

JOAQUIM BLESSMANN

efeitos do vento em edificações

SÉRIE ENGENHARIA ESTRUTURAL **7**



EDIÇÕES URGs

**EFEITOS DO VENTO
EM EDIFICAÇÕES**

RESERVA TÉCNICA
Editora da UFRGS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Homero Só Jobim, Reitor

Mário Rigatto, Vice-Reitor

Ernesto Alfredo Preussler, Pró-Reitor de Extensão

Francisco Luís dos Santos Ferraz, Pró-Reitor de Planejamento

Gerhard Jacob, Pró-Reitor de Pesquisa e Pós-Graduação

Jorge Honório M. Britto, Pró-Reitor de Assistência à Comunidade Universitária

Luiz Carlos de Mesquita Rothmann, Pró-Reitor de Graduação

Manoel Marques Leite, Pró-Reitor de Administração

EDITORA DA URGS

Blasio H. Hickmann, Diretor

CONSELHO EDITORIAL

Ana Íris do Amaral

Blasio H. Hickmann

Flávio Loureiro Chaves

Francisco Riopardense de Macedo

Lothar Francisco Hessel

JOAQUIM BLESSMANN

- Engenheiro Civil
- Mestre e Doutor em Ciências pela Divisão de Engenharia Aeronáutica do Instituto Tecnológico da Aeronáutica
- Professor Adjunto da Escola de Engenharia da UFRGS
- Pesquisador-Titular do Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq)

efeitos do vento em edificações

SÉRIE ENGENHARIA ESTRUTURAL/7



editora da urgs
universidade federal do rio grande do sul
porto alegre / 1978

Direitos desta edição:
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Blessmann, Joaquim

Efeitos do vento em edificações. Porto Alegre, Ed. da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1978.

63p. 23cm.

CDU 624.042

CDD 624.175

Nº de registro: 862

Nº de obra: 319

Data: 25/11/2009

SUMÁRIO

- 1 – Introdução/9
- 2 – Meteorologia: estrutura do vento/11
 - 2.1 – Definições/11
 - 2.2 – Variação da velocidade média com a altura/12
 - 2.3 – Intensidade da turbulência/14
 - 2.4 – Escala longitudinal da turbulência/16
 - 2.5 – Correlação cruzada/17
 - 2.6 – Espectro de potência/17
 - 2.7 – Norma Brasileira/20
- 3 – Aerodinâmica: ação estática do vento/25
 - 3.1 – Coeficiente aerodinâmico/25
 - 3.2 – Influência das proporções e da forma da edificação/27
 - 3.3 – Zonas com sucções elevadas/29
 - 3.4 – Ações locais/33
 - 3.5 – Pressão interna/33
 - 3.6 – Interação/37
- 4 – Aerodinâmica: ação dinâmica do vento/41
 - 4.1 – Vórtices desprendidos da edificação/41
 - 4.2 – Efeitos de golpe (buffeting, martelamento)/42
 - 4.3 – Galope/43
 - 4.4 – Drapejamento (flutter clássico)/45
 - 4.5 – Energia contida nas rajadas de vento/45
- 5 – Pesquisas em túnel de vento/49
- 6 – Efeitos nocivos do vento/55
 - 6.1 – Danos a esquadrias, vidros, paredes e rebocos/55
 - 6.2 – Danos a vidros, paredes e painéis de revestimento/55
 - 6.3 – Conforto dos usuários/58
 - 6.4 – Conforto dos transeuntes/59
- Referências Bibliográficas/61

1 – INTRODUÇÃO

a) “Na noite de 29 de dezembro de 1879 um trem de passageiros composto de seis carros, uma locomotiva e um vagão de bagagem precipitou-se, como um foguete flamejante, da ponte Tay, na Escócia, mergulhando nas águas turbulentas situadas a 27 metros abaixo. O vento alcançara uma velocidade de 115 a 130km/h e aparentemente derrubara 13 vãos em treliça, com 75 metros cada um. Nenhuma pessoa sobreviveu e ninguém sabe exatamente o que aconteceu.”

Assim descreve Steinman⁴⁰ este impressionante acidente, no qual pereceram os 90 passageiros e toda a tripulação do trem. A ponte fora entregue ao tráfego em 1877.

b) Este acidente, bem como diversos outros ocorridos em pontes metálicas construídas no século passado — muitas delas tiveram apenas alguns meses ou poucos anos de vida útil antes de serem total ou parcialmente destruídas pelo vento — fez com que fosse despertada a atenção de engenheiros e pesquisadores para a importância da ação do vento sobre construções civis.

c) Nos últimos anos o interesse neste assunto foi ainda aumentado pelos seguintes fatores:

- o avançado grau de refinamento dos projetos estruturais conseguido com o emprego de computadores, torna necessário um conhecimento mais preciso das cargas e dos esforços que agem sobre as estruturas;
- o emprego de materiais de alta resistência conduz a estruturas mais leves e mais esbeltas, nas quais a ação do vento passa a ter uma importância relativa maior, podendo inclusive surgir efeitos dinâmicos de importância, além dos efeitos estáticos;
- as vedações de muitas estruturas são constituídas por painéis leves, susceptíveis de serem danificados ou arrancados por

fortes e breves rajadas de vento, principalmente em partes da edificação sujeitas a fortes sucções.

d) O estudo racional da ação do vento nas edificações deve levar em conta os dois aspectos do problema: o meteorológico e o aerodinâmico.

Em seu aspecto meteorológico devem ser conhecidas as velocidades máximas do vento a esperar e a chamada *estrutura* do vento. Inicialmente era comum tomar para velocidade máxima do vento simplesmente a máxima velocidade de rajada existente nos registros da estação meteorológica mais próxima da edificação em estudo. Esta velocidade era usada indistintamente tanto para a determinação dos esforços do vento na estrutura principal como na secundária e nos elementos de vedação (paredes e painéis de revestimento, coberturas, vidros, etc). Um melhoramento a este processo é devido a Sherlock³⁸ que, em 1947, sugeriu o uso de uma velocidade média juntamente com *fatores de rajada* que permitiam considerar o efeito adicional das rajadas. O processo atualmente usado, com determinação das velocidades máximas do vento por via probabilística, entretanto, já fora sugerido por Wing em 1940².

e) A aplicação da Aerodinâmica à construção civil tem permitido chegar a formas estruturais mais econômicas. Assim, por exemplo, a forma cilíndrica dos arcos e montantes da ponte de Askeroefjord, Suécia, a forma levemente cônica das torres em treliça de Cadiz, Espanha, a forma das pontes de Tancarville, França, e Severn, Grã-Bretanha, permitiram uma redução apreciável dos esforços estáticos do vento.

Do mesmo modo o comportamento dinâmico de estruturas tem sido estudado por via teórica e/ou experimental, tanto nas edificações como em seus modelos. Como exemplos de pesquisas desenvolvidas no Brasil citamos o estudo do comportamento dinâmico das torres de microondas em concreto armado da Telecomunicações do Rio de Janeiro S.A. — TELERJ (Ex Companhia Telefônica Brasileira, CTB), situadas em Teresópolis, RJ, e Rio de Janeiro, RJ (Central Rádio Rio — Rio Comprido)¹¹; do mastro metálico para a Bandeira Nacional, em Brasília¹⁰; dos pilares do Viaduto Nº 13, Ferrovia L-35, Roca Sales — Passo Fundo, RS, com 134 metros de altura; da torre hiperbólica de refrigeração para a Usina Elétrica Presidente Médici, Candiota, RS, com 133 metros de altura.

2 – METEOROLOGIA: ESTRUTURA DO VENTO

2.1 – Definições

a) O termo *vento natural* tem sido usado na literatura especializada sempre que se queira evitar confusão entre o vento atmosférico e o que é simulado em um túnel de vento. Em linhas gerais podemos dizer que o vento natural consiste de um fluxo de ar médio ao qual se superpõem flutuações do fluxo. Estas flutuações são conhecidas pelo nome de *rajadas* ou *turbulência*.

O estudo completo da turbulência, partindo das clássicas equações de Navier-Stokes, não é possível nem com os maiores computadores atualmente em uso.¹⁴ O exame da estrutura dos ventos naturais mostra o caráter aleatório da turbulência atmosférica. Assim sendo, a melhor maneira, atualmente, de estudar suas características será tratando as rajadas de vento como um fenômeno aleatório. Mais particularmente, a experiência mostra que, para fins aeronáuticos e de engenharia civil, pode-se considerar o vento natural como um fenômeno aleatório estacionário ergódico. A turbulência é analisada pelos métodos originalmente desenvolvidos pelos engenheiros de comunicação e de controle para a análise de sinais elétricos aleatórios, sendo clássico no tema o trabalho de Rice.³⁶

b) Em ventos fortes, que, exceto para certos problemas de efeitos dinâmicos, são os de maior interesse para a engenharia estrutural, a agitação mecânica — causada pela orografia do terreno, pelos obstáculos naturais e artificiais e pela rugosidade junto ao solo — é de tal monta que os gradientes térmicos são rapidamente desfeitos. Nestas condições as flutuações do fluxo são quase integralmente causadas por agitação mecânica do ar, formando-se um grande número de *turbilhões* ou *redemoinhos*. Estamos em condições de estabilidade neutra: não

há gradientes térmicos dando origem a processos de convecção. Os turbilhões, superpostos ao vento médio, originam as rajadas de vento, que ocorrem em uma seqüência aleatória de freqüências e intensidades. As mais fortes são de pequena duração (fração de segundo) e atuam sobre uma pequena região. Correspondem à chegada simultânea ao ponto em estudo de turbilhões de diferentes dimensões e em condições tais que seus efeitos se somam.

c) Pelo tratamento estatístico, no interior da camada limite atmosférica, a velocidade do vento, medida em um ponto fixo em relação à terra, é constituída de uma *velocidade média* e de um componente de flutuação aleatória, denominada *rajada* ou *turbulência*. Para o projeto estrutural é de importância o conhecimento do perfil de velocidades médias e das propriedades da turbulência. O conhecimento destes itens permite determinar a ação estática e a ação dinâmica do vento.

Nos itens a seguir faremos uma breve revisão dos parâmetros de maior interesse para o projeto estrutural.

2.2 – Variação da velocidade média com a altura

a) Uma boa concordância com os dados experimentais pode ser obtida por uma simples lei potencial – no sentido de lei de potência – do tipo

$$\bar{V}(x_3)/\bar{V}(x'_3) = (x_3/x'_3)^\alpha$$

que relaciona as velocidades médias em duas alturas quaisquer dentro da camada limite atmosférica, x_3 e x'_3 .

