

2 Revisão bibliográfica

2.1 O evento meteorológico

2.1.1 Considerações gerais

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 uma trilha 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, pendente de uma nuvem cúmulo-nimbo. O Glossário de Meteorologia da *American Meteorological Society* (2000) assim define tornado: “uma coluna de ar com rotação violenta e em contato com o solo, pendente de uma nuvem cumuliforme ou sob uma nuvem cumuliforme e geralmente, mas nem sempre, visível como um funil de condensação”. 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 originado.



Figura 2.1 - Exemplo de tornado na Flórida, EUA, 1991 (foto de Fred Smith)

Um detalhe importante, consequência da própria definição de tornado, é o fato de a circulação estar em contato com o solo. Quando o funil rotativo de condensação não atinge o solo, temos uma nuvem-funil, não um tornado, como mostrado na Figura 2.2. A circulação pode, ainda, atingir o solo, mesmo sem que o funil de condensação o faça, caracterizando um tornado.



Figura 2.2 – Funil rotativo de condensação em Xanxerê – SC (2005)

Há dois tipos de tornados. O primeiro, tipo 1, formado a partir de tempestade tipo supercélula, é mais intenso. Tais tempestades possuem longa duração (>1h) e apresentam uma corrente de ar ascendente com rotação. São as tempestades convectivas mais intensas que existem. Ocorrem em latitudes médias e subtropicais. O segundo, do tipo 2, corresponde àqueles tornados, mais fracos, gerados por nuvens tipo cúmulo-nimbo não-supercélulas, de curta duração, na fase inicial de seu desenvolvimento. Essas tempestades não são confinadas às latitudes médias e subtropicais.

2.1.2 Situações atmosféricas favoráveis à formação de tornados

As situações propícias à formação de tornados são condicionadas por inúmeros fatores meteorológicos distribuídos em diversas escalas de movimento, desde a escala sinótica (da ordem de centenas de quilômetros e com várias horas de duração) até a escala de nuvem (da ordem de poucos quilômetros e alguns minutos de duração). Tais fatores dificilmente estão presentes todos ao mesmo tempo em um dado ponto e, por isso, tornados são fenômenos meteorológicos raros.

Para a formação de uma supercélula, o primeiro fator básico é a presença de instabilidade termodinâmica, necessária para a ocorrência de qualquer tipo de tempestade. A mesma consiste nos movimentos ascendente e descendente de correntes de ar causados pelo resfriamento em baixos níveis e aquecimento em níveis médios. Outra condição é o cisalhamento vertical de vento entre a superfície e aproximadamente 5 km de altura, gerando vorticidade horizontal. Essa, juntamente com a variação da velocidade vertical ascendente, pode levar à formação de mesociclones ou mesoanticiclones.

Para haver cisalhamento vertical do vento em grande escala, é necessária grande variação horizontal de temperatura, isto é, uma atmosfera baroclínica. A atmosfera em latitudes médias e subtropicais é bem mais baroclínica do que a atmosfera em latitudes tropicais/equatoriais. Por isso, supercélulas (e tornados tipo 1) formam-se em latitudes mais altas. O fenômeno 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. Asnani (1993) faz referência desde condições de trovoadas severas até o nível de tornado devido à forte instabilidade convectiva.

Os tornados tipo 2 geralmente se formam no estágio inicial da nuvem convectiva, quando a corrente ascendente está ganhando força. Não requerem, portanto, cisalhamento vertical de vento na escala sinótica. Por isso, são observados também na região tropical/equatorial. Podem assim, inclusive, ocorrer em qualquer lugar do Brasil.

2.1.3 Ocorrências

2.1.3.1 No mundo

Como já mencionado, o fenômeno é mais freqüente nas latitudes extratropicais do que nos trópicos. Dentro da faixa tropical, entre 20°N e 20°S, os tornados mostram-se mais fracos, desenvolvendo-se, na maioria das vezes, como trombas de água cruzando o litoral (Asnani, 1993). 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 2.3, de Brooks et al (2006), mostra a quantidade anual de dias sob condições favoráveis à ocorrência de tornados no período entre 1980 e 1999. Praticamente, nota-se que tais condições ocorrem somente em zonas de clima temperado.

Na América do Sul, o país que contabiliza mais registros é a Argentina, seguido 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. No Paraguai a matéria é pouco documentada. Taxas de ocorrência de tornados baseadas em um banco de dados de mais de 50 anos

para o caso argentino são mostradas na Figura 2.4, extraídas de Schwarzkopf et al (1993, apud Goliger e Milford, 1998). A região 'A' apresenta probabilidade anual de $2 \cdot 10^{-4}/\text{km}^2$, correspondente ao dobro da probabilidade em 'B' e ao quádruplo de 'C'. A área hachurada indica regiões onde ventos de alta intensidade, incluindo tornados, ocorrem.

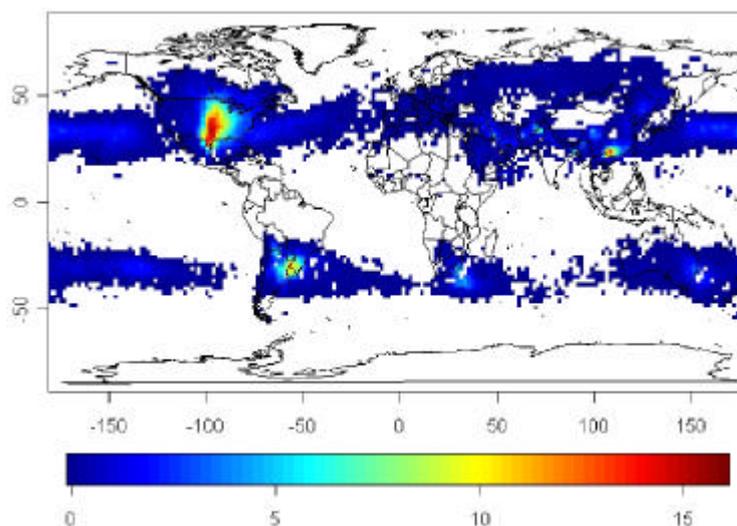


Figura 2.3 - Dias anuais com condições favoráveis à ocorrência de tornados no período de 1980 a 1999 – Brooks et al (2006)

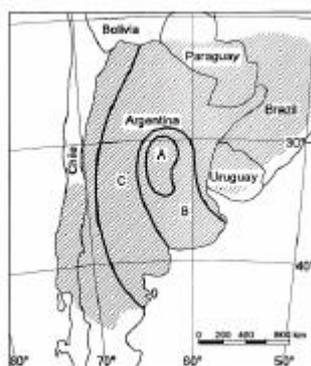


Figura 2.4 – Ocorrência de tornados na Argentina – Goliger e Milford (1998)

2.1.3.2 No Brasil

Dyer (1991) apresenta 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 1970, o autor, pioneiro no estudo de tornados no Brasil, identifica 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 apresentam variações, sendo que o mais longo apresenta comprimento de cerca de 70 km, enquanto que a maior largura observada é de 2 km, aproximadamente. Exemplos de tornados ocorridos no território nacional são mostrados nas Figuras 2.5 e 2.6. Este último, ocorrido no mar, é também denominado tromba d'água.



Figura 2.5 – Tornado ocorrido em Indaiatuba, SP, 2005 – Rodovia das Colinas S.A.



Figura 2.6 – Tromba d'água na Bacia de Campos, RJ, próximo à plataforma P-17, 2001

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.

Dadas as condições favoráveis à ocorrência de tornados e a extensão do território brasileiro, que possui regimes atmosféricos distintos, pode-se dividir o mesmo em dois setores, no contexto de atividades de tempestades severas: tropical e subtropical. O setor tropical, com ênfase sobre a bacia amazônica, apresenta escoamento de leste em escala sinótica, com teor de umidade elevado e moderada instabilidade termodinâmica. Apesar de ser a região brasileira que apresenta a maior atividade convectiva, a ausência de variação horizontal da temperatura em escala sinótica e, conseqüentemente, de força cortante de vento intensa, faz com que a bacia amazônica não seja uma região propícia à formação de supercélulas, o que faz com que os tornados sejam menos intensos.

Já o cenário para o setor subtropical é diferente, sendo caracterizado pelo escoamento de oeste, que, em determinadas ocasiões, pode ser acompanhado de ingredientes necessários à formação de supercélulas (Nascimento, 2004), como baroclinia, instabilidade termodinâmica, oferta de umidade em baixos níveis e mecanismo de disparo das tempestades (por exemplo, o avanço de um sistema frontal). Assim, apesar de registrarem menor atividade de convecção quando comparadas com a Amazônia, as regiões Sul e Sudeste do Brasil apresentam condições mais propícias para a formação de supercélulas e, por conseguinte, de tornados mais intensos.

Levando-se em conta ainda a orografia, definem-se assim dois ambientes principais onde tornados são possíveis:

- Setor Tropical (STROP): região da Planície Amazônica ao norte de 10° S;
- Setor Subtropical (SSUBT): região ao sul de 20° S, particularmente os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Mato Grosso do Sul, Rio de Janeiro e sul de Minas Gerais.

Considerando-se esses dois setores principais do território brasileiro onde tornados são possíveis, as localizações das ocorrências de tornados com a respectiva classificação de intensidade segundo a Escala Fujita (a ser apresentada

em 2.1.5), e delimitando uma área propícia a essas ocorrências, sugere-se uma regionalização do ambiente atmosférico correspondente em três províncias tornádicas: Província da Bacia Amazônica – PBA, Província da Bacia Paraná-Paraguai-Uruguai (do Prata) – PBP, Província da Bacia do Atlântico Sul-Sudeste – PBASSE.

