

Fernanda Lins Gonçalves Pereira

**Sensibilidade das estruturas civis das usinas
nucleares a cargas tornádicas**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio

Orientador : Prof. Paulo Batista Gonçalves
Co-Orientador: Prof. João Luís Pascal Roehl
Co-Orientador: Prof. Andréia Abreu Diniz de Almeida

Rio de Janeiro
Agosto de 2009

Fernanda Lins Gonçalves Pereira

**Sensibilidade das estruturas civis das usinas
nucleares a cargas tornádicas**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC–Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Paulo Batista Gonçalves

Orientador

Departamento de Engenharia Civil — PUC–Rio

Prof. João Luís Pascal Roehl

Co–Orientador

Departamento de Engenharia Civil — PUC–Rio

Prof. Andréia Abreu Diniz de Almeida

Co–Orientador

Departamento de Engenharia Civil — PUC–Rio

Prof. Raul Rosas e Silva

Departamento de Engenharia Civil — PUC–Rio

Prof. Rodolfo Luiz Martins Suanno

Eletronuclear S.A — Eletronuclear

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC–Rio

Rio de Janeiro, 13 de Agosto de 2009

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

Fernanda Lins Gonçalves Pereira

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro em agosto de 2007. No mesmo ano, ingressou no curso de mestrado em Engenharia Civil da PUC-Rio, na área de concentração de Estruturas, atuando na linha de pesquisa de Instabilidade e Dinâmica das Estruturas, sendo bolsista CNPq durante esse período.

Ficha Catalográfica

Pereira, Fernanda Lins Gonçalves

Sensibilidade das estruturas civis das usinas nucleares a cargas tornádicas : / Fernanda Lins Gonçalves Pereira; orientador: Paulo Batista Gonçalves; co-orientadores: João Luís Pascal Roehl, Andréia Abreu Diniz de Almeida. — 2009.

105 f.: il.(color.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Tornado. 3. Usina nuclear. 4. Forças mecânicas. 5. Efeitos barométricos. 6. Ações de mísseis. I. Gonçalves, Paulo Batista. II. Roehl, João Luís Pascal. III. Almeida, Andréia Abreu Diniz de. IV. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. V. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

Agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, amigos, colegas e professores, e em especial:

Aos meus pais, Alvimar e Helida, e meus avós, Dormecínio e Ary-Cléa, por sempre terem me apoiado e incentivado, pelo amor e carinho deles.

Aos professores João Luís Pascal Roehl e Andréia Abreu Diniz de Almeida pela amizade, orientação e oportunidade de aprender e crescer mais.

Ao meu namorado André Luiz Ferreira Pinto, pelo apoio dado para o desenvolvimento deste trabalho, pela amizade, compreensão e paciência.

À Monique Cordeiro Rodrigues, amiga de faculdade, sempre presente nesses dois anos de mestrado, com a peculiar amizade.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos meus amigos e colegas da PUC-Rio e UERJ pela amizade e por sempre me mostrarem coisas boas da vida.

E a Deus, por me permitir conquistar mais um sonho.

Resumo

Pereira, Fernanda Lins Gonçalves; Gonçalves, Paulo Batista (Orientador); Roehl, João Luís Pascal (Co-orientador); Almeida, Andréia Abreu Diniz de (Co-orientador). **Sensibilidade das estruturas civis das usinas nucleares a cargas tornádicas**. Rio de Janeiro, 2009. 105p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Dentre as manifestações da natureza de grande intensidade que têm acontecido em algumas regiões brasileiras, uma das que carecem de mais estudos direcionados ao território nacional é o tornado. Por ser um fenômeno que não pode ser evitado, a ocorrência de tal desastre pode causar inúmeros impactos ambientais e sócio-econômicos. Com o propósito de avaliar a ação de um tornado sobre certas estruturas civis de usinas nucleares, estão sendo estudadas as forças mecânicas, os efeitos barométricos e as ações dos mísseis originários de um tornado de projeto chocando-se com três estruturas selecionadas: o prédio do reator, o edifício de alimentação de emergência e a torre de ventilação. Para isso, está sendo adotado o modelo de campo de ventos proposto por Wen, baseado na solução teórica de Kuo. Ademais, para melhor compreensão do modelo, é feita uma análise dos parâmetros utilizados no método, demonstrando como alterações nesses elementos influenciam nos valores das velocidades calculadas. Também é feita uma análise comparativa entre os efeitos de inércia e arrasto, além dos esforços globais nas estruturas avaliados como ponto material e corpo extenso, e uma breve descrição da geração da curva de ameaça para a região de Angra dos Reis, desenvolvido por Almeida. E, por fim, mediante uma simulação numérica, apresenta-se a resposta dinâmica para a torre de ventilação quando atingida pelo tornado proposto.

