

5 Desenvolvimento

Analisa-se os efeitos da pressão direta de vento resultante da incidência do tornado descrito na seção 4.1 nas estruturas reticuladas prismáticas de alturas 20, 60 e 100 m, descritas em 4.2, utilizando-se processadores matemáticos e o programa *Ansys*, de análise estrutural pelo Método dos Elementos Finitos. Os ensaios realizados são discriminados abaixo e analisados em seqüência:

- Análise cinemática estática e dinâmica não-amortecida, com obtenção de deslocamentos e acelerações no topo das estruturas e análise comparativa dos efeitos de arrasto e inércia;
- Efeitos globais (forças cortantes e momentos totais na base dos modelos), para as estruturas tomadas como corpo extenso (discretizadas em quatro faixas ao longo da largura, de modo a considerar variação espacial horizontal do tornado, discutida em 3.1) e como ponto material (solicitações devidas ao tornado avaliadas no eixo de simetria);
- Avaliação e proposta de espectro de resposta cinemática para tornados.

5.1. Resultados cinemáticos

5.1.1. Efeitos da flexibilidade

Os resultados cinemáticos analisados nesta seção consideram a inclusão da parcela de força de inércia na equação de Morrison e os modelos estruturais são tratados como corpo extenso; os efeitos de flexibilidade se referem ao nó do topo, N_t , dos modelos, mostrado na Figura 5.1.

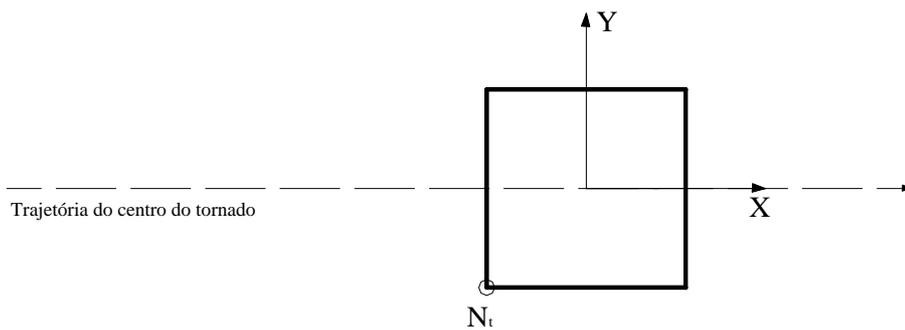


Figura 5.1 – Nó do topo, N_t , onde se analisam os efeitos de flexibilidade dos modelos

A resposta dinâmica não-amortecida é obtida para os três modelos. Opta-se por considerar o amortecimento nulo, pois se entende que a duração do pulso é pequena para mobilizá-lo de modo significativo. Os deslocamentos do topo para o modelo de 20 m de altura podem ser visualizados nas Figuras 5.2 a 5.4.

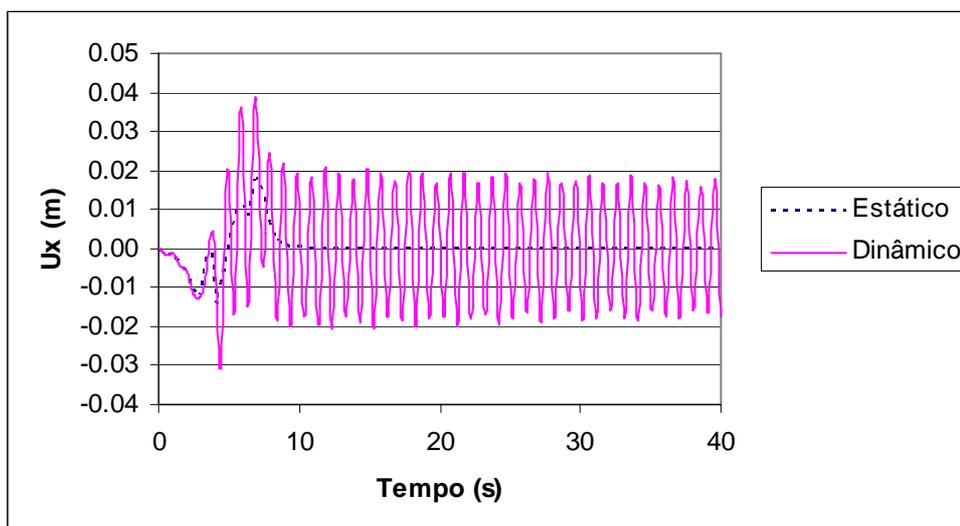


Figura 5.2 – Deslocamento na direção radial para o modelo de 20 m; $f_{0t_1} = 5,10$

A resposta se assemelha à de um sistema com um grau de liberdade, com predominância do modo fundamental, submetido a um pulso senoidal. Observam-se duas regiões bem definidas na resposta dinâmica, correspondentes às soluções particular, enquanto há ainda excitação, visualizada essa pela resposta estática, e à homogênea, quando não há mais excitação e a estrutura se encontra em vibração

livre. A máxima resposta dinâmica ocorre durante o primeiro pulso para a direção tangencial e durante o segundo pulso na direção radial.

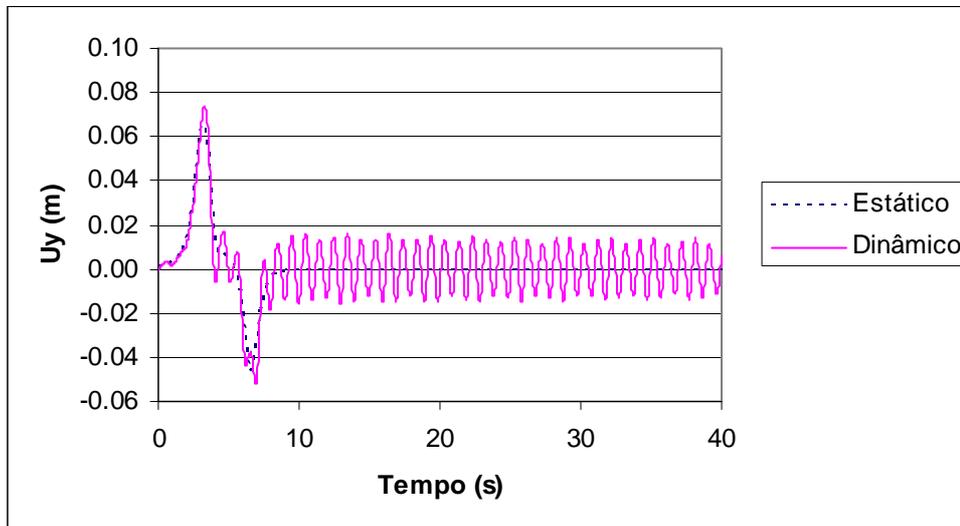


Figura 5.3 – Deslocamento na direção tangencial para o modelo de 20 m; $f_0 t_1 = 5,10$

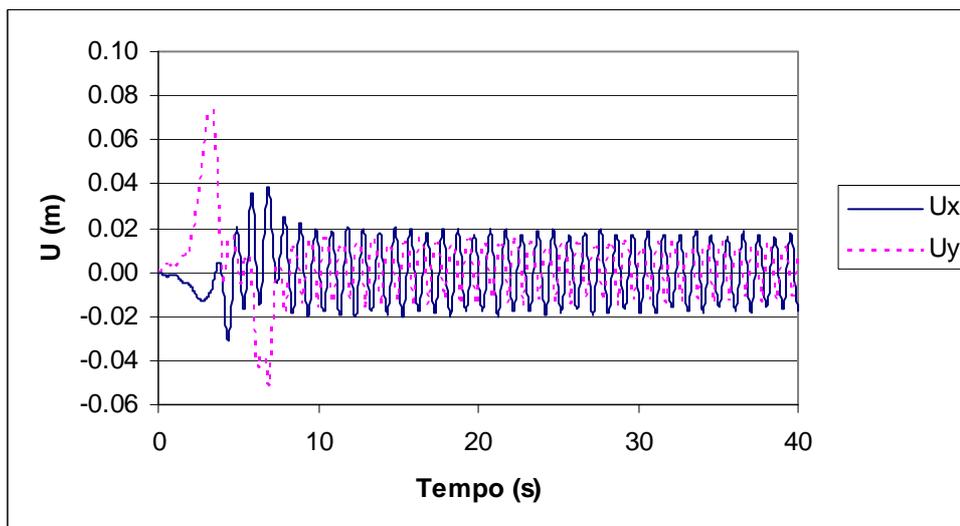


Figura 5.4 – Deslocamentos nas duas direções para o modelo de 20 m; $f_0 t_1 = 5,10$

As máximas respostas estáticas são de 0,018 e 0,066 m para as direções radial e tangencial. Os fatores de amplificação são de 2,11 e 1,12, respectivamente. A relação entre os deslocamentos dinâmicos nas duas direções, $U_{y_{\max}}/U_{x_{\max}}$, é de 1,95. Ressalta-se que se trata de uma resposta não-amortecida. Devido à presença do amortecimento, a resposta após o pulso tem a energia remanescente rapidamente dissipada.

Os deslocamentos para o modelo de 60 m de altura estão mostrados nas Figuras 5.5 a 5.7.

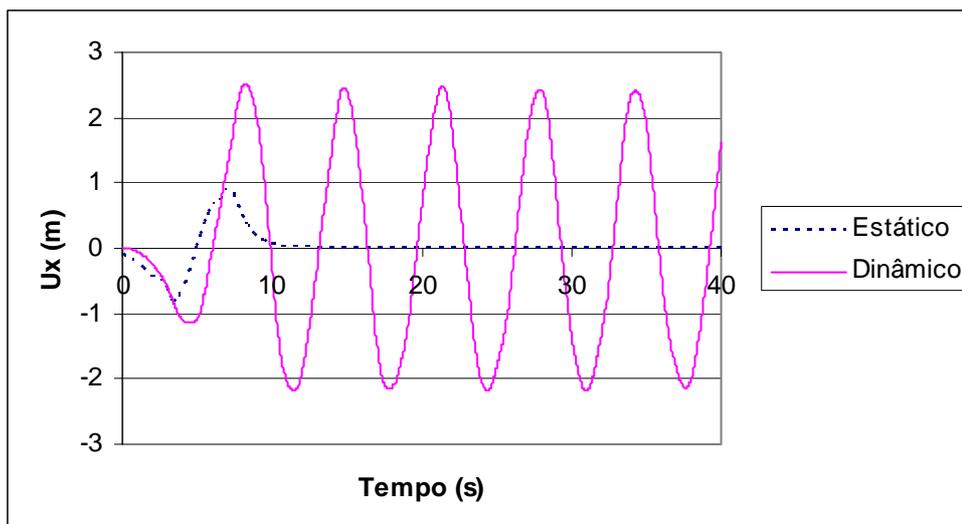


Figura 5.5 - Deslocamento na direção radial para o modelo de 60 m; $f_0 t_1 = 0,75$