As Figuras 2.7 e 2.8 apresentam, respectivamente, mapas com a conformação das bacias hidrográficas do território nacional e a divisão política da América do Sul e, sobre ambos, a plotagem das ocorrências de tornados com a respectiva classificação de intensidade segundo a Escala Fujita. As províncias tornádicas da Bacia Amazônica e da Bacia do Prata estão representadas esquematicamente por poligonais, enquanto a Província da Bacia do Atlântico Sul-Sudeste é ilustrada pela área em verde.

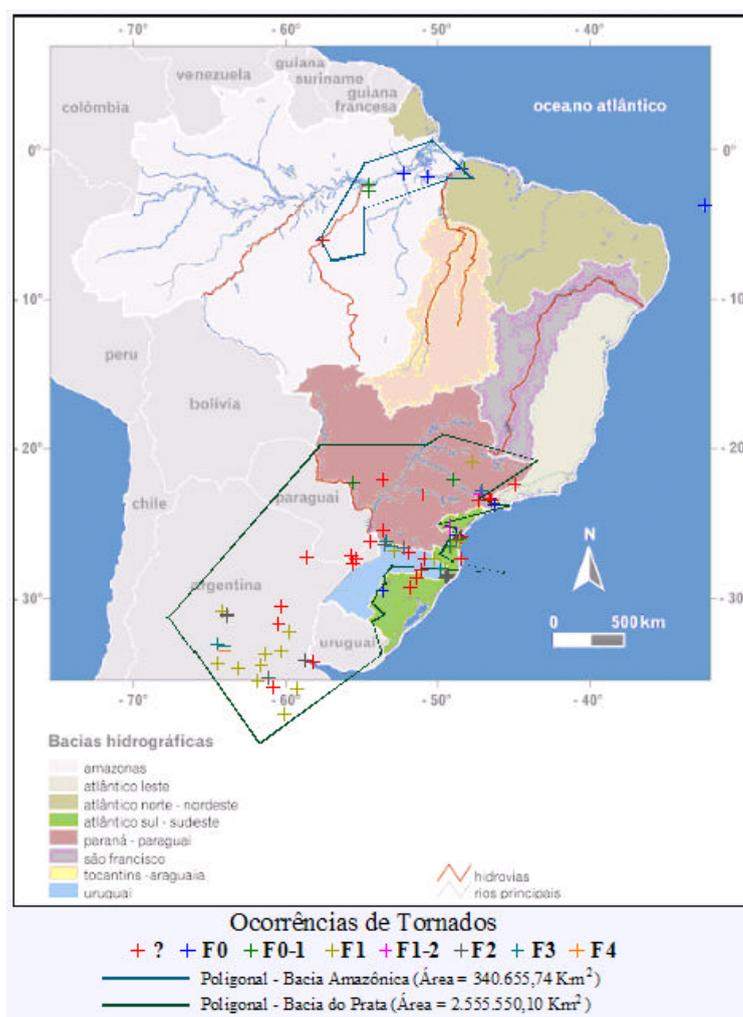


Figura 2.7 – Ocorrências de tornados e conformação das bacias hidrográficas –

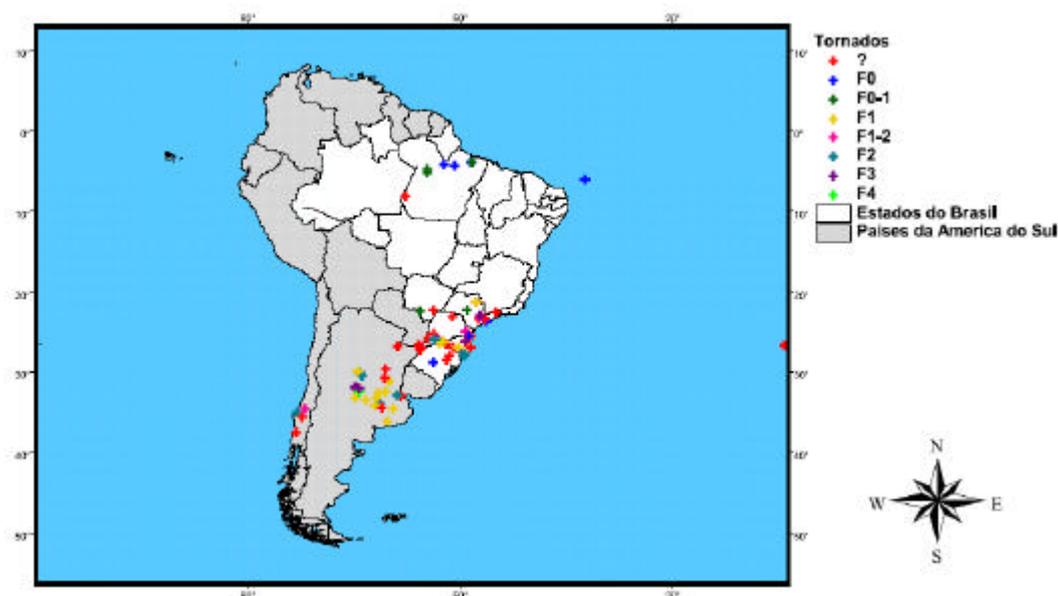


Figura 2.8 – Ocorrência de tornados na América do Sul – Relatório 001/4 (2007)

2.1.4 O movimento e a estrutura do tornado

O movimento de translação do tornado essencialmente acompanha o deslocamento da tempestade que o forma. Isso ocorre porque o tornado está diretamente associado, e deve sua existência, à corrente ascendente da tempestade, a qual promove a inclinação de vórtices horizontais e/ou o estiramento vertical de vórtices em baixos níveis, o que essencialmente gera e mantém o tornado (Klemp, 1987). A velocidade translacional pode variar entre 0 e 100 km/h. No hemisfério norte é, na maioria das vezes, mas nem sempre, no sentido sudoeste-nordeste. No hemisfério sul, a tendência é que se desloquem no sentido noroeste-sudeste. Tais fatos são ilustrados pelas trilhas mostradas nas Figuras 2.9 e 2.10.

Apesar dessa tendência de comportamento, o movimento de um tornado é incerto, conforme exemplo mostrado na Figura 2.11. Há casos reportados de tornados que permanecem estacionários por algum momento e, então, mudam sua direção bruscamente (Sherman, 1973; Melaragno, 1982). No caso de um tornado ocorrido na Índia, em 1987, há uma reversão no movimento de 180°, seguida por um deslocamento e outra reversão, desta vez em 90° (Agarwal et al, 1997).



Figura 2.11 – Mudança brusca na direção de movimento do tornado, Iowa, 1999 –
National Weather Service (2003)

Quanto à estrutura, o tornado é um vórtice, geralmente ciclônico, com baixa pressão em seu centro. A queda de pressão pode chegar a 100 mb.

Lewellen (1976) considera cinco regiões na estrutura de um tornado (Figura 2.12):

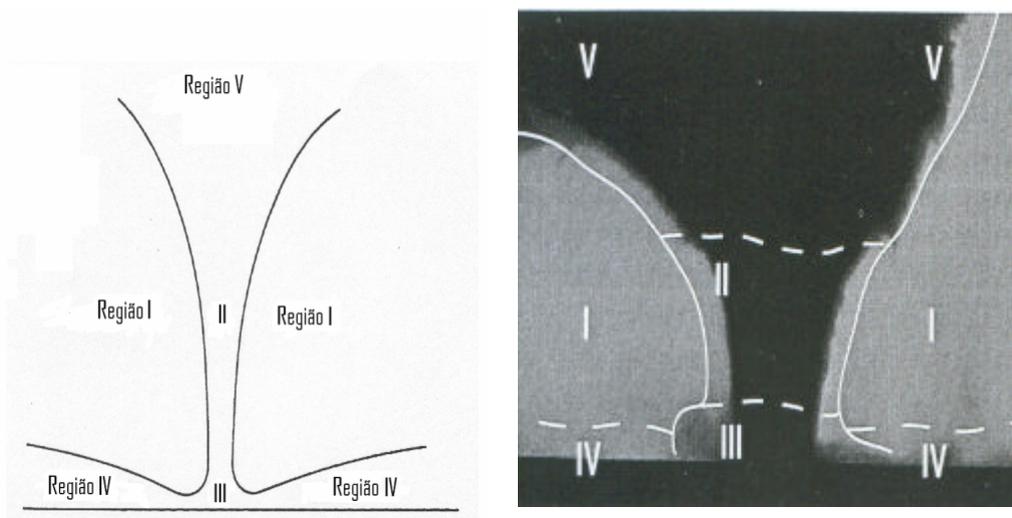


Figura 2.12 – Estrutura do tornado – adaptada de Lewellen (1976); foto: Willhelmsom e Wicker (2001)

- Região I: Escoamento externo;
- Região II: Núcleo do vórtice;
- Região III: Escoamento de canto;
- Região IV: Camada limite ou camada de influxo;
- Região V: Pluma convectiva.

O escoamento externo, região I, estende-se radialmente por cerca de 1 km a partir da “parede” do núcleo. Nessa região, o ar aproxima-se do núcleo e sobe ao encontrar a região II. O ar da região I não consegue penetrar na região II porque a força do gradiente horizontal de pressão (que acelera o ar na direção do tornado) não consegue superar a força centrípeta na fronteira da região II. O escoamento dessa região não é o que mais ameaça as edificações e estruturas em superfície (mas pode ser uma ameaça para a aviação nas proximidades do tornado; por exemplo, helicópteros tentando aproximação).

O núcleo, região II, estende-se para fora a partir do eixo de rotação até aproximadamente o setor de velocidade tangencial mais alta. Seu raio varia de dezenas a centenas de metros. Núcleos pequenos estão aproximadamente em rotação de corpo sólido. Núcleos maiores podem ter velocidade angular maior conforme se afasta do seu eixo central.