Na prática, fixa-se uma das alturas em um valor padrão. Este costuma ser ou a altura em que se atinge a *velocidade gradiente* (\bar{V}_g) – denominada *altura gradiente*: é a altura da camada limite atmosférica (δ) – conforme sugestão de Davenport,¹⁶ ou a altura de 10 metros. Teremos, respectivamente,

$$\bar{V}(x_3)/\bar{V}_g = (x_3/\delta)^\alpha$$

$$\bar{V}(x_3)/\bar{V}(10) = (x_3/10)^\alpha.$$

A lei potencial aplica-se bem em condições de estabilidade neutra, condições reinantes em ventos fortes sem processos de convecção. Não se aplica aos casos de excitação dinâmica por resso-

nância em ventos de pequena velocidade. Outra limitação: o terreno deve ser ao menos aproximadamente plano.

b) O perfil da velocidade média é função dos parâmetros α e δ , que dependem da rugosidade do terreno. Do estudo de mais de uma centena de medidas feitas em diversos tipos de terrenos, Davenport sugeriu três casos típicos de terrenos:¹⁷

Terreno tipo A — Terreno aberto com muito pouco obstáculos (campo aberto ou fazendas com poucas árvores, cercas vivas e outros obstáculos, etc; pradarias, tundras, costas e ilhas baixas de lagos internos, desertos, etc).

Terreno tipo B — Terreno uniformemente coberto com obstáculos de 10 a 15 metros de altura (subúrbios residenciais, cidades pequenas; matos e capoeiras; pequenos campos com bosques, árvores e cercas vivas).

Terreno tipo C — Terreno com obstáculos grandes e irregulares (centros de grandes cidades; zonas muito irregulares com muitos quebra-ventos de árvores altas).

A Fig. 1 apresenta os perfis de velocidades médias para os três tipos de terreno propostos por Davenport, bem como os respectivos valores de α e δ .

c) A edição preliminar da monografia Planning and design of tall buildings apresenta os valores indicados na Tabela 1.³⁵

TABELA 1 — Propriedades típicas dos perfis de velocidades médias na camada limite atmosférica

Terreno	Altura gradiente (m)	Expoente α
Mar agitado	250	0,12
Campo aberto, etc.	300	0,16
Subúrbios, matos, etc.	400	0,28
Centros de grandes cidades, etc.	500	0,40

d) Em casos de extrema instabilidade (como nas tempestades locais violentas, denominadas de temporais), devido à intensa troca de quantidade de movimento, a velocidade média pouco aumento sofre com a altura acima do terreno. Barkat Ali¹ mediu $\alpha = 0,02$, enquanto que Sutton sugere $\alpha = 0,01$.¹⁷

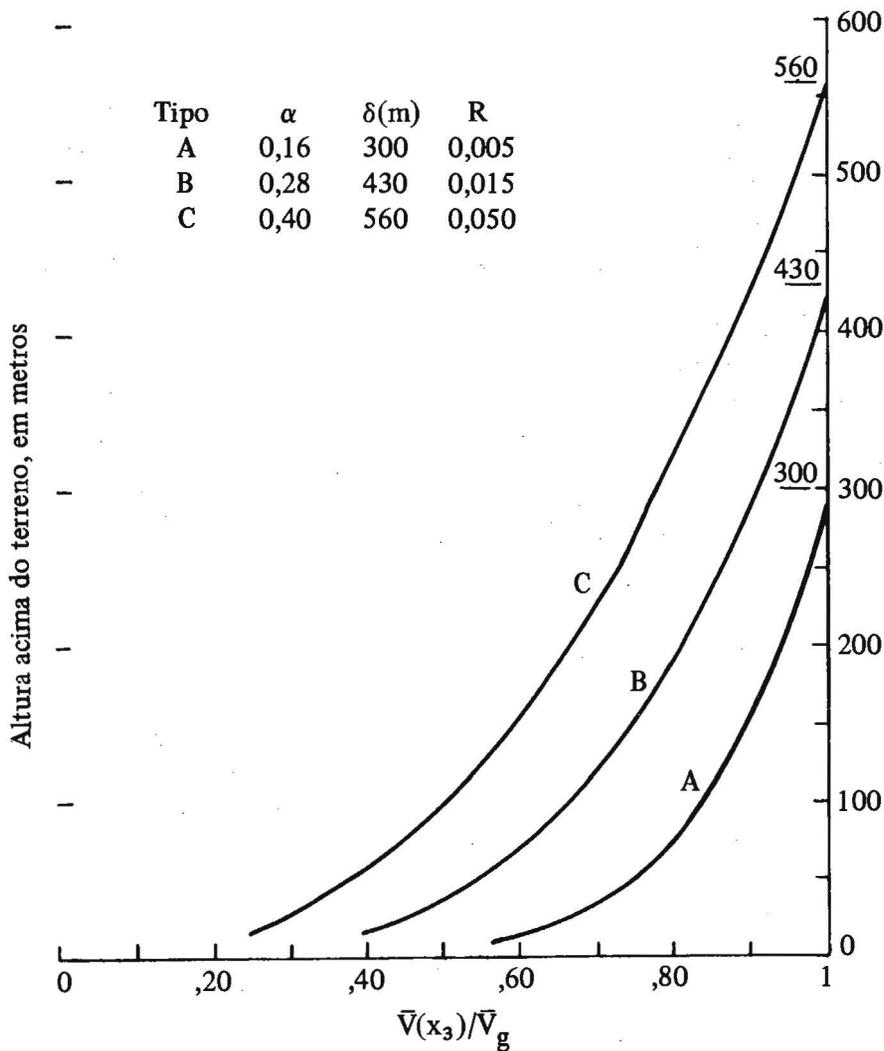


Fig. 1 – Perfis de velocidades médias para os três terrenos típicos, conforme Davenport

2.3 – Intensidade da turbulência

Vem a ser uma medida adimensional da energia total (cinética) contida nas rajadas. É definida pelo quociente entre o desvio padrão das flutuações e uma velocidade de referência. Esta tanto pode ser a velocidade média $\bar{V}(x_3)$ na altura x_3 em que se determinou o desvio

padrão – intensidade local – como a velocidade gradiente (\bar{V}_g) – intensidade normalizada. Das três componentes da turbulência, a mais importante é a intensidade (local ou normalizada) da componente longitudinal.

As curvas de variação com a altura da intensidade local da turbulência longitudinal, para os três terrenos típicos sugeridos por Davenport, estão dadas na Fig. 2. A intensidade normalizada da turbulência longitudinal corresponde ao topo de cada uma das curvas e vale 0,11.

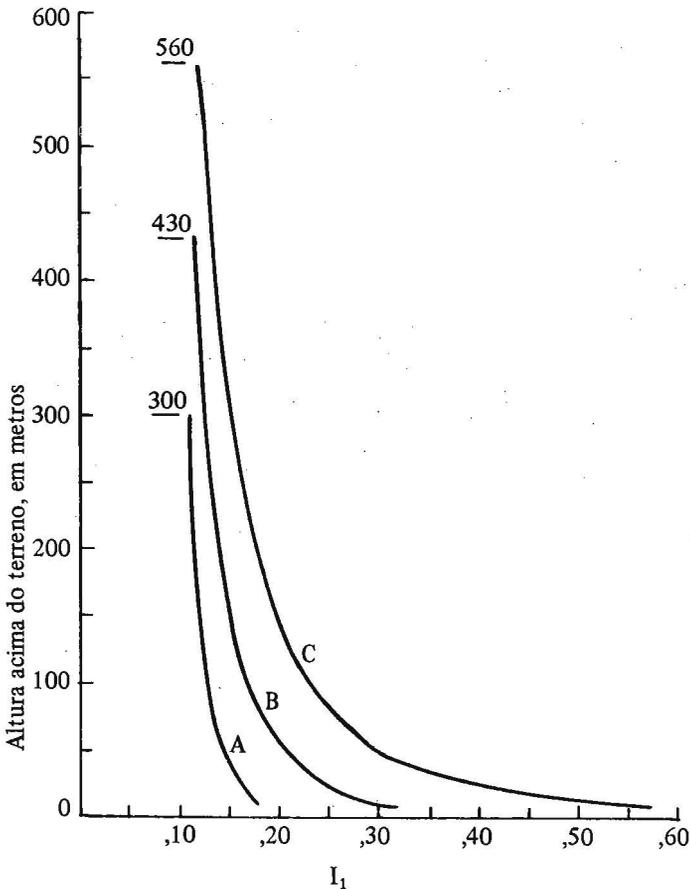


Fig. 2 – Intensidade local da turbulência longitudinal para os três terrenos típicos, conforme Davenport

2.4 – Escala longitudinal da turbulência

Constitui uma medida das dimensões médias dos maiores turbilhões. Uma definição mais precisa, matemática, está fora da finalidade deste trabalho.

A Fig. 3 apresenta as curvas de variação da escala longitudinal da turbulência com a altura para os três terrenos típicos de Davenport.

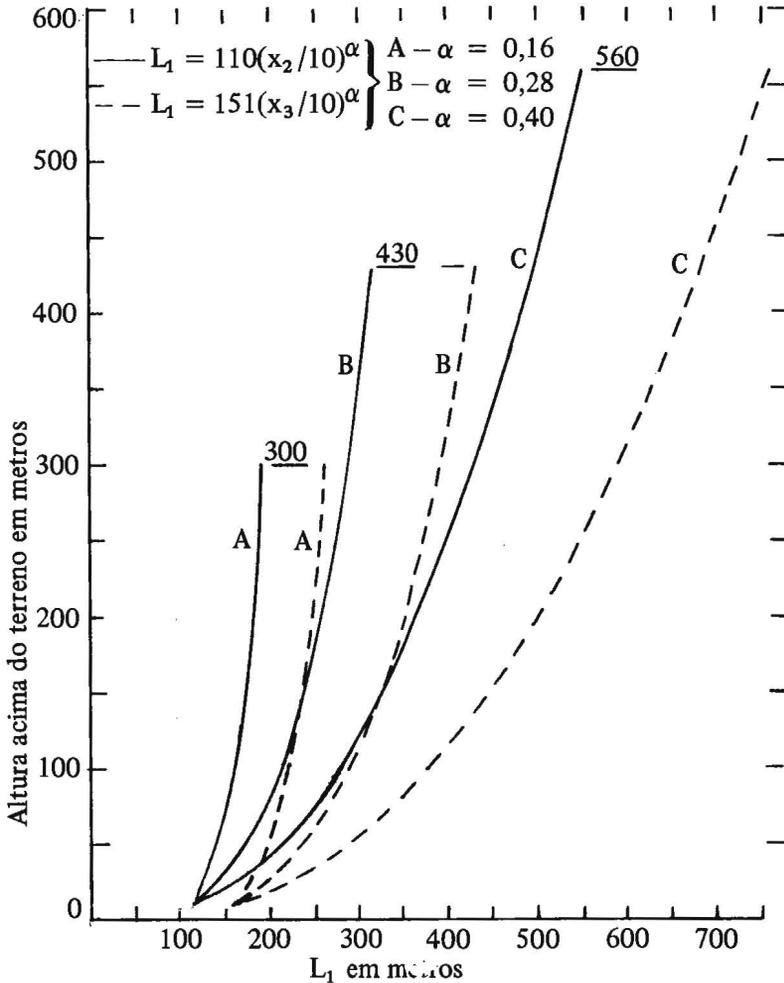


Fig. 3 – Variação da Escala longitudinal da turbulência com a altura

As curvas em linha contínua referem-se aos estudos teórico-empíricos de Whitbread⁴⁸ e as curvas em linha tracejada aos de Harris.²⁶ A diferença entre os dois grupos de curvas indica claramente a dispersão existente nas medidas efetuadas ao vento natural.