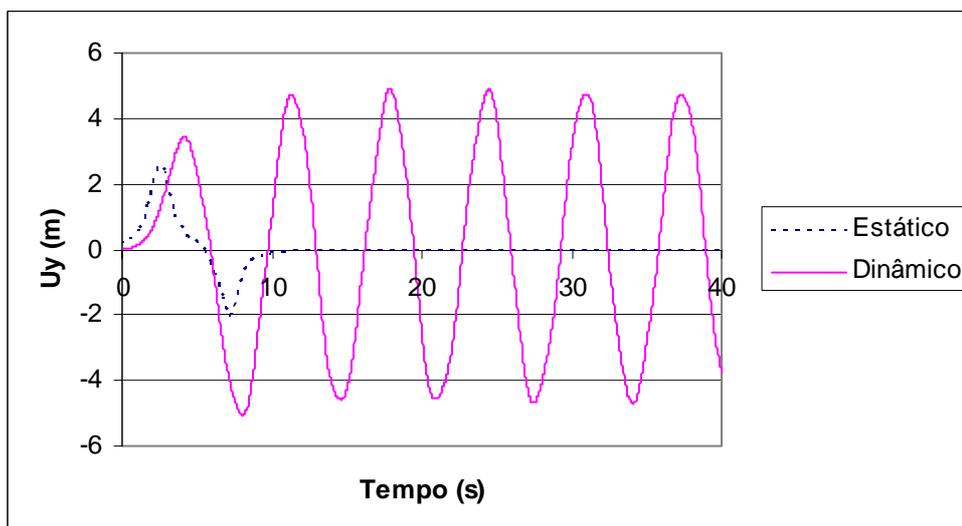


Figura 5.6 - Deslocamento na direção tangencial para o modelo de 60 m; $f_0 t_1 = 0,75$

Há predominância da frequência fundamental, como se nota pela solução homogênea. A máxima resposta dinâmica durante o pulso é aproximadamente igual à máxima após o mesmo nas direções radial e tangencial. Nessas direções, os deslocamentos estáticos são de 0,92 e 2,60 m, respectivamente, sendo os fatores de amplificação máximos iguais a 2,72 e 1,95. A relação entre os deslocamentos dinâmicos máximos, $U_{y_{max}}/U_{x_{max}}$, é igual a 2,01. A resposta para o modelo de 100 m está nas Figuras 5.8 a 5.10.

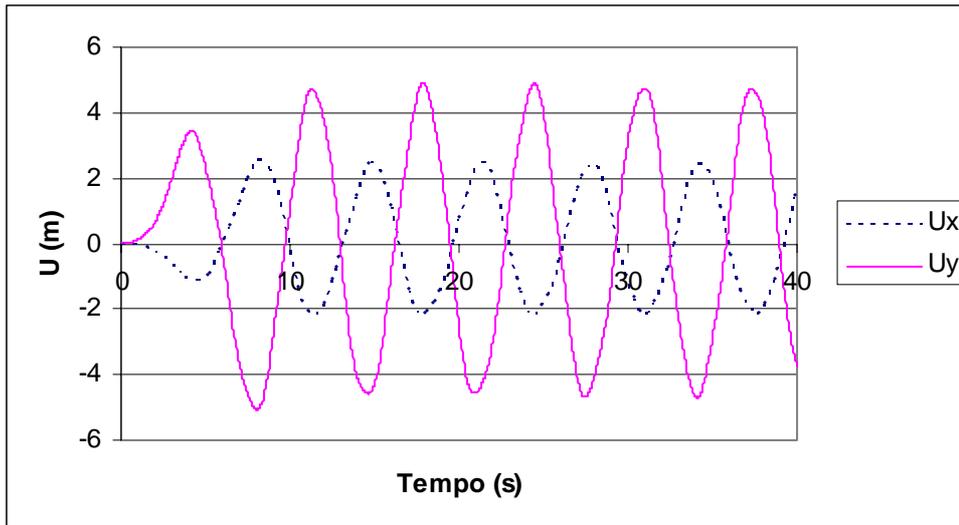


Figura 5.7 - Deslocamentos nas duas direções para o modelo de 60 m; $f_0 t_1 = 0,75$

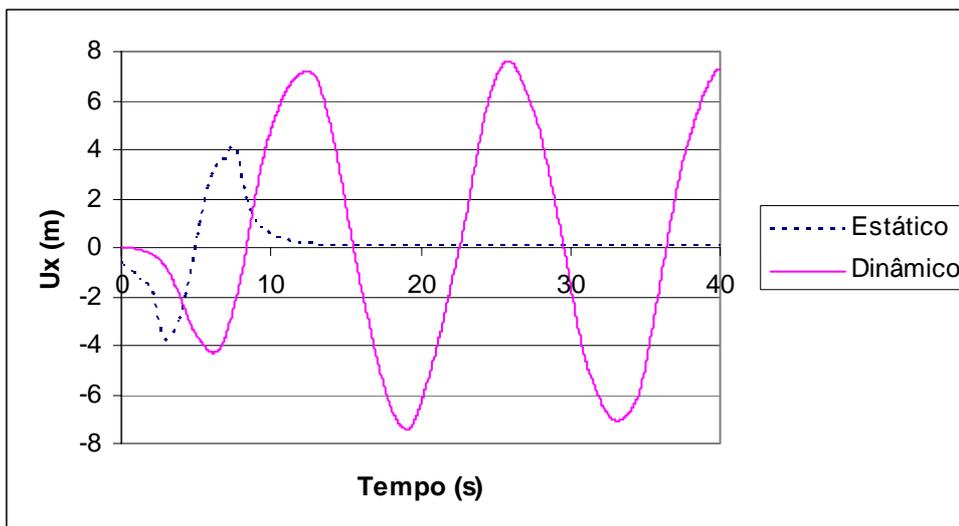


Figura 5.8 - Deslocamento na direção radial para o modelo de 100 m; $f_0 t_1 = 0,35$

Como nos casos anteriores, o modo fundamental de vibração predomina na resposta dinâmica, conforme se observa na vibração livre. As respostas dinâmicas máximas ocorrem após o pulso nas duas direções. Na direção radial, a máxima resposta estática é de 4,19 m e o fator de amplificação máximo é de 1,82. Na direção tangencial, a resposta estática máxima alcança 10,68 m, com o fator de amplificação máximo sendo de 1,62. A relação $U_{y_{\max}}/U_{x_{\max}}$ é de 2,28.

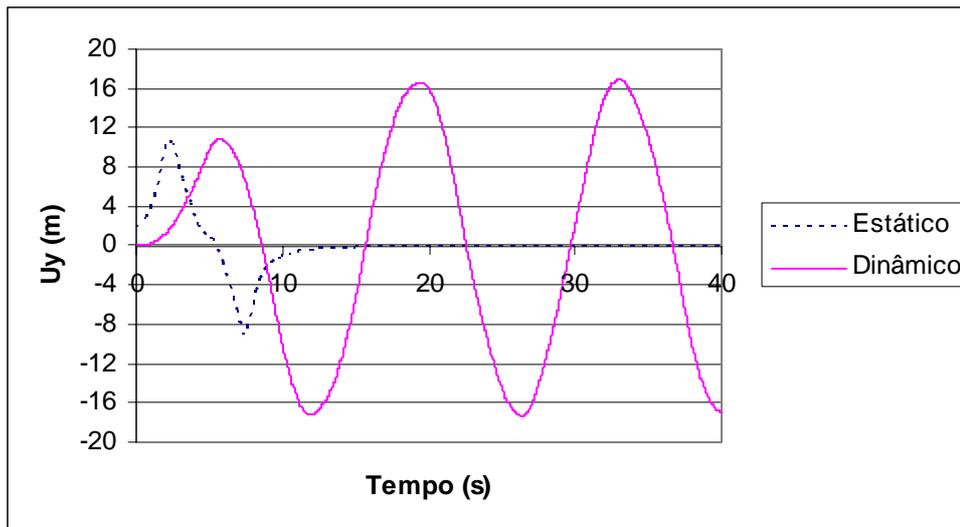


Figura 5.9 – Deslocamento na direção tangencial para o modelo de 100 m; $f_0 t_1 = 0,35$

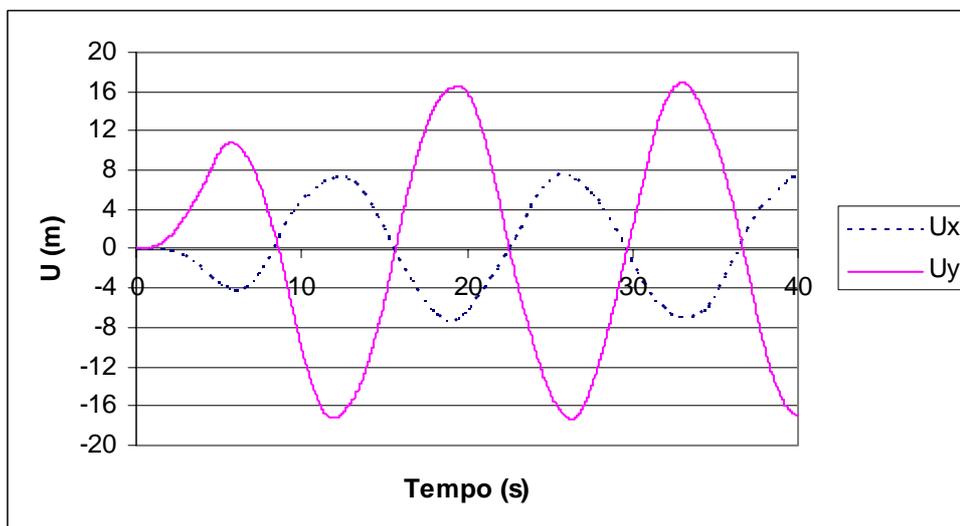


Figura 5.10 - Deslocamentos nas duas direções para o modelo de 100 m; $f_0 t_1 = 0,35$

A solicitação sobre a estrutura, visualizada através das respostas estáticas, assemelha-se a um duplo pulso, como descrito anteriormente, aplicado simultaneamente nas duas direções, com duração inversamente proporcional à velocidade de translação do tornado. Os deslocamentos dinâmicos não-amortecidos que ocorrem na direção tangencial atingem 0,07, 5,07 e 17,33 m, representando $1/285$, $1/18$ e $1/6$ das respectivas alturas (20, 60 e 100 m). Nota-se, assim, que os deslocamentos devidos às ações de tornados possuem grande sensibilidade à dimensão vertical da estrutura.

As acelerações do topo na direção tangencial para os três modelos estão mostradas nas Figuras 5.11 a 5.13.

