

# Acidentes causados pelo vento

Joaquim Blessmann

QUARTA EDIÇÃO  
REVISTA E AMPLIADA

ACID  
A181  
4/1/1981

# Acidentes causados pelo vento

RESERVA TÉCNICA  
Editora da UFRGS



UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO  
GRANDE DO SUL

Reitora

**Wrana Maria Panizzi**

Vice-Reitor  
e Pró-Reitor de Ensino

**José Carlos Ferraz Hennemann**

Pró-Reitor de Extensão

**Fernando Setembrino  
Cruz Meirelles**

**EDITORA DA UNIVERSIDADE**

Diretor

**Geraldo F. Huff**

**CONSELHO EDITORIAL**

**Antônio Carlos Guimarães**

**Aron Taitelbaun**

**Célia Ferraz de Souza**

**Clovis M. D. Wannmacher**

**Geraldo Valente Cañali**

**José Augusto Avancini**

**José Luiz Rodrigues**

**Lovois de Andrade Miguel**

**Luiza Helena Malta Moll**

**Maria Cristina Leandro Ferreira**

**Geraldo F. Huff, presidente**

**Editora da Universidade/UFRGS** • Av. João Pessoa, 415 - 90040-000 - Porto Alegre, RS - Fone/fax (51) 3224-8821, 3316-4082 e 3316-4090 - E-mail: [editora@ufrgs.br](mailto:editora@ufrgs.br); [vendas.editora@ufrgs.br](mailto:vendas.editora@ufrgs.br) - <http://www.ufrgs.br/editora> • *Direção*: Geraldo Francisco Huff • *Editoração*: Paulo Antonio da Silveira (coordenador), Carla M. Luzzatto, Maria da Glória Almeida dos Santos, Rosangela de Mello; *suporte editorial*: Fernando Piccinini Schmitt, Gabriel Bolognesi Ferronato (bolsista), Luciane Leipnitz (bolsista) e Sílvia Aline Otharan Nunes (bolsista) • *Administração*: Najára Machado (coordenadora), José Pereira Brito Filho, Laerte Balbinot Dias, Mary Cirne Lima e Norival Hermeto Nunes Saucedo; *suporte administrativo*: Ana Maria D'Andrea dos Santos, Erica Fedatto, Jean Paulo da Silva Carvalho, João Batista de Souza Dias e Marcelo Wagner Scheleck • *Apoio*: Idalina Louzada e Laércio Fontoura.

# Acidentes causados pelo vento

---

Joaquim Blessmann

QUARTA EDIÇÃO  
REVISTA E AMPLIADA

RESERVA TÉCNICA  
Editora da UFRGS

 Editora  
da Universidade  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

© de Joaquim Blessmann  
1ª edição: 1971

Direitos reservados desta edição:  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Capa: Carla M. Luzzatto

Ilustração da capa: Fotografia de Emílio Pedroso; imagem de arquivo do jornal *Zero Hora*. Resultado da passagem de tornado na localidade de Águas Claras, município de Viamão, RS, em 10 de outubro de 2000. O incidente é comentado nas páginas 60 e 61.

Revisão: Maria da Glória Almeida dos Santos  
Luciane Leipnitz

Editoração eletrônica: Fernando Piccinini Schmitt

**Joaquim Blessmann** é Engenheiro Civil, Mestre e Doutor em Ciências pela Divisão de Engenharia Aeronáutica do Instituto de Aeronáutica (ITA), Professor Emérito da UFRGS, "Professor Honorario de la Universidad Austral", Buenos Aires, Acadêmico Correspondente da Academia Nacional de Ingeniería, Argentina, e fundador do Laboratório de Aerodinâmica das Construções do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da UFRGS.

---

B647a Blessmann, Joaquim  
Acidentes causados pelo vento / Joaquim Blessmann. – 4.ed. –  
Porto Alegre : Ed. Universidade/UFRGS, 2001.

i. Engenharia Civil – Ventos – Acidentes. I. Título.

CDU 624.01/9:551.55

---

Catálogo na publicação: Mônica Ballejo Canto - CRB 10/1023

ISBN 85-7025-621-3

W<sup>o</sup> de registro: 11

W<sup>o</sup> de obra: 4

Data: 20/09/22

À minha esposa, Lygya Maria,  
companheira de mais de cinquenta anos  
de vida matrimonial, e a cujo estímulo  
muito devo de minha vida profissional,  
dedico este livro, que vem a ser o 140º  
de minha produção técnico-científica.

RESERVA TÉCNICA  
Editora da UFRGS



# Agradecimentos

O professor José Leite de Souza, recentemente falecido (24/2/2002), foi diretor do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS de 1960 a 1976. O túnel de vento desta Universidade foi projetado e construído durante sua gestão e graças a seu interesse e empenho, inclusive conseguindo verbas adicionais do CNPq para sua construção.

É de plena justiça lembrarmos aqui sua importante e inestimável colaboração, sem a qual o túnel de vento não teria sido construído naquela época, tornando-se o primeiro da América do Sul com possibilidade de simular corretamente as principais características de ventos naturais e, por 25 anos, o único.

As pesquisas desenvolvidas neste túnel de vento foram essenciais para meus estudos técnico-científicos e para a quase totalidade de minhas publicações.

Quero registrar aqui os agradecimentos que, em ocasiões anteriores, manifestei publicamente.

O autor

RESERVA TÉCNICA  
Editora da UFRGS





# Sumário

1. Introdução .....	11
2. Causas aerodinâmicas dos acidentes .....	19
2.1. Coeficientes aerodinâmicos.....	19
2.2. Velocidade máxima do vento .....	20
2.3. Pressão interna .....	20
2.4. Objetos lançados pelo vento .....	21
3. Causas estruturais dos acidentes .....	23
4. Exemplos de acidentes no exterior.....	25
5. Exemplos de acidentes no Brasil.....	35
6. Torres e linhas de transmissão .....	83
7. Conclusões e recomendações .....	95
Referências bibliográficas .....	101
Apêndice I .....	105
Apêndice II .....	117
Apêndice III .....	131



# Introdução

a) Neste trabalho estudaremos acidentes causados por ação estática do vento, principalmente em construções baixas.

A importância dos efeitos do vento nas construções está intimamente ligada ao desenvolvimento da tecnologia dos materiais, e da ciência e técnica das construções, bem como a um melhor aproveitamento dos terrenos, com a construção de edifícios cada vez mais altos.

O vento não era problema em construções baixas e pesadas de grossas paredes, mas passou a ser; e em medida crescente, quando as construções foram-se tornando mais e mais esbeltas, e as estruturas usando cada vez menos quantidade de material.

Atualmente as paredes de edifícios altos não têm, em geral, função resistente, mas apenas de vedação. São, em muitos casos, constituídas de leves painéis de vedação, fazendo com que já ocorram problemas de arrancamento de painéis, pelas altas sucções que aparecem próximo às quinas. Foi o que aconteceu em um arranha-céu de Nova Iorque, em março de 1966,<sup>19</sup> onde o vento arrancou um painel entre duas janelas, bem como os vidros das janelas do 18º e 21º pisos, nas proximidades da quina do edifício.

Este tipo de acidente tem sido noticiado seguidamente nos últimos anos, pois os leves painéis de revestimento e suas ancoragens nem sempre foram projetados para resistirem às altas sucções que surgem nas faces laterais de edifícios altos, especialmente quando efeitos de vizinhança provocam aumento dessas sucções.

b) O estudo racional da ação do vento através da aerodinâmica

tem permitido chegar a formas estruturais mais econômicas. Assim, por exemplo, a forma cilíndrica dos arcos e montantes da ponte de Askerøefjord, Suécia, a forma levemente cônica das torres em treliça de Cadiz, Espanha, a forma das pontes de Tancarville, França, e Severn Bridge, Grã-Bretanha, permitiram reduzir em muito os esforços estáticos do vento.

c) Acidentes em edifícios são raros. Clássico é o colapso do Meyer-Kiser Bank Building, Flórida, Estados Unidos, pelo furacão de 18 de setembro de 1926.<sup>46</sup> Este edifício foi torcido, ficando sua estrutura metálica deformada, as paredes fendilhadas, tendo algumas ruído. Já o arrancamento de paredes, sem danos na estrutura, é um acidente mais comum.

Acidentes em pontes são bastante numerosos. Principalmente no século passado, diversas pontes tiveram apenas alguns meses ou anos de vida útil, antes de serem total ou parcialmente destruídas<sup>39</sup> pelo vento. O assunto hoje em dia é particularmente importante em torres de transmissão de energia elétrica, torres de rádio, televisão e microondas, antenas de radar e outras estruturas semelhantes. Na Europa, após a Segunda Guerra Mundial, centenas de torres reticuladas estaiadas foram construídas, tendo um bom número delas sido destruído pelo vento.

d) Entretanto, a maioria dos acidentes ocorre em construções leves, principalmente de grandes vãos livres, tais como hangares, pavilhões de feiras e de exposições, pavilhões industriais, oficinas, grandes mercados, depósitos de cereais, armazéns portuários, estações ferroviárias, garagens, sedes de clubes sociais, coberturas de estádios e hipódromos, ginásios cobertos, cinemas, teatros, igrejas, pavilhões para fins agrícolas e pecuários etc.

Um único acidente destes, isoladamente, não representa muito no conjunto da economia nacional. Mas somados, os prejuízos causados à economia das nações por todos estes acidentes representam um valor apreciável.

e) Assim, por exemplo, uma companhia de seguros do estado de Iowa, Estados Unidos, pagou cerca de 1,5 milhão de dólares por danos causados pela tempestade de outubro de 1949, e mais de 3 milhões pelos causados por uma tempestade ainda mais devastadora, em maio de 1950.<sup>20</sup>

f) O furacão da Flórida, em 1926, causou 75 milhões de dólares de prejuízo.

g) Dois furacões na ilha de Antígua, no ano de 1950, causaram 1

milhão de dólares de prejuízo. Trotman<sup>43</sup> chama a atenção para o fato de que após o furacão de 1928 foram tomadas precauções para tornar as construções resistentes a esses fenômenos. Mas, à medida que o tempo foi passando e o acidente foi esquecido, a maioria das estruturas foi construída para resistir apenas a condições normais e não estavam aptas para resistir aos esforços de ventos mais violentos.

O mesmo, diga-se de passagem, aconteceu após o desastre com a ponte Tay Bridge, Escócia, em 1879. As normas aumentaram bastante os esforços do vento, e com o correr dos anos foram diminuindo de novo.

As construções de madeira que sofreram danos nos dois furacões citados por Trotman em sua maioria eram leves, insuficientemente contraventadas e inadequadamente fixadas em suas fundações. Muitas outras ruíram por detalhes construtivos impróprios ou devido à falta de manutenção.

h) Wilson<sup>45</sup> indica que, de acordo com os dados do Factory Mutual System, no período de 1935 a 1949 as perdas em média foram de 1 milhão de dólares por ano. Na maioria dos casos os danos foram nos telhados e, na maior parte, por ventos com velocidade entre 120 e 200km/h. Na tempestade de 25 de novembro de 1950 os danos foram de mais de 4 milhões de dólares, incluindo as perdas pela chuva.

i) Um tornado em Ontário, Canadá,<sup>41</sup> em maio de 1953, causou prejuízos de mais de 20 milhões de dólares. Ao menos metade deste total corresponde a construções rurais. Todas as edificações afetadas sofreram danos nos telhados, sendo que em 60% dos celeiros e 78% das casas danificadas somente os telhados sofreram danos.

j) O furacão Camille, em agosto de 1969,<sup>17</sup> um dos mais violentos e danosos dos que assolaram os Estados Unidos, causou um total de 248 mortes e um prejuízo de 1,42 bilhões de dólares. Alguns anos antes, em 1965, o furacão Betsy<sup>17</sup> causara quase cem mortes e um prejuízo de cerca de 1,76 bilhões de dólares. As rajadas de vento, neste furacão, devem ter ultrapassado a velocidade de 300km/h.

k) No Reino Unido, no período 1962-1969,<sup>27,13</sup> cerca de 100 mil construções foram danificadas, em média, por ano; o prejuízo anual médio foi estimado em 46 milhões de libras (ao valor da libra em 1982). Danos pequenos começaram quando as rajadas de vento ultrapassaram 20m/s (72km/h), enquanto danos importantes apareceram com velocidades do vento a partir de 32,5m/s (117km/h).

No período 1970-1976,<sup>10,13</sup> o número de construções danificadas por

ano, em média, subiu para 230 mil; porém, o prejuízo anual médio foi reduzido para 16,4 milhões de libras (ao valor da libra em 1982). Para danos pequenos a velocidade mínima das rajadas foi também de 20m/s (72km/h). A maioria das construções danificadas eram antigas e construídas, portanto, antes da nova norma britânica,<sup>9</sup> na qual se baseia a norma brasileira.<sup>4</sup> Danos em edificações novas freqüentemente ocorreram em revestimentos leves, especialmente coberturas, sendo que muitas vezes durante a execução da obra.

O número de mortes, entre 1962 e 1981, foi de 97, além de 158 pessoas com ferimentos graves e 1.087 com ferimentos leves.<sup>13</sup>

l) O ciclone Tracy,<sup>26</sup> que se abateu sobre a cidade de Darwin, em 25 de dezembro de 1974, foi o furacão mais devastador da Austrália. Levou de quatro a cinco horas para passar sobre a cidade, deixando um saldo de cerca de 50 mortes e prejuízos acima de 300 milhões de dólares americanos. A longa duração e a anormalmente baixa velocidade de deslocamento (6-8km/h, apenas) são as razões principais dos pesados danos, sendo que muitas construções teriam resistido a ventos de igual velocidade que atuassem por um tempo menor.

m) Um acidente típico, em obras de grandes vãos internos, é o arancamento parcial ou total das telhas. Se estas estão bem presas, então parte ou toda a estrutura do telhado pode ser levada junto (caibros e/ou terças, e às vezes também as tesouras), em alguns casos por centenas ou mesmo milhares de metros. Kármán<sup>25</sup> cita o caso de um telhado em arco construído sobre pilares, mas ainda sem as paredes; um forte vento fez com que o telhado, qual asa gigante, fosse levado a alguns quilômetros de distância.

Embora de proporções bem mais modestas, temos notícia de um acidente semelhante ocorrido há alguns anos em Porto Alegre: ao levantar-se, o proprietário de uma casa se deparou com o telhado da mesma “pousado”, praticamente intacto, em um terreno baldio vizinho. Isto aconteceu na década de 60. Mais recentemente, em outubro de 1999, o mesmo tipo de acidente aconteceu na cidade de Santa Maria, RS.

Outras vezes, além do telhado, também as paredes de alvenaria e mesmo estruturas em aço, madeira ou concreto armado são destruídas, parcial ou totalmente.

Muitos prejuízos são causados, não pela ação direta dos ventos, mas sim por parte de construções e de árvores arrancadas pelo vento de outros locais e lançadas ou deixadas cair mais adiante, ou por detritos coletados pelo vento junto ao terreno (projéteis).

n) Para tornados em geral não há interesse em projetar as construções leves para resistir à sua ação. É muito mais econômico reconstruir as construções que ficam no caminho relativamente estreito do tornado, do que calcular todas elas para resistir a seus efeitos.

o) Mesmo para ventos com velocidades previstas nas normas, há casos em que não é econômico calcular a construção para resistir a eles. Um caso muito comum é o de muros de divisa (1,80m de altura, meio tijolo de espessura, 11 a 12cm, contrafortes a cada 2,50 a 3,00m). Eles não resistem à força do vento especificada nas normas. Entretanto, são relativamente poucos os muros que tombam por ação do vento, pois a probabilidade de se ter uma rajada máxima de cálculo sobre um muro, e com a incidência mais nociva, é pequena. É mais econômico reconstruir estes poucos muros que desabam do que construir todos eles para resistir (o consumo de material e de mão-de-obra seria duplo).

Critério análogo tem sido adotado, em certos casos, para linhas de transmissão, como se verá no capítulo 6, *Torres e linhas de transmissão*.

p) Um problema assaz importante em cidades com edifícios de grande altura e com considerável superfície coberta por vidros (algumas vezes em 100% das fachadas) é o da ruptura destes vidros, que pode ter várias causas:<sup>24</sup>

- pressões do vento superiores às previstas nas normas;
- impacto de fragmentos lançados pelo vento;
- vidros que caem de edifícios vizinhos;
- canalização do vento em torno de edifícios (efeitos de vizinhança);
- degradação da resistência do vidro;
- duração efetiva das cargas;
- tensões por deslocamento estrutural.

Muitos vidros têm sido quebrados durante a reposição em edifícios vizinhos simplesmente porque o vidraceiro, em vez de recolher para o interior os pedaços que ficaram presos nas esquadrias ou em seus suportes, os lança para fora.<sup>24</sup>

Ao ser estudada a quebra de vidros em edifícios altos em Houston,<sup>24</sup> foi constatado que não houve vidros quebrados acima do topo dos edifícios vizinhos, nas fachadas confrontantes. As causas mais importantes da quebra de vidros foram cascalhos oriundos das coberturas próximas e vidros quebrados. Cerca de 3.000 vidros foram quebrados.

A ruptura de vidros não ficou limitada a situações classificadas como de tormentas violentas (tornados e furacões). Muitos destes aciden-



tes ocorreram com a velocidade máxima do vento próxima ou menor que a velocidade de cálculo (que é menor que a de tornados e furacões violentos). Uma grande parte da ruptura de vidros deve-se às pressões do vento e a fragmentos lançados pelo mesmo.<sup>28</sup>

Na primavera de 1974, a Torre Sears,<sup>28</sup> em Chicago, teve seus vidros quebrados em diversas ocasiões. No acidente do dia 22 de fevereiro de 1974, os vidros quebrados estavam situados abaixo do 30º piso. Os fragmentos transportados pelo vento foram a causa principal deste acidente.

Em Lubbock, Texas,<sup>28</sup> o tornado de 11 de maio de 1970, por ruptura das janelas de dois edifícios altos, causou prejuízos em seus interiores de cerca de um milhão de dólares em cada um. Estes dois edifícios estavam afastados do centro do tornado e foram afetados por ventos periféricos e não pelo próprio tornado.

q) Em geral as construções não são projetadas para resistir a tornados. As centrais nucleares constituem uma exceção marcante. Porém, os critérios de segurança nelas adotados são por demais onerosos para as edificações em geral. Por outro lado, um melhor conhecimento das cargas do vento, das características dos materiais de construção e do funcionamento estrutural das construções faz com que estas possam ser projetadas para resistir a tornados não demasiadamente violentos com um custo adicional relativamente pequeno. Chang<sup>11</sup> classifica as construções de acordo com sua importância e vida útil, e estuda a segurança das mesmas para diversas velocidades máximas de ventos de tornados. Pelo critério de Chang, para áreas com uma ocorrência anual de tornado de razão quatro ou maior por 10.000km<sup>2</sup>, as construções são seguras até:

160km/h – residências (25-50 anos de vida útil);

190km/h – edifícios grandes de um ou dois pisos (25-50 anos de vida útil);

240km/h – edifícios de mais de dois pisos (50-100 anos de vida útil). Apartamentos, hotéis, escritórios, bancos, lojas;

320km/h – edifícios de alto risco (100 ou mais anos de vida útil). Centrais nucleares, edifícios altos e esbeltos, edifícios públicos e para defesa.

Para 400km/h os edifícios de alto risco sofrem danos leves (0-1% de perda) e para 480km/h sofrem danos não estruturais (1-10% de perda).

Lembramos que, no Brasil, dificilmente a velocidade máxima em um tornado ultrapassará 190km/h. Para esta velocidade, pelo critério de Chang, os danos a residências serão nulos ou leves (0-1% de perda) e as demais construções da classificação anterior estarão seguras.

Para 240km/h, os danos são os seguintes:

– residências: danos não estruturais (1-10% de perda);

– edifícios grandes de um ou dois pisos: danos nulos ou leves (0-1% de perda);

– demais construções: com segurança.

Recomendações de Chang são dadas no item 7.m.

r) Um estudo geral dos prejuízos econômicos causados pelo vento nos Estados Unidos é apresentado por Friedman,<sup>23</sup> para diversos tipos de tormentas, em 411 catástrofes ocorridas entre 1949 e 1975. Os valores são dados em dólares referidos ao ano de 1978 (correção da inflação):

<i>Tipo de tormenta</i>	<i>Total</i>	<i>Média anual</i>
Furacão	4,69 bilhões	174 milhões
Tormenta de inverno	1,48 bilhão	55 milhões
Tornado	3,00 bilhões	111 milhões
Trovoada	0,97 bilhão	36 milhões
Granizo	1,35 bilhão	50 milhões

Para prejuízos em furacões mais recentes ver capítulo 4.



# Causas aerodinâmicas dos acidentes

Do ponto de vista aerodinâmico, os acidentes são devidos a um ou mais dos seguintes fatores: coeficientes aerodinâmicos, velocidade do vento, pressão interna, objetos lançados pelo vento.

## 2.1. Coeficientes aerodinâmicos

a) O ângulo de incidência do vento e as proporções entre as dimensões da construção são dois fatores que influem bastante no coeficiente de forma, e que muitas normas não levavam em conta. Assim, por exemplo, grandes sucções locais aparecem com vento incidindo entre  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  e  $45^\circ$  com a parede. Estas sucções aparecem nas proximidades das quinas, tanto horizontais como verticais.

Ensaio em túneis de vento e normas atualizadas mostram que o máximo de sucção média (apresentada como coeficiente de forma) aparece em coberturas com inclinação entre  $8^\circ$  e  $12^\circ$ , para certas proporções da construção, exatamente as inclinações de uso corrente na arquitetura atual, em um grande número de construções.

b) Em ensaios que realizamos em São Paulo,<sup>5</sup> obtivemos no topo de uma construção alta com cobertura plana um coeficiente de pressão de  $-3,60$  (sucção), enquanto em Iowa,<sup>12</sup> em construção baixa, chegou-se a  $-7,40$ . É um acidente comum o arrancamento parcial de telhados constituídos de telhas metálicas onduladas, em virtude destas for-

tes sucções locais. A solução está em reforçar a fixação das telhas nas telhas. (Os picos de sucção indicados devem ser considerados com reservas, uma vez que os ensaios foram feitos em túneis aerodinâmicos, com corrente de ar uniforme).

## 2.2. Velocidade máxima do vento

a) A velocidade máxima do vento a considerar no projeto estrutural de uma edificação depende da localização da mesma. No Brasil, a norma NBR-6123 incorporou os resultados dos estudos desenvolvidos no Laboratório de Aerodinâmica das Construções do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Nestes estudos foram considerados os registros das velocidades máximas do vento em 49 estações do Serviço de Proteção ao Vôo do Ministério da Aeronáutica, os quais foram processados e exaustivamente testados, do ponto de vista probabilístico. Duas teses de mestrado e diversas publicações são os resultados destes estudos.

De acordo com a NBR-6123<sup>4</sup> a velocidade básica do vento (velocidade de uma rajada de três segundos de duração, a 10 metros de altura, em terreno aberto e plano, com um período médio de recorrência de 50 anos) varia, no País, entre 30 e 50m/s. Como a força devida ao vento é proporcional ao quadrado de sua velocidade, segue que as forças correspondentes estão na razão de 9 para 25. Isto é, conforme a localização de uma dada edificação dentro do País, os esforços devidos ao vento podem, no limite, quase que triplicar.

b) A velocidade máxima do vento a considerar depende também de outros fatores, tais como: condições topográficas locais, que podem aumentar ou diminuir a velocidade do vento (Fator  $S_1$  da norma); características da rugosidade superficial, que influem no perfil de velocidades médias, na altura da camada-limite atmosférica e nas características da turbulência (Fator  $S_2$ ); dimensões da edificação (Fator  $S_2$ ); probabilidade de ocorrência do vento de velocidade máxima durante a vida útil da edificação, risco de vidas humanas, lucros cessantes etc. (Fator  $S_3$ ).

## 2.3. Pressão interna

a) A consideração da pressão interna correta torna-se particularmente importante no caso de grandes recintos, tais como pavilhões para

exposição e indústria, hangares, estações ferroviárias cobertas etc. Também aqui algumas normas antigas dão valores bem abaixo dos reais, como veremos ao explicar a causa de alguns colapsos.

b) Acidentes têm sido evitados fazendo reinar no interior da construção uma depressão, que diminui o esforço externo de sucção. Isto se consegue com aberturas na zona em sucção. Estas aberturas podem ser de emergência ou permanentes. Por exemplo, abrindo uma boa parte do oitão situado na esteira da construção (emergência); ou construindo janelas basculantes tipo válvula, que se abrem com sucção e se fecham com sobrepressão (permanente).<sup>4</sup>

## 2.4. Objetos lançados pelo vento

a) Objetos lançados pelo vento tanto podem causar danos a edificações e veículos como a pessoas e animais. Telhas arrancadas e levadas pelo vento podem constituir projéteis perigosos, principalmente telhas leves de grandes dimensões (de alumínio, folha galvanizada, fibrocimento).

Em certos casos, a quase totalidade de vidros quebrados o foi por fragmentos contra eles lançados pelo vento. Além de telhas, também vidros arrancados ou quebrados em edificações vizinhas, fragmentos das mesmas, esquadrias, portas, galhos de árvores, arbustos e mesmo árvores de pequeno porte, animais pequenos e detritos existentes sobre o terreno podem servir como projéteis.



## Causas estruturais dos acidentes

a) Examinando-se os acidentes, chegamos à conclusão de que, quanto à resistência da estrutura, em geral o problema é de *falta de ancoragem*, seja das telhas nas terças, seja destas na estrutura do telhado (tesouras, arcos etc.), seja destes últimos no restante da estrutura, ou ainda desta nas fundações. Ou então há falta de ancoragem dos painéis de vedação na estrutura secundária, ou desta na estrutura principal, ou de elementos estruturais entre si. O acidente mais comum neste item é o arrancamento de telhas, por estarem mal ou insuficientemente ancoradas.

b) Também um *contraventamento insuficiente* de paredes e telhados pode levar a estrutura ao colapso, principalmente estruturas de madeira e metálicas.

c) Em alguns casos, porém, o problema é de *dimensionamento insuficiente*, como ocorreu na flambagem de arcos em treliça de um pavilhão na cidade de Gravataí, Rio Grande do Sul, e na flambagem de linhas de tesouras tipo Polonceau, nas proximidades de Ribeirão Preto, São Paulo.

Outras causas são as seguintes:

d) *Fundações inadequadas*. Em muitos casos a fundação não tem o peso ou a profundidade necessária para, juntamente com o terreno interessado, resistir à força ascensional causada pelas altas sucções que aparecem em certos telhados. Assim, por exemplo, a força ascensional em um hangar de cobertura curva pode ser superior a seu peso próprio.



Em outros casos as dimensões das fundações não são suficientes para resistir aos momentos que aparecem (tombamento).

e) *Paredes inadequadas*. As paredes podem tombar por ser fraca a argamassa ou, no caso de grandes painéis, por não terem uma estrutura em concreto ou metálica que lhes dê estabilidade. Ou simplesmente por falta de ancoragem nos pilares.

A parede pode estar resistindo enquanto o telhado está firme em seu lugar, mas irá abaixo assim que este é arrancado.

f) *Deformabilidade excessiva da edificação*. Uma estrutura muito deformável pode causar fendas nas paredes e danos às esquadrias e/ou vidros, que podem romper. As deformações podem ser por flexão, cisalhamento ou torção.

## Exemplos de acidentes no exterior

a) Esmay e Giese,<sup>20</sup> em um estudo sobre danos causados pelo vento em construções rurais, apresentam os resultados de um trabalho estatístico de vinte anos desenvolvido pela Iowa Agricultural Experiment Station. Destacamos as seguintes conclusões: “Alguns celeiros aparentemente resistentes foram demolidos devido à falta de consideração do contraventamento, bem como de uma adequada ancoragem dos telhados. Quase todos estes danos teriam sido evitados com apenas um pequeno custo extra”. Já para o problema da cobertura dos telhados, “para evitar a maioria dos acidentes será necessário um esforço dos fabricantes e colocadores para obter economicamente elementos de coberturas que resistam ao vento”.

b) Scruton e Newberry<sup>35</sup> citam diversos casos de arrancamento de elementos de cobertura ou de todo o telhado. Por exemplo: uma cobertura asfáltica em telhado pouco inclinado de uma água foi arrancada pela sucção, nas proximidades da quina de barlavento. Outro caso interessante é o de parte de cobertura de telhado arrancada pela sucção que se formou atrás de uma torre de igreja. Problema análogo apareceu em igreja de Porto Alegre, em que o telhado atrás da torre foi, por várias vezes, danificado por se encontrar em zona de fortes sucções (esteira muito turbulenta da torre).

Scruton e Newberry constataram centenas de casos de telhados danificados a sotavento de chaminés nos vendavais do inverno de 1962-1963 (Grã-Bretanha).

c) Font,<sup>32</sup> estudando os danos causados por furacões em Porto Rico, chegou às conclusões a seguir expostas. A velocidade máxima do vento foi de cerca de 220km/h.

As estruturas de aço e concreto armado danificadas tinham projeto estrutural deficiente. Ou eram fracas demais, ou o contraventamento era deficiente ou inexistente, ou a esbeltez dos pilares de aço era demasiada.

Outras conclusões, mais específicas, são:

1º – a pressão do vento usada nos cálculos é muito baixa;

2º – construções de concreto armado, quando bem calculadas e apropriadamente construídas, são à prova de furacões;

3º – contraventamento e conexões dos contraventamentos das estruturas de aço devem ser cuidadosamente estudados, e não apenas feita uma estimativa;

4º – coberturas em painéis leves (zinco, ferro galvanizado, alumínio etc.) e telhas de barro são inseguros e um elemento de perigo durante furacões. Um grande número de mortes foi devido a pedaços de coberturas que voavam;

5º – o único telhado à prova de furacões é o de laje de concreto;

6º – usar janelas com vidros reforçados, quando são diretamente expostos ao vento;

7º – telhados a quatro águas resistem mais que os de duas;

8º – ferragens comuns de portas e janelas não são suficientes. Elas voam fora;

9º – treliças de telhados devem ser seguramente ancoradas às paredes da construção;

10º – no caso de linhas telefônicas, telegráficas e de força elétrica, é mais econômico segurá-las do que construí-las à prova de ciclones.

d) Saffir,<sup>34</sup> estudando furacões de Miami, concluiu que o dano mais comum foi em telhados de residências e de pequenas estruturas. Coberturas de papelão alcatroado foram arrancadas de residências pela força do vento. Altas sucções apareceram principalmente em coberturas planas de residências, que sofreram mais danos que telhados inclinados. Algumas residências mostraram insuficiência de ancoragem dos telhados. Em muitos casos a razão de colapso de telhados foi a falta de atenção para detalhes construtivos supostamente sem importância. Parece ter sido ignorada a possibilidade da existência de altas sucções.