2.5 – *Correlação cruzada*

a) É uma medida da relação existente entre as flutuações do vento em dois pontos. Se estudarmos esta relação em um mesmo ponto, variando apenas o retardo entre os pares de observações, teremos a *autocorrelação*, ou correlação temporal. Ela permite o estudo da natureza repetitiva das rajadas, enquanto que as correlações espaciais possibilitam o estudo da não uniformidade da ação das rajadas ao longo da edificação.

b) As correlações espaciais a estudar em cada caso dependem da forma e do comportamento dinâmico da estrutura. Exemplificando: no projeto estrutural de uma edificação alta e esbelta (tipo torre) interessam as correlações verticais das componentes longitudinal e lateral das flutuações (Fig. 4a). Já para uma ponte pênsil interessará conhecer as correlações laterais das componentes longitudinal e vertical (Fig. 4c).

Para o caso de uma estrutura com a superfície principal exposta ao vento relativamente pequena não interessa a variação dos redemoinhos no espaço e as suas dimensões; interessa-nos a variação no tempo, tão somente, e iremos estudar a correlação temporal. Exemplo: luminárias colocadas sobre suportes muito esbeltos (Fig. 4b).

2.6 – *Espectro de potência*

a) O espectro de potência de uma das componentes das flutuações do vento indica a distribuição, em frequência, da energia cinética contida nesta componente. Esta energia é definida pelo valor quadrado médio da respectiva flutuação, isto é, por sua variância (quadrado do desvio padrão). Assim, o espectro de potência — mais precisamente: a densidade espectral da variância de uma das componentes das flu-

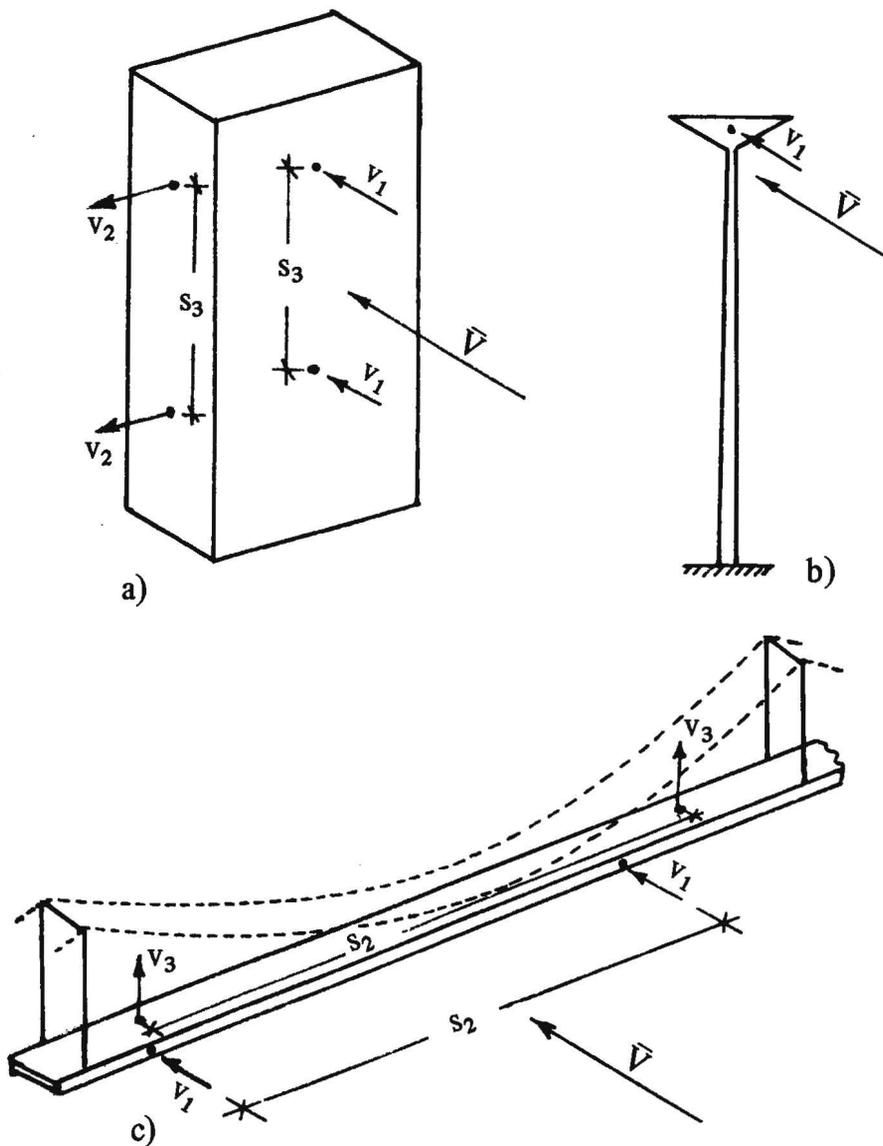


Fig. 4 – Componentes da turbulência a considerar em alguns estudos de correlação

tuações do vento em torno da velocidade média – indica a contribuição, para a variância total, da energia cinética parcial contida nas diversas frequências.

O espectro de potência é uma descrição, no domínio das frequências, da propriedade expressa pela autocorrelação no domínio

dos tempos. A correlação cruzada corresponde o espectro de potência cruzado.

b) A Fig. 5 apresenta o espectro da turbulência longitudinal, conforme van der Haven, a uma altura de 100 metros acima do terreno. Para a engenharia estrutural interessa a parte da direita da curva, correspondente à micrometeorologia. Para esta parte da curva, na

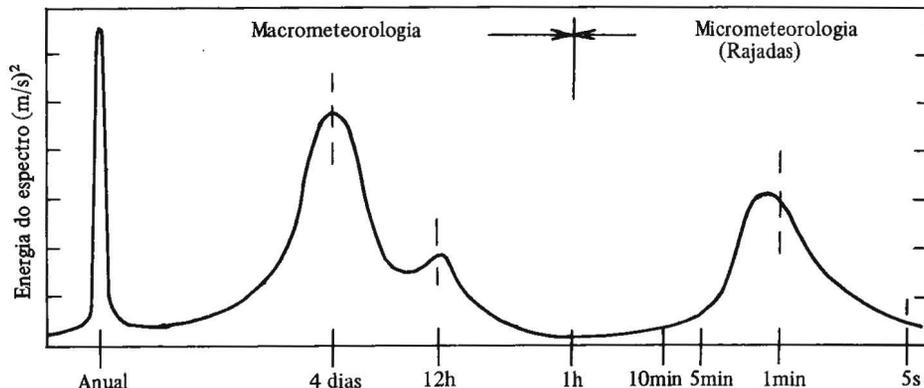


Fig. 5 - Espectro da velocidade horizontal do vento. Medições de van der Haven a 100m de altura.

Fonte: Davenport,¹⁶

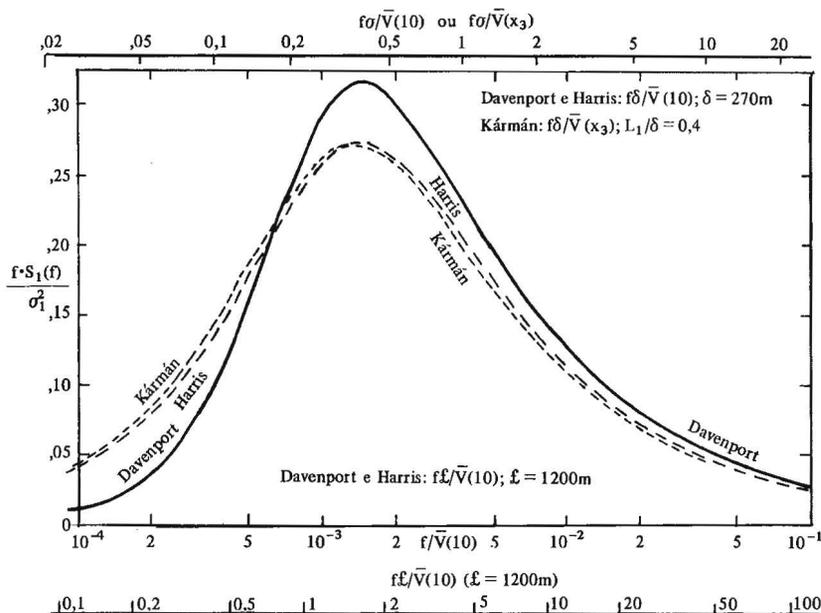


Fig. 6 - Curvas universais do espectro de potência da componente longitudinal das rajadas

Fig. 6, são dados os espectros correspondentes aos estudos teórico-empíricos de Davenport, Harris e Kármán, sendo

f → frequência em Hertz;

$S_1(f)$ → densidade espectral da variância na frequência f ;

σ_1^2 → variância da componente longitudinal das rajadas.

2.7 – Norma Brasileira

a) A Norma Brasileira NB-599³ indica o seguinte:

A *velocidade característica* (velocidade de cálculo) V_K é dada por

$$V_K = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3,$$

sendo

V_0 → velocidade básica;

S_1 → fator topográfico;

S_2 → fator que considera a rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno;

S_3 → fator estatístico.

