

5 Análises preliminares

Analisa-se os efeitos da incidência de um tornado, com o campo de vento dado pelas equações de Kuo/Wen, descritas em 3.1, em modelos estruturais de torres de transmissão de energia. Objetiva-se, com isso, aprofundar o conhecimento do campo de vento tornádico em seus diversos aspectos e sua interação com as torres de transmissão. Tem-se assim o desenvolvimento da sensibilidade necessária e a eleição de aspectos relevantes para a avaliação da solicitação tornádica no projeto dessas estruturas. As seguintes definições são importantes:

- Efeitos globais - efeitos totais atuantes na base das torres. Três efeitos são tratados: força cortante global, força vertical global e momento global. São também referenciados como “força cortante total na base”, “momento de tombamento”, etc. Eventualmente, analisa-se ainda o momento global de torção;
- Eixo material – simplificação que desconsidera as dimensões horizontais da estrutura para análise dos efeitos mecânicos, ou seja, a avaliação dos mesmos é realizada no eixo de simetria do modelo. Em planta, esse seria representado por um ponto material. Nesse caso, por exemplo, o momento global de torção é desprezado;
- Corpo extenso – consideram-se as dimensões horizontais da estrutura para a análise dos efeitos mecânicos;

Quatro modelos são estudados. O primeiro é hipotético e de características singelas, denominado ‘modelo inicial’ e tratado na seção 5.1. Na seção 5.2, representa-se simplificadamente a estrutura de uma torre de transmissão. Nas seções 5.3 e 5.4, são estudados dois modelos de torres, uma autoportante e outra

estaiada, representativas da região brasileira mais suscetível a tornados. As mesmas são apresentadas em 4.2.

Os objetivos principais são o estudo das componentes de vento radial, tangencial e vertical, além de comparações entre as seguintes hipóteses de análise:

- Eixo material *versus* corpo extenso – estuda-se a influência da consideração das dimensões horizontais da estrutura sobre os efeitos mecânicos decorrentes da incidência tornádica. A discussão é realizada na seção 5.1;
- Força de arrasto *versus* força de inércia – comparação entre as forças de arrasto e inércia, definidas em 3.2, de tornados sobre torres de transmissão, realizada na análise do modelo simplificado na seção 5.2;
- Análise estática *versus* análise dinâmica – análise da influência da flexibilidade de torres de transmissão na resposta mecânica a tornados. Conduzida nas seções 5.2 a 5.4.

Os efeitos mecânicos resultantes da incidência de tornados em torres de transmissão devem-se quase integralmente à pressão direta de vento, pois as torres, sendo estruturas abertas, praticamente não sofrem efeitos de sucção. O estudo tem ainda enfoque sobre efeitos globais. Acredita-se que essa é uma primeira forma de abordagem adequada à natureza do problema, de modo a se ter uma idéia sintética dos efeitos mecânicos sobre as torres, e mormente sobre suas fundações, considerando-se a grande variação de ações elementares do tornado. Análises cinemáticas são também eventualmente realizadas. Utilizam-se os programas MAPLE[®], de álgebra simbólica, e ANSYS[®], de análise estrutural pelo Método dos Elementos Finitos.

Considera-se também que o eixo de translação do tornado passe pelo centro da torre, em planta. Nesse caso, a direção do movimento do mesmo coincide com a direção da velocidade radial e é denominada ‘direção radial’; a direção perpendicular é referenciada como ‘direção tangencial’. Os efeitos globais são dados em relação à convenção de vetores mostrada na Figura 5.1. Importante notar que a denominação dos momentos de tombamento é feita de tal forma a considerar a direção do vento incidente que os causa. O nó do topo tomado como

referência para análise de deslocamentos é visualizado na Figura 5.2, bem como os sentidos vetoriais adotados para estudos cinemáticos.

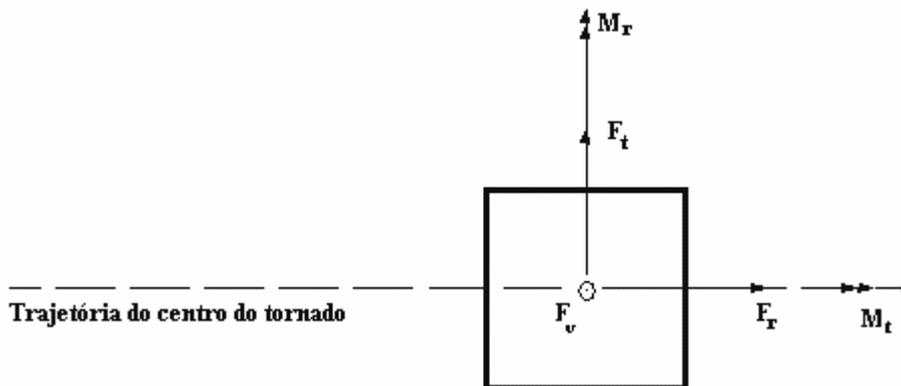


Figura 5.1 – Sentidos vetoriais adotados para consideração dos efeitos globais

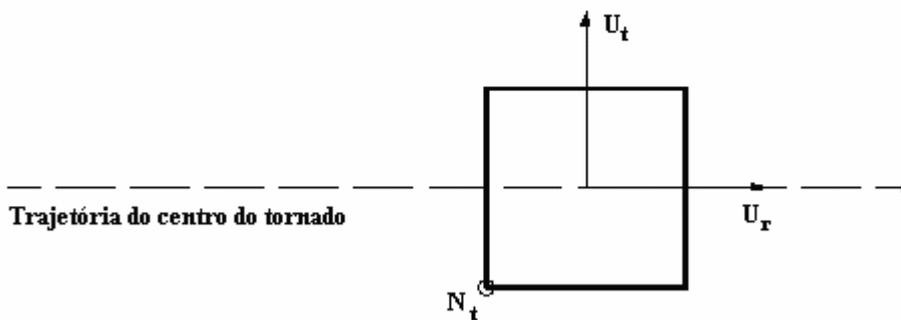


Figura 5.2 – Nó do topo, N_t , onde se analisam os efeitos da flexibilidade dos modelos

5.1 Modelo inicial

Inicialmente, estuda-se um modelo tridimensional singular, que possui quatro barras verticais, de 180 m de altura, dispostas de tal modo a constituírem vértices de um quadrado de lado 10 m. Às mesmas, acrescentam-se barras horizontais nas quatro faces, a cada 5 m de altura. Todas as barras possuem diâmetro externo de 0,5 m e interno de 0,4 m. A estrutura pode ser visualizada na Figura 5.3.

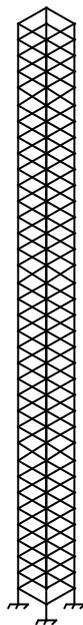


Figura 5.3 – Modelo inicial

Considera-se a incidência do tornado F5 descrito em 4.1. Nesta primeira análise, estudam-se as respostas mecânicas estáticas em termos dos efeitos globais. Inicialmente, toma-se a estrutura como eixo material e, a seguir, a influência da consideração de corpo extenso é analisada. Em todos os resultados desta seção, inclui-se a parcela de inércia no cálculo da força atuante. As ações são parametrizadas em relação a valores calculados através da metodologia preconizada pela NBR 6123 (ABNT, 1988) para a máxima velocidade básica de vento (45 m/s). Os coeficientes de arrasto e inércia são tomados como unitários para o tornado.

5.1.1 Estrutura tomada como eixo material

Os resultados para os efeitos globais nas direções radial, tangencial e vertical podem ser visualizados nas Figuras 5.4 e 5.5. Nesses primeiros resultados, despreza-se o efeito da velocidade de translação, de modo a possibilitar uma comparação mais fiel entre as componentes de vento tornádicas.

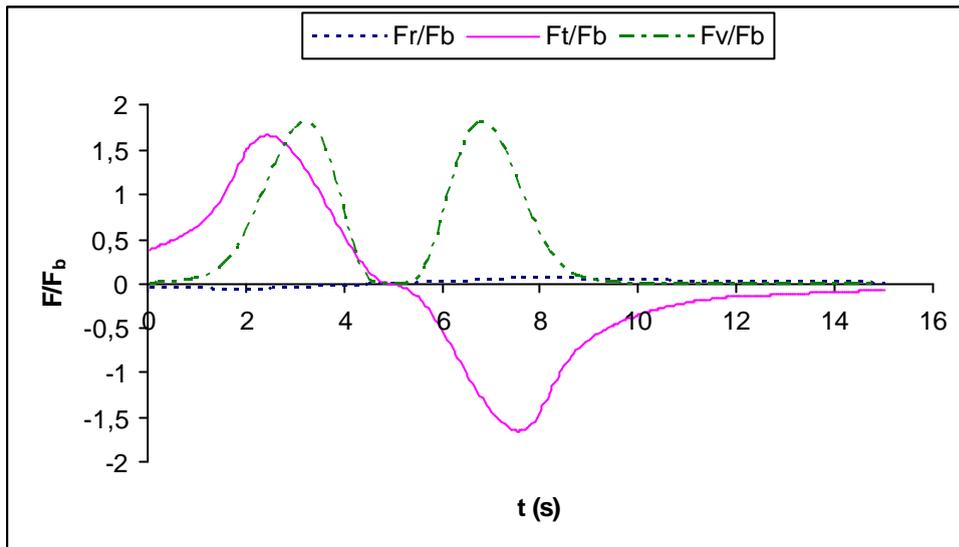


Figura 5.4 – Forças cortantes globais para o modelo inicial

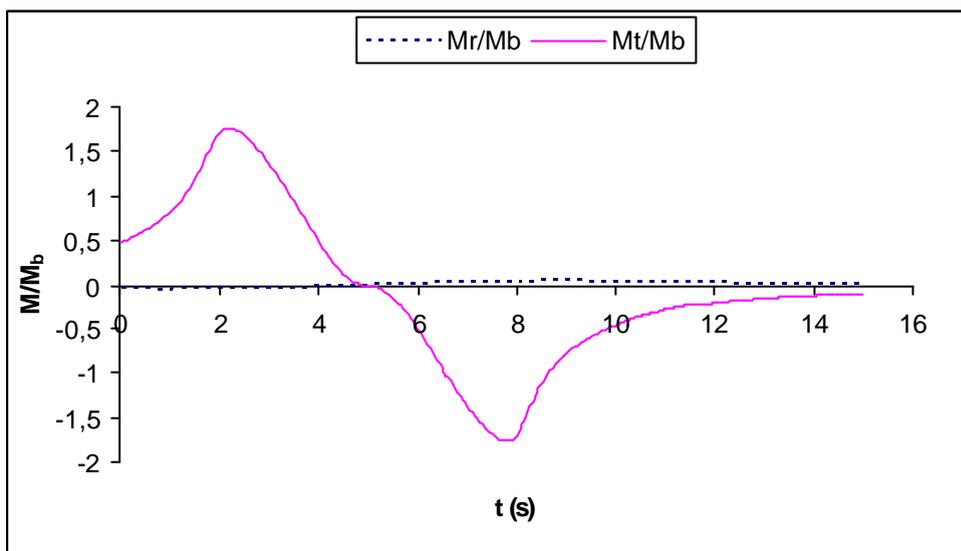


Figura 5.5 – Momentos globais para o modelo inicial

Nota-se a preponderância das ações tangenciais sobre as radiais, resultado já verificado em estudos anteriores sobre a incidência de tornados em estruturas fechadas (Pecin, 2006). A ação sobre a estrutura assemelha-se a dois pulsos, referentes às situações de aproximação e afastamento do centro do tornado em relação ao alvo estrutural. Os picos na direção tangencial são cerca de 70% superiores aos valores previstos pela norma. Os resultados mostram que a componente vertical possui valor bastante significativo, comparável à ação tangencial do tornado.

No caso em que a trajetória do eixo do tornado passa pelo centro geométrico da estrutura, tratado aqui, a parcela de vento translacional atua apenas na direção radial. A influência da consideração de tal parcela na força cortante global nessa direção é analisada a partir da Figura 5.6.

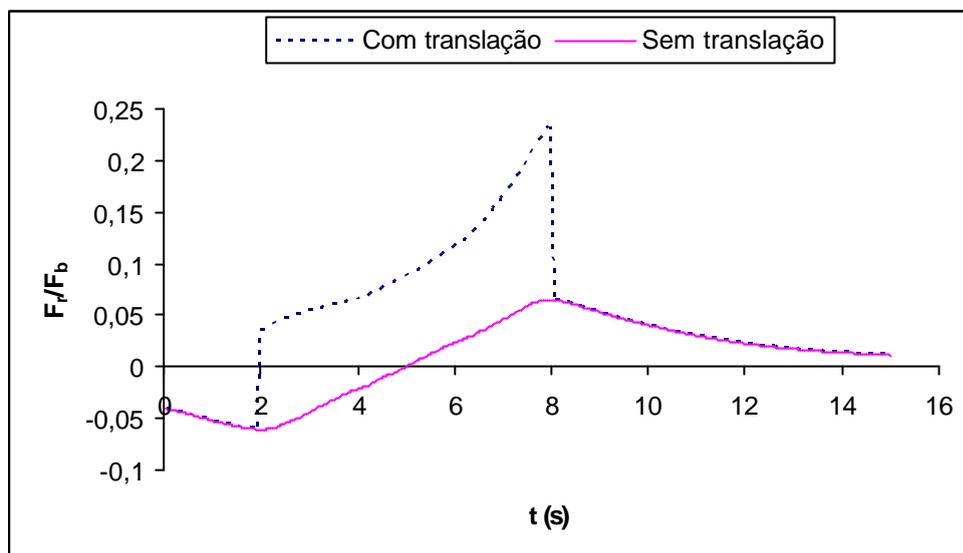


Figura 5.6 – Força cortante global na direção radial para o modelo inicial

O trecho onde os perfis não são coincidentes corresponde ao núcleo tornádico, região onde se considera a velocidade translacional atuante. O cômputo dessa velocidade resulta nas descontinuidades observadas na solicitação. Nota-se que a consideração de tal componente aumenta a força cortante global na direção radial em aproximadamente 4 vezes. No entanto, tal valor é ainda significativamente menor que o calculado pela metodologia preconizada na NBR 6123/88, corroborando a pouca relevância das ações tornádicas nessa direção.

5.1.2 Efeitos da consideração da estrutura como corpo extenso

Estuda-se o efeito da discretização horizontal do modelo. Portanto, as ações tornádicas não são mais avaliadas no eixo de simetria da estrutura. Em todos os exemplos, deste item em diante, considera-se a velocidade de translação do

tornado. Os resultados obtidos para as ações globais radiais e tangenciais podem ser visualizados nas Figuras 5.7 a 5.10.

