

8

Ensaio e Análise dos Resultados para a Torre de Ventilação

Analisa-se os efeitos das forças de vento resultantes da incidência do tornado de projeto sobre a torre de ventilação como uma forma de estender os cálculos feitos na seção 7.1.3, utilizando-se o programa ANSYS 11.0 — de análise estrutural pelo Método dos Elementos Finitos — e processadores matemáticos. Estão sendo calculados os deslocamentos no topo da estrutura através de uma análise cinemática estática e dinâmica não-amortecida. A opção por considerar o amortecimento nulo, deve-se porque ele tem muito menos importância no controle da resposta máxima da estrutura, quando não se trata de carregamentos periódicos ou harmônicos. Isso porque a resposta máxima é alcançada num curto espaço de tempo, antes que as forças de amortecimento possam absorver qualquer quantidade apreciável da energia do sistema [20]. Além disso, também está sendo avaliada, de forma semelhante à realizada na seção 4.1, a influência dos diversos parâmetros nos deslocamentos finais.

As 15 primeiras frequências naturais da torre são mostradas na tabela 8.1.

Tabela 8.1: Frequências naturais e frações de massa acumulada.

Modo	Frequências (Hz)	Frações de massas acumuladas					
		Direção X	Direção Y	Direção Z	Rotação em X	Rotação em Y	Rotação em Z
1	0,43	0,52	0,02	0,00	0,04	0,87	0,00
2	0,43	0,55	0,55	0,00	0,91	0,91	0,00
3	1,71	0,76	0,58	0,00	0,92	0,97	0,00
4	1,71	0,80	0,80	0,00	0,98	0,98	0,00
5	3,98	0,90	0,82	0,00	0,98	0,99	0,00
6	3,98	0,92	0,92	0,00	0,99	0,99	0,00
7	4,31	0,92	0,92	0,00	0,99	0,99	0,00
8	4,31	0,92	0,92	0,00	0,99	0,99	0,00
9	5,97	0,92	0,92	0,00	0,99	0,99	0,00
10	5,97	0,92	0,92	0,00	0,99	0,99	0,00
11	6,68	0,92	0,99	0,00	0,99	0,99	1,00
12	7,11	0,92	1,00	0,00	0,99	0,99	1,00
13	7,11	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00
14	7,21	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
15	7,77	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

As figuras 8.1 a 8.4 mostram alguns modos de vibração da torre.

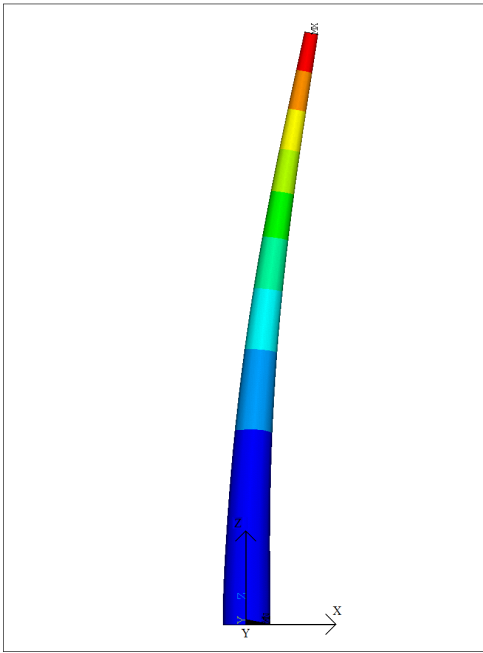


Figura 8.1: 1º modo de vibração da torre, $f_0=0,43\text{Hz}$, direção X.

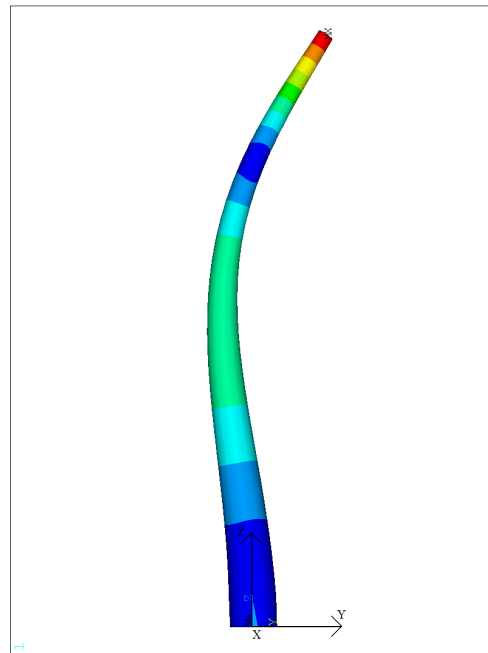


Figura 8.2: 4º modo de vibração da torre, $f_0=1,71\text{Hz}$, direção Y.