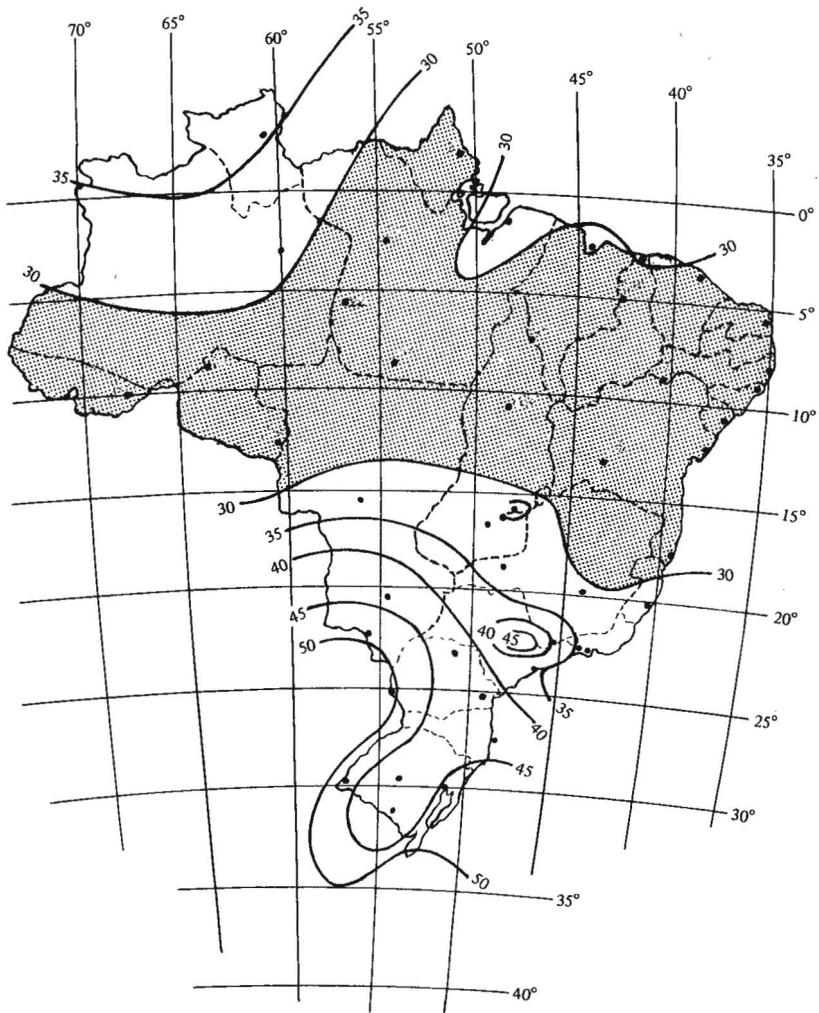
b) A velocidade básica (V_0) é a velocidade de uma rajada de três segundos excedida na média uma vez em 50 anos, a dez metros acima do terreno, em campo aberto e plano.

A Fig. 7, que faz parte da norma supracitada, apresenta as isopletras da velocidade básica com intervalo de 5m/s. “Como regra geral é admitido que o vento básico pode soprar de qualquer direção horizontal. Em caso de dúvida quanto à seleção da velocidade básica e em obras de excepcional importância é recomendado um estudo específico para a determinação de V_0 . Neste caso podem ser consideradas direções preferenciais para o vento básico, se devidamente justificadas.”

c) *Fator topográfico S_1 .*

“O fator topográfico S_1 leva em consideração as grandes variações locais na superfície do terreno. A Tabela 2 dá os valores do fator topográfico para condições típicas. O conhecimento da situação local pode ajudar o projetista na seleção de outros valores para S_1 . Os valores da Tabela 2 devem ser usados com precaução, uma vez que em certos casos os valores nela indicados podem estar acima ou abaixo dos reais.”

Para obras marítimas, sem influência de acidentes topográficos próximos, $S_1 = 1,0$.



V_0 — Máxima velocidade média medida sobre três segundos, que pode ser excedida em média uma vez em 50 anos, a 10m sobre o nível do terreno em lugar aberto e plano

Fig. 7 — Isopletas da velocidade básica do vento, V_0

TABELA 2 – Fator topográfico S_1

Topografia	S_1
a. Todos os casos, exceto os casos b e c abaixo	1,0
b. Encostas e cristas de morros em que ocorre aceleração do vento. Vales com efeito de afunilamento	1,1
c. Vales profundos, protegidos de todos os ventos	0,9

d) *Fator S_2 : rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno.*

“O fator S_2 considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação ou parte componente em consideração.

Em ventos fortes a velocidade do vento usualmente aumenta com a altura acima do terreno. Este aumento depende da rugosidade do terreno e do intervalo de tempo considerado na determinação da velocidade. Este intervalo de tempo está relacionado com as dimensões da edificação, pois edificações pequenas e elementos de edificações são mais afetados por rajadas de curta duração do que grandes edificações. Para estas é mais adequado considerar o vento médio calculado em um intervalo de tempo maior.”

e) *Fator estatístico S_3*

“O fator estatístico S_3 é baseado em conceitos estatísticos e considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação. Segundo a definição dada anteriormente, a velocidade básica (V_0) é a velocidade do vento que apresenta um período de recorrência média de 50 anos. A probabilidade de que a velocidade (V_0) seja igualada ou excedida neste período é de 63%.”

Este nível de probabilidade (0,63) e a vida útil (50 anos), adotados no projeto de norma, são considerados adequados para edificações normais, destinadas a moradias, hotéis, escritórios, etc. Para estas edificações o coeficiente S_3 vale 1,00. Este valor será alterado para mais ou para menos, conforme a influência da vida útil prevista para a edificação, do risco de vidas humanas, de lucros cessantes, de considerações de ordem estratégica e de segurança nacional, da importância da operação segura e sem interrupções do equipamento existente na edificação, etc.

f) *Pressão dinâmica*

A velocidade característica do vento permite determinar a pressão dinâmica (q) ("pressão de obstrução" da NB-5) pela relação

$$q = V_k^2 / 16,$$

sendo

q → expresso em kgf/m²

e

V_k → expresso em m/s.



3 – AERODINÂMICA: AÇÃO ESTÁTICA DO VENTO

3.1 – Coeficiente aerodinâmicos

A ação estática do vento é determinada a partir dos chamados coeficientes aerodinâmicos. Os mais importantes desses coeficientes são definidos nos itens seguintes.

3.1.1 – Coeficiente de pressão.

a) Como a força do vento depende da diferença de pressão nas faces opostas da parte da edificação em estudo, os coeficientes de pressão são dados para superfícies externas (c_{pe}) e para superfícies internas (c_{pi}).

Definimos como pressão efetiva (Δp), em um ponto na superfície de uma edificação, ao valor definido por

$$\Delta p = \Delta p_e - \Delta p_i,$$

sendo

$\Delta p_e \rightarrow$ pressão efetiva externa

e

$\Delta p_i \rightarrow$ pressão efetiva interna.

Portanto:

$$\Delta p = (c_{pe} - c_{pi})q,$$

sendo

$c_{pe} \rightarrow$ coeficiente de pressão externa

$$c_{pe} = \Delta p_e / q$$

e

c_{pi} → coeficiente de pressão interna

$$c_{pi} = \Delta p_i / q.$$

b) Valores positivos dos coeficientes de pressão externa ou interna correspondem a sobrepressões e valores negativos correspondem a sucções.

Um valor positivo para Δp indica uma pressão efetiva com o sentido de uma sobrepressão externa e um valor negativo para Δp indica uma pressão efetiva com o sentido de uma sucção externa.

3.1.2 – Coeficiente de forma.

a) A força do vento sobre um elemento plano de edificação de área A atua em direção perpendicular ao mesmo, sendo dada por

$$F = F_e - F_i,$$

sendo

F_e → força externa à edificação, agindo na superfície plana de área A ,

e

F_i → força interna à edificação, agindo na superfície plana de área A .

Portanto:

$$F = (C_e - C_i)q \cdot A,$$

sendo

C_e → coeficiente de forma externo

$$C_e = F_e / qA$$

e

C_i → coeficiente de forma interno

$$C_i = F_i / qA.$$

b) Valores positivos dos coeficientes de forma externo e interno correspondem a sobrepressões e valores negativos correspondem a sucções.

Um valor positivo para F indica que esta força atua para o interior e um valor negativo indica que esta força atua para o exterior da edificação.

3.1.3 – Coeficiente de força.

a) A força global do vento sobre uma edificação ou parte dela (F_g) é obtida pela soma vetorial das forças do vento que atuam em todas suas partes.

b) A componente da força global na direção do vento, força de arrasto (F_a), é obtida por

$$F_a = C_a \cdot q \cdot A,$$

sendo

C_a → coeficiente de arrasto

e

A → área de uma superfície de referência, especificada em cada caso.

c) De um modo geral, uma componente da força global é obtida por

$$F = C_f \cdot q \cdot A,$$

sendo

C_f → coeficiente de força, especificado em cada caso. Por exemplo:

– C_s → coeficiente de sustentação (componente vertical da força global do vento);

– C_x → coeficiente de força na direção x;

– A → área de uma superfície de referência, especificada em cada caso.

3.2 – Influência das proporções e da forma da edificação

a) Quanto à influência das proporções, para o caso de edificações ao menos aproximadamente paralelepípedicas, definem-se os três parâmetros:

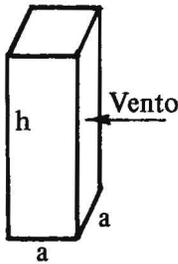
– Alçamento E : $E = \text{altura/largura}$;

– Alargamento A : $A = \text{largura/altura} = 1/E$;

– Profundidade Pr : $Pr = \text{profundidade/menor dimensão da secção transversal}$.

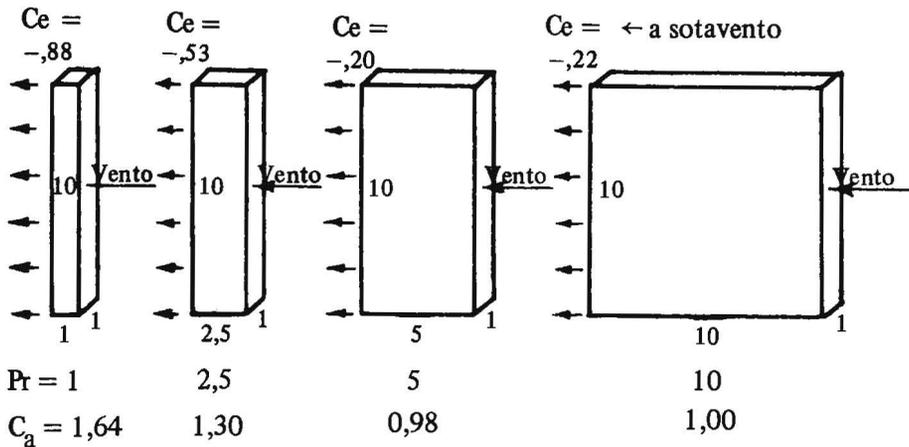
Relembramos que o termo *largura* refere-se à direção perpendicular do vento. A largura a considerar dependerá da fachada segundo a qual estiver incidindo o vento.

b) A Fig. 8 mostra a influência bem sensível do Alçamento e da Profundidade. Estes resultados foram obtidos em fluxo de ar de velocidade uniforme. Conclui-se que, de duas edificações com a mesma área de fachada exposta perpendicularmente ao vento, será maior a força do vento sobre a edificação mais alteada.