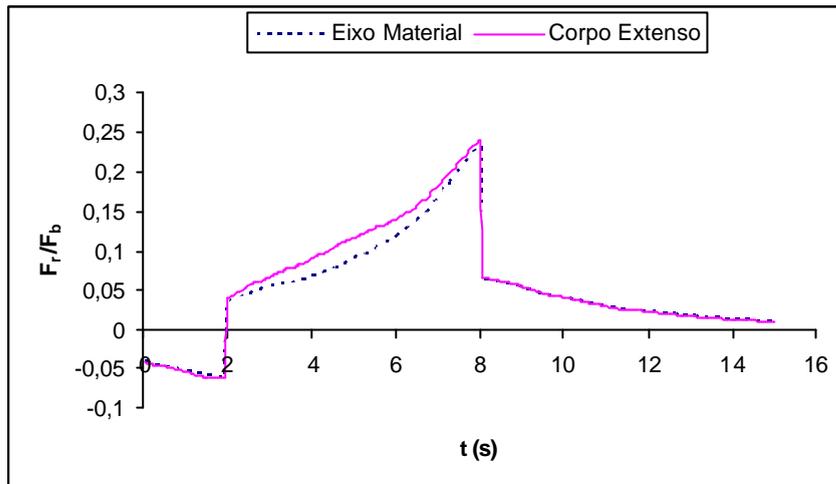


Figura 5.7 – Força cortante global na direção radial para o modelo inicial

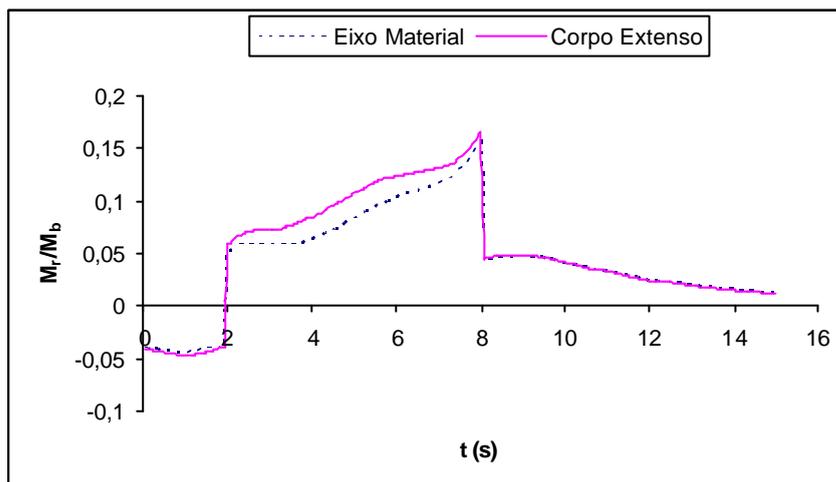


Figura 5.8 – Momento global na direção radial para o modelo inicial

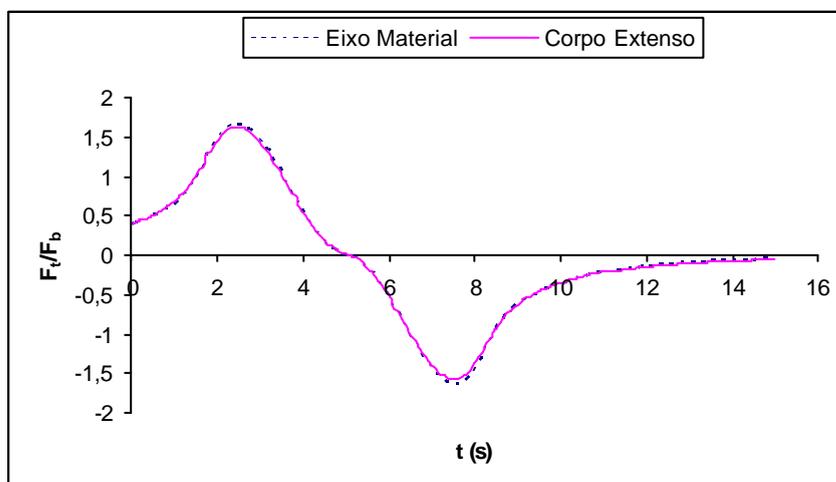


Figura 5.9 – Força cortante global na direção tangencial para o modelo inicial

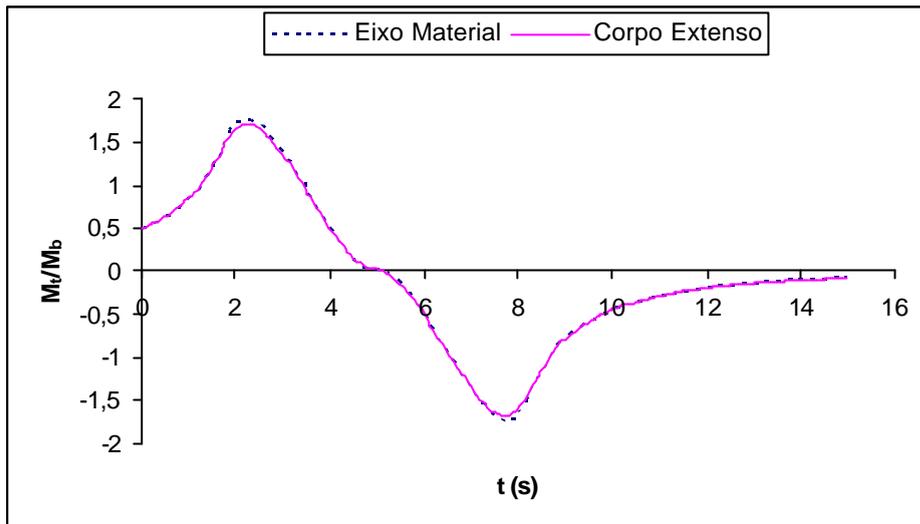


Figura 5.10 – Momento global na direção tangencial para o modelo inicial

As ações globais radiais tendem a ser ligeiramente majoradas com a discretização do modelo. As ações tangenciais apresentam valores semelhantes, quer se considere a estrutura como eixo material ou corpo extenso.

As forças verticais obtidas são mostradas na Figura 5.11. Os perfis são praticamente coincidentes.

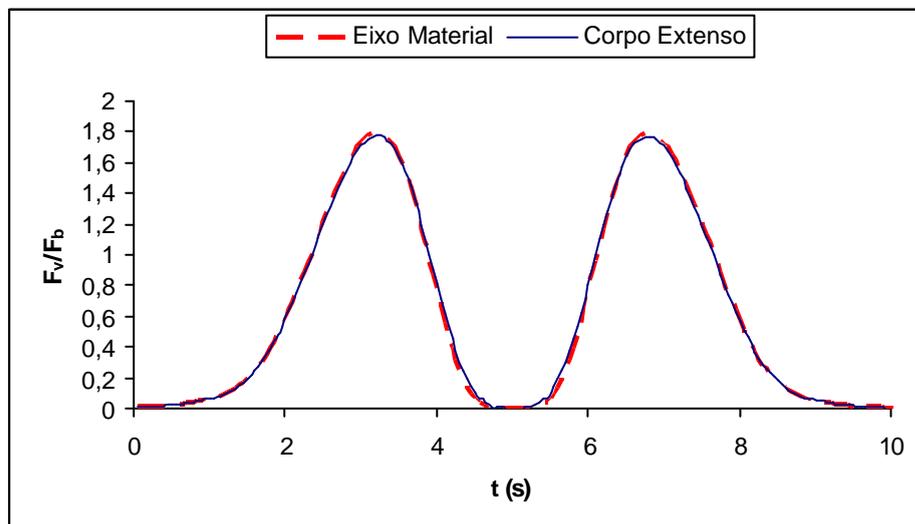


Figura 5.11 – Força global na direção vertical para o modelo inicial

O momento global de torção é mostrado na Figura 5.12. O mesmo é parametrizado pela força cortante global máxima, F_q , e pela dimensão da base do modelo, B .

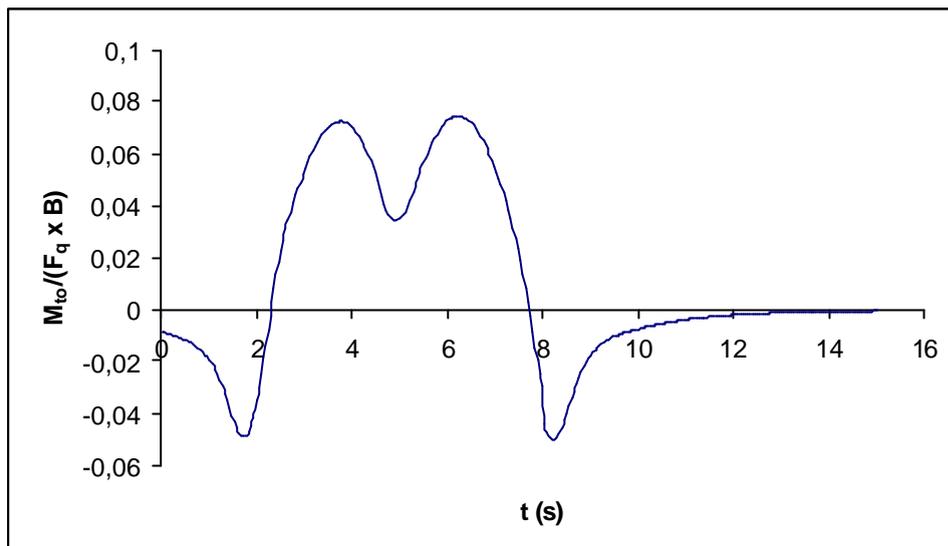


Figura 5.12 – Momento global de torção obtido para o modelo inicial discretizado

O acréscimo de carga horizontal na fundação é de aproximadamente 7%. Tal resultado é semelhante ao observado por Pecin (2006) para estruturas fechadas. O momento de torção constitui uma singularidade da ação tornádica em relação ao vento usual de projeto.

5.2 Modelo simplificado

Avaliam-se os efeitos mecânicos estáticos e dinâmicos em um modelo simplificado de torre, mostrado na Figura 5.13, quando submetido ao tornado F5 descrito em 4.1. A altura total da estrutura é de 55 m, com base quadrada de lado igual a 17 m (Aguilera, 2007). A frequência fundamental do modelo é de 0,38 Hz. O mesmo é tomado como eixo material perante o tornado. Para a avaliação da pressão sobre a estrutura, considera-se a projeção ortogonal da área exposta de cada barra. Analisa-se a influência da parcela de inércia durante a análise estática. Os resultados apresentados incluem essa parcela, exceto quando indicado o contrário. A exemplo da seção 5.1, os mesmos são parametrizados em relação à metodologia da NBR 6123/88.

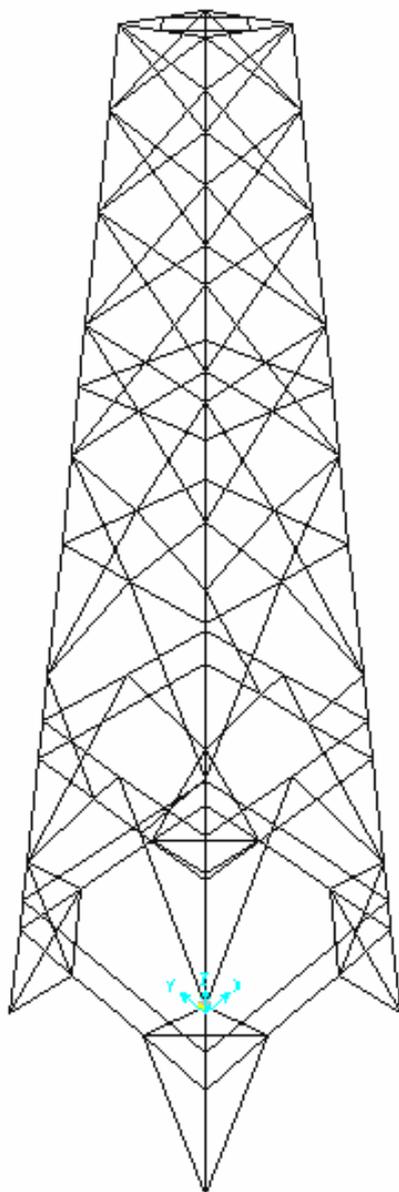


Figura 5.13 – Modelo simplificado, adaptada de Aguilera (2007)

5.2.1 Análise estática

Os efeitos mecânicos estáticos para as forças totais nas direções radial, tangencial e vertical, assim como os momentos de tombamento, são mostrados nas Figuras 5.14 e 5.15. Consideram-se unitários os coeficientes de arrasto e inércia.

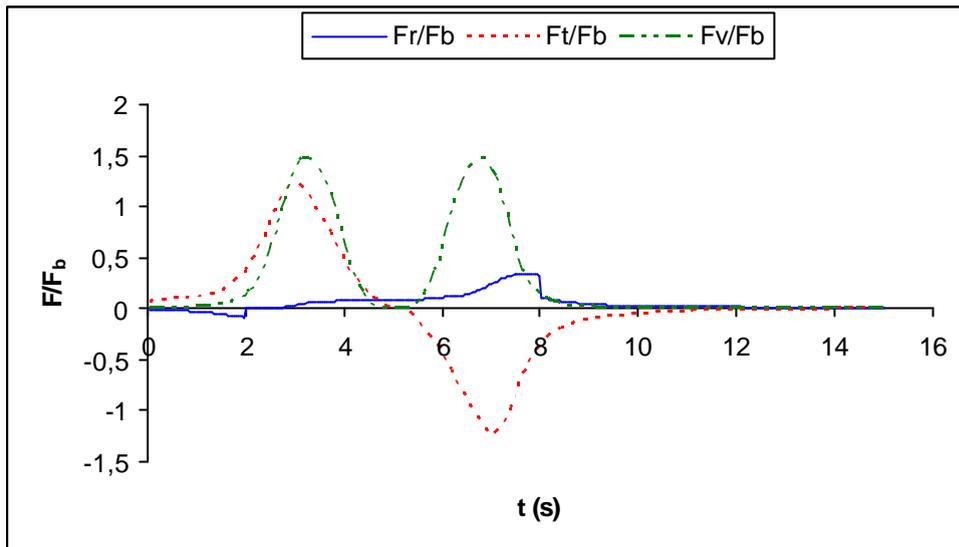


Figura 5.14 – Forças globais para o modelo simplificado

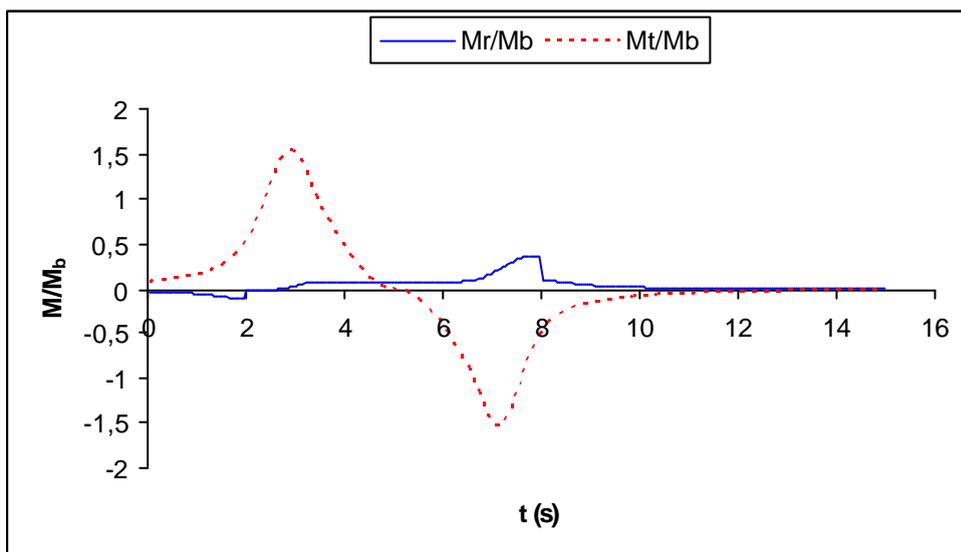


Figura 5.15 – Momentos globais para o modelo simplificado

As ações tangenciais e verticais são preponderantes. As primeiras ultrapassam as ações de norma em cerca de 25%. As ações verticais não são usualmente consideradas em projeto e promovem o arrancamento da torre de sua fundação. A excitação radial é influenciada substancialmente pela velocidade de translação, tendo sua resposta estática afastada do comportamento de duplo pulso.

