

2 Revisão bibliográfica

2.1. O evento meteorológico

Dependendo de sua intensidade, tornados podem chegar a devastar completamente uma comunidade, pela ação combinada do vento giratório e diferença de pressão exercidos sobre a área localizada. De acordo com Kessler (1970), nos Estados Unidos, onde sua ocorrência é muito freqüente, causa danos estimados em US\$ 100 milhões por ano. Apresenta diâmetro médio da ordem de 300 m e se desenvolve dentro de uma severa tempestade, movendo-se com velocidade translacional que pode chegar a 100 km/h em um caminho de aproximadamente 15 km, geralmente em sentido nordeste. A velocidade tangencial do vento pode chegar a 350 km/h na região limite do funil.

Segundo Nalivkin (1983), o fenômeno consiste em uma chaminé de ar de altíssima rotação, dependurada em uma nuvem cúmulo-nimbo. A maior parte dos estudos sobre tornados os tem considerado de maneira independente, isto é, desvinculados das nuvens de tempestade. Somente nos últimos anos é que alguns estudiosos passaram a dar atenção ao relacionamento direto entre tornados e a vortacidade das nuvens. O fenômeno principal é justamente essa vortacidade da chamada nuvem-mãe, sendo o tornado uma formação semelhante, secundária, dela originada e pendendo da mesma em forma de tuba ou tromba. Exemplo de tornado encontra-se na Figura 2.1, onde se pode visualizar nitidamente a nuvem-mãe e o funil dela originada.

Uma característica importante relacionada ao estudo de tornados é a necessidade de se criarem escalas que permitam estimar a velocidade do vento, pois esta raramente pode ser medida diretamente. Essas escalas são baseadas nos danos verificados. A escala mais utilizada é a proposta por Fujita (1970), onde os tornados são classificados em seis categorias, de F0 a F5, considerando eventualmente categorias de F6 a F12, de acordo com o seu poder de destruição. A mesma é mostrada na Tabela 2.1. Há ainda a escala FPP, que considera também

dados sobre a largura e comprimento das trilhas, dados por Pearson. Tal escala tem entrado em desuso.



Figura 2.1 – Exemplo de tornado americano

O tornado pode ocorrer em qualquer época, mas é mais comum na primavera, quando a atmosfera nos níveis superiores ainda está fria e os aquecimentos, mesmo não tão grandes nessa estação, causam convecções intensas devidas à diferença de temperatura entre a superfície e os níveis superiores (Nechet, 2002). Asnani (1993) faz referência das condições de trovoadas severas até o nível de tornado devido a forte instabilidade convectiva.

O fenômeno é mais freqüente nas latitudes extratropicais do que nos trópicos. Dentro da faixa tropical, entre 20°N e 20°S, os tornados parecem ser mais fracos, desenvolvendo-se, na maioria das vezes, como trombas de água cruzando o litoral (Asnani, 1993). Como já mencionado, a região do mundo que apresenta maior ocorrência são os Estados Unidos. Segundo Flora (1953), durante um período de 35 anos, de 1916 a 1950, foi registrada a passagem de 5200 tornados, com a morte de 7961 pessoas; de 1916 a 1961, esse número de tornados atingiu a casa de 11053 habitantes em todo o território norte-americano. Tornados têm sido registrados também, embora com freqüências menores, na Austrália, Europa Ocidental, Índia e Japão. A Figura 2.2, de Brooks et al (2006), mostra a

quantidade de dias anuais com condições favoráveis à ocorrência de tornados no período entre 1980 e 1999. Nota-se que tais condições ocorrem praticamente somente em zonas de clima temperado.

Tabela 2.1 – Escala de Fujita

Escala	Denominação	Velocidade máxima de vento, V_{\max} (m/s)	Danos
F0	Tornado Rajada	18 a 32	Danos a antenas, quebra de galhos de árvores
F1	Tornado Moderado	33 a 50	Danos a fundações, movimentação de carros
F2	Tornado Significante	51 a 70	Grandes árvores arrancadas, objetos leves arremessados
F3	Tornado Severo	71 a 92	Carros pesados transportados, trens virados
F4	Tornado Devastador	93 a 116	Casas frágeis transportadas, carros arremessados
F5	Tornado Inacreditável	117 a 142	Casas fortes desintegradas, carros arremessados por até 100 m
F6-F12	Tornado Inconcebível	143 a V_{som}	Danos inconcebíveis