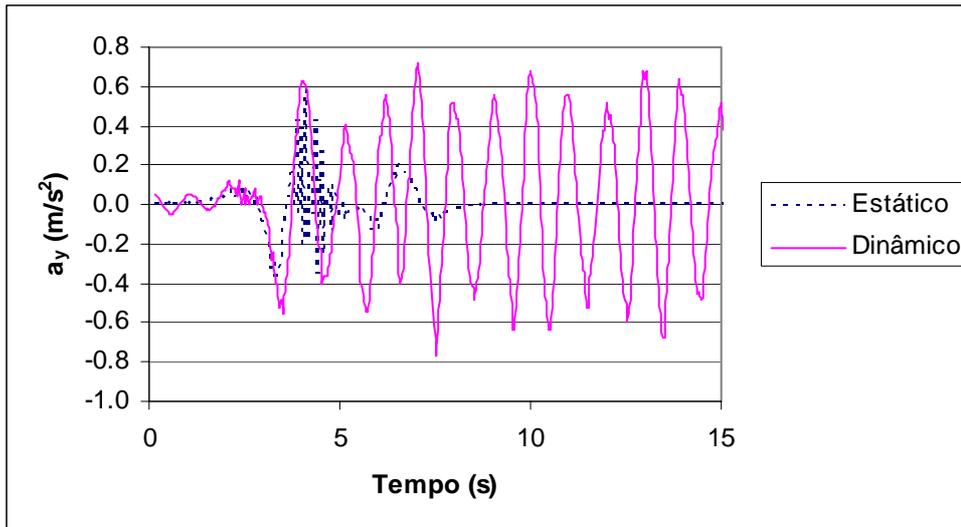


Figura 5.11 – Aceleração do topo na direção tangencial para o modelo de 20 m de altura

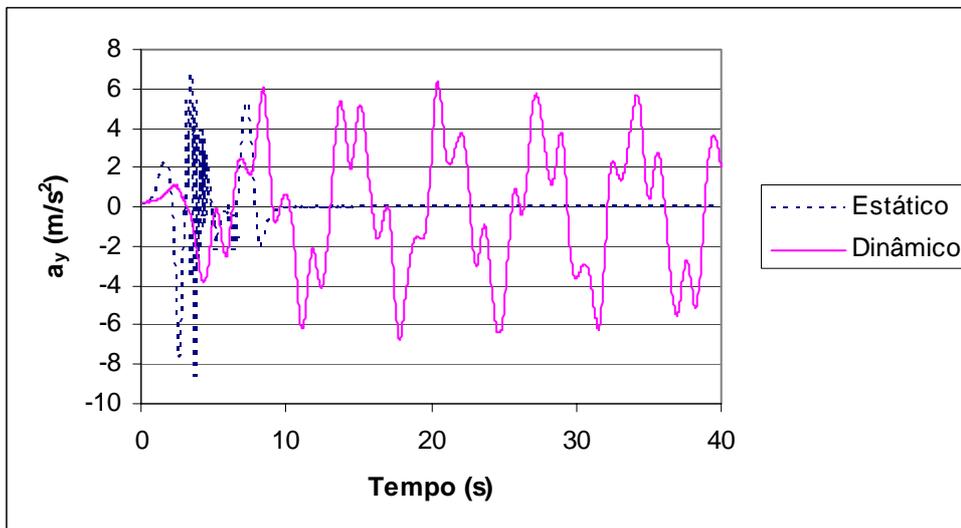


Figura 5.12 - Aceleração do topo na direção tangencial para o modelo de 60 m de altura

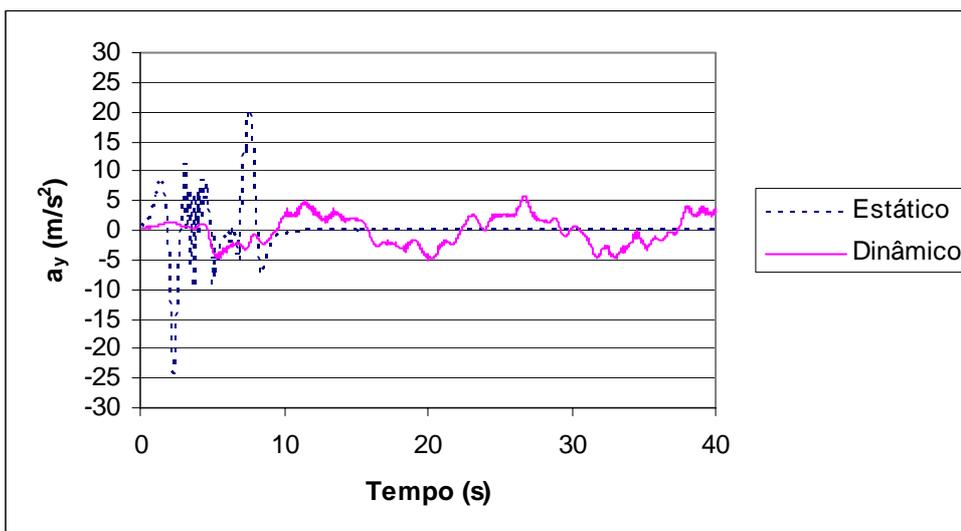


Figura 5.13 – Aceleração do topo na direção tangencial para o modelo de 100 m de altura

A aceleração para o topo apresenta-se bastante sensível à altura do modelo, atingindo aproximadamente 0,8g e 2,5g para as estruturas de 60 e 100 m, respectivamente.

5.1.2. Avaliação relativa dos efeitos de inércia e arrasto

A maioria dos trabalhos presentes na literatura não considera efeitos de inércia. Wen (1975) chama a atenção de que essa não consideração leva a seriamente subestimar o carregamento, principalmente perto do solo. De fato, como comentado em 4.1, as componentes de velocidade do tornado variam muito rapidamente, resultando em grandes acelerações convectivas, levando a forças de inércia comparáveis ou superiores às forças de arrasto em alguns casos. Ao que se sabe, nenhum estudo existe comparando as duas parcelas. Nas Figuras 5.14 a 5.19, podem-se observar os efeitos da inclusão da parcela de inércia da equação de Morrison nas respostas cinemáticas. Os modelos são tratados como corpo extenso perante o tornado.

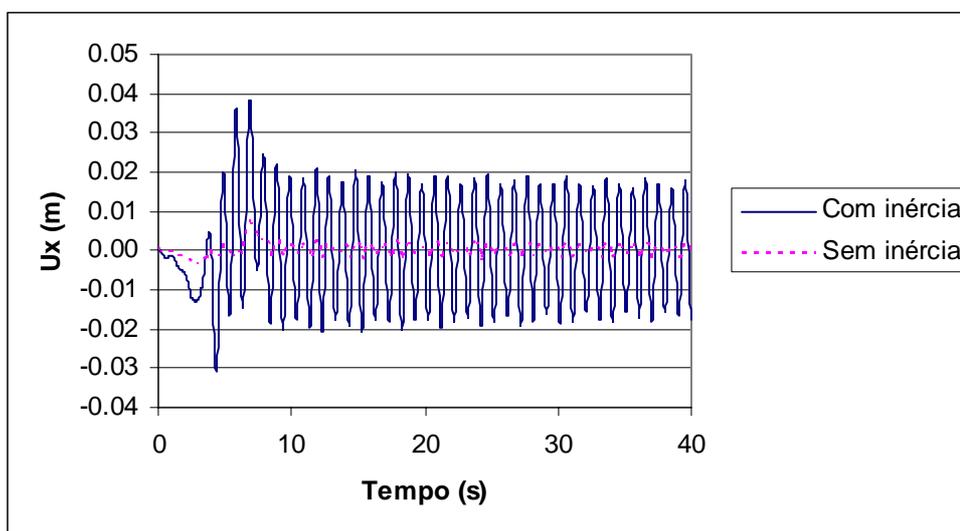


Figura 5.14 – Deslocamento na direção radial com e sem inclusão da parcela devida à inércia para o modelo de 20 m

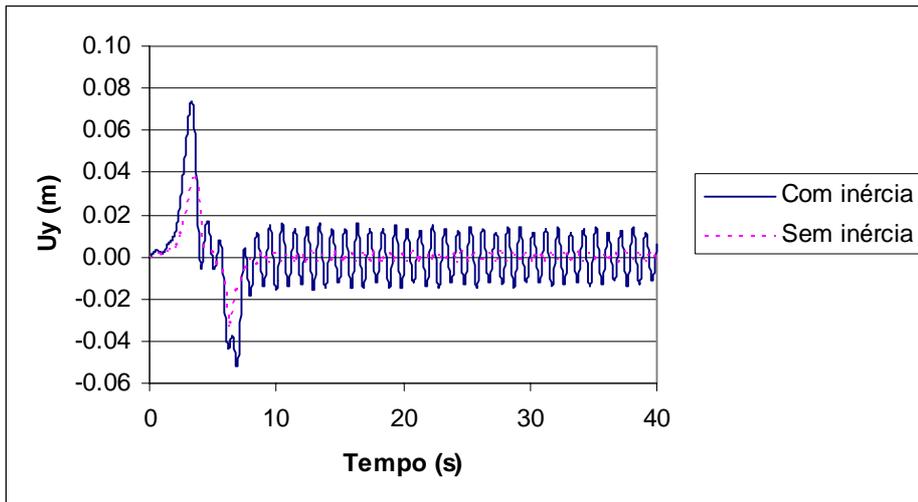


Figura 5.15 - Deslocamento na direção tangencial com e sem inclusão da parcela devida à inércia para o modelo de 20 m

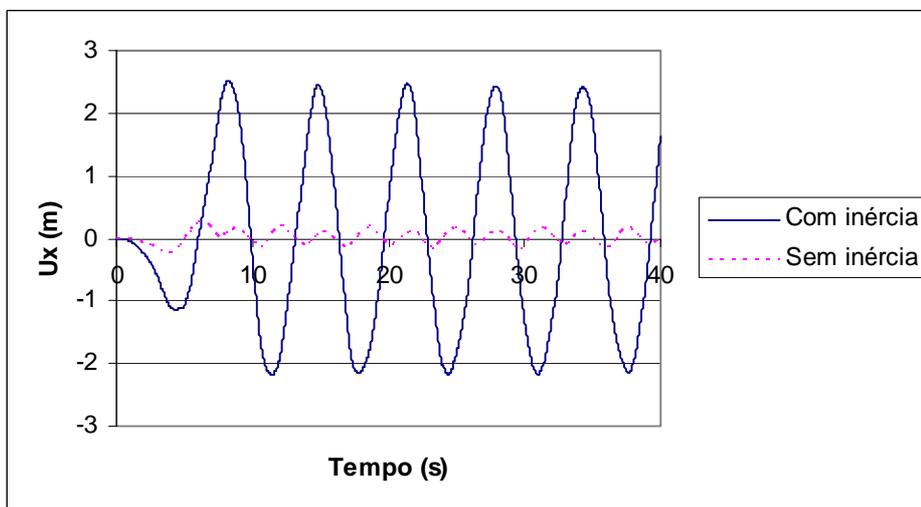


Figura 5.16 - Deslocamento na direção radial com e sem inclusão da parcela devida à inércia para o modelo de 60 m

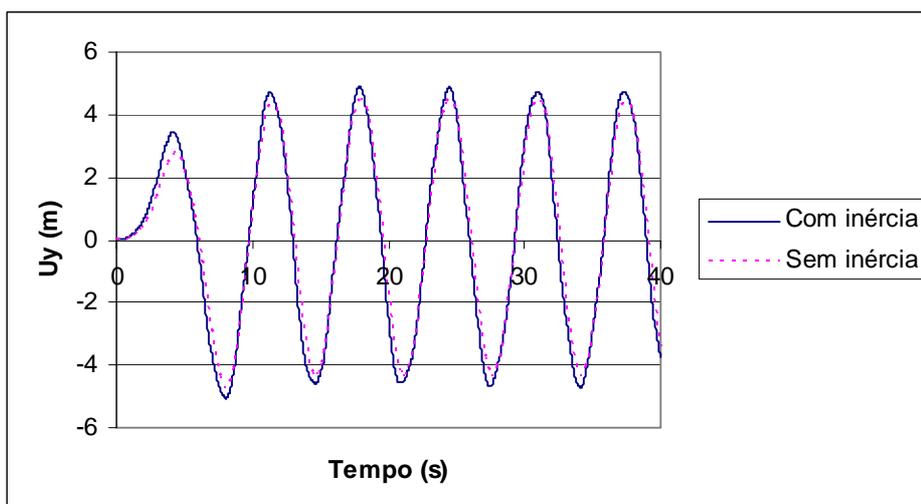


Figura 5.17 - Deslocamento na direção tangencial com e sem inclusão da parcela devida à inércia para o modelo de 60 m