O movimento vertical dentro da região II é ascendente ou uma combinação de movimentos ascendente e descendente. No caso de presença de corrente descendente, têm-se pontos de estagnação na fronteira entre os movimentos ascendente e descendente. Como não existem trocas de ar entre as regiões I e II, o ar dentro do núcleo advém das regiões III, IV ou V. O escoamento da região II não afeta diretamente edificações e estruturas em superfície, mas detritos e escombros leves adentrando essa região podem ser carregados para distâncias maiores. Em trombas d’água (tornados formados na água), isso pode incluir peixes. Tem-se ainda que o escoamento dessa região está em balanço ciclostrófico (Davies-Jones et al, 2001), que é o equilíbrio entre as forças centrípeta e de gradiente de pressão.

O escoamento de canto, região III, é o desvio vertical abrupto do influxo vindo da região IV. É nessa região que a maior destruição é causada, mísseis são gerados, detritos e escombros são lançados ao ar. Lewellen (1976) sugere que a

velocidade tangencial máxima do tornado ocorre na metade superior do escoamento de canto. Observações da estrutura interna do tornado feitas com radar Doppler parecem confirmar isso (Wurman, 2002). Processos que ocorrem na região III podem levar à formação de subvórtices (subtornados), com poder destrutivo maior do que o do tornado em si. Tal formação depende da fração do volume do fluxo em excesso na camada limite, que é avaliada pelo parâmetro de giro, S , definido como a razão entre a vorticidade vertical (que é uma medida de rotação do fluido) e a convergência horizontal do vento ambiental — por “ambiente”, entenda-se o ambiente externo vizinho ao vórtice, que tem influência direta sobre o comportamento do mesmo. O parâmetro de giro é avaliado pela equação a seguir:

$$S = \frac{(\omega r_{\max})}{(2 a_h h')} = \frac{T_{\max}}{w_0} \quad (2.1)$$

onde ω é a vorticidade vertical do ambiente, a_h é a convergência horizontal do vento no ambiente, T_{\max} é a velocidade tangencial do influxo em r_{\max} , que é o raio do núcleo tornádico, w_0 é a velocidade vertical média no topo do domínio e h' é a altura até o topo do domínio.

A Figura 2.13 ilustra como o escoamento de canto em um vórtice semelhante a um tornado tem seu comportamento qualitativamente representado pelo parâmetro S . Quando S tende a zero (isto é, quando não há a formação de um vórtice; $\omega \approx 0$ ou $T_{\max} \approx 0$), a camada limite no escoamento de canto sofre uma separação, com o influxo circundando uma região de estagnação (Figura 2.13a). Um valor pequeno de S , indicando a presença de alguma rotação, é suficiente para manter o escoamento de canto rente ao solo (Figura 2.13b). Esse é o caso clássico associado, por exemplo, a um tornado com uma única célula de rotação.

Para valores de S da ordem de grandeza de 1, o fluxo vertical ascendente de ar na corrente de canto passa a ser mais intenso do que o suportado pela condição de contorno superior para a velocidade vertical (dada por w_0). Como consequência, uma corrente descendente tem de se formar no eixo do vórtice (Figura 2.13c) para que, em média, a velocidade vertical ao longo do topo do domínio satisfaça a condição de contorno superior. Há, assim, em um ponto acima da superfície, uma transição brusca do escoamento entre corrente ascendente e

descendente. Nos níveis acima dessa região de transição, o vórtice apresenta um padrão de duas células de rotação.

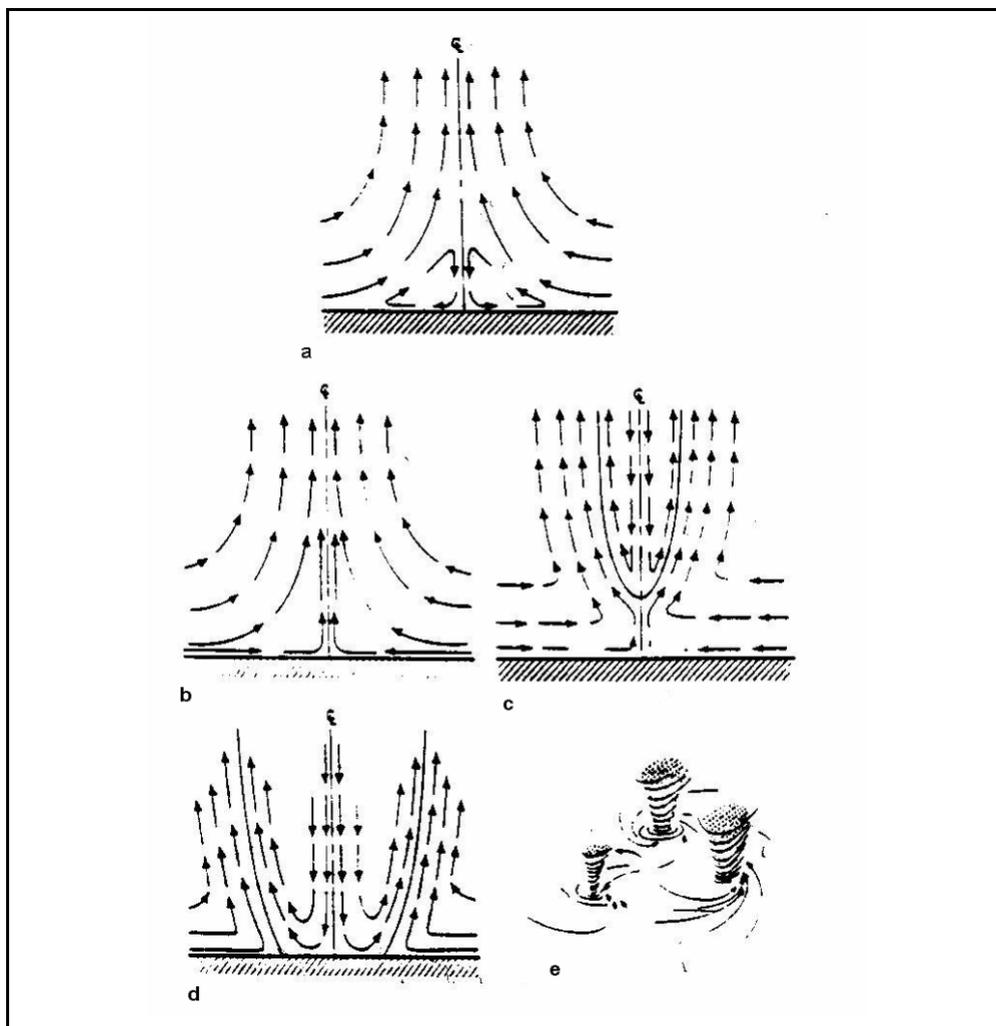


Figura 2.13 - Ilustração esquemática de tipos de vórtice de canto - Lewellen (1993)

Para valores mais altos de S , a corrente descendente pode atingir a superfície (Figura 2.13d), e nesse caso a região de corrente ascendente no vórtice em superfície não se dá mais em um ponto central de convergência (como no caso da Figura 2.13b), mas ao longo de um anel em torno do centro do vórtice. Esse caso passa a apresentar o padrão de duas células de rotação ao nível do solo e representa aproximadamente o caso de um tornado com dois subvórtices girando em torno de um eixo principal. Finalmente, se S continuar a aumentar, podem ocorrer instabilidades ao longo do anel de correntes ascendentes e um número maior de subvórtices pode ocorrer (Figura 2.13e). Imagens de um radar Doppler

móvel mostrando os subvórtices de um tornado ocorrido em Oklahoma em 1999 podem ser vistas na Figura 2.14.

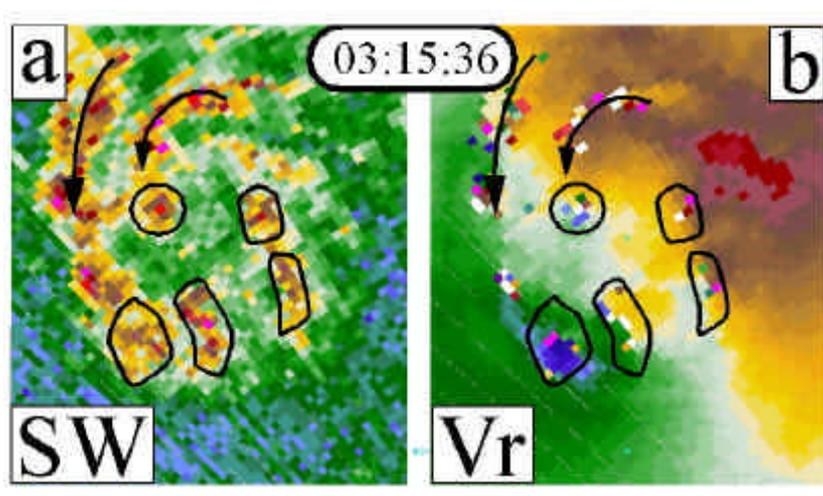


Figura 2.14 – Imagens do radar Doppler móvel, mostrando subvórtices no tornado de Oklahoma, em 1999 – Wurman (2002)

Fica evidente que a complexidade do escoamento do vento em superfície no vórtice será tanto maior quanto maior for S . O último caso representa a situação de vários subvórtices tornádicos, que é a condição de maior poder destrutivo em superfície, como, por exemplo, no caso do tornado na cidade de Indaiatuba/SP. Acredita-se que a velocidade de movimento dos subvórtices em torno do eixo do tornado varie entre 50 e 100% da velocidade tangencial do mesmo (Wurman, 2002).