Torres metálicas de rádio em geral sofreram danos, e 11 foram completamente destruídas. A ruína parece ter iniciado por flambagem de barras, individualmente. Nenhuma torre ruiu por tombamento da estrutura inteira. Diversas torres estaiadas resistiram à força do furacão sem dano.

Saffir, para resumir, salienta que além de danos gerais em telhados de pequenas estruturas e em torres de rádio, não houve grande dano estrutural na tempestade de 1950.

e) É interessante assinalar que Wilson<sup>45</sup> concluiu que a ancoragem dos telhados poderia evitar praticamente todos os danos a telhados causados por ventos fortes e furacões (120 a 200km/h) e poderia também evitar alguns dos danos dos tornados, fora da trajetória de seu núcleo. Dos acidentes estudados por Wilson, o tipo mais freqüente de danos foi justamente sobre coberturas de telhados.

Quanto às paredes, os danos em geral foram devidos ao levantamento de telhados sem ancoragem, com o conseqüente colapso das paredes por falta de suporte lateral no nível do telhado. Também paredes de alvenaria de edifícios em construção foram demolidas por inadequada ancoragem.

Janelas foram freqüentemente danificadas por tempestades comuns e também por furacões. Em geral devido à fixação fraca, mas também por colocação imprópria.

Também lanternins sofreram danos.

A principal recomendação de Wilson é: ancorar telhados (nenhum caso de acidente foi constatado nos telhados ancorados e calculados com uma força de sustentação adequada). “Se os telhados estão ancorados, e assim sendo não podem ser levantados pelo vento, de modo que as paredes têm apoio na parte superior, é extremamente improvável que elas sejam danificadas”.

Para paredes em construção Wilson recomenda usar contraventamento provisório sempre que a altura da parede seja superior a 10 vezes sua espessura. Um acidente por falta deste contraventamento ocorreu no município de Canoas, Rio Grande do Sul, em dezembro de 1962. Toda uma parede em construção, com 60m de comprimento e cerca de 2m de altura, ruiu. Maiores detalhes serão dados no item 5.f.

f) Furacão de Miami de 1950 (velocidade do vento acima de 240km/h, a 69m de altura). Da revista *Civil Engineering*<sup>1</sup> extraímos os seguintes comentários:

O código de Miami especifica cuidadosa ancoragem de todas as tesouras; muito poucos casos foram encontrados onde tesouras e estruturas de telhados foram danificados. Os danos em geral foram em detalhes dos telhados. Observe-se que só 0,3% do número total de construções sofreu danos, enquanto o furacão de 1926 danificou 80%. Isto indica que o novo código de construção levou em conta devidamente a lição.

g) Furacão da Flórida,<sup>39</sup> 18 de setembro de 1926. Causou danos de 75 milhões de dólares. Vento de 200km/h, com rajadas de maior velocidade. De cerca de 25 edifícios, três foram danificados. Todos eles eram muito estreitos e estavam abertamente expostos ao vento em todas as direções.

Por outro lado, a percentagem de acidentes em construções com grandes áreas sem repartições (garagens, igrejas, salões etc.) foi bem maior: freqüentemente sofreram colapso completo. Algumas delas tinham vigas e pilares nos planos das paredes, mas não vigas transversais, de modo a formar uma estrutura espacial.

O processo de destruição em geral foi o seguinte: as platibandas foram jogadas sobre o telhado ou para um lado. Isto abriu uma entrada para o vento através do telhado danificado ou ao longo da linha aberta entre telhado e parede. A sobreprensão interna e sucção externa arrancaram o telhado. As paredes, sem apoio superior, ruíram.

Vê-se, pois, a grande importância de usar telhados de boa resistência e bem-ancorados. Telhados em chapas de papelão alcatroado e fixadas com pregos em geral são rasgados. Telhas de barro são geralmente arrancadas; se as telhas são enganchadas, resistem mais. Telhados de folhas galvanizadas foram invariavelmente arrancados. Muito dano foi causado a telhados por objetos pesados que voavam, inclusive telhas arrancadas de outras construções.

h) Editorial de *Engineering News-Record*<sup>40</sup> chama a atenção de que os relatórios de danos de furacões mostram que a maior causa de danos é a falta ou insuficiência de ancoragem dos telhados nas construções.

i) Theakston e Walpole,<sup>41</sup> estudando os acidentes causados pelo tornado que assolou Ontário, no Canadá, em 1953, chegaram, entre outras, à conclusão de que uma considerável parcela dos danos inflingidos a edificações adjacentes à trajetória do tornado teria sido evitada ou reduzida se:

- o telhado estivesse em boas condições;
- os caibros estivessem firmemente ancorados;
- o contraventamento interno tivesse sido adequado;
- a estrutura tivesse sido ancorada à fundação.

Os autores estão se referindo principalmente a construções rurais, de madeira.

j) A lista dos acidentes provocados pelo furacão Camille (1969)<sup>33</sup> é a seguinte:

- 5.662 casas destruídas;

- 13.915 casas com grandes danos;
- 33.933 casas com pequenos danos;
- 1.082 casas móveis (*mobile homes*) destruídas;
- 621 casas móveis com grandes danos;
- 775 construções rurais destruídas;
- 2.289 construções rurais com grandes danos;
- 679 lojas pequenas destruídas ou com grandes danos.

Os autores do relatório chamam a atenção de que muitos detalhes estruturais eram inadequados para assegurar resistência a furacões. Além disso, objetos e fragmentos volantes causaram danos consideráveis às estruturas, evidenciando o fato de que elementos leves, placas metálicas e afins podem causar considerável dano funcionando como projéteis, durante furacões.

k) De dois relatórios que tratam do tornado que se abateu sobre Lubbock, Texas (1970),<sup>37,11</sup> extraímos as seguintes informações:

- 28 mortes e 2.000 pessoas feridas;
- prejuízos de 135 milhões de dólares;
- área de danos severos: 23km<sup>2</sup>;
- área de danos leves: 15km<sup>2</sup>;
- residências destruídas: 460;
- residências com danos consideráveis: 489;
- residências com danos pequenos: 764;
- casas móveis destruídas: 80;
- casas móveis com danos consideráveis: 30;
- lojas pequenas destruídas: 250;
- unidades de apartamentos destruídas: 600 (inclui nove edifícios com 240 unidades).

A velocidade média de translação do tornado foi de cerca de 34km/h. A velocidade máxima (de translação e de rotação combinadas) não pôde ser determinada. Pelos danos, uma estimativa razoável é de 320km/h no centro da cidade, aumentando para 480km/h na região mais atingida.

l) Tornados com velocidades acima de 420km/h (117m/s) são raros. Não chegam a 2% de todos os tornados. Porém são responsáveis por 68% das mortes por eles causadas. Estas são as conclusões de uma análise de 20.000 tornados feita nos Estados Unidos. Enquanto para a grande maioria dos tornados sua trajetória anda em torno de 3km, com uma largura média de 140m, esses violentos e raros tornados chegam a percorrer 400km, com uma largura de cerca de 2km. A destruição em sua trajetória é impressionante: árvores e postes são arrancados e lançados à distância; casas bem-construídas, incluindo grandes mansões, são to-

talmente destruídas; carros e caminhões são lançados à distância e amassados; detritos vários, bicicletas, motocicletas e até carros e pessoas são levantados do terreno e lançados a distâncias consideráveis, que podem chegar a alguns quilômetros para os objetos mais leves.

Um tornado com estas características atingiu, no início do mês de maio de 1999, o norte do estado de Oklahoma, Estados Unidos, destruindo cerca de 2.000 moradias, além de danos genéricos, anteriormente descritos. Este tornado fazia parte de um grupo de 40 tornados que se formaram naquela data nessa região dos Estados Unidos. Foram 48 os mortos e mais de 700 os feridos em Oklahoma e no vizinho estado de Kansas.

Poucas horas antes esta mesma região tinha sido atingida por um outro conjunto de 62 tornados. Total em um dia: 102 tornados! Em abril de 1974, um fenômeno similar, com 148 tornados, varreu 13 estados norte-americanos do sul e do vale de Ohio, matando 355 pessoas e causando um prejuízo de 600 milhões de dólares (dólar de 1974). Aliás, a região continental dos Estados Unidos é a região do mundo com a maior ocorrência de tornados (de 1.000-1.100 por ano); só no Alaska não foi registrado este fenômeno atmosférico.

m) Furacão *Gilbert*, setembro de 1988.<sup>14,15</sup> Passou pela República Dominicana, Haiti, Jamaica, península de Yucatan (México) e Texas (Estados Unidos). Foi um dos furacões mais violentos a atingir a Jamaica. Na época foi descrito, com muito exagero e falta de oportunidade, como o “furacão do século”. Entretanto, logo no ano seguinte já perdeu para o furacão Hugo.

Próximo à costa jamaicana a velocidade média a 10m de altura foi estimada em 40m/s (144km/h), com rajadas de até 60m/s (216 km/h), aproximadamente. Toda a Jamaica foi afetada, tendo sido as perdas nesta ilha estimadas entre 2 e 3 bilhões de dólares. Cerca de 25% das construções sofreram danos significativos, principalmente nas coberturas dos telhados. Dez hospitais também sofreram danos de importância. Torres de comunicação foram destruídas, escolas, igrejas e outras construções usadas como refúgio foram gravemente danificadas, com as pessoas no interior. Das 580 escolas da ilha, 500 foram danificadas ou destruídas. Nos edifícios de escritórios houve quebra considerável de vidros, com os conseqüentes danos pela entrada da chuva.

Das conclusões apresentadas por Davenport<sup>14</sup> destacamos:

– a maioria dos danos a construções foi devida a um inadequado controle de qualidade, especialmente no que diz respeito à fixação de telhas de alumínio e de aço galvanizado e à fixação da estrutura do telhado às paredes;

- a maioria das paredes de alvenaria era solidamente construída. Isto evitou o colapso das paredes, mesmo quando o telhado era arrancado;
- quando existente, a fixação da estrutura do telhado às paredes funcionou bem;
- telhados a quatro águas e de boa inclinação comportaram-se muito melhor que os telhados a duas águas e telhados planos.

n) Furacão *Hugo*, setembro de 1989.<sup>38</sup> O local mais atingido foi “Bulls Bay”, no centro da costa da Carolina do Sul, onde as rajadas atingiram 65m/s (234km/h). A velocidade média sobre 10min, nesta mesma região (campo aberto), foi de 38m/s (137km/h). Os danos foram estimados em mais de 6 bilhões de dólares, sendo que cerca de 4 bilhões em danos a construções.

o) Furacão *Andrew*, agosto de 1992. Após passar pelas Bahamas, o furacão atingiu, com muita violência, a região sul da Flórida, parte da Luisiana e do Texas. A velocidade máxima indicada em revista de divulgação parece-nos exagerada: 320km/h (89m/s). No continente houve 20 mortes, 200 mil desabrigados, 62 mil casas destruídas (?). A estimativa dos prejuízos varia amplamente: começa em 6 bilhões e vai até 30 bilhões de dólares (?). Até esta data, foi o terceiro mais forte furacão registrado nos Estados Unidos no século XX.

Eis uma descrição do que aconteceu em Miami: árvores foram arrancadas, postes caíram, casas e lojas foram destruídas, uma boa parte da cidade ficou sem energia elétrica, os barcos no porto foram atirados uns contra os outros por ondas de até 5m de altura. O National Hurricane Center perdeu seu radar e anemômetro quando este registrava uma rajada de 262km/h (73m/s).

Apenas duas pessoas mortas; provavelmente porque cerca de um milhão de moradores da região tinha sido previamente evacuado.

p) Furacão *Floyd*, setembro de 1999. Este furacão assolou as Bahamas com rajadas de até 240km/h (67m/s). Continuou seu caminho desviando-se para o norte, atingindo o litoral da Flórida e da Carolina do Sul, com rajadas já atenuadas, que não ultrapassaram 200km/h (56m/s). O temor de que o furacão viesse a ser um dos piores do século levou 3 milhões de pessoas a deixarem suas casas. As estradas ficaram completamente congestionadas, não só na Flórida como também na Georgia e na Carolina do Sul. Ao entrar no continente a velocidade do vento baixou para 144km/h (40m/s) e, como sempre, foi perdendo velocidade à medida que avançava terra a dentro. O furacão, quando atingiu Nova Iorque, já não era mais um furacão, pois sua



velocidade era muito baixa para ser assim designado (velocidade abaixo de 120km/h-33m/s).

No século XX, informaram os jornais, só dois furacões mais fortes que o Floyd assolaram os Estados Unidos: um furacão que, no sul da Flórida, em 1935, além da destruição de casas, árvores, postes etc., matou 408 pessoas; o outro foi o furacão Camille, em 1969, que matou 256 pessoas na Louisiana e no Mississipi. Uma lista dos acidentes provocados por este último furacão citado já foi dada no item 4.j. Observe-se que o citado furacão da Flórida, em 1935, nem tem nome. Naquela época os furacões eram simplesmente numerados. Somente após a Segunda Guerra Mundial é que eles passaram a ter nomes de pessoas, inicialmente só de mulheres. Por pressão do movimento feminista, na década de 60 passaram a ter, alternadamente, nome feminino e masculino.

q) Furacão *Bart*, setembro de 1999. Eis um exemplo de furacão na costa leste da Ásia, região também assolada por violentos ciclones tropicais, lá conhecidos como tufões. A velocidade máxima do vento chegou a 238km/h (66m/s) e provocou ondas gigantes que ameaçaram cidades inteiras situadas nas proximidades do estreito coreano. No sul do Japão, causou 26 mortes e mais de 300 feridos. Na ilha de Kyushu, Japão, 60 casas no litoral foram “engolidas” por um maremoto, morrendo 12 pessoas. Em Hiroshima, um guindaste pesando 100 toneladas caiu sobre uma fábrica da Mitsubishi, matando três pessoas e ferindo quatro.

Na Coreia do Sul foram quatro mortes. Duas delas ocorreram durante o descarrilamento de um trem, as outras, em virtude de inundações e deslizamentos.

r) Marshall, em seu relatório sobre o furacão Tracy, em Darwin, Austrália (1974),<sup>26</sup> estudando os danos por ele causados, chega à conclusão que são necessárias pesquisas adicionais nos tópicos seguintes, entre outros:

- comportamento de edificações sujeitas a pressões internas anormalmente altas em virtude da ruptura de portas e janelas;
- comportamento de telhas de folhas galvanizadas e sistemas de fixação sob cargas repetidas;
- resistência de materiais frágeis, tais como fibrocimento, ao impacto de projéteis.

s) Do estudo de Cook<sup>13</sup> sobre o comportamento das edificações no Reino Unido sob a ação dos ventos tiraram-se os comentários a seguir expostos:

*Residências.* Os danos foram principalmente: remoção de telhas e ardósias, danos ou remoção de chaminés, danos a oitões e paredes laterais, e quebra de janelas. O dano mais comum foi em telhados, e, muitas vezes, iniciava nos cantos ou ao longo das bordas ou cumeeira. Danos superficiais em telhados cobertos com telhas começaram com velocidades de vento com período médio de recorrência de apenas dois anos. A remoção completa do telhado, incluindo a estrutura de madeira, foi mais rara e geralmente em construções antigas.

Danos em paredes de alvenaria de tijolo ocorreram geralmente em oitões, especialmente onde o aceleração do vento entre casas originou grandes sucções (efeito Venturi).

*Revestimentos leves.* Revestimentos, em particular em coberturas leves de telhados de pequena inclinação, são freqüentemente danificados. Em geral as folhas de metal ou asbesto são arrancadas de suas fixações, deixando o restante do telhado intacto. De modo análogo foram danificados revestimentos leves de paredes.

*Construções abertas.* Arquibancadas cobertas, exemplo típico de construções abertas, são vulneráveis à ação do vento, pois podem estar sujeitas a sobrepessões internas consideráveis, que somam seus efeitos às sucções externas, originando assim grandes forças ascensionais. Danos a 45 arquibancadas cobertas foram registrados apenas no período de 1970 a 1976. Em geral o revestimento foi removido, mas ocasionalmente grande parte da estrutura foi destruída. Algumas arquibancadas cobertas pequenas ruíram.

*Durante a construção.* A presença de grandes aberturas em edificações em construção faz com que as mesmas possam estar submetidas a cargas semelhantes às que aparecem em construções abertas, sem que estejam, muitas vezes, com sua estrutura resistente terminada. Diversos reservatórios de grandes dimensões foram danificados antes da montagem de suas coberturas, embora tenham sido usados enrijecedores temporários. Também houve falhas em estruturas de grandes dimensões, tanto em aço como em concreto armado, pela falta de contraventamento. A falha mais comum em residências durante a construção foi nos oitões, que funcionavam como paredes em balanço, antes da construção do telhado, ao qual são fixados.

*Outros tipos.* Muitos danos foram causados a estruturas pequenas e temporárias, tais como cercas, paredes, andaimes, galpões, estufas etc. Muitos muros foram derrubados integralmente.

t) O edifício John Hancock, em Boston,<sup>40,28</sup> durante o ano de 1973 começou a ter seus vidros rompidos, sempre que a velocidade do vento chegava a 22m/s (80km/h). No total foram quebrados cerca de 5 mil

vidros, os quais foram sendo substituídos por placas de madeira compensada, enquanto o problema era estudado.

A causa dos sucessivos acidentes não era nenhuma das usuais: fragmentos volantes, sobrepressão ou sucção elevadas (por rajadas violentas, pela turbulência gerada nos edifícios a barlavento ou por efeito Venturi). Foi constatado que o edifício apresentava uma deformação por torção demasiadamente grande, com o que as janelas se deformavam e os vidros saltavam fora.

Para solucionar o problema, 300 vigas de aço em forma de cantoneira foram utilizadas para reforçar a estrutura. Um amortecedor gigante com 600 toneladas de chumbo e aço foi fixado por molas ao 58º piso. Vidro temperado mais resistente foi instalado em todas as 10.344 janelas. O custo destas obras foi de 15 milhões de dólares, fazendo subir o custo total do edifício a 150 milhões de dólares.

u) Para terminar este capítulo daremos, na Tabela 1, algumas informações sobre características meteorológicas de quatro furacões de grande violência.

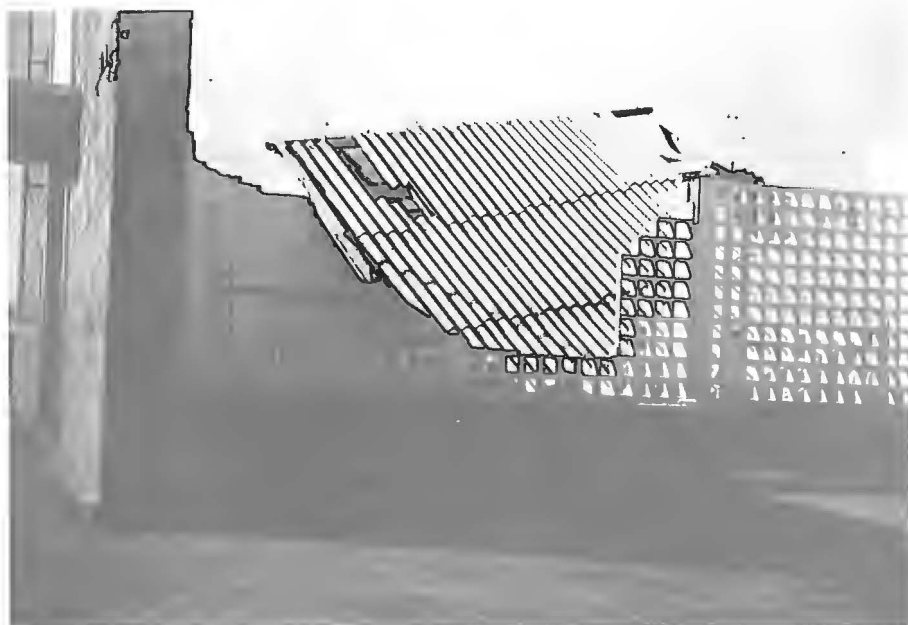
**Tabela 1**  
**CARACTERÍSTICAS METEOROLÓGICAS DE FURACÕES**

FURACÃO	Camille (1969) Mississippi	Celia (1970) Texas	Tracy (1974) Austrália	Gilbert (1988) Jamaica
Pressão no núcleo (mbar)	905-915	940-950	940-950	963
Velocidade máxima do vento (m/s)	75-85	70-75	60-75	60
Raio do círculo com ventos acima de 50m/s (km)	30-50	25-30	10-12	-
Diâmetro do núcleo (km)	8-10	20-30	8-10	40-50
Velocidade de deslocamento (m/s)	6	6	2	7

## Exemplos de acidentes no Brasil

a) Grupo Escolar em Júlio de Castilhos. Temporal da noite de 29 de agosto de 1961. O vento incidiu obliquamente a uma das fachadas, justamente a que possuía uma parte em elementos vazados (Figura 1a), situados perpendicularmente a uma parede maciça de pedra. Esta é uma solução arquitetônica aerodinamicamente perigosa, pois o vento, incidindo obliquamente a ambas as paredes, ocasiona uma região entre as duas paredes com altas sobrepressões externas, as quais se transmitem ao interior da construção pelos elementos vazados. Esta sobrepressão interna somou sua ação ascensional à sucção externa (inclinação do telhado:  $12^\circ$ ), arrancando todo o telhado (cobertura e estrutura) e grande parte das vigas de ancoragem do mesmo (Figura 1b). Um dos extremos de uma destas vigas estava por sua vez ancorado com dois ferros de 2m em uma parede de pedra. Estes ferros foram arrancados (Figura 1c). Em outro local, onde a viga de ancoragem estava melhor ancorada, o parafuso que solidarizava tesoura e viga levou consigo um cilindro perfeito de concreto, de base delimitada pela placa inferior de ancoragem (Figura 1d).

b) Depósito de cereais em Carazinho. Com este depósito ocorreu uma série de acidentes. No primeiro deles o vento arrancou diversas telhas, o que levou os responsáveis a ancorarem-nas melhor. Uma segunda ventania levou então telhas e terças, arrancando as peças em U, com pontas de lança, que uniam terças e arcos de madeira (Figura 2). A ligação danificada foi refeita com várias voltas de ferro comum de construção. A ventania de 26 de setembro de 1961, com rajadas de 67km/h, encontrando uma boa ancoragem na parte superior, partiu pela base



*Figura 1a* – Grupo Escolar em Júlio de Castilhos, RS.



*Figura 1b* – Grupo Escolar em Júlio de Castilhos, RS.



*Figura 1c* – Grupo Escolar em Júlio de Castilhos, RS.



*Figura 1d* – Grupo Escolar em Júlio de Castilhos, RS.

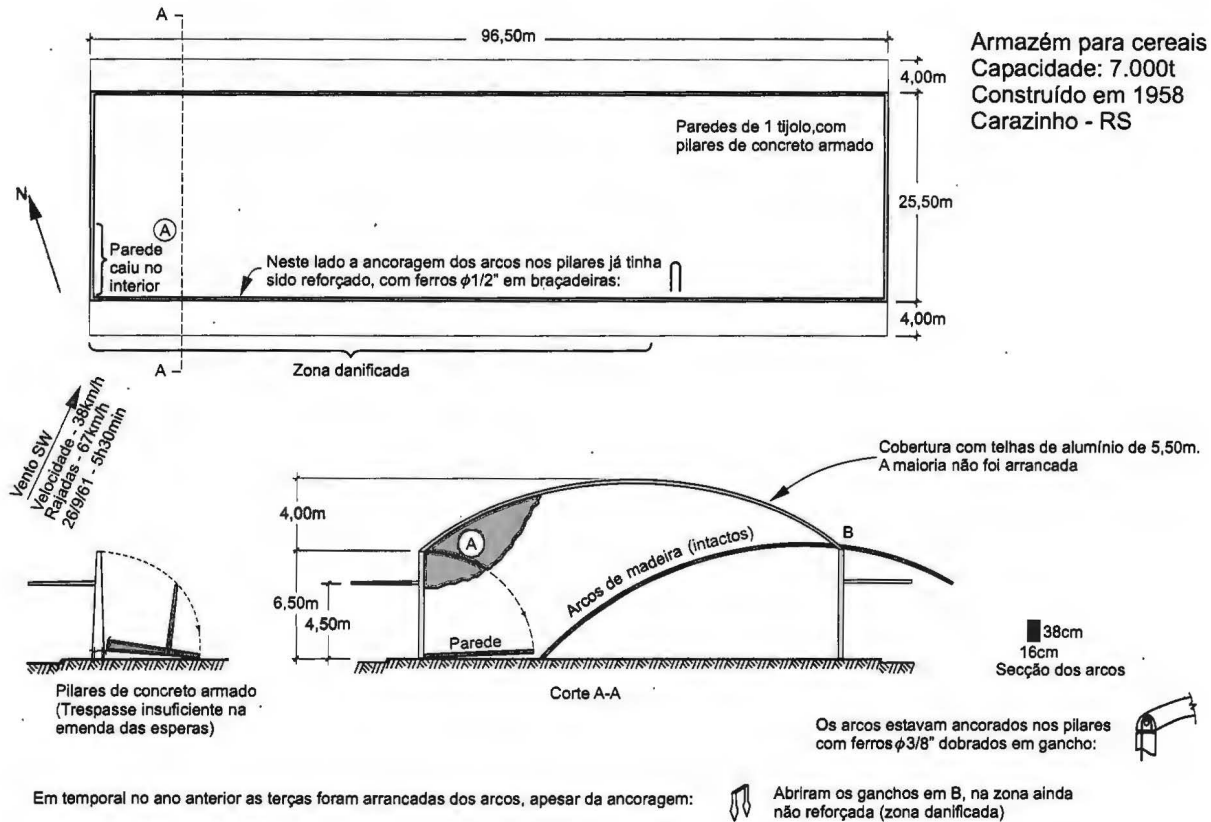


Figura 2 – Depósito de cereais em Carazinho, RS.



*Figura 3a* – Clube na praia Curumim, RS.



*Figura 3b* – Clube na praia Curumim, RS.



os pilares de concreto armado de barlavento. Neste lado a ancoragem dos arcos nos pilares já tinha sido reforçada com ferros de 12,5mm, em braçadeiras (as duas pontas mergulhadas no pilar). Na parede de sotavento isto fora feito apenas em alguns pilares. Na maioria deles (“zona danificada” da Figura) ainda estava a ancoragem primitiva, de ferros 9,5mm apenas dobrados em gancho. Estes ganchos foram retificados e os arcos foram levantados a sotavento pela força ascensional do vento. Estabeleceu-se no interior uma sucção que, aliada à sobrepressão externa na parede de barlavento, empurrou esta para dentro da construção. Os pilares de concreto armado de barlavento ruíram, em virtude da justaposição insuficiente das barras de aço das “esperas” das fundações. Mesmo ruindo os pilares conservaram-se solidários aos arcos, que se apoiaram intermediariamente nos pilares de sotavento (Figura 2). Os arcos ficaram intactos. A cobertura era de telhas de alumínio de 5,50m, e poucas foram arrancadas. Uma parte da parede lateral mais de barlavento ruiu para o interior do pavilhão.

Moral da história: se toda a estrutura não for convenientemente dimensionada, incluindo fundações, o melhor é deixar as telhas voarem (se a construção estiver isolada e as telhas volantes não puderem causar danos a pessoas, veículos, edificações etc.).

c) Praia do Curumim. Temporal de 30 de novembro de 1961. Diversas residências de veraneio tiveram os telhados danificados, sendo que de uma delas voaram todas as telhas de fibrocimento. O acidente mais notável foi o ocorrido no clube social.

O telhado do clube “arfava”, movendo-se como uma membrana, para cima e para baixo. Em dado momento os vidros das janelas da frente não resistiram à sobrepressão e estalaram (Figura 3a). Imediatamente o telhado levantou vôo, levando junto lâmpadas e lustres que nele estavam fixados. O conjunto passou por sobre uma parede interna e a dos fundos, indo cair a cerca de 40 metros (Figura 3b). A cobertura era de telhas de fibrocimento; telhado de duas águas de pequena inclinação.

Causa do acidente: alta sobrepressão interna, devido à ruptura dos vidros, aliada à alta sucção externa, provocou uma força de sustentação superior ao peso próprio; não havendo ancoragem do telhado nas paredes, ele foi levantado.

Uma segunda ventania, dias após, derrubou uma das paredes, que ficara livre em seu extremo superior:

d) Prédio nos arredores de Porto Alegre, 1962 e 1963. No temporal de 3 de dezembro de 1962 o vento incidiu obliquamente à ala sul. Observa-se na Figura 4 que o telhado completo (cobertura de alumínio,



*Figura 4 – Prédio nos arredores de Porto Alegre, RS.*

terças e tesouras) foi arrancado em seus primeiros 20 metros, indo parte cair no solo e parte na ala vizinha. Em outro temporal, mais violento, em 16 de março de 1963, os 9 metros mais de barlavento do telhado foram arrancados, indo parar a mais de 100 metros de distância. Também neste caso a incidência do vento foi oblíqua.

A causa do arrancamento do telhado, em ambos os casos, foi a falta de ancoragem.

Também outras construções situadas nas proximidades tiveram seus telhados arrancados total ou parcialmente, e lançados alguns deles a grandes distâncias.

e) Pavilhão da FENAC, Novo Hamburgo. Em abril de 1963 o vento danificou o pavilhão da FENAC, que mede 40 x 100m, com telhado curvo revestido com telhas de fibrocimento. A estrutura do telhado é constituída por arcos triarticulados, de treliça metálica. O vento agiu quase axialmente, pela frente. Ainda não estavam colocados os vidros do oitão da frente. Os portões têm dimensões de 3 x 4m. Estavam abertos os três portões da frente e os quatro das paredes laterais (dois em cada). Os dois portões da parede dos fundos estavam fechados, e o oitão desta parede já tinha os vidros colocados. Nestas condições, o esforço de sobrepressão interna somou seus efeitos à sucção externa. A força ascensional levantou a cumeeira do telhado e inverteu o sentido do empuxo nos dois apoi-



*Figura 5a* – Pavilhão da FENAC em Novo Hamburgo, RS.



*Figura 5b* – Pavilhão da FENAC em Novo Hamburgo, RS.

os. A vinculação destes era incompleta, apta a resistir apenas a empuxo para fora. Com a inversão deste, os dois extremos dos arcos correram para dentro e o telhado caiu no interior do pavilhão (Figuras 5a e 5b).

