

4 Cenários

Para a obtenção de uma base de dados numéricos referentes a ações mecânicas sobre estruturas civis produzidas por tornados e, a partir da análise e interpretação dessas informações, desenvolver-se o entendimento sobre o comportamento de tais sistemas, dois modelos são gerados:

- um para simular o evento atmosférico, isto é, o cenário do tornado;
- o segundo para representar o alvo para o tornado, o cenário estrutural.

4.1. Modelo do tornado para os ensaios

Tendo em mente o cenário subtropical brasileiro e na ausência de informações relativamente precisas e numerosas sobre o potencial de danos a ser atribuído a prováveis novas ocorrências de tornados nessa região, opta-se por formular um conjunto de parâmetros para definição de um tornado que, muito provavelmente, envolveria o potencial de danos de todas as ocorrências já verificadas e das que poderiam ser propostas a partir daquelas.

Assim, considera-se um tornado de ensaio com as seguintes características:

$$T_{\max} = 90 \text{ m/s};$$

$$r_{\max} = 60 \text{ m};$$

$$V = 20 \text{ m/s};$$

$$\delta_0 = 460 \text{ m}.$$

Para esses parâmetros, a Figura 4.1 permite melhor visualização da variação qualitativa das componentes de velocidade em relação à espessura da camada limite.

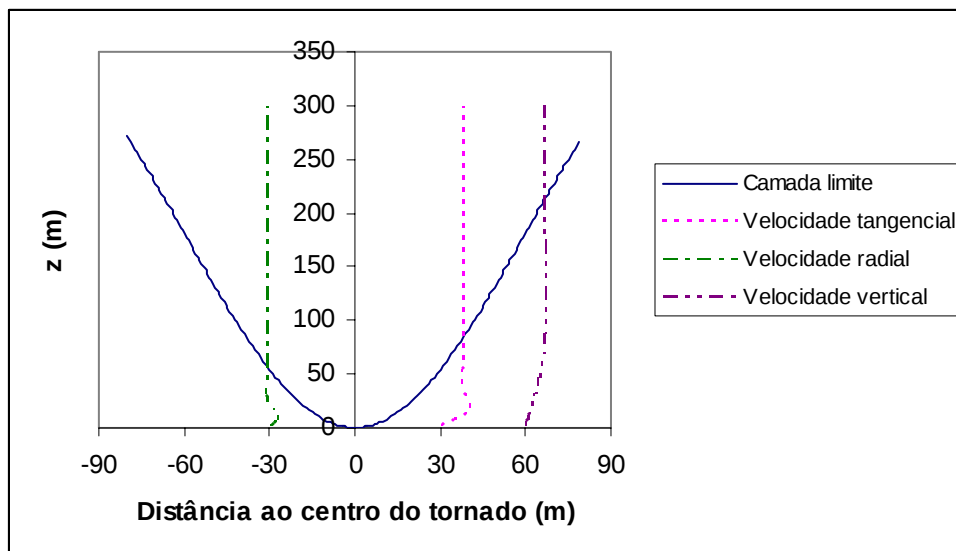


Figura 4.1 – Variação das componentes de velocidade em relação à espessura da camada limite

A análise inicia-se a 100 m do centro da estrutura ($S_0 = 100$ m), posição onde os efeitos do tornado passam a ser sensíveis. Assim sendo, o período de análise compreendido entre 0 e 5 s é designado como evento de aproximação do tornado. A partir de então, tem-se o afastamento. Opta-se por analisar os efeitos estruturais até o instante de 15 s, quando o centro do tornado se localiza a 200 m do centro da estrutura, posição na qual as forças sobre o modelo são praticamente nulas. Este tornado é classificado no patamar inferior da categoria F5 na escala de Fujita. Como comparação, usinas nucleares nos EUA devem ser projetadas para velocidades máximas tangenciais da ordem de 120 m/s.

