

6

Ações Mecânicas Principais sobre Edificações de uma Usina Nuclear

6.1

Forças sobre estruturas civis sensíveis

Na avaliação da força sobre a estrutura é utilizada a relação força/velocidade descrita pela equação de Morrison, como está sendo descrita na seção 3.3, que é composta por duas parcelas: arrasto + inércia. Para o cálculo dos valores das forças é preciso, além dos parâmetros já citados, o coeficiente de arrasto, C_d , e o coeficiente de massa, C_m , que estão sendo adotados de acordo com Holmes [34], Det Norske Veritas [24] e Liu [40]. No apêndice estão expostos os gráficos e tabelas com os valores de C_d e C_m usados.

Além disso, estão sendo mantidas as considerações feitas no capítulo 4, sintetizadas a seguir:

- Trajetória do tornado alinhada com o centro da estrutura;
- Ângulo entre a trajetória do tornado e o eixo x, $\beta = 0$;
- Distância do centro da estrutura à trajetória do tornado, $D = 0$;
- Velocidades calculadas no centro da estrutura.

Também está sendo adotado que a presença do prédio não afeta o campo tornádico, isto é, interações não são consideradas.

Na figura 6.1 estão sendo traçadas as curvas da força total numa estrutura em planta com dimensões iguais a 15×15 m. A força total é formada pela composição das forças na direções x e y, que são determinadas pelo somatório das forças ao longo da altura para cada instante de tempo. As curvas são traçadas para três alturas diferentes — 20m, 60m e 100m.

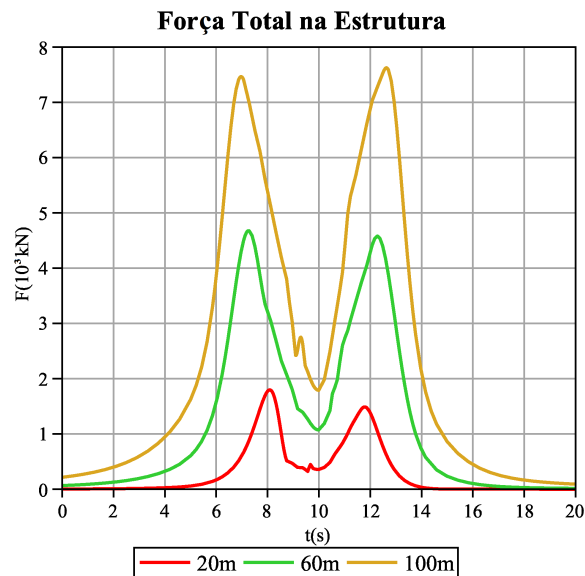


Figura 6.1: Módulo da força total ao longo do tempo.

Na tabela 6.1 são mostrados os valores das forças totais máximas e iniciais, retiradas da figura 6.1, e a razão entre esses valores.

Tabela 6.1: Forças máximas e iniciais na estrutura, e a razão entre elas.

Altura (m)	Força Máxima ($10^6 kN$)	Força Inicial ($10^6 kN$)	Razão
20	1,80	0,005	343
60	4,68	0,07	69
100	7,62	0,22	35

Percebe-se, que a máxima força total que ocorre na estrutura é pelo menos 35 vezes maior que a força total inicial, mostrando que os valores de S_0 e t_{max} foram satisfatórios.

6.1.1

Parcela do arrasto e da inércia

Assim como foi feito por Wen [49] e Pecin [43], está sendo realizado neste trabalho um estudo do desenvolvimento das forças de arrasto e de inércia separadamente. Nos gráficos das figura 6.2 e 6.3, é possível avaliar para um instante de tempo qualquer ($t=12,5$ segundos) a variação da força (arrasto + inércia) e de suas parcelas ao longo de uma estrutura de 100m de altura e seção quadrada de 15m de lado.

Percebe-se que, na direção x, a maior contribuição provém da força de inércia, enquanto que, na direção y, a participação da força de arrasto é

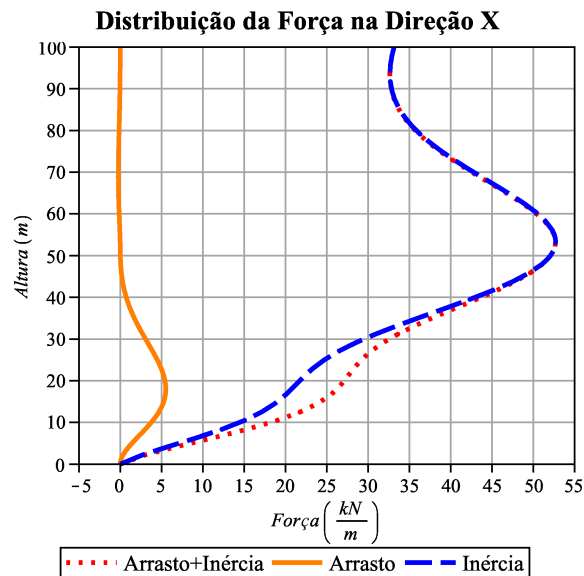


Figura 6.2: Distribuição da força na direção x ao longo da altura.