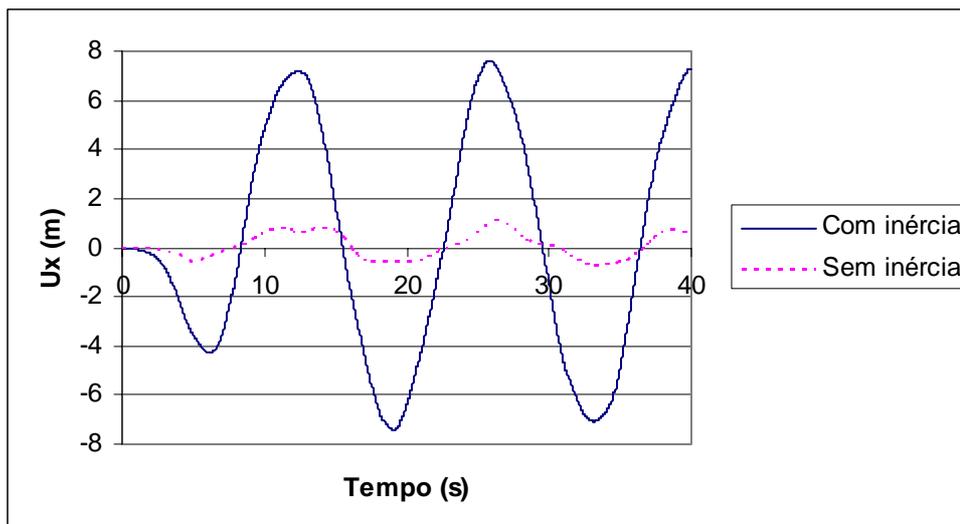


Figura 5.18 - Deslocamento na direção radial com e sem inclusão da parcela devida à inércia para o modelo de 100 m

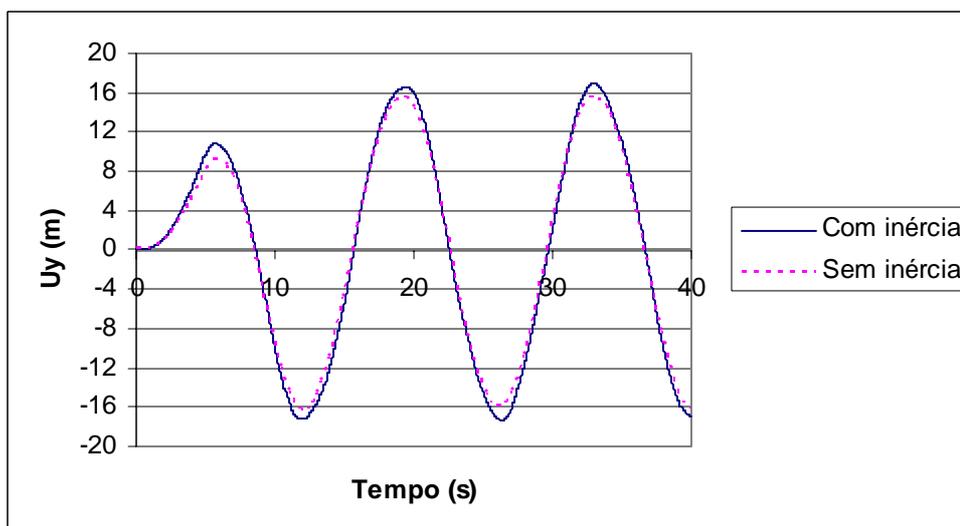


Figura 5.19 - Deslocamento na direção tangencial com e sem inclusão da parcela devida à inércia para o modelo de 100 m

Como esperado, através da análise realizada em 4.1, os efeitos de inclusão da inércia se revelam muito importantes na direção radial. Nessa direção, as ampliações de resposta são de aproximadamente 8, 10 e 7,5 para as estruturas de 20, 60 e 100 m, respectivamente. Na direção tangencial, tal efeito é relevante somente para pequenas alturas, tornando-se pequeno com o aumento desta. Nessa direção, para o modelo de 20 m, a amplificação é de cerca de 2 vezes, sendo irrelevante para as outras estruturas. Tal comportamento advém do modelo de campo de vento adotado, como explicado na seção 4.1, e da própria equação de Morrison.

5.2. Efeitos globais

Os esforços cortantes e momentos totais são considerados em relação ao sistema de eixos adotados, conforme Figura 5.20.

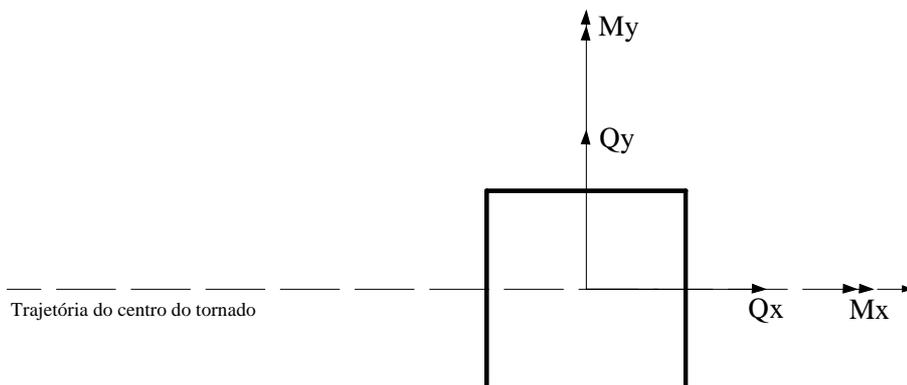


Figura 5.20 – Sentidos vetoriais adotados para consideração dos efeitos globais

5.2.1. Momentos e cortantes totais na base

Para uma excitação com as características singulares do tornado e considerando-se a origem especulativa do modelo matemático, muito pobre em comprovação física, a análise dos efeitos mecânicos sob uma ótica global é recomendada. Assim sendo, opta-se pela avaliação de ações globais para se ter uma idéia sintética dos efeitos mecânicos sobre as estruturas, para essa situação de grande variação de ações elementares do tornado. Nas Figuras 5.21 e 5.22 é mostrada a variação no tempo das forças cortantes totais e momentos de tombamento na base do modelo de 20 m de altura devidos à passagem do tornado, considerando a estrutura como corpo extenso e também o efeito da inclusão parcela de inércia na equação de Morrison. Essas ações correspondem às resultantes das forças que atuam sobre a estrutura, calculadas a partir do modelo matemático do tornado, em cada instante.

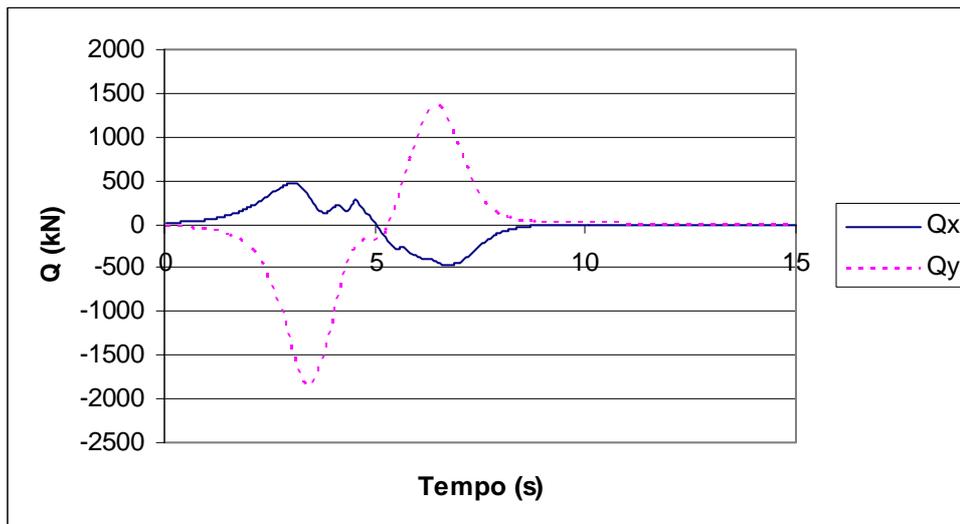


Figura 5.21 – Força cortante na base para o modelo de 20 m de altura

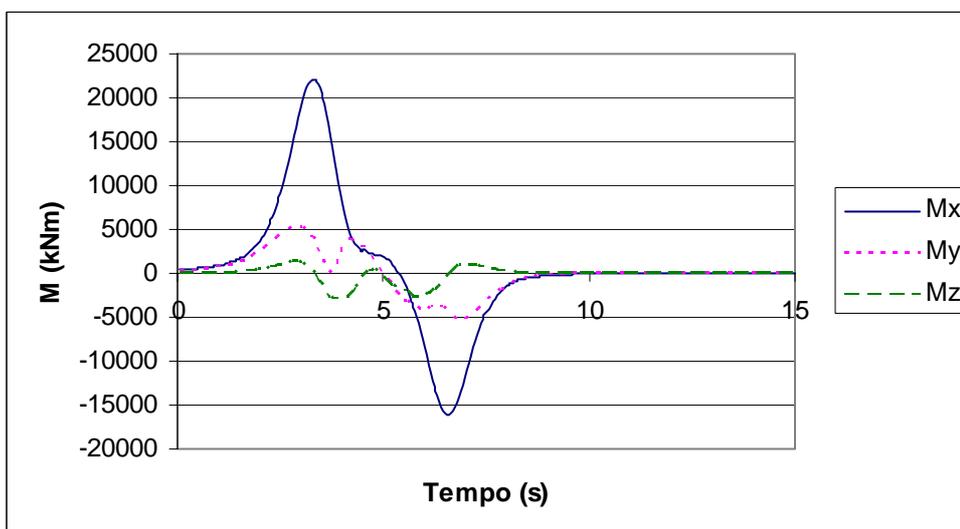


Figura 5.22 – Momentos de tombamento e torção, na base, para o modelo de 20 m de altura

Os sinais referem-se às orientações dos eixos cartesianos mostrados na Figura 5.20. A aproximação ocorre em 5 s, pois a velocidade de translacional é de 20 m/s e o início da análise se dá quando a distância entre os centros do tornado e da estrutura é de 100 m, como mostrado em 4.1. Os esforços, como se observa, têm seu sentido invertido durante o afastamento (tempo superior a 5 s). Isto se deve à inversão ocorrida nas componentes radial e tangencial conforme o tornado se localiza à esquerda ou à direita da estrutura. Os sentidos invertidos das forças cortantes nas duas direções são justificados pelo fato de a componente radial

apontar, geralmente, para o centro do tornado, coerente com o mecanismo de sucção do mesmo devido à queda de pressão na região de ocorrência.