Por causa da grande velocidade vertical no núcleo, a aceleração convectiva é geralmente maior do que a aceleração local quando o sistema está perto ou dentro deste. Assim sendo, a força de inércia pode se tornar comparável ou maior do que a força de arrasto (Wen, 1975). Na direção radial, a inércia é muito relevante quando comparada com a parcela de arrasto, independentemente da altura, pois as componentes de velocidade são pequenas e os gradientes são elevados. Na outra direção, tangencial, a parcela de inércia geralmente causa aumento na força total, sendo a maior diferença observada perto do solo, diminuindo consideravelmente com a altura, refletindo a alteração das expressões de velocidade nessa região. A visualização desse comportamento nas duas direções está nas Figuras 4.2 a 4.7, para as alturas de 20, 60 e 100 m. Os valores de força são obtidos através da Equação de Morrison e referem-se a um alvo prismático de seção quadrada, 15 x

15 m, apurado perpendicularmente à trajetória e centrado ao tornado. Sabe-se (Wen, 1975) que a consideração da variação da força para pontos exteriores a essa trajetória é, em geral, no sentido da redução da ação total; assim sendo, prefere-se trabalhar com o centro da estrutura coincidindo com a trajetória do tornado, como situação mais desfavorável.

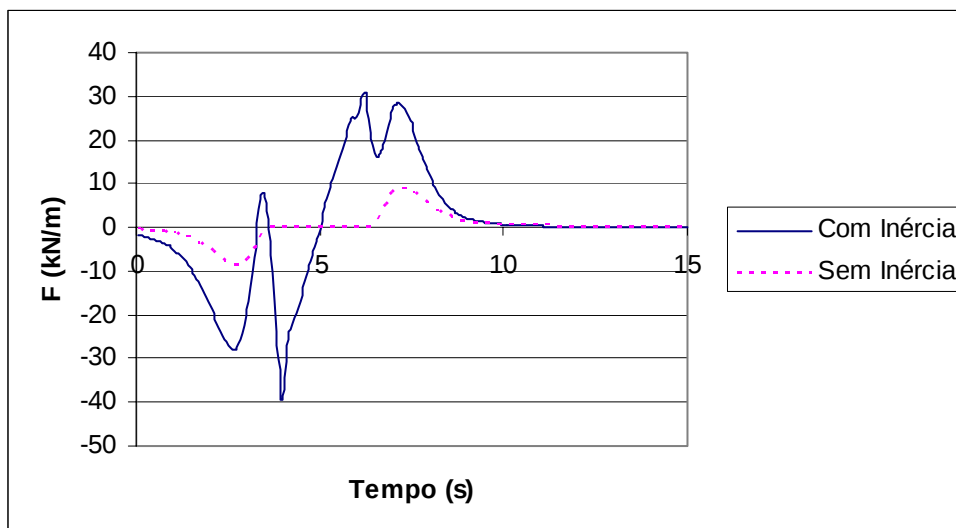


Figura 4.2 – Avaliação do efeito relativo da força de inércia na direção da velocidade radial, $z = 20$ m

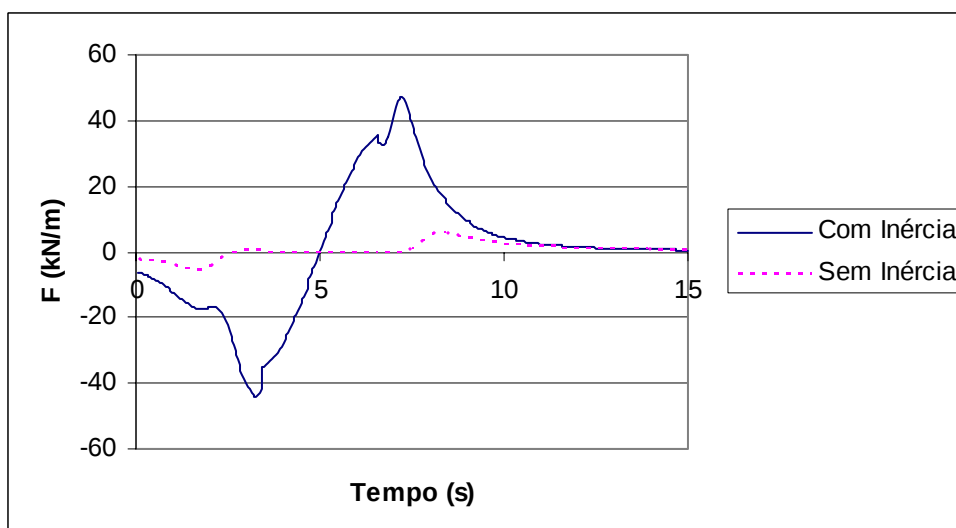


Figura 4.3 - Avaliação do efeito relativo da força de inércia na direção da velocidade radial, $z = 60$ m