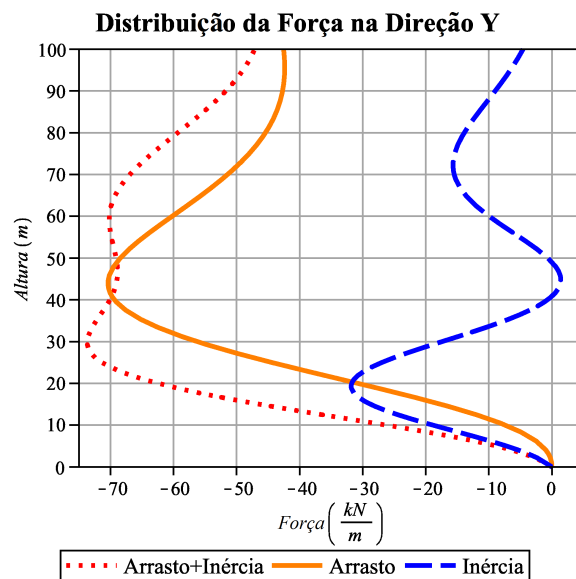


Figura 6.3: Distribuição da força na direção y ao longo da altura.

superior. Essa diferença entre as direções deve-se somente ao comportamento das velocidades e das acelerações, já que como a estrutura é simétrica os demais parâmetros são iguais.

A figura 6.4 destaca o instante 12,5s da figura 4.15 (Velocidade na direção x para diferentes alturas), enquanto que a figura 6.5 destaca o mesmo instante para a figura 4.17 (Velocidade na direção y para diferentes alturas). Para

altura, por exemplo, de 60m a velocidade na direção x é de -2,58m/s, como na fórmula do cálculo da força 3-10, a velocidade é multiplicada pelo seu módulo, a força na direção x é proporcional a $|(-2,58)| \times (-2,58) = -6,67$. Já na direção y, a velocidade é de aproximadamente -54,56m/s, que resulta numa força proporcional a $|(-54,56)| \times (-54,56) = -2976,85$. Sendo assim, a força oriunda do arrasto é, na direção y, 446 vezes superior do que a força na direção x; pelo gráfico da figura 6.3 a força na direção y é de -60,22kN, enquanto que na direção x é de -0,13kN (imperceptível pela figura 6.2), o que corresponde exatamente aos 446 e explica o porquê da força de arrasto ser superior na direção y.

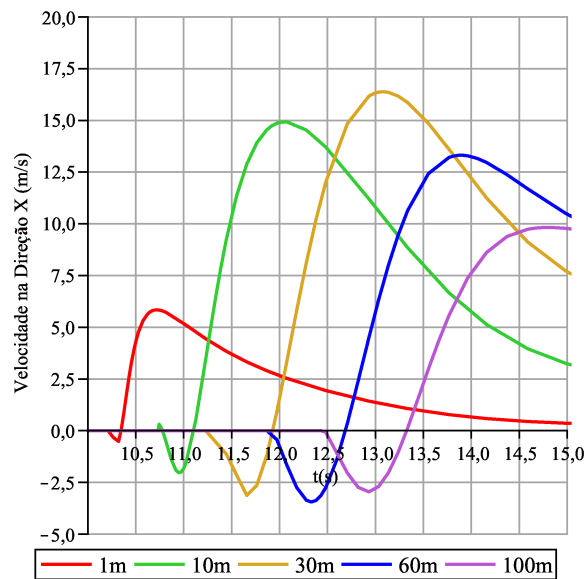


Figura 6.4: Detalhe da velocidade na direção x (figura 4.15) em t=12,5s.

Fazendo o mesmo procedimento descrito anteriormente para a aceleração, tem-se para altura de 60m e instante de 12,5s, a aceleração na direção x de $92,95m/s^2$, figura 6.6. E na direção y, $-18,32m/s^2$, figura 6.7. Na fórmula do cálculo da força, a aceleração não aparece multiplicada pelo seu módulo, sendo assim, a força oriunda da inércia é, na direção x, -5 vezes superior do que a força na direção y, pelo gráfico da figura 6.3 a força na direção y é de -9,96kN, enquanto que na direção x, figura 6.2, é de 50,55kN, o que corresponde exatamente aos -5, o que explica o porquê da força de inércia ser superior na direção x.