Analisa-se a influência da consideração da parcela de inércia (eq. 3.8) no cálculo das ações globais do tornado no modelo em questão. Para isso, obtêm-se

os efeitos globais tomando-se apenas a parcela de arrasto. A comparação pode ser realizada a partir das Figuras 5.16 a 5.20.

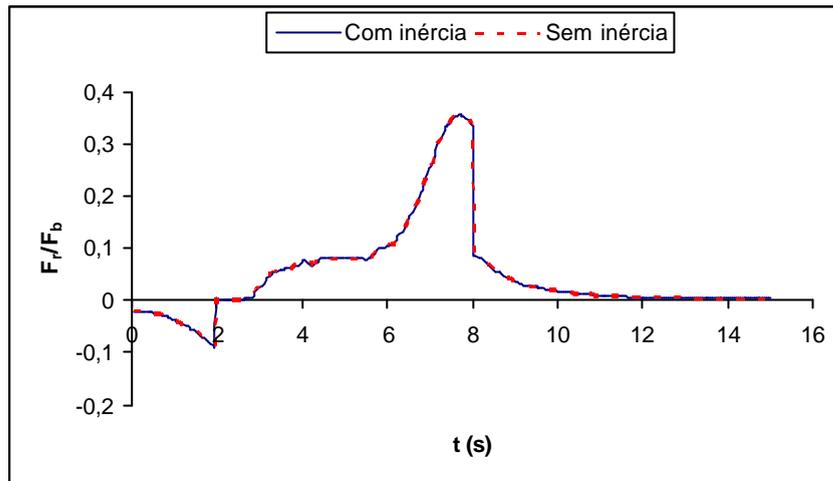


Figura 5.16 – Força cortante global na direção radial para o modelo simplificado

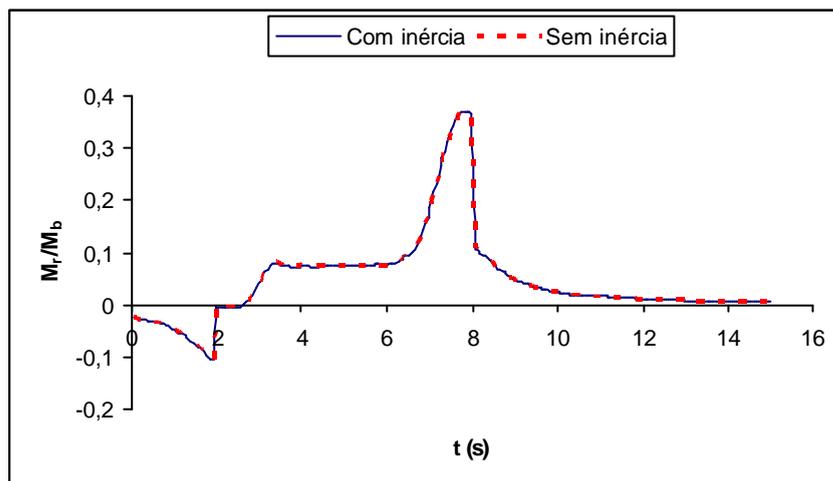


Figura 5.17 – Momento global na direção radial para o modelo simplificado

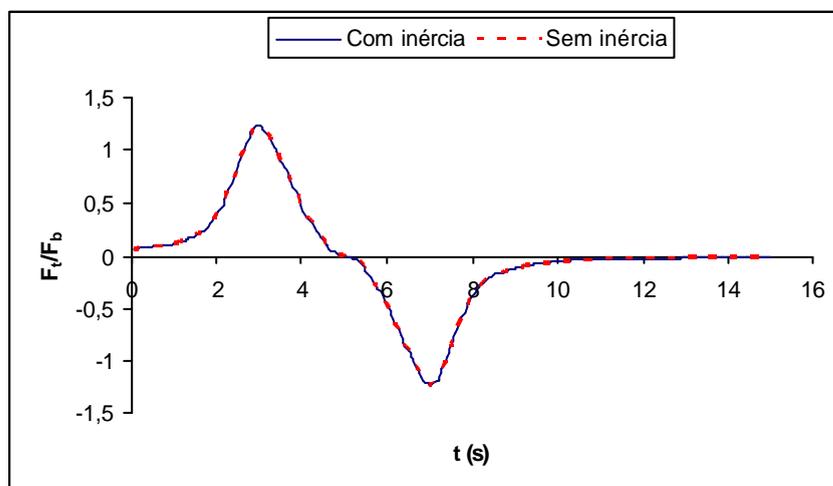


Figura 5.18 - Força cortante global na direção tangencial para o modelo simplificado

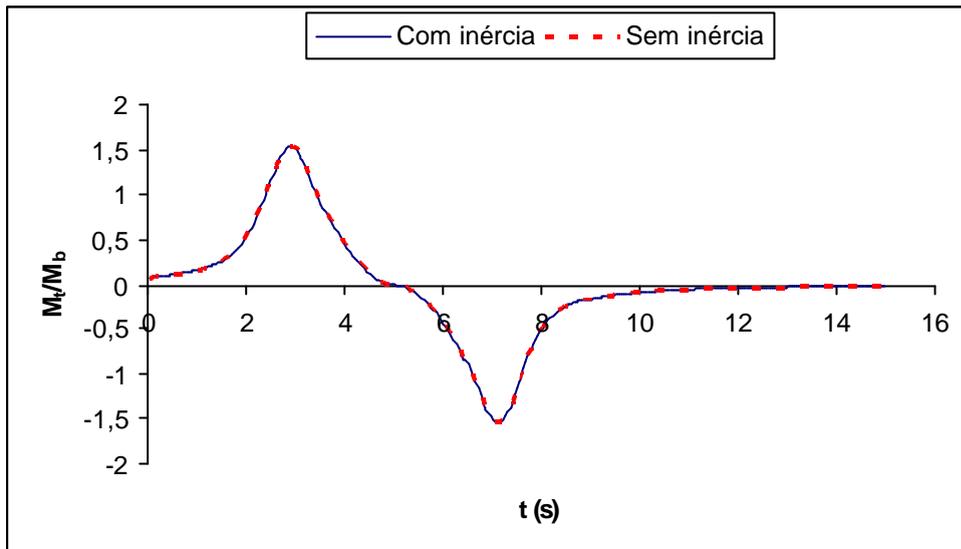


Figura 5.19 – Momento global na direção tangencial para o modelo simplificado

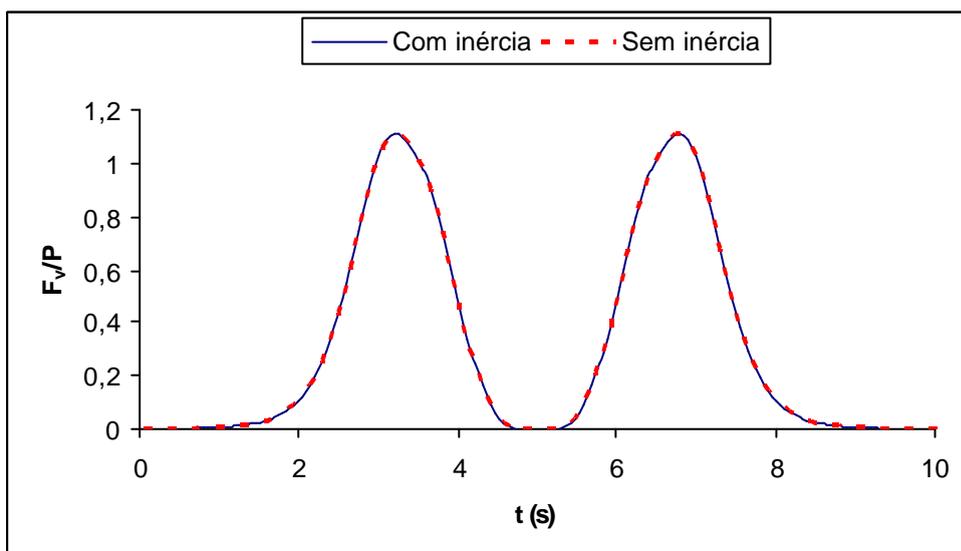


Figura 5.20 – Força global na direção vertical para o modelo simplificado

Como se nota, a parcela de inércia é desprezível no cômputo das ações globais. Esse comportamento difere do observado para modelos fechados (Wen, 1975; Pecin, 2006). Isso ocorre devido ao pequeno volume de uma estrutura reticulada em relação a sua área exposta, ao contrário do que ocorre para estruturas fechadas. Portanto, para as primeiras, espera-se que a força de inércia, como função do volume de fluido deslocado, seja menos relevante do que para as últimas. O cálculo dessa força é particularmente trabalhoso e sua desconsideração

permite a elaboração de metodologias de projeto mais aplicáveis, reproduzíveis e normalizáveis. Em relação às forças verticais, Figura 5.20, uma observação interessante é o fato de as mesmas superarem o peso próprio da estrutura.

5.2.2 Análise dinâmica

Obtém-se a resposta dinâmica do modelo estrutural, em termos de efeitos globais e deslocamentos de um nó do topo da torre. Despreza-se o amortecimento. As forças globais obtidas segundo as direções radial e tangencial podem ser visualizadas nas Figuras 5.21 e 5.22. O parâmetro ' r_{\max}/V ' representa aproximadamente a duração do pulso de aproximação ou afastamento do tornado em relação ao alvo estrutural.

O FA_{\max} é de aproximadamente 1,3 na direção radial e de 2,1 na direção tangencial. Há predominância da frequência fundamental na resposta para as duas direções, como se nota pelo comportamento apresentado pela estrutura durante a vibração livre. O máximo ocorre durante o pulso para as duas direções.

As respostas para os deslocamentos do topo, U , são mostradas nas Figuras 5.23 e 5.24. O comportamento é semelhante ao observado para os efeitos globais, corroborando os aspectos comentados anteriormente para as duas direções.

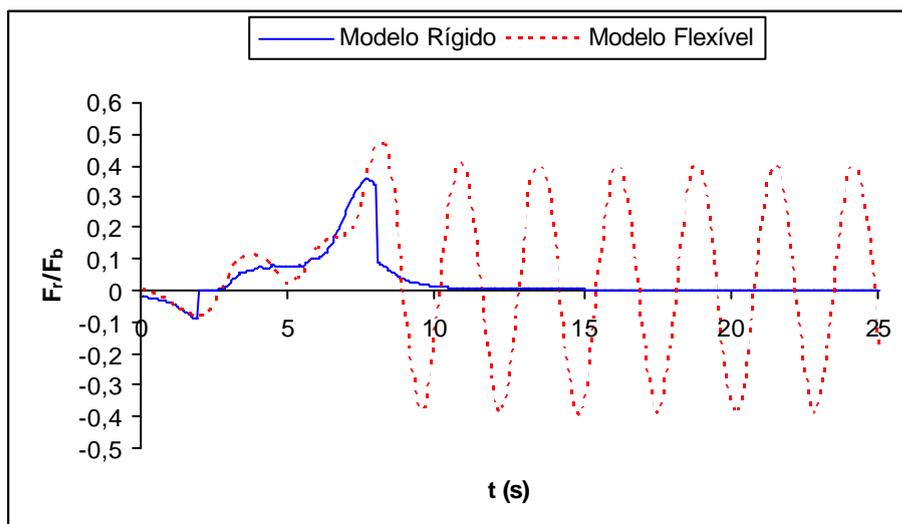


Figura 5.21 – Força cortante global na direção radial para o modelo simplificado,

$$f_0 \times r_{\max}/V = 1,13$$

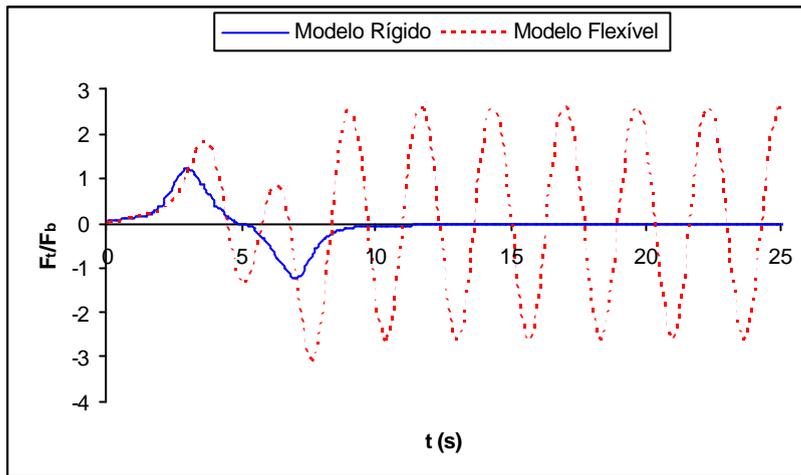


Figura 5.22 – Força cortante global na direção tangencial para o modelo simplificado,

$$f_0 \times r_{\max}/V = 1,13$$

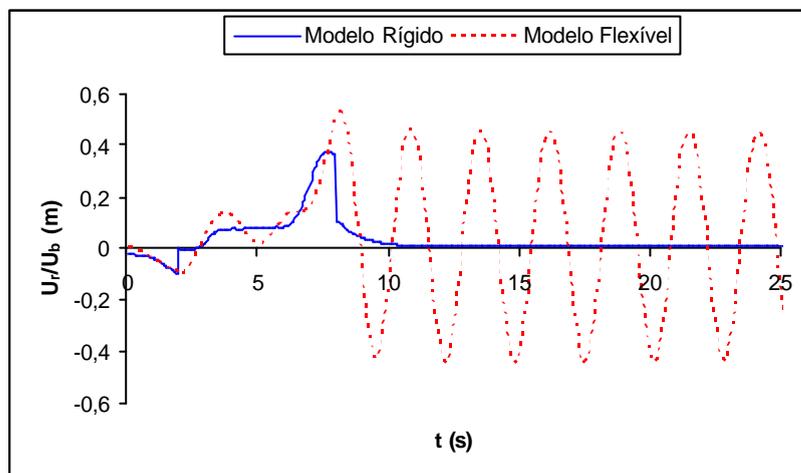


Figura 5.23 – Deslocamento do topo na direção radial para o modelo simplificado,

$$f_0 \times r_{\max}/V = 1,13$$

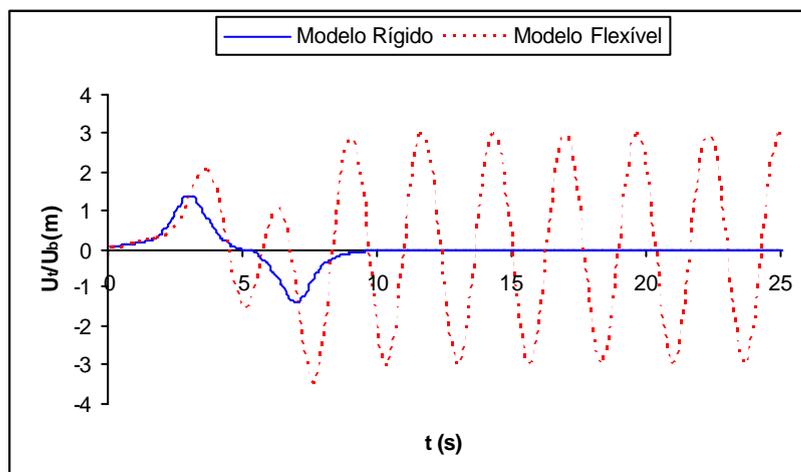


Figura 5.24 – Deslocamento do topo na direção tangencial para o modelo simplificado,

$$f_0 \times r_{\max}/V = 1,13$$

A Figura 5.25 mostra as forças globais na direção vertical. As respostas estática e dinâmica são praticamente coincidentes, devido à grande rigidez da estrutura nessa direção. Portanto, metodologias para projeto podem considerar as ações verticais atuando estaticamente.