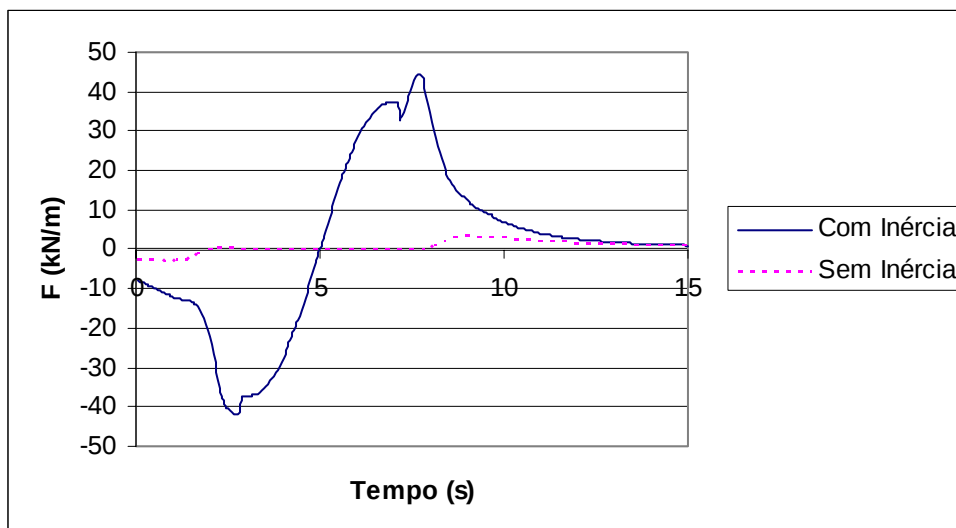


Figura 4.4 - Avaliação do efeito relativo da força de inércia na direção da velocidade radial, $z = 100$ m

De maneira geral, a solicitação sobre o alvo apresenta-se como dois pulsos sucessivos e antissimétricos, de duração aproximada de 5 s, relativamente bem comportados, o pulso da aproximação e do afastamento. Observa-se ainda que para a altura de 20 m, há situação em que o primeiro pulso é subdividido em dois outros pulsos, como reflexo de flutuação do campo cinemático do modelo do tornado.

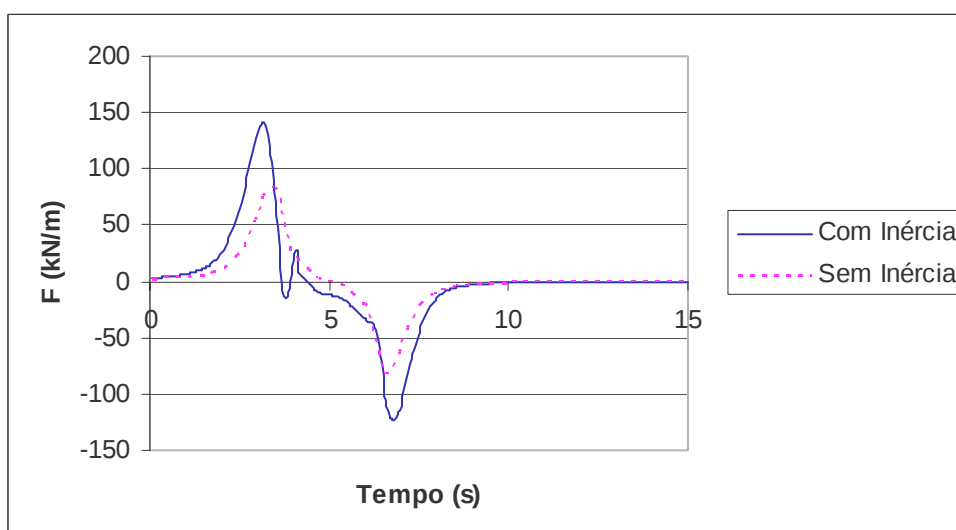


Figura 4.5 - Avaliação do efeito relativo da força de inércia na direção da velocidade tangencial, $z = 20$ m