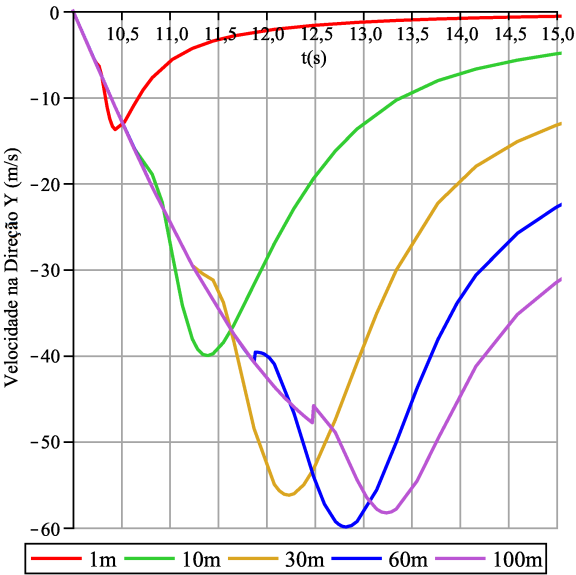


Figura 6.5: Detalhe da velocidade na direção y (figura 4.17) em t=12,5s.

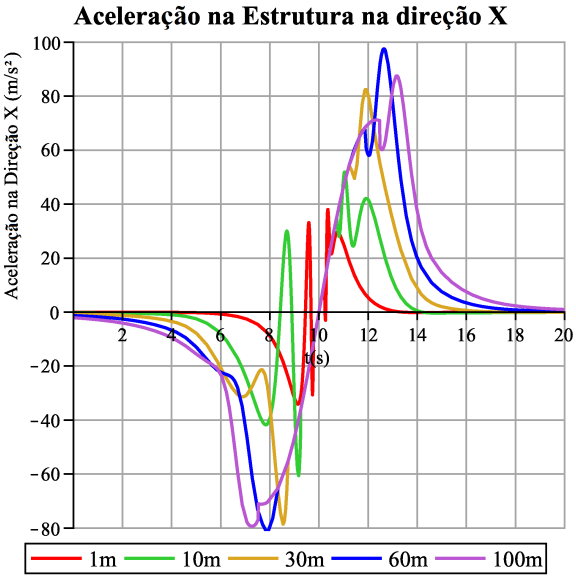


Figura 6.6: Aceleração na direção x para diferentes alturas.

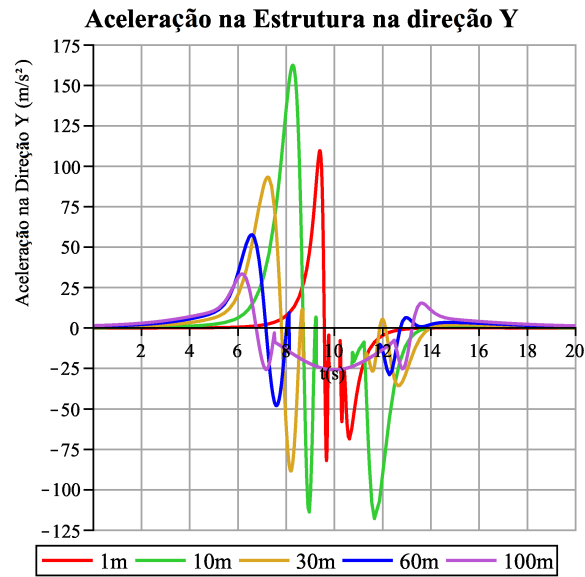


Figura 6.7: Aceleração na direção y para diferentes alturas.

Para verificar se essa configuração não é uma situação pontual, traçam-se os gráficos, para a mesma estrutura, das forças totais ao longo do tempo. Nota-se que a configuração: direção x - inércia e direção y - arrasto, permanece (figura 6.8 e figura 6.9).

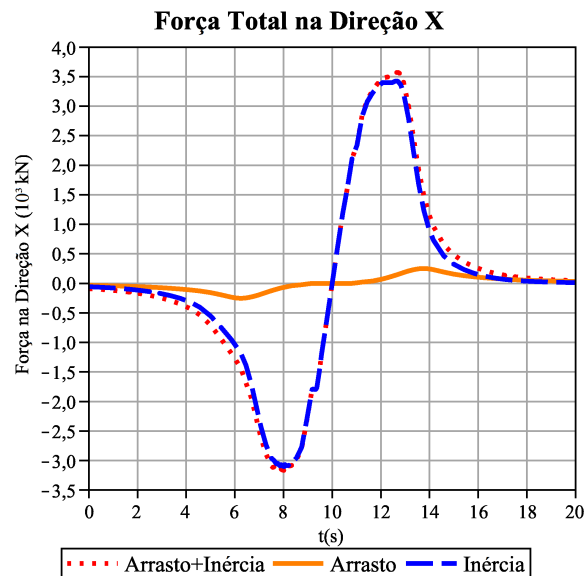


Figura 6.8: Força total na direção x, para uma estrutura quadrada de lado 15m e altura de 100m.