$E=h/a$	12	3	5	10	∞
$C_a=F_a/qA$	0,94	1,50	1,55	1,64	2,00

Influência do Alçamento



Influência da Profundidade

Fig. 8 – Influência das proporções

O Alargamento pouco influi no coeficiente de arrasto.

c) Um exemplo da importância da forma e da situação da edificação em relação ao vento é dado na Fig. 9. Esta figura apresenta valores do arrasto relativo e do coeficiente de arrasto em fluxo bi-

dimensional. Observe o leitor a influência da Profundidade e da forma das bordas de barlavento e de sotavento. Tanto os arrastos relativos como os coeficientes de arrasto estão dados para dois valores do número de Reynolds. É de assinalar a grande diferença existente para o cilindro, abaixo e acima da região crítica.

d) A influência das proporções em ações locais será vista no item seguinte, 3.3.

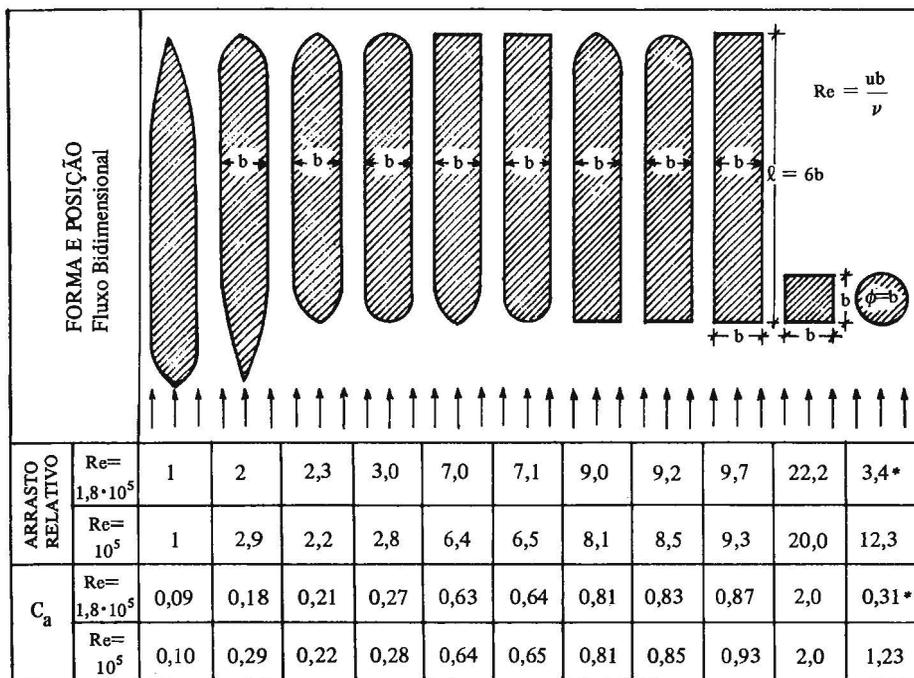
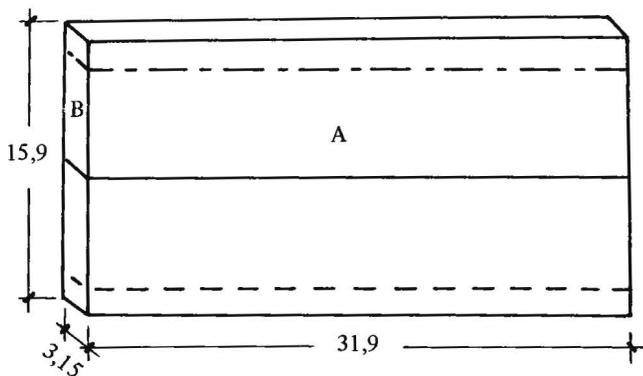


Fig. 9 – Influência da forma e da posição
(* Para $Re = 3 \cdot 10^5$ – acima da região crítica)

3.3 – Zonas com sucções elevadas

a) O vento incidindo axial ou quase axialmente em uma edificação profunda provoca sucções elevadas na zona mais de barlavento das paredes laterais e da cobertura; estas sucções decaem rapidamente na zona mais de sotavento (Fig. 10, vento a 0°).



Localização das Secções

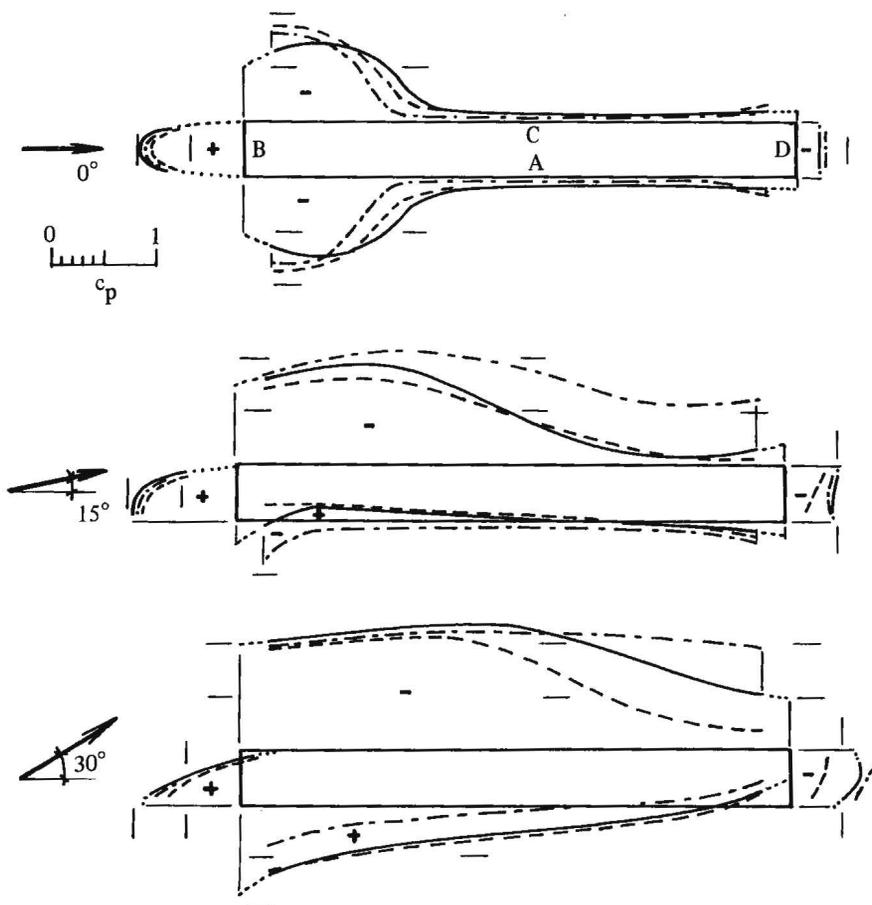


Fig. 10 – Perfis horizontais de pressão em edificações paralelepédicas

Certas edificações funcionam como verdadeiras asas, para vento incidindo pouco obliquamente em relação à fachada maior (pequeno *ângulo de ataque*). Na mesma Fig. 10 vemos um modelo paralelepípedo em que isto aconteceu para vento a 30° , com grande parte da parede de sotavento submetida a sucções correspondentes a c_p acima de 1,00 (em valor absoluto). Também a 15° as sucções nesta parede lateral foram elevadas.

b) A influência da interação aerodinâmica entre as diversas faces de uma edificação impede que se utilize expressões do tipo $k_1 \cdot \text{sen } \alpha - k_2$, para edificações limitadas por superfícies poligonais planas ou levemente encurvadas. Tal impossibilidade é claramente destacada nos resultados dos ensaios em túnel de vento, realizados para o Edifício Pirelli, em Milão, Itália (Fig. 11). Alcançou-se uma sucção local com $c_p = -2,86$ (vento a 15° com o eixo horizontal maior). Além disso os ensaios indicaram um nítido *efeito de asa*, tanto na distribuição das sobrepressões e sucções como no fenômeno de estol, isto é, descolamento da corrente de ar quando o ângulo de ataque for exagerado (a cerca de 15° , nesses ensaios). Resultou também uma componente de força horizontal contra o sentido do vento.

c) A desigual distribuição de pressões origina efeitos de torção. Esta solicitação foi muito importante no Edifício Pirelli, em que o coeficiente de torção, para todo o edifício, atingiu o valor

$$C_t = 0,14,$$

sendo

$$C_t = M_t/q \cdot \ell \cdot A$$

M_t → momento de torção;

ℓ → eixo maior em planta;

A → área da secção vertical longitudinal do edifício;

q → pressão dinâmica do vento.

d) Mesmo em edificações e elementos estruturais de secção quadrada em planta aparecem efeitos de torção. Dryden e Hill,²³ estudando modelo de secção quadrada e de Alçamento 3, observaram uma excentricidade da resultante das forças horizontais de 8,3% da aresta da base para vento a 75° , com uma das fachadas, e de 4,4% para vento a 60° .