Palavras-chave

Tornado; Usina nuclear; Forças mecânicas; Efeitos barométricos; Ações de mísseis;

Abstract

Pereira, Fernanda Lins Gonçalves; Gonçalves, Paulo Batista (Advisor); Roehl, João Luís Pascal (Co-advisor); Almeida, Andréia Abreu Diniz de (Co-advisor). **Nuclear Plant Civil Structure Sensitivity to Tornado Mechanical Actions**. Rio de Janeiro, 2009. 105p. MSc Dissertation — Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Among the nature great intensity manifestations that have happened in some brazilian regions, one that needs more directed attention in civil engineering structures design is the tornado. For being a phenomenon that cannot be prevented, the occurrence of such disaster can cause innumerable ambient and partner-economic impacts. With the intention to evaluate the action of a tornado on certain nuclear power plant civil engineering structures, mechanical forces, barometric effects and the action of flying missiles, under a tornado action on three selected structures: the Reactor Building, the Emergency Feed Building and the Vent Stack. For this, it is being adopted the Wen's wind field model, based on the theoretical Kuo's solution. Furthermore, for better model understanding, variations on the used parameters are made to indicate how these changes may influence the calculated velocities. Also a comparative analysis is done between inertia and drag effects, beyond the global effects on the evaluated structures, as material point and extensive body, for instance, and a short description on the generation of a tornado hazard curve for Angra dos Reis region, according to Almeida. And, finally, by a numerical simulation, a dynamic response is studied for the Vent Stack reached by an artificial tornado.

Keywords

Tornado; Nuclear Power Plant; Mecanical Forces; Pressure Effects; Missiles Actions;

Sumário

1	Introdução	15
2	Usinas Nucleares	17
2.1	Estruturas Cíveis Sensíveis	18
3	Ações Tornádicas	21
3.1	O fenômeno	21
3.2	Modelo Cinemático	27
3.3	Ações Mecânicas	31
3.4	Efeitos Barométricos	32
3.5	Mísseis	32
4	Tornado de Projeto	34
4.1	Análise dos Parâmetros	35
4.1.1	Velocidade Translacional	35
4.1.2	Velocidade Tangencial Máxima	36
4.1.3	Espessura da Camada Limite	37
4.1.4	Raio Máximo	41
4.2	Velocidade do Tornado	43
4.3	Conclusões Imediatas	46
5	Ameaça Tornádica	48
5.1	Exemplo de Angra	52
6	Ações Mecânicas Principais sobre Edificações de uma Usina Nuclear	54
6.1	Forças sobre estruturas civis sensíveis	54
6.1.1	Parcela do arrasto e da inércia	55
6.1.2	Corpo extenso e ponto material	61
6.2	Queda de Pressão Atmosférica	62
6.3	Ações de Mísseis	65
6.3.1	Identificação dos mísseis de projeto	65
6.4	Conclusões Imediatas	70
7	Exemplificação para projeto	71
7.1	Forças sobre as Estruturas	71
7.1.1	Edifício de controle de emergência	71
7.1.2	Prédio do reator	72
7.1.3	Torre de ventilação	73
7.2	Queda de Pressão Atmosférica	73
7.2.1	Edifício de controle de emergência	74
7.2.2	Prédio do reator	76
7.2.3	Torre de ventilação	77
7.3	Míssil	79
7.3.1	Automóvel	79
7.3.2	Tubulação	79