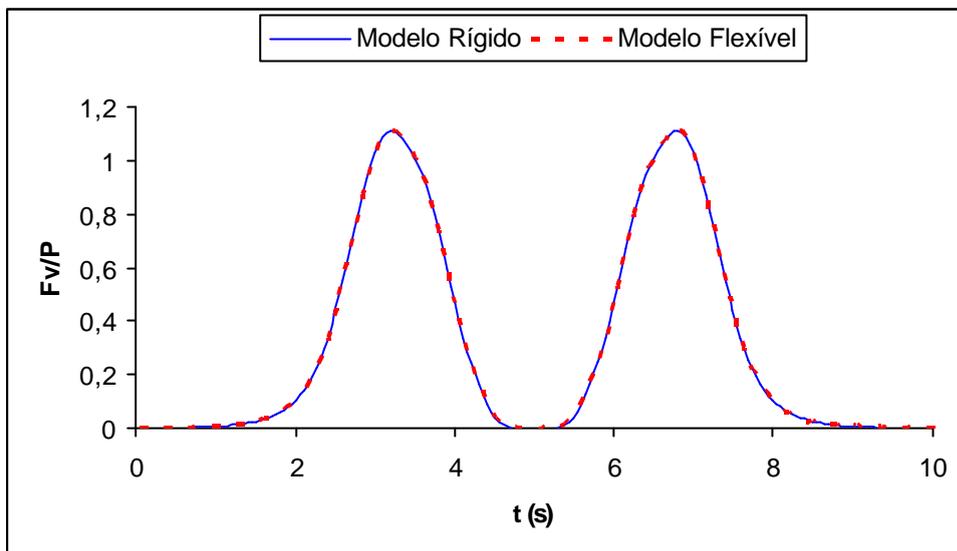


Figura 5.25 – Força global na direção vertical para o modelo simplificado

Na literatura, é freqüente a análise estrutural a tornados ser feita através de variações de parâmetros do mesmo ou da estrutura, como raio do núcleo, altura do modelo, velocidade de translação, etc. Propõe-se a utilização de espectros de resposta, que, ao considerar o período da excitação e a freqüência fundamental da estrutura, inclui os casos particulares anteriores, podendo constituir uma poderosa ferramenta de análise.

O espectro apresentado, Figura 5.26, é para o deslocamento cinemático do topo na direção tangencial, U . Varia-se a freqüência fundamental da estrutura através da variação de sua massa.

Há dois picos, com amplificações máximas de aproximadamente 2,25 e 2,5. A principal diferença observada em relação ao espectro clássico para pulso senoidal é a presença de um vale, onde o FA_{max} é próximo a 1,4. Tal comportamento é o mesmo observado por Pecin (2006) para estruturas aporticadas flexíveis e reflete características singulares da excitação tornádica.

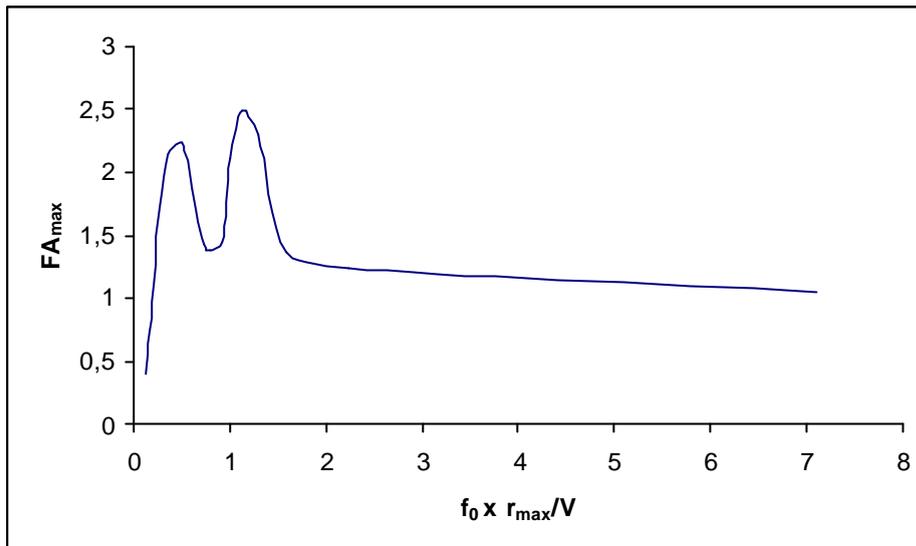


Figura 5.26 – Espectro de resposta do deslocamento do topo na direção tangencial para o modelo simplificado

5.3 Torre SA

Apresentam-se os resultados obtidos para a torre SA, mostrada em 4.2, quando submetida ao tornado F3 descrito em 4.1, que a incide conforme Figura 5.1. Assume-se a linha de transmissão localizada de modo perpendicular à direção de translação do tornado. Assim, a direção radial tornádica equivale à direção transversal do vento de projeto. O mesmo se aplica às direções tangencial e longitudinal. Essa é a convenção utilizada nesta seção e na seguinte.

Baseando-se nos estudos realizados em 5.1 e 5.2, adota-se a simplificação de eixo material e desconsidera-se o efeito da parcela de inércia. A apresentação dos resultados é feita do seguinte modo: primeiro toma-se a torre isoladamente. A seguir, avaliam-se os efeitos da participação dos outros elementos da linha. Os resultados são parametrizados em relação a valores de projeto da norma *IEC 60826/00 – Loading Strength of Overhead Transmission Lines*. Os coeficientes de arrasto obtidos a partir desta são aplicados também à solicitação tornádica.

5.3.1 Torre isolada

5.3.1.1 Análise estática

As respostas estáticas podem ser visualizadas através das Figuras 5.27 a 5.29. Os resultados vão ao encontro do exposto para o modelo simplificado (seção 5.2). As ações tornádicas preponderantes são as tangenciais e verticais. As mesmas são, ainda, anti-simétricas e simétricas, respectivamente. Isso se deve à natureza do modelo de Kuo/Wen e da desconsideração da parcela de inércia na equação de Morrison.

A relação entre as forças cortantes tangenciais causadas pelo tornado e aquelas advindas do vento de projeto atinge o pico de 1,25. Para os momentos, tal relação vai a mais de 1,5. As forças globais verticais superam o peso próprio em 75% para a torre em estudo. Essa solicitação, não prevista em projeto para ventos usuais, resulta no aumento das forças de tração nas pernas da torre e em suas fundações. As ações radiais tornádicas, como esperado, mostram-se pouco relevantes quando comparadas às ações do vento de projeto.

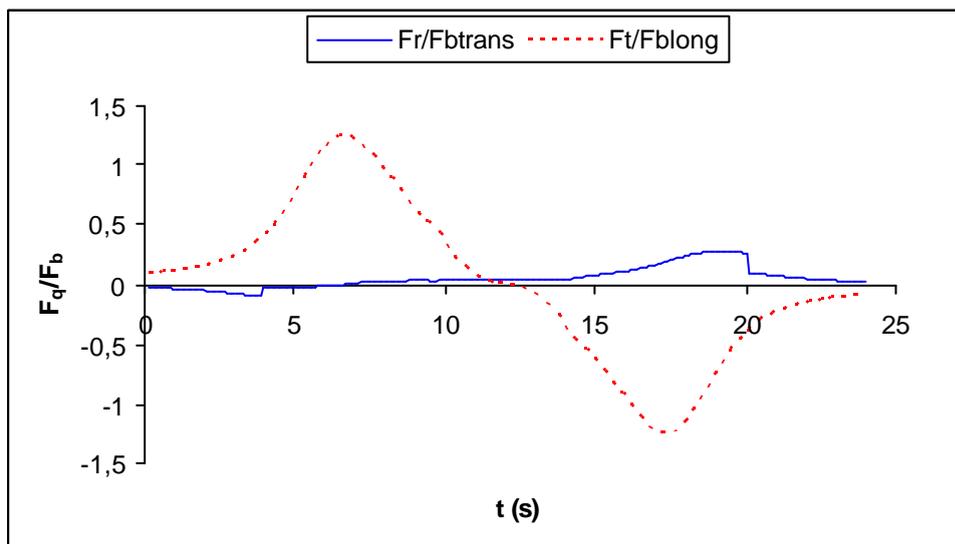


Figura 5.27 – Forças cortantes globais para a torre SA

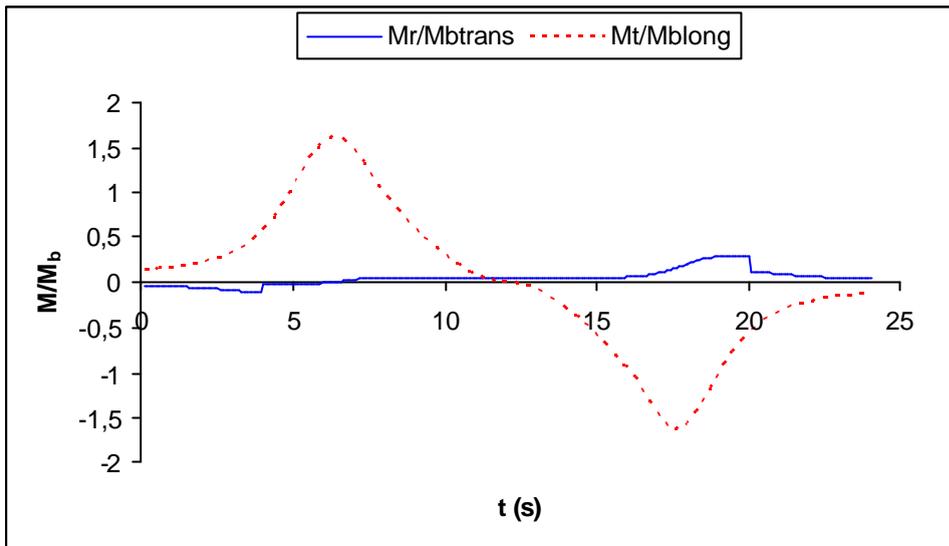


Figura 5.28 – Momentos globais para a torre SA

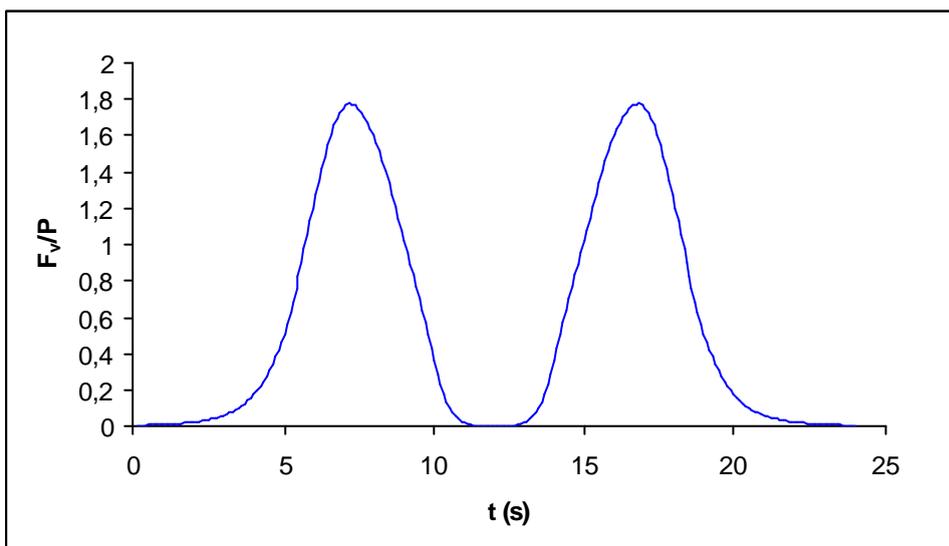


Figura 5.29 – Força global na direção vertical para a torre SA

5.3.1.2 Análise dinâmica

As respostas dinâmicas não-amortecidas da torre em questão são tratadas neste item. Nas Figuras 5.30 e 5.31, podem ser visualizadas as forças cortantes globais obtidas para o modelo nas direções radial e tangencial. Opta-se pela não realização da análise dinâmica na direção vertical, dada a pequena flexibilidade da estrutura nessa direção. Como já mencionado, ' r_{\max}/V ' representa

aproximadamente a duração do pulso de aproximação ou afastamento do tornado em relação ao alvo estrutural.

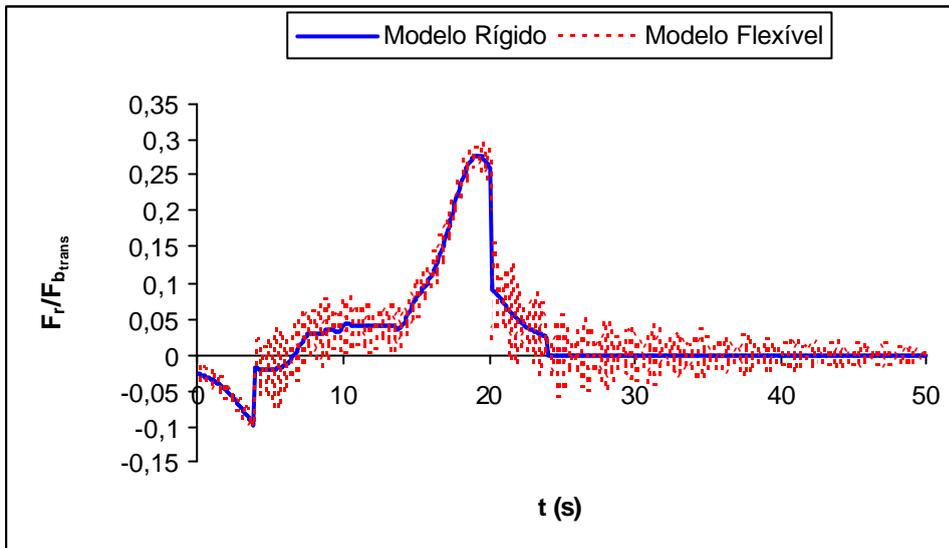


Figura 5.30 – Força cortante global na direção radial para a torre SA, $f_0 \times r_{\max}/V = 19,82$

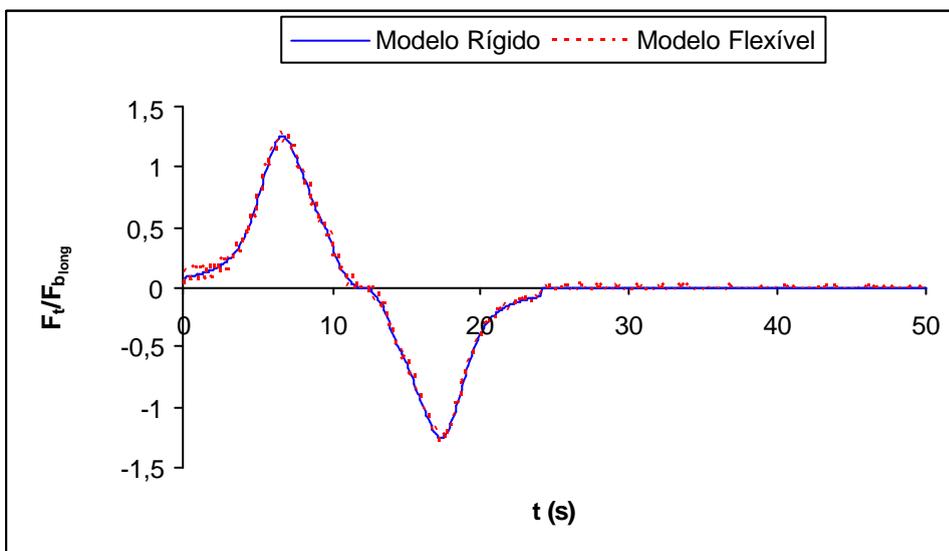


Figura 5.31 - Força cortante global na direção tangencial para a torre SA,

$$f_0 \times r_{\max}/V = 19,82$$

Nota-se que a estrutura não apresenta amplificações dinâmicas consideráveis para o tornado em questão. As respostas dinâmicas, em ambas as direções, assemelham-se às estáticas, com fatores de amplificação próximos à unidade. Os máximos ocorrem durante o pulso nas duas direções. Para a direção

radial, tem-se uma vibração livre mais pronunciada. Observa-se também que a consideração da velocidade de translação altera o perfil da solicitação nessa direção, fazendo com que o mesmo se diferencie de um duplo pulso anti-simétrico, como observado para a direção tangencial. O comportamento estrutural em vibração livre indica a predominância da frequência fundamental para as duas direções. Os deslocamentos do topo são mostrados nas Figuras 5.32 e 5.33, corroborando as observações feitas para as forças globais.