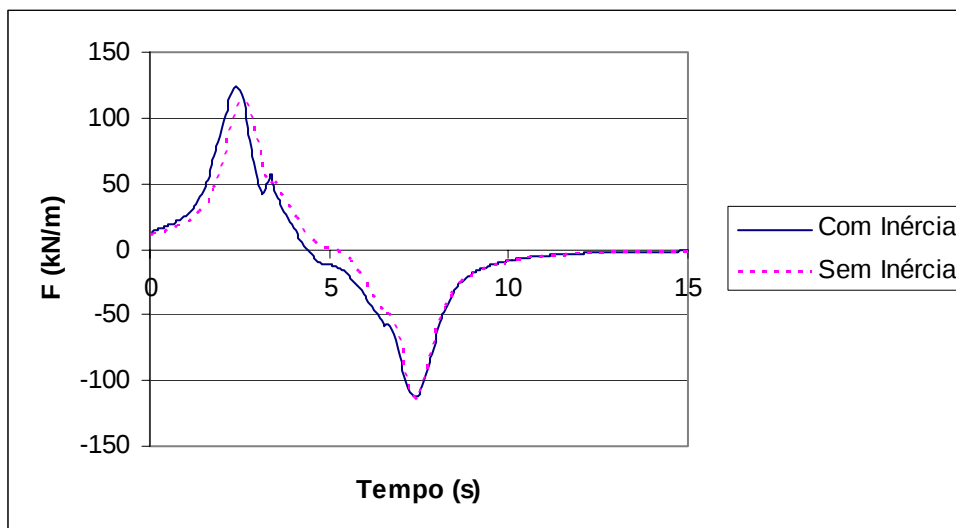


Figura 4.6 - Avaliação do efeito relativo da força de inércia na direção da velocidade tangencial, $z = 60$ m

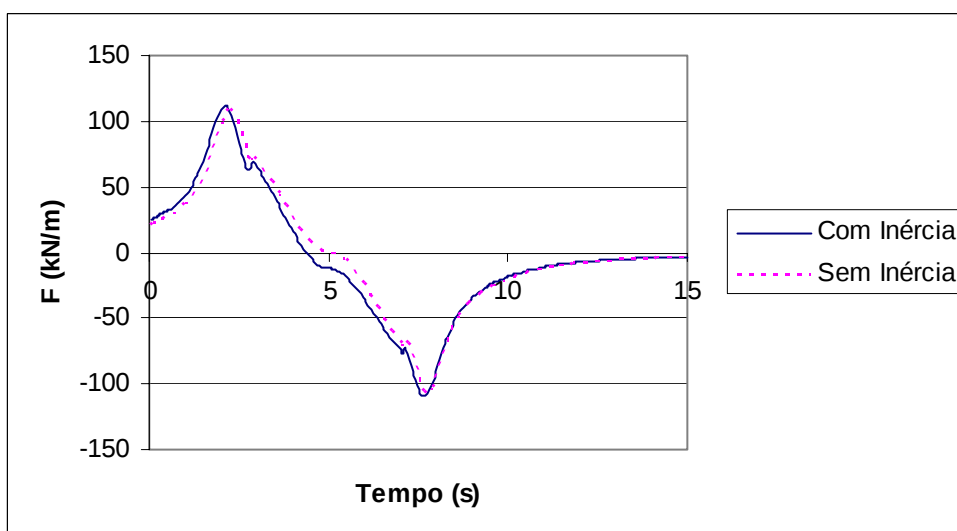


Figura 4.7 – Avaliação do efeito relativo da força de inércia na direção da velocidade tangencial, $z = 100$ m

Espera-se, portanto, na análise das respostas estruturais decorrentes da incidência deste tornado modelado, que o efeito de inércia seja mais relevante na direção radial e em modelos de menores alturas. De fato, não considerar efeitos de inércia resulta em sérias subestimativas das solicitações perto do solo.

Nas Figuras 4.8 a 4.10 vêem-se os perfis de forças nas direções radial e tangencial para as mesmas alturas. Nota-se que os pulsos são semelhantes, com diferenças de amplitude. As solicitações tangenciais são cerca de 2 a 4 vezes maiores que as solicitações radiais, atingindo aproximadamente 150 kN/m.