7.3.3	Esfera	81
8	Ensaio e Análise dos Resultados para a Torre de Ventilação	82
8.1	Análise dos Parâmetros	87
8.1.1	Velocidade Translacional	88
8.1.2	Raio máximo	90
8.1.3	Camada Limite	91
8.1.4	Velocidade Tangencial	92
8.2	Conclusões Imediatas	93
9	Conclusões Finais	95
	Referências Bibliográficas	98
A	Coeficientes de arrasto e inércia	102
B	Detalhes para o Cálculo das Acelerações	104

Lista de figuras

2.1	Usinas Nucleares na América reportados à IAEA até 24 de agosto de 2006.	17
2.2	Foto da usina de Angra 2.	19
3.1	Tornado F3 em Kansas/Oklahoma, em 3 de maio de 1999.	21
3.2	Tipos de nuvens:	22
3.3	Supercélulas.	23
3.4	<i>Downburst</i> .	23
3.5	Inclinação da coluna de ar por uma corrente de ar ascendente.	24
3.6	Nuvem funil.	24
3.7	Tromba d'água.	24
3.8	Representação esquemática do campo de vento tornádico proposto por Kuo.	28
3.9	Geometria do problema - adaptada de Wen.	30
3.10	Efeitos locais do impacto dos mísseis.	33
4.1	Velocidade tangencial média, para diferentes velocidades translacionais.	35
4.2	Velocidade radial média, para diferentes velocidades translacionais.	36
4.3	Velocidade tangencial média, para diferentes velocidades tangenciais máximas.	36
4.4	Velocidade radial média, para diferentes velocidades tangenciais máximas.	37
4.5	Espessura relativa da camada limite ao longo de r .	38
4.6	Velocidade radial ($r' = r_{max}$) ao longo da altura dividida por δ_0 .	38
4.7	Velocidade tangencial ($r' = r_{max}$) ao longo da altura dividida por δ_0 .	39
4.8	Velocidade radial ($r' = r_{max}$) ao longo da altura para diferentes valores de δ_0 .	39
4.9	Velocidade tangencial ($r' = r_{max}$) ao longo da altura para diferentes valores de δ_0 .	40
4.10	Velocidade tangencial média ao longo do tempo para diferentes valores de δ_0 .	40
4.11	Distribuição da espessura relativa da camada limite, ao longo de r' , para diferentes valores de r_{max} .	42
4.12	Velocidade tangencial média ao longo do tempo para diferentes valores de r_{max} .	42
4.13	Esquema indicando a posição inicial e final do tornado em relação ao ponto de interesse.	43
4.14	Velocidade radial para diferentes alturas.	43
4.15	Velocidade na direção x para diferentes alturas.	44
4.16	Velocidade tangencial para diferentes alturas.	45
4.17	Velocidade na direção y para diferentes alturas.	45
4.18	Velocidade vertical para diferentes alturas.	46