Na América do Sul, o país que contabiliza mais registros é a Argentina, seguida por Brasil e Paraguai. Segundo Dyer (1991), muito embora notícias de tornados tenham sido registradas há longo tempo nos órgãos de imprensa da Argentina, somente a partir de 1971 tais sinistros começaram a ser, sistematicamente, estudados. Ainda segundo o autor, no Paraguai a matéria é pouco documentada. Taxas de ocorrências de tornados baseadas em um banco de dados de mais de 50 anos para o caso argentino são mostradas na Figura 2.3, extraídas de Schwarzkopf et al (1993, apud Goliger e Milford, 1998). A região ‘A’ representa probabilidade anual de $2.10^{-4}/\text{km}^2$, correspondente ao dobro da

probabilidade em 'B' e ao quádruplo em relação a 'C'. A área hachurada indica regiões onde ventos de alta intensidade, incluindo tornados, ocorrem.

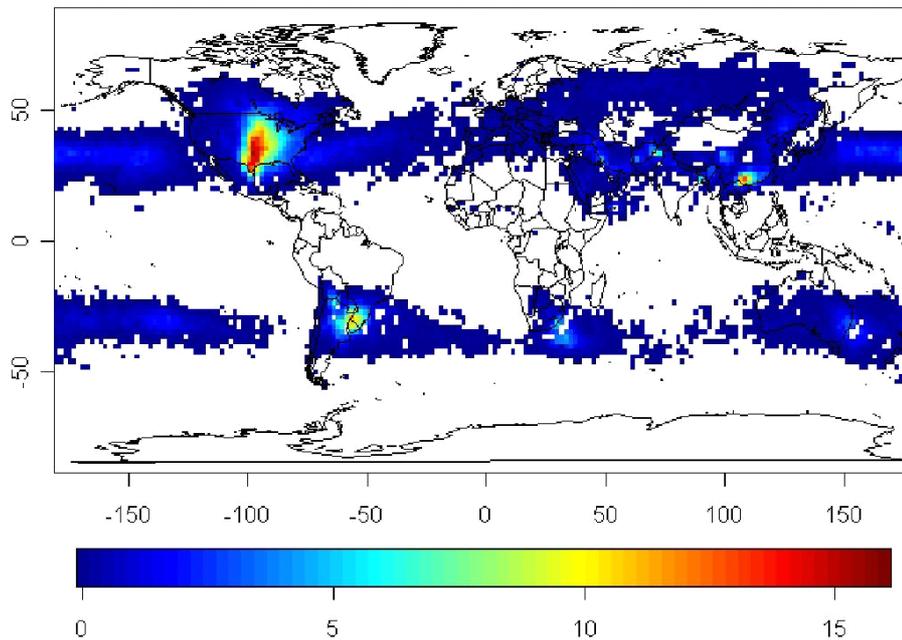


Figura 2.2 – Dias anuais com condições favoráveis à ocorrência de tornados no período de 1980 a 1999 – Brooks et al (2006)

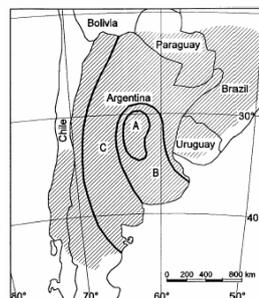


Figura 2.3 – Ocorrência de tornados na Argentina – Goliger e Milford (1998)

Em território nacional, a região compreendida pelos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo e Mato Grosso do Sul responde por quase a totalidade dos casos registrados. Fotos da formação de um tornado de intensidade considerável ocorrido recentemente no Brasil estão mostradas nas Figuras 2.4 e 2.5. Trata-se do fenômeno ocorrido em Indaiatuba (SP), em maio do ano de 2005. Os danos observados, como os vagões tombados na Figura 2.6, permitem classificá-lo como F3 na escala de Fujita.



