

## 6 Conclusões e recomendações

O conhecimento sobre os campos cinemáticos de vento e de pressão no tornado é ainda bastante limitado. Medições de campo, simulações de laboratório e análises numéricas são feitas na literatura, resultando em diferentes propostas, mas não se dispõe de um modelo que represente o fenômeno com fidelidade, o que dificulta o desenvolvimento de análises estruturais.

A solicitação estrutural de tornados modelados através das equações de velocidade de vento de Kuo/Wen assemelha-se a um duplo pulso, com duração inversamente proporcional à velocidade de translação do fenômeno. Isto é visualizado claramente através das respostas estáticas cinemáticas de deslocamento para os três modelos estruturais aqui utilizados. A resposta dinâmica é semelhante à de um sistema com um grau de liberdade com frequência igual à fundamental da estrutura, submetido a um pulso. Os fatores de amplificação da resposta são superiores na direção radial, no entanto a direção tangencial é a crítica, apresentando os maiores deslocamentos estáticos, pois a componente de velocidade nesta direção é maior, conforme modelo utilizado. A relação entre os deslocamentos dinâmicos máximos nas duas direções fica entre 1,90 e 2,30. Tais deslocamentos apresentam grande sensibilidade à dimensão vertical do modelo considerado.

A aceleração convectiva é geralmente maior que a aceleração local por causa da grande velocidade vertical no núcleo. Assim sendo, a força de inércia se torna comparável ou superior à força de arrasto. A inclusão de tal parcela é mais importante na direção radial, pois nessa direção as componentes de velocidade são pequenas e os gradientes elevados, resultando em amplificações de resposta de 7 a 10 vezes. Na direção tangencial, a maior diferença é observada perto do solo, diminuindo com a altura, refletindo a alteração das componentes de velocidade nesta direção. Para o modelo de 20 m, a amplificação é de cerca de duas vezes, sendo insignificante para os demais.

A avaliação das ações mecânicas globais devidas a tornados sobre a base das estruturas é uma forma muito conveniente para conduzir-se a uma primeira análise quantitativa do problema e para avaliação comparativa de procedimentos e modelos. As estruturas sujeitas à incidência do tornado modelado apresentam momentos de tombamento e forças cortantes totais na base superiores ao previsto pela norma brasileira para o máximo das cargas devidas ao vento. A relação entre tais esforços decresce com a altura, ficando entre 4 e 8, aproximadamente. A direção tangencial apresenta respostas máximas 2 a 4 vezes superiores à direção radial.

Avaliar as ações tornádicas no eixo da estrutura, desconsiderando a variação espacial horizontal do carregamento, não resulta em diferenças significativas de momentos de tombamento e forças cortantes totais na base. No entanto, o momento de torção resultante da consideração dessa variação é significativo. Assim sendo, para avaliação de efeitos mecânicos com vistas a metodologias de projeto, é recomendável o tratamento da estrutura como corpo extenso perante o tornado. Com aumento da altura da estrutura, os momentos de torção se tornam menos significativos quando comparados aos demais momentos, pois boa parte do modelo fica acima da camada limite quando no núcleo do tornado, região na qual as forças são constantes nas duas direções.

A proposta de utilização de espectros de resposta para tornados pode ser uma ferramenta poderosa para análise, pois avalia indiretamente a variação de parâmetros notáveis do tornado, como raio do núcleo e velocidade de translação, e da estrutura, como massa e rigidez. O espectro de resposta cinemática para deslocamento na direção tangencial para o modelo de 60 m apresenta dois picos, com valores de amplificação máximos de aproximadamente 2,08 e 2,16. Nota-se uma região de depressão entre esses dois máximos, com o fator de amplificação caindo a cerca de 1,4. Isso se deve à configuração das respostas estática e dinâmica, através da relação  $f_0t_1$ .

Para prosseguimento da investigação de ações mecânicas de tornados sobre sistemas de estruturas recomenda-se estudar:

- delimitação do emprego de modelos de campos cinemáticos dos tornados e da transformação desses indicadores em valores de pressão sobre a estrutura;
- alterações provocadas no campo cinemático dos tornados com a forma, fechamento e outras considerações aerodinâmicas das estruturas;
- implementação computacional da avaliação para efeitos globais, deslocamentos e esforços internos em estruturas;
- em particular, considerar as estruturas de torres em linhas de transmissão de energia.