A região IV, de influxo, próxima à superfície, é caracterizada pela redução da velocidade tangencial por causa da força de atrito existente entre o escoamento e o solo. Desfaz-se então o balanço ciclostrófico, pois a força do gradiente de pressão torna-se bem mais intensa do que a força centrípeta. Portanto, o escoamento perto da superfície nas vizinhanças de um tornado é acelerado na direção do mesmo. O vento na camada de influxo pode ser intenso o suficiente para causar danos significativos em edificações e estruturas. Ou seja, uma estrutura não precisa ser atingida diretamente pelo núcleo tornádico para sofrer danos (Figura 2.15).



Figura 2.15 – Danos a construções em superfície causados pela velocidade radial dentro da camada limite - *Federal Emergency Management Agency, FEMA, 1999*

A Região V é a chamada nuvem ou tempestade-mãe, que impõe a condição de contorno superior e alimenta de energia todo o processo pela transformação de sua energia potencial em energia cinética do vento no vórtice do tornado, muito perto da superfície, onde é possível causar grande destruição. O momento angular do vórtice primário é transferido e dissipado de forma turbulenta no contorno superior.

2.1.5 A escala de Fujita

Uma característica importante relacionada ao estudo de tornados é a necessidade de escalas que permitam estimar a velocidade do vento, pois essa raramente pode ser medida de modo direto. A escala mais utilizada é a proposta

por Fujita (1971), a partir de um intenso levantamento fotogramétrico, feito desde o início dos anos 60, da destruição causada por tornados e micro-explosões nos Estados Unidos. Baseado na ampla experiência adquirida com esses levantamentos, ele propõe uma escala de classificação de tornados. A idéia consiste em dividir a intensidade do vento tornádico em categorias, a partir da conexão da velocidade B12 da Escala Beaufort, de 1805, com o número Mach 1, através de uma curva suave (Figura 2.16):

$$V_{\max} = 6,3(F_N + 2)^{1,5} \quad (2.2)$$

onde V_{\max} (em m/s) é o limite inferior de cada categoria F_N .

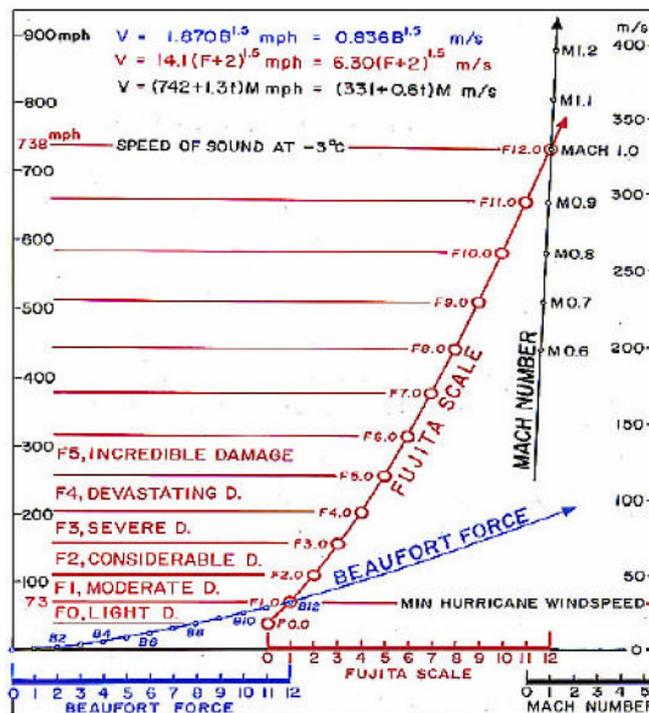


Figura 2.16 – A escala de Fujita (1971)

F1 corresponde a B12 e F12 a Mach1 (a -3° C). A velocidade na escala de Fujita (ou Escala-F) refere-se ao vento máximo que é sustentado por um quarto de milha (cerca de 402 m). Portanto, velocidades superiores a 80 m/s na Escala Fujita correspondem a rajadas de vento (duração menor que 5 s).

Assim, 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 (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Escala de Fujita

Escala	Denominação	Velocidade máxima de vento, V_{\max} (m/s)	Danos
F0	Tornado Rajada	17 - 32	Danos a antenas, quebra de galhos de árvores
F1	Tornado Moderado	32 - 50	Danos a fundações, movimentação de carros
F2	Tornado Significante	50 - 70	Grandes árvores arrancadas, objetos leves arremessados
F3	Tornado Severo	70 - 92	Carros pesados transportados, trens virados
F4	Tornado Devastador	92 - 116	Casas frágeis transportadas, carros arremessados
F5	Tornado Inacreditável	116 - 142	Casas fortes desintegradas, carros arremessados por até 100 m
F6-F12	Tornado Inconcebível	142 - V_{som}	Danos inconcebíveis

A intensidade e o tamanho do rastro de destruição de um tornado estão relacionados, pelo menos estatisticamente. Quando a largura e/ou o comprimento da trilha aumenta, maior a probabilidade de se ter um tornado mais intenso na Escala-F (Figura 2.17). Portanto, é razoável assumir que os dados geométricos da trilha de um tornado sejam um indicador de sua intensidade. Não se recomenda, no entanto, a aplicação desses valores estatísticos diretamente a tornados específicos (*National Weather Service*, 2003)

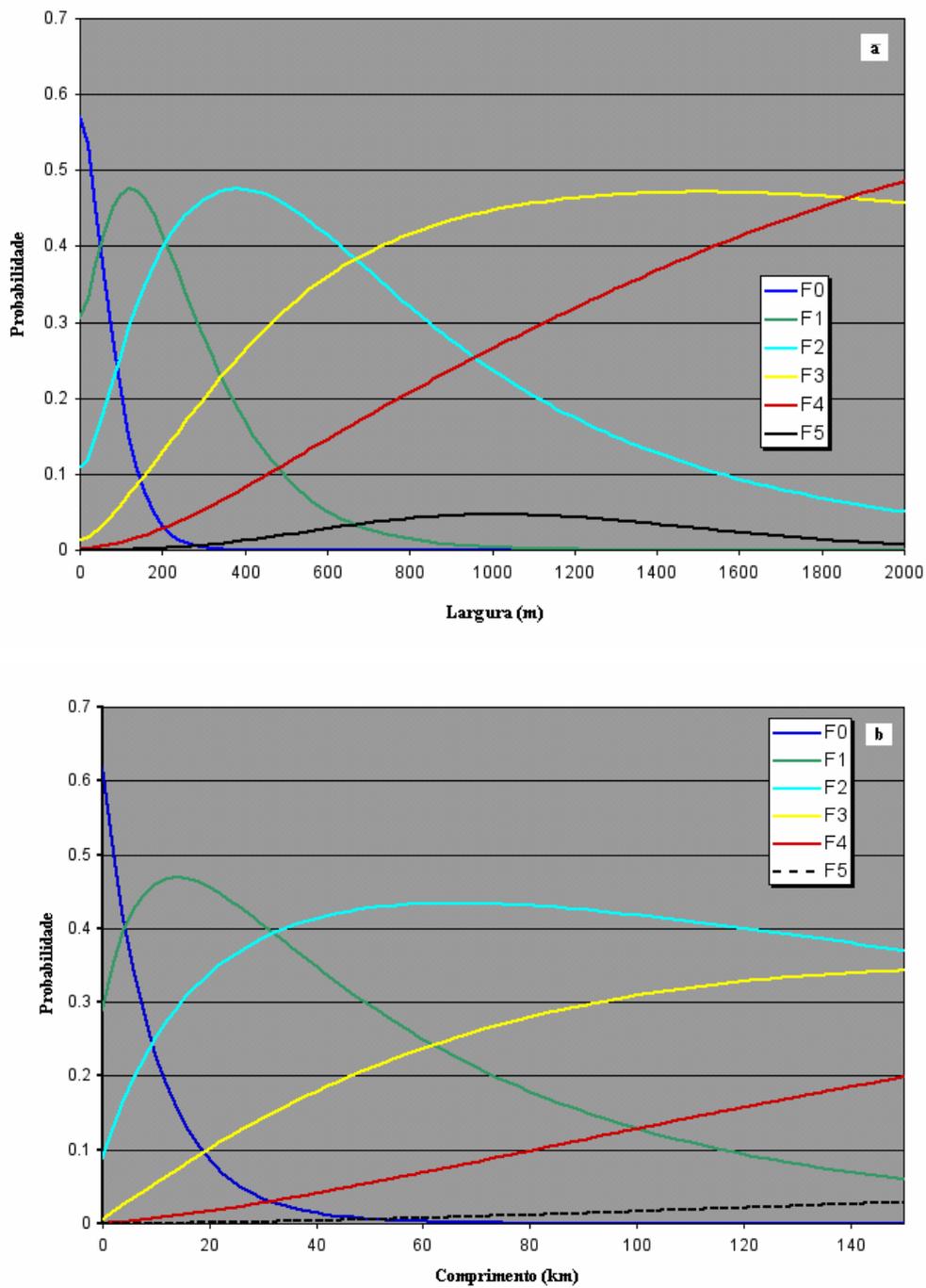


Figura 2.17 – Relação entre intensidade, largura (a) e comprimento (b) das trilhas tornádicas – adaptada de *National Weather Service* (2003)

A escala de Pearson, que complementa a Escala-F, também tem seis níveis que indicam o comprimento e a largura médios da trilha (rastros) de dano. Um tornado pode ser convenientemente classificado pelo seu número FPP, onde a letra F associa-se à intensidade na escala de Fujita, enquanto a primeira e a

segunda letra P representam, respectivamente, o comprimento e a largura da trilha segundo a escala de Pearson. Por exemplo, um tornado 3,2,4 apresenta intensidade F3, comprimento de trilha P2 e largura P4. A Tabela 2.2 mostra as classificações FPP.