Figura 2.4 – Formação do tornado de Indaiatuba (SP) – foto 1



Figura 2.5 – Formação do tornado de Indaiatuba (SP) – foto 2

Dyer (1991) apresenta ainda dados sobre a ocorrência de tornados no Brasil, Argentina e Paraguai. A partir de imagens de fotografias aéreas tomadas em 1965 e em algumas imagens Landsat no início da década de 70, o autor identificou uma série de 24 rastros de desmatamento em meio a densas florestas na região da Bacia do Paraná. A extensão e a largura de tais rastros variam enormemente, sendo que o mais longo apresenta comprimento de cerca de 70 km, enquanto que a maior largura observada foi de 2 km, aproximadamente.



Figura 2.6 – Exemplo de dano causado pelo tornado de Indaiatuba (SP)

Há outros estudos brasileiros sobre o assunto. Oliveira (2000) apresenta levantamento de tornados ocorridos em Santa Catarina e Nechet (2002) descreve a ocorrência de tornados em diversas regiões do país.

2.2. Considerações de projeto

Os primeiros estudos sobre tornados são bastante remotos, do final do século XIX. Finley (1884, apud Dutta et al, 2002) apresenta um trabalho sobre as características de seiscentos tornados. Os primeiros trabalhos dão maior ênfase aos aspectos meteorológicos e à estimativa de danos causados pelos mesmos. Quando se pensa em avaliação de danos e efeitos mecânicos sob o ponto de vista da engenharia, torna-se de fundamental importância o conhecimento dos campos cinemáticos de vento e de pressão nos tornados. Tal conhecimento é de difícil obtenção, dada a imprevisibilidade e curta duração do fenômeno, o que torna bastante difícil a realização de medições diretas. Estudos nesse sentido iniciam-se na década de 60, com os trabalhos pioneiros de Hoecker (1960, 1961). Através de observações de campo do tornado de Dallas, 1957, o autor chega a conclusões interessantes sobre a estrutura do vórtice, notando que o mesmo se assemelha ao vórtice de Rankine para alturas maiores que 330 m, ou seja, nessa região, do centro até um raio r_{\max} , o regime é de um corpo sólido e, a partir desse raio, a

velocidade tangencial é inversamente proporcional à distância radial ao centro do tornado. Para pequenas alturas, menores que 45 m, tal comportamento se desvia um pouco disso, dada a interferência do solo. A máxima velocidade tangencial ocorre na fronteira do núcleo, ainda segundo o autor. Outros trabalhos nessa linha se desenvolvem nessa mesma década. Glassler (1960, apud Dutta et al, 2002) estabelece a aplicabilidade da equação ciclostrópica para a estimativa da queda de pressão atmosférica devida ao tornado. Fujita (1960) apresenta análises de campo detalhadas de tornados ocorridos em Fargo. O modelo teórico desenvolvido por Kuo (1971) resulta em perfis das componentes de velocidade do tornado, dependentes da distância radial e da altura sobre o solo. Tal modelo é adaptado por Wen (1975) para aplicações em engenharia, sendo o mesmo utilizado no estudo aqui apresentado.

Estudos de engenharia, porém, se iniciam apenas no ano de 1966 (Dutta et al, 2002), principalmente por causa dos requisitos de segurança exigidos para usinas nucleares. Chang (1966) anuncia o primeiro tornado produzido em laboratório. Em trabalhos subseqüentes, Chang (1971, 1972), o autor apresenta detalhes da simulação de tornados, com medidas de diferentes componentes de velocidade e suas variações. Chang* (1971) sugere ainda que estruturas devam ser dimensionadas para acréscimos de pressão dinâmica que podem variar de 20% a 70% acima da média para a consideração dos efeitos de tornados.

A maioria das análises dos efeitos de tornados sobre sistemas estruturais apresentada na literatura é estática. McDonald (1970) mostra a resposta de um edifício de 20 andares ao tornado de Lubbock, Texas. Doan (1970) discute considerações de tornados para usinas nucleares. Trabalho semelhante é realizado por McDonald et al (1974). Sherman (1973) apresenta considerações de efeitos de tornados sobre estruturas simples, como residências, com vistas a propor metodologia de projeto de tais estruturas para resistir a esses efeitos. Ainda dentro da abordagem de análise estática, citam-se os estudos de Mehta et al (1976) e Sparks et al (1988).

A primeira análise dinâmica é realizada por Wen (1975), que apresenta a resposta estrutural de edifícios altos, utilizando o modelo de campo de vento de Kuo (1971). O autor introduz ainda a consideração dos efeitos de inércia na solicitação, essenciais em fluxos tornádicos, pois os mesmos apresentam variações bruscas das componentes de velocidade, resultando em elevados gradientes.