5.1	Expectativa de ocorrência de tornados no mundo num período de 4 anos.	49
5.2	Ocorrências de tornados sobre conformação das bacias hidrográficas.	50
5.3	Curvas de ameaça de tornado. Velocidade máxima (escala Fujita Melhorada) x Probabilidade anual.	51
5.4	Curvas de ameaça tornádica para a região de Angra dos Reis. Velocidade máxima (escala Fujita Melhorada) x Probabilidade anual.	53
6.1	Módulo da força total ao longo do tempo.	55
6.2	Distribuição da força na direção x ao longo da altura.	56
6.3	Distribuição da força na direção y ao longo da altura.	56
6.4	Detalhe da velocidade na direção x (figura 4.15) em $t=12,5s$.	57
6.5	Detalhe da velocidade na direção y (figura 4.17) em $t=12,5s$.	58
6.6	Aceleração na direção x para diferentes alturas.	58
6.7	Aceleração na direção y para diferentes alturas.	59
6.8	Força total na direção x, para uma estrutura quadrada de lado 15m e altura de 100m.	59
6.9	Força total na direção y, para uma estrutura quadrada de lado 15m e altura de 100m.	60
6.10	Participação das parcelas de arrasto e inércia nas direções x e y para diferentes alturas.	60
6.11	Gradiente de pressão atmosférica.	62
6.12	Queda de pressão atmosférica.	63
6.13	Distribuição temporal da taxa de queda de pressão.	64
6.14	Distribuição da taxa de queda de pressão com a altura, parametrizada pela espessura da camada limite.	65
7.1	Forças totais na estrutura nas direções x e y.	71
7.2	Forças totais na estrutura nas direções x e y.	72
7.3	Forças totais na estrutura nas direções x e y.	73
7.4	Posição dos pontos avaliados.	74
7.5	Queda de pressão para altura de 7,10m, com o tornado atingindo a menor face, 7.4(a).	74
7.6	Queda de pressão para altura de 7,10m, com o tornado atingindo a maior face, 7.4(b).	75
7.7	Valores da queda de pressão ao longo da altura em módulo (centro da face).	75
7.8	Valores da taxa de pressão ao longo da altura.	76
7.9	Valores da queda de pressão ao longo da altura em módulo.	76
7.10	Valores da taxa de queda de pressão ao longo da altura.	77
7.11	Valores ao longo da altura da queda de pressão.	78
7.12	Valores ao longo da altura da taxa de queda de pressão.	78
8.1	1º modo de vibração da torre, $f_0=0,43Hz$, direção X.	83
8.2	4º modo de vibração da torre, $f_0=1,71Hz$, direção Y.	83
8.3	5º modo de vibração da torre, $f_0=3,98Hz$, direção X.	83
8.4	12º modo de vibração da torre, $f_0=7,11Hz$, direção Y.	83
8.5	Geometria do elemento SHELL93.	84
8.6	Vista frontal da torre.	84

8.7	Vista superior da torre.	84
8.8	Deslocamento na direção X; $f_0 t_1 = 4,30$.	85
8.9	Deslocamento na direção Y; $f_0 t_1 = 4,30$.	85
8.10	Espectro de resposta para três tipos de pulsos.	86
8.11	Deslocamento na direção X para as 20 primeiras frequências.	87
8.12	Deslocamento na direção Y para as 20 primeiras frequências.	87
8.13	Deslocamento na direção X; $f_0 t_1 = 0,86$.	88
8.14	Deslocamento na direção Y; $f_0 t_1 = 0,86$.	88
8.15	Deslocamento na direção X; $f_0 t_1 = 0,215$.	89
8.16	Deslocamento na direção Y; $f_0 t_1 = 0,215$.	89
8.17	Deslocamento na direção X; $f_0 t_1 = 2,15$.	90
8.18	Deslocamento na direção Y; $f_0 t_1 = 2,15$.	90
8.19	Deslocamento na direção X; $\delta_0 = 100\text{m}$.	91
8.20	Deslocamento na direção Y; $\delta_0 = 100\text{m}$.	91
8.21	Deslocamento na direção X; $T_{max} = 26\text{m/s}$.	92
8.22	Deslocamento na direção Y; $T_{max} = 26\text{m/s}$.	92
A.1	Coeficiente de arrasto para um prisma retangular bidimensional num fluxo laminar.	102
A.2	Variação do coeficiente de arrasto de um cilindro retangular com seção transversal D/B.	102