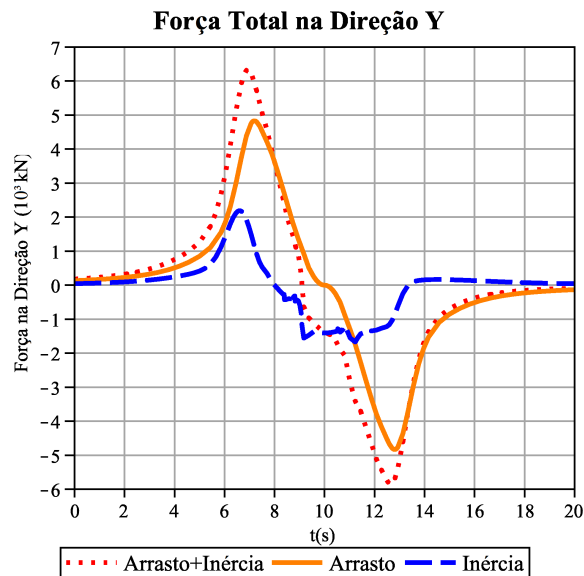


Figura 6.9: Força total na direção y, para uma estrutura quadrada de lado 15m e altura de 100m.

Objetivando determinar a influencia das parcelas de inércia e arrasto no resultado final da força atuante na estrutura nas direções x e y, avalia-se o percentual de participação de cada parcela no valor da força final, figura 6.10, para estruturas quadradas de lado 15m e alturas diferentes.

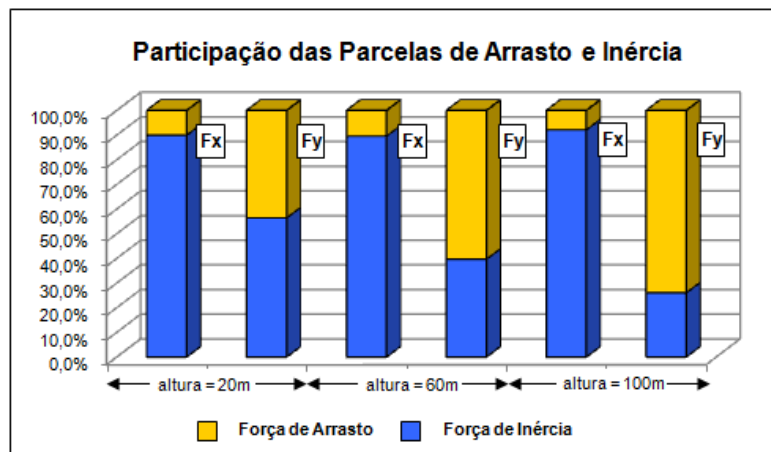


Figura 6.10: Participação das parcelas de arrasto e inércia nas direções x e y para diferentes alturas.

Conclui-se, que a parcela da força de inércia predomina na direção x e que para estruturas mais altas, a parcela da força de arrasto sobressai na direção y. Porém, essas não podem ser consideradas como unicamente essenciais para o cálculo, pois as outras parcelas não chegam a ser julgadas desprezíveis no cálculo final.

6.1.2

Corpo extenso e ponto material

No cálculo das forças atuantes pode-se considerar a estrutura como um corpo extenso (CE) — Pecin [43], ou como um ponto material (PM) — Wen [49]. Quando a estrutura é avaliada como PM, considera-se que suas dimensões são suficientemente menores que o raio máximo do tornado, de tal forma que todas as ações são avaliadas em seu eixo de simetria, não havendo variação espacial horizontal do carregamento. Considerar a estrutura como CE é calcular a variação espacial das velocidades ao longo de sua superfície.

Até então, as forças estão sendo calculadas considerando a estrutura como um PM, pois as velocidades estão sendo determinadas para apenas um ponto, o centro da estrutura. A tabela 6.2 mostra a diferença, equação 6-1, que ocorre ao considerar a estrutura como um PM ao invés de um CE, em estruturas fechadas de seção quadrada, com variação do lado e da altura.

$$\text{diferença} = \frac{\text{corpo extenso} - \text{ponto material}}{\text{corpo extenso}} \times 100 \quad (6-1)$$

Tabela 6.2: Diferença entre a força calculada como CE e PM.

Lado (m)	Altura (m)	Direção X (%)	Direção Y (%)	Resultante (%)
15	20	41,7	34,8	35,6
15	60	43,1	41,5	41,9
15	100	47,0	42,9	44,2
30	20	2,7	-9,0	-7,3
30	60	7,0	14,0	11,5
30	100	25,9	19,8	22,9
45	20	-19,4	-91,6	-74,5
45	60	-8,2	-23,9	-16,3
45	100	-1,8	-6,0	-3,7

Percentuais positivos, na tabela 6.2, indicam que as forças calculadas como CE são maiores que quando calculadas como PM, o que ocorre para as estruturas de dimensões menores. Isso acontece pois, por um lado, apesar da variação da velocidade ser menor nas faces — o que diminui as diferenças entre CE e PM —, fazer o cálculo ao longo de toda superfície em planta, resulta numa força em cada direção calculada nas duas faces, o que explica o porquê dos valores serem maiores. Conforme os valores dos lados aumentam, as diferenças diminuem, até que a avaliação como PM supera a do CE (sinal negativo dos percentuais). Assim pois, com o maior aumento das distâncias, maior a variação das velocidades, que diminuem quão mais longe da trajetória do tornado estão. Outro ponto importante é que, apesar da simetria da estrutura, os percentuais de diferença não são os mesmos na duas direções, isso ocorre porque as forças

na direção y resultam de faces que não coincidem com a trajetória do tornado, logo, com valores de velocidades menores do que as calculadas no centro da estrutura.