Mehta e McDonald (1986) apontam a dificuldade de se medirem velocidades e pressões no tornado e a conseqüente falta de conhecimento sobre esses perfis. Ainda segundo o autor, devido a esse fato, as análises dinâmicas dos efeitos dos mesmos sobre estruturas são raras. Eberline et al (1991) relatam a resposta não-linear de um condutor de carvão utilizando o método dos elementos finitos, MEF. Savory et al (2001) apresentam estudos sobre torres de transmissão e Dutta et al (2002) discorrem sobre a resposta dinâmica de pórticos planos utilizando também o MEF.

Estudos geralmente têm considerado que o custo associado à execução de estruturas usuais projetadas para suportar efeitos de tornados é significativamente maior do que o risco associado ao fenômeno. Por essa razão, a maioria das normas de projeto existentes (e.g. *Uniform Building Code*, *Southern Building Code*, *American National Standard A58.1*) não inclui recomendações para resistência a tornados. Entretanto, quando se tratam de estruturas cujos danos associados resultariam em conseqüências extremamente graves, os efeitos da ocorrência de tornados devem ser explicitamente considerados. Tais estruturas incluem usinas nucleares, conforme preconizado pela norma americana: "... estruturas, sistemas e componentes importantes para a segurança... projetados para resistir ao efeito de fenômenos naturais como... tornados... sem perda da capacidade de desempenhar suas funções de segurança". Nos Estados Unidos, a permissão para construção ou operação de usinas nucleares só é obtida se cumpridas as normas dos Guias Regulatórios da *USNRC (United States Nuclear Regulatory Commission)*.

Os efeitos de tornados podem ser divididos em três grupos, analisados em seguida:

1. Pressões de vento, causados pela ação direta do vento sobre a estrutura;
2. Pressões associadas com a variação do campo de pressão atmosférica na região do tornado;
3. Forças de impacto causadas pelo choque de projéteis arremessados.

2.2.1. Efeitos mecânicos sobre estruturas

2.2.1.1. Pressão direta de vento

O campo de vento tornádico é de difícil conhecimento, pois o fenômeno é de difícil previsão e curta duração. Modelos usuais para aplicações em engenharia assumem que o fenômeno é governado por cinco parâmetros: máxima velocidade de rotação, $V_{r_{\max}}$; velocidade de translação do tornado, V ; raio da máxima velocidade tangencial, r_{\max} ; queda de pressão, p_a ; e taxa de queda de pressão, dp_a/dt . Vários modelos teóricos baseados em fluxos hidrodinâmicos são propostos na literatura (e.g., Abdullah, 1955; Kuo, 1971). Modelos práticos são sugeridos (e.g., Bates e Swanson, 1967; Paddleford, 1969) a partir dos estudos de Hoecker (1960) sobre o tornado ocorrido em Dallas, 1957.

Obtém-se a pressão de vento na estrutura a partir da velocidade de vento incidente. As propostas existentes são semelhantes, não considerando, em sua maioria, efeitos de inércia. O procedimento descrito aqui é sugerido por Rotz et al (1974), admitindo o modelo experimental de campo de vento de Hoecker (1960), e considera que:

1. As velocidades e pressões não variam com a altura;
2. A componente tangencial, T , da velocidade é dada por:

$$T = \frac{r'}{r_{\max}} T_{\max} \quad (0 \leq r' \leq r_{\max}) \quad (2.1)$$

$$T = \frac{r_{\max}}{r'} T_{\max} \quad (r_{\max} \leq r' < \infty) \quad (2.2)$$

T_{\max} – máxima velocidade tangencial;

r_{\max} – raio da máxima velocidade tangencial.

3. A velocidade horizontal total, V_h , é dada por:

$$V_h = K.T \quad (2.3)$$

onde:

K – constante de proporcionalidade.

A pressão de vento p_w usada no projeto de estruturas ou em parte dessas é dada pela equação abaixo:

$$p_w = q_f C_p + q_m C_{pi} \quad (2.4)$$

onde:

C_p - coeficiente de pressão externa;

C_{pi} - coeficiente de pressão interna;

q_f - pressão externa básica;

q_m - pressão interna básica.