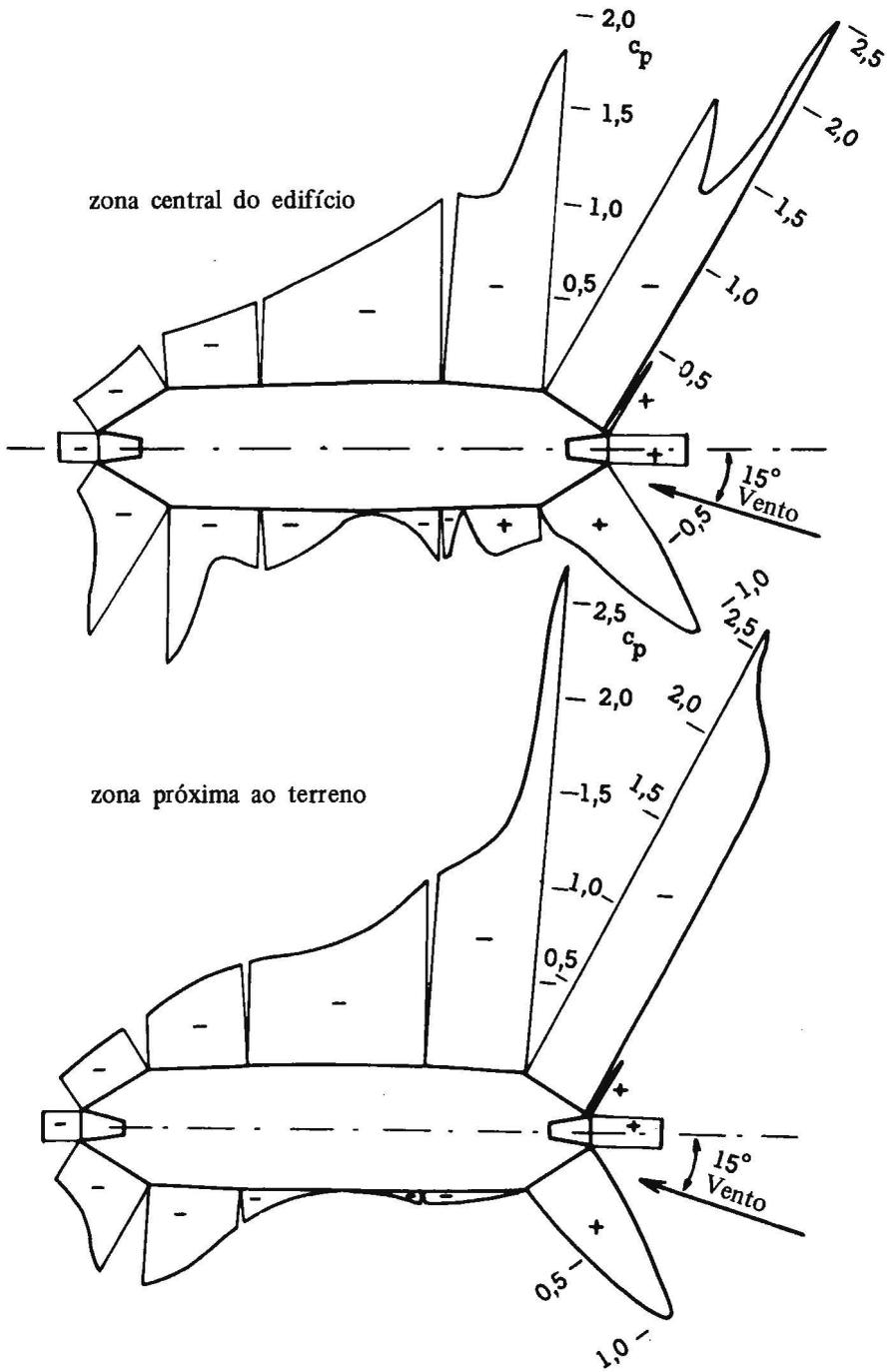


Fig. 11 – Perfis horizontais de pressão no Edifício Pirelli, Milão

3.4 – *Ações locais*

a) A experiência mostra que apenas em circunstâncias excepcionais e ocasionais há o colapso total de uma edificação. E mesmo nestes casos, em geral, a falha inicial foi local. Portanto, do ponto de vista econômico, bem como do estrutural, é importante estudar com cuidado os altos esforços locais do vento, a fim de evitar estas falhas locais; não será necessário superdimensionar toda a estrutura.

Estas ações locais são constituídas por sucções de alto valor em zonas mais ou menos restritas (picos ou pontas de sucção). Aparecem em arestas e quinas de paredes e coberturas, principalmente para o vento incidindo obliquamente a uma fachada. Além da direção do vento influi também a inclinação do telhado, a existência de beiral, a forma e as proporções da edificação (Fig. 12).

No telhado, fortes sucções devem-se à formação dos dois vórtices de topo, quando o vento incide obliquamente, em torno de 45° . Estes vórtices iniciam-se na quina mais de barlavento, desenvolvendo-se em forma cônica ao longo das duas arestas do telhado. São estas sucções, só ou aliadas a uma sobrepressão interna, as responsáveis pelos casos cada vez mais freqüentes de arrancamentos parciais ou totais de coberturas planas ou de pequena inclinação e constituídas de materiais leves. O arrancamento começa no canto mais solicitado, o de barlavento; à sucção externa pode-se aliar uma sobrepressão interna, provocando o colapso parcial ou total do telhado.

b) Também elementos que sobressaem da edificação (chaminés, torres, cornijas, etc.) produzem turbilhonamento e uma esteira com sucções bastante elevadas.

Scruton e Newberry³⁷ observaram centenas de danos em telhados, na zona situada na esteira de chaminés, durante os temporais do inverno 1962-63, na Grã-Bretanha.

c) A Fig. 12 apresenta valores de altas sucções locais medidos em diversos ensaios.

3.5 – *Pressão interna*

a) No interior de uma edificação (não estanque, porém fechada) a pressão tem um valor intermediário entre as sobrepressões e sucções

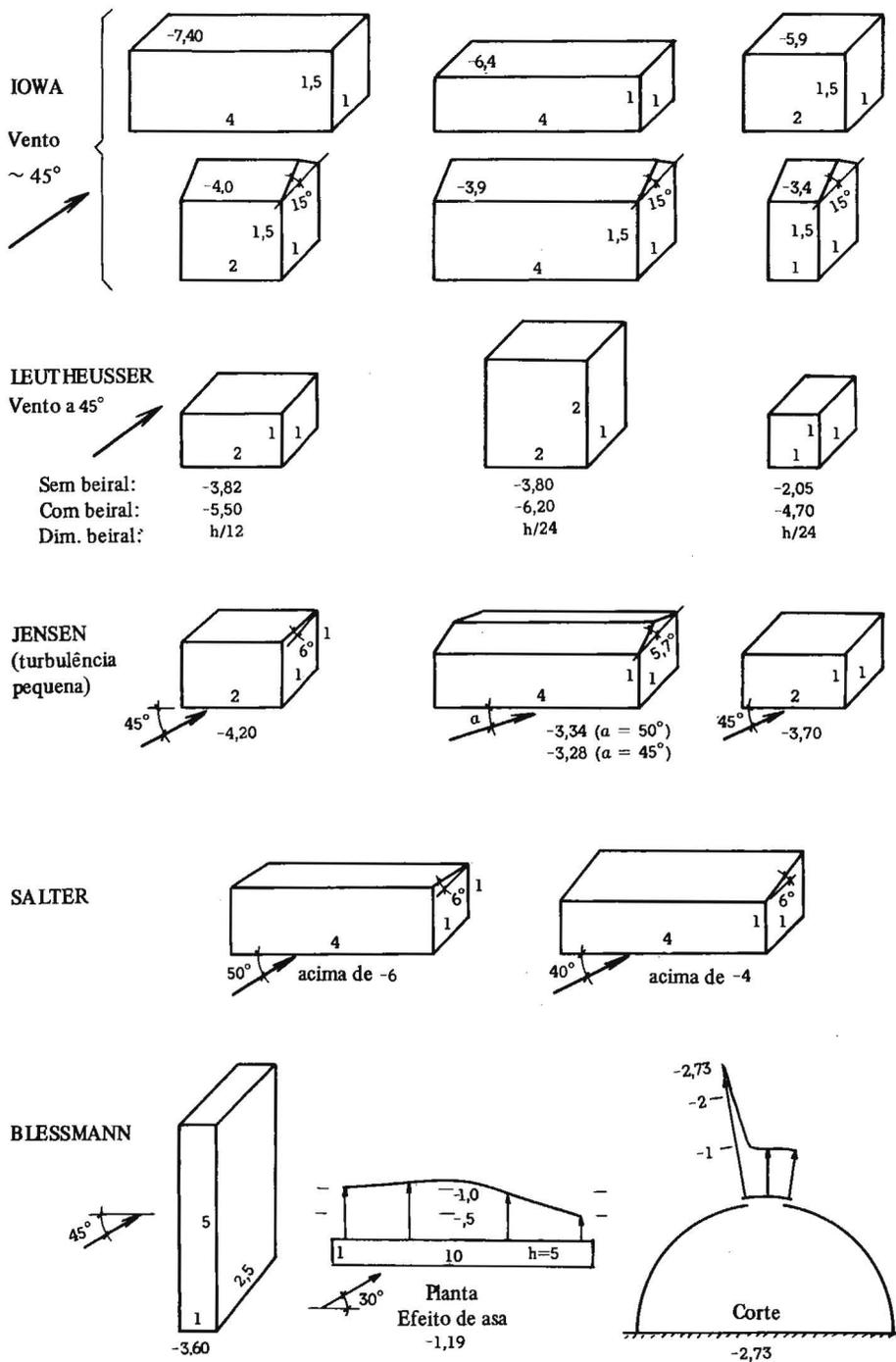


Fig. 12 – Altas sucções locais e “efeito de asa”

externas extremas. Ela depende da localização, tipo e quantidade de aberturas, bem como das repartições internas ou outros obstáculos interiores.

Estas aberturas podem ser:

- normais. Aberturas normalmente existentes: portas, janelas, gateiras, chaminés, lanternins, paredes vazadas, etc.
- por danos. Por exemplo: um pico de sucção local externa arranca elementos da cobertura do telhado ou de vedação das paredes; ruptura de vidros por sobrepressão externa ou por objetos lançados pelo vento. A abertura assim formada poderá fazer com que apareça uma sobrepressão interna, provocando em certos casos danos ainda muito maiores.

b) Em linhas gerais, pode-se dizer que se uma parede tem muito mais aberturas do que as demais, a pressão interna se aproxima do valor médio existente externamente nesta parede, nas bordas das aberturas.

Se, porém, a permeabilidade for disseminada mais ou menos uniformemente em toda a edificação (só nas paredes ou nas paredes e na cobertura), teremos sucção dentro da mesma, pois a maior parte da edificação se encontra externamente sujeita a sucções. Isto foi verificado não só em modelos, mas também em medidas feitas em edificações.

No caso de uma única abertura (abertura dominante), se ela, por suas dimensões, forma e situação não alterar sensivelmente o fluxo externo do ar, a pressão interna será aproximadamente a média das pressões externas nas bordas dessa abertura.

c) A existência de uma sucção interna é favorável à estabilidade do telhado, pois ela se opõe às sucções externas, diminuindo assim a força de sustentação no telhado. Pode-se, mediante certos dispositivos,⁶ fazer com que reine no interior da construção uma sucção, conseguindo-se assim evitar um tipo de acidente muito comum em construções leves e de grandes vãos (Fig. 13).

d) As pressões internas podem variar amplamente, dependendo das dimensões e da posição das aberturas. Algumas normas indicam valores muito baixos, enquanto que outras só admitem valores maiores para edificações em que uma parede tenha no mínimo 30% ou 1/3 de aberturas. Este limite, como mostraram ensaios de D'Havé^{21,22} e de Whitbread e Packer⁴⁶ é exagerado; a partir de 3% de aberturas já se pode considerar como *grande abertura*, de um modo geral.