De acordo com a norma brasileira da época, a NB-5, o coeficiente de pressão é constituído de um coeficiente de pressão interna de 0,5 e de um coeficiente de pressão externa de -0,5, supostos uniformemente distribuídos. Portanto, o coeficiente de pressão será numericamente igual à sua soma:

$$c_p = 1,0$$

Ensaíos e normas mais atualizadas indicam um coeficiente de pressão interna de 0,8, e um externo de -1,1 (nas condições da obra em estudo e na região mais de barlavento). Assim sendo, o coeficiente de pressão na região mais de barlavento será

$$c_p = 1,9$$

Isto é, um valor praticamente duplo do da NB-5, e que ocasiona um esforço para cima de

$$F = C q = 1,9 \cdot 60 = 114 \text{ kgf/m}^2 \text{ (de 6-20m)}$$

superior ao peso próprio do telhado.

A causa do acidente foi, portanto, o esforço ascensional muito superior ao de cálculo, aliado a uma ancoragem deficiente.

Este acidente mostra a importância, em certos casos, da ordem de fechamento de paredes e/ou aberturas. Os oitões deveriam ter sido envidraçados simultaneamente. Ou, caso fosse conhecida a orientação dos ventos mais violentos, fechar primeiro o oitão de barlavento, para evitar o aparecimento de altas sobrepressões internas.

f) Um outro exemplo típico da importância do modo de fechamento de uma edificação é fornecido pelo acidente ocorrido durante a construção de uma fábrica em Canoas.

O vento incidiu contra a fachada situada à esquerda, na Figura 6. Esta fachada já estava com as paredes prontas, porém sem esquadrias. Estava em construção a parede da fachada oposta, que ruiu integralmente. Esta parede estava praticamente na situação de um muro isolado, pois sua ligação aos pilares era muito fraca, apenas com argamassa; não tinham sido deixados ferros horizontais nos pilares, para uma ancoragem eficiente das paredes.

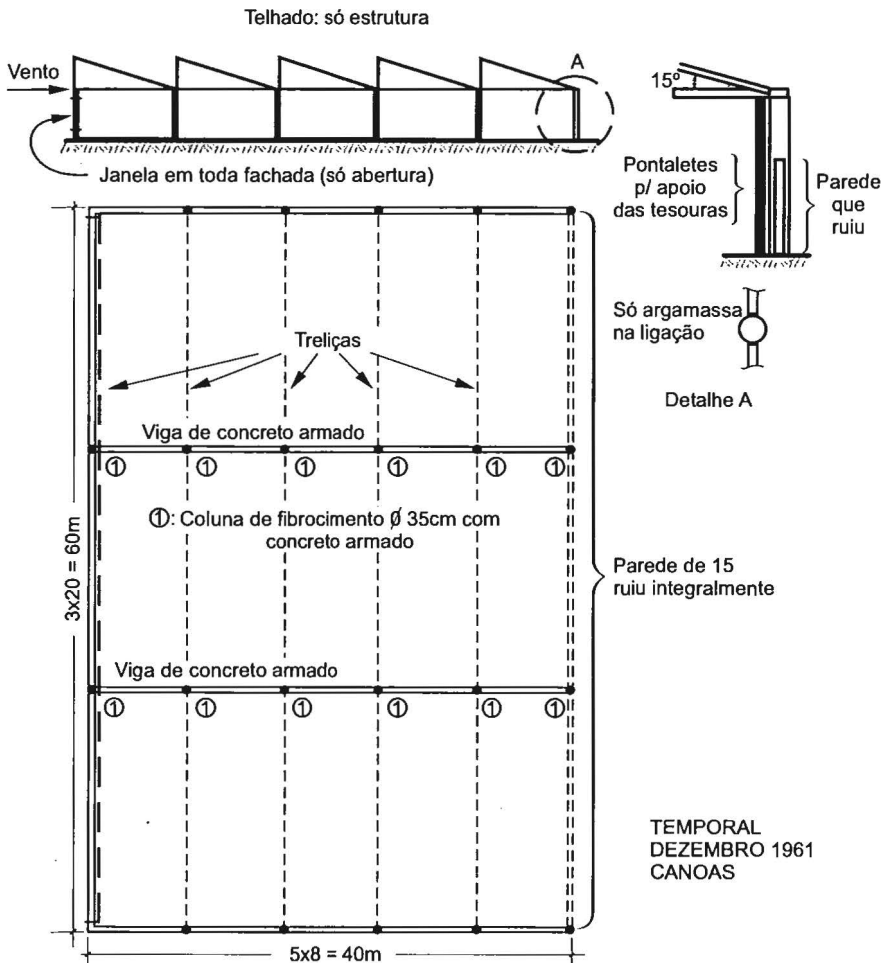


Figura 6 – Fábrica em construção em Canoas, RS.

Os muros isolados, aos quais comparamos a parede que ruiu, são muito sensíveis à ação do vento, pois têm apenas seu peso próprio para garantir sua estabilidade. Como regra aproximada, um muro isolado não pode ter uma altura superior a 10 vezes sua espessura resistente (isto é, não se considera a espessura do reboco). Contraventar durante a construção, se for necessário ultrapassar esta altura, é uma prática recomendável para o construtor não ter surpresas desagradáveis.

Muros de divisas em geral não obedecem a esta regra. É só aparecer uma rajada de vento com uma boa intensidade e na obliquidade mais nociva que ele ruiu (vento oblíquo origina forças maiores que vento perpendicular ao muro – ver NBR-6123).

g) Cinema em construção, em Caxias do Sul. Temporal de 1963. Todo o telhado (com cobertura de alumínio) subiu com a força ascensional do vento e depois caiu no interior vazio da construção. Foi rapidamente retirada a alvenaria dos painéis superiores das paredes, para aliviar o esforço na estrutura e evitar sua ruína. Mesmo assim a parede lateral de sotavento ficou fortemente encurvada, com nítidas fissuras de corte nas ligações vigas-pilares. Observe-se na Figura 7 que as paredes eram estruturadas em seus planos. As tesouras não estavam ancoradas nas paredes, o que ocasionou o arrancamento do telhado e a conseqüente deformação das paredes, que ficaram sem apoio na parte superior.

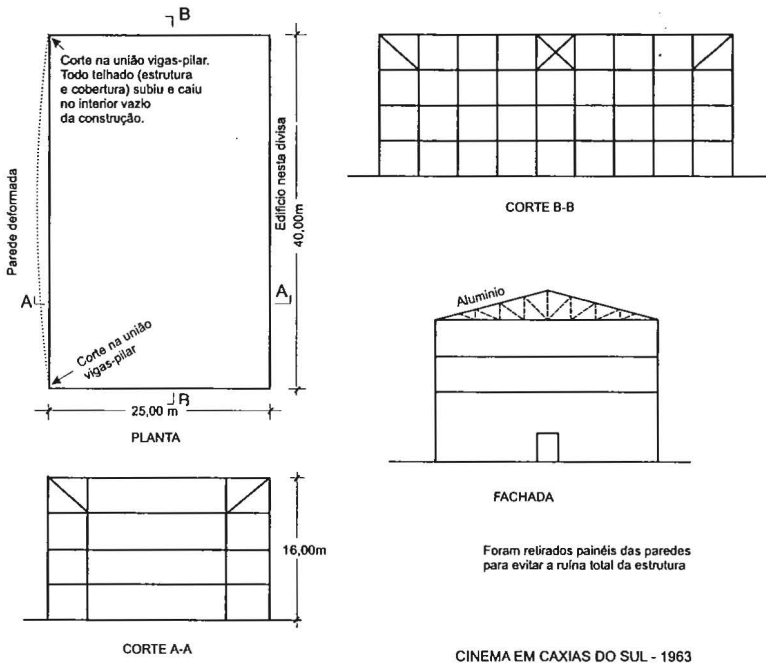


Figura 7 – Cinema em construção em Caxias do Sul, RS.

h) Acampamento para construção de barragens, em Santiago. Temporal de 23 de agosto de 1963. Foram arrancadas as coberturas dos telhados, de folhas onduladas de ferro galvanizado, de todas as construções do acampamento. Em alguns casos parte das terças foram arrancadas, solidárias às telhas, indo cair o conjunto algumas dezenas de metros adiante. No escritório, também as tesouras foram levadas pelo vento, bem como as tampas dos reservatórios de fibrocimento. A porta que ficava no fim do patamar foi arrancada (Figura 8a).



*Figura 8a* – Acampamento para construção de barragem em Santiago, RS.



*Figura 8b* – Acampamento para construção de barragem em Santiago, RS.

Na Figura 8b aparece um dos pavilhões para máquinas. Observe-se que os pilares e tesouras, convenientemente contraventados, resistiram ao esforço do vento. A parede dos fundos permaneceu intacta; a parte da frente era aberta. A sobrepessão interna somou seus efeitos à sucção externa.

i) Depósitos da Petrobrás, em Canoas, 12 de abril de 1964. De um conjunto de 16 tanques de petróleo (12 de 15.000 barris e 4 de 5.000 barris), o vento danificou 15, sendo que 13 foram fortemente amassados (Figura 9b) e 2 tanques tiveram duas chapas deformadas. O anel inferior dos tanques maiores era de chapa 8mm (este anel não foi deformado), e os quatro anéis acima deste de chapas 6,4mm.

O vento incidiu obliquamente ao eixo do conjunto de tanques (Figura 9a). Note-se que não houve efeito de proteção: os tanques situados na esteira dos demais sofreram danos iguais ou maiores que estes.

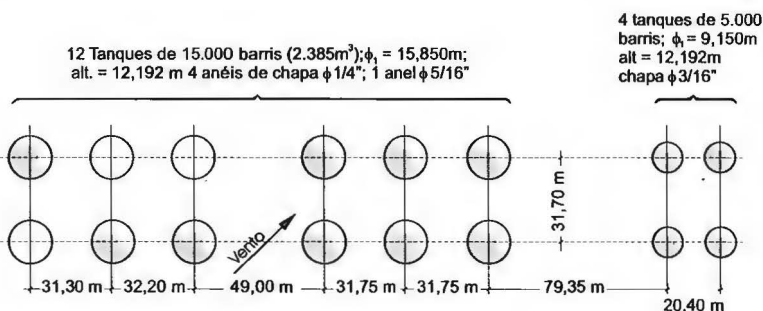


Figura 9a – Depósitos da Petrobrás em Canoas, RS.



Figura 9b – Depósitos da Petrobrás em Canoas, RS.



Os tanques estavam em construção; não tinham ainda tampa nem anel superior de enrijecimento. A velocidade do vento não foi muito alta. Estimaram-na em 40km/h; cremos que deve ter sido maior, embora não excepcionalmente alta.

O acidente foi causado pela sobrepressão exercida na parte de barlavento, e pelas altas sucções laterais. Aos efeitos da sobrepressão adicionaram-se os efeitos da sucção interna (que diminuiu mas não anulou as sucções laterais).

j) Escola Municipal nos arredores de Porto Alegre. Destruída por uma ventania em 1966. Causa: apesar de já estar colocado o revestimento externo de madeira e a cobertura do telhado, a estrutura de madeira ainda não estava contraventada. Tombou inteira para um dos lados (Figura 10).

k) Outros acidentes que julgamos de interesse mencionar são os seguintes:

- arrancamento total da cobertura em forma de parabolóide hiperbólico do ginásio coberto do Grêmio Futebol Portoalegrense (Figura 11).

- arrancamento da cobertura de um posto de serviço, em Canoas (Figura 12). Para maiores detalhes sobre a ação do vento em coberturas isoladas, consultar as referências 7 e 8. Em Santa Maria, em 1997, e entre Osório e Capão da Canoa, em 1998, postos de serviço sofreram o mesmo tipo de acidente, causado por vento que incidiu inclinado para baixo (e não horizontalmente), caso este previsto na Norma Brasileira NBR-6123/88 (Figura 13). Este problema é típico de coberturas isoladas.

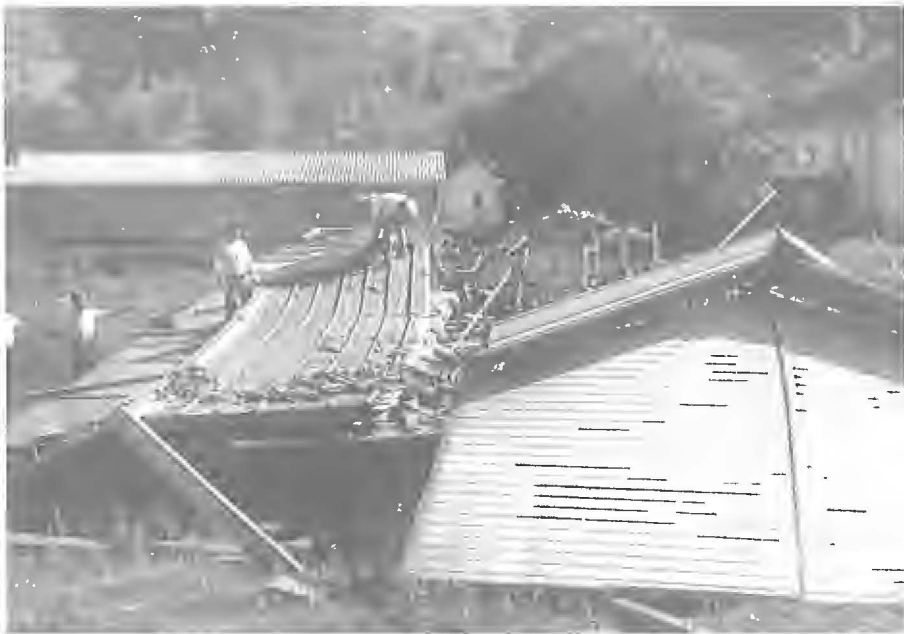
- deslocamento e deformação de uma escola na zona rural gaúcha (Figura 14).

- arrancamento de telhas de fibrocimento de grande porte, a partir do beiral não forrado (Figura 15).

- destruição total da cobertura e paredes laterais de um hangar, em Carazinho (Figura 16).

l) Os acidentes descritos neste item e nos anteriores ocorreram com ventos fortes, porém não excepcionais, em geral com velocidades abaixo do valor máximo previsto pela norma brasileira. São acidentes evitáveis, se forem devidamente considerados os fenômenos aerodinâmicos no projeto da estrutura.

Porém, há casos de ventos de velocidades excepcionais, alguns com características de tornados, embora não alcancem velocidades tão altas como em outras regiões, tais como a Argentina e os Estados Unidos da América.



*Figura 10a* – Escola Municipal nos arredores de Porto Alegre, RS.



*Figura 10b* – Escola Municipal nos arredores de Porto Alegre, RS.



*Figura 11 – Ginásio do Grêmio Futebol Portoalegrense, RS.*



*Figura 12 – Posto de serviço em Canoas, RS.*



*Figura 13a* – Posto de serviço em Santa Maria, RS (1997).



*Figura 13b* – Posto de serviço em Santa Maria, RS (1997).



*Figura 14* – Escola em zona rural gaúcha.



*Figura 15* – Arrancamento de telhas de fibrocimento de grande porte.



*Figura 16 – Hangar em Carazinho, RS.*

Entre os casos de tornados constatados no Brasil citamos cinco exemplos:

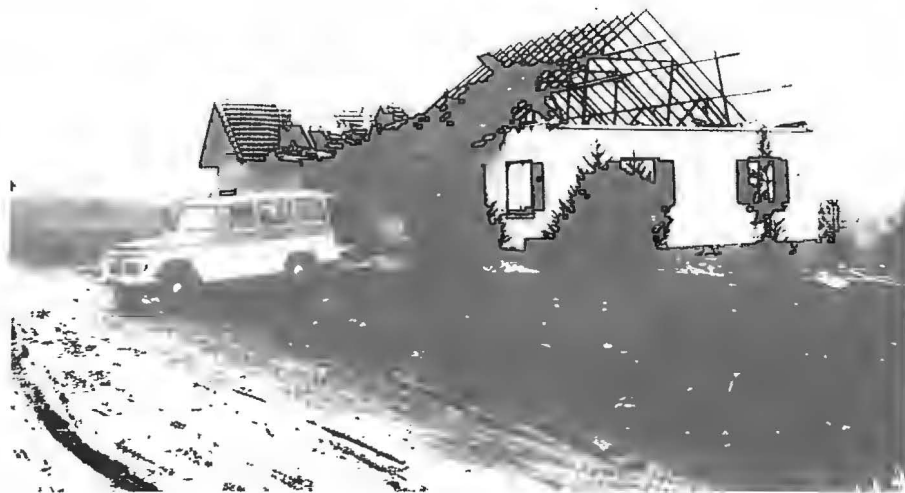
1º) No tornado que atingiu a cidade de Lageado, RS, em 1967, a velocidade do vento deve ter ultrapassado 150km/h. Os prejuízos materiais foram enormes, além de 6 mortos e 40 feridos. Foram danificadas 214 casas, sendo que outras 22 foram totalmente demolidas. Postes e árvores foram arrancados. Casas de madeira foram tiradas de sobre suas fundações. O pavilhão de feiras (FENAL) teve seu telhado completamente destruído, à semelhança da FENAC (item 5e).

O pavilhão paroquial (Figura 17a) teve todo o seu telhado e parte das paredes demolidos, danificando os carros estacionados nas proximidades. Quase nada sobrou da cobertura e dos oitões da casa que aparece na Figura 17b que, além disso, teve uma parede tombada para dentro. O parque de exposição de animais, de madeira, ficou totalmente destruído (Figura 17c). Outros danos podem ser vistos nas figuras 17d e 17e.

2º) Alvorada, RS. A Figura 18 mostra como ficou um dos pavilhões do terminal de uma empresa de ônibus. Um dos ônibus tombou no pátio do terminal. A largura da faixa atingida pelo tornado ficou claramente indicada por uma linha de postes de iluminação de uma das ruas,



*Figura 17a* – Pavilhão paroquial em Lageado, RS.



*Figura 17b* – Residência em Lageado, RS.



*Figura 17c* – Parque de exposição de animais em Lageado, RS.



*Figura 17d* – Outros detalhes dos danos ocorridos em Lageado, RS.





*Figura 17e* – Destruição total de telhado em Lageado, RS.



*Figura 18* – Pavilhão do terminal de ônibus em Alvorada, RS.



*Figura 19a – Acidente em Alvorada, RS.*



*Figura 19b – Acidente em Alvorada, RS.*



*Figura 19c – Acidente em Alvorada, RS.*

perpendicular à trajetória do tornado, que foram fortemente inclinados pelo vento. Nesta faixa a destruição foi intensa, com casas de madeira inteira ou parcialmente destruídas, árvores e muros tombados, postes inclinados, casas deslocadas de suas fundações, coberturas e estruturas de telhados arrancados total ou parcialmente etc. Este acidente ocorreu em 1976 (Figura 19).

3º) Guaíba, RS, 1978. O tornado atingiu as vizinhanças da cidade, arrancando pedaços de árvores e árvores inteiras, derrubando postes, arrancando coberturas e estruturas de telhados etc. Em uma das casas atingidas, além de todo o telhado foi arrancado o forro do quarto de casal e foram succionados os móveis existentes. A Figura 20 mostra a que ficou reduzido um pavilhão industrial em fase de construção e que já se encontrava parcialmente coberto.

4º) A cidade de Itaqui, RS, foi atingida, em 28/10/97, por uma violenta tormenta, a qual, por suas características, deve também ter sido um tornado. Durou cerca de 10 minutos, atingindo uma faixa de uma largura de cerca de 500m e com velocidades que, pelos acidentes causados, devem ter chegado ou mesmo ultrapassado os 40m/s (144km/h).

Foram muitas árvores e cerca de 120 postes de energia elétrica e de telefonia que caíram, tendo sido danificadas cerca de 4 mil casas. Uma



Figura 20 – Pavilhão industrial em construção em Guaíba, RS.

notícia de jornal informava que 25 pessoas tinham sido feridas, outra já falava em 150 (!). Na própria cidade cinco silos para arroz foram arrancados de suas bases. Um deles, ao tombar, amassou um carro e derrubou uma parede do escritório da empresa. Um grande armazém de alvenaria de tijolos teve sua cobertura de chapas de aço galvanizado erigida “como se fosse uma tampa de uma caixa de sapatos”, na descrição de uma testemunha do acidente. Os destroços dessa cobertura cortaram cabos de uma rede elétrica de alta tensão. “Telhas de aço galvanizado voavam por todos os lados. Tudo o que o vento conseguia arrancar se transformava em arma”, comentou outra testemunha. No hospital São Patrício foram atendidas muitas pessoas com cortes profundos provocados por essas telhas

Eis, com mais detalhes, o que aconteceu com um dos atingidos pelo tornado, conforme relatado em um jornal: “Quando o dono da casa estava tomando o café da manhã, um estrondo sacudiu a casa, uma construção mista de tijolos e tábuas. Era uma rajada de vento que levantou o telhado. Sua esposa foi atirada pela porta dos fundos. O dono da casa pegou os três filhos e saiu correndo pela porta da frente (“Um homem passou voando, como se alguém o tivesse atirado longe, e caiu a poucos metros da minha porta”, contou ele mais tarde). Atravessando a rua, os 4 deitaram-se no chão e ainda viram um silo de arroz de 5 toneladas ser arrancado do chão”.

5º) O tornado que atingiu, em 11/10/2000, Águas Claras e adjacências, no município de Viamão, região metropolitana de Porto Alegre, foi, ao que sabemos, o mais violento que assolou o Rio Grande do Sul em muitas décadas.

Na rodovia RS-040 um caminhão carregado com engradados de cerveja e um ônibus com passageiros tombaram. Automóveis viraram, ficando com as rodas para cima, outros se chocaram. Árvores caíram sobre a pista, algumas delas atingindo veículos.

Várias casas foram totalmente destruídas, com os destroços e móveis de algumas sendo lançados a dezenas de metros de distância. Cerca de 800 residências foram danificadas, além de alguns prédios públicos, escolas, estabelecimentos comerciais, galpões rurais etc.

Em muitos casos o tornado, por assim dizer, “aspirou” telhados, paredes, móveis, utensílios e animais domésticos. Só restaram os pisos. No pátio de uma casa, uma piscina de fibra de vidro, à espera de instalação, voou sobre cercas e foi detida em um mato, a cerca de 300 metros.

Uma senhora de 57 anos, cuja casa foi destruída, foi encontrada, morta, nas águas de um córrego, a cerca de 100 metros de sua casa.

Um produtor rural, além da destruição do galpão onde guardava as sementes de arroz, teve colheitadeiras destruídas e um secador esmagado sob os escombros do celeiro. Sua moradia também ficou em ruínas.

As árvores que ficaram de pé e os tocos das que foram quebradas, bem como os postes, ficaram como que esculpidos, falquejados pelo granizo que dilacerou cascas e madeira, deixando-os “como esculturas desastrosamente esculpidas a faca”, no dizer de um jornalista. Uma mata nativa de três hectares (30.000m<sup>2</sup>) foi completamente destruída.

Diz uma notícia que “o tornado matou vacas, cavalos, cachorros, ovelhas, galinhas e pássaros. Equipes da Prefeitura de Viamão recolhiam ontem, nas estradas, animais sobreviventes, com fraturas, olhos perfurados e ferimentos graves”.

Eis o que nos relatou uma pessoa que transitava na rodovia RS-040, durante o tornado:

Pelas 21 horas, tendo eu já ultrapassado o posto de pedágio de Águas Claras, começou um vento violento, com granizo. Devido à pouca visibilidade prossegui, lentamente, tentando sair da zona do vento, que soprava transversalmente à estrada. O pára-brisa e as sinaleiras traseiras de meu carro foram quebrados e os dois espelhos laterais foram arrancados (as carcaças deles ficaram em seus lugares).

Eucaliptos, galhos e fios estavam atravessados na estrada, dificultando a marcha do veículo e obrigando-me a andar pelo acostamento, em certos trechos. Vi três ou quatro carros tombados e outros caídos no valo lateral da estrada. Uma antiga caminhonete rural veio rolando de um ‘ferro velho’ até a estrada. Telhas de aço galvanizado (telhas de ‘zinco’) passavam

voando. Uma carreta (caminhão semi-reboque) estava tombada na estrada. Vi também casas, situadas às margens da estrada, destruídas; só sobram os alicerces.

Uma figueira centenária virou completamente, ficando com as raízes para cima e a copa para baixo. Muitas outras árvores estavam tombadas, sendo que de uma fila de eucaliptos só sobrou a parte inferior dos troncos, com cerca de três a quatro metros de altura. Postes de luz, em uma distância de cerca de três quilômetros, estavam inclinados (os dos extremos deste trecho de estrada) ou deitados (os da parte central).

m) Em 23 de fevereiro de 1976 ruíram por completo as coberturas dos armazéns 29, 32 e 33 da Companhia Docas de Santos, situados no Cais do Macuro, Porto de Santos, SP, sendo destruídos 26.500m<sup>2</sup> de cobertura. O acidente deu-se em consequência da ação do vento, com rajadas que atingiram velocidades de até 80km/h nos anemômetros das estações do Ministério da Agricultura, na Ponta da Praia, e da Base Aérea de Santos. O que não significa que no local do acidente não tenham sido alcançadas velocidades maiores.

As dimensões em planta dos galpões são de 50x150m no armazém 29 e de 50x190m nos armazéns 32 e 33. As coberturas tinham for-



*Figura 21* – Armazéns da Companhia Docas de Santos, no Cais do Macuro, Porto de Santos, SP.

ma cilíndrica, com laternim fechado de grandes dimensões (retângulo circunscrito de 9,0x2,7m). Altura das paredes: 8,0m. Flecha da cobertura: 7,2m.

A estrutura principal do telhado era formada por arcos biarticulados atirantados com vão de 50m, espaçados de 5m ou 10m e apoiados em pilares de concreto a cada 10m. O peso do telhado (estrutura e telhas de alumínio) era de aproximadamente 15kgf/m<sup>2</sup> passando para cerca de 50kgf/m<sup>2</sup> com o projeto estrutural de reconstrução. Como sistema estrutural foram adotados ainda arcos em treliça biarticulados, porém agora com tirantes rígidos, para permitir inversões de esforços sem alteração do esquema resistente. A Figura 21 mostra dois dos pavilhões acidentados.

O novo projeto estrutural foi baseado nas forças do vento obtidas a partir de ensaios aerodinâmicos feitos, sobre modelo reduzido, no túnel de vento TV-2 da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

n) Neste mesmo ano de 1976 um temporal fez diversos estragos na região de Taquari e Venâncio Aires, no Rio Grande do Sul. De uma fábrica de móveis em Taquari só ficaram de pé duas paredes internas (Figura 22).

Na beira da estrada que liga as duas cidades um prédio escolar, de madeira, foi deslocado de suas fundações (Figura 14). Um aviário teve suas instalações completamente destruídas. Em Venâncio Aires, um silo metálico, em fase final de montagem (faltava sua fixação às fundações), foi derrubado (Figura 23). No mesmo conjunto de silos, um elevador de grãos foi parcialmente destruído e lançado contra outro silo, danificando-o.



Figura 22a – Fábrica de móveis em Taquari, RS.



*Figura 22b* – Fábrica de móveis em Taquari, RS.



*Figura 23* – Silo metálico em fase final de montagem, em Venâncio Aires, RS.



o) Na barragem de Bom Retiro do Sul, RS, o temporal do dia 29 de janeiro de 1977 provocou um sério acidente com o pórtico de manobras, de 96tf. O exame dos danos causados pelo temporal na região levou-nos à conclusão de que a velocidade máxima de rajada de 3 segundos de duração, a 10 metros de altura, em local plano e sem obstruções (velocidade de referência), foi de 130km/h. No centro de gravidade do pórtico foi estimada uma velocidade de rajada de 3 segundos de 138km/h, a que corresponde uma pressão dinâmica de 92kgf/m<sup>2</sup>. Estudos feitos a partir da literatura especializada, do anteprojeto da norma de vento NB-599 e de ensaios feitos no túnel de vento TV-2 da UFRGS (Figura 24) mostraram que as forças devidas ao vento, que realmente atuaram no pórtico de manobras, na parte mais violenta do temporal, foram de cerca de 2 vezes as forças previstas pela NB-5.

O pórtico de manobras, apesar de estar frenado mecânica e eletricamente, foi arrastado ao longo dos trilhos por cerca de 70 metros, terminando por cair dentro do rio, após se chocar com o vertedouro (Figura 25).

p) Acidentes com torres de microondas e de linhas de transmissão têm ocorrido com, relativamente, demasiada frequência em diversos países, incluindo o nosso.

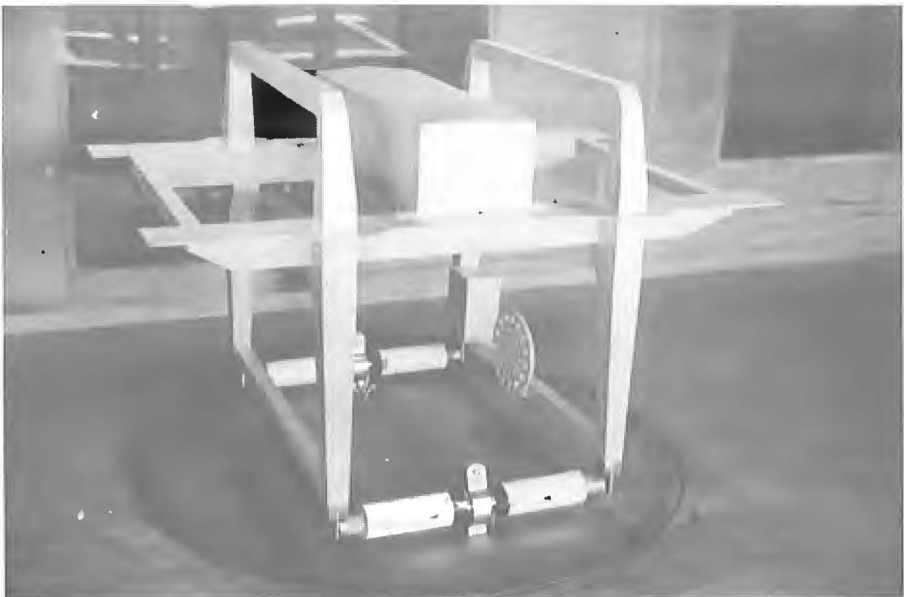


Figura 24 – Modelo do pórtico de manobras no túnel de vento TV-2 da UFRGS.



*Figura 25a* – Pórtico de manobras na barragem de Bom Retiro do Sul, RS.



*Figura 25b* – Pórtico de manobras na barragem de Bom Retiro do Sul, RS.