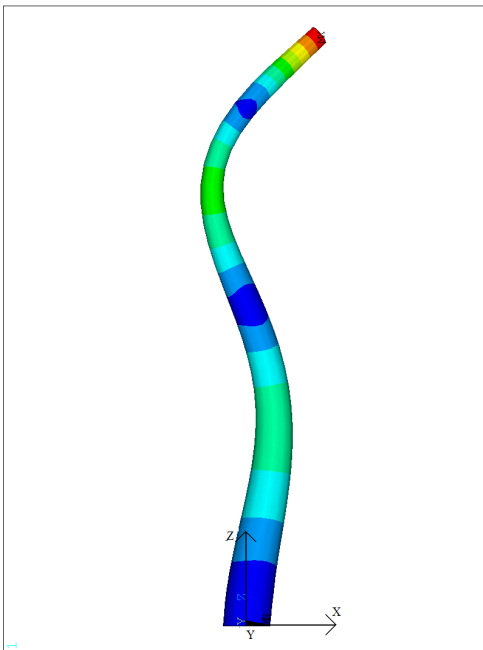


Figura 8.3: 5º modo de vibração da torre, $f_0=3,98\text{Hz}$, direção X.

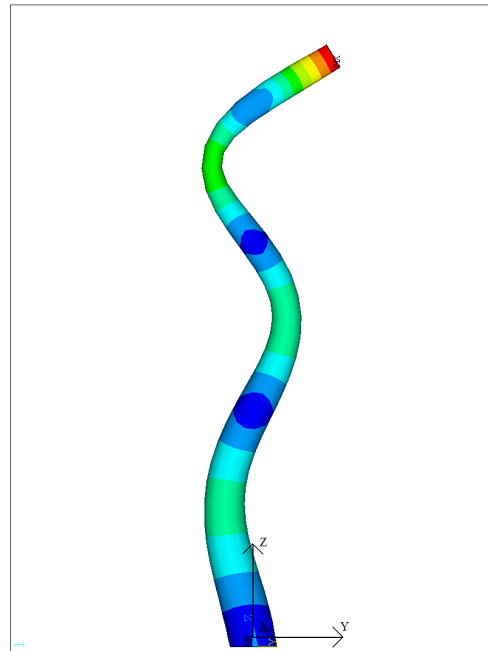


Figura 8.4: 12º modo de vibração da torre, $f_0=7,11\text{Hz}$, direção Y.

A malha da torre está sendo modelada com elementos de casca do tipo SHELL93. Cada elemento possui 8 nós e 6 graus de liberdade em cada nó: translações nodais nas direções x, y e z e rotações sobre os eixos nodais x, y e z, figura 8.5 adaptada de [18].

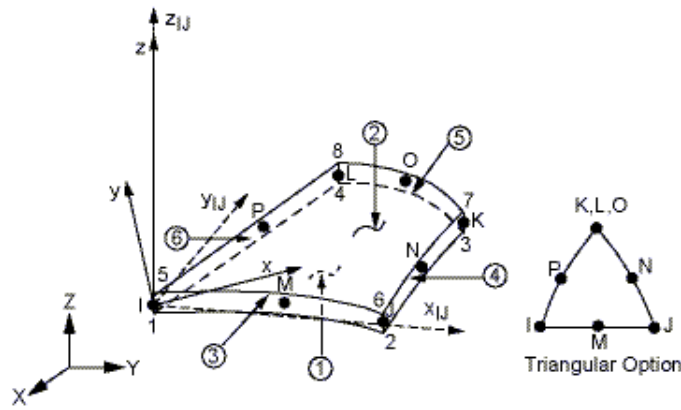


Figura 8.5: Geometria do elemento SHELL93.

Seguem abaixo as características do material adotadas para reproduzir a torre:

- Material Linear Elástico;
- Módulo de Elasticidade igual a $5600 \times \sqrt{f_{ck}}$; como está sendo adotado um f_{ck} de 35MPa, resulta num valor de $5600 \times \sqrt{(35 \times 10^6)} = 33,13 \times 10^6 Pa = 33,13 MPa$;
- Coeficiente de Poisson de 0,2;
- Densidade do concreto de $2500 kg/m^3$;

A torre é engastada na sua base e a carga é calculada integrando-se as forças ao longo de sub-áreas e aplicadas sobre cada superfície. Essas sub-áreas são determinadas dividindo-se a torre em nove áreas como pode ser visto nas figuras 8.6 e 8.7.

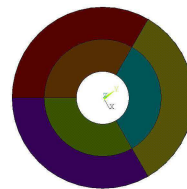
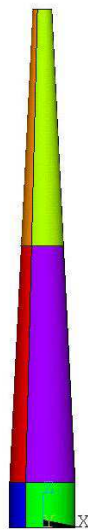


Figura 8.6: Vista frontal da torre.

Figura 8.7: Vista superior da torre.

Os resultados cinemáticos analisados nesta seção consideram a parcela de arrasto e de inércia na equação de Morrison e a torre é tratada como corpo extenso; os efeitos de flexibilidade referem-se ao deslocamento de um nó no topo. É obtida a resposta dinâmica não-amortecida para a torre, optando por considerar apenas as duas primeiras frequências naturais. Os deslocamentos do topo da torre na direção x e y podem ser visualizados nas figuras 8.8 e 8.9, respectivamente.