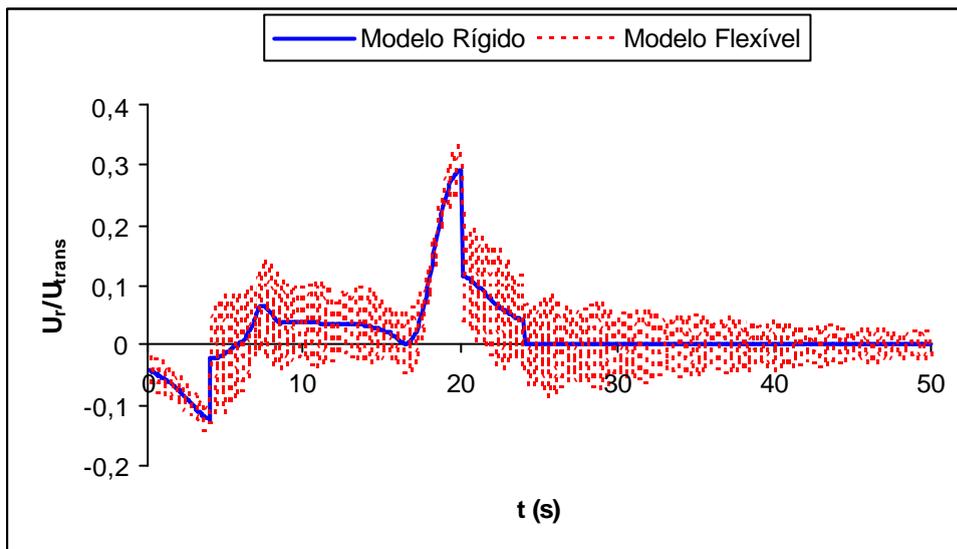


Figura 5.32 - Deslocamento do topo na direção radial para a torre SA, $f_0 \times r_{\max}/V = 19,82$

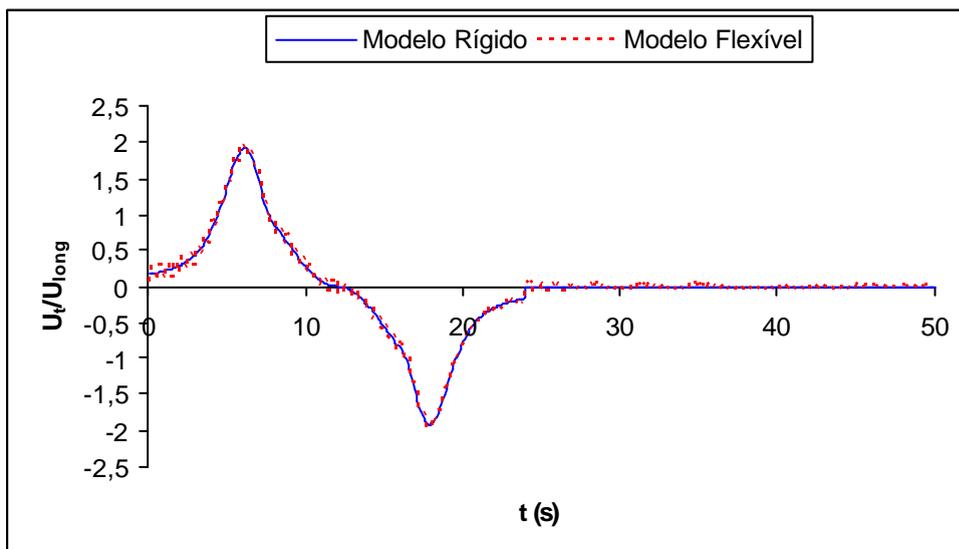


Figura 5.33 - Deslocamento do topo na direção tangencial para a torre SA,

$$f_0 \times r_{\max}/V = 19,82$$

A Figura 5.34 mostra como varia o esforço normal nas pernas da torre SA quando da passagem do tornado, comparando-o com o máximo esforço normal resultante da incidência do vento de projeto. Desconsideram-se cargas permanentes. Para a tração, a relação atinge o pico de cerca de 2,3, ficando em 1,6 para a compressão. Tais resultados apresentam-se conforme esperado, pois a força vertical tornádica atua de modo a tracionar as pernas da torre, fazendo com que os esforços de tração nas pernas sejam mais críticos que os de compressão. Nota-se também que a resposta dinâmica assemelha-se à estática, fato já esperado, dadas as observações anteriores.

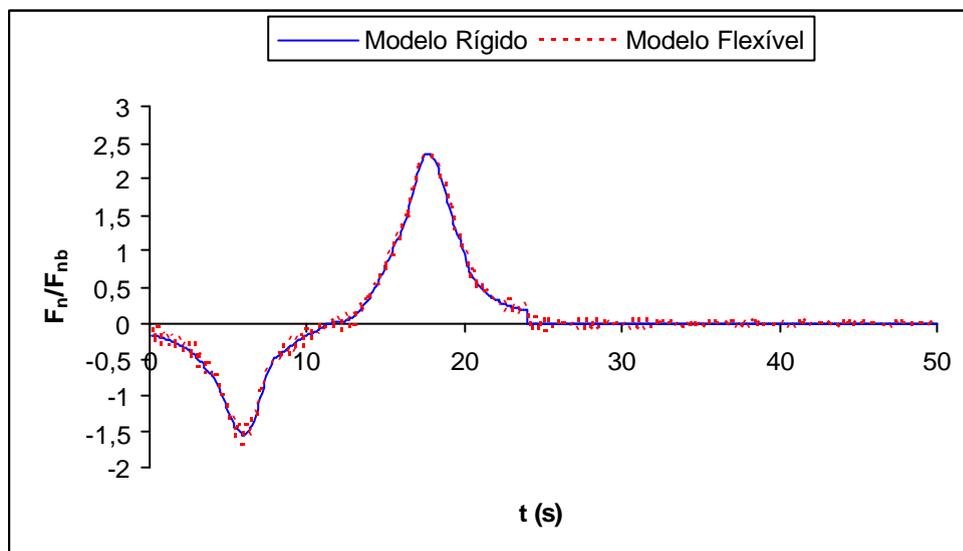


Figura 5.34 – Esforço normal nas pernas da torre SA, $f_o \times r_{\max}/V = 19,82$

5.3.2 Torre na linha de transmissão

Considera-se a influência dos cabos condutores e pára-raios da linha de transmissão na resposta mecânica da torre SA submetida ao tornado em questão.

5.3.2.1 Análise estática

As forças cortantes e momentos globais para as direções radial e tangencial, Figuras 5.35 e 5.36, apresentam comportamento semelhante ao observado para o

caso da torre tomada isoladamente. Isso ocorre porque as ações tangenciais nos cabos condutores, por serem anti-simétricas, não acrescentam forças nos suportes. Na direção transversal à linha, há acréscimo de solicitação por conta da incidência das velocidades radial e translacional. Considera-se esta última atuante apenas na região do núcleo tornádico. Como o vento transversal de projeto apresenta intensidade consideravelmente maior (pressão nos condutores e pára-raios) do que o vento longitudinal, a solicitação radial torna-se ainda menos relevante frente à tangencial.

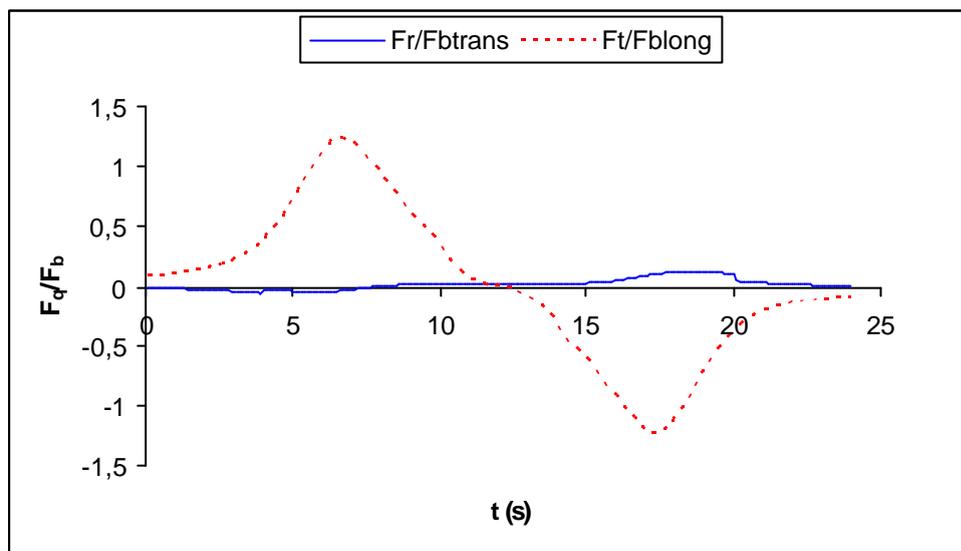


Figura 5.35 - Forças cortantes globais para a torre SA na linha de transmissão

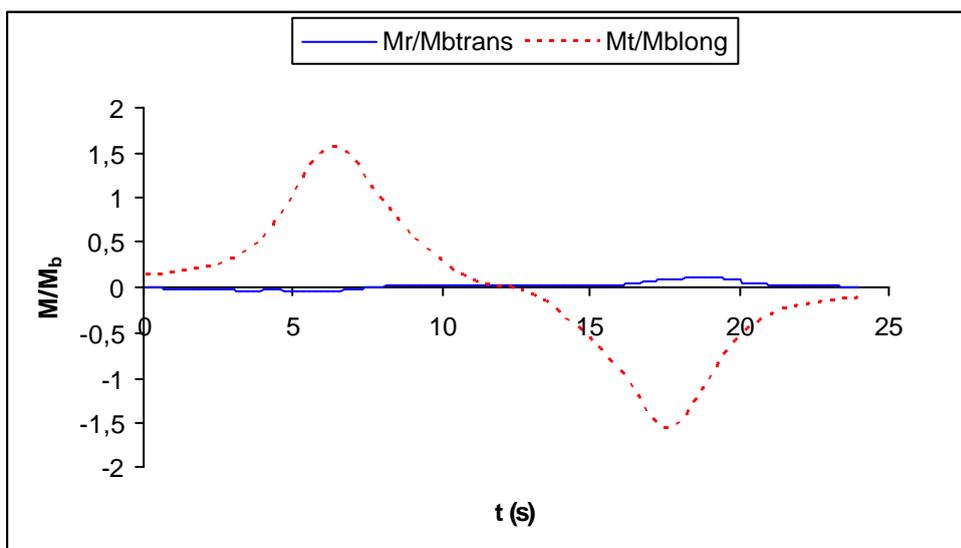


Figura 5.36 - Momentos globais para a torre SA na linha de transmissão

A Figura 5.37 mostra como varia a força vertical tornádica em relação ao peso total do conjunto, que considera os outros elementos da linha; tal peso é cerca de 2,5 vezes superior ao peso próprio da torre. A mesma diferencia-se da Figura 5.29 (força vertical tomando a torre isoladamente) sobretudo pela presença de um patamar entre os dois picos. Tal comportamento é consequência da ação vertical do tornado sobre os cabos condutores e pára-raios, que é máxima quando essa mesma ação anula-se na torre. O valor de pico (em torno de 0,8) é menor do que o observado na análise da torre tomada isoladamente, naturalmente por conta do aumento do peso total do conjunto ao se considerarem os demais elementos constituintes da linha de transmissão de energia.

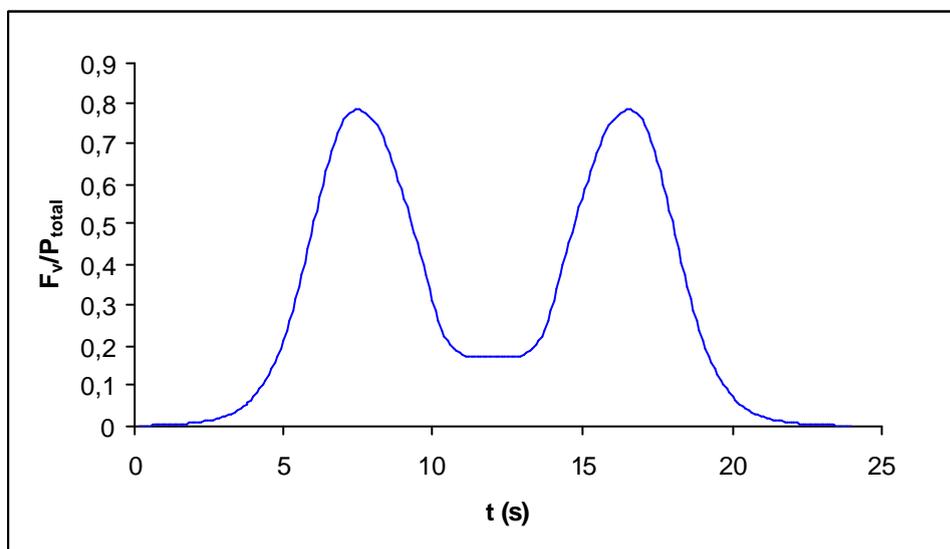


Figura 5.37 - Força global na direção vertical para a torre SA na linha de transmissão

5.3.2.2 Análise dinâmica

A análise dinâmica é realizada considerando o acréscimo de massa do sistema estrutural por conta dos cabos condutores, pára-raios, isoladores e demais elementos da linha. Tem-se assim, portanto, uma diminuição da frequência natural do modelo. Os resultados obtidos para as forças cortantes globais nas direções radial e tangencial são mostrados nas Figuras 5.38 e 5.39.