Portanto, a consideração de corpo extenso apresenta-se recomendável para a obtenção de esforços e a partir deste ponto será a metodologia usada nos cálculos das forças dos exemplos que se seguem.

6.2

Queda de Pressão Atmosférica

Seguindo a formulação fornecida na seção 3.4, é calculado o gradiente de pressão atmosférica, utilizando a equação 3-11 e as equações da velocidade tangencial 3-3 e 3-5. Além disso, para efeito de comparação, também está sendo calculado o gradiente de pressão com base na formulação onde a velocidade tangencial não varia com a altura (SVA – Sem Variação com a Altura). Essa formulação é utilizada no Regulatory Guide [42], e segundo Simiu [45] é dada pela equação 6-2. Na figura 6.11, têm-se as curvas do gradiente de pressão com a distância r' para três alturas diferentes e para a formulação SVA.

$$T = \frac{r'}{r_{max}} T_{max} \quad \text{para} \quad (0 \leq r' \leq r_{max})$$

$$T = \frac{r_{max}}{r'} T_{max} \quad \text{para} \quad (r_{max} \leq r' \leq \infty)$$
(6-2)

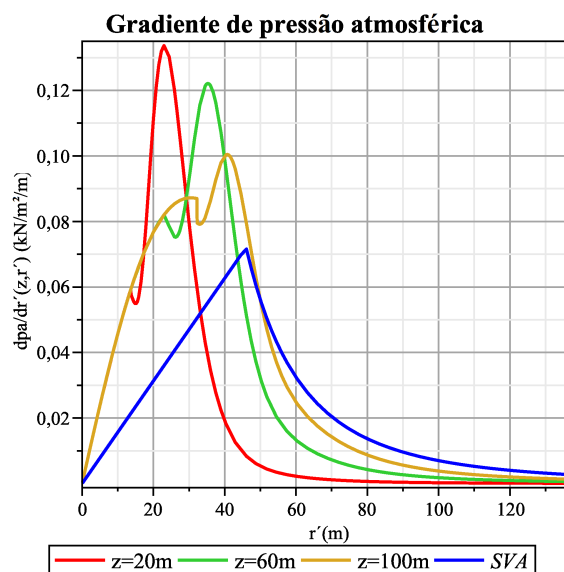


Figura 6.11: Gradiente de pressão atmosférica.

Observa-se no gráfico da figura 6.11 que os valores máximos para as alturas de 20, 60 e 100m são bem superiores ao valor máximo da formulação sem variação com a altura.

Para o cálculo da queda de pressão utiliza-se a equação 3-12 e, assim, como no gráfico da figura 6.11, as mesmas curvas são traçadas:

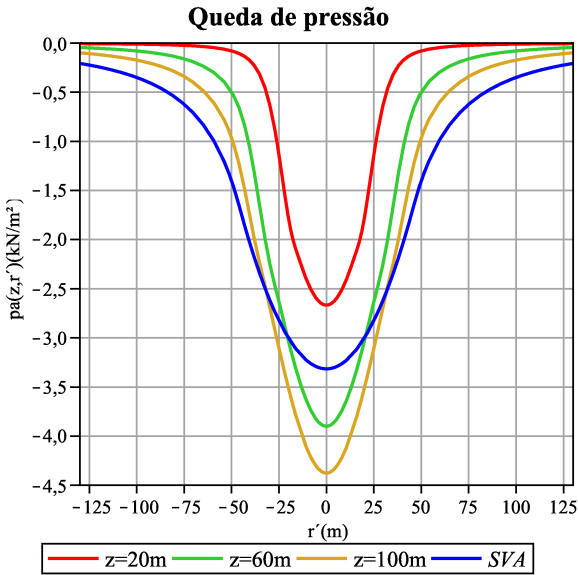


Figura 6.12: Queda de pressão atmosférica.

Com base nas equações 6-2 e 3-12, a queda de pressão quando não se considera variação da velocidade com a altura, é descrita como:

$$p_a(r') = \rho \frac{(T_{max})^2}{2} \left(2 - \frac{r'^2}{(r_{max})^2} \right) \quad \text{para} \quad (0 \leq r' \leq r_{max})$$
$$p_a(r') = \rho \frac{(T_{max})^2}{2} \frac{(r_{max})^2}{r'^2} \quad \text{para} \quad (r_{max} \leq r' \leq \infty)$$

(6-3)

Na tabela 6.3, seguem os valores máximos da queda de pressão para diferentes situações.

Tabela 6.3: Valores máximos da queda de pressão.