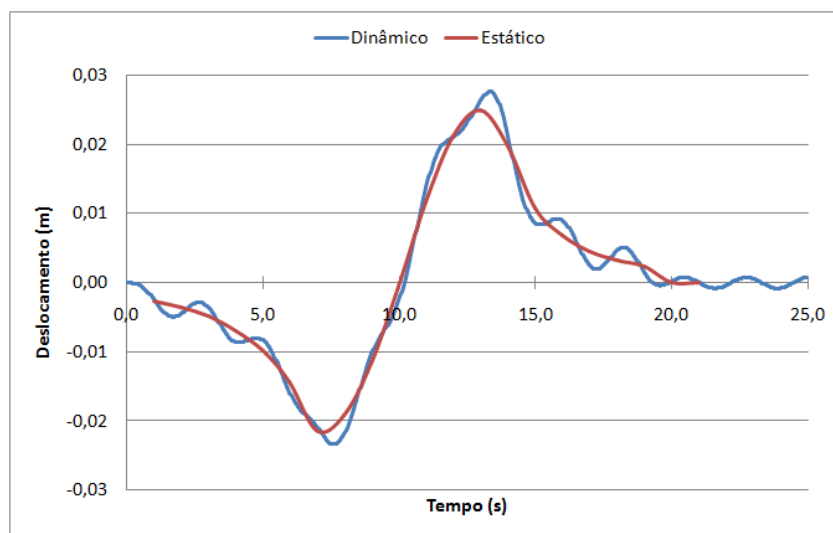


Figura 8.8: Deslocamento na direção X; $f_0 t_1 = 4,30$.

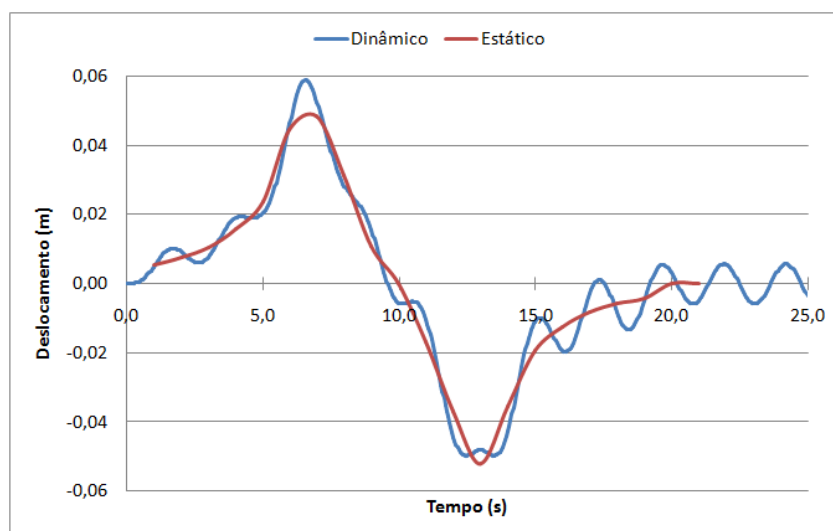


Figura 8.9: Deslocamento na direção Y; $f_0 t_1 = 4,30$.

Os gráficos mostram duas soluções particulares: durante a excitação, visualizada pela resposta estática, e a homogênea, quando não há mais excitação e a estrutura encontra-se em vibração livre. A máxima resposta dinâmica ocorre durante o primeiro pulso, tanto para a direção x, quanto para a direção y. As máximas respostas estáticas são de 0,025m e 0,052m para as direções x e y, respectivamente. Os fatores de amplificação são de 1,11 (direção x) e 1,21 (direção y). Esses valores, próximos de um, são esperados, visto a figura 8.10 [20], que mostra o espectro de resposta para um pulso senoidal. As curvas para os pulsos retangular e triangular são valores de situações extremas com base na origem. A curva do pulso de meia onda senoidal parte e termina em zero, com único valor máximo no interior. As curvas do espectro podem prever os efeitos máximos a serem esperados numa estrutura para um dado tipo de pulso (carregamento). Conclui-se que, para uma mesma frequência natural, se o intervalo de duração do pulso for muito pequeno, a estrutura não “sente” a solicitação, gerando uma resposta menor que a resposta estática. A amplificação máxima para o pulso de meia onda senoidal ocorre para um valor de $f_0 t_1 = 0,8$; o aumento desse parâmetro faz com que a resposta aproxime-se da resposta estática.

Ressalta-se que se trata de uma resposta não-amortecida, a existência do amortecimento dissiparia a energia remanescente presente após o pulso.