Tabela 2.2 - Escala Fujita-Pearson

Categoria	Comprimento (km)	Largura (m)
P0	0,5-1,6	5,5-16,5
P1	1,6-5	16,5-50,3
P2	5-16	50,3-161
P3	16-50	161-483
P4	50-161	483-1609
P5	161-507	1609-5149

T. Fujita reconhece que há uma limitação séria em sua escala no que diz respeito à estimativa da velocidade do vento baseada no grau de destruição de estruturas. Estruturas fracas podem sofrer grande destruição, mesmo com ventos não muito intensos. Em 1992, ele propõe uma modificação em sua escala, que considera o tipo de estrutura para a classificação na Escala-F.

Ainda assim, grande insatisfação nas comunidades de meteorologia e engenharia em relação à escala de Fujita persiste. Sente-se a necessidade de maior detalhamento nos indicadores de danos, de consideração da qualidade e da variabilidade da qualidade das construções e de uma melhor correlação entre danos e velocidade do vento. Estudos mais recentes (e.g., Phan e Simiu, 1998) mostram que ventos de 420 km/h não são necessários para destruir completamente uma casa bem construída e espalhar seus escombros. Velocidades abaixo desse limiar já seriam capazes de causar esse tipo de destruição.

Em 2001, uma equipe de especialistas (engenheiros, meteorologistas e arquitetos) com ampla experiência em análise de danos causados por ventos nos Estados Unidos reúne-se para estabelecer a chamada Escala de Fujita Aprimorada (Escala-EF). Os principais objetivos são: identificar indicadores de danos mais detalhados; discriminar graus de destruição para cada um desses indicadores; melhorar a estimativa de velocidades de vento para cada categoria de tornado, mas

sem comprometer a longa série histórica de classificação baseada na Escala-F original. Chegam então a uma classificação que preserva a sistemática inicial, alterando apenas os limiares de velocidade de vento para cada categoria (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 – Escala de Fujita Aprimorada

Classificação na escala-F	Classificação correspondente na escala-EF	Novos limiares de velocidade do vento (m/s)
F0	EF0	29-35
F1	EF1	35-50
F2	EF2	50-63
F3	EF3	63-86
F4	EF4	86-90
F5	EF5	>90

2.2 Considerações de projeto

Os primeiros estudos sobre tornados são remotos, do final do século XIX. Finley (1884, apud Dutta et al, 2002) apresenta um trabalho sobre as características de seiscentos tornados. Esses primeiros estudos dão maior ênfase aos aspectos meteorológicos e à estimativa de danos. Quando se pensa em avaliação de efeitos mecânicos sob o ponto de vista da engenharia, torna-se de fundamental importância o conhecimento dos campos cinemáticos de vento e de pressão dos tornados. Tal conhecimento é de difícil obtenção, dada a imprevisibilidade e curta duração do fenômeno, o que torna bastante trabalhosa a realização de medições diretas. Estudos nesse sentido iniciam-se na década de 1960, com os trabalhos pioneiros de Hoecker (1960, 1961). Através de observações de campo do tornado de Dallas, ocorrido em 1957, o autor chega a conclusões interessantes sobre a estrutura do vórtice, notando que o mesmo assemelha-se 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 daí, a velocidade tangencial é inversamente proporcional à distância ao centro do

tornado. Para pequenas alturas, menores que 45 m, tal comportamento desvia-se um pouco disso, dada a interferência do solo. A velocidade tangencial máxima ocorre na fronteira do núcleo. Trabalhos semelhantes são desenvolvidos nessa mesma década. Glassler (1960) estuda a aplicabilidade da equação ciclostrófica 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 adotado no que segue.

Estudos de engenharia, porém, iniciam-se 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), Chang e Wan (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 projetadas a tornados devam ser dimensionadas para acréscimos de pressão dinâmica de 20 a 70% da média.

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 dos efeitos de tornados sobre estruturas simples, com o objetivo de propor uma metodologia de projeto. Ainda em relação à 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 da parcela de inércia na solicitação (eq. 3.8), essenciais em fluxos tornádicos, pois os mesmos apresentam variações bruscas das componentes de velocidade, o que resulta em elevados gradientes. Mehta e McDonald (1986) apontam a dificuldade de medição de velocidades e pressões no tornado e a conseqüente falta de conhecimento sobre

esses campos. Ainda segundo os autores, devido a esse fato, análises dinâmicas dos mesmos sobre estruturas são raras.

Estudos geralmente têm considerado que o custo associado à execução de estruturas usuais projetadas para suportar efeitos de tornados é significativamente maior que o risco associado ao fenômeno. Por essa razão, a maioria das normas de projeto (e.g. *Uniform Building Code*, *Southern Building Code*, *American National Standard A58.1*) não inclui recomendações para resistência a tornados. Entretanto, quando se trata de estruturas cujos danos associados resultam em conseqüências extremamente graves, os efeitos da ocorrência de tornados devem ser explicitamente considerados. Para usinas nucleares, por exemplo, a norma americana preconiza que “... 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 Reguladores da *USNRC (United States Nuclear Regulatory Commission)*.

As ações mecânicas de tornados sobre estruturas podem ser divididas em três grupos, analisados a seguir:

- 1) Pressões de vento, causadas pela ação direta sobre a estrutura;
- 2) Sucções associadas à 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

Modelos usuais para aplicações em engenharia assumem que o tornado é governado por cinco parâmetros: velocidade de rotação máxima, $V_{r\max}$; velocidade de translação do tornado, V ; raio da velocidade tangencial máxima, 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 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:

$$T = \frac{r'}{r_{\max}} T_{\max} \quad (0 \leq r' \leq r_{\max}) \quad (2.3)$$

$$T = \frac{r_{\max}}{r'} T_{\max} \quad (r_{\max} \leq r' < \infty) \quad (2.4)$$

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

$$V_h = K.T \quad (2.5)$$

onde K é uma constante de proporcionalidade.

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

$$p_w = q_f C_p + q_m C_{pi} \quad (2.6)$$

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:

$$q_f = C_{sf} p_{\max} \quad (2.7)$$

$$q_m = C_{sm} p_{\max} \quad (2.8)$$

onde:

$$p_{\max} = \frac{1}{2} \rho V_{\max}^2 \quad (2.9)$$

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. A eq. (2.9), com a massa específica do ar colocada implicitamente, é constante também na NBR 6123 - Forças devidas ao vento em edificações (ABNT, 1988).

2.2.1.2 Efeito de sucção

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

$$\frac{dp_a}{dr'} = \rho \frac{T^2}{r'} \quad (2.10)$$

Integrando-se a expressão acima, considerando T dado pelas eqs. (2.3) e (2.4), obtém-se a queda de pressão total para uma distância r' (Rotz et al, 1974):

$$p_a(r') = \rho \frac{T_{\max}^2}{2} \left(2 - \frac{r'^2}{r_{\max}^2} \right) \quad (0 \leq r' \leq r_{\max}) \quad (2.11)$$

$$p_a(r') = \rho \frac{T_{\max}^2}{2} \frac{r_{\max}^2}{r'^2} \quad (r_{\max} \leq r' < \infty) \quad (2.12)$$

No 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 $r' = 0$:

$$p_a^{\max} = \rho T_{\max}^2 \quad (2.13)$$

Para estruturas completamente abertas, a pressão iguala-se quase instantaneamente e a sucção é considerada, para efeitos práticos, nula. Em estruturas ventiladas, a pressão interna muda durante a passagem do tornado por um valor $p_i(t)$. Denotando-se 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-se $r' = Vt$, onde V é a velocidade de translação do tornado, nas eqs. (2.11) e (2.12). O valor de $p_i(t)$ pode ser estimado iterativamente (Rotz et al, 1974). Considerando-se 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:

$$W_N(t_{j+1}) = W_N(t_j) + [G_{N(\text{in})}(t_j) - G_{N(\text{out})}(t_j)]\Delta t \quad (2.14)$$

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

$$p_{iN}(t_{j+1}) = \left[\frac{W_N(t_{j+1})}{W_N(t_j)} \right]^k p_{iN}(t_j) \quad (2.15)$$

onde $k = 1,4$ é a razão entre os calores específicos do ar à pressão e a volume constantes.

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).

$$G = 0,6C_c A_2 [2g\gamma_1(p_1 - p_2)]^{1/2} \quad (2.16)$$

onde:

$$C_c = \left\{ \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{2/k} \frac{k}{k-1} \left[\frac{1 - (p_2/p_1)^{(k-1)/k}}{1 - p_2/p_1} \right] \left[\frac{1 - (A_2/A_1)^2}{1 - (A_2/A_1)^2 (p_2/p_1)^{2/k}} \right] \right\}^{1/2} \quad (2.17)$$

sendo: 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. Este último assume que a

probabilidade de transição de um ponto para outro independa da história prévia do sistema. Tal tópico não faz parte do escopo principal deste trabalho, portanto não se estende a discussão sobre esses métodos.

2.2.2 Ações de tornados sobre torres de transmissão

Torres de transmissão, especialmente de energia elétrica, são alvos constantes de eventos atmosféricos de pequena escala, como tornados e *downbursts*. Estima-se que mais de 80% das falhas dessas estruturas relacionadas a condições meteorológicas sejam devidas a tais eventos de pequena escala (Savory et al, 2001). Apesar desse fato, normas e códigos tratam do assunto com limitada atenção (Goliger e Milford, 1997). O único código que faz referência específica a tornados é o da ASCE (1990).

A falha das torres nem sempre se deve à magnitude da velocidade do vento incidente, mas também a ações não previstas em projeto. No caso dos tornados, cita-se a ação vertical ascendente de vento. No Brasil, as rupturas de torres devidas a tornados são comuns na região da Bacia do Prata, onde a ocorrência de tornados é razoável e a quantidade dessas linhas é grande, por conta da grande demanda energética das regiões Sul e Sudeste e da presença de hidrelétricas como a de Itaipu. Um exemplo é mostrado na Figura 2.18, onde a falha ocorre por ruptura local de um dos mastros de uma torre estaiada.