Valores dos coeficientes de pressão são sugeridos pelo *American National Standards Institute* (1982). Os valores de q_f e q_m podem ser calculados pelas expressões:

$$q_f = C_s^f p_{\max} \quad (2.5)$$

$$q_m = C_s^m p_{\max} \quad (2.6)$$

onde:

$$p_{\max} = \frac{1}{2} \rho V_{\max}^2 \quad (2.7)$$

Na equação anterior, ρ é a massa específica do ar e V_{\max} é a máxima velocidade horizontal do vento. C_{sf} e C_{sm} são coeficientes de redução para considerar a variação espacial do campo de vento do tornado e podem ser obtidos por metodologia específica proposta por Rotz et al (1974).

2.2.1.2. Efeito de sucção

Conhecido o campo de velocidade, o campo de pressão pode ser obtido através da equação ciclostática:

$$\frac{dp_a}{dr'} = \rho \frac{T^2}{r'} \quad (2.8)$$

Integrando-se a expressão acima, considerando T dado pelas equações 2.1 e 2.2, obtém-se a queda de pressão total para uma distância r' (Rotz et, 1974):

$$p_a(r') = \rho \frac{T_{\max}^2}{2} \left(2 - \frac{r'^2}{r_{\max}^2} \right) \quad (0 \leq r' \leq r_{\max}) \quad (2.9)$$

$$p_a(r') = \rho \frac{T_{\max}^2}{2} \frac{r_{\max}^2}{r'^2} \quad (r_{\max} < r' < \infty) \quad (2.10)$$

Em caso de estruturas não-ventiladas, a pressão interna não se altera com a passagem do tornado. Portanto, a queda de pressão total é $p_a(r')$. A máxima diferença de pressão ocorre quando $r' = 0$:

$$p_a^{\max} = \rho T_{\max}^2 \quad (2.11)$$

Para estruturas completamente abertas, a pressão se iguala quase que instantaneamente e a pressão de sucção é considerada, para efeitos práticos, nula. Para estruturas ventiladas, a pressão interna muda durante a passagem do tornado de um valor $p_i(t)$. Denotando por $p_a(t)$ a mudança de pressão externa, a diferença de pressão que age na estrutura é $p_a(t) - p_i(t)$.

O valor de $p_a(t)$ pode ser obtido substituindo $r' = Vt$, onde V é a velocidade de translação do tornado, nas equações 2.9 e 2.10. O valor de $p_i(t)$ pode ser estimado iterativamente (Rotz et al, 1974). Considerando uma estrutura de n compartimentos, a massa de ar no compartimento N ($N \leq n$) no tempo t_{j+1} é $W_N(t_{j+1})$ e pode ser escrita como:

$$W_N(t_{j+1}) = W_N(t_j) + [G_{N(in)}(t_j) - G_{N(out)}(t_j)]\Delta t \quad (2.12)$$

onde $G_{N(in)}$ e $G_{N(out)}$ representam as massas de ar que entram e saem do compartimento por unidade de tempo e Δt é o incremento de tempo. Tais taxas podem ser calculadas como função das pressões externa e interna ao compartimento N e de parâmetros geométricos relevantes, incluindo tamanho de aberturas. A pressão interna no compartimento N no tempo t_{j+1} , $p_{iN}(t_{j+1})$, pode ser escrita:

$$p_{iN}(t_{j+1}) = \left[\frac{W_N(t_{j+1})}{W_N(t_j)} \right]^k p_{iN}(t_j) \quad (2.13)$$

onde $k = 1,4$ é a razão entre o calor específico do ar à pressão constante pelo calor específico do ar a volume constante.

Um programa de computador para cálculo de carregamento em estruturas ventiladas é brevemente descrito por Rotz et al (1974, apud Simiu e Scanlan, 1986). O programa incorpora o seguinte modelo para a taxa de fluxo de massa, retirado de Binder (1949, apud Simiu e Scanlan, 1986).

$$G = 0,6C_c A_2 [2g\gamma_1(p_1 - p_2)]^{1/2} \quad (2.14)$$

onde:

$$C_c = \left\{ \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{2/k} \frac{k}{k-1} \left[\frac{1 - (p_2/p_1)^{(k-1)/k}}{1 - p_2/p_1} \right] \left[\frac{1 - (A_2/A_1)^2}{1 - (A_2/A_1)^2 (p_2/p_1)^{2/k}} \right] \right\}^{1/2} \quad (2.15)$$

onde: A_1 - área, do lado do compartimento 1, da parede entre os compartimentos 1 e 2; A_2 - área que conecta os compartimentos 1 e 2; C_c - coeficiente de compressibilidade; g - aceleração da gravidade; $k = 1,4$; p_1 - pressão no compartimento 1; p_2 - pressão no compartimento 2 ($p_2 < p_1$); e γ_1 - peso por unidade de volume no compartimento 1.