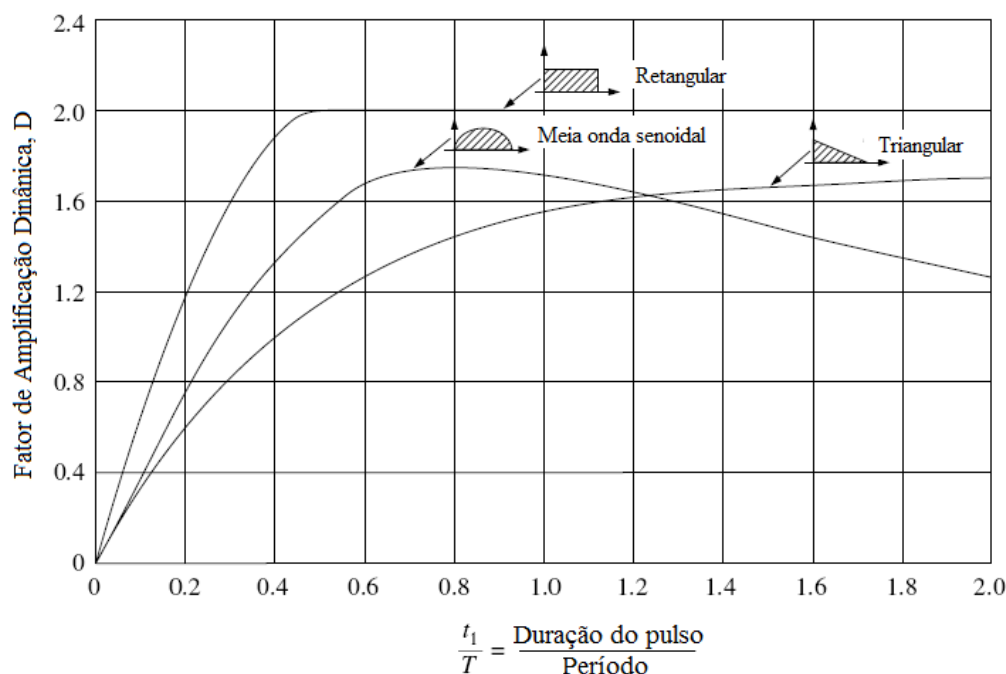


Figura 8.10: Espectro de resposta para três tipos de pulsos.

Nas figuras 8.11 e 8.12 também estão sendo avaliados os deslocamentos, porém considerando as 20 primeiras frequências fundamentais. Nota-se que as curvas assemelham-se às curvas 8.8 e 8.9, onde apenas o primeiro e o segundo modo estão sendo considerados. Concluindo-se que os primeiros modos são dominantes na resposta.

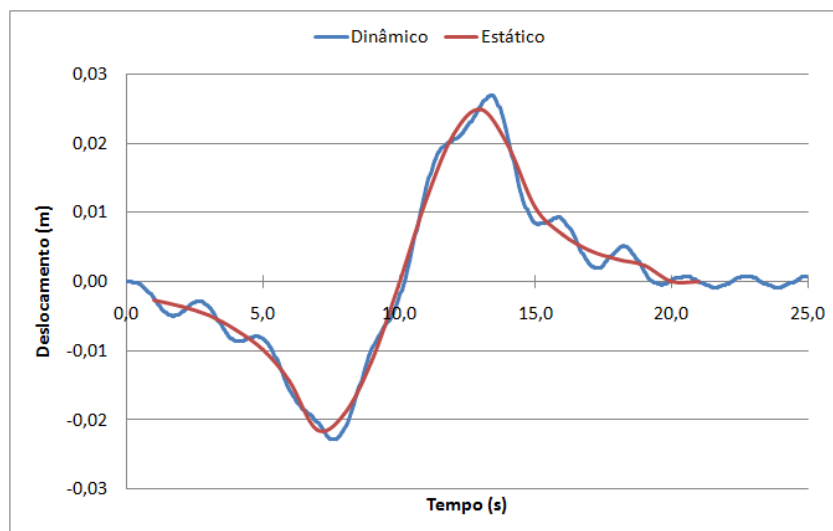


Figura 8.11: Deslocamento na direção X para as 20 primeiras frequências.

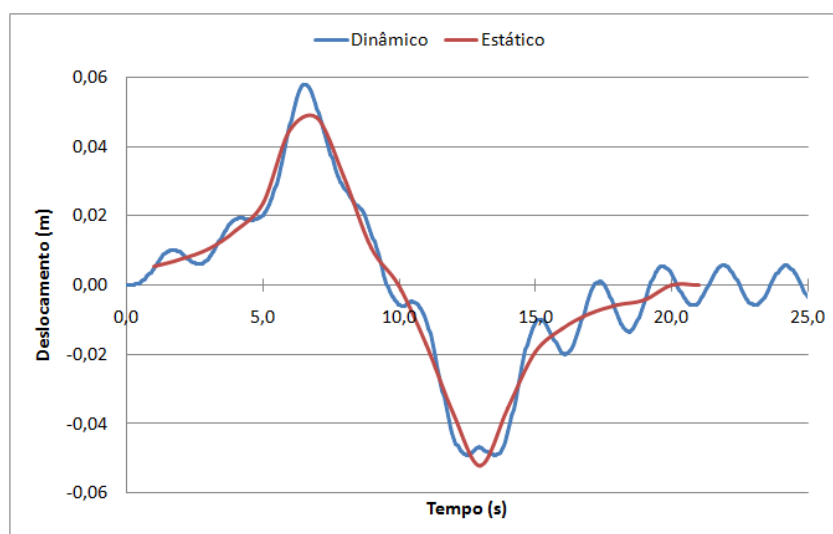


Figura 8.12: Deslocamento na direção Y para as 20 primeiras frequências.

8.1

Análise dos Parâmetros

Nesta seção é feito um estudo sobre a influência dos parâmetros do tornado pela formulação de Wen/Kuo no resultado final dos deslocamentos, complementando o estudo realizado no capítulo 4.

8.1.1

Velocidade Translacional

Percebe-se que a velocidade translacional de 13m/s, $t_1=10$ s e f_0t_1 de 4,30, não resultam em muitas amplificações das respostas. Nas figuras 8.13 e 8.14 as velocidades translacionais são alteradas para $V=2,6$ m/s (cinco vezes menor). Verifica-se que os deslocamentos aumentam, com fatores de amplificação de 2,84 na direção x e de 2,49 na direção y; isso ocorre porque o valor de f_0t_1 passa a ser igual a 0,86 — região das amplificações máximas, figura 8.10.