Figura 2.18 – Ruptura de torre na Bacia do Prata causada por tornado

Pouco se encontra na literatura sobre a análise estrutural determinística de torres de transmissão submetidas a tornados. Savory et al (2001) estudam a resposta de uma dessas torres quando submetida a um tornado modelado pelas equações propostas por Wen (1975). Gráficos de deslocamentos e esforços são apresentados. Não se consideram esforços verticais na modelagem numérica e a ruptura acontece pela falha local de membros estruturais inferiores.

A maioria dos trabalhos existentes na literatura sobre o assunto é de caráter não-determinístico. Como exemplo, citam-se os trabalhos de Milford e Goliger (1997) e Li (1999), que investigam o risco de um tornado atingir uma linha de transmissão.

2.2.3 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 conservadoras e não consideram efeitos de inércia, não-linearidades, etc. As mesmas são semelhantes e versam sobre os 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* é empregar a sistemática de Thom (1963), onde a probabilidade anual de um tornado atingir um ponto, dentro da região de interesse, é estimada pela expressão:

$$P(S) = n \frac{a}{A_0} \quad (2.18)$$

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 , $P(V > V_s)$, seja dada pela eq. (2.19).

$$P(V > V_s) = P(V_s)P(S) \quad (2.19)$$

onde $P(V_s)$ é a probabilidade de a velocidade máxima do vento em qualquer tornado superar o valor V_s e $P(S)$ é dado pela eq. (2.18).

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:

$$P(V_s)P(S) = 10^{-7} \quad (2.20)$$

A partir de uma base de dados de 13 anos (1955-1967), avalia-se $P(S)$, que, substituído na eq. (2.20), fornece valores de $P(V_s)$. Então, o valor V_s é obtido da distribuição do vento ajustada aos registros de tornados. Por fim, esses resultados são usados para identificar três regiões de probabilidade de ameaça tornádica, que podem ser visualizadas na Figura 2.19. Os parâmetros de projeto para cada região são dados na Tabela 2.4.



Figura 2.19 – Divisão do território americano para definição de parâmetros de projeto a tornados – Simiu e Scanlan (1986)

Tabela 2.4 – 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 eqs. (2.11) e (2.12). Os valores de projeto dados pela norma americana estão na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Parâmetros de pressão 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 da probabilidade de ameaça exigem o conhecimento das relações de área-intensidade e de ocorrência-intensidade para a região geográfica que contém a instalação de interesse. Uma vez estabelecidas, essas relações em nada alteram a metodologia apresentada.

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 nos campos de vento e pressão do tornado, como já comentado em 2.2.1.3.

2.2.4 Ações de tornados sobre outras estruturas

Comentam-se brevemente alguns trabalhos que versam sobre efeitos de tornados em estruturas. Todos tratam apenas da pressão direta de vento.

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 dos campos de vento e pressão. O estudo leva em conta os efeitos de inércia. Como as variações nas componentes de velocidade são grandes, tais efeitos mostram-se relevantes, principalmente para a direção radial, sendo importantes também para a direção tangencial nas regiões próximas ao solo. O efeito combinado da análise dinâmica com a consideração da parcela de 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 passa pelo eixo de simetria da estrutura, em planta.

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 se leva apenas em conta o vento lateral. Varia-se também a velocidade de translação. Como essa altera a função de tempo, as maiores respostas são observadas quando a frequência da excitação se aproxima da frequência de ressonância do sistema estrutural.

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 o 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 adotada para o tornado, apresentando vários pontos de falha para valores superiores a 380 km/h.

2.2.5 Análise não-determinística da solicitação tornádica

A probabilidade anual de determinada falha ocorrer a um sistema estrutural em decorrência da ação tornádica pode ser avaliada por:

$$P_f = \int_H P_{f/h} f_H(h) dh \quad (2.21)$$

onde $P_{f/h}$ é a probabilidade de falha condicionada a um valor da ameaça e $f_H(h)$ é a função de distribuição de probabilidade da mesma (no caso do tornado, um parâmetro conveniente para a definição da ameaça é a velocidade horizontal máxima de vento, V_{\max}). A eq. (2.21) pode ser assim escrita:

$$P_f = - \int_0^{\infty} \left(\frac{dP_H(V_{\max})}{dV_{\max}} \right) P_{f/V_{\max}} dV_{\max} \quad (2.22)$$

onde $P_H(V_{\max})$ é a probabilidade da ameaça tornádica. Tais grandezas são definidas e explicadas nos itens a seguir.

2.2.5.1 Avaliação da ameaça tornádica

Pesquisas direcionadas à análise probabilística de tornados despontam da década de 1960, mas, como já mencionado, a carência de dados continua sendo uma grande limitação (McDonald, 1983). Basicamente os modelos podem ser divididos em duas classes:

- Modelos que estimam a probabilidade para pontos-alvo (probabilidade de ponto-alvo);
- Modelos que consideram o tamanho e a orientação da instalação na avaliação da probabilidade (probabilidade de área).

O conceito de probabilidade de ponto-alvo é mais conveniente para a regionalização das probabilidades de ameaça a tornados, uma vez que independe do tamanho e da orientação da estrutura. As potenciais vantagens em se considerarem as dimensões do alvo são neutralizadas pela carência de dados (McDonald, 1983).

Os órgãos americanos ligados à segurança e projeto de centrais nucleares aplicam o conceito de probabilidade de ponto-alvo para a ameaça tornádica, diferindo apenas na aplicação dos fatores de correção da curva. O *DOE* (*Department of Energy*) segue a metodologia proposta por Fujita, conforme

descrita por Coats (1984), enquanto a *USNRC* usa a sistemática proposta por McDonald (1983).

Aplicando-se a metodologia de McDonald (1983) para o território nacional e utilizando-se um levantamento das ocorrências tornádicas, tem-se, na Figura 2.20, a curva de ameaça para as províncias anteriormente descritas (Relatório 001/4, 2007). A mesma é apresentada em termos de a probabilidade anual de determinada velocidade máxima ser ultrapassada. A curva identificada como PBP+ refere-se à ameaça proposta para a região correspondente às Províncias da Bacia do Prata e do Atlântico Sul-Sudeste.

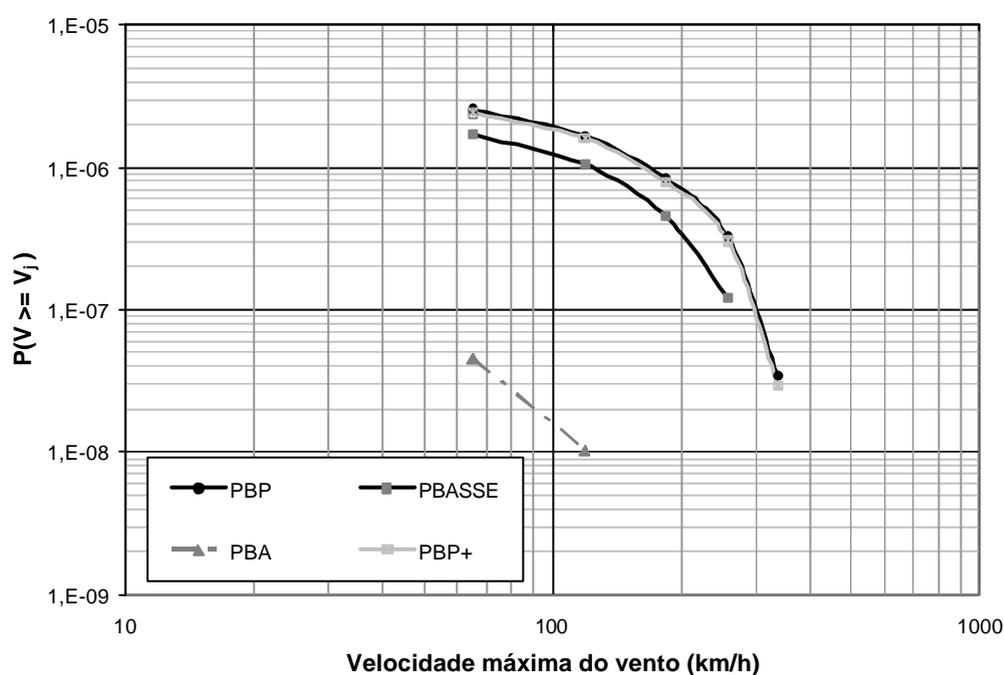


Figura 2.20 – Curvas de ameaça tomádica para o território nacional – Relat. 001/4 (2007)

2.2.5.2 Probabilidade de falha condicionada a um valor de ameaça

Nesta etapa, objetiva-se determinar a probabilidade de determinada falha estrutural, dado um valor de ameaça; no caso do tornado, para um valor especificado da velocidade horizontal máxima de vento. Para isso, se faz necessária a caracterização probabilística da demanda causada pela excitação e da capacidade resistente da estrutura.

Nesse sentido, a excitação ambiental é tratada como um processo aleatório e, conseqüentemente, a resposta da estrutura (demanda) também o é. Tais processos aleatórios são condicionados a um valor do parâmetro definidor da ameaça.