A direção y é a mais solicitada, pois as forças nessa direção são devidas quase exclusivamente às solicitações tangenciais, maiores que as radiais, como mostrado em 4.1. O pico alcança 1800 kN, solicitação relevante, correspondente a aproximadamente 70% da carga vertical permanente por pavimento.

Os índices adotados para os momentos de tombamento se referem à direção do vetor momento. Assim sendo, M_x representa giro no plano yz , devido às solicitações na direção y , e assim por diante. Daí, as semelhanças entre os perfis de M_x e Q_y , e de M_y e Q_x . O pico atinge aproximadamente 22000 kNm. Os instantes dos máximos momentos e forças cortantes são próximos a 3s, quando o centro da estrutura se localiza a 40 m do centro do tornado, ou seja, dentro do núcleo, que possui raio de 60 m. Através desses máximos valores, chega-se a um centro de aplicação de carga a aproximadamente 12 m de altura, ou seja, pouco acima do centro geométrico da estrutura.

A parcela M_z refere-se ao esforço de torção. Tal parcela advém da consideração da variação espacial horizontal da pressão do tornado sobre o sistema. O comportamento aproximadamente simétrico desse esforço quando a estrutura encontra-se no núcleo deve-se ao comportamento da solicitação horizontal, conforme Figura 4.14, principalmente à variação da componente tangencial, predominante nessa direção. Não há variação significativa das forças na direção transversal, paralela ao eixo y . O efeito de torção é analisado com mais detalhes em 5.2.

Os efeitos globais para os modelos de 60 e 100 m de altura são mostrados nas Figuras 5.23 a 5.26.

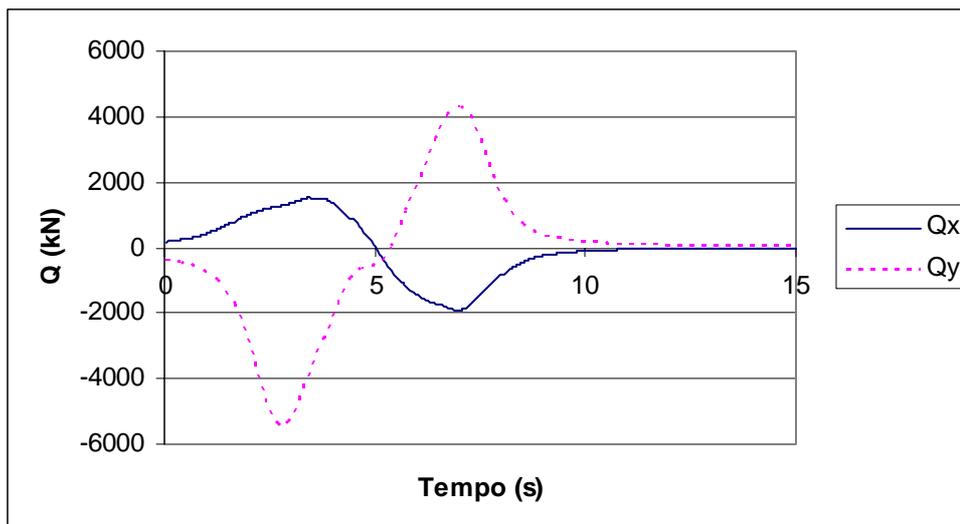


Figura 5.23 – Forças cortantes na base para o modelo de 60 m de altura

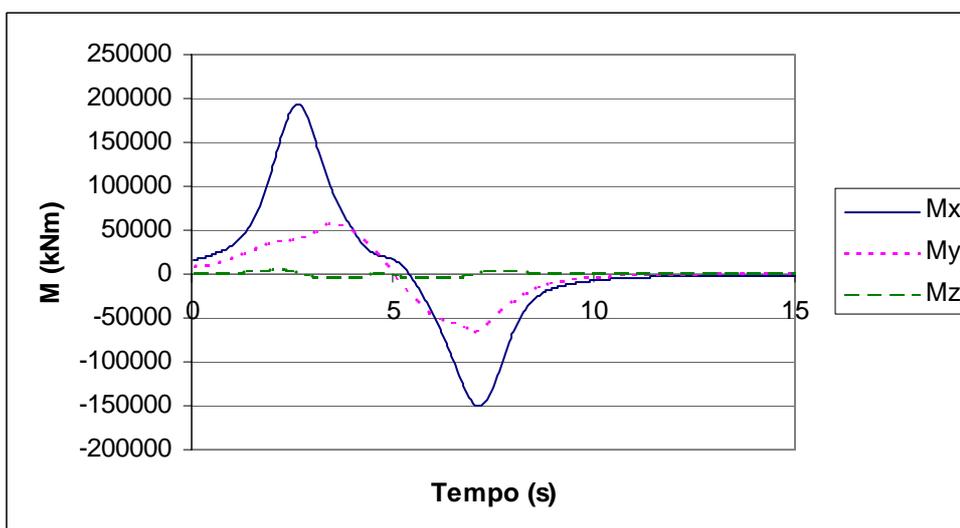


Figura 5.24 – Momentos de tombamento e torção, na base, para o modelo de 60 m de altura

Os perfis de efeitos globais apresentam formas semelhantes para as diferentes alturas. Os esforços cortantes máximos atingidos na direção y, mais solicitada, são de aproximadamente 5400 e 9000 kN, para as estruturas de 60 e 100 m, respectivamente. Os momentos máximos são em torno de 190000 e 500000 kNm, levando a centros de aplicação de carga a 35 e 56 m, aproximadamente, para os dois modelos. A relação entre a altura desses centros de aplicação de carga e as alturas das estruturas de 20, 60 e 100 m, são de 0,60, 0,58 e 0,56, respectivamente, sendo, portanto, pouco superiores ao centro geométrico, tendendo a este quando a altura da estrutura é aumentada, como pode ser deduzido

a partir da variação das forças com a altura, exemplificada na Figura 4.13. Essa mesma variação justifica o fato de a torção se tornar menos significativa com a altura quando comparada com os outros momentos. De fato, com o aumento da altura da estrutura, boa parte da mesma fica na região externa à camada limite, quando no núcleo do tornado, onde as forças são constantes, fazendo com que as solicitações de torção se tornem relativamente menores que os demais momentos.

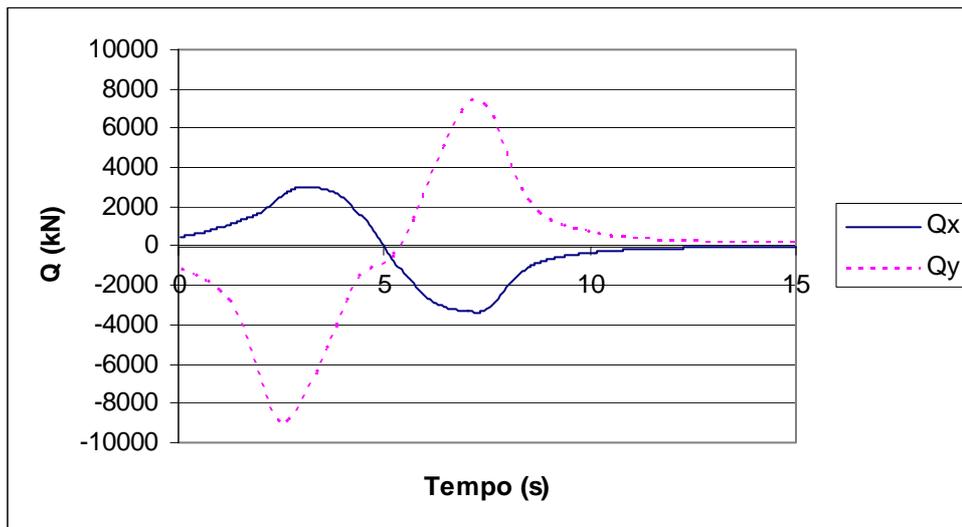


Figura 5.25 – Forças cortantes na base para o modelo de 100 m de altura

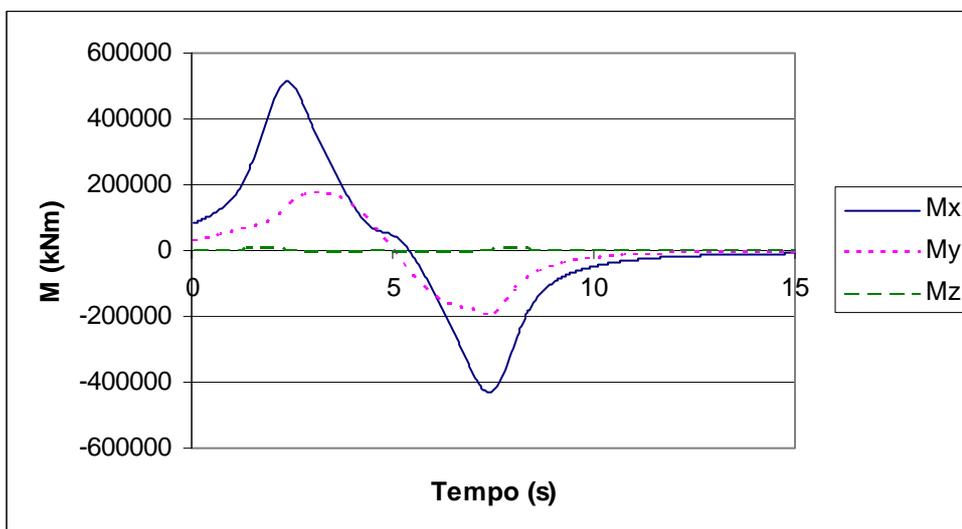


Figura 5.26 – Momentos na base para o modelo de 100 m de altura

A análise comparativa dos esforços globais para as diferentes alturas pode ser realizada a partir das Figuras 5.27 a 5.31.