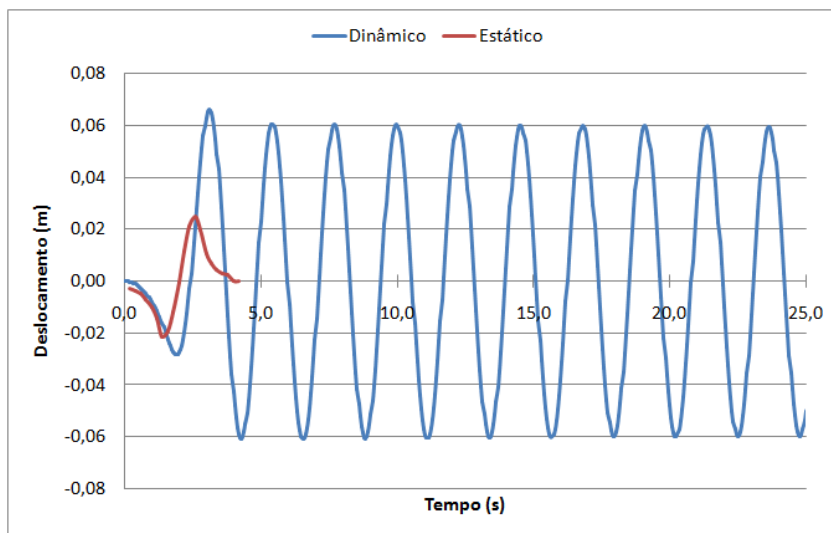


Figura 8.13: Deslocamento na direção X; $f_0t_1 = 0,86$.

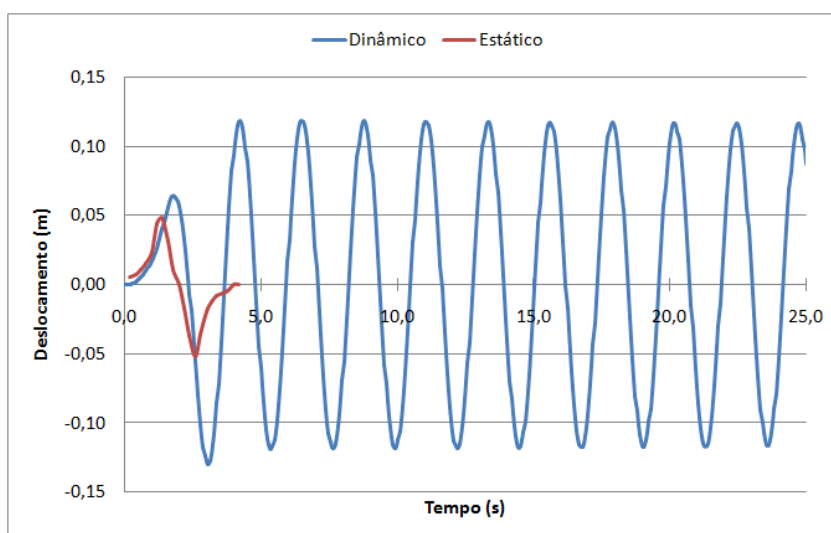


Figura 8.14: Deslocamento na direção Y; $f_0t_1 = 0,86$.

Nos gráficos das figuras 8.15 e 8.16, a velocidade translacional é reduzida em 20 vezes ($f_0 t_1 = 0,215$). Pela figura 8.10, uma redução da resposta dinâmica em relação à estática é esperada, e pode ser verificada pelos valores máximos das curvas dos deslocamentos dinâmicos que se mostram inferiores às curvas dos deslocamentos estáticos.

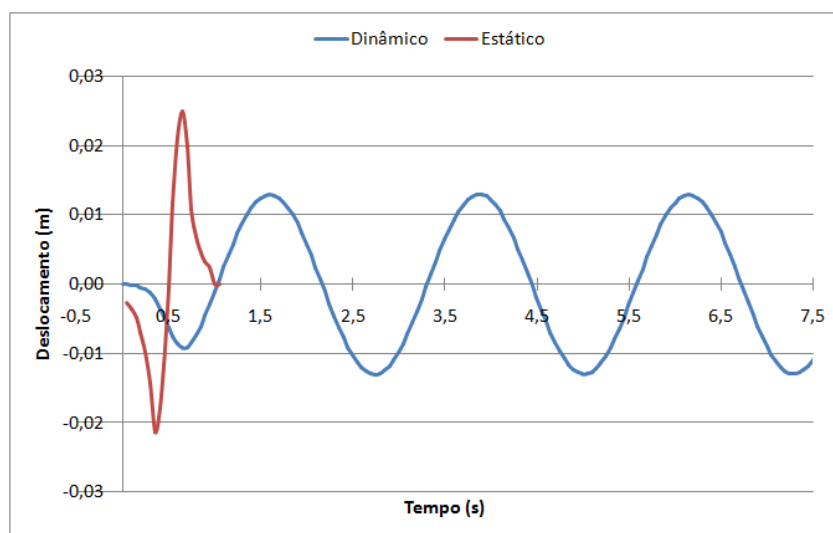


Figura 8.15: Deslocamento na direção X; $f_0 t_1 = 0,215$.