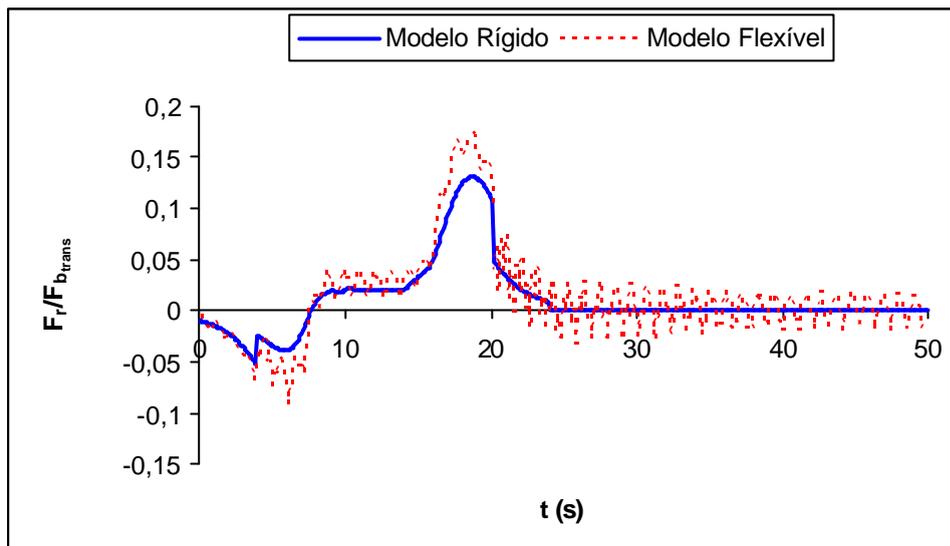


Figura 5.38 - Força cortante global na direção radial para a torre SA na linha de transmissão, $f_0 \times r_{\max}/V = 6,63$

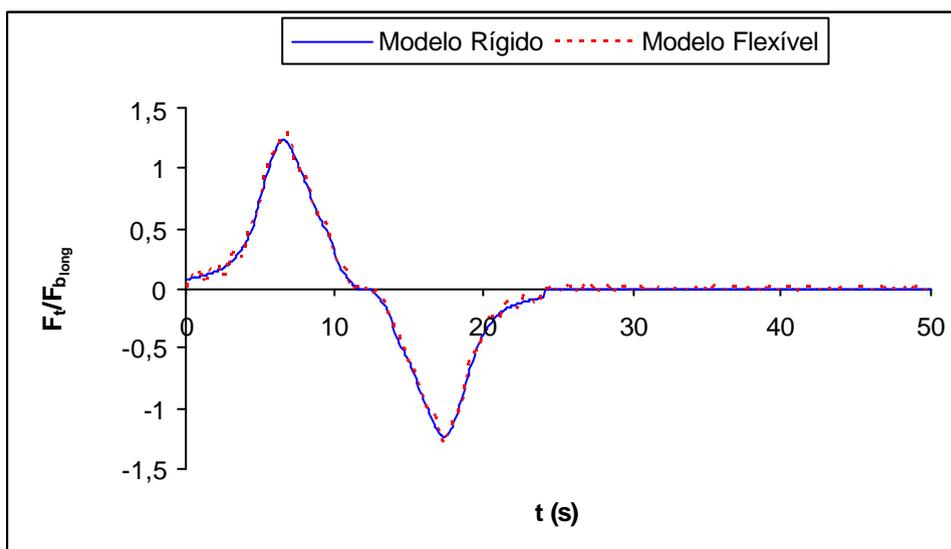


Figura 5.39 - Força cortante global na direção tangencial para a torre SA na linha de transmissão, $f_0 \times r_{\max}/V = 6,63$

A despeito da alteração da frequência natural do sistema, nota-se que não há amplificações dinâmicas consideráveis para a direção tangencial, a exemplo do que foi observado para a análise da torre isolada. Para a direção radial, tal fator é de aproximadamente 1,35. A diferença mais pronunciada entre as situações de consideração ou não dos outros elementos da linha é no valor de pico da resposta na direção radial (Figura 5.38). Isso se deve ao fato de, no caso em estudo, essa

direção corresponder ao vento transversal de projeto, que tem seu valor sensivelmente aumentado quando se assume a existência da linha, em decorrência da contribuição do vento incidente nos cabos condutores e pára-raios. A alteração da frequência natural do sistema pode ser observada pelo comportamento da resposta em vibração livre (Figuras 5.38 e 5.39). Os deslocamentos do topo da torre confirmam essas observações (Figuras 5.40 e 5.41), com a ressalva de os fatores de amplificação serem próximos à unidade para as duas direções.

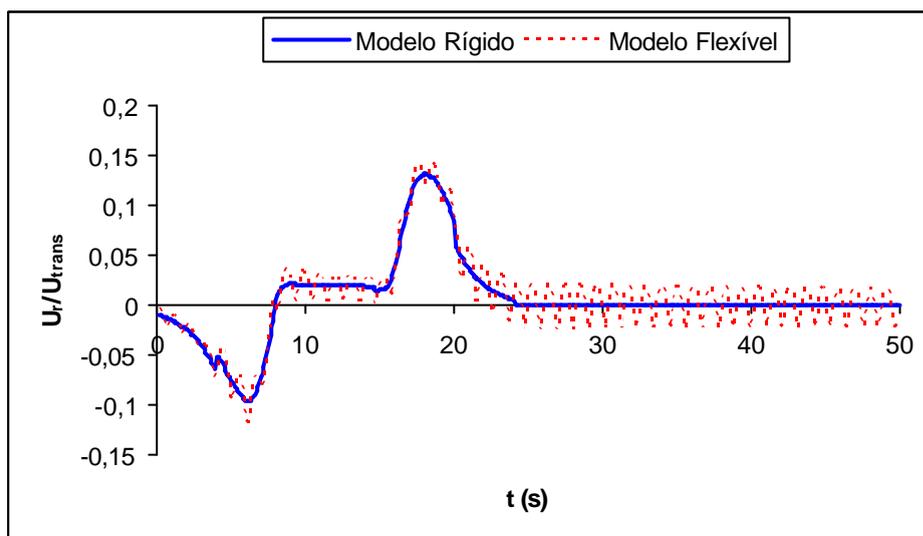


Figura 5.40 - Deslocamento do topo na direção radial para a torre SA na linha de transmissão, $f_0 \times r_{\max}/V = 6,63$

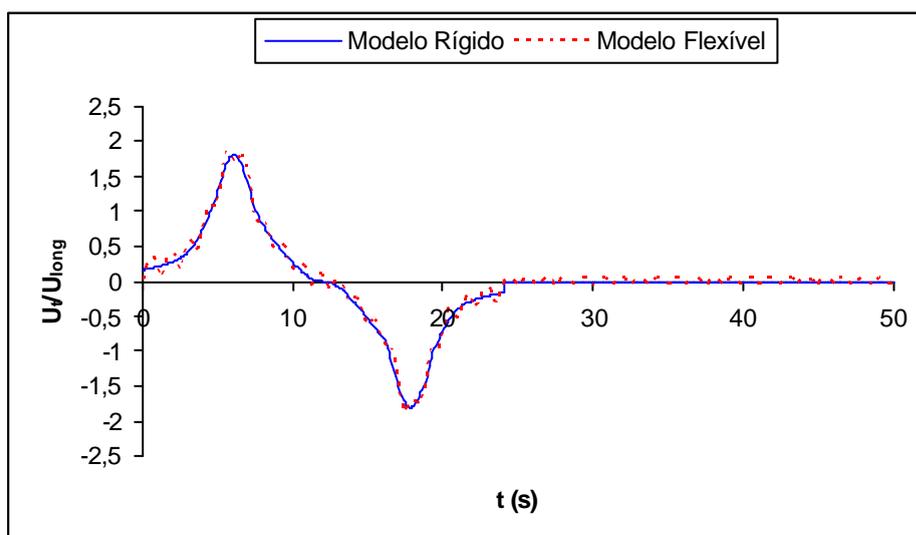


Figura 5.41 - Deslocamento do topo na direção tangencial para a torre SA na linha de transmissão, $f_0 \times r_{\max}/V = 6,63$

O esforço normal nas pernas da torre pode ser analisado através da Figura 5.42. Como se vê, para esse caso, a passagem do tornado não causa esforços de tração e compressão que superem os esforços de projeto, ao contrário do observado para a torre isolada. A relação fica em torno de 0,5 para a compressão e de 0,7 para a tração. O vento de projeto incidente nos cabos condutores e pára-raios provoca acréscimo nos esforços de tração nessas pernas. O vento tornádico, por apresentar anti-simetria na direção tangencial, não causa solicitações horizontais adicionais relevantes nos suportes quando interage com os outros elementos da linha.

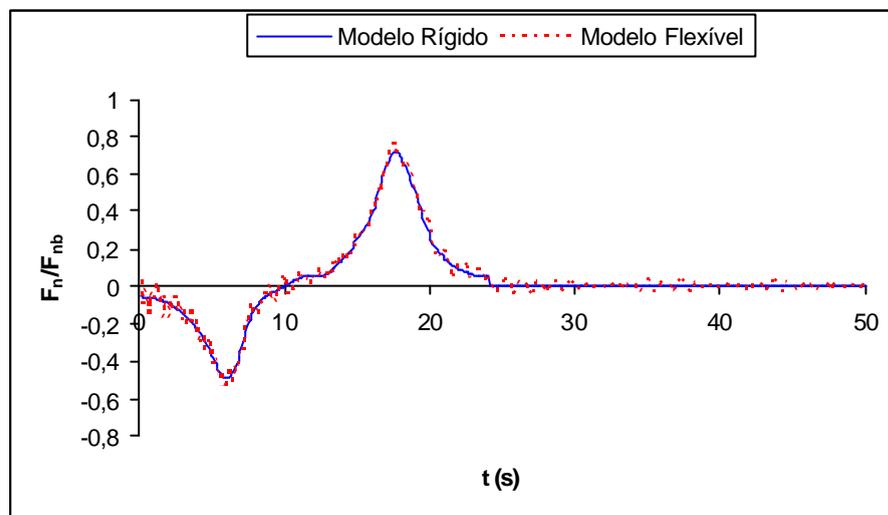


Figura 5.42 - Esforço normal nas pernas da torre SA na linha de transmissão,

$$f_0 \times r_{\max}/V = 6,63$$

5.4 Torre SE

Os resultados obtidos para a torre SE, descrita em 4.2, são mostrados na seqüência, considerando o mesmo tornado incidente e as demais condições adotadas para a torre anterior.

5.4.1 Torre isolada

5.4.1.1 Análise estática

As respostas estáticas da torre SE podem ser visualizadas através das Figuras 5.43 a 5.45.

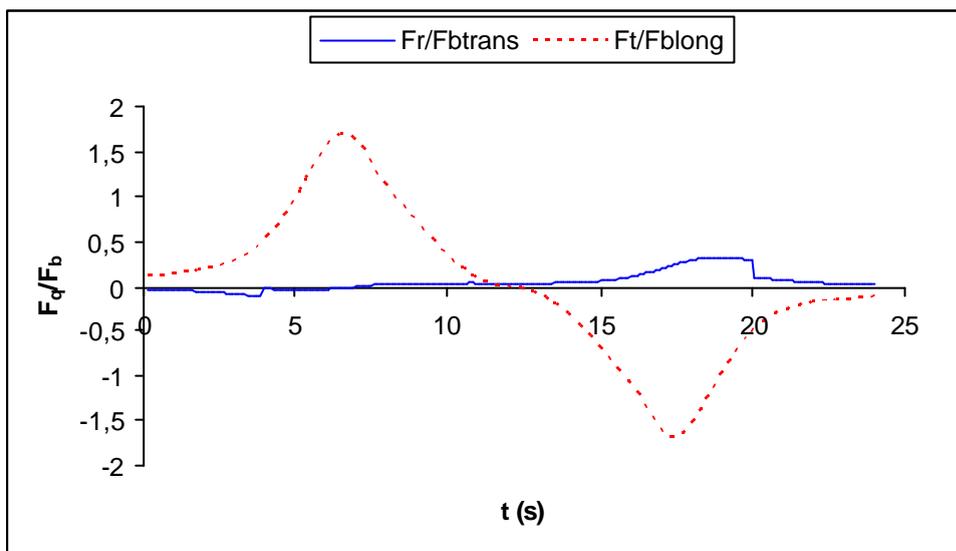


Figura 5.43 - Forças cortantes globais para a torre SE

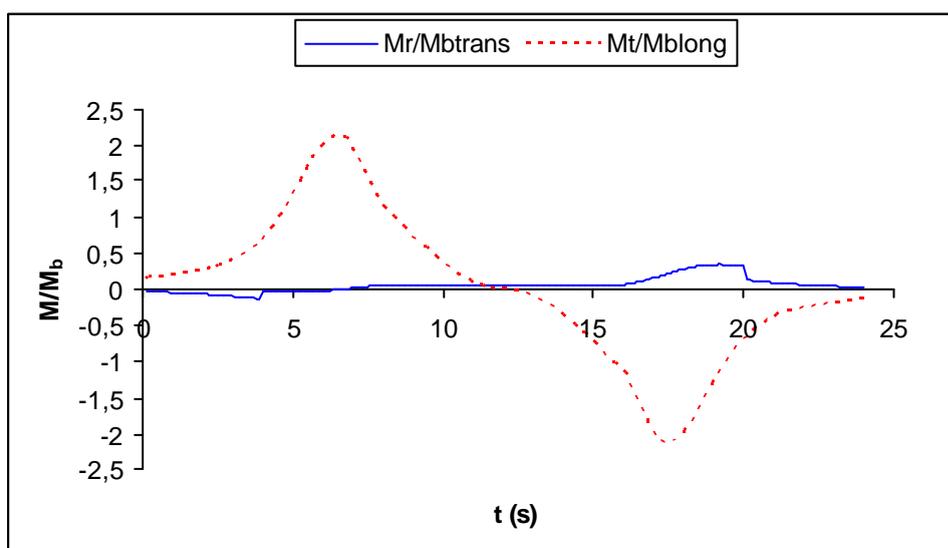


Figura 5.44 – Momentos globais para a torre SE

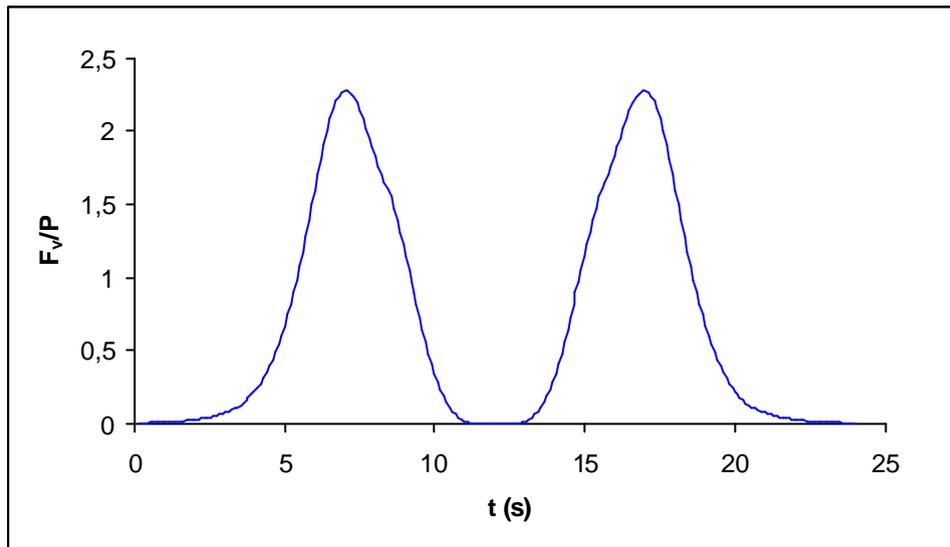


Figura 5.45 - Força global na direção vertical para a torre SE

Os resultados são semelhantes aos observados para a torre autoportante. A relação entre a força tangencial do tornado e a do vento de projeto atinge o pico de 1,68. Para os momentos, a mesma é maior que 2. A força vertical total advinda da incidência tornádica é 2,3 vezes superior ao peso próprio da estrutura. As solicitações radiais são pouco relevantes quando comparadas às ações previstas em projeto.