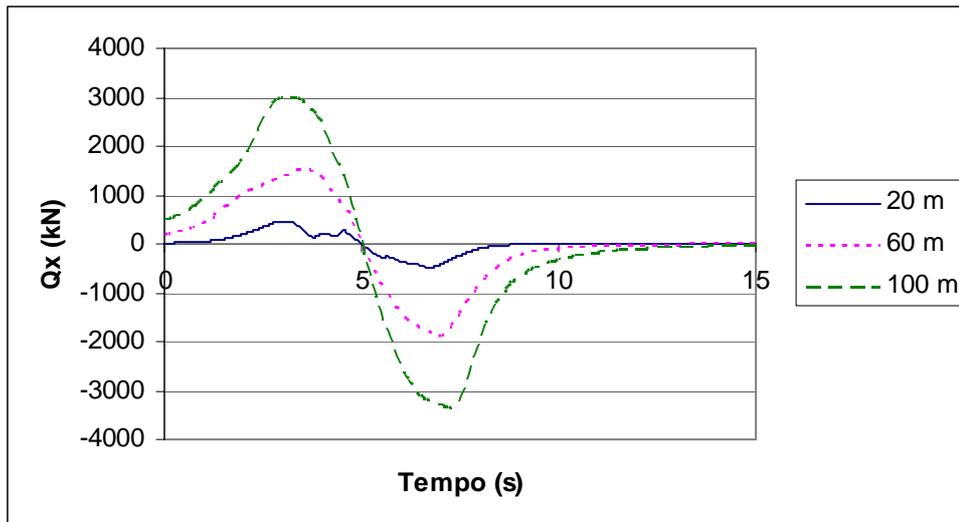


Figura 5.27 – Força cortante na base na direção radial, Q_x

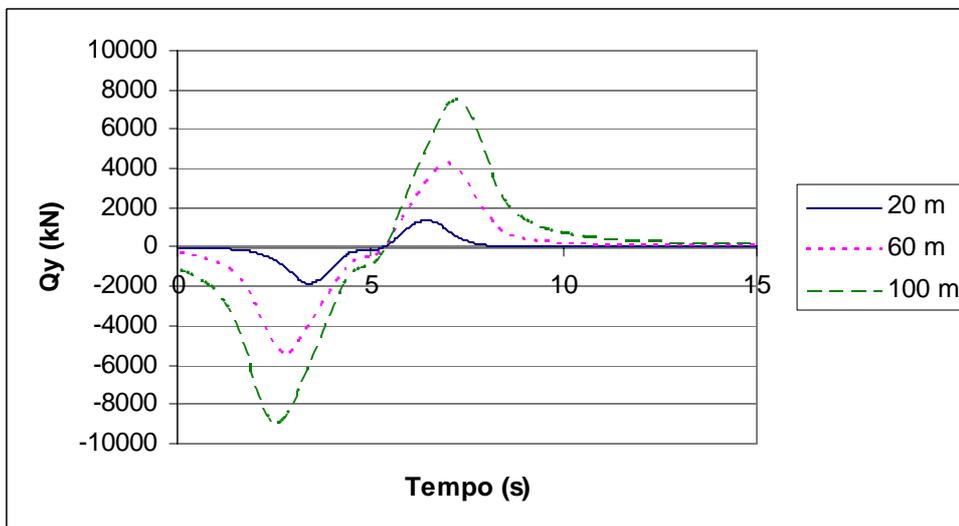


Figura 5.28 – Força cortante na base na direção tangencial, Q_y

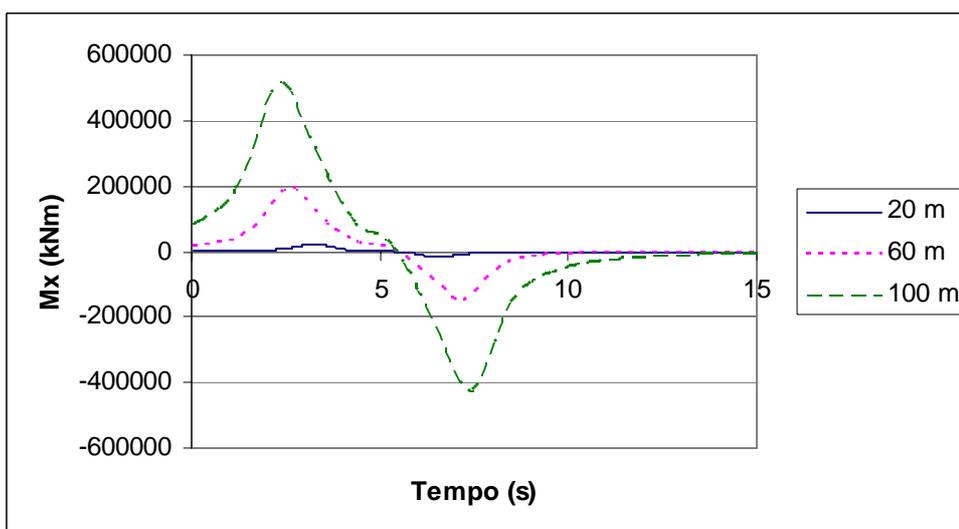


Figura 5.29 – Momento de tombamento na base devido às ações tangenciais, M_x

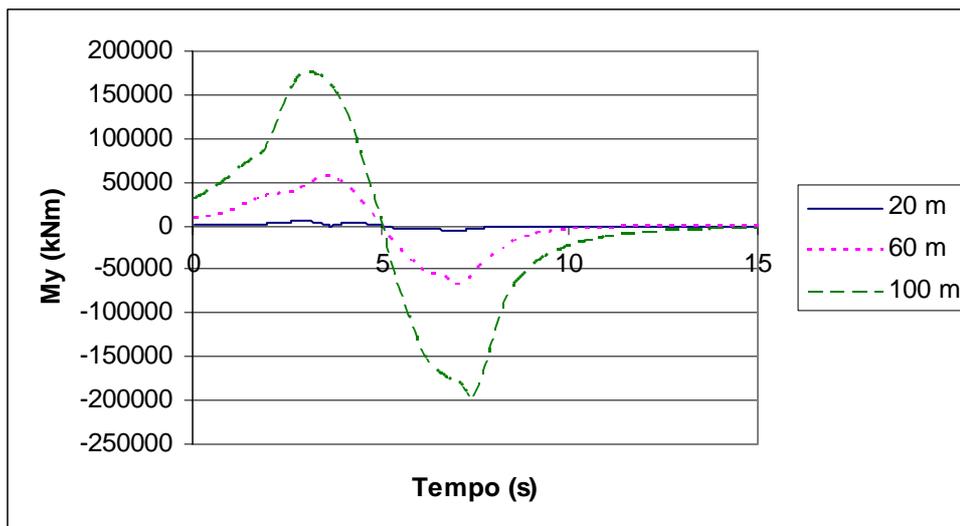


Figura 5.30 – Momento de tombamento na base devido às ações radiais, M_y

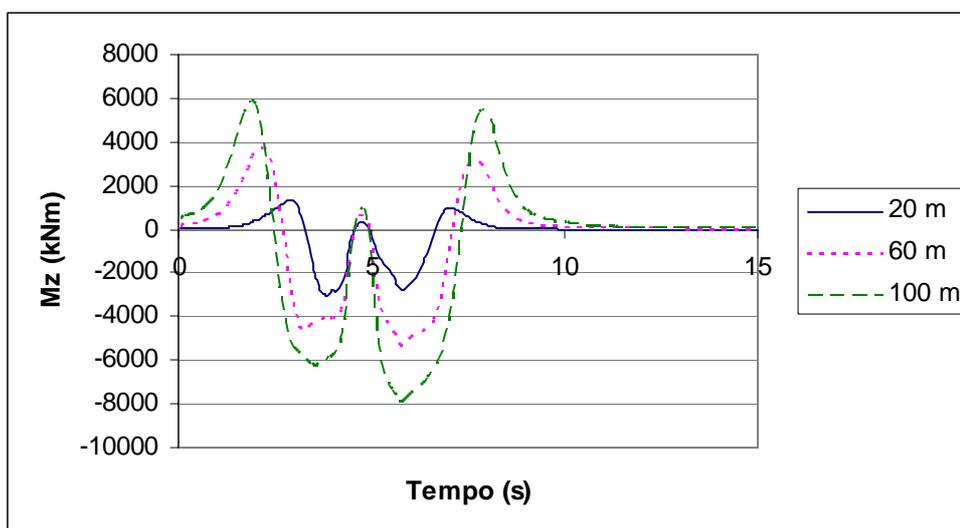


Figura 5.31 – Momento de torção na base devido às ações radiais e tangenciais, M_z

Como pode ser observado, entre os instantes 2 e 8 s, quando o eixo da estrutura encontra-se no núcleo do tornado, ocorrem as maiores solicitações. Fora do núcleo, as forças tendem rapidamente a zero. Os efeitos máximos tendem a ocorrer primeiro para as ações tangenciais, mais significativas, nos três modelos. A taxa de crescimento dos efeitos globais diminui com a altura, principalmente para os momentos de tombamento, como se verifica nas Figuras 5.27 a 5.30. Já na Figura 5.31, no caso dos momentos de torção, é constatado que a variação é menos significativa. Tais fatos devem-se à variação das forças com a altura, mostrada na Figura 4.13.

A seguir, as ações globais máximas na base devidas à excitação do tornado são confrontadas com os valores obtidos para a ação direta do vento, utilizando-se procedimento preconizado pela NBR 6123 – Forças Devidas ao Vento em Edificações (ABNT, 1988), considerando a maior velocidade básica de vento prescrita pela mesma para o território nacional, igual a 45 m/s. Tais valores são apresentados na Tabela 5.1. A análise comparativa é mostrada na Figura 5.32 para os três modelos, considerando a força cortante máxima na direção tangencial, mais crítica, e o momento de tombamento máximo nessa mesma direção. Como se nota, a razão diminui com a altura do modelo para os dois casos, sendo maiores que 8 para a estrutura de 20 m. Para 100 m, tal relação apresenta-se pouco menor que 4.

Tabela 5.1 – Efeitos globais calculados pela NBR 6123

Altura (m)	$V_0 = 45 \text{ m/s}$	
	$Q_b \text{ (kN)}$	$M_b \text{ (kNm)}$
20	227	2520
60	1051	37560
100	2343	137957

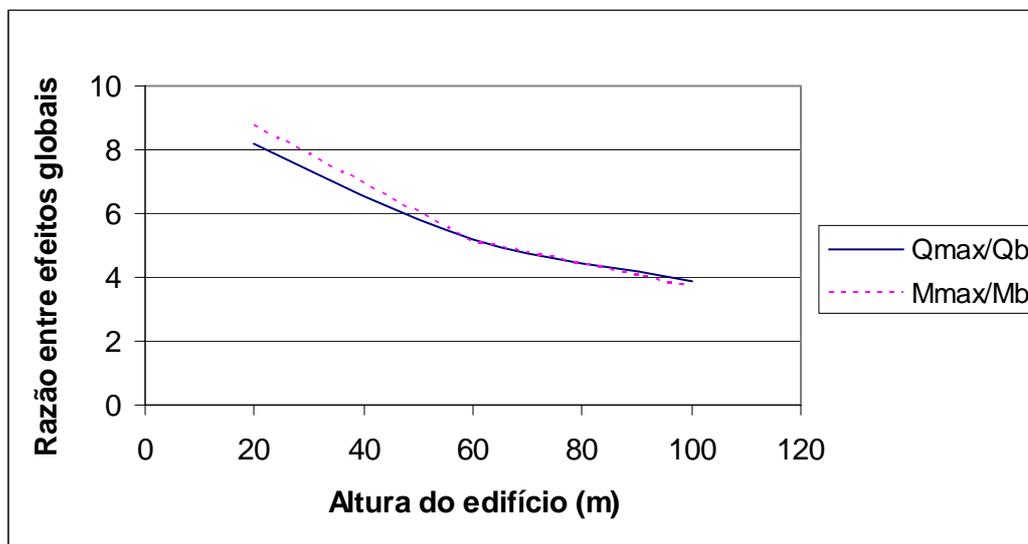


Figura 5.32 – Razão entre forças globais máximas causadas pelo tornado e calculadas pela norma brasileira para o máximo vento

Os valores dessas ações são proporcionais ao quadrado da velocidade tangencial máxima, sendo, portanto, bastante sensíveis a variações desta. Como,

no presente estudo, não se consideram os efeitos estruturais da velocidade de translação, conforme comentado anteriormente, a variação do raio do núcleo não altera o valor das forças máximas na base, modificando, entretanto, a posição do tornado para a qual esses ocorrem. Pela formulação empregada, as forças de vento, para uma determinada altura, z , são função apenas da relação $r = r'/r_{\max}$, onde r' é a distância entre o tornado e a estrutura, tomada de centro a centro. O mesmo vale, portanto, para os efeitos globais. Assim sendo, cada modelo apresenta força cortante máxima na base para determinado valor de r , ocorrendo o mesmo para o momento de tombamento. A dimensão do núcleo interfere somente na duração de tempo em que a estrutura fica sujeita às maiores solicitações.