2.2.1.3. Impacto de projéteis

Para a estimativa da velocidade alcançada por objetos que se movem pela ação de forças aerodinâmicas induzidas por tornados, é necessária uma série de considerações, como:

- . características aerodinâmicas do objeto;
- . aspectos detalhados do campo de vento;
- . posição inicial do objeto em relação ao solo e ao centro do tornado e sua velocidade inicial.

Muito se encontra sobre o assunto na literatura (Fung, 1969; Paddleford, 1969; Simiu e Cordes, 1976, 1980; etc.). Os modelos existentes dividem-se em três grandes grupos, a saber: modelos determinísticos, modelos probabilísticos envolvendo simulações numéricas e modelos que consideram o transporte de projéteis como um processo de difusão de Markov, que assume que a probabilidade de transição de um ponto para outro independe da história prévia do sistema. Tal tópico não faz parte do escopo principal do presente trabalho, portanto não se estende a discussão sobre esses métodos.

2.2.2. Ações de tornados sobre usinas nucleares

Existem algumas publicações (Doan, 1970; McDonald et al, 1974; Rotz et al, 1974) que tratam de metodologias de projeto para usinas nucleares. Como o conhecimento sobre os campos de vento e de pressão do tornado é ainda bastante limitado, como citado anteriormente, tais metodologias são simplistas e conservadoras, não considerando efeitos de inércia, não-linearidades, etc. Tais metodologias são semelhantes e compostas dos três efeitos descritos anteriormente.

Em projetos de instalações nucleares, é elemento inicial importante a avaliação da probabilidade anual de vento ultrapassar um valor V_s , designado probabilidade de ameaça do tornado.

Nesse contexto, a primeira iniciativa da *USNRC* foi empregar a sistemática de Thom (1963), onde a probabilidade anual de um tornado atingir um ponto, dentro da região de interesse, poderia ser estimada pela expressão abaixo:

$$P(S) = n \frac{a}{A_0} \quad (2.16)$$

onde A_0 é a área de uma dada região local de interesse, n é a freqüência anual de tornados observada nesse local e 'a' é a área média de dano da trilha.

A seguir, assumindo a independência entre a ocorrência e a intensidade do tornado, Markee et al (1974) sugerem que a probabilidade anual de um ponto na região de interesse experimentar velocidades de vento superiores a V_s , $P(V > V_s)$ é dada pela expressão 2.17:

$$P(V > V_s) = P(V_s)P(S) \quad (2.17)$$

onde $P(V_s)$ é a probabilidade de a velocidade máxima de vento em qualquer tornado superar o valor V_s e $P(S)$ é dado pela equação 2.16.

Nos Estados Unidos, de acordo com Markee et al (1974), “para proteger adequadamente a saúde e a segurança públicas, a determinação das bases de projeto a tornados é baseada na premissa de que a probabilidade de ocorrência de um tornado que exceda a *Design Basis Tornado (DBT)* deve ser da ordem de 10^{-7} por ano por usina nuclear.” Ou seja:

$$P(V_s)P(S) = 10^{-7} \quad (2.18)$$

A partir de uma base de dados de 13 anos (1955-1967), emprega-se a equação 2.16 para avaliar $P(S)$, que substituída na equação 2.18 fornece valores de $P(V_0)$. Então, o valor V_0 é obtido da distribuição do vento ajustada aos registros de tornados. Esses resultados são então usados para identificar três regiões de probabilidade de ameaça de tornados, como pode ser visualizado na Figura 2.7. Os parâmetros de projeto para cada região são dados na Tabela 2.2.