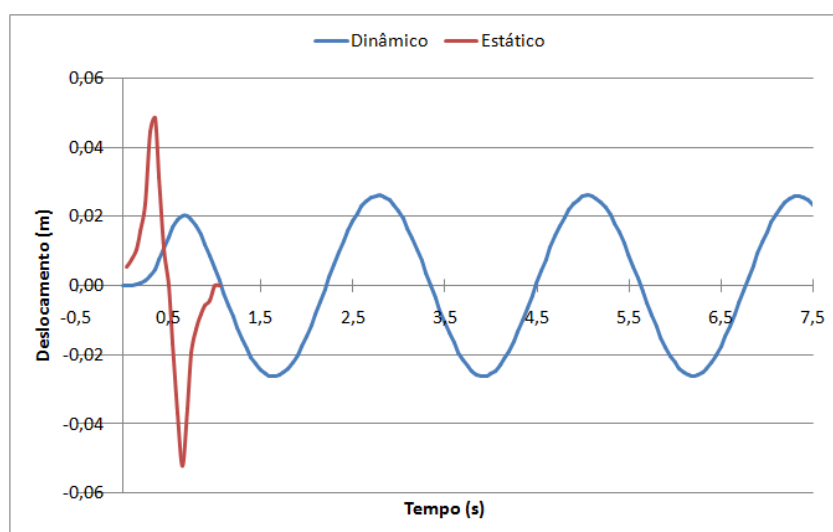


Figura 8.16: Deslocamento na direção Y; $f_0 t_1 = 0,215$.

8.1.2

Raio máximo

Nas figuras 8.17 e 8.18, o valor do raio máximo é reduzido à metade ($r_{max} = 23m$), o que diminui o valor de $f_0 t_1$ para 2,15, representando um aumento da resposta dinâmica. Na direção x, a amplificação aumenta de 1,11 para 1,32 e na direção y, de 1,21 para 1,73.

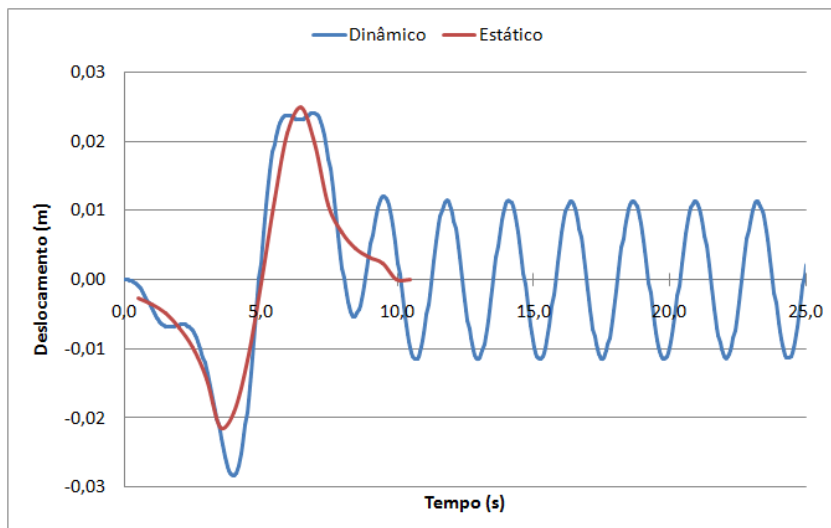


Figura 8.17: Deslocamento na direção X; $f_0 t_1 = 2,15$.

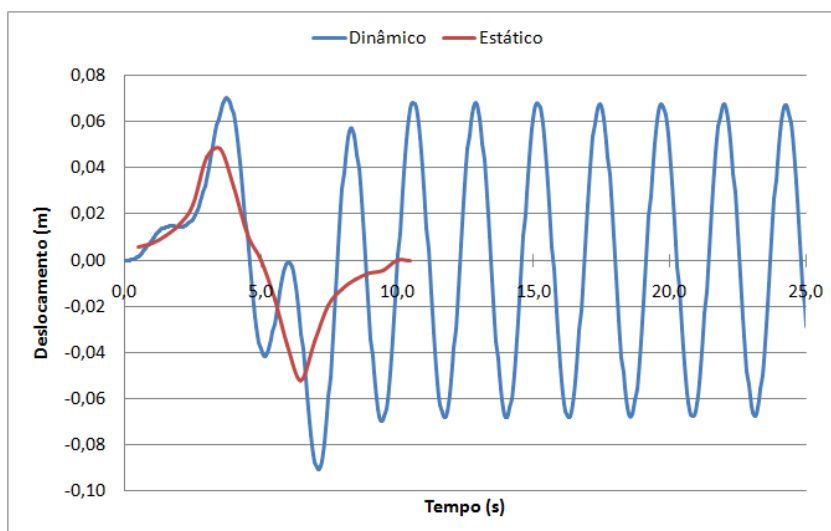


Figura 8.18: Deslocamento na direção Y; $f_0 t_1 = 2,15$.

Com base nas informações do capítulo 4 e nas figuras 8.17 e 8.18, pode-se inferir que, a variação do raio máximo afeta a resposta dinâmica da mesma forma que a velocidade translacional, regulando o fator de amplificação dinâmico. Quanto maior o valor de r_{max} , maior o valor de t_1 , o que significa uma aproximação para a resposta estática. A diminuição do parâmetro, passa

por uma amplificação da resposta até um valor máximo e depois para uma redução até zero.

8.1.3 Camada Limite

A variação da espessura da camada limite, δ_0 , altera os valores das velocidades e acelerações, o que corresponde a uma mudança da resposta estática. Nas figuras 8.19 e 8.20, o valor de δ_0 é alterado de 460m para 100m, porém a variação dos deslocamentos é imperceptível.