São definidas duas grandezas aleatórias - a demanda, $D(t)$, e a capacidade, $C(t)$, onde a demanda é representada por um efeito de interesse da estrutura. No caso presente, onde a análise não-determinística é conduzida a partir de um modelo numérico para o campo de vento, podem-se considerar somente os picos da demanda, tratando essa variável como independente do tempo, ou seja, uma variável aleatória. A capacidade é também tomada como tal. Em suma, tem-se o cenário representado pela Figura 2.21:

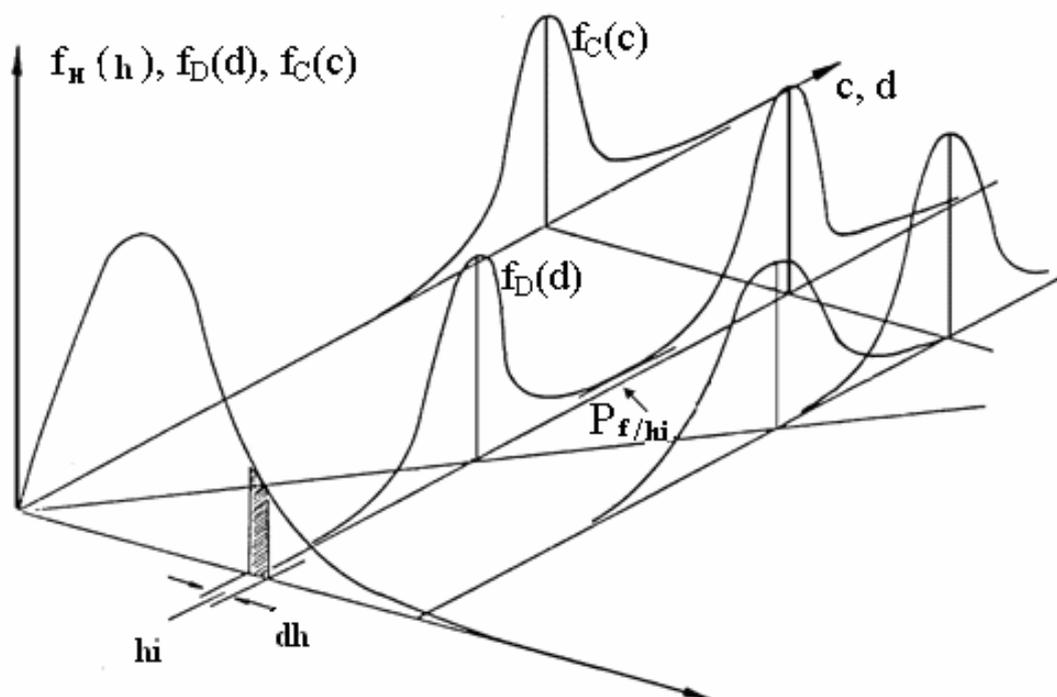


Figura 2.21 – Probabilidade de falha condicionada à ameaça – Almeida (2002)

Como se observa, a função de distribuição de probabilidade da capacidade é invariável em relação ao parâmetro da ameaça. Já a f.d.p. da demanda muda para cada valor desse parâmetro. Tal mudança dá-se com a alteração do desvio padrão e/ou da média da distribuição, enquanto o tipo de distribuição mantém-se constante.

Admitindo-se que demanda e capacidade são independentes entre si, avalia-se a probabilidade de falha condicionada à ameaça, $P_{f/h}$, a partir da equação:

$$P_{f/h} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_c^{\infty} (f_C(c) \cdot f_D(d)) dd \cdot dc \quad (2.23)$$

Ou ainda, já considerando também o parâmetro definidor da ameaça tornádica, V_{\max} :

$$P_{f/V_{\max}} = \int_0^{\infty} (1 - F_D(c)) \cdot f_C(c) dc \quad (2.24)$$

onde $f_C(c)$ é a função de densidade de probabilidade da capacidade; $f_D(d)$ é a função de densidade de probabilidade da demanda e $F_D(d)$ é a função de distribuição de probabilidade da demanda.

Ao repetir o procedimento para vários valores de ameaça, obtém-se a curva de fragilidade. Esta, juntamente com a curva de ameaça (Figura 2.20), compõe a integral da eq. (2.22), que fornece a probabilidade anual de falha.

2.3 Linhas aéreas de transmissão e tipos usuais de torres

2.3.1 Tensões usuais e componentes de uma linha de transmissão

As linhas, quanto as suas tensões nominais, podem ser assim classificadas:

- 13,8 kV e 34,5 kV – linhas de distribuição;
- 69 kV, 138 kV e 230 kV – linhas de alta tensão (transmissão e subtransmissão);
- 345 kV, 500 kV e 750 kV – linhas de extra-alta tensão.

Os principais componentes de uma linha de transmissão e suas características básicas são descritos a seguir, segundo Santiago (1983):

I) Cabos condutores

Os cabos condutores constituem o guia de onda para a propagação do campo eletromagnético e geralmente são formados por várias camadas de fios encordoados. Podem ser constituídos de fios de um só metal, como, por exemplo, os cabos AAC (só fios de alumínio) e os cabos AAAC (só fios de alumínio-liga) ou de dois metais, como os cabos ACSR (fios de alumínio em torno de uma alma formada de fios de aço). Há também os cabos ACAR (fios de alumínio em torno de uma alma formada de fios de alumínio-liga). No Brasil, praticamente todas as linhas de transmissão utilizam condutores ACSR.

II) Cabos pára-raios

Os cabos pára-raios têm como função proteger a linha contra surtos atmosféricos, blindando os condutores de fase. Em geral, são constituídos de fios encordoados de aço galvanizado de alta resistência mecânica (HS) e extra-alta resistência (EHS), podendo-se empregar também cabos ACSR de alta resistência ou os cabos do tipo *Alumoweld* (composto de fios de aço revestidos de alumínio).

III) Estruturas

As estruturas de uma linha de transmissão servem de suporte para os cabos condutores e pára-raios, mantendo uma distância mínima de segurança entre os condutores e o solo. As estruturas são construídas em treliças com perfis de aço galvanizado ou em postes de aço, concreto ou madeira. As estruturas treliçadas podem ser rígidas ou estaiadas.

No Brasil, é usual utilizarem-se estruturas com postes de madeira em tensões de 33 kV e 69 kV. Estruturas com postes de concreto são em geral aplicadas na faixa de 69 kV a 230 kV. A grande maioria das linhas com tensões de 345 kV e 750 kV utiliza estruturas treliçadas de aço.

IV) Fundações

As fundações resistem e transmitem ao solo as forças oriundas das estruturas e dos demais elementos da linha. Podem ser em concreto ou do tipo grelha (estrutura de aço enterrada).

V) Cadeias de isoladores e ferragens dos condutores

As cadeias de isoladores e suas respectivas ferragens servem para fixar os condutores nas estruturas, mantendo-se o isolamento necessário entre eles. Em geral, os isoladores são discos de vidro, porcelana ou poliméricos e as ferragens de aço galvanizado.

VI) Ferragens dos cabos pára-raios

As ferragens dos cabos pára-raios são utilizadas para fixá-los nas estruturas e são compostas de peças de aço galvanizado.

VII) Espaçadores

Em linhas de transmissão com feixe de condutores são utilizados espaçadores entre os subcondutores com o intuito de se manter a distância entre eles e evitar que os mesmos se choquem sob a ação do vento, danificando os respectivos fios da camada externa. Para evitar fadiga nos condutores devido a vibrações eólicas e oscilações de subvão, é comum a utilização de espaçadores amortecedores.

VIII) Amortecedores

São aplicados, quando necessários, tanto nos condutores de fase como nos cabos pára-raios e servem para absorver a vibração desses cabos sob a ação do vento, evitando que os mesmos danifiquem-se por fadiga. Existem vários tipos de amortecedores, como os do tipo *stockbridge* e suas variações, amortecedores de impacto, torcional e outros.

IX) Contrapeso

Tem como função diminuir a resistência de aterramento das estruturas, a fim de se obter um dado desempenho quanto a surtos atmosféricos estipulado em projeto. Em geral, são alguns fios de aço ou do tipo *Copperweld* enterrados no solo a uma dada profundidade e conectados à estrutura.

2.3.2 Tipos usuais de torres

Os suportes podem ser classificados nos seguintes tipos, que normalmente integram uma “família de estruturas”, ou “série de estruturas”, para uma linha (Labegalini et al, 1992):

- a) Tipo “suspensão” ou “alinhamento” – são suportes dimensionados para, em condições normais de operação, resistir aos esforços verticais devido ao peso dos cabos, isoladores e suas ferragens. Poderão ser solicitados igualmente no sentido vertical pelas forças decorrentes do estaiamento. Devem suportar igualmente as forças horizontais transversais da pressão do vento sobre cabos, isoladores e sobre seus próprios elementos. Esse tipo de estrutura é, na maioria das linhas, o mais frequentemente empregado, podendo haver em uma mesma linha suportes calculados para dois ou mais vãos de referência. São os menos reforçados;
- b) Tipo “terminal” ou “ancoragem total” – constituem os suportes utilizados no início e no fim das linhas, cabendo-lhes a responsabilidade de manter os cabos esticados. São os suportes mais solicitados, sendo, portanto, os mais reforçados;
- c) Tipo “ancoragem intermediária” – semelhantes ao tipo anterior, porém empregados no meio das linhas, com trações longitudinais equilibradas à frente e à ré. São menos reforçados que os anteriores, pois resistem unilateralmente apenas aos esforços decorrentes do tensionamento dos cabos durante a montagem ou após a ruptura de alguns deles;

- d) Para “ângulos” – são estruturas dimensionadas para suportar, além dos esforços verticais e transversais, a resultante das forças de tração dos cabos nos dois alinhamentos que se cruzam;
- e) Para “transposição” ou “rotação de fases” – a fim de se assegurar o equilíbrio eletromagnético das linhas, e com isso a igualdade das quedas de tensão nas três fases, efetua-se a transposição de fases, o que exige estruturas especiais;
- f) Para “derivação” – freqüentemente se efetuam sangrias nas linhas para alimentar um ramal, sem necessidade de algum pátio de seccionamento e manobras. Nesses casos, uma estrutura especialmente projetada para esse fim é utilizada.