Figura 2.7 – Divisão do território americano para definição de parâmetros de projeto a tornados – Simiu e Scanlan (1986)

Tabela 2.2 – Parâmetros de projeto para tornados nos Estados Unidos

Região	Velocidade máxima de vento, V_{max} (mph)	Velocidade rotacional máxima, V_{romax} (mph)	Velocidade de translação, V (mph)	Raio da velocidade tangencial máxima, r_{max} (ft)
I	360	290	70	150
II	300	240	60	150
III	240	190	50	150

A queda de pressão devido à passagem do tornado pode ser estimada através das equações 2.9. e 2.10. Os valores de projeto dados pela norma americana estão na Tabela 2.3:

Tabela 2.3 – Parâmetros de pressão de projeto para tornados nos Estados Unidos

Região	Queda de pressão total (psi)	Taxa de queda de pressão (psi/s)
I	3,0	2,0
II	2,25	1,2
III	1,5	0,6

Atualmente, os métodos de avaliação de probabilidade de ameaça exigem conhecimento de relação de área-intensidade e de ocorrência-intensidade para a

região geográfica que contém a instalação de interesse. Uma vez estabelecidas, o uso dessas relações nada muda na metodologia.

A *USNRC* prescreve ainda considerações sobre impacto de projéteis arremessados por tornados sobre usinas nucleares. Há uma lista de mísseis a serem considerados, incluindo desde rodas e tubos a automóveis. Há vários estudos de modelos que descrevem o comportamento desses objetos quando no campo de vento e de pressão do tornado, como já comentado em 2.2.1.3.

2.2.3. Ações de tornados sobre outras estruturas

A maioria dos trabalhos sobre tornados existentes na literatura é de enfoque meteorológico. A carência de dados sobre os campos de vento e pressão do fenômeno dificulta estudos mais detalhados sobre efeitos estruturais. Alguns trabalhos realizados com esse intuito são aqui brevemente comentados. Todos consideram a pressão direta de vento devida ao fenômeno.

Wen (1975) avalia os efeitos da incidência de um tornado modelado sobre um pórtico tridimensional de aço. Para isso, adapta a solução analítica de Kuo (1971) para os modelos de campo de vento e de pressão no tornado. O principal diferencial apresentado pelo autor é a avaliação dos efeitos de inércia. Como as variações nas componentes de velocidade são bastante grandes, tais efeitos se mostram relevantes, principalmente para a direção radial, sendo importantes também para a direção tangencial nas regiões próximas ao solo. O efeito combinado do carregamento dinâmico e da consideração da inércia resulta em uma amplificação de quatro vezes do deslocamento do topo em relação à resposta estática para a maior velocidade tangencial de vento. Geralmente, os efeitos são mais relevantes quando a trajetória do tornado coincide com o eixo da estrutura.

Dutta et al (2002) apresentam a resposta dinâmica de um pórtico bidimensional sujeito a um perfil de vento de um tornado real apresentado por Fujita (1976). Os autores concluem que os efeitos são mais danosos quando se considera a componente vertical de velocidade do que quando apenas se leva em conta o vento lateral. Estudos são feitos também através da variação da velocidade de translação. Como esta altera a função de tempo, as maiores respostas serão

observadas quando a frequência da excitação se aproximar da frequência de ressonância do sistema estrutural.

Outro tipo de estrutura que recebe atenção de pesquisadores são as torres de transmissão de energia elétrica, pois são constantemente vítimas de fenômenos meteorológicos, podendo acarretar danos como interrupção de fornecimento, causando grandes prejuízos. Savory et al (2001) estudam a resposta de uma dessas torres quando submetida a um tornado modelado pelas equações propostas por Wen (1975), a partir do trabalho de Kuo (1971). Gráficos de deslocamentos e esforços são apresentados. Os maiores deslocamentos, assim como a ruptura da estrutura, ocorrem na direção tangencial, perpendicular à trajetória do tornado, direção essa sujeita às maiores velocidades de vento.

Eberline et al (1991) reproduzem numericamente a falha de um sistema condutor de carvão em estrutura de aço atingido por um tornado. Para isso, utilizam-se do modelo de campo de vento proposto por Hoecker (1960). A análise é não-linear e utiliza o método dos elementos finitos. O sistema mostra bastante sensibilidade à máxima velocidade rotacional considerada para o tornado, apresentando vários pontos de falha para velocidades superiores a 380 Km/h.