5.4.1.2 Análise dinâmica

As respostas dinâmicas não-amortecidas para a torre estaiada nas direções radial e tangencial são mostradas nas Figuras 5.46 e 5.47. O FA_{max} para a direção radial é de 1,47. Na direção tangencial, mais relevante em termos de efeitos estruturais, a resposta dinâmica é praticamente coincidente à estática. Os demais aspectos são semelhantes aos já expostos para a torre autoportante. As Figuras 5.48 e 5.49 mostram os deslocamentos do topo da torre devidos ao tornado.

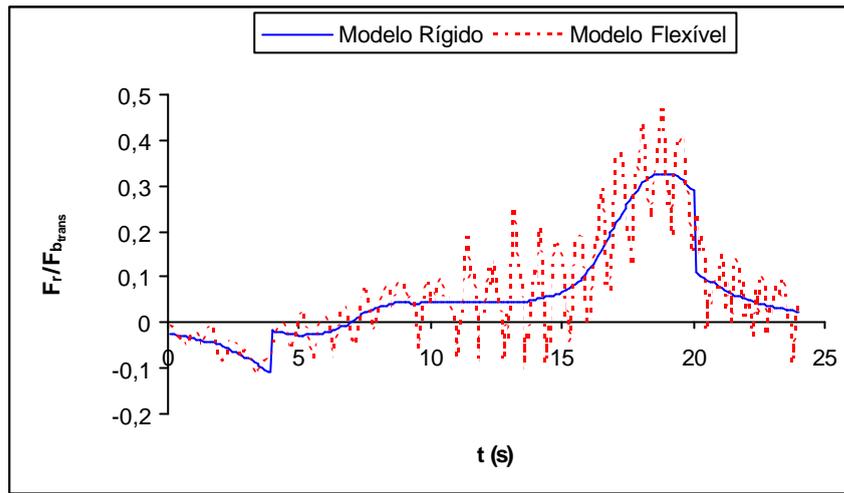


Figura 5.46 - Força cortante global na direção radial para a torre SE, $f_0 \times r_{max}/V = 10,04$

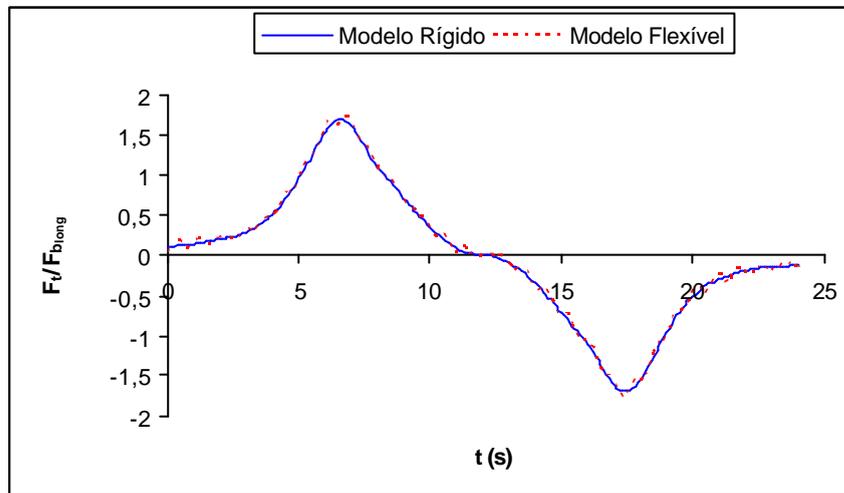


Figura 5.47 - Força cortante global na direção tangencial para a torre SE,
 $f_0 \times r_{max}/V = 10,04$

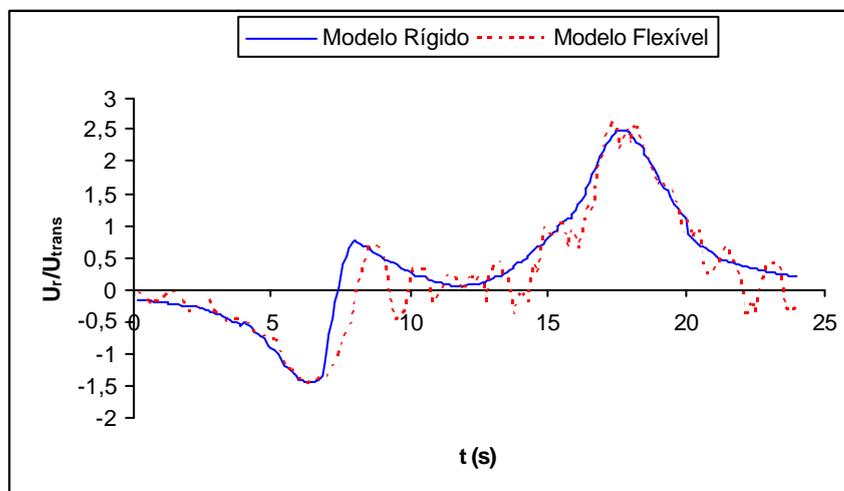


Figura 5.48 - Deslocamento do topo na direção radial para a torre SE, $f_0 \times r_{max}/V = 10,04$

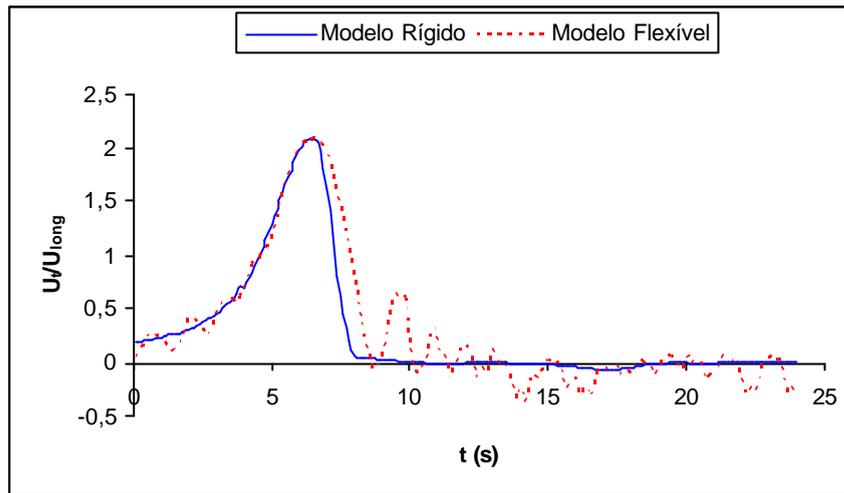


Figura 5.49 - Deslocamento do topo na direção tangencial para a torre SE,

$$f_0 \times r_{\max}/V = 10,04$$

A presença dos estais provoca significativas alterações nos perfis de deslocamento do topo para as duas direções. Para a direção radial (Figura 5.48), a relação chega a 2,5, apesar de ser igual a 0,3 para a força global. Isso se deve à alteração da rigidez da estrutura por conta dos estais. Na direção tangencial (Figura 5.49), tal alteração leva a uma resposta de pulso único. A amplificação dinâmica é desprezível para ambos os casos.

A Figura 5.50 mostra como varia o esforço normal em um dos mastros da torre SE e o compara aos esforços de projeto. De modo semelhante ao notado para as pernas da torre autoportante, as barras são submetidas a esforços de compressão e tração durante a passagem do tornado. No caso em questão, tem-se que os esforços de tração tornádicos superam levemente a previsão de projeto. A compressão do mastro pelo vento de projeto é superior à causada pelo tornado. A presença dos estais evita que os mesmos sejam sobrecarregados. A amplificação dinâmica é de aproximadamente 1,3 para a tração e 1,1 para a compressão.

O esforço de tração nos estais pode ser visualizado na Figura 5.51. O mesmo supera o esforço de projeto em mais de duas vezes. O estai especificamente tratado aqui, como se nota, só é mobilizado durante o afastamento do tornado. Naturalmente, outros estais são mobilizados durante a aproximação do mesmo. A amplificação dinâmica é desprezível.

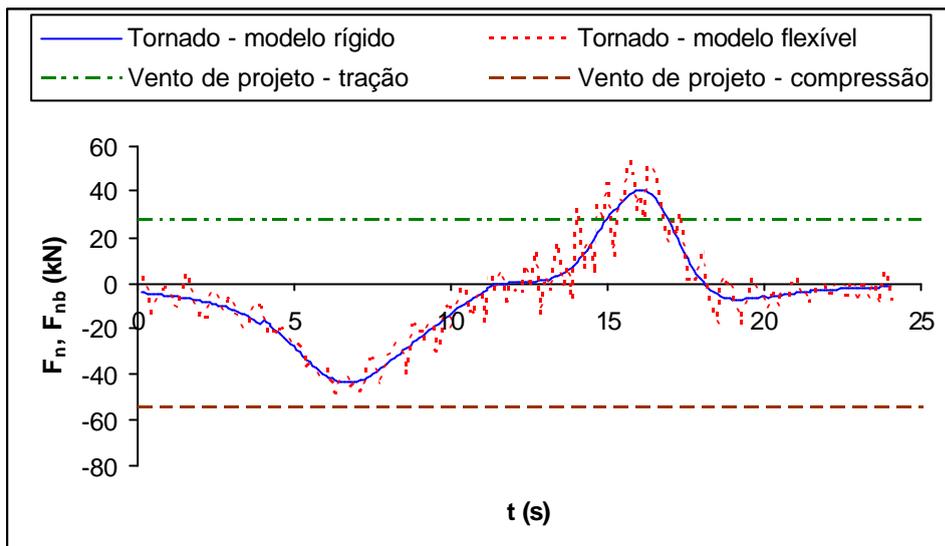


Figura 5.50 - Esforço normal nos mastros da torre SE, $f_o \times r_{max}/V = 10,04$

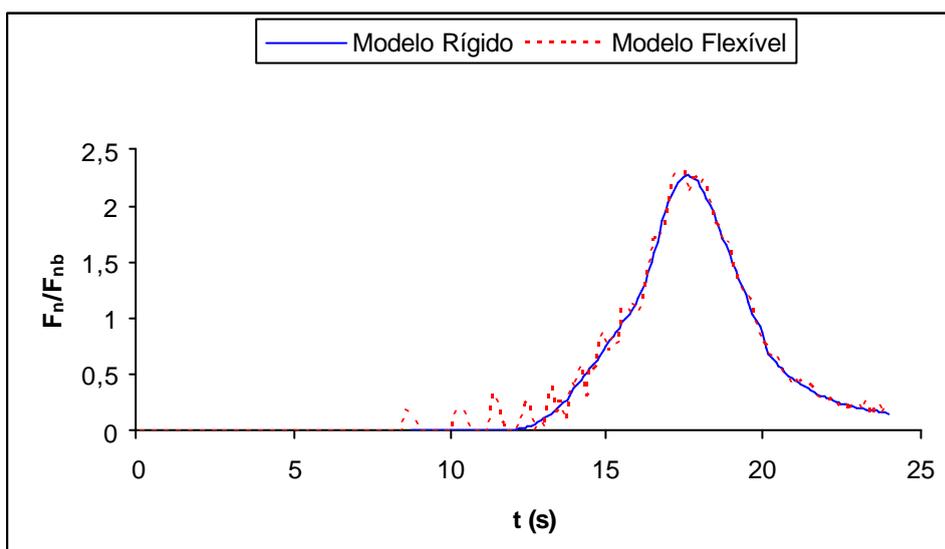


Figura 5.51 – Esforço normal de tração nos estais da torre SE, $f_o \times r_{max}/V = 10,04$

5.4.2 Torre na linha de transmissão

Considera-se a influência dos cabos condutores e pára-raios da linha de transmissão na resposta mecânica da torre SE submetida ao tornado em questão.

5.4.2.1 Análise estática

Os efeitos globais são mostrados nas Figuras 5.52 a 5.54. Os valores de pico superam os obtidos para a torre autoportante. A força tangencial máxima é 1,6 vez superior ao previsto em projeto. Para o momento nessa mesma direção, tal relação é de 2. Esses valores são próximos aos observados para o caso da torre isolada. A força vertical não é superior ao peso total da estrutura (que inclui os outros elementos da linha e é cerca de 3,5 vezes superior ao peso da torre). A razão entre ambas atinge o máximo de 0,74. Outros aspectos são semelhantes ao descrito em 5.4.2.1 para a torre autoportante.