Formulação (kN/m^2)	Com variação da altura			Sem variação da altura
	altura = 20m	altura = 60m	altura = 100m	
p_a	2,66	3,89	4,37	3,31

Além dos dados já citados, também está sendo calculada a taxa máxima da queda de pressão [15], dada pela equação 6-4:

$$\left(\frac{dp_a}{dt}\right)_{max} = \left(\frac{T_{max}}{r_{max}}\right) p_a \quad (6-4)$$

A figura 6.13 mostra a taxa de queda de pressão em diferentes alturas, e também curva para a formulação SVA.

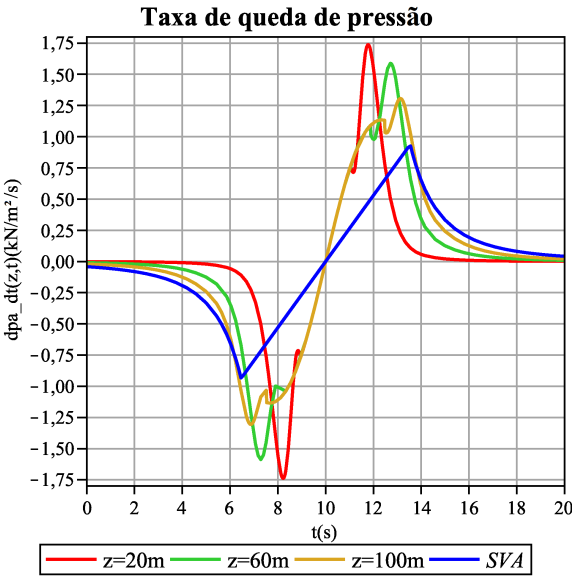


Figura 6.13: Distribuição temporal da taxa de queda de pressão.

A tabela 6.4 mostra os valores máximos da taxa de queda de pressão com base na equação 6-4 e figura 6.13.

Tabela 6.4: Valores máximos da taxa de queda pressão.

Formulação ($kN/m^2/s$)	Com variação da altura			Sem variação da altura
	altura = 20m	altura = 60m	altura = 100m	
$\frac{dp_a}{dt}$	1,73	1,58	1,30	0,93

Como na avaliação das taxas de pressão com o tempo o mais importante é conhecer as alturas em que os valores máximos ocorrem e não o instante em que elas acontecem, o gráfico da figura 6.14 mostra os valores máximos das taxas de pressão com o tempo ao longo das alturas em função do parâmetro δ_0 .

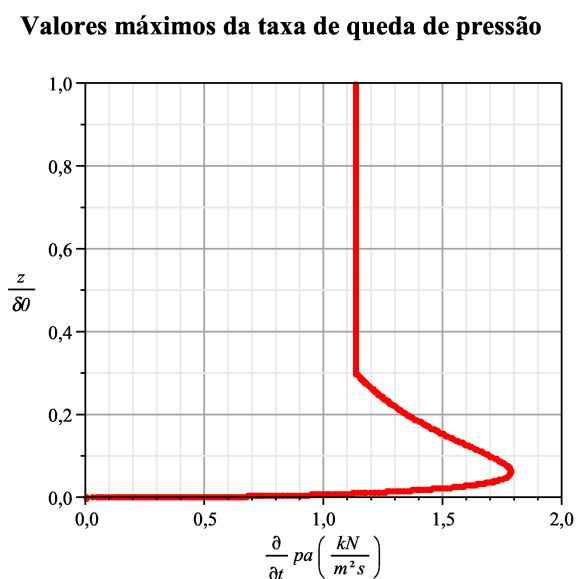


Figura 6.14: Distribuição da taxa de queda de pressão com a altura, parametrizada pela espessura da camada limite.

6.3

Ações de Mísseis

Para assegurar a segurança das usinas nucleares à ação de tornados, é exigido que os projetos das usinas considerem o impacto de mísseis gerados pelos tornados – objetos movendo-se sob a ação de forças aerodinâmicas induzidas pela força do tornado.

De acordo com a literatura [42], ventos superiores a 34m/s são capazes de gerar mísseis a partir de objetos que se encontram dentro da trajetória do tornado e de restos de estruturas próximas danificadas.

6.3.1

Identificação dos mísseis de projeto

Os mísseis selecionados como base para os projetos de usinas nucleares incluem pelo menos:

1. um míssil maciço de elevada energia cinética que se deforma no impacto;
2. um míssil rígido que testa a resistência à penetração;
3. um míssil rígido pequeno de um tamanho suficiente para passar por alguma abertura de barreiras protetoras.

Sendo assim, a Comissão de Regulamentação Nuclear (NRC - Nuclear Regulatory Commission) estabelece que um tubo de aço Schedule 40 de

15,24cm (6 polegadas) e um automóvel sejam utilizados como míssil de penetração e míssil maciço, respectivamente, para o uso em projetos de usinas nucleares. A fim de testar as aberturas em barreiras protetoras, é considerada uma esfera sólida de aço de 2,54cm (1 polegada) como um míssil rígido pequeno [42]. As características desses mísseis são dados na tabela 6.5, com base nos métodos descritos na referência [45] e [15].

Tabela 6.5: Características dos mísseis para as usinas de Angra dos Reis.