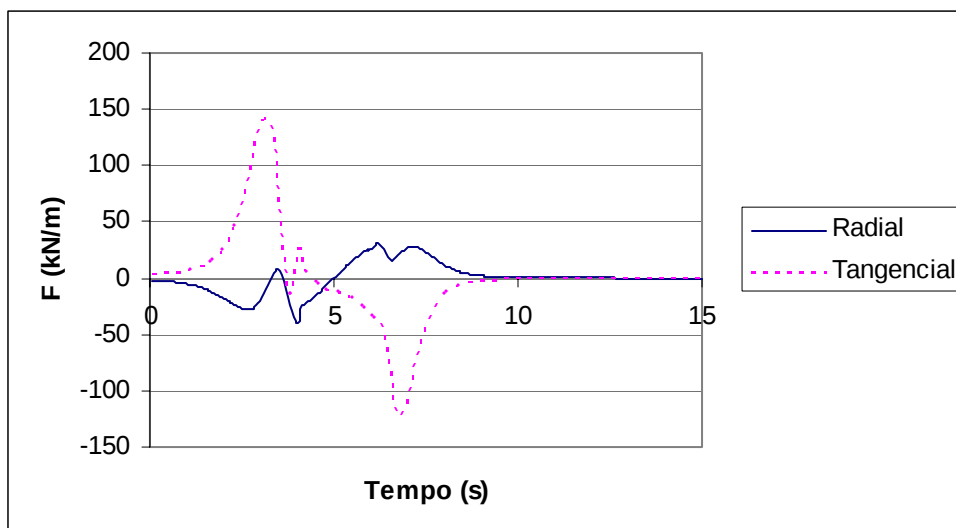


Figura 4.8 – Forças nas direções radial e tangencial, $z = 20$ m

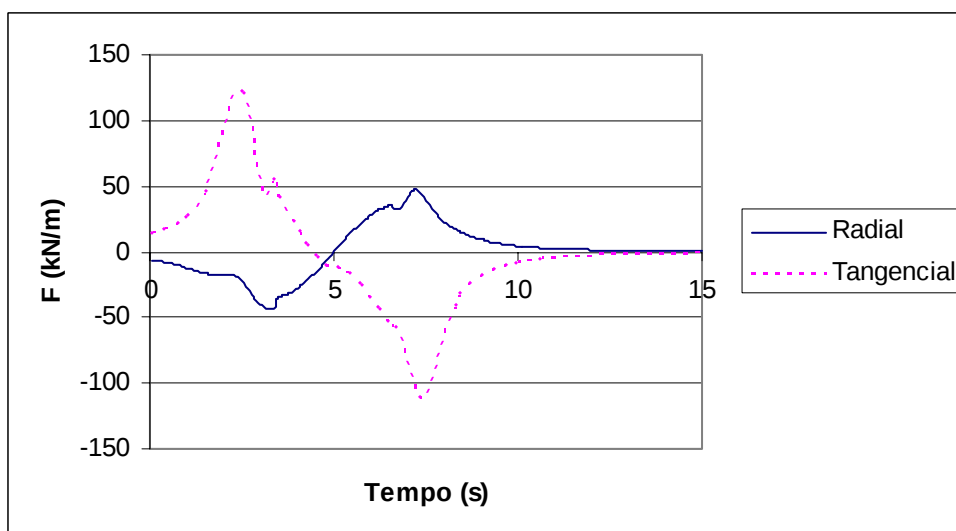


Figura 4.9 – Forças nas direções radial e tangencial, $z = 60$ m

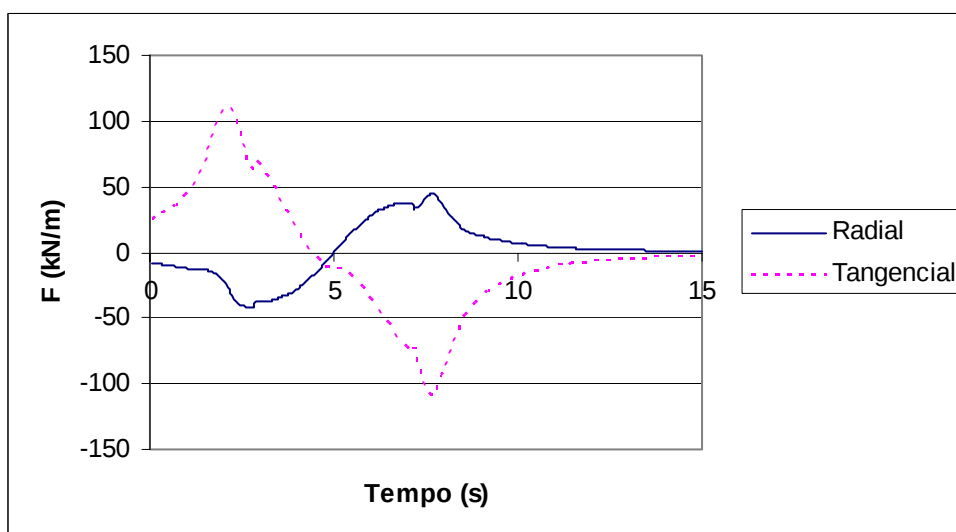


Figura 4.10 – Forças nas direções radial e tangencial, $z = 100$ m

Nas Figuras 4.11 e 4.12 é mostrada a variação das forças com a altura para cada direção, separadamente, para as alturas de 20, 60 e 100 m, novamente. Os pulsos são semelhantes, principalmente para as alturas de 60 e 100 m. A Figura 4.13 permite melhor visualização do comportamento das solicitações do campo modelado, mostrando a variação com a altura das forças nas duas direções a 30 m do centro do tornado. Há variação dentro da camada limite, com os valores sendo constantes para pontos acima da mesma. Os esforços tangenciais são cerca de três vezes maiores que as solicitações radiais, atingindo 150 kN/m.