A Figura 26 mostra a torre de microondas da Companhia Riograndense de Comunicações em Pinheiro Machado, após um forte temporal no dia 15 de janeiro de 1975. A torre ruiu completamente, sem se desligar das fundações. Tratava-se de uma torre em treliça metálica, com 80m de altura e base quadrada 10x10m. Esta torre foi reconstruída e novamente destruída nas primeiras horas do dia 25/11/86. Uma torre de mesmas características, situada nas proximidades e pertencente a CEEE, porém calculada de acordo com a NBR-6123, não foi danificada. Este distinto comportamento é explicado no capítulo 6.

Outros acidentes durante o mesmo temporal e na mesma região foram os seguintes:

- por toda a região de Pinheiro Machado, Seival e Candiota, houve quebra de galhos de árvores grandes, derrubada de árvores finas e mesmo de eucaliptus de dimensões médias, bem como inclinação a cerca de 45° de postes de madeira de iluminação;
- o vento, incidindo perpendicularmente a um quebra-ventos de eucaliptus, arrancou os galhos da parte inferior das árvores, deixando intacta apenas a terça parte superior;
- dezenas de casas tiveram seus telhados danificados parcial ou to-



*Figura 26* – Torre de microondas da Companhia Riograndense de Comunicações em Pinheiro Machado, RS.

talmente; a maioria delas tinha telhados de pequena inclinação e leves. Porém alguns telhados eram de inclinação maior, com cobertura de telhas francesas;

– a torre em treliça metálica e estaiada da estação repetidora do Canal 10 de Televisão, em Pinheiro Machado, com cerca de 30m de altura, ruiu dobrando-se a cerca de meia altura.

q) Temporal ocorrido na tarde do dia 8 de dezembro de 1979 provocou a ruína de cinco torres da linha de transmissão entre a Usina Termelétrica Presidente Médici e Quinta, no Rio Grande do Sul. Esta linha de transmissão, em circuito duplo de 230 e 138kV, fornece energia para a maior parte dos municípios da zona sul do Estado. As torres danificadas foram as de número 36 a 40.

Também a nova vila residencial da Companhia Estadual de Energia Elétrica – CEEE –, em construção nas imediações da usina, sofreu diversos danos, principalmente arrancamento parcial ou total de coberturas, com ou sem a estrutura do telhado. Houve um grande número de arrancamento de telhas de barro, tipo colonial (de canal), situadas nos beirais horizontais ou de oitões. Estes acidentes devem ter ocorrido pela falta de um forro relativamente estanque sob o telhado, e não por rajadas de grande velocidade. Somaram-se os efeitos da sucção na parte superior das telhas e da sobrepressão na parte inferior das mesmas. A solução para evitar futuros arrancamentos consiste na colocação de forros razoavelmente estanques em todos os beirais e passagens com cobertura.

Telhas de barro francesas foram arrancadas em telhados de pequena inclinação. Coberturas leves, com pequena inclinação, foram parcialmente arrancadas, enquanto em outras também a estrutura do telhado foi retirada de sua posição.

Uma construção em madeira ficou completamente demolida, com o arrancamento total do telhado e conseqüente desabamento das paredes, por falta de contraventamento eficiente. A causa do início da ruína da construção (arrancamento total do telhado) deve ter sido o ângulo de inclinação da cobertura (as maiores sucções aparecem, via de regra, em telhados com inclinação em torno de 10°), o seu pouco peso e a falta de uma ancoragem adequada no restante da estrutura.

r) Na década de 90 violentas tormentas (elétricas, ciclones extratropicais e alguns tornados) assolaram os estados do sul do Brasil. Descreveremos, sinteticamente, os acidentes causados por algumas destas tormentas.

Em 17/1/90 a região do vale do Rio Pardo, RS, sofreu o mais violento temporal dos últimos cinqüenta anos. Durou cerca de 15 minu-

tos, com ventos que devem ter ultrapassado 33m/s (120km/h). Em Santa Cruz do Sul cerca de 200 casas foram destelhadas total ou parcialmente, três ficaram completamente destruídas (alvenaria de tijolos de seis furos). Seis casas de madeira foram tiradas de seus alicerces e arrastadas por cerca de seis metros. As coberturas de aço galvanizado dos pavilhões de duas transportadoras foram arrancadas e lançadas a mais de 500 metros. A torre da Rádio Gazeta tombou. Diversas árvores, com até cerca de 30m de altura, caíram; uma delas sobre uma casa, ferindo uma pessoa. O muro do estádio do esporte Clube Avenida, com cerca de 500m de extensão, foi praticamente todo ele destruído. As coberturas das arquibancadas sociais e das piscinas cobertas foram arrancadas. A torre dos refletores, com 25m de altura e de concreto armado, ruiu.

Em Vera Cruz foram mais de mil casas destelhadas (total ou parcialmente), sendo que seis foram inteiramente destruídas. Cerca de 30 postes de iluminação pública e muitas árvores caíram. O telhado de uma fábrica, onde trabalhavam mais de 100 pessoas, foi arrancado. Algumas paredes foram danificadas. Foram 11 os feridos nesta fábrica. O pára-brisa traseiro de uma caminhonete foi quebrado por uma telha de fibrocimento. Vitrines foram rompidas. Este mesmo tipo de acidente (com vitrines) ocorreu em São Luiz Gonzaga, e os estilhaços feriram duas pessoas (além, evidentemente, dos acidentes "habituais").

s) No ano seguinte, em 1/10/91, a cidade de Itu, SP, foi atingida por uma tormenta muito violenta, sem uma definição razoável de sua velocidade máxima. A estimativa de 180km/h, que apareceu em um jornal, é exagerada. Diz o jornalista que a velocidade foi esta porque 4 torres de uma linha de transmissão de energia elétrica, calculadas para resistir a ventos de até 180km/h, foram destruídas. Esta é uma conclusão apressada e nitidamente de quem é leigo no assunto. Sugerimos que o leitor busque informações no capítulo 6. Exagero à parte, os danos foram consideráveis. Transcrevemos no próximo parágrafo informações veiculadas por jornais, sem nos responsabilizarmos por sua exatidão.

A parte superior da chaminé de alvenaria de uma olaria foi destruída, bem como seu telhado. Foram destelhadas cerca de 200 casas e 10 pavilhões industriais, danificados os prédios da Faculdade de Direito e da Escola Agrícola de Itu. Desabou a cobertura do hotel San Raphael. Na rodovia Santos Dumont um carro Chevette foi jogado a 700m (sic!) de distância da pista; os dois ocupantes morreram. Um ônibus foi lançado para o acostamento da pista contrária, chocando-se contra o barranco e causando a morte de oito passageiros.

t) Aliás, em muitas tormentas violentas há pessoas que ficam feridas

das ou morrem. No parágrafo anterior descrevemos casos em que as mortes foram devidas a acidentes automobilísticos causados estes pelo vento. Em outros casos são muros e paredes que desabam sobre pessoas, são telhas (ou pedaços delas), galhos, pedaços de painéis de propaganda e de revestimento de fachadas, cacos de vidros (rompidos diretamente pela pressão exercida pelo vento ou pelo impacto de detritos sobre as vidraças) e outros detritos que são lançados com violência contra as pessoas, ferindo-as e matando-as. Assim, para citar outro exemplo, na tormenta que atingiu Porto Alegre, RS, em 17/10/93, com uma duração de 10 minutos e ventos que chegaram a cerca de 30m/s (108km/h), 15 pessoas ficaram feridas ao serem atingidas por galhos de árvores ou estilhaços de vidros.

Acidente ainda mais grave aconteceu em Ribeirão Preto, SP, em 14/5/94. No centro da cidade, onde a velocidade do vento parece ter sido superior a 32m/s (115km/h) – segundo estimativa do Serviço de Proteção ao Voo das Telecomunicações da Aeronáutica S.A., TASA – além de 120 casas destruídas houve dezenas de feridos leves e três mortes, sendo duas por desabamento.

Em Porto Alegre, RS, em 6/7/99, a queda de um painel luminoso junto com seu fuste metálico, com 15m de altura, tombou sobre um automóvel, matando uma jovem de 17 anos e ferindo sua mãe. Um caso típico de dimensionamento deficiente da fixação do fuste em sua base, por meio de quatro parafusos, com pequena distância entre eles.

u) Os fortes ventos que apareceram em 1999 ocasionaram os acidentes típicos já descritos anteriormente e mais alguns que só têm sido registrados nos últimos anos, por se tratarem de formas construtivas novas, ligadas, por exemplo, à tecnologia da comunicação. Tais são os casos de antenas parabólicas, tanto de telefonia por microondas como para recepção de TV via satélite, que são distorcidas ou arrancadas pelo vento. Também as relativamente recentes mini-torres para telefonia celular têm sido derrubadas pelo vento.

Em Osório, RS, em 13/2/99, a cobertura de um posto de serviço foi totalmente destruída (Figura 27). Três dias depois a cidade de Horizontina, RS, foi atingida por uma tormenta com rajadas de vento de até 36m/s (130km/h), conforme registro no aeroporto da cidade. Além de mais de 150 casas destelhadas, o hangar e o prédio de administração deste aeroporto foram destelhados, desabando sua torre de comunicações. Além disso, a antena da estação de rádio da cidade foi destruída.

No mês seguinte, em 28/3/99, uma tormenta na região metropolitana, oriunda de uma frente fria do Uruguai, durou uma hora. No lago Rio Guaíba, um veleiro virou, provocando a morte de um advogado.

Além dos acidentes típicos de sempre, um andaime de um prédio em construção desabou e um abrigo de parada de ônibus, na Avenida João Pessoa, teve boa parte de sua cobertura e dos pilares que a sustentavam derrubados (Figura 28). Acidente semelhante aconteceu em outro abrigo do mesmo tipo, na Avenida Bento Gonçalves, na tormenta de 8/9/99 (Figura 29), com rajadas de velocidade estimada em torno de 30m/s (108km/h). Nesta mesma tormenta, um muro com 3m de altura desabou sobre um estacionamento, atingindo dez carros.

Essa tormenta assolou uma boa parte do Estado, causando ferimentos e mortes. Em Bossoroca, RS, na região das Missões, um eucalipto caiu sobre uma barraca de um acampamento dos “sem-terra”, causando a morte de uma agricultora. Houve dez feridos, três atingidos por galhos de árvores. Em Cachoeira do Sul, RS, três operários morreram e dois ficaram feridos com a queda de uma torre metálica de telefonia celular, em construção, com 90m de altura.

Em Santa Catarina, no dia 18/9/99, ventos de até 130km/h (36m/s) destruíram 13 torres de linhas de transmissão das Centrais Elétricas do Sul do Brasil (Eletrosul) no meio oeste catarinense. No dia anterior, outras 13 torres haviam sido derrubadas pelo vento na região nordeste do Rio Grande do Sul. Para um estudo mais detalhado deste problema, favor consultar o capítulo 6.



*Figura 27 – Posto de serviço em Osório, RS (1999).*



*Figura 28a* – Parada de ônibus na Av. João Pessoa, Porto Alegre, RS (1999).



*Figura 28b* – Parada de ônibus na Av. João Pessoa, Porto Alegre, RS (1999).





*Figura 29a* – Parada de ônibus na Av. Bento Gonçalves, Porto Alegre, RS (1999).



*Figura 29b* – Parada de ônibus na Av. Bento Gonçalves, Porto Alegre, RS (1999).

v) Também em 2000 o Rio Grande do Sul foi assolado por um grande número de tormentas de vários tipos, com ventos de altas velocidades. Entre elas está o que foi, ao que sabemos, o mais violento dos tornados em nosso Estado em muitas décadas, e do qual já tratamos no item 5.1.

A seguir apresentaremos informações sobre acidentes ocorridos em algumas dessas tormentas.

– Em 27 de março a região das Missões sofreu as conseqüências de ventos de alta velocidade, com dezenas de casas destelhadas e muitos postes e árvores tombados. Em Entre-Ijuís a cobertura de aço galvanizado de uma farmácia foi inteiramente arrancada e lançada ao outro lado da rua, danificando dois carros lá estacionados.

Próximo à cidade de Marau uma casa de madeira foi deslocada de suas fundações, além de sofrer arrancamento de toda a cobertura e de parte da estrutura do telhado.

– Em 16 de maio, ventos com rajadas máximas estimadas em 31,1m/s (112km/h) atingiram o sul do Estado. Em Bagé, além dos acidentes de rotina (danos em telhados, tombamento de postes, árvores e muros), um hangar teve seu portão deslocado pela sobrepressão do vento, seguindo-se o arrancamento de parte da cobertura. Algumas aeronaves, pequenas, foram lançadas a distância e um monomotor foi danificado.

No município de Dom Pedrito um colono morreu em conseqüência da queda de um eucalipto, que o atingiu enquanto cortava lenha.

Também Pelotas, Rio Grande, Pinheiro Machado, Uruguaiana e outros municípios desta região sofreram danos.

– Poucos dias depois, em 25 de maio, outra tormenta, com ventos de alta velocidade, assolou a região central do Estado e a região metropolitana. Em Santa Cruz, a cidade mais atingida, dezenas de casas foram destelhadas, o que fez o prefeito da cidade decretar estado de calamidade pública. De um minimercado de alvenaria de tijolo, situado no centro da cidade, só ficaram de pé as duas paredes laterais. Em um dos subúrbios uma casa de madeira foi arrancada de sua fundação e tombou.

Em Triunfo mais de 30 casas foram destelhadas, cerca de 50 árvores arrancadas e aproximadamente 30 postes de luz tombaram. Estes acidentes, que já são “de rotina”, também aconteceram em outras cidades da região.

As estimativas (sem comprovação) das velocidades máximas das rajadas de vento oscilaram entre 33,3m/s (120km/h) e 41,7m/s (150km/h).

– Em 10 e 11 de setembro ventos de alta velocidade sopraram em uma vasta região do Estado. Além dos acidentes “de rotina”, uma carreta (caminhão semi-reboque) tombou na rodovia BR-290, na zona rural de Alegrete.

Em Santa Maria o vento atingiu 29m/s (104km/h), causando danos tanto na parte central como na periferia da cidade.

Entre outros municípios nos quais o vento causou acidentes estão Porto Alegre, com rajadas de até 25m/s (90km/h), Canoas, São Leopoldo, Novo Hamburgo, Taquara, Santa Cruz do Sul, Rio Grande e Pelotas; o que mostra a extensão da zona assolada por ventos violentos nestes dois dias. Em geral o vento era acompanhado de chuvas e, em alguns casos, também por granizo.

– Na noite de 18 de setembro outro temporal com ventos violentos, chuvas fortes e granizo voltou a assolar o Estado, causando destruição de algumas casas e destelhamento de várias outras, tombamento de postes e árvores e, o que é mais lastimável, duas mortes. Uma delas ocorreu em Santa Maria, quando um muro desabou, matando um senhor de 47 anos. A outra morte não foi causada pelo vento, mas sim por um raio que atingiu um ciclista.

· No interior de Santo Ângelo e Guarani das Missões mais de 100 casas e galpões foram danificados.

– Dois dias depois, na noite de 20 de setembro, novamente o vento fez das suas na região sul do Estado, acompanhado de chuvas e de granizo. Em Bagé, além dos destelhamentos usuais, três casas de madeira e uma de alvenaria de tijolo foram destruídas. Uma escola de madeira, situada em um dos bairros da cidade, foi destruída e seus destroços, juntamente com mesas e cadeiras, foram levados pelo vento por cerca de 60 metros. Outra escola teve seus muros frontal e lateral derrubados, e árvores caíram sobre o prédio. Um caminhão tombou. A linha de transmissão de energia elétrica entre Candiota e Pelotas foi danificada. Foi decretada situação de emergência no município.

– Na noite de 11 para 12 de outubro temporais acompanhados de granizo e de fortes rajadas de vento fizeram com que os prefeitos de sete municípios gaúchos decretassem situação de emergência. Três pessoas morreram (em Teutônia, Pejuçara e Viamão).

Em Porto Alegre a zona mais afetada foi o bairro Belém Novo, onde se situa o Aeroclube do Rio Grande do Sul. Dois hangares deste Aeroclube foram parcialmente destelhados; o terceiro ficou intacto. No hangar 2 os quatro portões de aço foram deslocados pelo vento, atingindo um avião bimotor, um ultraleve, outras aeronaves e um helicóptero. Fora dos hangares, um avião foi virado pelo vento, ficando com as rodas para cima. No total, dez aeronaves sofreram danos pequenos e dois helicópteros danos consideráveis.

Não só a região metropolitana como também o noroeste do Estado e o litoral norte foram afetados. Nos municípios de Imbé e Tramandaí, no litoral norte, as rajadas de vento chegaram a 27,2m/s (98km/h). Foram seis minutos de granizo.

Em Viamão o temporal originou um tornado violento, já comentado no item 5.1.

Das tormentas ocorridas no primeiro semestre de 2001 destacamos:

– Em 8 de janeiro um jovem morreu seis horas depois de ter sido atingido por uma telha de fibrocimento arrancada de uma construção de madeira, durante um temporal, na praia de Torres. A telha voou por cerca de 30m até atingir o jovem, causando afundamento craniano e fraturas múltiplas. Outras duas pessoas que o acompanhavam sofreram ferimentos leves.

Neste mesmo dia um forte vendaval, com rajadas de vento estimadas em 41,7m/s (150km/h) – o que nos parece um pouco exagerado – derrubou árvores e muros e danificou telhados em Canoas, na região metropolitana. Um pavilhão de grandes dimensões, depósito de mercadorias, teve o telhado seriamente danificado, incluindo sua estrutura. Parte da cobertura de uma igreja foi arrancada e lançada no outro lado da rua. Em três bairros diversas residências e estabelecimentos comerciais foram destelhados. Uma casa foi atingida pelo telhado da casa vizinha. Entre as árvores tombadas estava uma figueira de grandes dimensões, que caiu sobre uma garagem. Um senhor de 75 anos quase foi morto por um poste que caiu a “poucos centímetros de minha cabeça”, contou ele. Parte de um pilar de alvenaria situado em um pátio foi lançado pelo vento dentro da cozinha da residência vizinha. Dezenas de placas de publicidade, ao longo de uma estrada, foram derrubadas.

– Em 23 de abril mais uma passagem de frente fria trouxe, além da queda de temperatura, chuvas e ventos fortes. O município mais atingido foi o de Capão do Cipó, próximo a Santiago. Na cidade 55 residências foram destelhadas e sete seriamente danificadas, com destruição dos telhados e tombamento de diversas paredes de alvenaria. No interior do município uma escola estadual “foi reduzida a tijolos espalhados pelo chão”, no dizer de um jornalista. Uma colheitadeira foi arrastada por cerca de 20 metros.

w) Poder-se-iam encher páginas e páginas com relatos de acidentes causados pelo vento nos Estados do sul do País. Cada uma dessas tormentas destrói ou danifica dezenas de casas de madeira e mesmo de alvenaria, bem como fábricas, escolas, igrejas, hangares, estádios esportivos e pavilhões industriais e afins. Via de regra, telhados são arrancados parcialmente; em um número menor, totalmente (Figura 30). Muitas vezes ao arrancamento do telhado segue-se o tombamento parcial ou total de paredes, na mesma ou na tormenta seguinte. Um caso típico é mostrado na Figura 31, de uma fábrica próxima à cidade de Estrela, RS, em fase final

de acabamento (1995). Em uma primeira tormenta a cobertura foi arrancada quase que totalmente; em uma segunda, as paredes, funcionando estruturalmente como peças em balanço, ruíram em parte.

São muros, postes e painéis de propaganda (Figura 32) que são destruídos às dezenas. São paredes não estruturadas que são demolidas, como foi o caso de um cinema em Porto Alegre, em 9/10/63, cuja parede dos fundos foi arrancada pelo vento.

Em muitos casos o acidente se dá durante a construção, por inexistência de um contraventamento: o definitivo, com a obra pronta, ainda não existe e um provisório não costuma ser providenciado. Em 1958 um cinema em construção na cidade de Lajes, SC, ainda sem a estrutura do telhado, teve uma das paredes laterais totalmente demolida. Acidente análogo ocorreu em dois cinemas nos arredores de Buenos Aires, em 1959.

Em 11/11/97, com ventos de velocidades de cerca de 30m/s (108km/h) ocorreram acidentes em duas obras em construção, uma em Ijuí, RS, e a outra em Cruz Alta, RS. Na primeira destas cidades um pavilhão industrial com 220m<sup>2</sup>, em fase final de construção, foi totalmente destruído: a cobertura de telhas de aço galvanizado foi levada pelo vento e as paredes de alvenaria de tijolo ruíram. Em Cruz Alta, um ginásio de esportes, também em fase final de construção, foi totalmente destruído.

Há acidentes pitorescos, como o acontecido com uma piscina de fibra de vidro, de 350kg, em exposição, que foi levada pelo vento por mais de 100 metros (Cruz Alta, RS, 1997). Ou o da árvore que foi arrancada e lançada contra um portão de um estádio de futebol, rompendo-o (se fosse pouco antes de um jogo, certamente muita gente entraria sem pagar o ingresso...). Há também o caso de um carro tanque ferroviário, com cerca de 30 toneladas de peso, que foi tombado pela força do vento (Santa Maria, 1963). Acidente análogo, de piores conseqüências, aconteceu em São Bernardo do Campo, SP, na tormenta de 26/4/91, na qual a velocidade do vento deve ter atingido 40m/s (144km/h): 12 carretas, cada uma delas carregada com 10 toneladas de eletrodomésticos, tombaram no estacionamento de uma firma comercial (Figura 33). O galpão aí situado foi destelhado. Em Osório, RS, na tormenta de 13/2/99 dois caminhões tombaram, com um vento de rajadas de até 33m/s (120km/h). No interior de Santa Maria, RS, no dia 12/1/2000 o vento virou dois traçadores, além de destruir dois engenhos de arroz, destelhar casas e derubar cerca de 30 postes de energia elétrica.

Anteriormente, em Carazinho, RS, a tormenta de 28/11/94 causou sérios prejuízos no aeroporto, com 2 hangares danificados, 9 aviões



*Figura 30 – Depósito em Uruguaiana, RS (1987).*



*Figura 31 – Fábrica próximo a Estrela, RS – Vista Parcial (1995).*



*Figura 32 – Painel de propaganda.*



*Figura 33 – Doze carretas tombadas, São Bernardo do Campo, SP (1991).*



*Figura 34a – Aeroporto de Carazinho, RS (1994).*



*Figura 34b – Aeroporto de Carazinho, RS (1994).*



avariados e 3 destruídos (Figura 34). Outros danos a aeronaves, ocorridos em 2000, já foram comentados no item 6.v.

x) Estes acidentes, repetimos, salvo casos excepcionais, podem ser evitados. Isto porque o problema maior é o da insuficiência dos coeficientes aerodinâmicos adotados nas normas antigas, muito menores que os obtidos em ensaios em túneis de vento.

Para confirmar o que dissemos, damos o exemplo de dois pavilhões iguais construídos em Gravataí, RS. A estrutura do telhado é constituída por arcos em treliça metálica. Um deles foi calculado de acordo com a NB-5 e o outro, construído mais recentemente, conforme os resultados experimentais. Em um temporal ocorrido há poucos anos o telhado do pavilhão antigo entrou em colapso por flambagem das barras inferiores da treliça, enquanto o pavilhão novo resistiu. É que a inversão de esforços nas barras, em virtude da grande força ascensional, fora prevista no cálculo do segundo pavilhão.

y) Levantamento efetuado em Belo Horizonte sobre edificações abaladas na respectiva região metropolitana por diversos tipos de sinistros (incêndio, inundação, destelhamento, desabamento de muro e “não-especificado”) mostra que de um total de 429 casos registrados no período de 1980 a novembro de 1984, 90% (386) foram de destelhamento. Dos 12 casos de desabamento, pelo que expusemos anteriormente, é bastante provável que diversos tenham sido causados pelo vento.

z) No Rio Grande do Sul, grande número de escolas tem sido danificado pelo vento. Os acidentes a seguir descritos referem-se a prédios pertencentes à Secretaria de Obras Públicas e Desenvolvimento Regional do Rio Grande do Sul. Os acidentes constaram de arrancamento parcial ou total da cobertura, com ou sem madeiramento e forro. A quase totalidade destes acidentes ocorreu com escolas.

Na Tabela 2 os acidentes estão classificados pela região climática. Na região do planalto ocorreram aproximadamente 20% dos acidentes, tanto em número de prédios acidentados como em custo. A depressão central leste, alto vale do Uruguai e planalto, em conjunto englobam mais de 50% dos acidentes, tanto em número de prédios acidentados como em custo.

**Tabela 2**  
DANOS POR TIPO DE COBERTURA NO PERÍODO 1979-1982

Ano	Descrição	Número				Porcentagem		
		cim. am.	barro	metal	Total	cim. am.	barro	metal
1979	Prédios acidentados	69	17	4	90	76,7	18,9	4,4
	Danos em ORTN	18152	1944	718	20814	87,2	9,3	3,5
1980	Prédios acidentados	57	16	1	74	77,0	21,6	1,4
	Danos em ORTN	17264	2898	1157	21319	81,0	13,6	5,4
1981	Prédios acidentados	36	17	2	55	65,5	30,9	3,6
	Danos em ORTN	9222	4524	829	14575	63,3	31,0	5,7
1982	Prédios acidentados	118	13	5	136	86,8	9,5	3,7
	Danos em ORTN	46923	3597	3242	53762	87,3	6,7	6,0

**Tabela 3**  
DANOS POR REGIÃO CLIMÁTICA NO PERÍODO 1979-1982

Região	Ano				Número		Danos		
	79	80	81	82	Total	%	ORTN	%	
Campanha	3	7	3	10	23	6,5	6541	5,9	
Serra do sudeste	8	3	-	1	12	3,4	2520	2,3	
Litoral Norte	-	2	1	3	6	1,7	2666	2,4	
Litoral Sul	-	-	-	8	8	2,2	6211	5,6	
Depressão Central	- centro	8	7	5	10	30	8,4	7841	7,1
	- oeste	3	4	-	6	13	3,7	4149	3,8
	- leste	6	10	12	27	55	15,5	13827	12,5
Vale Uruguai	- alto	23	6	9	17	55	15,5	16537	15,0
	- baixo	6	5	6	5	22	6,2	7642	6,9
Missões	11	4	4	20	39	11,0	11936	10,8	
Planalto	17	22	7	26	72	20,3	21932	19,9	
Serra do nordeste	5	4	8	3	20	5,6	8669	7,8	
TOTAL	90	74	55	136	355	100	110470	100	

Já na Tabela 3, os acidentes estão classificados pelo tipo de material de cobertura. A maior parte dos acidentes ocorreu em coberturas de fibrocimento. Embora uma apreciação correta exija o conhecimento da percentagem de prédios com este tipo de cobertura, é de esperar que para igual percentagem, os acidentes sejam em maior número em coberturas de fibrocimento e chapas metálicas (aço galvanizado, alumínio). Isto porque trata-se de coberturas leves e usadas geralmente com pequenas inclinações do telhado, inclinações para as quais aparecem valores elevados de sucções externas. Pela mesma razão, o número reduzido de acidentes com telhas metálicas indica que poucos devem ser os prédios cobertos com este tipo de cobertura.

Convém assinalar que as coberturas em fibrocimento e metálicas terão a segurança adequada se forem convenientemente fixadas à estrutura do telhado e este ancorado ao restante da estrutura do prédio, uma vez determinados os respectivos esforços de acordo com as especificações da norma NBR-6123.<sup>4</sup>

Uma distribuição dos acidentes ao longo dos meses do ano pode ser vista na Figura 35, que mostra um acúmulo dos acidentes no último trimestre do ano. De março a julho o número de acidentes mensais permaneceu abaixo de 10.

A Figura 36 apresenta o número total de acidentes por ano no período 1976-1983 (este último com resultados parciais). O número de acidentes nos últimos anos cresceu acentuadamente. Certamente estes prédios não foram projetados após a vigência da NBR-6123.<sup>4</sup> Ou excepcionalmente apareceram ventos de violência acima da prevista nas normas; mais provavelmente, ambas as causas.

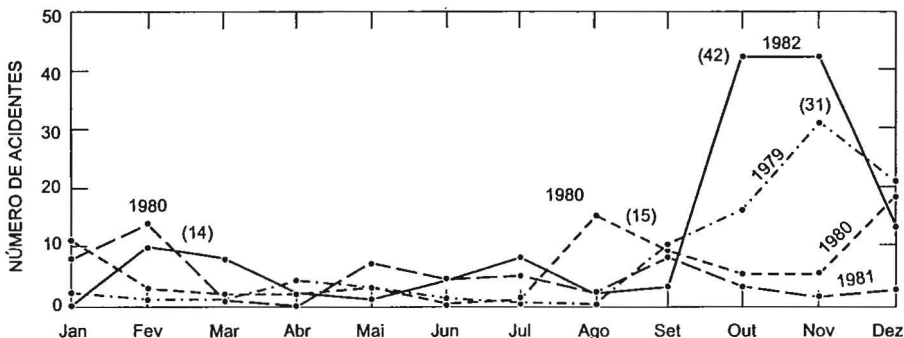


Figura 35 – Prédios da Secretaria de Obras Públicas do Rio Grande do Sul. Acidentes por mês.

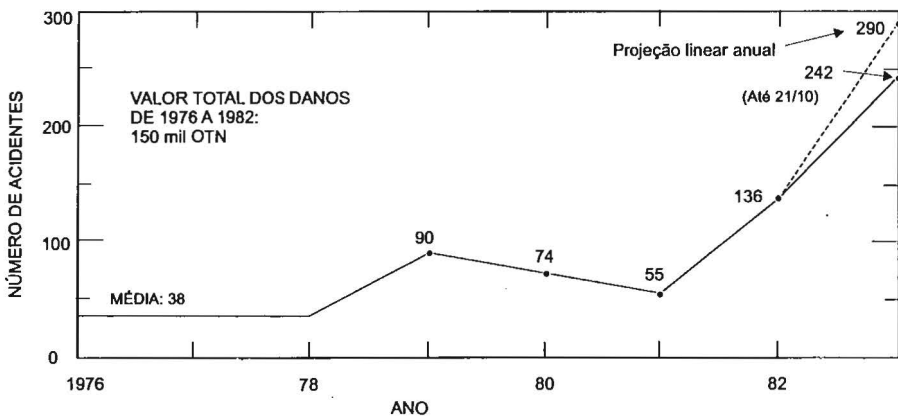


Figura 36 – Prédios da Secretaria de Obras Públicas do Rio Grande do Sul acidentados pelo vento.