Tipo de mísseis	Dimensões (m)	Massa (kg)	V_{max} (m/s)
Automóvel	4,5 x 1,7 x 1,5	1178	24
Tubulação Schedule 40	Diâmetro 0,168 Comprimento 4,58	130	24
Esfera	Diâmetro 0,0254	0,0669	6

Os mísseis acima descritos são capazes de atingir a estrutura em todas as direções com velocidade horizontal de V_{max} e a velocidade vertical igual a 67 por cento de V_{max} . O projeto de barreiras deve ser avaliado assumindo um impacto normal à superfície da estrutura, tanto para a tubulação quanto para o automóvel. O automóvel é considerado para impacto em todas as alturas menores que 9,14m para estruturas em planta dentro de um raio de 800m.

Míssil – automóvel

O míssil automóvel pode perfurar ou puncionar barreiras (caso onde parte do míssil perfura através da barreira, porém a completa passagem do míssil é impedida); entretanto por causa da sua baixa velocidade, a geração de fragmentos é improvável. O automóvel é um míssil sujeito a grandes deformações no momento do impacto. O impacto do automóvel transmite forças impulsivas à estrutura e pode causar consideráveis amplificações em pequenas estruturas com uma extremidade fixa e outra livre. Entretanto, para grandes estruturas, a resposta dinâmica total a esse ataque é insignificante, e os efeitos dinâmicos são limitados aos membros realmente golpeados pelo míssil ou conectados ao membro golpeado. A pergunta importante é saber se o dano local pode evoluir para comprometer a segurança da estrutura [46].

Uma relação aproximada tem sido observada em experimentos de impactos com automóveis [39]. Para uma grande variedade de modelos de automóveis americanos de tamanho padrão percebe-se que a desaceleração por unidade de deformação associada com a força de impacto tem sido aproximadamente a mesma. A desaceleração durante um impacto frontal pode ser dada pela equação 6-5:

$$-\frac{d^2}{dt^2}x(t) = 12,5g \cdot x(t) \quad (6-5)$$

Onde:

t é a duração a partir do instante inicial de contato (s)

$-\frac{d^2}{dt^2}x(t)$ é a desaceleração (ft/s^2)

$x(t)$ é a extensão do impacto do automóvel com o alvo (ft)

g é aceleração da gravidade (ft/s^2)

A equação 6-5, é a equação de movimento para um oscilador linear não amortecido com massa unitária e com a constante da mola igual a 12,5g. Sua solução com deformação inicial igual a zero é:

$$x(t) = C \sin(\sqrt{12,5g}t) \quad (6-6)$$

Para determinar a constante, C, considera-se o balanço da energia cinética inicial, E_m . Que pode ser descrita como o trabalho exercido pela força de impacto do automóvel somado à energia perdida, E_L , que pode ser dita como outro fenômeno qualquer, como por exemplo a resposta do alvo:

$$E_m = \frac{1}{2} \frac{W_p V_s^2}{g} = \frac{1}{2} F_{\max} x_{\max} + E_L \quad (6-7)$$

Onde:

W_p é o peso do automóvel (lbf)

V_s é a velocidade de impacto do automóvel (ft/s)

Pela primeira lei de Newton e a equação 6-5, tem-se a relação:

$$F(t) = -\frac{W_p \frac{d^2}{dt^2}x(t)}{g} = 12,5 W_p x(t) \quad (6-8)$$

Onde:

$F(t)$ é a função no tempo da força no alvo (lbf)

No caso conservativo de $E_L = 0$, a constante C pode ser determinada pela substituição das equações 6-6 e 6-8 na equação 6-7:

$$C = V_s \sqrt{\frac{1}{12,5g}} \quad (6-9)$$

Finalmente, substituindo as equações 6-6 e 6-9 na equação 6-8 tem-se a força em função do tempo:

$$F(t) = 12,5 W_p V_s \sqrt{\frac{1}{12,5g}} \sin(\sqrt{12,5g}t) \approx 0,625 V_s W_p \sin(20t) \quad (6-10)$$

A equação 6-10 corresponde a uma onda senoidal de frequência $\omega=20$ rad/s e período de $2\pi/\omega=0,314$ s. A força máxima ocorre no tempo igual a um quarto de período, $t=0,0785$ s, quando a velocidade do impacto do automóvel em relação à superfície rígida é zero.

Sendo assim, de acordo com as proposições acima, que são baseadas numa consideração teórica e de valores experimentais, a função da força ao longo do tempo é aproximadamente:

$$\begin{aligned} F(t) &= 0,625 V_s W_p \sin(20t) && \text{para } (0 \leq t \leq 0,0785s) \\ F(t) &= 0 && \text{para } (t \geq 0,0785s) \end{aligned} \quad (6-11)$$

Míssil – tubulação e esfera

Para calcular o comportamento local do concreto armado, a fórmula NDRC modificada (National Defense Research Committee), como interpretada por Sliter [47], é recomendada. A espessura calculada pela fórmula NDRC deve ser aumentada de 10% a 20%; para novos projetos é sugerido que a espessura seja aumentada em 20%.