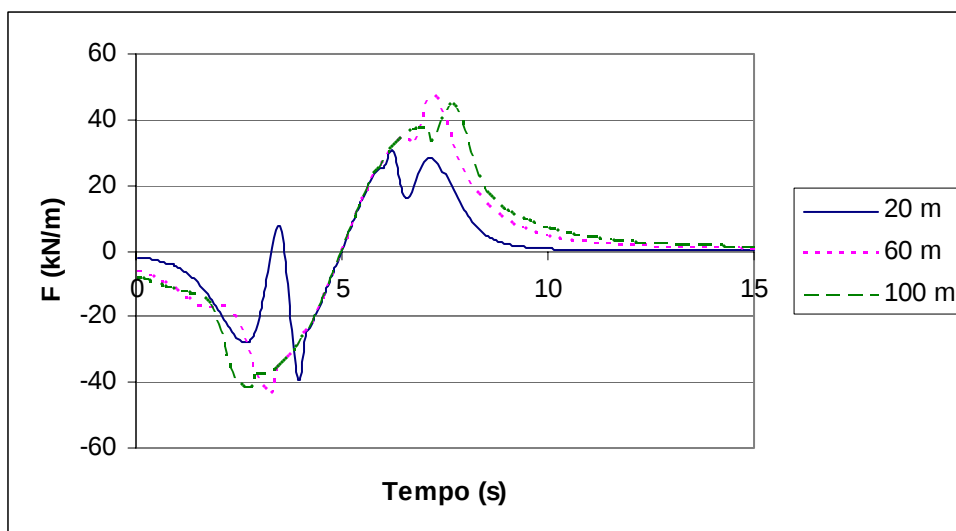


Figura 4.11 – Variação das forças na direção radial com altura

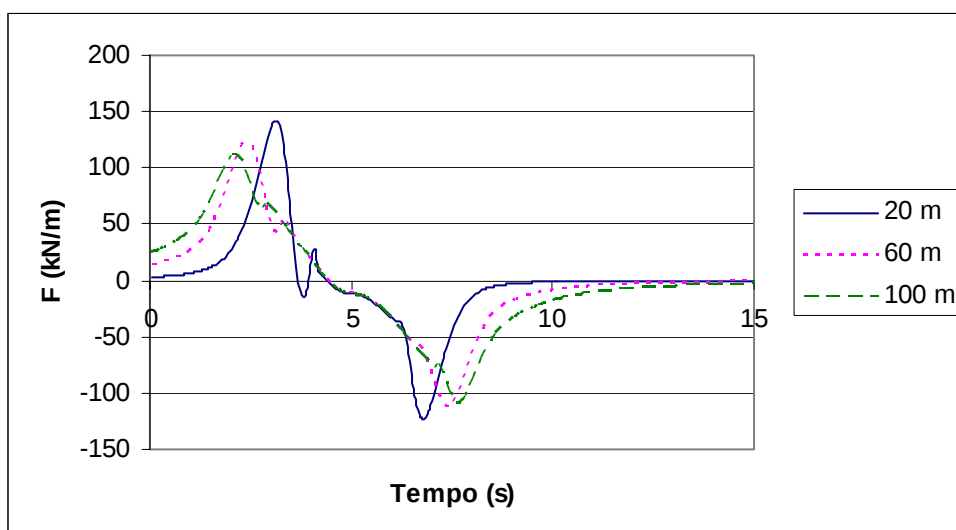


Figura 4.12 – Variação das forças na direção tangencial com altura

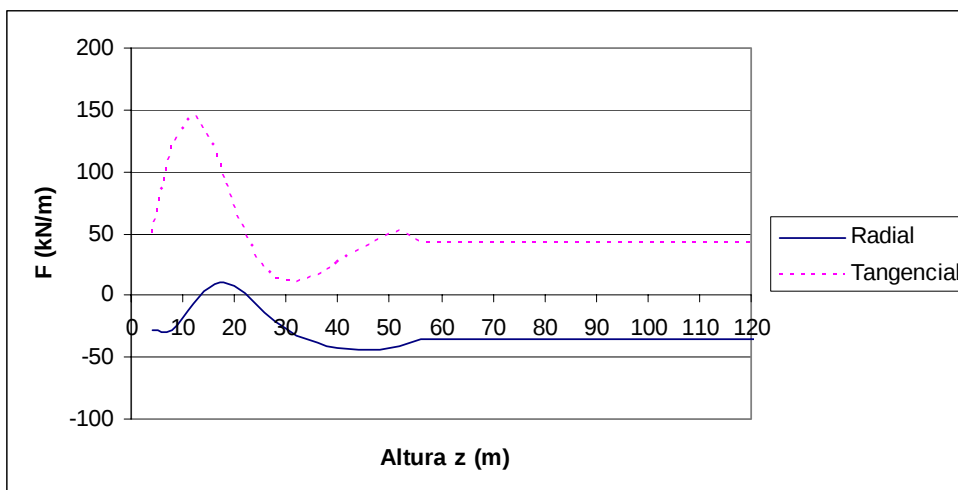


Figura 4.13 – Variação espacial das forças nas duas direções a 30 m do centro do tornado

A variação espacial horizontal das componentes radial e tangencial da força é mostrada na Figura 4.14, para uma altura de 100 m. Considera-se que o tornado não translada e o perfil das forças referem-se ao seu eixo de simetria. Tal análise é importante para se decidir em considerar a estrutura como ponto material ou corpo extenso perante o tornado. Quando a estrutura é tratada como ponto material frente ao tornado, considera-se a mesma suficientemente pequena em relação ao fenômeno, de modo que todas as ações são avaliadas