção radial, Q_x	71
Figura 5.28 – Força cortante na base na direção tangencial, Q_y	71
Figura 5.29 – Momento de tombamento na base devido às ações tangenciais, M_x	71
Figura 5.30 – Momento de tombamento na base devido às ações radiais, M_y	72
Figura 5.31 – Momento de torção na base devido às ações radiais e tangenciais, M_z	72
Figura 5.32 – Razão entre forças globais máximas causadas pelo tornado e calculadas pela norma brasileira para o máximo vento	73
Figura 5.33 – Forças cortantes na base para o modelo de 20 m, para as metodologias de ponto material e corpo extenso	74
Figura 5.34 – Momentos de tombamento na base para o modelo de 20 m, para as metodologias de ponto material e corpo extenso	75

Figura 5.35 - Forças cortantes na base para o modelo de 60 m, para as metodologias de ponto material e corpo extenso	75
Figura 5.36 - Momentos de tombamento na base para o modelo de 60 m, para as metodologias de ponto material e corpo extenso	76
Figura 5.37 – Forças cortantes na base para o modelo de 100 m, para as metodologias de ponto material e corpo extenso	76
Figura 5.38 - Momentos de tombamento na base para o modelo de 100 m, para as metodologias de ponto material e corpo extenso	76
Figura 5.39 – Espectro de resposta cinemática de deslocamento na direção tangencial para o topo do modelo de 60 m	78
Figura 5.40 – Resposta no tempo para o primeiro pico do espectro	78
Figura 5.41 – Resposta no tempo na região de depressão observada no espectro	79
Figura 5.42 - Resposta no tempo para o segundo pico do espectro	79

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Escala de Fujita	25
Tabela 2.2 – Parâmetros de projeto para tornados nos Estados Unidos	37
Tabela 2.3 – Parâmetros de pressão de projeto para tornados nos Estados Unidos	37
Tabela 4.1 – Frequências naturais, Hz, do modelo do sistema estrutural	55
Tabela 5.1 – Efeitos globais calculados pela NBR 6123	73

Lista de símbolos

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_c ,	coeficiente de compressibilidade;
C_d ,	coeficiente de arrasto;
C_m ,	coeficiente de inércia;
C_p ,	coeficiente de pressão externa;
C_{pi} ,	coeficiente de pressão interna;
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;
F ,	força por unidade de comprimento;
FA_{max} ,	fator de amplificação de resposta máximo;
$G_{N(in)}(t_j)$,	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 ;
H ,	pé-direito do pavimento-tipo;
K ,	constante de proporcionalidade da velocidade horizontal;
M ,	momento de tombamento na base;
M_b ,	momento de tombamento na base para a máxima velocidade de vento prescrita pela NBR 6123;
M_x ,	momento de tombamento na base em x;
$M_{x_{ptomat}}$,	momento de tombamento na base em x, para a consideração de ponto material;
M_y ,	momento de tombamento na base em y;

$M_{y_{ptomat}}$,	momento de tombamento na base em y, para a consideração de ponto material;
M_z ,	momento de torção na base;
Q ,	força cortante total na base;
Q_b ,	força cortante total na base para a máxima velocidade de vento prescrita pela NBR 6123;
Q_x ,	força cortante total na base em x;
$Q_{x_{ptomat}}$,	força cortante total na base em x, para a consideração de ponto material;
Q_y ,	força cortante total na base em y;
$Q_{y_{ptomat}}$,	força cortante na base em y, para a consideração de ponto material;
$P(S)$,	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;
S_0 ,	distância entre os centros do tornado e da estrutura no início da análise;
T ,	velocidade tangencial;
T_{max} ,	velocidade tangencial máxima;
T_0 ,	período fundamental do sistema;
U ,	deslocamento do topo;
U_0	vento prevalecente da região;
U_{ven} ,	velocidade de vento incidente;
U_x ,	deslocamento do topo em x;
$U_{x_{max}}$,	deslocamento dinâmico máximo do topo em x;
U_y ,	deslocamento do topo em y;
$U_{y_{max}}$,	deslocamento dinâmico máximo do topo em y;
V ,	velocidade de translação do tornado;
V_0 ,	velocidade básica de vento da NBR 6123;
V_h ,	velocidade horizontal total;
V_{max} ,	velocidade horizontal máxima de vento;
V_{ro} ,	velocidade rotacional;
V_{romax} ,	velocidade rotacional máxima;
V_s ,	velocidade de vento genérica utilizada na análise probabilística;

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_y ,	aceleração do topo do modelo em y;
a_{cx} ,	aceleração incidente em x;
a_{cy} ,	aceleração incidente em y;
b ,	parâmetro de flutuação das componentes de velocidade;
d_k ,	lado da seção quadrada dos pilares;
f_0 ,	frequência fundamental do sistema;
g ,	aceleração da gravidade;
k ,	razão entre os calores específicos do ar à pressão constante e a volume constante;
m ,	número de pavimentos-tipo;
n ,	frequência anual de tornados observada na área A_0 ;
p_a ,	queda de pressão atmosférica;
p_a^{max} ,	máxima queda de pressão atmosférica;
p_i ,	mudança de pressão interna;
p_1 ,	pressão no compartimento 1;
p_2 ,	pressão no compartimento 2;
$p_{iN}(t_j)$,	pressão no compartimento N no instante t_j ;
$p_{iN}(t_{j+1})$,	pressão no compartimento N no instante t_{j+1} ;
p_{max} ,	máxima pressão de vento;
p_w ,	pressão de vento utilizada no projeto de estruturas;
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 máxima velocidade tangencial;
t_I ,	duração do pulso;
u ,	velocidade incidente na estrutura na direção x;
v ,	velocidade incidente na estrutura na direção y;
w ,	velocidade incidente na estrutura na direção z;
z ,	altura sobre o solo;

- Δt , incremento de tempo;
- β , ângulo entre a trajetória do tornado e o eixo x;
- δ_0 , espessura da camada limite quando $r \gg 1$;
- $\delta(r)$, espessura da camada limite em função de r;
- ϕ , ângulo entre o eixo x e a reta que une os centros do tornado e da estrutura;
- γ , peso por unidade de volume no compartimento 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;

“Toda a nossa ciência, comparada com a realidade, é primitiva e infantil – ainda assim, é o
nosso bem mais precioso.”
Albert Einstein