# Torres e linhas de transmissão

a) Por sua importância, dedicaremos um capítulo especial ao problema de torres e linhas de transmissão. Algumas normas ainda em uso apresentam valores dos coeficientes aerodinâmicos aplicáveis a treliças e cabos bastante afastados da realidade. Por exemplo, para os perfis metálicos da torre de TV de Cape Girardeau, Estados Unidos, com cerca de 510m de altura e estaiada, foi adotado um coeficiente de força igual a 1,32. Para estes perfis de faces planas os coeficientes de força indicados por normas recentes e obtidos em ensaios situam-se em torno de 2. Por exemplo, para as torres de transmissão de energia elétrica situadas na entrada da baía, em Ohkunoshima, Japão, com 226m de altura, foram adotados os seguintes valores:

- perfis simples:  $C_f = 1,8$
- perfis compostos:  $C_f = 2,1$ .

A propósito, não são raros os acidentes com torres em treliça nos Estados Unidos. Uma das razões pode ser os baixos valores dos coeficientes de força usados no projeto de tais torres.

b) No Japão, país assolado por furacões violentos, o número de acidentes com torres de linhas de transmissão tem diminuído com o decorrer dos anos em virtude do progresso tecnológico no projeto e construção das torres, bem como por um melhor conhecimento dos coeficientes aerodinâmicos. Sichiri<sup>36</sup> indica o número de torres acidentadas em três furacões de violência praticamente igual, com velocidades máximas de rajadas acima de 60m/s (216m/h):

- furacão Muroto, em 1934: 230 torres;

- furacão Isewan, em 1959:164 torres;
- furacão Muroto 2, em 1961: 24 torres.

O Japão está utilizando principalmente perfis tubulares cilíndricos na estrutura principal das torres, pois a força exercida pelo vento é bem menor que a correspondente aos tradicionais perfis de faces planas. A maior parte da estrutura das torres para uma nova linha de 500kV foi fabricada com tubos cilíndricos de aço enchidos com concreto.

c) Voltemos ao acidente que provocou a ruína das torres de número 36 à 40 na linha de transmissão entre a Usina Termelétrica Presidente Médici e Quinta (item 5.q.). A primeira torre a entrar em colapso deve ter sido a do meio, atingida por uma rajada de vento excepcionalmente violenta. Esta torre foi arrancada de suas fundações, levando consigo parte das duas fundações em concreto armado do lado de barlavento. As bases destas duas pernas da torre foram deslocadas, transversalmente à linha, por uma distância de 9,10m (Figura 37). O esforço lateral causado nas quatro torres vizinhas (duas de cada lado) pelo deslocamento dos cabos, com o tombamento e deslocamento transversal da torre central, aliado aos esforços originados pelas altas velocidades do vento sobre os cabos e as torres vizinhas, provocou o colapso por flexão das outras 4 torres. Este colapso se deu com ruptura por flexão no terceiro ou quarto painel das torres, a contar da base.



Figura 37 – Torre entre a Usina Termelétrica Presidente Médici e Quinta.

d) O acidente descrito no item anterior permitiu um interessante estudo comparativo entre as normas brasileiras NB-182<sup>3</sup> e NB-599.<sup>4</sup>

As torres foram dimensionadas pela norma da ABNT *Projeto de linhas aéreas de transmissão e subtransmissão de energia elétrica*, NB-182. De acordo com esta norma (edições 1969 e 1972), a velocidade de cálculo (velocidade característica, pela NB-599) do vento é de 130km/h, na região das torres, sem considerar dimensões e altura da torre ou características de rugosidade e topográficas do terreno. O coeficiente de arrasto desta norma é dado juntamente com o parâmetro meteorológico, critério este que não nos parece aconselhável, por misturar dois fenômenos que podem ser estudados separadamente. Pelo que sabemos, este processo não é mais usado nas normas recentemente desenvolvidas em diversos países. Diz a NB-182 que a pressão do vento sobre superfícies planas é dada por

$$P = K V^2 \quad (6.1)$$

sendo

P – pressão em kgf/m<sup>2</sup>

V – velocidade do vento em km/h

K= 0,0075.

De acordo com a expressão usual para a determinação da força estática exercida pelo vento sobre um obstáculo sólido:

$$F = C_f q A \quad (6.2)$$

Para A = 1m<sup>2</sup> devemos ter a igualdade entre (6.1) e (6.2)

$$P = F : K V^2 = C_f q$$

$$K V^2 = C_f (V / 3,6)^2 / 16$$

para ter V em km/h em ambos os membros da igualdade. Portanto:

$$C_f = 207,36 K = 1,56 \quad (6.3)$$

A equação 6.2 fornece o valor do coeficiente de força conforme a definição da NB-599, mas correspondente à NB-182. Para o caso de torre de secção quadrada, de acordo com o item 11.4 da NB-182 “a área real projetada da face a barlavento é multiplicada por no mínimo 1,5, para se ter em conta a área da face de sotavento”. Teremos, então, para o coeficiente de força sobre a torre de secção quadrada:

$$C_r = 1,56 \times 1,5 = 2,34.$$

O coeficiente de força na direção do vento é designado por coeficiente de arrasto,  $C_a$ :

$$C_a = 2,34 \quad (6.4)$$

Portanto, a força do vento sobre  $1\text{m}^2$  de área exposta da treliça de barlavento (a de sotavento está considerada no coeficiente 1,5) será:

$$F = 1,5 \times 0,0075 V^2 = 1,5 \times 0,0075 (130)^2 = 190\text{kgf/m}^2 \quad (6.5)$$

Vejamos qual o valor de F pela NB-599, *Forças devidas ao vento em edificações*, na parte referente a torres em treliça.

O índice de área exposta das torres de transmissão situa-se entre 0,1 e 0,2. Para as torres atingidas, está em torno de 0,12. Para este valor corresponde (Tabela 12):

$$C_r = C_a = 3,7 \quad (6.6)$$

coeficiente este que se aplica a torres constituídas por barras prismáticas de faces planas.

Este valor refere-se a vento soprando perpendicularmente a uma das faces. Para vento soprando segundo a diagonal, este coeficiente deve ser multiplicado por 1,2 (por exemplo, uma torre isolada, sem cabos, podendo assim tombar em qualquer direção sem provocar reações nos cabos). Interessa-nos aqui o caso de vento perpendicular à linha (e, portanto, a uma das faces da torre), caso em que se adicionam os esforços na torre e nos cabos.

Pela NB-599 a velocidade básica do vento na região das torres vale

$$V_0 = 45\text{m/s} = 162\text{km/h} \quad (6.7)$$

A velocidade característica é dada por

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (6.8)$$

sendo

$S_1 = 1,1$ , na torre do meio

$S_2 = 0,95$  a 10m de altura (terreno Categoria I, Classe A)

$S_3 = 1,00$

$$V_k = 47,03\text{m/s} \quad (6.9)$$

Teremos, para a força devida ao vento a 10m de altura:

$$F = C_a q A = 3,7 \frac{47,03^2}{16} \times 1 = 511 \text{ kgf/m}^2 \quad (6.10)$$

A relação entre as forças calculadas pelas duas normas será

$$\frac{F \text{ (NB-599)}}{F \text{ (NB-182)}} = \frac{511}{190} = 2,69 \quad (6.11)$$

A NB-599 considera a variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno. De modo que, em alturas acima de 10 metros, a relação de forças será ainda maior. Por exemplo, a 30m de altura teremos:

$$V_k = 52,0\text{m/s} \text{ e } F = 625\text{kgf/m}^2 \quad (6.12)$$

e a relação de forças será:

$$\frac{F \text{ (NB-599)}}{F \text{ (NB-182)}} = \frac{525}{190} = 3,29 \quad (6.13)$$

Considerando o fator topográfico  $S_1 = 1$ , ter-se-á:

A 10m de altura:  $F \text{ (NB-599)} = 405\text{kgf/m}^2$ ; Rel. = 2,13

A 30m de altura:  $F \text{ (NB-599)} = 495\text{kgf/m}^2$ ; Rel. = 2,61.

A Tabela 3 apresenta um resumo dos principais resultados desenvolvidos anteriormente, além dos esforços nos cabos da linha de transmissão (condutores e pára-raios).

O estudo explica o tombamento da torre com a ocorrência de vento que, embora bastante violento, é inferior ao especificado na NB-599. Os projetos mais antigos consideravam um coeficiente de segurança  $s = 1,5$ . Mais recentemente foi adotado  $s = 2,0$ . Como a força devida ao vento sobre a torre e cabos é de 2,5 a 3 vezes superior à obtida pela NB-182, o coeficiente de segurança é ultrapassado mesmo com velocidade inferior à máxima prevista pela NB-599.

A velocidade do vento que atingiu as torres não pode ser estimada pelos acidentes na região (escala Beaufort), pela inexistência de obstá-



**Tabela 3**  
**FORÇAS NA TORRE E NOS CABOS**

FORÇAS NA TORRE	NB-182	NB-599
Ca.....	2,34	3,7
Vk (km/h).....	130	170*
<b>A 10m de altura:</b>		
F (kgf/m <sup>2</sup> )	190	511*
F (599) / F (182).....	2,69*	(2,13 <sup>†</sup> )
<b>A 30m de altura:</b>		
F (kgf/m <sup>2</sup> )	190	625*
F (599) / F (182).....	3,29*	(2,61 <sup>†</sup> )
<b>FORÇAS NOS CABOS</b>		
Ca – CONDUTORES	–	1,1
PÁRA-RAIOS	–	1,3
F (kgf/m <sup>2</sup> ) ..... C.	3200	8900
P.R.	<u>220</u>	<u>725</u>
TOTAL	3420	9625
F (599) / F (182).....	2,81*	(2,33 <sup>†</sup> )

Nota: \*S<sub>1</sub>=1,1 ; †S<sub>1</sub>=1,0

culos tais como árvores, postes, edificações etc. Entretanto, podemos avaliar a velocidade máxima do vento partindo de informações do projeto estrutural. A ruína da torre central deu-se basicamente por um efeito de flexão do conjunto em plano perpendicular à linha. Portanto, o esforço que deveremos estudar como principal é o correspondente ao momento de tombamento da torre, igualando os valores obtidos por ambas as normas. Admitindo que a NB-599 indique valores que correspondem aos reais, devemos calcular a velocidade V para a qual as forças correspondentes provocam um momento de tombamento igual ao de ruína calculado segundo a NB-182 (nesta, os esforços atuantes devem ser multiplicados pelo coeficiente de segurança s).

Com este critério e lembrando a (6.8):

$$V = V_0 S_1 S_2 S_3$$

sendo

$$S_1 = 1,1$$

$$S_2 = 1,0 \text{ a } 17\text{m de altura (aproximadamente à meia altura da torre)}$$

$$S_3 = 1,0$$

chega-se a  $V = 1,1 V_0$

$$V_0 = 127\text{km/h, para } s = 1,5$$

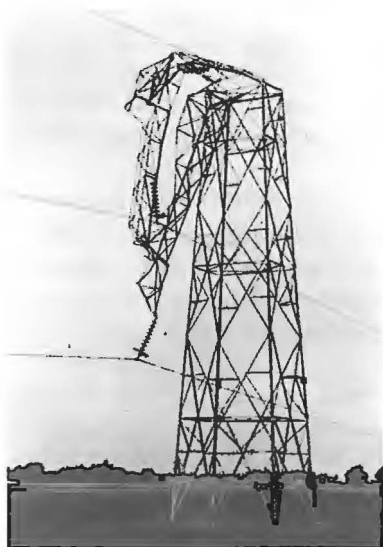
$$V_0 = 147\text{km/h, para } s = 2,0.$$

Pela idade das torres, parece-nos que o coeficiente de segurança usado foi 1,5. Conseqüentemente, a velocidade básica do vento,  $V_0$ , na rajada mais violenta (e que deve ter causado a ruína da torre central) deve ter atingido um valor em torno de 130km/h.

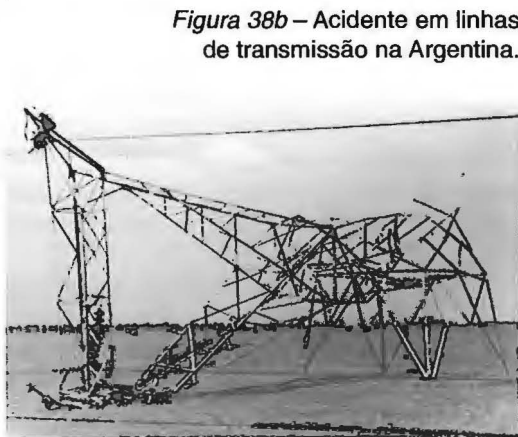
A razão para a grande diferença entre os valores da NB-182 e NB-599 parece ser a seguinte:

A NB-599, que se aplica a edificações em geral (e não apenas a edifícios e assemelhados), considera uma probabilidade de ruína muito pequena, em relação à NB-182. Esta última parece basear-se em certas normas européias que admitem uma probabilidade de ruína muito maior, em zonas não-povoadas, pela existência na Europa de uma malha bastante densa de linhas de transmissão interligadas. Qualquer interrupção em uma delas é rapidamente suprida por outras linhas. Isto explica, cremos nós, não só os acidentes ocorridos no Rio Grande do Sul, mas também outros de que temos informações, em São Paulo (CESP) e na Argentina (Aguas y Energia Eléctrica), de cujos acidentes damos dois exemplos na Figura 38.

É de destacar também a imprecisão do coeficiente para a determinação da força devida ao vento fornecido pela NB-182, que na parte aerodinâmica apresenta um valor muito baixo e único, sem consideração da influência de fatores como o número de Reynolds, proporções dos elementos estruturais e sua rugosidade superficial. Também a parte meteorológica deste coeficiente é deficiente e incompleta em sua conceituação. Trata-se de coeficientes baseados em estudos e especificações muito antigos, que não faziam distinção entre a parte meteorológica e aerodinâmica do coeficiente de força.



*Figura 38a* – Acidente em linhas de transmissão em São Paulo.



*Figura 38b* – Acidente em linhas de transmissão na Argentina.

e) Além do acidente com a torre estaiada de pequena altura citada anteriormente (item 5.p), temos conhecimento de acidente em torre do mesmo tipo, porém de dimensões bem maiores. Trata-se da torre estaiada da Rádio Farroupilha, de Porto Alegre, RS, com 190m de altura, contados da rótula da base a seu topo. A Figura 39 indica a localização dos estais e a Figura 40 um esboço em vista aérea da posição da torre após o colapso, no ano de 1970. Na Figura 41 vê-se parte da torre acidentada.

A torre, podemos dizer, desmoronou, dobrando-se exatamente nos n pontos de fixação dos estais, com um único ponto de ruptura completa, separando-se em duas partes na secção dos estais centrais.

O acidente deu-se com vento forte, mas ainda assim bem abaixo dos valores indicados pela NB-599. Aliás, o estudo de acidentes com torres estaiadas tem mostrado que a maioria ocorre com velocidades do vento abaixo da velocidade de projeto.<sup>31</sup>

Os estais têm uma importância decisiva no comportamento da torre, pois, além de constituírem apoios elásticos, eles influem dinamicamente, com suas características próprias de massa, mola, amortecimento e forças excitadoras (vibrações dos cabos pelo vento agindo diretamente neles e pela interação com a torre).

Para certas freqüências de excitação, os estais, em vez de aplicarem uma força restauradora à torre, tendem a encurvá-la.<sup>16</sup>

Talvez a causa do acidente tenha sido uma oscilação dos cabos na freqüência do harmônico de ordem  $(n + 1)$  – a torre tem  $n$  níveis de fixação dos cabos – da torre, levando esta ao colapso por fenômeno de ressonância.<sup>32</sup>

Lembramos uma das conclusões de trabalho de Vellozzi:<sup>44</sup>

Os resultados demonstram que há uma necessidade urgente de ampliar as bases do projeto de torres estaiadas altas para incluir a análise dinâmica para cargas de vento. Isto é sugerido por numerosos relatórios de falhas de torres estaiadas que foram projetadas apenas para carga estática.

f) Em São Paulo têm ocorrido diversos acidentes com linhas de transmissão de energia elétrica, alguns deles com queda de mais de 10 torres consecutivas (no Rio Grande do Sul, o recorde é de 5 torres no acidente descrito anteriormente). Como exemplo de tais acidentes reproduziremos informações veiculadas em revistas de São Paulo:

De novembro de 1970 a junho de 1983, 20 acidentes na CESP (Companhia Energética de São Paulo), com queda ou inclinação acentuada de estrutura de linhas de transmissão de 69 a 460kV. No total foram atingidas 143 estruturas – média de 7,5 por ocorrência.<sup>30</sup>

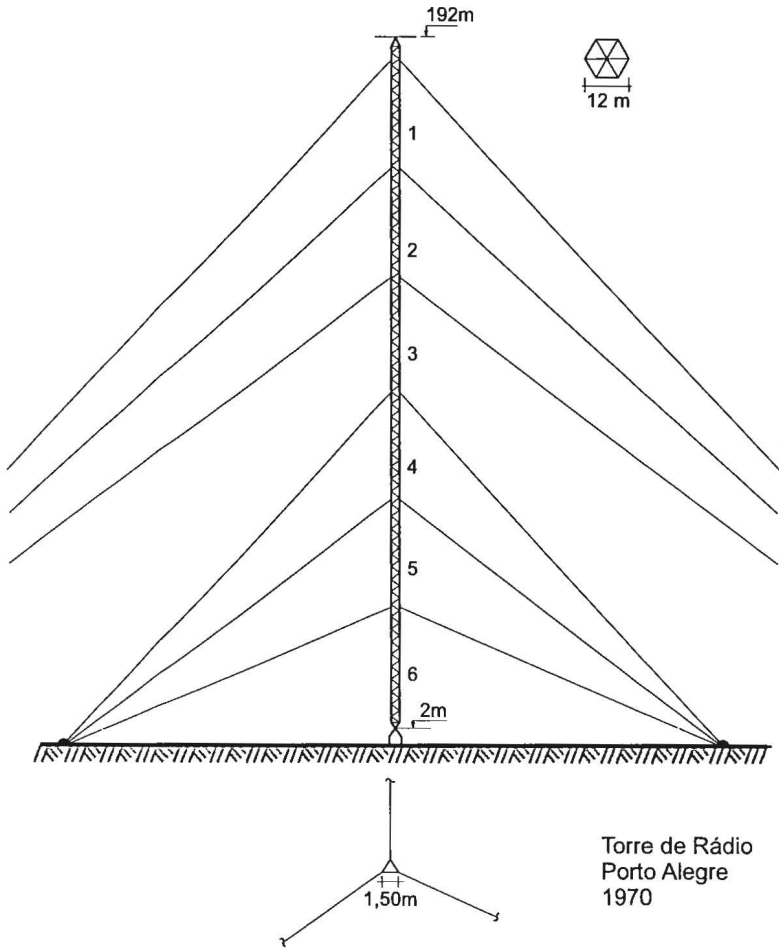


Figura 39 – Localização dos estais da torre da Rádio Farroupilha de Porto Alegre, RS.

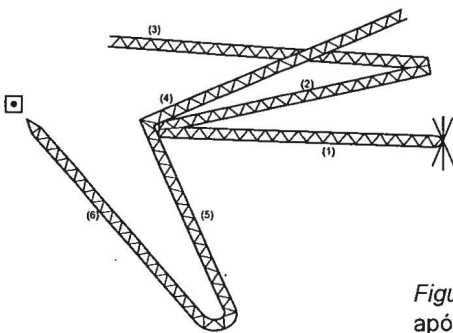


Figura 40 – Posição da torre após o colapso.



*Figura 41a*  
Torre acidentada  
da Rádio Farroupilha  
de Porto Alegre, RS.



*Figura 41b* – Torre acidentada da Rádio Farroupilha de Porto Alegre, RS.

Os ventos que superaram, em inúmeros locais, 115km/h e derrubaram linhas de transmissão da Cia. Energética de São Paulo (CESP), no dia 12 de outubro último, trouxeram consigo evidência e ensinamentos ao setor elétrico brasileiro.

Das 65 torres irremediavelmente perdidas, 49 sustentavam linhas de 440kV e 18 delas conectavam Ilha Solteira a Bauru, enquanto 31 ligavam Jupiá a Bauru, no Estado de São Paulo. As outras 16, entre Valparaíso e Penápolis, faziam parte de uma linha de 138kV.

Tecnicamente, garante a empresa, todas obedeciam com rigor às normas da ABNT que estabelecem, para São Paulo, as características e os padrões de uma região “B”, na qual os ventos não ultrapassariam 110km/h. O índice de segurança adicional para estas torres e equipamentos é de 1,8 a 2,0, quer dizer: a perda decorreu de ventos de mais de 180km/h, num trecho de quase 20km de extensão de linhas (0,1 por cento do total da Concessionária).

[...]

Na CESP, igualmente, uma vertente de opiniões passou a acreditar que as normas da ABNT precisariam ser revistas, baseadas numa revisão completa do comportamento dos ventos em São Paulo. No bojo desta teoria, vinha implícita a idéia de que entidades como a Força Aérea Brasileira (FAB) acumulam dados eólicos mais precisos, que deverão ser agregados, usados e pensados.

De qualquer maneira, na ótica do binômio custo *versus* benefício de um empreendimento como uma linha de transmissão, garantem os técnicos, não há meios compatíveis de se obter 100 por cento de segurança todo o tempo.<sup>2</sup>

g) Teceremos alguns comentários sobre o que foi transcrito.

Texto: “[...] as normas da ABNT precisariam ser revistas [...] entidades como a FAB acumulam dados eólicos mais precisos [...]”.

Comentário: A norma brasileira NB-599 (ou NBR-6123), intitulada *Forças devidas ao vento em edificações*, aprovada em 1978 (portanto, cinco anos antes do artigo que estamos comentando), apresenta valores das velocidades máximas do vento a considerar no projeto estrutural de edificações (estão incluídas nesta denominação também torres em treliça e cabos). Estes valores foram obtidos exatamente a partir dos registros de 49 estações do Serviço de Proteção ao Vôo do Ministério da Aeronáutica. As séries de velocidades máximas anuais destas estações foram processadas e exaustivamente testadas, do ponto de vista probabilístico, sendo os parâmetros ajustados mediante o método da máxima verossimilhança. Constituíram o tema de duas dissertações de mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, além de outros trabalhos apresentados em congressos.

Texto: “[...] todas obedeciam com rigor às normas da ABNT que estabelecem, para São Paulo, as características e os padrões de uma re-

gião “B”, na qual os ventos não ultrapassariam 110km/h. O índice de segurança adicional para estas torres e equipamento é de 1,8 a 2,0, quer dizer: a perda decorreu de ventos de mais de 180km/h [...]”.

Comentário: O autor está se referindo à norma brasileira NB-182, que julgamos não ser aplicável às condições brasileiras, conforme exposto ao ser estudado o acidente com 5 torres da CEEE (item 6.d). Os acidentes no Rio Grande do Sul que conhecemos ocorreram, todos eles, em torres calculadas com a NB-182 ou com normas estrangeiras equivalentes. Não temos notícia de acidentes com as torres projetadas de acordo com a NB-599.

Parece haver um pequeno engano na consideração do “índice de segurança”. O coeficiente de segurança, que no caso seria equivalente a um índice de majoração de cargas, aplica-se a cargas. Ora, a carga do vento é proporcional ao quadrado de sua velocidade. Portanto, a velocidade do vento que causou o acidente será de

$$\sqrt{1,8 \text{ a } 2,0} \times 110 = 147 \text{ a } 155\text{km/h}$$

e não “de mais de 180km/h”.

Além do que, pela NBR-6123, a velocidade básica em São Paulo varia entre 35 e 45m/s (126 a 162km/h). Isto é, para a região paulista assolada pelos ventos mais violentos, a velocidade característica a 18m de altura (cerca de metade da altura das torres comuns), em terreno aberto e plano sem obstruções, para edificações de Classe “B” (maior dimensão entre 20 e 50m) será

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 = 162 \times 1 \times 1 \times 1 = 162\text{km/h}$$

Isto é, um pouco acima da “velocidade do vento que causou o acidente”, 147 a 155km/h.

Texto: “[...] não há meios compatíveis de se obter 100 por cento de segurança todo o tempo”.

Comentário: Porém, a probabilidade de um acidente será bem menor se forem adotadas as ações do vento previstas, de um modo cientificamente correto, na NBR-6123.

Finalmente, lembramos que para linhas de transmissão, dependendo de sua extensão, pode ser de interesse um estudo especial, que colete todos os dados disponíveis na região e que leve em conta a probabilidade de ocorrência de ventos violentos de acordo com sua orientação.

## Conclusões e recomendações

a) Os acidentes causados pelo vento em geral são evitáveis.

b) Para isso é necessário levar em conta os coeficientes aerodinâmicos reais. Eles podem ser obtidos de normas atualizadas ou de ensaios realizados para obras semelhantes em estudo. Em caso de formas novas ou de obras excepcionais, recomenda-se o estudo direto em túnel de vento, com simulação das principais características do vento natural.

c) Grande importância deve ser dada às sucções externas, que aparecem principalmente em telhados pouco inclinados ou curvos. Também as pressões internas devem ser levadas em consideração. Não esquecer que se os vidros forem rompidos, ou se portas e janelas forem forçadas pela pressão do vento, no interior da construção aparecerá uma forte sobrepressão que somará sua ação à sucção externa (isto acontecerá quando os elementos rompidos estiverem na zona em sobrepressão externa, se estiverem na zona em sucção, esta se transmitirá ao interior).

d) A sobrepressão interna poderá ser impedida de aparecer, em muitos casos, pela disposição judiciosa de aberturas permanentes. Por exemplo: lanternins abertos, telhas com ventilação, aberturas tipo válvula nos oitões, venezianas etc.<sup>6</sup>

e) Os vidros e as ferragens de portas e janelas devem ser suficientemente fortes para resistirem aos esforços do vento.



f) Grande número de acidentes evitáveis deve-se à falta de ancoragem seja dos elementos da cobertura na estrutura do telhado, seja desta estrutura no restante da construção, ou desta nas fundações. Também a falta de contraventamento tem sido o motivo de muitos acidentes.

g) As fundações devem ser suficientemente pesadas e profundas para evitarem tombamento ou ascensão da estrutura.

h) As ligações entre os diferentes elementos estruturais devem ser capazes de resistir aos esforços horizontais e verticais do vento.

i) As paredes, tanto de alvenaria como de painéis de fibrocimento ou metálicos, devem ser suficientemente ancoradas na estrutura, a fim de não serem arrancadas pelos esforços do vento.

j) As obras rurais serão muito mais resistentes ao vento se forem convenientemente contraventadas e ancoradas suas peças constituintes. Isto pode ser conseguido mediante simples peças, de baixo custo. Recomendamos os estudos feitos pelos norte-americanos,<sup>42,43,45</sup> e, no Brasil, pela Eternit.<sup>21</sup>

k) Em cidades com edifícios altos e com grandes superfícies envidraçadas, considerar a possibilidade de fragmentos lançados pelo vento. Como no Brasil não é usado cascalho nas coberturas, uma melhor fixação dos elementos das coberturas e das janelas (telhas de diversos tipos, gelosias, esquadrias, vidros) já é suficiente para diminuir grande parte do risco de acidentes por fragmentos lançados pelo vento.

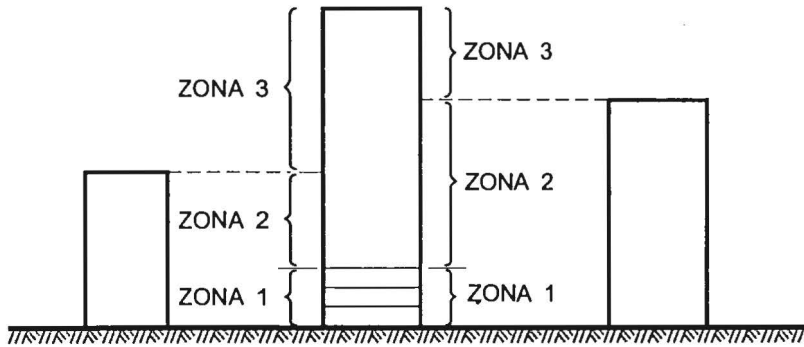
Para o caso do impacto de fragmentos lançados pelo vento, e baseando-se no estudo de danos causados a edifícios por mais de 50 tormentas, Minoi<sup>24</sup> propõe o seguinte:

As fachadas do edifício considerado são divididas em três zonas, com um grau de proteção específico para cada zona (Figura 42).

Zona 1: constituída pelos três primeiros pisos. É a parte da fachada que deve ser protegida contra fragmentos relativamente grandes que se deslocam próximo ao terreno.

Zona 2: a partir do limite da Zona 1 até o nível do topo do edifício vizinho mais alto situado a barlavento da fachada em estudo. É a parte da fachada que deve ser protegida contra fragmentos provenientes de telhados adjacentes – principalmente cascalho, mas incluindo material do telhado.

Zona 3: a parte restante de cada fachada. Não necessita ser projetada para fragmentos volantes.



### AÇÃO DE OBJETOS LANÇADOS PELO VENTO

Figura 42 – Zonas em um edifício para ação de objetos lançados pelo vento.

Estas recomendações terão uso restrito em nosso País, onde as tormentas (tormentas ou ciclones extratropicais, tormentas elétricas ou trovoadas, linhas de instabilidade e tornados) não atingem a violência daquelas que lhes serviram de base. A mesma observação é válida para o item seguinte.

m) Chang,<sup>11</sup> ao tratar da resistência de edificações a tornados, apresenta, entre outras, as seguintes sugestões:

- não devem ser usadas paredes de alvenaria não armadas, principalmente blocos de concreto vazados;
- paredes de alvenaria armada devem ser usadas de acordo com as recomendações do Forest Products Laboratory constantes nos relatórios FPL 33 (1965) e FPL 123 (1969);
- janelas estreitas são preferíveis, com venezianas de proteção;
- todas as coberturas devem ser automaticamente ventiladas e horizontais, e seguramente ancoradas às paredes e fundações de concreto;
- concreto armado é o melhor material para edifícios altos;
- estruturas altas de aço devem ser soldadas e possuir paredes cortinas (*shear walls*) resistentes e contínuas;
- devem ser evitadas árvores altas e postes nas proximidades das edificações;
- cuidadosa atenção deve ser dada às ancoragens e nós dos elementos de concreto pré-moldado e protendido;
- estruturas de madeira devem ser projetadas com nós apropriados e reforçadas com conexões metálicas.

n) Embora os coeficientes aerodinâmicos sejam valores universais, as forças correspondentes variam com o quadrado da velocidade do vento. Pela NBR-6123, o projeto estrutural é feito com a chamada velocidade característica, cujo valor depende do local da edificação. Assim, uma dada cobertura ou estrutura pode ser estável em uma região do Brasil e ser parcial ou totalmente danificada pelo vento em outra região. Por exemplo: há um tipo de telha ondulada que não é vendido no Rio Grande do Sul, tendo em vista as altas velocidades do vento neste Estado.

o) Na fase de projeto é possível adotar algumas providências que ocasionam uma diminuição dos esforços devidos ao vento. Para o caso de edificações leves e baixas (escolas, pavilhões rurais e industriais, coberturas isoladas de postos de serviço etc.) citamos:

- usar telhados com inclinação não menor que 20°;
- telhas de barro são mais estáveis do que as de fibrocimento e as metálicas;
- beirais não-forrados são facilmente danificados, principalmente nos oitões;
- forrar os beirais com forros estanques ao ar; porém, se eles estiverem presos na estrutura do telhado, poderão ser arrancados juntamente com caibros e telhas;
- são recomendáveis forros de concreto;
- evitar a formação de sobrepressões externas junto a paredes vazadas, com venezianas ou outras aberturas permanentes, pois esta sobrepressão passará ao interior da edificação, aumentando a força ascensional sobre o telhado, se o forro for permeável ao ar ou inexistir. O beiral da Figura 43 e a parede maciça da Figura 44 provocam o aparecimento de altas sobrepressões externas, com vento incidindo conforme indicado nestas figuras;
- evitar que durante a execução da obra sujam sobrepressões internas de alto valor; por um fechamento das paredes, aberturas e telhados planejados convenientemente;
- usar aberturas permanentes em locais apropriados. Por exemplo: cumeeiras com ventilação, janelas com venezianas fixas nos extremos das paredes maiores e janelas tipo válvula nos oitões;
- seguir as indicações da norma brasileira NBR-6123;
- usar quebra-ventos de árvores com copa e altura convenientes, dispostos a barlavento da edificação, considerando a orientação de onde provêm os ventos mais velozes;
- evitar edificações no topo de morros ou colinas, pois o vento nestes locais é acelerado pelo efeito Venturi.