em seu eixo de simetria, não havendo variação espacial horizontal do carregamento. Tratar a estrutura como corpo extenso é considerar a variação espacial do carregamento ao longo de sua largura.

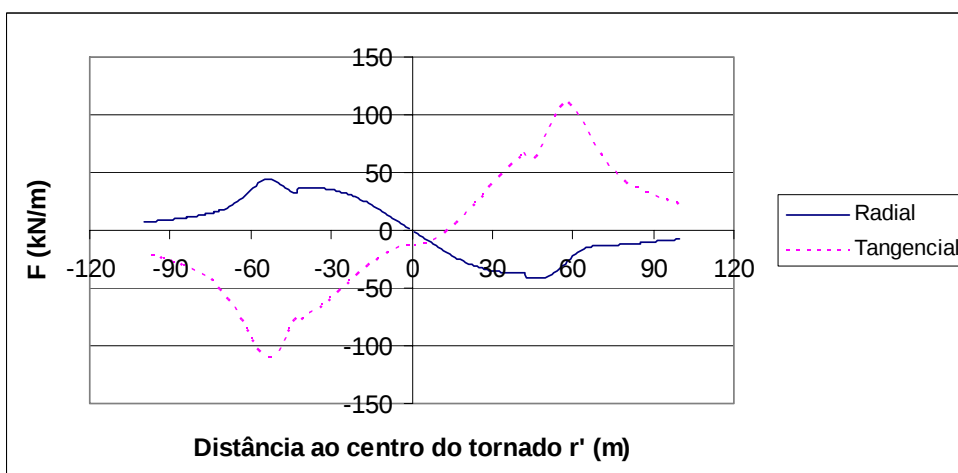


Figura 4.14 – Variação espacial horizontal das componentes de força, $z = 100$ m

Nota-se que as forças variam rapidamente dentro do núcleo (-60 a 60 m), indicando a necessidade de discretização da estrutura estudada também ao longo de sua largura, obtendo assim esforços de torção. Sendo assim, neste trabalho, a estrutura é assim tratada, como corpo extenso, para obtenção de respostas cinemáticas e esforços globais. Em particular, para efeito de comparação, obtêm-se os esforços globais também considerando a estrutura como ponto material. Na literatura, geralmente não se considera a variação espacial horizontal das forças tornádicas.