A não ser em casos de edificações estanques ou quase estanques, como caso limite as sobrepressões podem chegar até próximo de + 1,0

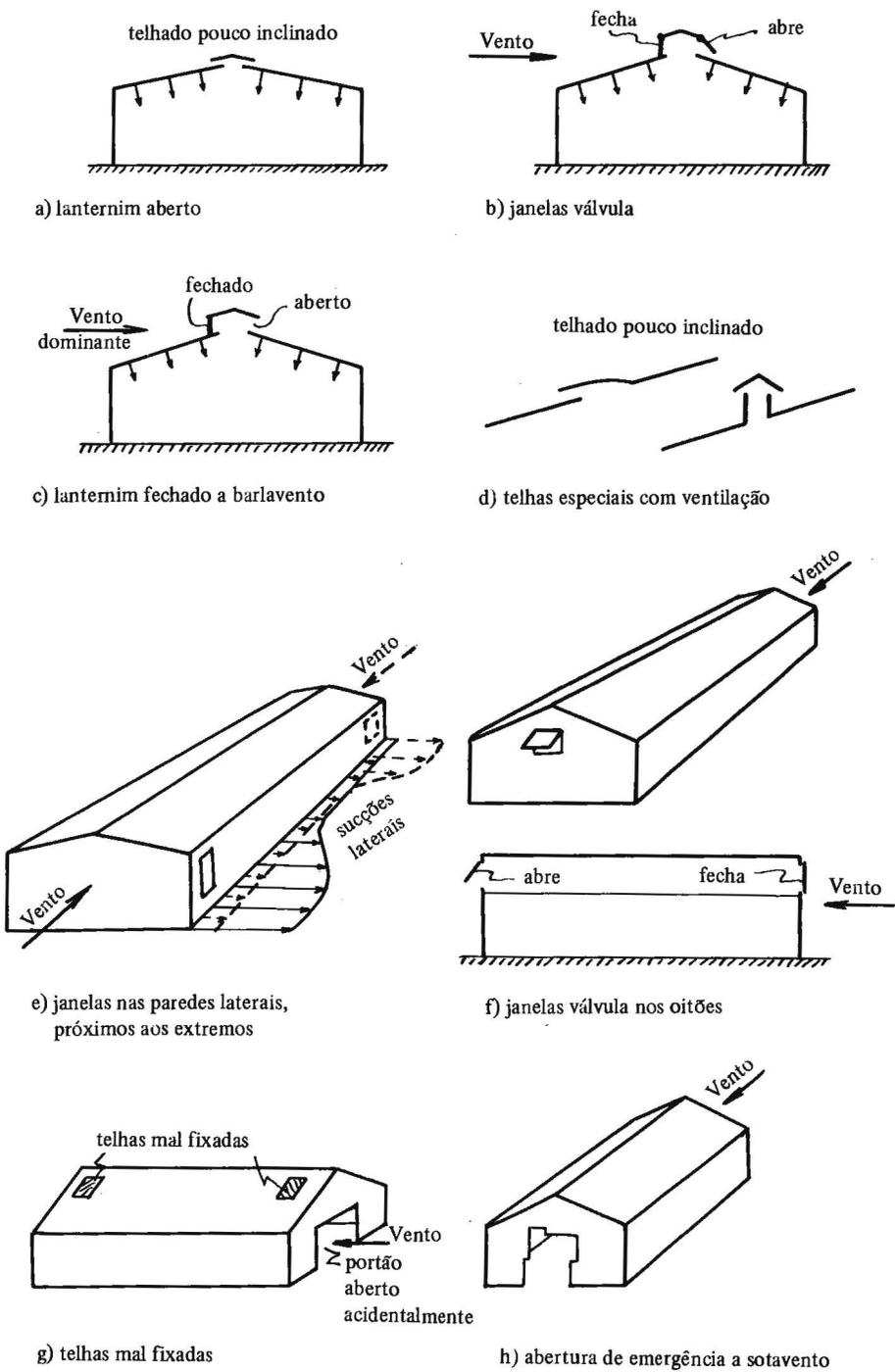


Fig. 13 – Dispositivos para redução da sustentação

(em termos de c_p), enquanto que as sucções podem atingir, excepcionalmente, valores tão altos como -1,2, dependendo das dimensões e localização da abertura ou aberturas dominantes.

3.6 – Interação

a) Os coeficientes aerodinâmicos variam muito com as condições de vizinhança. Um obstáculo qualquer (que pode ser uma outra edificação ou elemento estrutural), colocado nas proximidades da edificação ou elemento estrutural em estudo, pode afetar consideravelmente o campo aerodinâmico correspondente à edificação ou elemento estrutural isolado. Algumas vezes esta alteração é benéfica, outras vezes não.

Assim, por exemplo, Harris²⁵ verificou, em ensaio em túnel de vento, que dois projetados edifícios a serem construídos nas proximidades do Empire State Building, Nova Iorque, praticamente duplicariam os esforços de torção na parte inferior deste edifício, até a altura correspondente ao topo dos dois projetados edifícios.

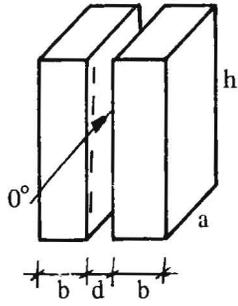
b) Bailey e Vincent,⁴ em seus clássicos ensaios neste tema, constataram, entre outras alterações, um aumento das sucções nos telhados e das sobrepressões nas paredes de duas construções situadas próximas uma da outra.

c) Em ensaios que realizamos com dois modelos de edifícios vizinhos, foram constatados valores bastante elevados de sucção nas faces confrontantes, próximo à aresta vertical,⁵ com uma sucção máxima correspondente a $c_p = -3,6$ (Fig. 14).

Leutheusser³¹ observou, em um modelo cercado por vários outros, uma diminuição nas sobrepressões, porém um aumento nas sucções. Em média, as sucções foram duplicadas, em relação às existentes com o modelo isolado. Em alguns casos houve um aumento de até cinco vezes.

d) Kelnhofer³⁰ mediu o aumento das sucções no telhado, chegando a observar aumentos de 3,16 vezes (Fig. 15).

e) Ishizaki e Sung²⁸ mediram as velocidades entre dois modelos vizinhos, constatando um aumento de velocidade, pela interação entre os dois modelos, de até 40%. Como as pressões são proporcionais ao quadrado das velocidades, isto corresponde a um aumento da pressão dinâmica de, aproximadamente, duas vezes.

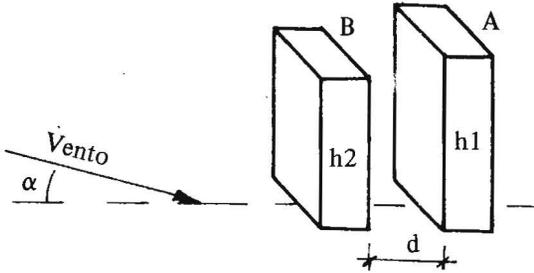


Sucções nas faces confrontantes, próximo à aresta de barlavento

$$a \times b \times h = 2 \times 1 \times 4$$

$d/b =$	0,075	0,125	0,25	0,50	1,00	2,00	∞
$c_{pe} =$	-3,2	-2,8	-3,6	-3,4	-3,1	-2,4	-0,95
$\alpha =$	30°	60°	0°	0°	0°	0°	0°

Fig. 14 – Efeitos de interação



$$c_p = \Delta p / q_\infty$$

$$\beta = 1 - \frac{\min c_p}{\min c_{po}}$$

$$\min c_p = (1 - \beta) \min c_{po}$$

$\min c_p$ – c_p mínimo no modelo A, com modelo B

$\min c_{po}$ – idem, sem modelo B

Casos mais nocivos:

α	$d/h1$	$h2/h1$	β
0°	0,25	0,75	-1,90
$22,5^\circ$	0,25 ou 0,50	1	-2,16

Fig. 15 – Efeitos de interação

f) Em ensaios que estamos realizando em dois modelos paralelepípedicos, proporções $1 \times 1 \times 6$, para um afastamento relativo $d/b = 0,25$ ($d \rightarrow$ afastamento entre modelos; $b \rightarrow$ aresta da base quadrada do modelo) foram medidas as seguintes sucções em pontos situados

em uma das duas faces confrontantes ($\alpha = 0^\circ \rightarrow$ direção das faces confrontantes):

$\alpha =$	0°	10°	15°	30°	45°	60°
$c_p =$	-1,85	-2,13	-2,09	-1,82	-1,66	-1,48.

g) A conclusão geral a tirar dos ensaios acima citados é a de que há um afastamento crítico entre edificações ou elementos estruturais vizinhos, para o qual aparecem sucções bem elevadas.

h) O fenômeno de interação é observado também em pilares, torres e outros elementos estruturais em treliça. A norma Brasileira da ação do vento em edificações indica que as forças do vento nas partes protegidas dos reticulados situados atrás do de barlavento são obtidas multiplicando-se a força correspondente ao reticulado isolado por um fator de proteção. Este fator depende do índice de área exposta do reticulado de barlavento, da forma das barras que constituem o mesmo e do espaçamento relativo entre reticulados.

Torres reticuladas de secção horizontal quadrada ou triangular equilátera, com reticulados iguais em todas as faces, constituem casos especiais para os quais pode ser conveniente determinar a força global do vento diretamente. A norma brasileira acima citada apresenta as tabelas necessárias a esta determinação.

4 – AERODINÂMICA: AÇÃO DINÂMICA DO VENTO

Certas edificações apresentam um comportamento intrinsecamente dinâmico quando expostas ao vento, tornando-se necessário estudar sua estabilidade, por via matemática e/ou experimental, em uma gama bastante extensa de velocidades do vento. A resposta dinâmica da edificação à excitação do vento depende não só de sua forma externa, mas também dos materiais empregados, do amortecimento e da rigidez estrutural.

Em geral as vibrações são originadas de uma ou mais das seguintes causas:

4.1 – *Vórtices desprendidos da edificação*

a) Em edificações rombudas submetidas ao vento há um desprendimento alternado de vórtices. Estes vórtices podem causar forças periódicas importantes, que tendem a produzir vibrações transversalmente à direção do vento.

A frequência de desprendimento dos vórtices é uma função da forma da construção, de suas dimensões (representadas por uma dimensão linear, L), da velocidade do vento (V) e do número de Reynolds (Re). Um parâmetro característico é o chamado número de Strouhal (S):

$$S = f \cdot L / V.$$

S depende da forma da edificação ou elemento estrutural, do número de Reynolds, das características de turbulência do fluxo e do movimento de oscilação da edificação ou elemento estrutural. Para um cilindro engastado pela base (podendo, pois, oscilar livremente),

como é o caso de uma torre cilíndrica, chaminé metálica, etc., $S \approx 0,20$, independentemente do valor de Re .