Figura 43 – Influência de um beiral nas pressões internas.

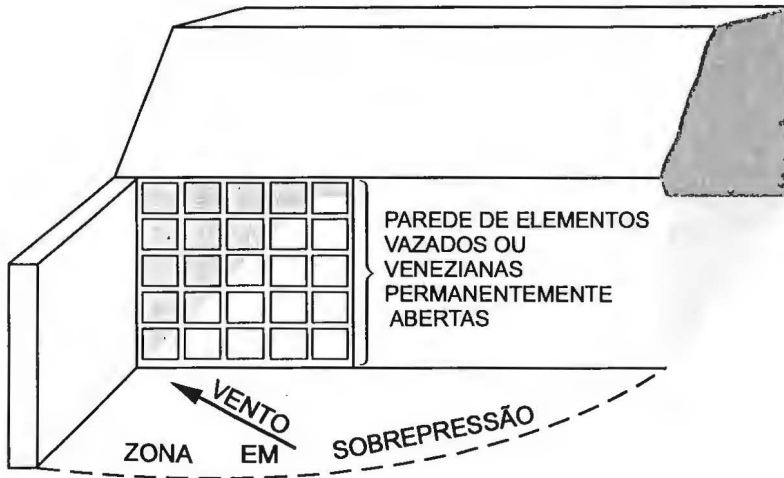


Figura 44 – Influência nas pressões internas de uma parede vazada situada perpendicularmente a uma parede maciça.



## Referências bibliográficas\*

- 1 ANDERSON, E.A. e SAFFIR, H. Miami suffer slight structural damage in severe hurricane. *Civil Engineering*, New York, N.Y., v.20, n.12, p.36, dec. 1950.
- 2 AS LIÇÕES DE UM VENDAVAL. São Paulo, *Mundo Elétrico*, nov.1981.
- 3 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Norma brasileira NB-182, *Projeto de linhas aéreas de transmissão e subtransmissão de energia elétrica*. Rio de Janeiro, 1972.
- 4 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. Norma brasileira NB-599, *Forças devidas ao vento em edificações*. Rio de Janeiro, 1980. (NB-599 ou NBR-6123 – atualizada em 1988.)
- 5 BLESSMANN, J. Efeito do vento em construções civis. *Manual do engenheiro*. Globo, v.7, tomo 1, p.285-373.
- 6 \_\_\_\_\_. *Pressão interna*. 3.ed. Porto Alegre: Ed. da Universidade, 1991. (Série Engenharia Estrutural, 5.)
- 7 \_\_\_\_\_. *Vento em coberturas planas isoladas*. Porto Alegre, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1985. (Caderno de Engenharia CE-1.)
- 8 \_\_\_\_\_. *Tópicos de normas de vento*. 2.ed. Porto Alegre: Editora da Universidade, 1990. (Série Engenharia Estrutural, 6.)
- 9 BRITISH STANDARD CODE OF PRACTICE. *Code of basic data for the design of buildings*. Chapter 5. Loading. Part 2. Wind loads. London: British Standards Institution, 1972.

---

\* Informações foram também obtidas de jornais, revistas e diretamente.

- 10 BULLER, P.S.J. Winds damage to buildings in the United Kingdom 1970-1976. *Buildings Research Establishment Current Paper* CP 42/78, Building Research Establishment, Garston, England, April 1978.
- 11 CHANG, C.C. What we learned from the tornado of Lubbock, Texas, U.S.A., May 11, 1970. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND EFFECTS ON BUILDINGS AND STRUCTURES, 3. *Proceedings*, Tóquio, 1971, p.471-80.
- 12 CHIEN, N.; FENG, Y.; WANG, H.; SIAO, T. *Wind-tunnel studies of distribution on elementary building forms*. Iowa: Iowa Institute of Hydraulic Research, 1951.
- 13 COOK, N.J. Performance of building in the United Kingdom. In: *Engineering Structures*, v.6, n.4, p.248-255, Oct. 1984. (Proc. Conference on design against wind-induced failure, Bristol, UK, 12-13 Jan. 1984.)
- 14 DAVENPORT, A.G. *The prospects of natural disaster reduction through improvements of structural quality*. In: 14th IABSE Congress, New Delhi, India, 1992. 13p.
- 15 \_\_\_\_\_. The impact of structural damage due to hurricanes and the prospects for disaster reduction. In: *Prediction and Perception of Natural Hazards*. Holanda: Kluwer Academic Publishers, 1993. p.13-21.
- 16 DAVENPORT, A.G. e STEELS, G.N. Dynamic behavior of massive guy cables. *Proc ASCE, J. Struct. Div.* ST2, p.43-70, April 1965.
- 17 DIKKERS, R.D.; MARSHALL, R.D.; THOM, H.C.S. Hurricane Camille-August 1969. *National Bureau of Standards Technical Note* 569, National Bureau of Standards, Washington, D.C., March 1971.
- 18 EDITORIAL. *Engineering News-Record*, New York, N.Y., 121, Dec.1938.
- 19 ENGINEERING approach to designing glass for wind. *Architectural Record*, New York, N.Y., v.77, p.163-166, Feb. 1967.
- 20 ESMAY, M. L. e GIESE, H. Wind damage to farm buildings. *Agricultural Engineering*, St. Joseph, Mich, v.32, p.275-277, May 1951.
- 21 ETERNIT. *Ancoragem das coberturas*. Boletim Eternit n.115, dez. 1982.
- 22 FONT, M. Lessons from hurricanes in Puerto Rico. *Engineering News-Record*, New York, N.Y., v.109, n.16, p.470-471, Oct.1932.
- 23 FRIEDMAN, D.G. Economic impact of windstorms in the United States. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND ENGINEERING, 5. *Proceedings* (pre-print), Fort Collins, Colorado, USA, 1979, v.1, p.I.4-1 a I.4-13.
- 24 GODFREY Jr., K.A. *Window glass extreme winds: design for flying debris?* New York, Civil Engineerings, ASCE, v.54, n.1, Jan.1984.
- 25 KÁRMÁN, T. von. L'aerodynamique dans l'art de l'ingénieur. *Memoires de la Société des Ingénieurs Civils de France*, Paris, Jul.1948, p.155-78. Edição Especial.
- 26 MARSHALL, R.D. Engineering aspects of cyclone Tracy. Darwin, Australia, 1974. *National Bureau of Standards Science Series* 86, National Bureau of Standards, Washington, D.C., June 1976.

- 27 MENZIES, J.B. Wind damage to buildings in the United Kingdom 1962-1969. *Building Research Station Current Paper CP 35/71*, Building Research Station, Garson, England, Nov.1971.
- 28 MINOR, J.E. e BEASON, W.L. Window glass failures in windstorms. *Journal of Structural Division, ASCE*, Jan.1976, v.10, n.ST 1.
- 29 PECK, R.L. e STINEMAN, N.M. The behavior of engineering structures in recent violent wind storms. *Proceedings of the American Concrete Institute*, Detroit, Mich., v.24, p.275, 1927.
- 30 POR QUE CAEM AS TORRES DE TRANSMISSÃO? São Paulo, *São Paulo Energia*, v.1, n.9, out.1984.
- 31 ROITSHTEIN, M. e SAVITSKY, G. The full-scale behaviour of mast guys. *Industrial Aerodynamics Abstracts*, Cranfield, England, v.4, n.2, p.1-11, March/April 1973.
- 32 SACHS, P. *Wind forces in engineering*. 2.ed. Oxford: Pergamon Press, 1978.
- 33 SAFFIR, H.S. Hurricane Camille: data on storm and structural damage. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND EFFECTS ON BUILDINGS AND STRUCTURES, 3. *Proceedings*, Tóquio, 1971, p.457-469.
- 34 \_\_\_\_\_. The effects on structures of winds of hurricane force. Ann Arbor, American Society of Civil Engineers, 1953. Separata n.206 do *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*. NewYork, NY, v.79, jul.1953.
- 35 SCRUTON, C. e NEWBERRY, C.W. On the estimation of wind loads for buildings and structural design. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, London, v.25, p.95-126, jun.1963.
- 36 SICHIRI, Y. Wind withstanding design for the transmission line tower. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND EFFECTS ON BUILDINGS AND STRUCTURES, 3. *Proceedings*, Tóquio, 1971, p.451-456.
- 37 SOMES, N.F.; DIKKERS, R.D. e BOONE, T.H. Lubbock tornado: a survey of building damage in an urban area. *National Standards Bureau Technical Note 558*, National Bureau of Standards, Washington, D.C., March 1971.
- 38 SPARKS, P.R.; REID, G.T.; REID, W.D.; WELSH, S. e WELSH, N. *Wind conditions in Hurricane Hugo by measurement, interference and experience*. In: J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v.41, p.55-66, 1992. [Proc. 8th International Conference on Wind Engineering, London, Canada, 1991].
- 39 STEINMAN, D.B. Design of bridges against wind: I - General considerations; aerostatic consideration. *Civil Engineering*, New York, N.Y., v.15, n.10, p.469-472, Oct. 1945.
- 40 TAMING THE TOWER. *Time*, New York, Oct.11, 1976. p.24
- 41 THEAKSTON, F.H. e WALPOLE, E.W. Wind damage to farm buildings as a result of 1953 tornado storms. *Agricultural Institute Review*, Canada, p.11-13, Jan./Feb. 1957.



- 42 THOMPSON, R.A. Protection of small building against high velocity winds. Gainesville, University of Florida Engineering and Industrial Experiment Station, 1949. (Bulletin Series, 28.)
- 43 TROTMAN, L.A.J. The effects of hurricanes on buildings structures. *Civil Engineering and Public Works Review*, London, v.48, n.560, p.147-148, Feb. 1953.
- 44 VELLOZZI, J.W. Tall guyed tower response to wind loading. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND EFFECTS ON BUILDINGS AND STRUCTURES, 4, Heathrow, England, 1975. p.735-743.
- 45 WILSON, J.A. Windstorms and their effects on buildings. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, Boston, Mass., v.38, n.1, p.262-271, Jan. 1951.
- 46 WIND-BRACED high buildings in the Florida. *Engineering News-Record*, New York, N.Y., v.100, n.9, p.151-153, Mar.1928.

# Furacões no Brasil?

## 1. Obra segura... até quando ?

A festa, um esplendor. O serviço, de primeira. A inauguração da obra foi um fecho de ouro de um meticuloso e eficiente trabalho de equipe. A solução arquitetônica soube aliar elegantemente beleza a uma aparência de robustez e de perenidade. A construção foi feita com materiais de primeira e com mão-de-obra da melhor qualidade. O projeto estrutural levou em consideração todas as ações permanentes e acidentais. Pela esbeltez e altura do edifício, especial atenção foi dada às ações estáticas e dinâmicas do vento. Velocidade básica do vento para um período de recorrência de cem anos foi obtida de várias décadas de registros na região. Coeficientes de força e de torção, vibração pelas rajadas de vento, ações locais (altas sucções em certas zonas do edifício), efeitos de vizinhança (aumento de ações locais, de momentos fletores e de momentos de torção), tudo de acordo com a norma brasileira de vento, NBR-6123. E, ainda, considerando os resultados de ensaios em modelo reduzido do edifício em túnel de vento, no qual foram simuladas as principais características dos ventos fortes em estabilidade neutra.

Os proprietários, o arquiteto, o estruturista, o engenheiro construtor, todos muito satisfeitos e exuberantemente felizes naquele momento festivo. Estavam inaugurando a *obra*, uma obra bem projetada e bem construída. Era, podiam dizer, uma *obra segura*. Mas, será realmente segura? Por quanto tempo? Bem, certamente por um tempo bem supe-

rior ao de sua vida útil teórica, de 100 anos. Mas, e dentro deste prazo, não poderia haver alterações sensíveis nas ações devidas ao vento? Não poderiam ser alteradas profundamente as condições climáticas nos próximos 100 anos?

A resposta a estas perguntas é *talvez*, pois há indicações de que as condições climáticas podem vir a ser alteradas no Brasil no próximo século, com um aumento considerável das velocidades do vento em boa parte da região costeira do Brasil.

As alterações climáticas de que vamos tratar a seguir estão ligadas ao chamado *efeito estufa* da atmosfera, quando aquecida pela energia provinda do sol.

## 2. O efeito estufa

a) O que vem a ser o efeito estufa? O nome deve-se ao fato de a atmosfera funcionar à semelhança do vidro de uma estufa. A energia solar atinge a Terra sob a forma de ondas eletromagnéticas (radiação solar) de diversos comprimentos de onda (ondas caloríficas, luminosas etc.). A maior parte desta energia não é calorífica. Parte dela é refletida para o espaço exterior ou absorvida diretamente pela atmosfera, dependendo das condições de poluição, umidade e cobertura por nuvens. Uma parte da energia que a atmosfera deixa passar é refletida e outra parte (a maior) é absorvida pela crosta terrestre, provocando seu aquecimento. A crosta e a atmosfera, uma vez aquecidas, irradiam este calor em comprimentos de onda muito maiores que os da radiação incidente, provinda do Sol. Este calor (radiação infravermelha) é, em sua maior parte, impedido de escapar da atmosfera. Esta se compõe principalmente de nitrogênio (78%) e oxigênio (21%), os quais são bastante “transparentes” tanto à radiação provinda do Sol como à radiação infravermelha emitida pela crosta aquecida. Entretanto, o vapor d’água (em quantidade muito variável) e outros gases são bastante transparentes à radiação solar, mas pouco ao infravermelho, mantendo assim a atmosfera aquecida, por um processo semelhante ao de uma estufa.

Os gases que mais influem no efeito estufa, com sua influência percentual aproximada e sua permanência no ar estão listados na Tabela 1.

O dióxido de carbono constitui atualmente cerca de 0,037% da atmosfera. Origina-se da queima de combustíveis fósseis (carvão, petróleo, gás), incêndios florestais, decomposição vegetal, respiração de ani-

mais. O metano desprende-se de toda matéria orgânica em decomposição protegida do ar. O óxido nítrico provém da combustão do petróleo e da indústria de fertilizantes. Os CFC's não existem na natureza; são usados em aerossóis, refrigeração e plásticos expandidos.

**Tabela 1**  
**GASES DO EFEITO ESTUFA**

GÁS	Influência percentual	Permanência no ar
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	50 %	100 anos
Metano (CH <sub>4</sub> )	19 %	10 anos
Clorofluorcarbonos (CFC)	17 %	65 - 110 anos
Ozônio (O <sub>3</sub> )	8 %	< 1 ano
Óxido nítrico (N <sub>2</sub> O)	4 %	150 anos
Vapor d' água (H <sub>2</sub> O)	2 %	

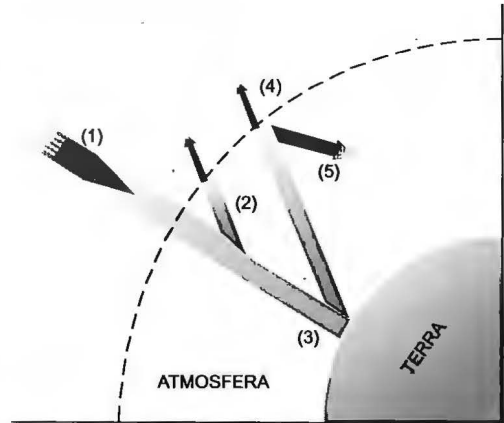
b) A absorção e a reflexão dependem das características das distintas partes da crosta: tipo de terreno e de sua cobertura vegetal, desertos, oceanos, calotas polares, montanhas cobertas de neve etc. Por exemplo, a absorção da energia solar é de cerca de 25% para neve, de 80 a 90% para campos gramados, 95% para terreno arado e de 60 a 90% para água, variando estas percentagens com os ângulos de incidência dos raios solares.

Da energia solar que atinge nosso planeta, 30% é refletida de volta para o espaço e 70% é absorvida pela atmosfera e pela crosta, com a seguinte distribuição:

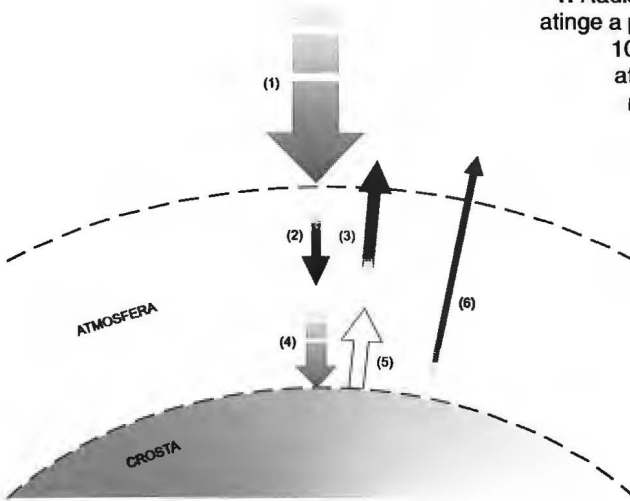
– Energia refletida:	
– atmosfera (exceto nuvens) .....	10%
– nuvens .....	18%
– crosta .....	2%
– Energia absorvida:	
– atmosfera (exceto nuvens) .....	22%
– nuvens .....	3%
– crosta .....	45%

c) A Figura 1 procura visualizar o efeito estufa:

**Figura 1 – Efeito estufa.** 1. Energia solar incidente sobre a Terra, na forma de ondas eletromagnéticas de alta frequência; 2. Energia absorvida diretamente na atmosfera pelo vapor d'água, nuvens, ozônio, partículas de aerossol (14%). Parte é refletida de volta ao espaço exterior; 3. A crosta terrestre absorve energia solar (45%), aquecendo-se e irradiando esta energia como radiação infravermelha (calor). Outra parte, pequena, é por ela refletida; 4. Pequena parcela da energia calorífica irradiada pela crosta volta ao espaço exterior (12% desta energia). Também parte da energia refletida pela crosta volta ao espaço exterior; 5. A maior parte da energia irradiada e refletida pela crosta fica retida na atmosfera pelo efeito estufa, causando um aumento de sua temperatura.



d) Os valores das parcelas da energia solar absorvida, refletida e irradiada pela atmosfera e pela crosta variam com a fonte consultada. Demillo,<sup>3</sup> por exemplo, apresenta o seguinte balanço da energia solar que atinge perpendicularmente um ponto da superfície da Terra (Figura 2):



**Figura 2**  
Absorção e irradiação da energia solar na Terra.

1. Radiação de alta frequência que atinge a parte exterior da atmosfera: 100%; 2. 20% é absorvida na atmosfera superior; 3. 27% é refletida para o espaço pela atmosfera superior e topo das nuvens brancas; 4. 50% é absorvida pela crosta terrestre; 5. Esta parcela é irradiada para a atmosfera em ondas caloríficas de baixa frequência; 6. 3% é refletida pela crosta para o espaço.

e) Antes de aparecer vida na Terra os gases do efeito estufa eram de origem geológica ou geoquímica (emanações de vulcões, liberação gasosa de rochas etc.). Com o aparecimento de vegetais e animais, este processo foi acelerado. Os vegetais em crescimento absorvem o dióxido de carbono, o qual é liberado com seu apodrecimento ou queima. Os animais exalam este gás na respiração e, após a morte, liberam o metano, quando se decompõem. Também excrementos animais liberam grande quantidade de metano.

O efeito estufa não é, em si, um mal. Pelo contrário, não fora este fenômeno a temperatura média da atmosfera (média espacial e temporal, que designaremos por *temperatura global*) estaria bem abaixo do ponto de congelamento da água. As estimativas indicam uma temperatura que deveria situar-se entre  $-20^{\circ}\text{C}$  e  $-32^{\circ}\text{C}$ . Os oceanos estariam todos congelados e não existiria a maioria das formas de vida que conhecemos, incluindo o homem. Com a ação protetora destes gases a temperatura global estabilizou-se em cerca de  $13^{\circ}\text{C}$ , até poucos séculos atrás.

A vida na Terra é resultado de um delicado equilíbrio de gases que formam uma pequeníssima parte de nossa atmosfera. E este equilíbrio está sendo paulatinamente rompido pelo homem, a partir do início da chamada “era industrial”. O nosso “cobertor” está começando a nos aquecer demasiadamente. E isto devido, principalmente, a dois fatores: o uso de combustíveis fósseis, que causam um aumento do teor de dióxido de carbono na atmosfera, e a derrubada de florestas, nas quais este gás era retirado da atmosfera ao ser incorporado às plantas pela fotossíntese. E, com a queima das florestas, este gás é novamente incorporado à atmosfera. Enquanto os homens derrubavam as árvores com machados, a natureza conseguia manter o equilíbrio. Com o uso posterior de serras movidas pela força muscular começou o desequilíbrio. O panorama mudou mais ainda com as grandes queimadas e com o advento das motosserras e tratores, que aceleraram em muito a devastação de vastas zonas florestais. Atualmente a temperatura global é de cerca de  $15^{\circ}\text{C}$ .

f) O teor de  $\text{CO}_2$  na atmosfera tem aumentado constantemente passando de 315 partes por milhão (0,0315%), em 1958, para 360 partes por milhão (0,0360%), em 1995. Isto é, um aumento de 14,3% em 37 anos. Desde o início da “era industrial” até os dias de hoje o dióxido de carbono na atmosfera aumentou em torno de 25%. Continuando a tendência atual, o teor de dióxido de carbono dobrará nos próximos 100 anos. Modelos computacionais desenvolvidos em vários laboratórios idôneos (tais como em um Instituto da NASA e no Instituto Max Planck de Meteorologia, em Hamburgo, Alemanha) estimam um aumento correspondente da temperatura global entre  $1^{\circ}\text{C}$  e  $4^{\circ}\text{C}$ . Desde o início da civi-

lização jamais foi registrado um aumento tão rápido. Se o aumento de temperatura for de aproximadamente 4°C, haverá mudanças drásticas no clima. Basta lembrar que nos últimos 150 mil anos a terra passou por diversas eras glaciais, separadas por eras mais quentes. Pois bem, a diferença máxima da temperatura global ao passar de uma era glacial para uma era quente ficava em torno de 5°C. Além disso, as temperaturas globais atuais são *as mais quentes dos últimos 150 mil anos*. E os últimos anos têm sido cada um deles mais quente que o anterior.

g) Até perturbações na camada de ozônio interferem, de um modo indireto, no efeito estufa. É esta camada que nos protege dos raios ultravioletas do Sol. Relativamente ao material existente na atmosfera, sua quantidade é ínfima. Se esta camada estivesse próxima à crosta, com a pressão e temperatura aí existentes, sua espessura seria de apenas 3 milímetros.

O que acontece é que os raios ultravioletas que passam pelos “buracos” existentes na camada de ozônio estão danificando as plantas unicelulares de certas regiões oceânicas, os *fictoplantos*. Na Antártida já foi constatada uma diminuição de 25% de fictoplantos e uma correspondente diminuição de extração de dióxido de carbono da atmosfera por estas plantas unicelulares. Conseqüentemente, aumenta o efeito estufa.

h) Algumas providências já estão sendo tomadas para evitar um colapso da atmosfera, mas ainda é muito pouco. A eliminação dos clorofluorcarbonados de aparelhos de refrigeração, de aerossóis e de certos plásticos já está sendo adotada no mundo gradualmente. Entretanto, para o maior vilão, o dióxido de carbono, bem como para o metano e o óxido nítrico (os três são causadores de cerca de três quartos do efeito estufa), não há medidas drásticas previstas para um futuro próximo. O ponto crucial está na energia obtida por combustão de materiais fósseis, que é responsável por 80% do dióxido de carbono lançado na atmosfera. Os países que mais poluem são os mais industrializados, sendo que os Estados Unidos encabeçam a lista. Este país tem 5% da população mundial e consome quase a quarta parte da energia mundial. Quase um terço do CO<sub>2</sub>, neste país, provém dos automóveis. A cada ano, em média um automóvel emite um peso de CO<sub>2</sub> superior a seu próprio peso! (Ref.6, p.134).

Vários eventos internacionais têm tratado deste grave problema nos últimos anos. Por exemplo, as quatro Convenções do Clima, no Rio de Janeiro (1992), Berlim (1995), Kioto (1997) e Buenos Aires (1998). São reuniões que congregam até mais de 2 mil representantes de mais de 160 países, mas até agora pouco de concreto foi conseguido. O país que mais se opõe a uma redução drástica da emissão de dióxido de carbono

é o que mais polui: os Estados Unidos, que são responsáveis por cerca de 23% da emissão total deste gás. Como foi dito em Kioto,

há resistência dos países em desenvolvimento para aceitar regras e métodos que impliquem a transferência, para eles, da responsabilidade pela solução do problema criado pelas nações ricas ao longo dos últimos duzentos anos, para sustentar seu progresso econômico e o alto padrão de vida que seus habitantes hoje desfrutam”.

Na reunião de Buenos Aires foi constatado que, entre 1990 e 1996, as emissões anuais de dióxido de carbono aumentaram 7%. Em 1996 os Estados Unidos lançaram 5.324 milhões de toneladas de dióxido de carbono na atmosfera, um aumento de 9% sobre 1990. A Alemanha conseguiu reduzir em 8% e a Grã-Bretanha em 0,4%. Entretanto, em países em desenvolvimento o aumento da emissão foi bem maior: Brasil com 31%, China com 33%, Índia com 44%, Arábia Saudita com 45% e a campeã, a Coreia do Sul, com 75%.

Em 1996, os países que mais lançaram dióxido de carbono na atmosfera foram (em milhões de toneladas): Estados Unidos, com 5.324; China, com 3.179; Rússia, com 1.516; Japão, com 1.177; Alemanha, com 904 e Índia, com 863. O Brasil aparece em 18º lugar, com 285 milhões de toneladas.

i) A temperatura da atmosfera tem subido gradativamente. De 1860 (início das medições) a 1990, os seis anos mais quentes situaram-se na última década deste período. E há anos da última década que têm sido ainda mais quentes: 1995 tinha batido o recorde (desde 1860), 1997 superou-o e 1998 foi ainda mais quente. No século XX a temperatura global aumentou entre 0,3°C e 0,6°C, variando o valor com a origem da estimativa. Atualmente a temperatura global é de 15,2°C. Se houver uma diminuição substancial da emissão de dióxido de carbono, em 2040 a temperatura chegará a 15,6°C. Com a emissão atual chegará a 16,8°C. E, se houver um aumento razoável desta emissão, chegará a 17,7°C.

O Painel Intergovernamental para Mudanças Climáticas, órgão das Nações Unidas, prevê que a temperatura global aumentará entre 1°C e 3,5°C até o fim do século XXI. Previsões de outras fontes, mais pessimistas, falam em até 5°C. Com isto haverá aumento no degelo em altas montanhas e nas zonas próximas aos pólos. Além disso, estudos computacionais mostram que mesmo com um aumento pequeno da temperatura global haverá inundações maiores, secas mais rigorosas, tempestades mais violentas, verões mais quentes, invernos mais frios. O nível do mar aumentará entre 0,15m e 0,95m;



este aumento será causado tanto pelo degelo de plataformas do anártico e geleiras como pelo aumento do volume dos oceanos com a elevação da temperatura global.

j) Aliás, mudanças que estão causando preocupação já têm sido detectadas. A superfície coberta pelo gelo no Ártico tem diminuído desde 1978. A geleira Wordie, na Antártida, apresentou grandes fendas na mesma época. Em janeiro de 1995 um bloco com 70km x 38km desprendeu-se da plataforma de gelo Larsen. Em 1998 um bloco ainda maior, com 150km x 25km, desprendeu-se da plataforma de gelo Ronne. E não são os únicos; há outros blocos, de menores dimensões, porém ainda muito maiores que os do Ártico.

As geleiras de montanha têm recuado em todo o mundo. Inundações na Europa têm sido, em parte, causadas pelo derretimento exagerado de geleiras e de neve. O nível do mar está subindo (entre 0,10m e 0,25m no século XX). Em várias partes do mundo os invernos estão cada vez mais frios e os verões mais quentes (porém com a temperatura global sempre aumentando, como já comentamos), com secas e inundações mais e mais severas. De 1970 a 1990 a superfície do oceano Pacífico com temperatura acima de 27°C aumentou em cerca de 15%.

k) Há previsões que são, ao menos em parte, ainda mais pessimistas, no que se refere aos próximos cem anos:

- A quantidade de dióxido de carbono na atmosfera no mínimo duplicará, com o que a temperatura global poderá subir até 3,5°C. Se as emissões deste gás forem reduzidas para a metade da atual, a temperatura não deverá subir mais de 2°C.

- O nível dos mares subirá entre 0,30m e 1,50m (pela fusão de gelos continentais). Algumas ilhas baixas, bem como regiões costeiras baixas nos continentes, poderão ficar submersas, ao menos parcialmente.

- Uma previsão ainda mais pessimista indica um aumento de 5°C na temperatura global. Será a mais alta, desde o início da idade do gelo, há 2,5 milhões de anos. Haverá então uma fusão considerável das calotas polares.

- Com um aumento considerável da temperatura global, as secas provocarão fome em uma escala maior. Ter-se-á o recrudescimento de diversas doenças, tais como malária, dengue, paludismo e outras, consideradas como erradicadas. Além disso, estas doenças atingirão regiões atualmente imunes a elas.