5.2.2. Simplificação da discretização da estrutura

A maioria das análises estruturais a tornados reportadas na literatura é bidimensional (e.g., Eberline et al, 1991; Savory et al, 2001; Dutta et al, 2002). Wen (1975) apresenta a resposta estrutural tridimensional de um edifício de aço, avaliando, entretanto, as ações de vento do tornado no eixo de simetria da estrutura, ou seja, considerando a mesma como ponto material em planta. Até o presente, conforme revisão bibliográfica realizada, nenhum estudo existe considerando a variação espacial horizontal das ações de tornados, que conduz à discretização da estrutura ao longo de sua largura. Faz-se, nesta seção, a análise comparativa entre as duas metodologias.

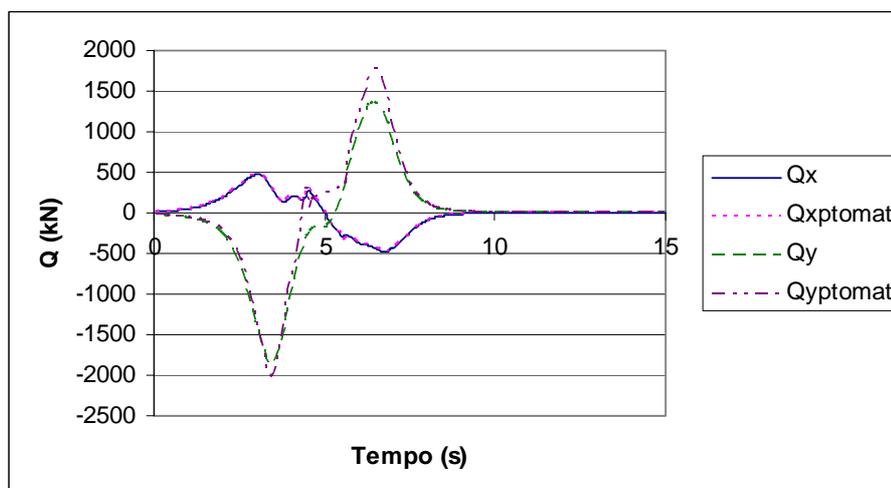


Figura 5.33 – Forças cortantes na base para o modelo de 20 m, para as metodologias de ponto material e corpo extenso

Nas Figuras 5.33 a 5.38 podem ser vistos os perfis de forças cortantes e momentos de tombamento para os três modelos, em duas situações, considerando ou não a estrutura como ponto material perante o tornado. A terminologia utilizada, 'ponto material', refere-se à configuração em planta. Na análise tridimensional, tem-se verdadeiramente uma 'linha material', correspondente ao eixo de simetria da estrutura.

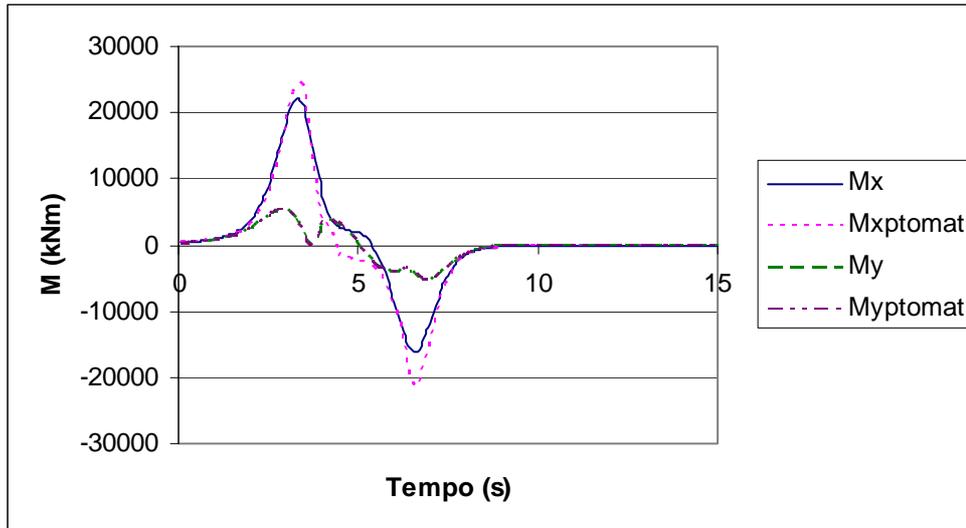


Figura 5.34 – Momentos de tombamento na base para o modelo de 20 m, para as metodologias de ponto material e corpo extenso

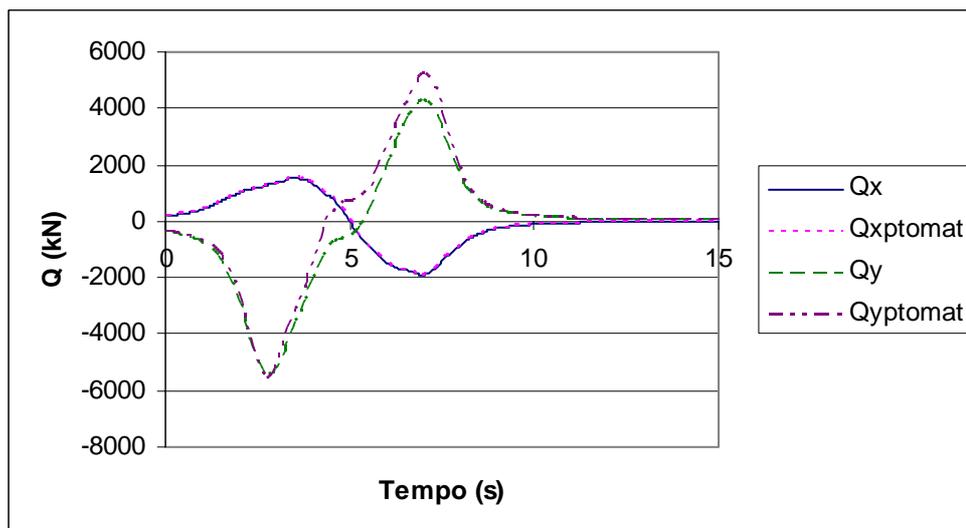


Figura 5.35 - Forças cortantes na base para o modelo de 60 m, para as metodologias de ponto material e corpo extenso

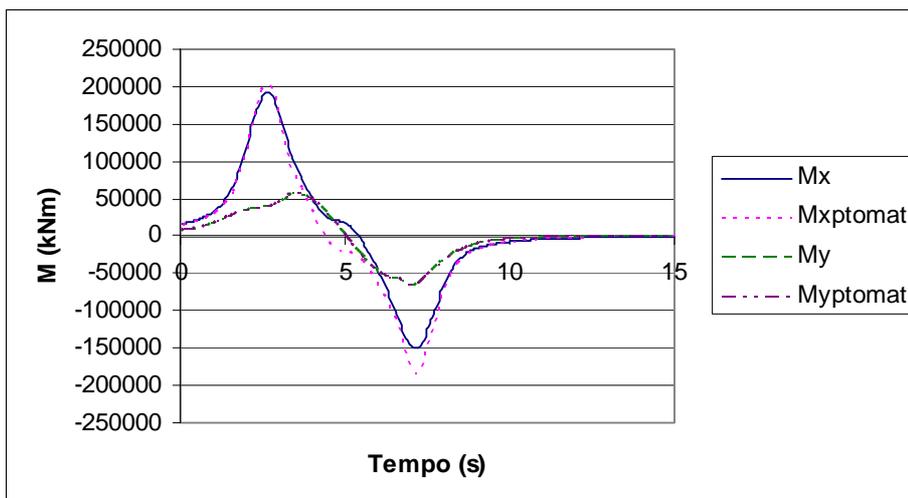


Figura 5.36 - Momentos de tombamento na base para o modelo de 60 m, para as metodologias de ponto material e corpo extenso

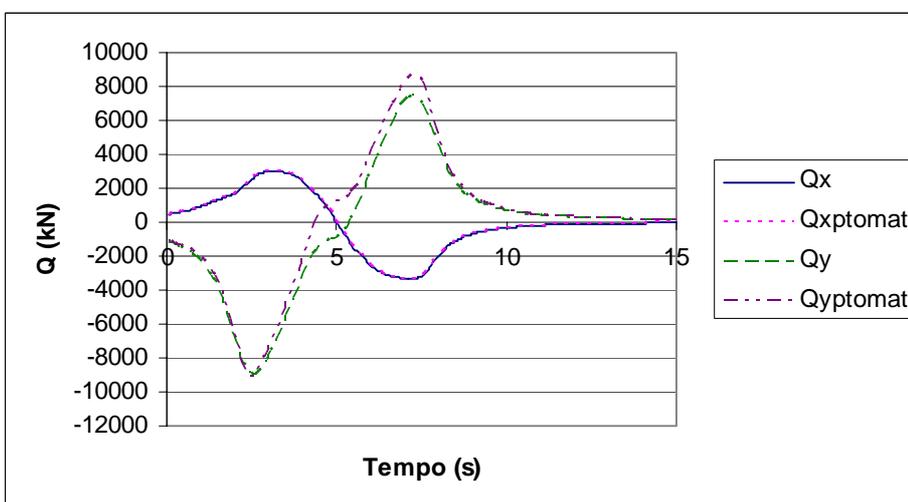


Figura 5.37 – Forças cortantes na base para o modelo de 100 m, para as metodologias de ponto material e corpo extenso

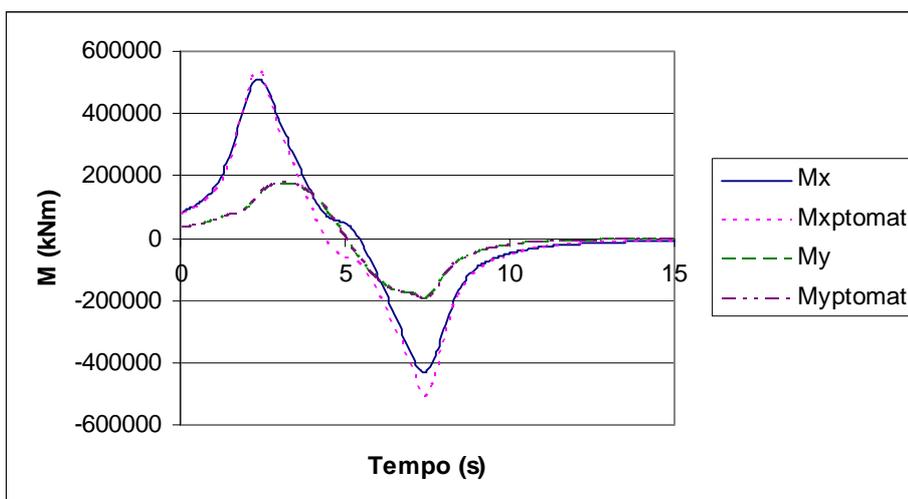


Figura 5.38 - Momentos de tombamento na base para o modelo de 100 m, para as metodologias de ponto material e corpo extenso

Como pode ser observado, não há diferenças significativas entre os perfis de forças cortantes totais e momentos de tombamento na base dos modelos para as duas metodologias. Na direção radial, os perfis são praticamente coincidentes, coerente com o fato de não haver variação espacial transversal significativa das forças, como já citado. Na direção tangencial, a simplificação tende a ser ligeiramente conservadora, aumentando as forças totais. Tal simplificação parece ser, portanto, aceitável, caso o interesse seja em estimar as forças cortantes e momentos de tombamento globais.