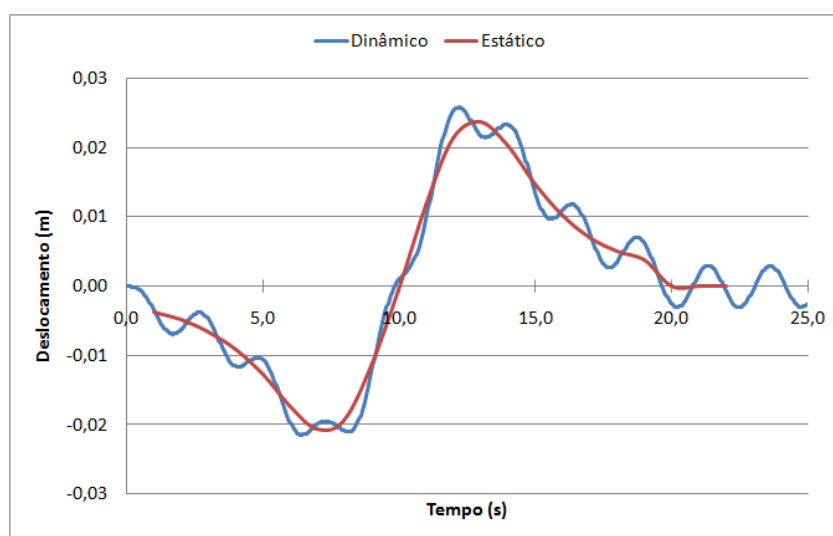


Figura 8.19: Deslocamento na direção X; $\delta_0 = 100\text{m}$.

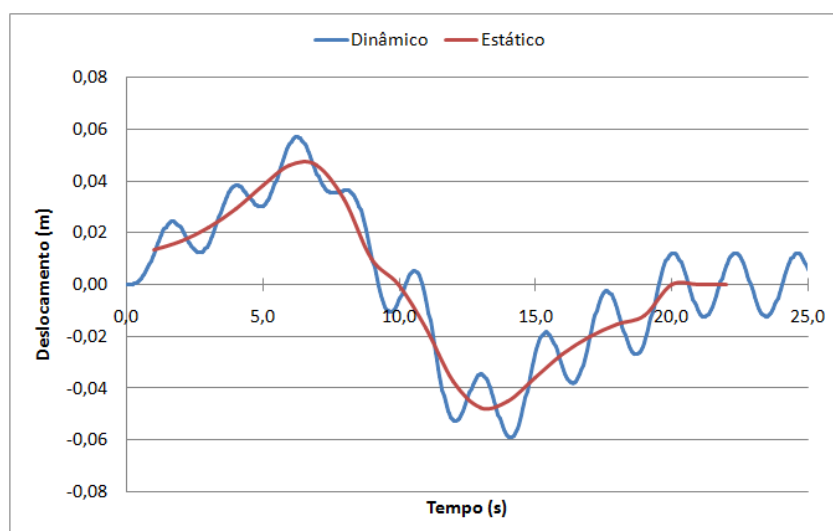


Figura 8.20: Deslocamento na direção Y; $\delta_0 = 100\text{m}$

Essa pequena alteração ocorre porque a variação das forças máximas aplicadas na estrutura não são significativas, o máximo valor da força total

ao longo do tempo para $\delta_0=460\text{m}$ é na direção x igual 506kN e, na direção y, igual a 837kN , enquanto que para $\delta_0=100\text{m}$, a força na direção x é de 485kN (redução de 5%) e na direção y de 827kN (redução de 1%). A resposta estática muda, na direção x, de $0,025\text{m}$ para $0,023\text{m}$ e na direção y, de $0,052\text{m}$ para $0,047\text{m}$; o fator de amplificação muda, na direção x, de $1,11$ para $1,08$ e na direção y, de $1,21$ para $1,24$.

8.1.4 Velocidade Tangencial

O decréscimo da velocidade tangencial máxima diminui a resposta estática. Nas figuras 8.21 e 8.22, o valor de T_{max} está reduzido a metade.

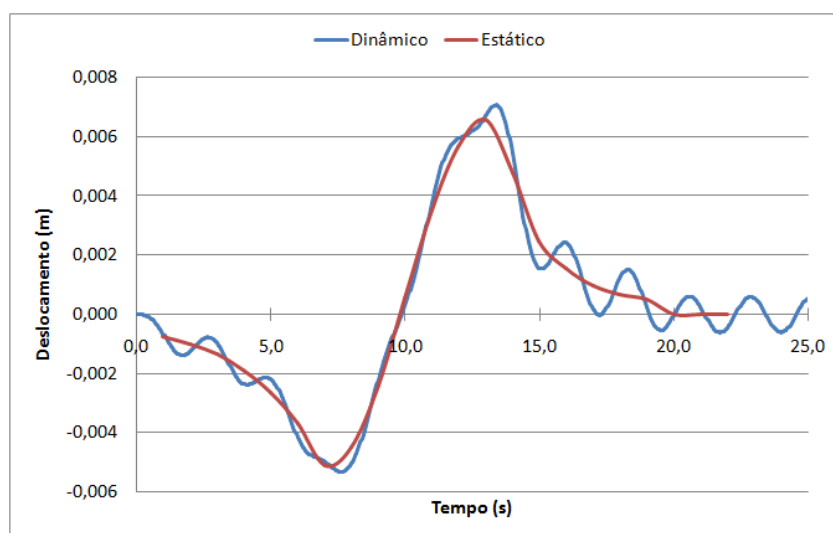


Figura 8.21: Deslocamento na direção X; $T_{max} = 26\text{m/s}$.