- O clima passará por grandes mudanças, com zonas férteis convertendo-se em semidesertos ou desertos e vice-versa. De acordo com algumas previsões, áreas atualmente favoráveis à agricultura na Ásia sul e

sudeste, na África abaixo do Saara e na América do Sul vão ficar mais quentes e secas.

l) O fenômeno é altamente complexo, e não há acordo entre os cientistas de como será o clima dentro de 100 anos. Há fatores que influenciam de maneira oposta. Por exemplo, o aquecimento provocará um aumento da evaporação, podendo haver um maior cobrimento de nuvens, sendo que a própria localização destas nuvens influi no aquecimento: aquelas situadas próximas à superfície refletem a luz solar, reduzindo a temperatura da crosta; porém, as mais altas colaboram para o efeito estufa, retendo calor. Lembramos o caso do planeta Vênus, que deve sua alta temperatura atmosférica (de cerca de 450°C) à espessa camada de nuvens que o cerca permanentemente.

O aumento da temperatura, das precipitações e do dióxido de carbono favorece a fotossíntese, com um aumento da vegetação (há informações de que a vegetação no Hemisfério Norte aumentou 10%, entre 1982 e 1990). Uma solução seria o plantio de árvores em larga escala. Seria necessário plantar uma área com superfície como a do Brasil, para surtir efeitos razoáveis. O que é uma tarefa gigantesca, irrealizável com a atual mentalidade de lucro imediato ou em futuro próximo.

O mar conserva em solução entre 50 e 60 vezes mais dióxido de carbono que a atmosfera, podendo absorver ainda mais.

O aumento de dióxido de carbono na atmosfera é menor que a emissão. É que parte deste gás é incorporada aos oceanos e à biosfera. Há sugestões de que mesmo as florestas adultas estão absorvendo este gás. Por que e até quando, não se sabe.

m) Do que foi exposto, o certo é que a temperatura global está aumentando, e que mudanças dramáticas no clima têm uma boa probabilidade de ocorrer. A natureza certamente encontrará um novo estado de equilíbrio. Mas, neste estado, será possível a vida como a conhecemos?

### 3. Ciclones tropicais no Brasil

a) Ciclones tropicais são movimentos circulatórios na atmosfera, de grandes dimensões. Embora possa indicar-se 1.000km como uma dimensão típica, ventos com velocidades destrutivas raramente atingem uma distância acima de 100km, a partir de seu centro, onde se situa o *núcleo*, com um diâmetro em torno de 20km. O núcleo é uma zona de baixa pressão, com ar seco e calmo, ou com apenas brisas sua-

ves, bem diferente da zona que o circunda, com ar úmido e quente e altas velocidades do vento.

Os ciclones tropicais formam-se a partir do ar úmido e quente existente sobre grandes extensões de água com temperatura acima de 27°C, em regiões tropicais dos oceanos. Sua energia provém do calor latente liberado pela condensação do vapor d'água contido no ar quente e úmido que sobe na zona que circunda o núcleo. Eles aparecem entre as latitudes de 5° e 30° (ou mesmo mais). Nos oceanos Índico e Pacífico formam-se em ambos os hemisférios. No Atlântico formam-se, por enquanto, apenas ao norte do equador; pois ao sul a temperatura está abaixo de 27°C, devido à corrente marítima fria que vem do Antártico. Dizemos “por enquanto” porque a Companhia de Resseguros de Munique<sup>2</sup> apresenta previsões nada agradáveis para o Brasil, as quais passamos a transcrever:

A temperatura da água em algumas partes do Atlântico Sul alcançará a temperatura crítica de 27°C, abrindo a porta para o desenvolvimento de ciclones tropicais até agora não encontrados nesta parte do mundo. Não é necessário dizer que tais ciclones constituirão então um tremendo risco ao longo da costa do Brasil.

O aumento da temperatura da água dos mares deve-se ao efeito estufa (item 2).

b) Quando a velocidade do vento próximo à superfície, em um ciclone tropical, atinge cerca de 70km/h (~20m/s), ele é chamado de *tormenta tropical (tropical storm)*; e, a partir de 120km/h (33m/s), de *furacão* ou *tufão (hurricane ou typhoon)*. Os furacões têm uma ação destrutiva considerável, tanto pela ação direta do vento (que pode atingir 250km/h ou mais ainda, excepcionalmente), como pelas violentas chuvas que o acompanham.

A Figura 3 mostra a correlação entre a temperatura da água do oceano e o aparecimento de tormentas tropicais e de furacões, no Hemisfério Norte.  $T_0$  é a temperatura crítica, a partir da qual podem se formar as tormentas tropicais e os furacões. As abscissas são os meses do ano, e as ordenadas, à esquerda, a temperatura da água do mar e, à direita, um valor proporcional ao número de furacões e de tempestades tropicais. Com o aumento da temperatura da água do mar, aumentará a “temporada” desses ciclones, bem como a superfície das regiões em que podem aparecer.

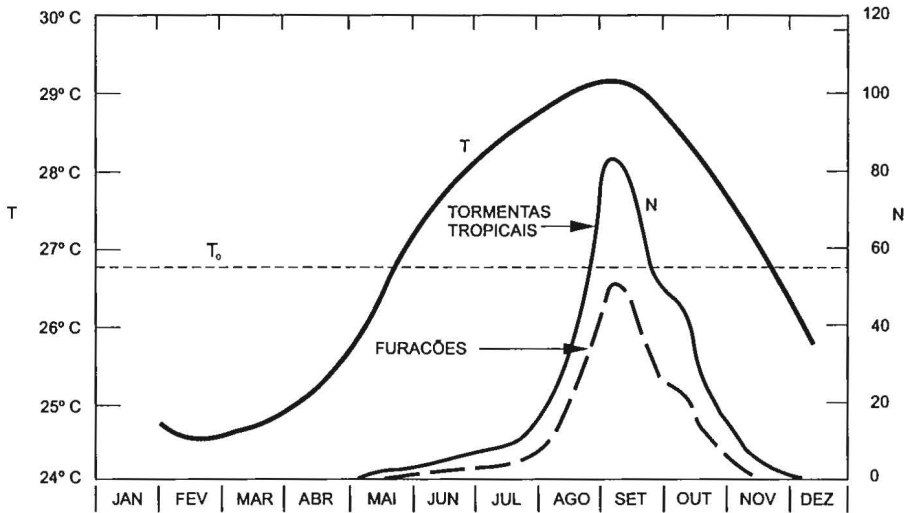


Figura 3 – Temperatura do oceano e ciclones tropicais.

c) Dos 114 maiores cataclismas registrados entre 1960 e 1989, 50% foram causados por ventos, 30% por terremotos, 10% por inundações e enchentes e 10% por outras causas (erupções, incêndios florestais e secas). O que mostra a importância dos danos causados pelo vento.

#### 4. Considerações finais

a) Esta é uma breve síntese do problema. Qual a solução? Parece-nos que seria necessária uma drástica redução da emissão de gases causadores do efeito estufa. A eliminação de clorofluorcarbonados de aparelhos de refrigeração (ar condicionado, geladeiras e afins etc.), de aerossóis e de certos plásticos já está sendo adotada no mundo, gradual mas efetivamente. Entretanto, para o maior vilão, o dióxido de carbono, bem como para o metano e o óxido nítrico (os 3 são causadores de cerca de três quartos do efeito estufa, sendo que cabe ao dióxido de carbono a metade deste efeito) não há medidas drásticas previstas para um futuro próximo. O ponto crucial está na energia obtida por combustão de materiais fósseis (carvão, petróleo, gás), que é responsável por 80% do dióxido de carbono lançado na atmosfera.

b) Como vimos, o problema foi agravado pelo desmatamento sistemático em quase todo o mundo. Europa e América do Norte devastaram

quase completamente suas florestas. Atualmente, é na Ásia, África e América do Sul (Indonésia, Congo e Amazônia, principalmente) que ocorre aceleradamente este processo suicida. O Fundo Mundial para a Natureza (World Wildlife Fund-WWF) informa que, dos 8 bilhões de hectares de florestas existentes há oito mil anos, atualmente restam apenas 3 bilhões. Na Ásia, 88% das florestas nativas já foram destruídas; na Europa, 62%; na América do Norte, 39%; na América Latina, 41% e na África, 45%. Outras fontes indicam devastações ainda maiores. “O mais terrível é que o ritmo de destruição das florestas aumentou consideravelmente nos últimos anos e continua crescendo”, informou Francis Sullivan, diretor da campanha do WWF em favor das florestas. Com esta mentalidade destruidora da natureza, é mera utopia pensar-se em um reflorestamento gigantesco, como foi comentado anteriormente (item 2.1).

c) Se a humanidade conseguir impedir o aumento do efeito estufa, tanto melhor. Se não o conseguir, poderá o excesso de dióxido de carbono acelerar o desenvolvimento das plantas e restabelecer o equilíbrio, como tem sido sugerido? Ou o equilíbrio térmico será obtido em um nível que dificulte ou impeça a vida humana?

E se o efeito estufa levar ao aparecimento de ciclones tropicais no Brasil dentro dos próximos cem anos? O prazo poderá ser menor se o dióxido de carbono na atmosfera aumentar mais rapidamente. Não estará na hora de prever este problema ao menos no projeto das grandes estruturas?

O que é já um fato é que “pela primeira vez na história o gênero humano está começando a alterar o clima do mundo drasticamente e, possivelmente, irreversivelmente” (Ref.2, p.112).

## Referências bibliográficas\*

1 BLESSMANN, J. *O vento na engenharia estrutural*. Porto Alegre: Ed. da Universidade, 1995.

2 COMPANHIA DE RESSEGUROS DE MUNIQUE. *Windstorm*. New loss dimensions of a natural hazard. Munich Reinsurance Company, 1990.

3 DEMILLO, R. *Como funciona o clima*. São Paulo: Ed. Quark do Brasil, 1998.

4 EXPLORING YOUR WORLD. New York: National Geographic Society, 1993.

5 LEHR, P. E.; BURNETT, R. W. e ZIM, H. S. *Weather*. New York: Ed. Simon and Schuster, 1957.

6 SAGAN, C. *Bilhões e bilhões*. São Paulo: Ed. Companhia das Letras, 1998.

---

\* Informações foram também obtidas de jornais e revistas.

# A escala Beaufort

## 1. Histórico

A escala Beaufort vem a ser uma escala da força exercida pelo vento. Ela permite estimar a velocidade do vento com uma “precisão surpreendente”, como diz Sachs.<sup>15</sup> Concordamos com Sachs, pois em nossa vida profissional tivemos oportunidade de estimar a velocidade do vento a partir dos danos por ele causados em árvores, postes e construções, confrontando com as descrições da escala Beaufort. Estes resultados, comparados com medições diretas da velocidade do vento ou com os resultados de estudos probabilísticos, foram satisfatórios, com um erro sempre inferior a 10%.

Essa escala deve-se ao almirante da Marinha Real Britânica Francis Beaufort, e nasceu de uma necessidade prática. Beaufort estava interessado em fazer com que marinheiros ainda inexperientes conseguissem estimar a velocidade do vento. Para isso ele estabeleceu diversas zonas de velocidade do vento, cada uma delas caracterizada por certos efeitos do vento sobre o mar ou sobre o navio, perceptíveis e distintos. Assim, o marinheiro, observando esses efeitos, estava em condições de estimar a velocidade aproximada do vento através da escala definida por Beaufort.

O primeiro registro dessa escala apareceu no diário de bordo pessoal de Beaufort no ano de 1805 (alguns autores indicam 1806). Em 1838 ela foi adotada pela Marinha Real Britânica e, internacionalmente, em 1853. Em virtude de sua praticidade e eficiência, posteriormente, em 1905, ela foi adaptada para uso em terra por George Simpson, e, mais

recentemente, para estimar as condições de conforto de pessoas expostas ao vento.

Observe-se que tanto marinheiros como engenheiros estão mais preocupados com a força exercida pelo vento, a qual é proporcional ao quadrado de sua velocidade. É a força exercida pelo vento que vai causar os efeitos descritos na escala Beaufort.

## 2. Velocidade de referência

### 2.1. RAJADAS

a) Um dos problemas para interpretar corretamente a escala Beaufort é o atinente à dependência da velocidade dos seguintes parâmetros: a altura acima do terreno, sua rugosidade e o intervalo de tempo usado na determinação da velocidade. Estamos sempre tratando com velocidades médias, que podem corresponder a uma vasta gama de intervalos de tempo. Na prática, a intervalos entre 1 hora e 3 segundos; em raros casos podem interessar rajadas muito rápidas, de apenas uma fração de segundo.

A Figura 1 apresenta um registro da velocidade do vento em um certo intervalo de tempo  $T$ , sendo  $\bar{V}$  a velocidade média do vento neste intervalo de tempo, em uma certa altura  $z$  acima do terreno. Em um dado instante:

$$V = \bar{V} + v \quad (1)$$

sendo  $v$  a flutuação (rajada) em torno da velocidade média  $\bar{V}$ .

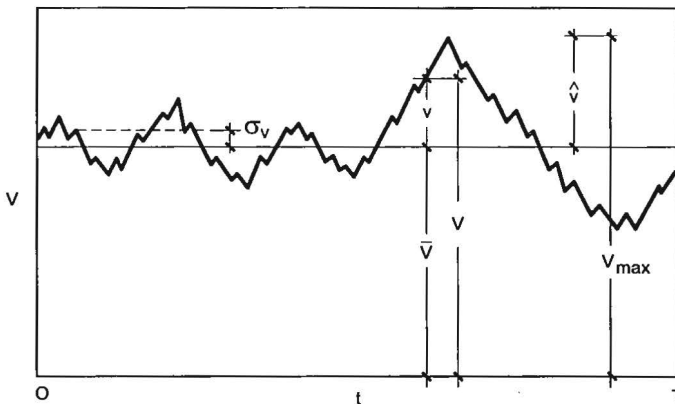


Figura 1 – Parâmetros básicos.

Outros parâmetros importantes são a velocidade de pico de rajada,  $\hat{v}$ , a velocidade máxima no intervalo de tempo considerado,  $V_{\max}$ , a variância  $(\sigma_v)^2$  e o desvio padrão das flutuações em torno da média,  $\sigma_v$ :

$$V_{\max} = \bar{V} + \hat{v} \quad (2)$$

$$(\sigma_v)^2 = (1/T) \int_0^T v^2 dt \quad (3)$$

A partir destes parâmetros básicos define-se a intensidade de turbulência, I:

$$I = \sigma_v / \bar{V} \quad (4)$$

que vem a ser uma medida adimensional da energia contida nas flutuações de velocidade (turbulência do vento).

Maiores detalhes destes parâmetros são encontrados na Ref.4.

b) Portanto, ao usar a escala Beaufort é necessário indicar sempre qual a velocidade a que estamos nos referindo: é a velocidade média horária? Ou sobre dez minutos? Ou é a velocidade de uma rajada de curta duração, de três ou cinco segundos, por exemplo? Infelizmente, muitas vezes a escala Beaufort é apresentada sem a indicação correta deste importante parâmetro. Diga-se de passagem que nada impede de tomar como referência um intervalo de tempo de dez minutos ou mais. Mas os efeitos indicados nessa escala devem-se principalmente às rajadas de curta duração, de apenas alguns segundos.

A passagem de um intervalo de tempo para outro se faz por meio do fator de rajada,  $F_r$ :

$$F_r = V_t / V_3 \quad (5)$$

sendo:

$V_t$  – velocidade média sobre t segundos

$V_3$  – idem sobre três segundos.

O fator de rajada geralmente é determinado para uma altura acima do terreno  $z=10m$ . Conceitualmente, poder-se-ia aplicar a qualquer altura. Os valores de  $F_r$  para  $z=10m$  e Categoria II de rugosidade do terreno aparecem na Tabela 21 da norma brasileira NBR-6123/88. E, para todas as cinco categorias desta norma, na figura 3.9 da Ref.4.



c) O problema é ainda maior se considerarmos que nem sempre a medição real da velocidade do vento coincide com a definição teórica. Eis o que diz a respeito Ed Arens<sup>1</sup> (1982): “Os registros de vento da ‘National Oceanic and Atmospheric Administration’ disponíveis nos Estados Unidos são designados ‘velocidade média horária do vento’, mas realmente são médias sobre um minuto medidas uma vez por hora” (!). A relação entre estas duas médias, a dez metros de altura, em campo aberto e plano (Categoria II da NBR-6123/88 – Tabela 22) é

$$V(1 \text{ min}) / V(1\text{h}) = 0,82 / 0,65 = 1,26$$

uma diferença demasiadamente grande para ser desprezada.

Alguns relatórios são omissos ao se referirem, vagamente, ao intervalo de tempo correspondente à velocidade média neles indicada, que seria 10min, 20min ou 1h. Para terreno da mesma Categoria II anterior, teremos:

$$V(10 \text{ min}) / V(1\text{h}) = 0,69 / 0,65 = 1,06$$

o que seria uma diferença ainda demasiada, mas tolerável, diante das imprecisões inerentes a estes estudos. Aliás, há autores que consideram constante a velocidade média para intervalos de tempo entre 10min e 1h, ao tratarem da escala Beaufort.

## 2.2. PERFIL DE VELOCIDADES MÉDIAS

a) Devido ao atrito com a rugosidade natural e artificial da superfície terrestre, a velocidade do vento na chamada camada limite atmosférica (cuja altura, dependendo desta rugosidade, varia entre 300m e 600m, aproximadamente) é tanto menor quanto mais próximo do terreno ela for medida.

Quanto maior a rugosidade do terreno e mais importantes em número e dimensões forem os grandes obstáculos (árvores, morros, edifícios, torres etc.), maiores serão a agitação do ar, o intercâmbio turbulento de quantidade de movimento e a altura interessada neste processo. Conseqüentemente, a altura da camada limite atmosférica (altura gradiente,  $z_g$ ) será maior em uma cidade que em campo aberto, por exemplo. Evidentemente, esta maior agitação provocará também uma maior intensidade de turbulência, com turbilhões atingindo uma vasta gama de dimensões: o vento em uma cidade será mais turbulento do que em campo aberto, continuando com o mesmo exemplo (Figura 2). Por outro lado, a uma dada altura, dentro da camada limite

atmosférica e para uma mesma velocidade gradiente (velocidade na altura gradiente), a velocidade média será menor em cidade do que em campo aberto (Figura 2).

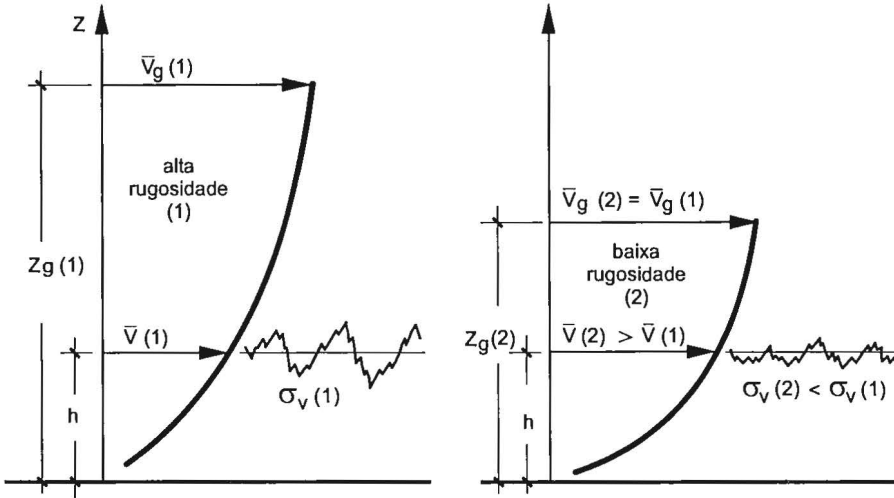


Figura 2 – Perfil de velocidades médias e turbulência variam com a rugosidade do terreno.

b) Para fins da engenharia civil é quase unânime a adoção de uma lei potencial para a variação da velocidade média com a altura. Esta lei representa, com aproximação suficiente para esses fins, o que acontece em diversos ventos naturais fortes. Além disso, ela também se aplica a velocidades médias calculadas em intervalos de tempo pequenos, a partir de rajadas de 3 segundos. O que não é o caso da lei logarítmica (muito usada em meteorologia), a qual só se aplica a intervalos de tempo de 10 minutos ou mais.

Para um certo terreno, a lei potencial para o perfil de velocidades médias é dada pela expressão

$$V_t(z) = V_t(10) (z/10)^p \quad (6)$$

sendo:

$V_t(z)$  – velocidade média sobre t segundos, na altura z  
 $V_t(10)$  – velocidade média sobre t segundos, a 10m de altura.

Quanto maior for  $t$ , menor a velocidade a uma mesma altura de um mesmo tipo de terreno. A Figura 3 apresenta os perfis correspondentes a  $t=1h$  e  $t=3s$ , para terreno de Categoria II da NBR-6123/88.

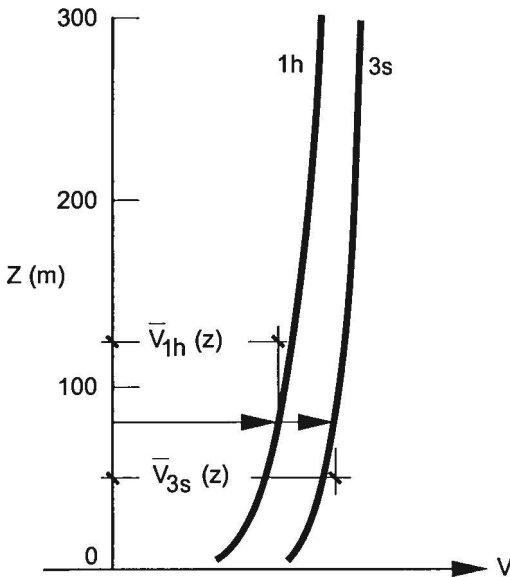


Figura 3 – Perfil de velocidades médias para 1h e 3s – Terreno de Categoria II da NBR-6123/88.

### 2.3. CONCLUSÃO

Conclui-se que as velocidades que constam na escala Beaufort devem ser referidas a valores bem definidos da altura acima do terreno e do intervalo de tempo utilizado no cálculo dessas velocidades, bem como a uma bem determinada categoria de rugosidade.

### 3. Escala Beaufort

Inicialmente Beaufort definiu 14 zonas, numeradas de 0 a 13, pouco depois passadas para treze, numeradas de 0 a 12. Cada zona correspondia a certos efeitos do vento sobre as ondas e o navio, ou melhor, sobre o modo de velejar. Ao ser adaptada para uso em terra consideraram-se os efeitos sobre elementos da natureza e sobre construções. Há também uma descrição específica para a orla marítima. E, mais recentemente, uma descrição ligada ao conforto de pessoas. Em sua apresentação tradicional, há uma tabela descritiva que inclui os respectivos limites de

velocidade média referentes a um só intervalo de tempo (em geral 10 minutos ou 1 hora).

Como salienta Penwarden,<sup>13</sup> a escala original não explicita o intervalo de tempo, mas “pareceria que as velocidades indicadas referem-se a médias sobre tempos longos, talvez dez minutos ou uma hora”.

Em outro trabalho Penwarden e Wise<sup>14</sup> apresentam um interessante gráfico que, partindo da velocidade média sobre dez minutos, vale entre dez minutos e um segundo. Ou seja, atinge até rajadas de curta duração. Quanto à rugosidade, indicam que a escala Beaufort refere-se a campo aberto e plano. Este gráfico, elaborado para problemas de conforto humano, engloba as forças 1 até 9 da escala Beaufort. Com o mesmo critério elaboramos o gráfico da Figura 4, porém para toda a escala Beaufort e considerando os valores de  $S_z$  da norma brasileira NBR-6123/88 para terreno de Categoria II (campo aberto e plano), velocidade do vento a 10 metros acima do terreno e intervalos de tempo entre 1 hora e 3 segundos.

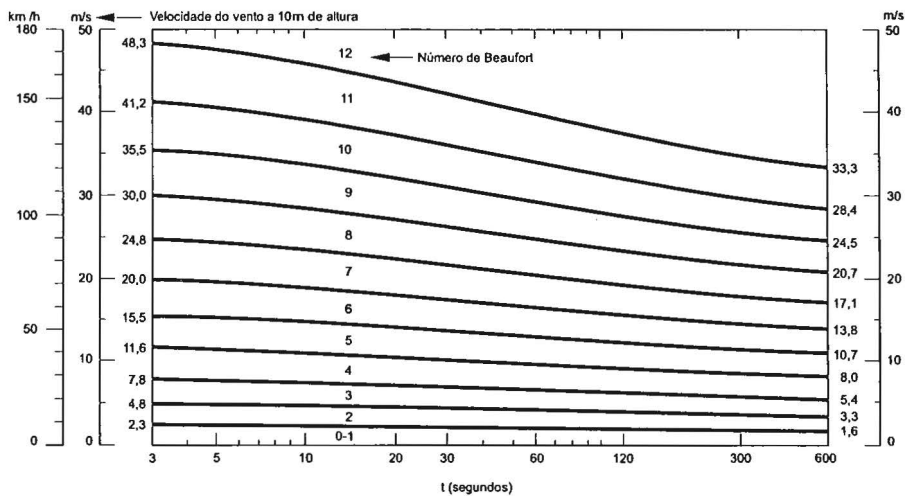


Figura 4 – Escala Beaufort

A Tabela 1 apresenta a escala Beaufort. Ela refere-se a terreno de Categoria II da norma brasileira, sendo dez minutos o intervalo de tempo usado para o cálculo da velocidade média, a 10 metros acima do terreno. Além disso, entre parênteses estão dadas as velocidades de rajadas de três segundos. De acordo com a norma brasileira, a dez metros de altura, para Categoria II:

$$V_{3s} = 1,45 \bar{V}_{10\text{min}} \quad (7)$$

Esta tabela indica os efeitos do vento em duas colunas: uma para os efeitos sobre a natureza e as construções e outra para os efeitos sobre pessoas. Quanto à designação do vento para cada zona da tabela, há uma grande variação, dependendo do autor. Na falta de uma padronização, a terminologia que estamos apresentando não passa de uma sugestão a mais, baseada, em geral, nos termos que mais encontramos na literatura.

Há uma certa imprecisão ao se usar a escala Beaufort em cidades, pois as rajadas são tanto mais velozes quanto mais rugoso o terreno. A energia nelas contida é caracterizada pela intensidade da turbulência, que serve também para quantificar as flutuações do vento (rajadas). A imprecisão aumenta quando se quer estudar a influência das rajadas sobre pessoas, a uma altura de 1,80m ou 2m acima do terreno. Nesta altura a intensidade de turbulência fica em torno de 0,2 em campo aberto e acima de 0,3 em grandes cidades. Além das rajadas, também a velocidade média é afetada pela rugosidade. Porém, enquanto as rajadas aumentam bastante de velocidade ao se passar de campo aberto para centro de grandes cidades, a velocidade média diminui. Para maiores detalhes, consultar Ref.4.

Muitos dos efeitos do vento descritos na Tabela 1 dependem das condições físicas do objeto considerado. Por exemplo, se uma árvore está com problemas nas raízes ou nos galhos, ela será arrancada ou seus galhos serão quebrados já com uma velocidade de vento menor. Também os danos às construções dependem de sua qualidade. Os acidentes iniciam-se em construções mal construídas. São telhas leves (alumínio, fibrocimento etc.) arrancadas por estarem mal ancoradas, paredes mal construídas, estruturas sem contraventamento adequado, concreto de má qualidade, tesouras de telhados mal dimensionadas e/ou ancoradas etc. Se as normas correspondentes à ação do vento e ao dimensionamento estrutural forem rigidamente seguidas, somente ventos de velocidades mais altas que as indicadas na Tabela 1 causarão danos. Muitas das construções danificadas são construções simples, sem qualquer projeto estrutural e mal construídas.

Para se avaliar a velocidade do vento a partir do número de Beaufort (B) há uma expressão empírica que fornece, com aproximação muito boa, a média das velocidades de rajadas máximas que limitam cada zona da escala de Beaufort. É a seguinte:

$$V_m = 1,22 \sqrt{B^3} \text{ m/s} \quad (8)$$

A Tabela 2 apresenta os valores assim obtidos. Para  $B = 12$ , como a

escala Beaufort indica apenas o limite inferior de velocidade, há uma certa discrepância. Para comparação, essa tabela contém ainda os valores médios obtidos da própria Tabela 1.

Conhecida a velocidade de rajada máxima que ocorreu, a expressão (9) permite a determinação aproximada do número de Beaufort.

$$B = 0,88 \sqrt[3]{V^2} \quad (9)$$

**Tabela 2**  
VELOCIDADE DE RAJADA A PARTIR DA EXPRESSÃO (8)

Número de Beaufort	Velocidade em m/s		Número de Beaufort	Velocidade em m/s	
	V <sub>m</sub> cf. Ref. 8	V <sub>m</sub> cf. Tabela 1		V <sub>m</sub> cf. Ref. 8	V <sub>m</sub> cf. Tabela 1
1	1,2	1,4	7	22,6	22,4
2	3,5	3,5	8	27,6	27,4
3	6,3	6,3	9	32,9	32,8
4	9,8	9,7	10	38,6	38,4
5	13,6	13,6	11	44,5	44,8
6	17,9	17,8	12	50,7	48,3

## Referências bibliográficas

- 1 ARENS, E. On considering pedestrian winds during building design. In: *Wind tunnel modeling for civil engineering applications*. (Proc. International Workshop.) Cambridge: Cambridge University Press, 1982.
- 2 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Norma brasileira NBR-6123/88: *Forças devidas ao vento em edificações*, 1988.
- 3 BAYNES, C. J. *The statistics of strong winds for engineering applications*. University of Western Ontario, Canada, 1974. (Tese Ph. D.)
- 4 BLESSMANN, J. *O vento na engenharia estrutural*. Porto Alegre: Editora da Universidade, 1995.
- 5 DAVENPORT, A. G. An approach to human comfort criteria for environmental wind conditions. In: *Teaching the teachers*. Colloquium on Building Climatology, Estocolmo, Sept. 1972.
- 6 ESQUILLAN, N. *Les effets de la neige et du vent sur les constructions et les règles NV65*. Annales de l' Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics. 21<sup>o</sup> Année, n.250, p.1.484-1.520, Oct. 1968.
- 7 GANDEMER, J. *Inconfort dû au vent aux abords des bâtiments: concepts aérodynamiques*. Cahiers du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, n.170, p.255-281, Juin 1976.