Quanto à forma de resistir, as torres podem ser classificadas em dois grupos:

- Estruturas autoportantes: transmitem todos os esforços ao solo através de suas fundações.
- Estruturas estaiadas: nesses tipos de suportes são empregados tirantes ou estais para absorver os esforços horizontais transversais e longitudinais. O emprego de tirantes é uma prática bastante antiga, principalmente em distribuição e em linhas de tensões menores, constituídas por postes articulados engastados, a fim de enrijecê-las.

As estruturas das linhas podem ainda ser classificadas conforme o material utilizado em sua construção: madeira, concreto armado ou aço. Este trabalho trata destas últimas. As Figuras 2.22 e 2.23 mostram alguns tipos de torres metálicas autoportantes e estaiadas.

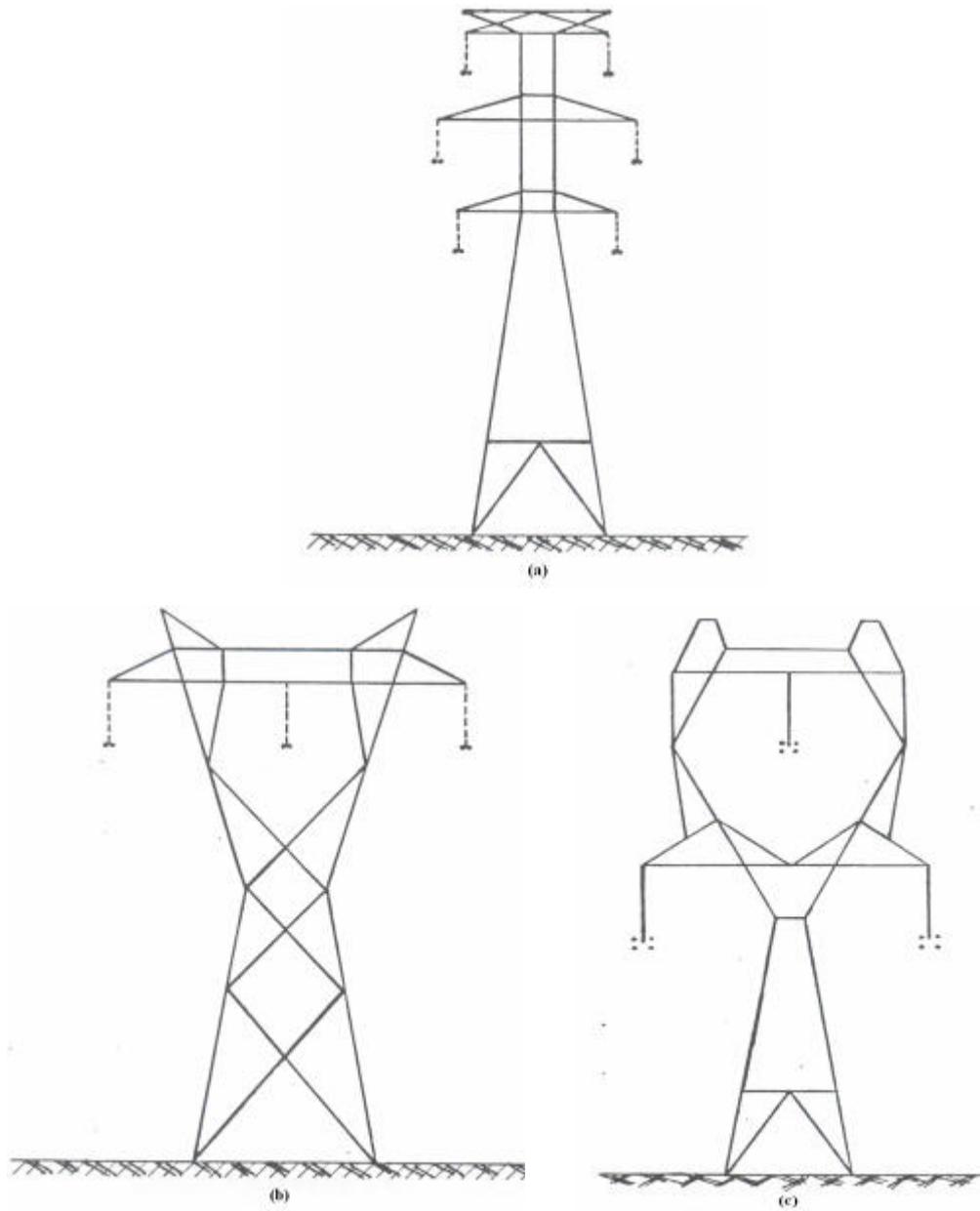


Figura 2.22 – Exemplos de torres autoportantes: circuito duplo (a), configuração horizontal (b) e configuração delta (c) – Santiago (1983)

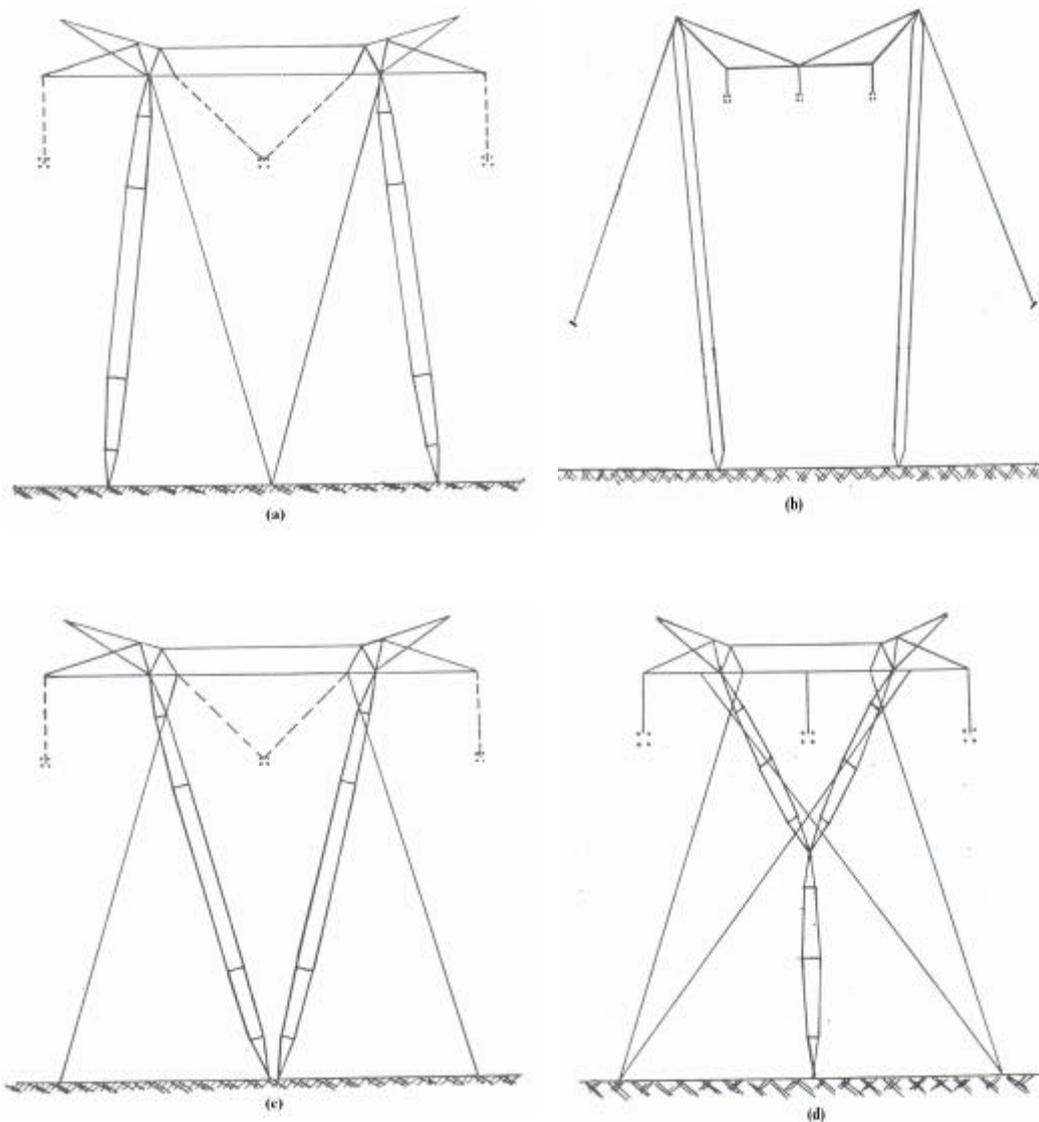


Figura 2.23 – Exemplos de torres estaiadas: tipo portal (a), tipo trapézio (b), tipo V (c) e tipo Y (d) – Santiago (1983)

2.3.3 Tipos usuais de fundações

As fundações podem ser em grelha (estrutura de aço enterrada) ou em concreto (sapatas, tubulões e blocos sobre estacas). Devido a efeitos de corrosão, as primeiras têm entrado em desuso. A decisão quanto à escolha do tipo de fundação depende de critérios técnico-econômicos. Como critério geral, as seguintes diretrizes para a seleção do tipo de fundação são colocadas (Santiago, 1983):

- Grelhas – solos de boas características, quanto à sua resistência e compressibilidade, sem presença do lençol d'água;
- Tubulões – solos de características idênticas ao caso de grelhas, para os casos de estruturas com elevados carregamentos;
- Sapatas – como alternativa ao uso de grelhas e ainda em solos não muito fracos com presença de lençol subterrâneo elevado;
- Estacas – solos fracos, onde é inviável o emprego dos demais tipos de fundações mencionadas;
- Especiais – que fogem à regra da grande maioria das fundações das estruturas de uma linha de transmissão, como tirantes metálicos helicoidais.