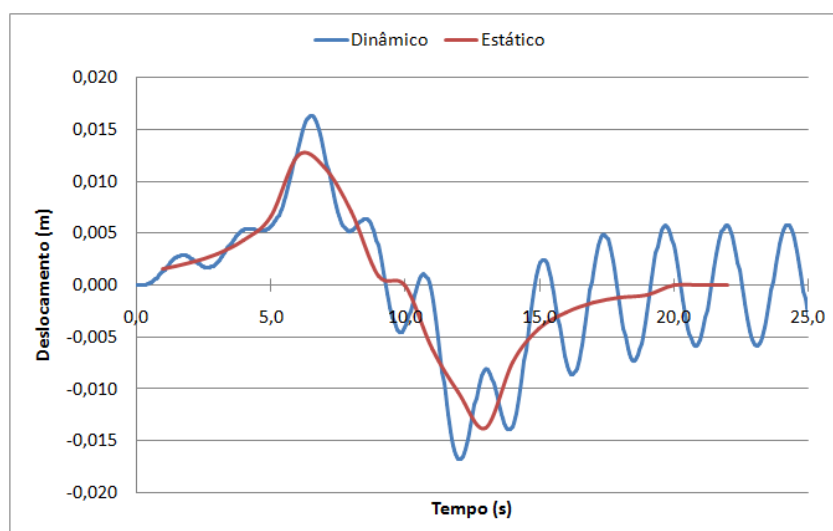


Figura 8.22: Deslocamento na direção Y; $T_{max} = 26\text{m/s}$.

Os deslocamentos são reduzidos significativamente, de 0,025m para 0,006m, na direção x, e de 0,052m para 0,013m, na direção y. Essa redução expressiva é esperada, pois como mostrado nas figuras 4.3 e 4.4, alterações na velocidade tangencial máxima, resultam em mudanças grandes nas velocidades tangenciais e radiais ao longo de todo tempo.

Percebe-se uma proporção entre a relação das velocidades tangenciais máximas e os deslocamentos obtidos, equação 8-1:

$$\left(\frac{T_{max(1)}}{T_{max(2)}}\right)^2 \approx \left(\frac{Deslocamento_{(1)}}{Deslocamento_{(2)}}\right) \quad (8-1)$$

$$\left(\frac{52}{26}\right)^2 \approx \left(\frac{0,025}{0,006}\right)_{(x)} \approx \left(\frac{0,052}{0,013}\right)_{(y)}$$

$$4,00 \approx 4,17_{(x)} \approx 4,00_{(y)}$$

8.2

Conclusões Imediatas

A análise da torre de ventilação submetida ao tornado de projeto mostra uma idéia geral do comportamento de uma estrutura flexível sob a ação de um tornado, observa-se que:

- Para o tornado de projeto adotado, a estrutura tem sua resposta dinâmica próxima da estática, com fator de amplificação máxima de 1,21 na direção y, valor esse esperado devido à solicitação se comportar como um pulso senoidal com duração de excitação (t_1) de 10s. Como a torre de ventilação possui a primeira frequência de excitação (f_0) igual a 0,43Hz, o valor de $f_0 t_1 = 4,30$ afasta-se da amplificação máxima, como pode ser visto na figura 8.10;
- Comparando os gráficos das figuras 8.8 e 8.9 que mostram a resposta utilizando apenas as duas primeiras frequências naturais da estrutura, com as figuras 8.11 e 8.12, onde são utilizadas as vinte primeiras frequências, percebe-se que as primeiras frequências são mais significativas na resposta, o que também pode ser notado pela tabela 8.1 das quinze primeiras frequências naturais com suas respectivas frações de massa acumulada;
- Para complementar os estudos feitos no capítulo 4, a análise dos parâmetros na resposta da estrutura mostram que:
 - Como alterações nos valores da velocidade translacional (V) modificam o intervalo de aplicação da carga (t_1), essas mudanças alteram

o fator de amplificação dinâmica na estrutura. Para exemplificar tal situação o valor de V é diminuído em cinco vezes, o que resulta num valor de $f_0 t_1 = 0,86$ e num fator de amplificação dinâmica máxima de 2,84 na direção x ;

- Como o raio máximo (r_{max}) altera, assim como a velocidade translacional, o valor de t_1 , quanto maior o seu valor, maior o valor de t_1 , o que aproxima a resposta dinâmica da resposta estática. A redução do parâmetro, amplifica a resposta até o seu valor máximo, seguindo até sua redução para o valor de zero;
- A espessura da camada limite (δ_0) altera a resposta estática e para a torre de ventilação, modifica muito pouco esse valor; isso se dá, por causa do pouco aumento da máxima carga atuante na estrutura ocorrido com a redução de δ_0 ;
- A velocidade tangencial (T_{max}) também modifica a resposta estática, mostrando-se um parâmetro muito significativo para a torre de ventilação; observa-se uma interessante relação entre o novo valor de T_{max} e a resposta da estrutura: o quadrado da razão entre a velocidade tangencial e a nova velocidade é aproximadamente igual à razão do deslocamento inicial e o novo deslocamento.