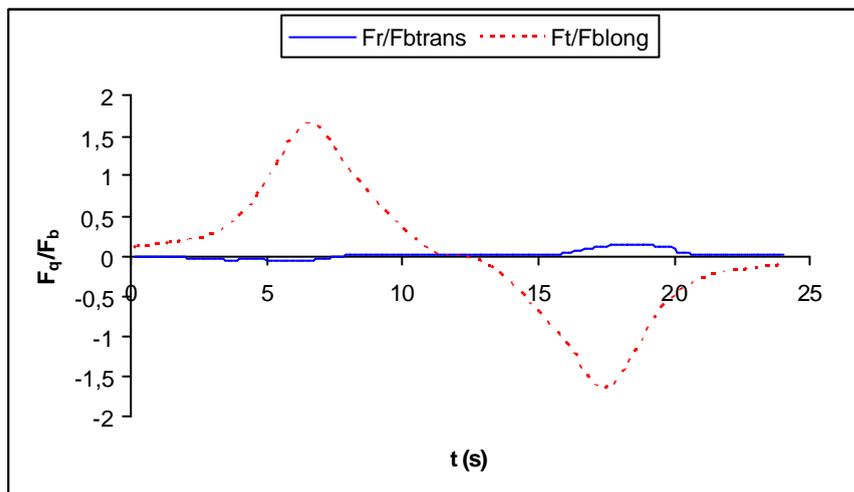


Figura 5.52 - Forças cortantes globais para a torre SE na linha de transmissão

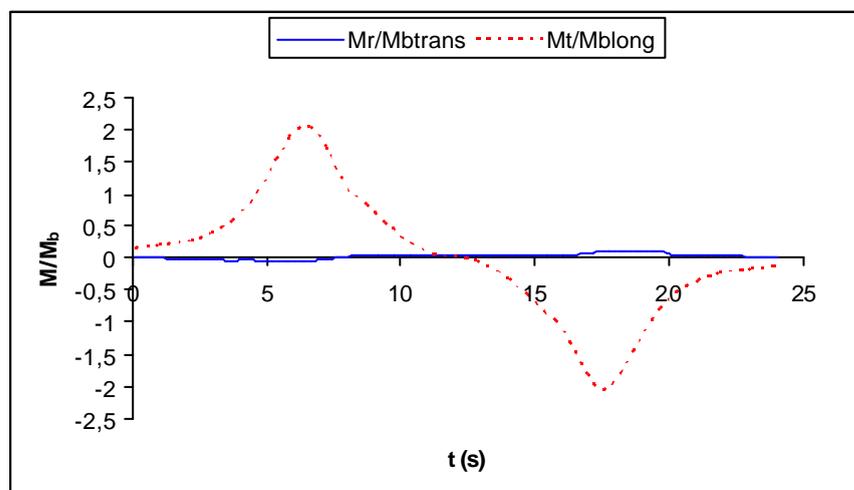


Figura 5.53 - Momentos globais para a torre SE na linha de transmissão

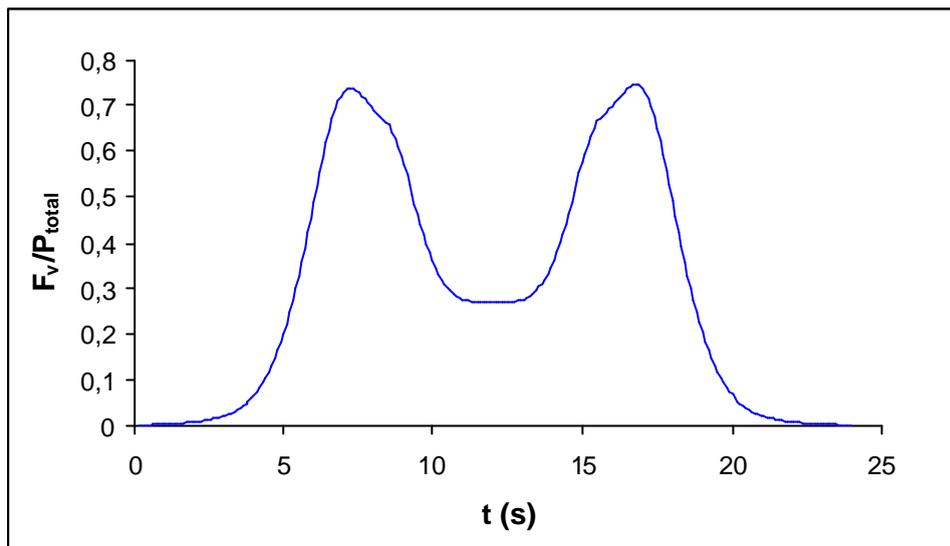


Figura 5.54 - Força global na direção vertical para a torre SE na linha de transmissão

5.4.2.2 Análise dinâmica

O acréscimo da massa correspondente aos demais elementos da linha diminui, naturalmente, a frequência natural do sistema estrutural, modificando o seu comportamento dinâmico. As forças cortantes globais nas direções radial e tangencial podem ser visualizadas nas Figuras 5.55 e 5.56.

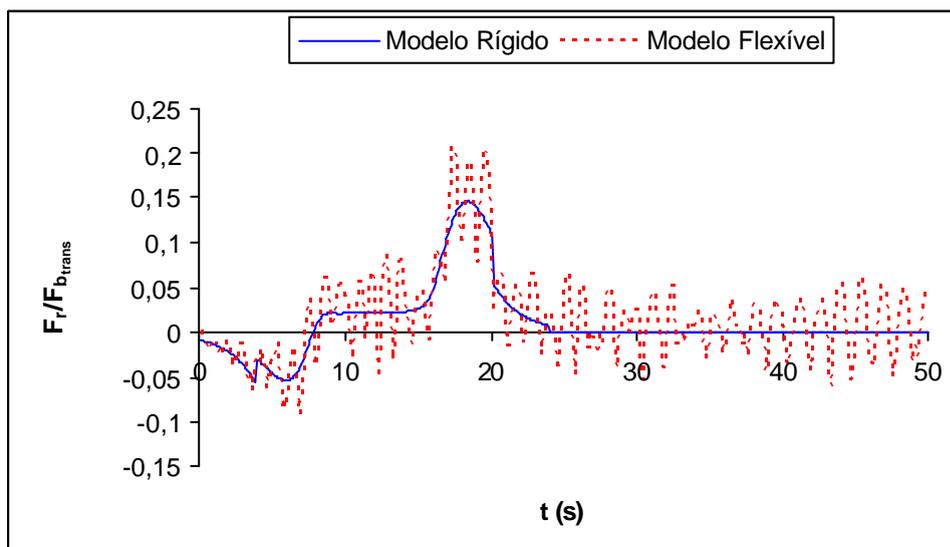


Figura 5.55 - Força cortante global na direção radial para a torre SE na linha de transmissão, $f_0 \times r_{\max}/V = 5,74$

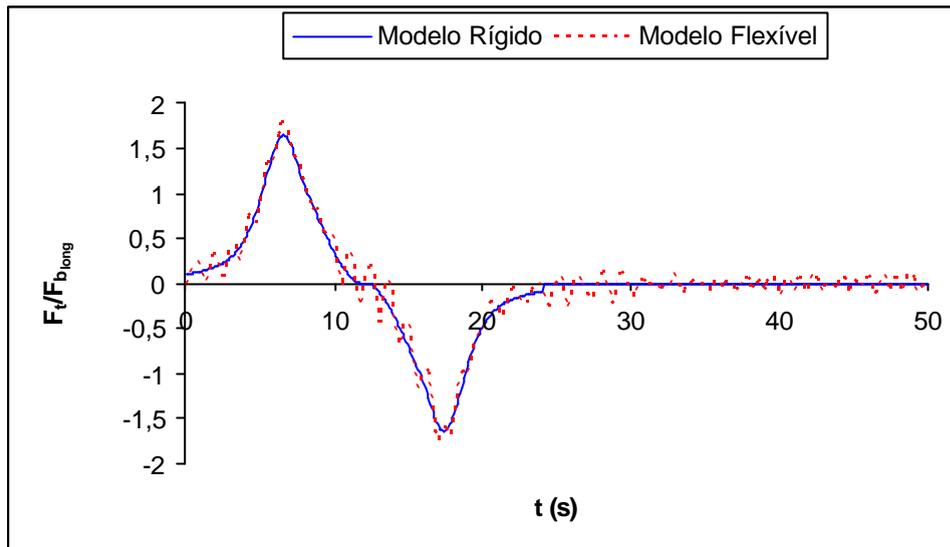


Figura 5.56 - Força cortante global na direção tangencial para a torre SE na linha de transmissão, $f_o \times r_{max}/V = 5,74$

O pico da resposta na direção radial é consideravelmente menor que o observado para a torre tomada isoladamente. Isso ocorre porque, no caso em questão, tal direção corresponde ao vento transversal de projeto, incidente nos cabos condutores e pára-raios. O fator de amplificação máximo é de 1,4 para a direção radial e próximo à unidade para a direção tangencial.

Os deslocamentos do topo são mostrados nas Figuras 5.57 e 5.58. Os perfis são semelhantes aos observados para o caso da torre isolada (Figuras 5.48 e 5.49), exceto pelo valor de pico na direção radial, pelos mesmos motivos descritos para as forças globais.

O esforço normal em um dos mastros da torre SE é mostrado na Figura 5.59. Há um aumento considerável da força de compressão de projeto por conta da atuação do vento nos cabos. Não há amplificações dinâmicas consideráveis.

Na Figura 5.60, mostra-se o comportamento do esforço de tração nos estais. Há um ligeiro acréscimo em relação ao caso em que se toma a torre isoladamente, devido à força vertical tornádica nos cabos condutores e pára-raios. Tal acréscimo não é suficiente para superar o esforço de tração do vento de projeto.

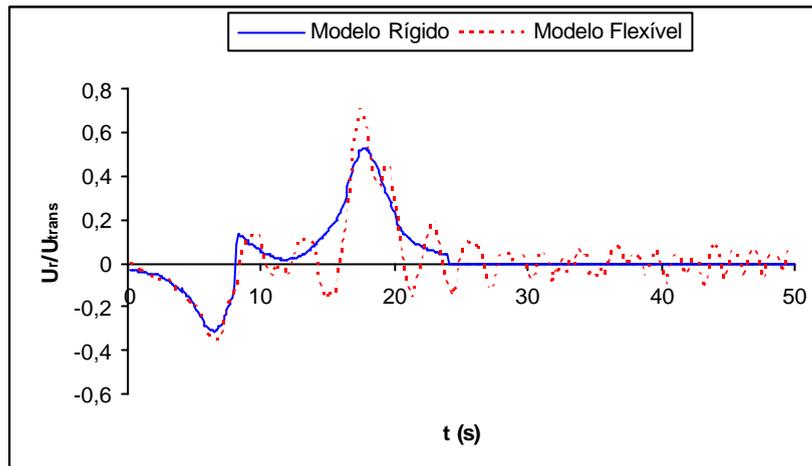


Figura 5.57 - Deslocamento do topo na direção radial para a torre SE na linha de transmissão, $f_0 \times r_{\max}/V = 5,74$

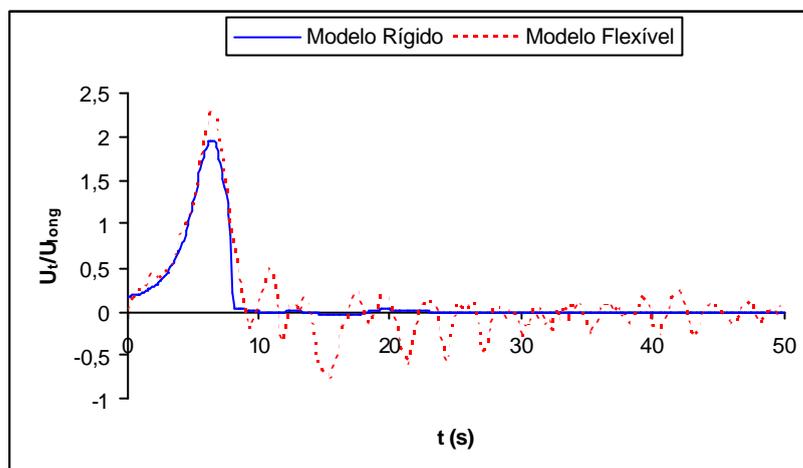


Figura 5.58 - Deslocamento do topo na direção tangencial para a torre SE na linha de transmissão, $f_0 \times r_{\max}/V = 5,74$

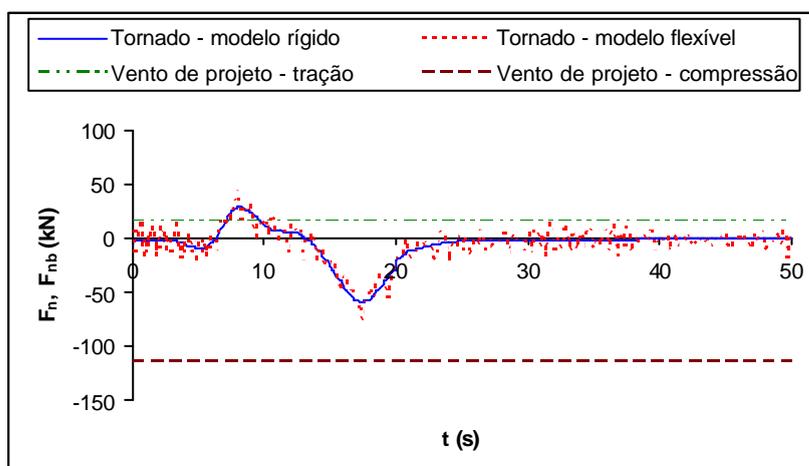


Figura 5.59 - Esforço normal nos mastros da torre SE na linha de transmissão,

$$f_0 \times r_{\max}/V = 5,74$$

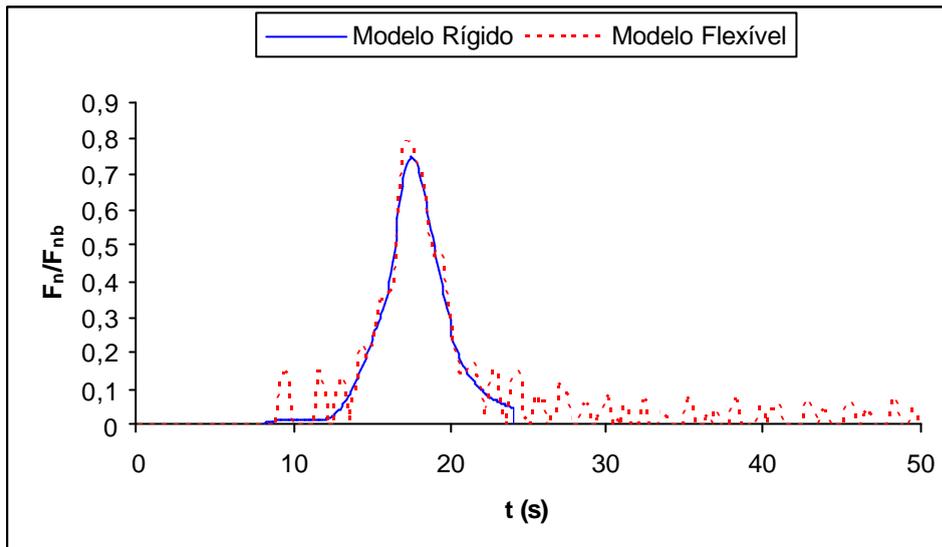


Figura 5.60 - Esforço normal de tração nos estais da torre SE na linha de transmissão,

$$f_o \times r_{\max}/V = 5,74$$

5.5 Conclusões parciais

As principais inferências dos resultados obtidos para os modelos apresentados são:

- A resposta estática assemelha-se a um duplo pulso, correspondente às situações de aproximação e afastamento do tornado em relação à estrutura. As ações tangenciais são preponderantes sobre as radiais;
- As barras horizontais permitem o surgimento de uma força vertical ascendente, quando da ocorrência do tornado, sobre as torres de transmissão. Tal força possui intensidade comparável às ações horizontais causadas pelo próprio tornado e é cerca de duas vezes superior ao peso próprio das torres, tendendo a promover o arrancamento da estrutura de sua fundação;
- A parcela de inércia da excitação tornádica é desprezível para a avaliação de ações globais sobre torres de transmissão. O fato de a sollicitação dever-se quase integralmente às forças de arrasto é bastante relevante, pois essas são de obtenção consideravelmente mais simples,

facilitando a difusão de conhecimento e a elaboração de metodologias para projeto;

- Os efeitos globais são pouco sensíveis a se considerar o modelo estrutural como corpo extenso ou eixo material perante o tornado. Tal fato também vai ao encontro da elaboração de metodologias para projeto mais simplificadas e difusíveis;
- Torres de transmissão respondem a solicitações de tornados de modo aproximadamente estático;
- Torres representativas de linhas brasileiras atingidas por tornados factíveis no território nacional são sujeitas a efeitos globais superiores aos valores de projeto;
- A ação de tornados sobre torres de transmissão diferencia-se da ação do vento de projeto, preconizado em normas, principalmente por dois aspectos: o surgimento de uma força vertical ascendente e de um momento de torção.