4.2. Modelo do sistema

Os sistemas analisados são prismáticos com base quadrada de 15 m e pavimentos-tipo com pé-direito, H , de 4 m. Três diferentes modelos são considerados, conforme número de pavimentos-tipo, m : 5, 15 e 25, resultando em três diferentes alturas, 20, 60 e 100 m. A estrutura é reticulada, em concreto armado, com quatro pilares de seção quadrada variável e vigas de seção retangular constante de 0,25 x 1,40 m. O lado da seção quadrada, d_k , dos pilares varia do topo para a base, com valores que vão de 0,71 a 1,45 m. Considera-se uma carga de 12 kN/m² por piso, distribuída igualmente nos quatro nós de cada pavimento; o carregamento do último pavimento é reduzido à metade. Apenas elementos de barra lineares são utilizados. Tal modelo é adaptado de Almeida et al (2005). Calculam-se as forças cortantes totais e momentos de tombamento e de torção na base nas direções x e y (efeitos globais) e os deslocamentos de topo para as mesmas direções. Esforços internos não são calculados, sendo tal fato justificado posteriormente. Para isso, discretizam-se os modelos em faixas de 4 m metros ao longo de sua altura e 3,75 m ao longo de sua largura, com carregamento nodal equivalente aplicado nos nós resultantes da intersecção dessas faixas. O sistema estrutural é mostrado na Figura 4.15. As cinco primeiras frequências naturais de cada estrutura são mostradas na Tabela 4.1.

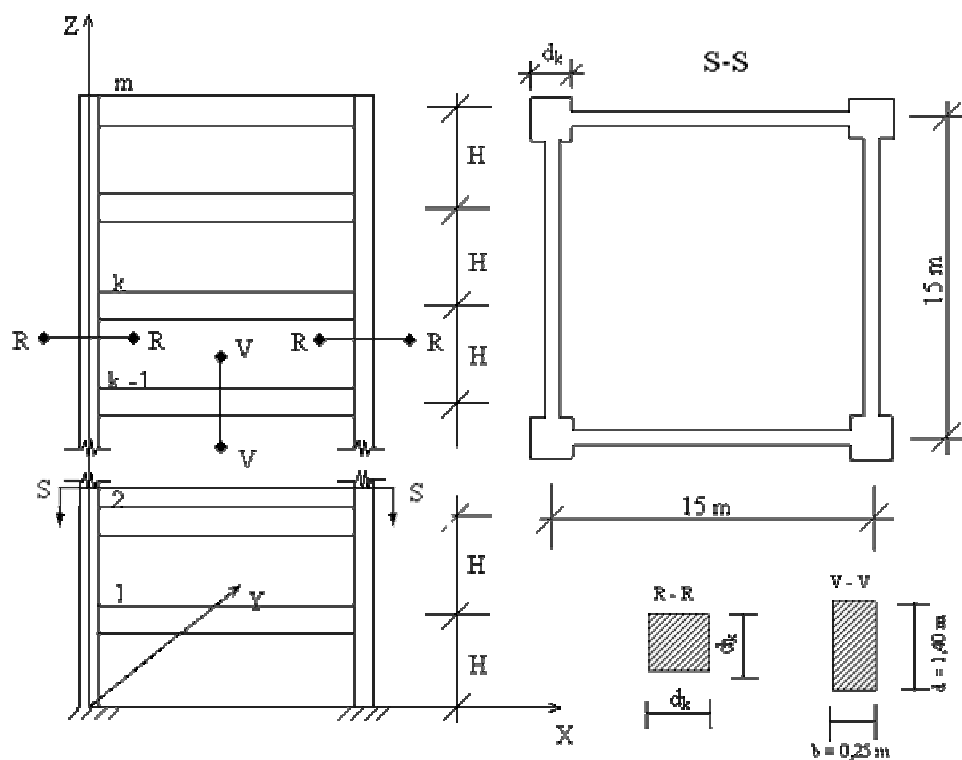


Figura 4.15 – Modelo estrutural – adaptada de Almeida et al (2005)

Tabela 4.1 – Frequências naturais, Hz, do modelo do sistema estrutural

Modo	1	2	3	4	5
20 m	1,020	1,020	1,353	2,779	3,944
60 m	0,154	0,154	0,314	0,585	0,585
100 m	0,071	0,071	0,177	0,256	0,256