O cálculo da profundidade da penetração é dada a seguir:

$$x_1 = \sqrt[1,8]{4KNW_m d_0 \left(\frac{V_i}{1000d_0} \right)^{1,8}} \quad (6-12)$$

$$x_2 = d_0 + KNW_m \left(\frac{V_i}{1000d_0} \right)^{1,8} \quad (6-13)$$

$$\begin{aligned} x &= x_1 && \text{se } \frac{x_1}{d_0} \leq 2 \\ x &= x_2 && \text{se } \frac{x_2}{d_0} > 2 \end{aligned} \quad (6-14)$$

Onde:

K é o fator de penetrabilidade do concreto $= 180/\sqrt{f'c}$ (adimensional)

$f'c$ é a tensão de compressão limite do concreto (lb/in^2)

N é o fator de forma do míssil, no caso do tubo $N=0,72$ e da esfera $N=0,84$

W_m é o massa do míssil (lb)

d_0 é o diâmetro nominal (in) $\left(\sqrt{\frac{4A_p}{\pi}} \right)$

A_p é a área projetada; isso é, a menor área projetada da seção de corte do míssil (in^2)

V_i é a velocidade de impacto do míssil normal à superfície (ft/s)

x é profundidade da penetração (in)

Onde x é a distância que um míssil penetra num bloco de concreto de dimensões ilimitadas, sendo x calculado sem considerar os efeitos do contorno.

Espessura necessária para prevenir a perfuração:

$$\begin{aligned} T_p &= 3,19x - 0,718\frac{x^2}{d_e} && \text{para } \frac{x}{d_e} \leq 1,35 \\ T_p &= 1,24x - 1,32d_e && \text{para } 1,35 < \frac{x}{d_e} \leq 13,5 \end{aligned} \quad (6-15)$$

Onde:

d_e é o diâmetro efetivo (in) $\left(\sqrt{\frac{4A_c}{\pi}}\right)$

T_p é a espessura da barreira perfurada (in)

A_c é área de contato, isso é, a menor área de contato com a face do alvo (in^2). Para a tubulação, é a área da seção transversal do metal.

$$\begin{aligned} t_p &= 1,2T_p && \text{para projetos novos} \\ t_p &= T_p && \text{para estruturas existentes} \end{aligned} \quad (6-16)$$

Onde:

t_p é a espessura da barreira para prevenir a perfuração (in)

Espessura necessária para evitar o estilhaçamento:

$$\begin{aligned} T_s &= 7,91x - 5,06\frac{x^2}{d_e} && \text{para } \frac{x}{d_e} \leq 0,65 \\ T_s &= 1,36x + 2,12d_e && \text{para } 0,65 < \frac{x}{d_e} \leq 11,75 \end{aligned} \quad (6-17)$$

$$\begin{aligned} t_s &= 1,2T_s && \text{para projetos novos} \\ t_s &= T_s && \text{para estruturas existentes} \end{aligned} \quad (6-18)$$

6.4

Conclusões Imediatas

Em relação às medidas que estão sendo tomadas para o cálculo das ações mecânicas principais sobre edificações de uma usina nuclear, chega-se às seguintes observações:

- Adotar a distância entre os centros do tornado e da estrutura no início da análise (S_0) como sendo aproximadamente três vezes o valor de r_{max} , capítulo 4, mostra-se satisfatório, já que a relação entre a máxima força total que ocorre na estrutura é pelo menos 35 vezes maior que a força total inicial, como pôde ser visto na tabela 6.1. Isso indica que as forças no início e no final da análise são bem pequenas e que o intervalo adotado é suficiente;
- A avaliação da parcela do arrasto e da inércia nos cálculos das forças para uma estrutura simétrica mostra que, a primeira contribui mais na direção perpendicular à trajetória do tornado, isto é, proveniente da velocidade tangencial do tornado. Já a força de inércia apresenta-se mais participativa na direção da trajetória do tornado, resultado da aceleração na direção radial do tornado. Sendo assim, conclui-se que para o cálculo das forças é necessário adotar tanto a parcela do arrasto quanto a parcela de inércia;
- Considerar a estrutura como corpo extenso ou como ponto material, pode fornecer grandes diferenças nos cálculos das forças, como visto no item 6.1.2, onde as estruturas de 15 metros de lado mostram que as forças avaliadas como corpo extenso são superiores às calculadas como ponto material, enquanto que as estruturas com 45 metros de lado mostram situação inversa. Sendo assim, a recomendação que está sendo dada é a utilização da consideração de corpo extenso para a obtenção de esforços;
- Em relação ao gradiente de pressão atmosférica, os valores máximos apresentam-se superiores para as alturas de 20, 60 e 100 metros quando comparados ao valor máximo da formulação sem variação com a altura. O mesmo ocorre para os valores máximos da taxa de queda de pressão; já a própria queda de pressão mostra-se superior apenas para as alturas de 60 e 100 metros.