A grande diferença na consideração da variação espacial horizontal das forças do tornado, entretanto, está no aparecimento dos momentos de torção. Tais momentos, mostrados na Figura 5.31, causam acréscimo das cargas horizontais nas fundações. Tal acréscimo é de 5 a 6% do cortante máximo para os três modelos analisados. Os picos observados, de 1300, 5300 e 8000 kNm, para os modelos de 20, 60 e 100m de altura, respectivamente, representam valores relevantes para efeito de projeto das peças estruturais. Portanto, a consideração de corpo extenso apresenta-se mais recomendável para a obtenção de esforços visando a metodologias de projeto.

5.3. Avaliação e proposta de espectro de resposta para tornados

É prática comum na literatura a avaliação do efeito da variação de alguns parâmetros do tornado ou da estrutura. Por exemplo, Dutta et al (2002) estudam a resposta dinâmica de sistemas flexíveis de diferentes alturas para três velocidades de translação tornádicas. Wen (1975) varia o raio do núcleo. Tais variações representam, em última instância, alterações na massa e rigidez do sistema estrutural ou no tempo em que este fica sujeito às solicitações do campo de vento do tornado. Propõe-se aqui um espectro de resposta, que, ao considerar a duração da excitação e a frequência fundamental da estrutura, inclui os casos particulares anteriores.

O espectro proposto é para o deslocamento cinemático na direção tangencial, U_y , no topo do modelo de 60 m de altura. Inclui-se a parcela de inércia e o modelo é tratado como corpo extenso. Varia-se a frequência fundamental da estrutura através da variação da massa da mesma e considera-se que cada um dos

dois pulsos tem duração de 5 s. O espectro obtido pode ser visualizado na Figura 5.39.

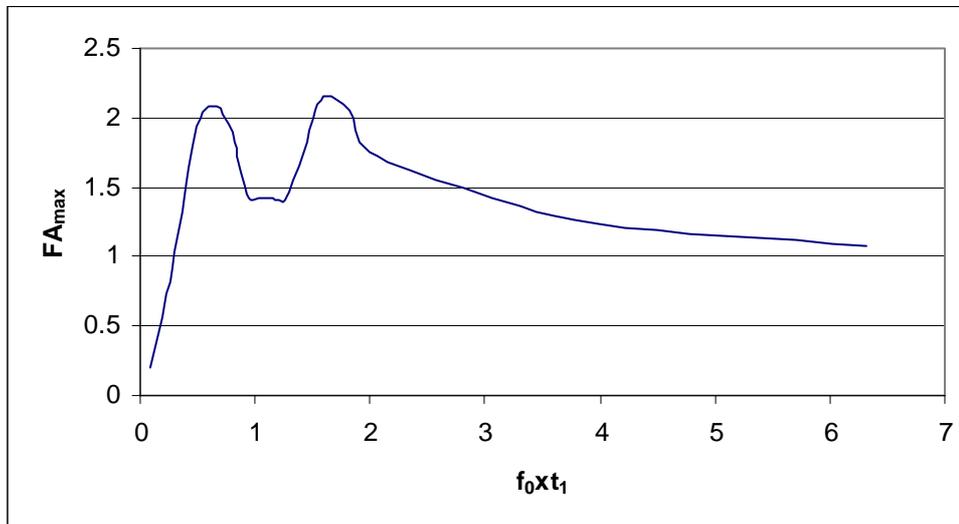


Figura 5.39 – Espectro de resposta cinemática de deslocamento na direção tangencial para o topo do modelo de 60 m

Há dois picos, com valores de amplificação máximos de aproximadamente 2,08 e 2,16, correspondendo aos valores de $f_0 t_1 = 0,65$ e $1,65$, respectivamente. A grande diferença observada em relação ao espectro clássico para pulso senoidal é a presença de uma região de decréscimo, um vale, entre esses dois picos. O fator de amplificação, depois de atingir o primeiro máximo, cai a cerca de 1,4, em torno da região de $f_0 t_1 = 1,15$, voltando a subir em seguida. Investiga-se tal comportamento através das respostas no tempo nesses pontos, que podem ser visualizadas nas Figuras 5.40 a 5.42.

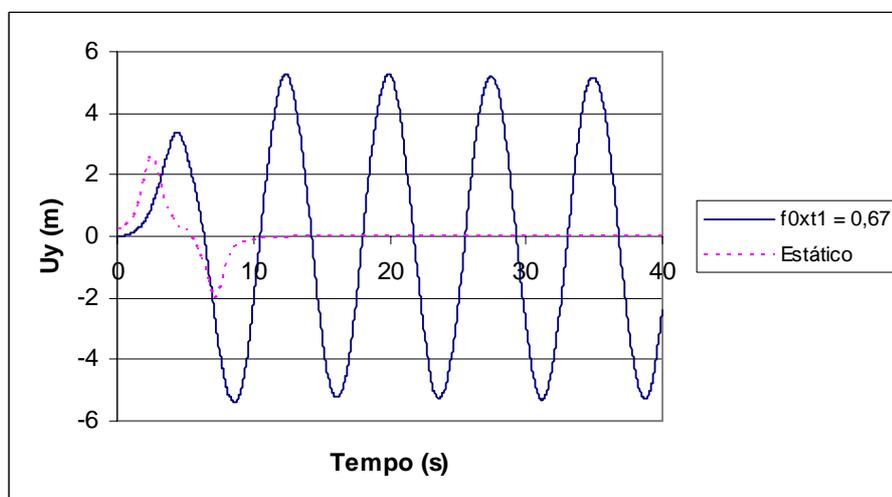


Figura 5.40 – Resposta no tempo para o primeiro pico do espectro

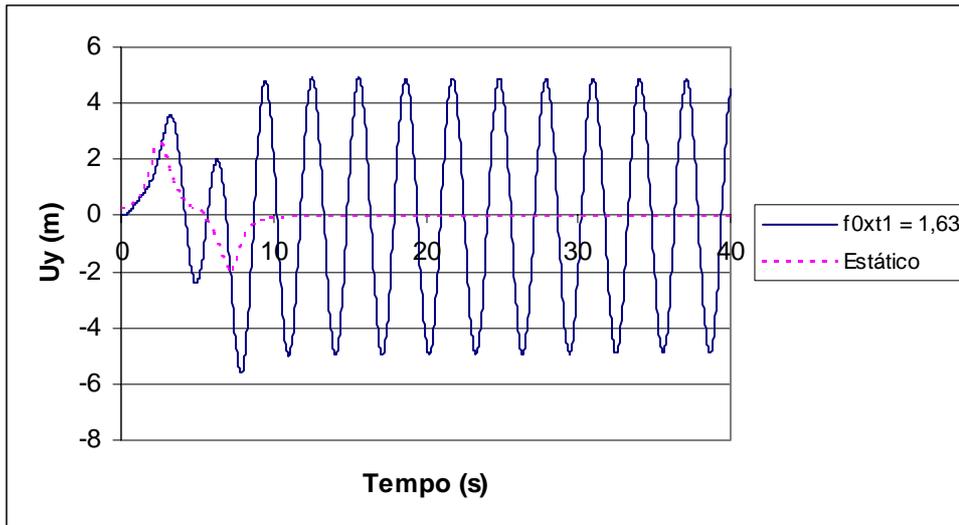


Figura 5.41 – Resposta no tempo na região de depressão observada no espectro

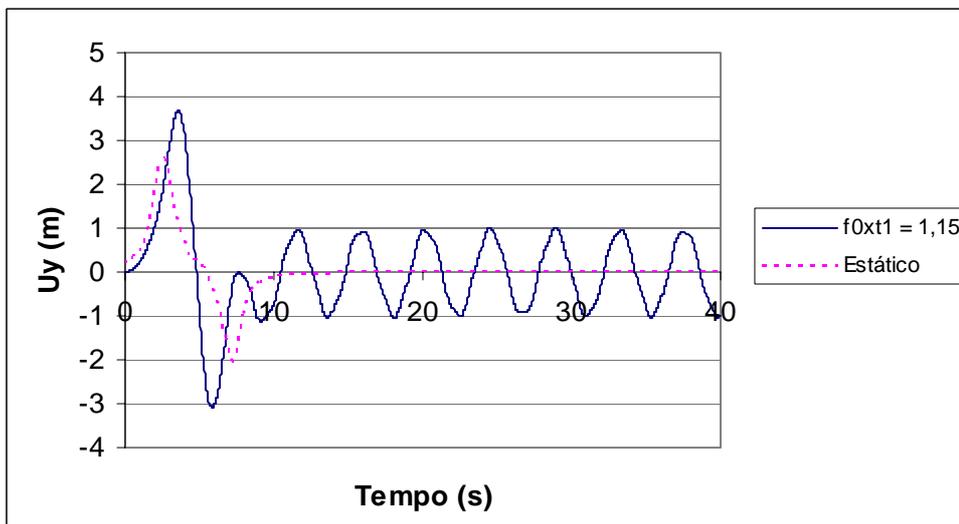


Figura 5.42 - Resposta no tempo para o segundo pico do espectro

Na região de depressão, a máxima resposta dinâmica ocorre durante o primeiro pulso. Para o segundo pico, tal resposta se dá no segundo pulso, ocorrendo após este para o primeiro pico. O fator de amplificação máximo depende das configurações das respostas estática e dinâmica, através da relação t_1/T_0 . Em síntese, observa-se que:

- para valores baixos de f_0t_1 ($< 0,7$), o FA_{\max} ocorre após a passagem do tornado, chegando a ultrapassar o valor de 2,0 (2,08);
- com o aumento de f_0t_1 , o FA_{\max} decresce até atingir patamar próximo a 1,4, com o valor extremo ocorrendo na fase de aproximação do tornado;

- com o aumento do parâmetro temporal, o FA_{\max} passa a ocorrer na fase de afastamento, segundo pulso, com valores crescentes até 2,16 para $f_0t_1 = 1,65$;
- prosseguindo-se para a direita sobre o espectro, o FA_{\max} decresce progressivamente, tendendo para a resposta estática, $FA_{\max} = 1,0$, ocorrendo, naturalmente, em coincidência com o maior valor da excitação tornádica.