- 8 HOUGHTON, E. L. e CARRUTHERS, N. B. *Wind forces on buildings and structures: an introduction*. New York: John Wiley & Sons, 1976.
- 9 JAGSICH, J. *Meteorologia física - El tiempo*. Buenos Aires: Ed. Kapelusz, 1954.
- 10 LAWSON, T. V. e PENWARDEN, A. D. The effects of wind on people in the vicinity of buildings. In: Proc. 4th International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, Heathrow, Grã-Bretanha, Cambridge University Press, 1975.
- 11 \_\_\_\_\_. Wind tunnel investigations. *Journal of Industrial Aerodynamics*, Elsevier, Amsterdam, v.3, n.2-3, p.177-186, July 1978.
- 12 LAWSON, T. V. The wind content of the built environment. *Journal of Industrial Aerodynamics*, Elsevier, Amsterdam, v.3, n.2-3, p.93-105, July 1978.
- 13 PENWARDEN, A. D. Acceptable wind speeds in towns. *Building Research Establishment Current Paper CP 1/74*, London, 1974.
- 14 PENWARDEN, A. D. e WISE, A. F. E. Wind environment around buildings. *Building Research Establishment Report*, London, 1975.
- 15 SACHS, P. *Wind forces in engineering*. 2.ed. New York: Pergamon Press, 1978,
- 16 WHITE, K. C. Wind tunnel testing to determine the environmental wind conditions for the proposed town center development at Corby. In: Symposium on Wind Effects on Buildings and Structures, Loughborough, Grã-Bretanha, v.2, Paper 34, 1968.

**Tabela 1**  
**ESCALA BEAUFORT**

Número de Beaufort	Designação	$\bar{V}_{10min}(10m)^{(1)}$		EFEITOS EM	
		km/h	m/s	NATUREZA E CONSTRUÇÕES	PESSOAS
0	Calmaria	< 1 ( < 1,5)	< 0,3 ( < 0,5)	Fumaça eleva-se verticalmente.	O vento não é notado.
1	Aragem	1 - 6 (1,5 - 8,7)	0,3 - 1,6 (0,5 - 2,3)	Fumaça inclina-se, indicando direção e sentido do vento.	O vento não é notado.
2	Brisa	6 - 12 (8,7 - 17,4)	1,6 - 3,3 (2,3 - 4,8)	Folhas agitam-se suavemente (farfalham). Cata-ventos indicam a direção do vento.	O vento é sentido na face.
3	Vento suave	12 - 20 (17,4 - 29)	3,3 - 5,4 (4,8 - 7,8)	Folhas, ramos finos e arbustos pequenos em movimento constante. Bandeiras leves e pequenas são inteiramente desfraldadas.	O cabelo é parcialmente despenteado. Roupas folgadas agitam-se. Dificuldade para ler jornais.
4	Vento moderado	20 - 29 (29 - 42)	5,4 - 8,0 (7,8 - 11,6)	Folhas, ramos finos e arbustos pequenos em movimento agitado. Bandeiras maiores são desfraldadas. Poeira e papéis soltos são levantados e carregados pelo vento.	O cabelo é completamente despenteado.
5	Vento regular	29 - 39 (42 - 56)	8,0 - 10,7 (11,6-15,5)	Ramos maiores e árvores pequenas oscilam.	A força do vento é sentida no corpo. Perturbação leve ao caminhar. Perigo de tropeçar ao entrar em zona com rajadas fortes (por exemplo, próximo a edifícios altos).
6	Vento forte	39 - 50 (56 - 72)	10,7 - 13,8 (15,5-20,0)	Galhos e arbustos grandes em movimento.	Dificuldade para caminhar firmemente e usar guarda-chuva. Ruído do vento nos ouvidos é desagradável. Ouve-se o assobio de fios telegráficos e telefônicos

<sup>(1)</sup> Entre parênteses: velocidade de rajada máxima sobre 3 segundos



**Tabela 1 (cont.)**  
**ESCALA BEAUFORT**

Número de Beaufort	Designação	$\bar{V}_{10\text{min}}(10\text{m})^{(1)}$		EFEITOS EM	
		km/h	m/s	NATUREZA E CONSTRUÇÕES	PESSOAS
7	Ventania fraca	50 - 62 (72 - 89)	13,8 - 17,1 (20,0 - 24,8)	Árvores inteiras em movimento. Galhos fortes são flexionados. Danos a coberturas mal construídas.	Diffícil caminhar contra o vento. O vento é ouvido em edifícios. Ouve-se suave gemido do vento.
8	Ventania moderada	62 - 75 (89 - 108)	17,1 - 20,7 (24,8 - 30,0)	Galhos finos e árvores fracas quebram-se. Troncos de árvores esbeltas oscilam. Coberturas leves são danificadas, principalmente na cumeeira e beirais. Desabamento de muros muito altos (2,5 - 3m) e de tapumes comuns.	Geralmente é impossível caminhar. Diffícil equilibrar-se com rajadas fortes. Aumenta o gemido do vento.
9	Ventania forte	75 - 88 (108 - 128)	20,7 - 24,5 (30,0 - 35,5)	Galhos grossos e arbustos quebram-se. Árvores esbeltas podem ser derrubadas. Telhas e telhados leves arrancados; topos de chaminés de alvenaria danificados; coberturas isoladas (postos de serviço, abrigos de ônibus etc.) ou com poucas paredes na periferia sofrem danos que podem chegar ao tombamento, inclusive com seus suportes; ruptura de vidraças; arrancamento de esquadrias; casas simples (de madeira ou alvenaria pobre) destruídas. Desabamento de muros altos (2 - 2,5m). Painéis de propaganda e de sinalização são danificados. Objetos leves são deslocados. Telhas leves, depois de arrancadas, são lançadas a distância. Caminhões-baús vazios podem tombar. Queda de torres de rádio e torres repetidoras de televisão. Torres de linhas de transmissão podem ser danificadas. Postes de iluminação e de telefonia celular são inclinados ou tombados. Antenas parabólicas são danificadas.	Pessoas podem ser lançadas ao solo pelas rajadas.

<sup>(1)</sup> Entre parênteses: velocidade de rajada máxima sobre 3 segundos

**Tabela 1 (cont.)**  
**ESCALA BEAUFORT**

Número de Beaufort	Designação	$\bar{V}_{10min}(10m)^{(1)}$		EFEITOS EM	
		km/h	m/s	NATUREZA E CONSTRUÇÕES	PESSOAS
10	Vendaval	88 - 102 (128 - 148)	24,5 - 28,4 (35,5- 41,2)	<p>Árvores são quebradas ou arrancadas em grande número. Danos a plantações e bosques.</p> <p>Danos estruturais consideráveis: forros, telhas e telhados pesados são arrancados; danos a paredes de alvenaria; casas de alvenaria podem ser parcial ou totalmente destruídas; hangares são destelhados e mesmo arrancados de suas bases; tombamento de silos metálicos; aviões pequenos são deslocados e virados.</p> <p>Destruição ou arrancamento de revestimentos de fachadas, esquadrias e vidraças.</p> <p>Tombamento de jamantas com carga leve. Tombamento de vagões e locomotivas em linhas de 1m.</p> <p>Desabamento de muros comuns (1,8m).</p> <p>Torres de linhas de transmissão danificadas ou arrancadas de suas bases.</p> <p>Postes tombados.</p>	Pessoas podem ser arrastadas.
11	Tempestade	102 - 120 (148 - 174)	28,4 - 33,3 (41,2- 48,3)	<p>Danos generalizados e severos, tanto em estruturas como em plantações e bosques, que sofrem grandes devastações.</p> <p>Construções de alvenaria podem ser totalmente destruídas, bem como pavilhões industriais e afins. Mesmo construções com boa estrutura em concreto armado ou aço sofrem danos consideráveis em paredes e telhados.</p>	
12	Furacão, tufão	> 120 (> 174)	> 33,3 (> 48,3)	Extremamente violento e devastador, com danos ainda mais importantes que os ocasionados por uma tempestade.	

<sup>(1)</sup> Entre parênteses: velocidade de rajada máxima sobre 3 segundos



# Tornados e a escala de Fujita

## 1. TORNADOS

### 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

a) Tornado vem a ser um vórtice no interior do qual o ar move-se circularmente, atingindo altas velocidades em sua região central. Um modelo matemático que descreve muito bem o fenômeno (e que permite o cálculo das forças nele geradas) é o do *vórtice combinado de Rankine*: a parte central, o *núcleo*, comporta-se como um *vórtice forçado*, com a velocidade tangencial proporcional à distância ao centro do tornado (*eixo*). Fora deste núcleo o comportamento é o de um *vórtice livre*, com a velocidade inversamente proporcional à distância ao eixo. Entre estas duas regiões há uma zona de transição, que não cabe aqui comentar com mais detalhes.

b) As normas estruturais não consideram no cálculo das estruturas a resistência a tornados violentos. É uma questão econômica: isto tornaria as estruturas muito caras, não compensando as perdas que ocorrem na relativamente pequena região atingida por um tornado. Estruturas são calculadas para resistir a tornados violentos somente quando uma falha da estrutura pode ter conseqüências muito graves, como é o caso das centrais nucleares.

c) Tornados situados no topo da violência (Classe F-5 da escala Fujita) são muito raros. Geralmente as velocidades máximas do vento situam-se entre 33m/s (119km/h) e 100m/s (360km/h). Raramente a

velocidade é superior a 120m/s (432km/h). Nos Estados Unidos da América,<sup>3</sup> um levantamento de tornados lá ocorridos entre 1916 e 1977, com um total de 24.148 tornados estudados, mostrou que tornados da Classe F-5 são muito raros, constituindo apenas 0,5% do total. Os mais comuns são os da Classe F-1 (34,5%), seguindo-se, em ordem decrescente, os de Classe F-2 (28,9%), F-0 (22,8%), F-3 (10,9%) e F-4 (2,8%). É neste país que ocorre o maior número de tornados, entre 700 e 1000 por ano, sendo Oklahoma o Estado campeão de ocorrências, tanto em número como em violência.

d) As cargas devidas a tornados têm sua origem em dois fenômenos distintos mas correlacionados: vento e variação na pressão atmosférica. Estes dois fenômenos interagem com as construções e geram forças através de três mecanismos:

- 1 - forças devidas ao ar em movimento (vento);
- 2 - forças devidas a grandes alterações da pressão atmosférica na parte central do tornado, principalmente em seu núcleo;
- 3 - forças de impacto de projéteis gerados pelas duas forças anteriores

## 1.2. FORÇAS DEVIDAS AO AR EM MOVIMENTO

a) O movimento do ar em um tornado pode ser descrito em termos de um vetor velocidade. O cálculo das forças geradas por este vetor considera sua componente horizontal como sendo a causadora das pressões e respectivas forças sobre os objetos imersos no tornado.

Por sua vez, a velocidade horizontal pode ser decomposta em três componentes:

- *velocidade de translação*,  $V_{tr}$ : é a velocidade de deslocamento do tornado como um todo;
- *velocidade tangencial*,  $V_{ta}$ : é a componente tangente ao movimento circular;
- *velocidade radial*,  $V_r$ : é a componente segundo o raio do movimento circular.

Nos estudos matemáticos e para o cálculo dos esforços admite-se  $V_{tr}$  uniforme em todo o tornado. Quando o tornado estaciona em um local,  $V_{tr} = 0$ .

Ainda é conceituada a *velocidade rotacional*,  $V_{ro}$ , que vem a ser a soma (composição) vetorial de  $V_r$  e  $V_{ta}$ :

$$V_{ro} = \sqrt{V_r^2 + V_{ta}^2} \quad (1)$$

Compoundo-se vetorialmente  $V_{ro}$  e  $V_{tr}$  obtém-se a *velocidade horizon-*

tal,  $V_h$ . É esta velocidade que origina as pressões que vão atuar sobre os objetos expostos:

$$p = (1/2) \rho V_h^2 \quad (2)$$

sendo  $\rho$  a massa específica do ar.

A velocidade horizontal será máxima ( $V_{max}$ ), em um certo ponto, quando as velocidades de translação e rotacional forem paralelas. E é este o valor que interessa para os cálculos estruturais. A pressão do vento é obtida pela *mesma expressão* utilizada para outros tipos de vento, e que é a seguinte:

$$p_{max} = (1/2) \rho V_{max}^2 \quad (3)$$

b) As pressões causadas pela velocidade horizontal originam forças sobre os objetos imersos em um tornado (construções, árvores, veículos, pessoas, animais etc), forças estas que podem causar deslocamentos, danos parciais e destruições de um modo análogo aos observados em outros tipos de vento, tais como ciclones tropicais, ciclones extratropicais, tormentas elétricas (temporais) etc.

### 1.3. FORÇAS DEVIDAS A ALTERAÇÕES NA PRESSÃO DINÂMICA

O movimento circulatório do ar no tornado, caracterizado pela velocidade tangencial  $V_{ta}$ , origina alterações na pressão atmosférica, de acordo com o teorema de Bernoulli: quanto maior a velocidade, menor a pressão. Ou seja, em relação à pressão atmosférica reinante fora do tornado (pressão ambiente) aparece uma *sucção*. Esta sucção atinge seus maiores valores no núcleo do tornado, com um máximo em seu eixo. Fora do núcleo esta sucção vai diminuindo, de modo que a pressão vai tendendo para a pressão ambiente.

Com o deslocamento do tornado, sucessivos pontos vão sendo atingidos pelas baixas pressões (altas sucções) do núcleo e suas adjacências. Para uma velocidade de translação  $V_{tr}$  não muito pequena o aparecimento das baixas pressões em um certo ponto é rápido. Em uma construção que esteja bem fechada não haverá tempo para se estabelecer equilíbrio entre a pressão existente em seu interior (pressão ambiente) e a pressão exterior muito menor da zona central do tornado. Esta diferença de pressões entre o interior e exterior da construção dá origem a forças dirigidas de dentro para fora, forças essas que destruirão, conforme seu valor, janelas, portas, paredes, telhados e, finalmente, toda a construção, como que em uma explosão.

Quando a construção é completamente aberta, há um rápido equilíbrio entre pressões internas e externas, e a carga correspondente é praticamente nula.

Nos casos intermediários, a permeabilidade maior ou menor das paredes e cobertura da construção leva a um equilíbrio entre estas forças ao fim de um certo tempo. Os danos (por diferença de pressão interna e externa) dependerão, se aparecerem, da velocidade de translação do tornado, de sua velocidade tangencial e da velocidade com que pode ser estabelecido esse equilíbrio entre pressões no interior e no exterior da construção.

#### 1.4. FORÇAS DE IMPACTO

O tornado, dependendo de sua violência, pode levantar do terreno objetos de diversos tamanhos e acelerá-los, fazendo com que atinjam outros objetos, pessoas e animais com uma boa velocidade. Eles funcionam como verdadeiros projéteis. Os efeitos dos impactos dependerão das formas e dimensões desses projéteis, de suas superfícies, de como estão orientados ao serem levantados e acelerados pelo vento (isto é, de suas características aerodinâmicas) e de suas massas. De acordo com essas características, adquirirão distintas velocidades na ocasião do impacto, rompendo janelas, portas, paredes, telhados, descascando árvores, ferindo pessoas e animais.

Não só objetos pequenos mas também de maior peso, como galhos de árvores, árvores, bicicletas, motocicletas, automóveis, pessoas e animais podem ser conduzidos pelo ar em tornados de grande violência.

Estudos matemáticos indicam que esses projéteis podem atingir velocidades de até, aproximadamente, 90m/s (324km/h !). Pela escala Fujita, é na Classe F-2 (182 - 253 km/h) dessa escala que começa a ação dos projéteis, constituídos, nesta Classe, por objetos pequenos. Ou seja, este fenômeno não aparece em tornados de pequena violência. Por outro lado, a escala Beaufort, em suas Classes mais altas, inclui esse fenômeno.

Também por estudos matemáticos, considerando as forças de arrasto e de sustentação (necessárias para originar um projétil), Fujita concluiu que automóveis podem ser movidos por ventos de 140km/h (45m/s). Chalés e casa móveis (*mobile homes*) são deslocadas por ventos de 116km/h (37m/s)<sup>2</sup>. Também estes acidentes estão contemplados na escala Beaufort.

#### 1.5. CORRENTES ASCENDENTES

No núcleo do tornado há correntes ascendentes de ar, as quais, nos tornados mais violentos, colaboram para a elevação de escombros e

mesmo seres vivos. A velocidade é de cerca de metade da velocidade tangencial. Não encontramos referências para a determinação de sua ação junto ao terreno, onde estão os elementos que são elevados pelas forças de sustentação. Estas forças são calculadas considerando a componente horizontal da velocidade do vento.

## 2. A escala Fujita

### 2.1. INTRODUÇÃO

Durante muito tempo não foi possível medir a velocidade do ar em seu giro no interior de um tornado. Isto só foi possível nos últimos anos, muito depois de Fujita ter, em 1971, apresentado sua escala, que relaciona a intensidade dos danos com diversos graus de intensidade (Classes) do vento.

As velocidades máximas da componente horizontal do vento eram estimadas por duas vias:

1 – Via estrutural: pelos danos, pelos deslocamentos de objetos e pela força de impacto dos projéteis.

2 – Via meteorológica: por registro de anemômetros, pela forma das nuvens no funil do tornado e por análise fotogramétrica.

### 2.2. DETERMINAÇÃO DE VELOCIDADES VIA ESTRUTURAL

a) Para comentar a via estrutural, vamos nos servir do que escreveram Simiu e Scanlan (Ref.4, p.127):

b) “Possíveis erros na apreciação das intensidades de tornados na base de danos observados: a razão para a ocorrência de tais erros é que as máximas velocidades de vento em tornados na prática não são medidas, mas inferidas, grandemente na base de juízo profissional, da observação de danos a construções, a painéis de propaganda e assim por diante”.

Este é um grande problema: a determinação correta da velocidade máxima em um tornado. Talvez a razão indicada por Simiu e Scanlan explique por que a escala Fujita apresenta Classes de âmbito tão vasto, com as forças, dentro de uma mesma Classe, podendo variar na razão de um para dois; isto é, tanto se poderá dizer, dada a Classe, que a força do vento é de, digamos, 1.000 quilos, ou então, de acordo com as conveniências, 2.000 quilos! A escala Beaufort não apresenta este inconveniente, pois as Classes indicam uma variação de vento muito menor; não se pode jogar tanto com os valores das forças.



b) Scanlan e Simiu<sup>4</sup> comentam que Twisdale (1978 e 1983) já sugerira reduzir os valores das velocidades das Classes da Escala Fujita em cerca de 5% para F-1, crescendo até 20% para os tornados mais violentos. Estes mesmos autores julgam esta sugestão uma mera tentativa, ao menos em certos casos. Mas acrescentam: “por outro lado, deve ser indicado que as estimativas de Fujita também são tentativas”.

### 2.3. DETERMINAÇÃO DE VELOCIDADES VIA METEOROLÓGICA

a) Já vimos que o principal modo de definir as velocidades dos tornados é por meio dos danos causados. Medidas de velocidades máximas em tornados, feitas a partir de filmes e, mais recentemente, com radar Doppler, confirmam o exagero de estimativas anteriores, principalmente nos tornados mais violentos.

Rádios sondagens não são muito indicadas para determinar velocidades muito próximas ao terreno, principalmente para a parte central (núcleo e vizinhanças) de um tornado, de dimensões relativamente pequenas e localização aleatória.

b) Informações de observatórios meteorológicos referem-se ao *local* em que as medidas foram feitas. Extrapolações são incertas e, portanto, perigosas. Temos exemplos que mostram que a 150m do anemômetro a velocidade do vento estava a cerca de 50% acima da velocidade indicada pelo anemômetro. Ou seja, para esse aumento de velocidade (1,5), a força do vento foi mais que dobrada ( $1,5^2=2,25$ ).

c) Para confirmar a incerteza existente no que diz respeito às velocidades do vento em tornados, Van Tassel (conforme citado na Ref.3, p.175), examinando marcas circulares ou cicloidais deixadas no terreno por tornados, chegou a uma velocidade máxima de 780km/h (250m/s). É que Van Tassel baseou-se na hipótese de que as marcas foram deixadas por um único objeto que girava em torno do centro do tornado. Fujita verificou que as marcas cicloidais eram geradas por vários vórtices pequenos, que ele chamou de *vórtices de sucção*. Com este novo conceito, Fujita verificou que a velocidade indicada por Van Tassel baixava para cerca de 290km/h (93m/s). Isto é, uma diferença que mostra o quanto havia (e ainda há, em menor escala) de incerteza nas velocidades estimadas pela escala Fujita. A razão entre as velocidades é de 2,69 e a de forças é de  $(2,69)^2 = 7,23!$

O mesmo Fujita, o autor da escala Fujita, comenta que, inicialmente, pensava-se que a máxima velocidade do vento em um tornado poderia até exceder a velocidade do som na atmosfera. Tais estimati-

vas diz Fujita em 1976, “foram recentemente reduzidas para cerca de 135m/s” (486km/h). Isto é, segundo o próprio autor da escala, as velocidades horizontais máximas de ventos em tornados não chegam a 500km/h.<sup>2</sup> No Brasil, nem pensar em tais valores, que só aparecem nos Estados Unidos e Bangladesh. De Millo<sup>3</sup>, mais recentemente, em 1998, disse o seguinte: “O radar Doppler revelou que as mais altas velocidades nos tornados mais intensos são de quase 450km/h”. Isto é, ainda bem abaixo de 500km/h.

#### 2.4. ESCALAS BEAUFORT E FUJITA E A NORMA BRASILEIRA

a) A escala Beaufort adotada para efeitos do vento em terra foi definida a partir de seus efeitos sobre a vegetação e as edificações. Nada tem a ver diretamente com a escala marítima; leva o nome de Beaufort em homenagem ao almirante inglês que teve a idéia de fazer uma correlação entre a velocidade do vento e seus efeitos sobre o mar e navios.

A escala aplicada a elementos terrestres bem que poderia se chamar escala Beaufort-Simpson, pois foi George Simpson quem, em 1905, elaborou-a para uso em terra. De Beaufort ficou só a idéia original.

Os danos descritos na escala Beaufort permitem avaliar a velocidade horizontal do vento. Inclui também os danos causados pela velocidade horizontal máxima de um tornado. Isto pode ser constatado comparando-se a descrição dos danos correspondentes às últimas Classes da escala Beaufort com os descritos nas Classes iniciais da escala Fujita. Uma ou outra escala conduzem à mesma velocidade. A escala Beaufort tem a vantagem de ter âmbitos de variação da velocidade menores em cada Classe, dando uma precisão muito maior às estimativas das velocidades do vento. Naturalmente, a escala Beaufort não inclui os efeitos devidos à variação da pressão atmosférica dentro e fora do tornado, como vimos em 1.3. Certos efeitos de torção aparecem só em tornados. Porém também encontramos efeitos de torção em outros tipos de vento, pois a torção pode ser causada pela ação de uma rajada violenta que incide assimetricamente em uma árvore, torre de linha de transmissão etc. Do mesmo modo, galhos quebrados, mesmo que todos os existentes em parte de uma ou de muitas árvores, não indicam necessariamente a presença de um tornado; é também um acidente típico tanto de ciclones tropicais e extra tropicais como de tormentas elétricas (temporais). Em nossa vida profissional já examinamos, ao vivo, tal tipo de dano.

b) Por outro lado, furacões são muitas vezes classificados pela escala Fujita, o que comprova o que dissemos sobre a intercambialidade das duas escalas, para velocidades do vento comuns às duas. Veja-se, por

exemplo, a Ref.2, na qual Fujita trata dos furacões Camille (em Jackson, Mississippi, agosto de 1969) e Celia (em Corpus Christi, Texas, agosto de 1970). No primeiro o máximo valor foi F-2,5 e no segundo, F-2,5 antes da passagem do núcleo do furacão pela estação meteorológica, e F-2,3 após a passagem.

Observe-se que, para sanar o inconveniente da exagerada gama de velocidades em cada Classe, foram usados valores fracionários da escala, obtidos mediante uma expressão matemática, função da velocidade medida.

c) A Norma Brasileira e a literatura especializada, quando se referem a “ventos bem comportados”, estão tratando da variação da velocidade média do vento com a altura acima do terreno. A Norma Brasileira (e outras) não está tratando de acidentes nem da influência do tipo de vento sobre eles. De modo que não se pode fazer referência ao termo “ventos bem comportados” da Norma para dizer (erroneamente) que os acidentes descritos pela escala Beaufort só se aplicam a esses ventos. Nos ventos “bem comportados” o perfil vertical de velocidades segue, com boa aproximação, uma lei potencial. Já nas tormentas elétricas (temporais) e nos tornados a velocidade é praticamente constante ao longo da altura.

d) A escala Fujita apresenta, em cada Classe, um âmbito de velocidades muito grande. Isto se deve, cremos, á imprecisão existente na determinação das velocidades máximas em um tornado. Não teria sentido apresentar Classes com menores variação de velocidade em cada uma delas (aumentando, evidentemente, o número de Classes). Com essa característica da escala Fujita, a determinação da velocidade do vento em um certo acidente torna-se bastante imprecisa. Vejamos, para exemplo, a Classe F-2. Ela indica velocidades limites de 50,3 e 70m/s (181 e 252 km/h). A razão entre as velocidades extremas nesta Classe será de  $(252/181)=1,39$ . Como as pressões são proporcionais ao quadrado das velocidades, as pressões e as respectivas forças atuantes sobre um corpo estarão na razão  $(252/181)^2 = 1,94$ . Isto é, se considerarmos as forças correspondentes aos dois extremos dessa Classe, no limite superior teremos uma força que é 94% maior que a força no limite inferior; a força quase que *dobrou*. E, para ambos os casos, estamos na mesma Classe F-2. Como tirar conclusões precisas sobre um acidente com tal imprecisão? O vento era de 181km/h ou de 252km/h, ou que valor intermediário?

Na extensa gama de velocidades dentro de uma mesma Classe da escala Fujita a incerteza pode nos levar (no exemplo da F-2 acima trata-

do), por exemplo, de uma força atuante em uma construção de uma tonelada para uma força de quase duas toneladas !

Evidentemente, as Classes da escala Beaufort também conduzem a uma imprecisão, mas muito menor. Por exemplo, a Classe B-10 (35,6 - 41,1m/s, ou 128-148km/h) nos leva a  $(148/128)^2 = 1,34$ . Isto é, entre os extremos desta Classe há um aumento de carga de 34 % (e não de 94 %, do caso do tornado acima comentado).

E, para a Classe B-11 (41,1 - 48,3m/s ou 148-174km/h) teremos  $(174/148)^2 = 1,38$ , com um aumento de carga de 38 % entre os valores extremos de velocidade.

e) Em nossa vida profissional tivemos várias oportunidades de estimar a velocidade do vento a partir dos danos por ele causados em árvores, postes e construções, e verificando em que Classe da escala Beaufort esses danos se encaixavam. Esses resultados, comparados com medições diretas da velocidade do vento ou com resultados de estudos probabilísticos (os quais levaram à elaboração da carta de isopleias da Norma Brasileira NBR-6123), foram satisfatórios, com uma diferença entre os dois processos sempre inferior a 10%. E isto mesmo em acidentes provocados por tornados.

## 2.5. Escala Fujita (ou Fujita-Pearson)

**F-0** (64 a 116km/h – 17,8 a 32,2m/s). Danos a chaminés, antenas de rádio e de televisão. Galhos de árvores são quebrados. Árvores com raízes pouco profundas e com troncos ocos são derrubadas. Danos em painéis de propaganda e similares.

**F-1** (117 a 181km/h – 32,5 a 50,3m/s). Vidros de janelas são rompidos. Telhas são arrancadas. Árvores são arrancadas com raiz; outras são quebradas. Automóveis em movimento perdem a direção. Casas móveis são deslocadas ou tombadas.

**F-2** (182 a 253km/h – 50,6 a 70,3m/s). Telhados de casa são arrancados, ficando de pé só as paredes mais fortes. Construções com estruturas fracas (construções provisórias, de madeira, construções rurais tais como galpões, silos, barracões) são destruídas. Estruturas de blocos e paredes são seriamente danificadas. Casas móveis são destruídas. Árvores grandes são quebradas ou arrancadas com raízes. Automóveis são lançados fora das estradas. Vagões ferroviários sofrem descarrilamento. Caminhões grandes são tombados. Objetos pequenos atuam como projéteis.





*Fotolitos*  
Cathedral Digital  
Rua Luzitana, 45A - Porto Alegre, RS  
Fone/Fax (51) 3343-4141

*Impressão*  
Gráfica da UFRGS  
Rua Ramiro Barcelos, 2705 - Porto Alegre, RS  
Fone (51) 3316-5069

*Acidentes causados pelo vento*, além de descrever um grande número destes acidentes, trata de suas causas aerodinâmicas e estruturais. Construções leves e de grandes vãos, tais como hangares, pavilhões de feiras e de exposições, pavilhões industriais, armazéns portuários, ginásios cobertos, cinemas, pavilhões para fins agrícolas e pecuários, são as que mais sofrem os efeitos dos ventos fortes. Também é relativamente grande o número de torres de transmissão de energia elétrica, de microondas e de telefonia celular que são danificadas. Um único desses acidentes, isoladamente, não representa muito no conjunto da economia. Mas, somados, os prejuízos causados à economia das nações por todos esses acidentes representam um valor apreciável: aproximadamente a metade dos prejuízos oriundos de todos os fenômenos da natureza, tais como erupções vulcânicas, terremotos, inundações, incêndios etc.

Se essas construções fossem projetadas considerando as cargas do vento indicadas na Norma Brasileira NBR-6123 – *Forças devidas ao vento em construções* –, certamente o número de acidentes seria bem menor.

Além de exemplos de acidentes no exterior e em outros estados do País, ênfase especial é dada aos acidentes ocorridos no Rio Grande do Sul. São dadas indicações que, se seguidas, diminuirão o número de acidentes.

No apêndice I é mostrado como o efeito estufa poderá levar ao surgimento de furacões no Brasil em um futuro não muito distante.

No apêndice II é apresentada a escala Beaufort, que permite determinar a velocidade das rajadas a partir dos danos causados pelo vento.

No apêndice III é discutida a escala Fujita, na qual a velocidade dos ventos máximos em tornados é avaliada pelos danos. Faz-se uma comparação com a escala Beaufort, na gama de velocidades em que ambas podem ser aplicadas.



Dos prejuízos oriundos de fenômenos naturais (erupções vulcânicas, terremotos, inundações, incêndios, secas etc.), cerca da metade deve-se ao vento.

*Acidentes causados pelo vento* trata das causas dos acidentes, apresenta exemplos típicos e providências a tomar para evitá-los, indica como determinar a velocidade do vento a partir dos danos por ele causados e alerta para o provável surgimento de furacões no Brasil em futuro não muito distante.



Editora  
da Universidade

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

ISBN 85-7025-621-3



9 788570 256213