Lista de tabelas

3.1	Escala Fujita.	25
3.2	Parte da Escala Fujita Melhorada.	26
4.1	Valores máximos e iniciais das velocidades tangenciais e sua relação para diferentes valores de δ_0 .	41
5.1	Tornados no Brasil, ano de 2009.	48
5.2	Registros de tornados nas províncias tornádicas.	51
5.3	Regiões selecionadas para avaliação da ameaça tornádica.	52
6.1	Forças máximas e iniciais na estrutura, e a razão entre elas.	55
6.2	Diferença entre a força calculada como CE e PM.	61
6.3	Valores máximos da queda de pressão.	63
6.4	Valores máximos da taxa de queda pressão.	64
6.5	Características dos mísseis para as usinas de Angra dos Reis.	66
7.1	Valores máximos retirados das curvas da figura 7.1.	72
7.2	Valores máximos retirados das curvas da figura 7.2.	72
7.3	Valores máximos retirados das curvas da figura 7.3.	73
8.1	Frequências naturais e frações de massa acumulada.	82
A.1	Parte da tabela de coeficiente de arrasto (C_d).	103
A.2	Parte da tabela de coeficiente de massa adicional (C_a), para determinação do coeficiente de inércia (C_m)*.	103

Lista de Símbolos

A_c ,	menor área de contato com a face do alvo;
A_{exp} ,	projeção da área do corpo ortogonalmente à velocidade de vento incidente;
C_a ,	coeficiente de massa adicional;
A_p ,	menor área projetada da seção de corte do míssil;
C_d ,	coeficiente de arrasto;
C_m ,	coeficiente de inércia;
D ,	distância do centro da estrutura à trajetória do tornado;
E_L ,	energia perdida;
E_m ,	energia cinética inicial;
F ,	força;
F_{AD}	fator de amplificação dinâmica;
K ,	fator de penetrabilidade do concreto;
N ,	fator de forma do míssil;
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 acima da camada limite;
T_p ,	espessura necessária para prevenir a perfuração;
T_s ,	espessura necessária para evitar o estilhaçamento;
U ,	vento prevalecente na região;
U_{ven} ,	velocidade de incidência do vento;
V ,	velocidade de translação do tornado;
V_i ,	velocidade de impacto do míssil normal à superfície;
V_{EF} ,	velocidade do vento na escala Fujita modificada;
V_F ,	velocidade do vento na escala Fujita;
Vol ,	projeção do volume do corpo ortogonalmente à aceleração de vento incidente;
V_s ,	velocidade de impacto do automóvel;
VT_{ini} ,	velocidade tangencial média no início da análise;
VT_{max} ,	velocidade tangencial média máxima;
W ,	velocidade vertical;
W_m ,	massa do míssil;
W_p ,	peso do automóvel;

b ,	parâmetro de flutuação das componentes de velocidade;
d_0 ,	diâmetro nominal;
d_e ,	diâmetro efetivo;
e ,	limite de perfuração;
f_{ck} ,	resistência característica do concreto à compressão;
f_0 ,	frequência fundamental do sistema;
f'_c ,	tensão de compressão limite do concreto;
g ,	aceleração da gravidade;
h_s ,	limite de estilhaçamento;
p_a ,	queda de pressão atmosférica;
p_i ,	mudança de pressão interna;
r ,	distância ao centro do tornado dividida pelo raio máximo, r'/r_{\max} ;
r' ,	distância ao centro do tornado;
r_{\max} ,	raio máximo, distância radial a partir do centro do tornado onde a velocidade tangencial acima da camada limite é máxima;
t_1 ,	duração do pulso;
t_{\max} ,	tempo total da análise;
t_p ,	espessura da barreira para prevenir a perfuração;
t_s ,	espessura da barreira para evitar o estilhaçamento;
u ,	velocidade incidente na estrutura na direção x;
v ,	velocidade incidente na estrutura na direção y;
w ,	velocidade incidente na estrutura na direção z;
x ,	profundidade de penetração;
$x(t)$,	extensão do impacto com o alvo;
z ,	altura acima do nível do solo;
β ,	ângulo entre a trajetória do tornado e o eixo x;
δ ,	espessura da camada limite;
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 fluido;
ϕ ,	ângulo entre o eixo x e a reta que une os centros do tornado e da estrutura;
ω ,	frequência.