Para estruturas flexíveis com baixo amortecimento estrutural haverá uma forte oscilação na direção transversal a do vento, sempre que a frequência (f) de desprendimento de um par de vórtices coincidir ou for próxima de uma das frequências naturais da estrutura (f_n) (ressonância).

b) Definimos como velocidade crítica (V_{cr}) a velocidade correspondente à ressonância:

$$V_{cr} = f_n \cdot L/S.$$

Para o caso de torres circulares, por exemplo, $S \approx 0,20$ e

$$V_{cr} = 5 \cdot f_n \cdot L.$$

O próprio movimento da estrutura exerce algum controle sobre o desprendimento de vórtices, de modo que são notadas oscilações também para velocidades mais ou menos afastadas da vizinhança de V_{cr} , principalmente para $V > V_{cr}$.

c) Ventos fortes, em rajadas, não são favoráveis à oscilação da estrutura, pois há grandes variações de velocidade e direção. Ventos calmos, com pequenas variações em torno da velocidade média (baixa turbulência), são muito mais perigosos. É de salientar que tanto a escala como a intensidade de turbulência afetam a resposta da estrutura.⁴⁹

d) Antigamente distinguia-se vibrações forçadas e auto-induzidas. Nas primeiras o desprendimento de vórtices é independente do movimento da estrutura. Se este movimento for impedido, o desprendimento de vórtices permanece com as mesmas características. Nas últimas, este desprendimento, se não for iniciado, é pelo menos mantido (ou intensificado) pelo movimento oscilatório da estrutura: os vórtices se desprendem na mesma cadência de oscilação da estrutura. Fixada esta, cessa o desprendimento de vórtices.

A interação verificada em muitos casos entre estes dois fenômenos fez com que esta classificação fosse abandonada na literatura mais recente.

4.2 – Efeitos de golpe (buffeting, martelamento)

a) Trata-se da excitação de uma estrutura pela turbulência existente na esteira de outra ou outras edificações situadas a barlavento.

Principalmente pelos vórtices existentes na zona de separação entre esteira e fluxo adjacente.

b) Se a estrutura em estudo está imersa na esteira de diversas edificações, teremos uma turbulência do mesmo tipo da do vento natural. Será necessário conhecer o espectro de turbulência desta esteira para determinar a resposta pelo espectro de potência, conforme será exposto em 4.5.

c) Se a estrutura estiver na esteira de um obstáculo (natural ou artificial) dotado de uma freqüência de turbulência predominante — o que acontece principalmente no limite entre esteira e fluxo adjacente — essa estrutura oscilará com as maiores amplitudes quando sua freqüência natural coincidir com a freqüência dominante da turbulência da esteira.

d) É interessante assinalar a influência do afastamento entre a edificação em estudo e um obstáculo a barlavento.

Whitbread e Wootton,⁴⁷ estudando o modelo de um par de edifícios em forma de torres aproximadamente circulares, de diâmetro D , constataram que a presença da torre a barlavento aumentou a amplitude de oscilação da torre de sotavento. As maiores amplitudes de oscilação surgiram com afastamento $4,75D$, entre eixos das duas torres. Porém com afastamento $7,70D$ as amplitudes foram apenas um pouco menores do que as máximas; em ambos os casos as amplitudes foram várias vezes superiores às medidas na oscilação de uma torre isolada.

O mesmo fenômeno foi observado em um conjunto de quatro chaminés dispostas em linha. A chaminé que oscilou mais violentamente foi a situada mais a sotavento. A direção mais nociva do vento formava um ângulo de aproximadamente 25° com a linha de chaminés.⁴⁴

4.3 – Galope

a) Estruturas com secção transversal angulosa, tais como a secção quadrada, retangular, triangular, semicircular, além de estarem sujeitas a fortes excitações pelo desprendimento de vórtices na própria estrutura, são susceptíveis de oscilações pelo fenômeno de instabilidade aerodinâmica denominado de galope. O nome galope vem da justificativa dada por Den Hartog para fenômeno deste tipo ocorrido em linhas de transmissão de energia elétrica cobertas de uma camada de

gelo; estas linhas em certas condições oscilam com grandes amplitudes em planos verticais, com baixas frequências.

b) Uma explicação simples para o galope obtém-se admitindo, a cada instante, a equivalência entre as forças aerodinâmicas agindo na estrutura oscilante e na mesma estrutura considerada fixa, com uma conveniente correção na direção do vento, que passa de V a V_{rel} (Fig. 16). Se a forma da secção for tal que a força lateral F_y , correspondente a V_{rel} , tem o sentido do movimento transversal de m naquele instante, V_{rel} inclinar-se-á ainda mais. Conforme o valor de F_y para esta nova situação, poderemos ter um aumento do deslocamento. Chegaremos a uma obliquidade de V_{rel} em que o processo se inverte, originando-se uma oscilação da estrutura. Na inversão do processo influi também a flexibilidade maior ou menor da estrutura.

c) As oscilações por galope não podem partir do repouso. O início pode ser provocado, por exemplo, por rajadas de vento ou por vórtices alternados. Uma vez iniciado o fenômeno, as oscilações ocorrem em uma larga gama de velocidades do vento.

São susceptíveis de oscilar por galope estruturas muito leves e esbeltas. Um aumento da massa e/ou do amortecimento da estrutura diminui a amplitude das oscilações.

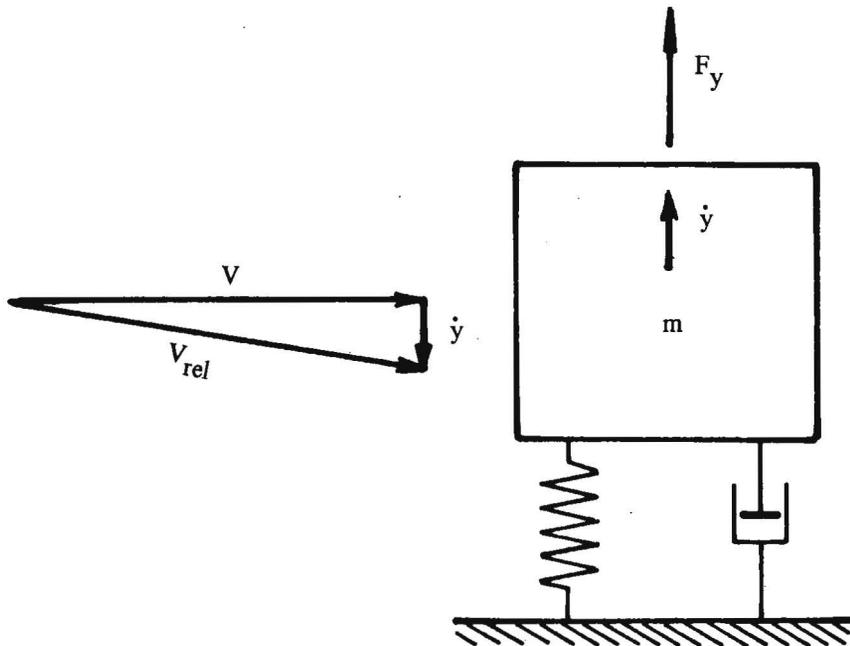


Fig. 16 – Galope

d) De acordo com estudos de Novak,³⁴ o galope pode aparecer também em fluxos turbulentos. Conforme as proporções e orientação dos prismas de secção retangular, ensaiados por Novak, pode aparecer galope só em fluxo turbulento ou só em fluxo de baixa turbulência.

4.4 – *Drapejamento (flutter clássico)*

a) Trata-se de um tipo de instabilidade que envolve dois ou mais graus de liberdade da estrutura, com acoplamento de vibrações. Por exemplo: interação entre flexão e torção.

b) É um fenômeno típico de estruturas longas e esbeltas, tais como pontes pênses. Entretanto, já está aparecendo também em edifícios muito altos e esbeltos. No estudo da estrutura do Keio Plaza Hotel, em Tóquio,³³ um primeiro cálculo estrutural, feito no regime plástico, acusou um período torcional excessivo, isto é, uma rigidez muito baixa. Em um segundo cálculo a rigidez foi aumentada, diminuindo o período torcional para 3,5s. Medidas no edifício indicaram 3,3s. Velocidade crítica do vento: 223km/h. O edifício tem 47 andares, com uma altura de 170m e dimensões externas, em planta, de 26 x 10m, em forma de Z.

c) Em pontes pênses o fenômeno atinge uma importância muito maior. Existem túneis de vento projetados especialmente para estudar o comportamento dinâmico de pontes, sendo o drapejamento um dos fenômenos mais importantes, existindo uma vasta literatura a respeito, tanto em estudos teóricos como experimentais.

4.5 – *Energia contida nas rajadas de vento*

a) As rajadas podem influir nos tipos acima descritos de oscilação; conforme as circunstâncias, agravam ou atenuam o fenômeno. Além disso a energia cinética contida nas rajadas pode causar diretamente oscilações, independentemente das outras causas.

b) Conhecido o espectro de potência da turbulência ($S(f)$) e a admitância da estrutura ($H(f)$) e o valor quadrado médio da resposta é dado por

$$\bar{x}^2 = \int_0^{\infty} S(f) \cdot |H(f)|^2 \cdot df = \sigma_x^2.$$

c) A expressão acima, portanto, permite determinar a amplitude média, em termos da variância (σ_x^2) ou do desvio padrão (σ_x). Não obtemos informação sobre a amplitude máxima de oscilação. Para isto é necessário estudar o problema probabilisticamente. De acordo com estudos de Davenport^{18,19} pode-se tomar

$$x_{\text{pico}} = k_0 \cdot \sigma_x,$$

sendo

$$k_0 = \sqrt{2 \cdot \ln \nu \cdot T} + \frac{0,58}{\sqrt{2 \cdot \ln \nu \cdot T}}$$

Em sistemas com pequeno amortecimento pode-se tomar

$$\nu = f_n$$

$f_n \rightarrow$ frequência natural.

Considerando ainda que em problemas de forças devidas ao vento interessam valores prováveis de ocorrerem em períodos da ordem de uma hora, Davenport toma $T = 3.600$ segundos.

Considerando que as frequências de interesse estão, em ordem de grandeza, entre 10Hz e 0,1Hz, teremos:

$$f_n = 10\text{Hz} \quad \dots\dots\dots k_0 = 4,7$$

$$f_n = 1\text{Hz} \quad \dots\dots\dots k_0 = 4,2$$

$$f_n = 0,1\text{Hz} \quad \dots\dots\dots k_0 = 3,6$$

c) Para se obter a deflexão máxima deve-se somar, ao valor x_{pico} (pico de deflexão dinâmica), a deflexão média (\bar{x}) causada pelo vento médio (velocidade média horária, segundo Davenport):

$$x_{\text{máx}} = \bar{x} + x_{\text{pico}} = \bar{x} + k_0 \cdot \sigma_x$$

d) Um processo simplificado, baseado nesses estudos, foi sugerido por Davenport.²⁰ Este autor adota um fator de rajada (G), o qual permite obter a pressão de cálculo (p) pelo produto

$$\bar{p} = G\bar{p},$$

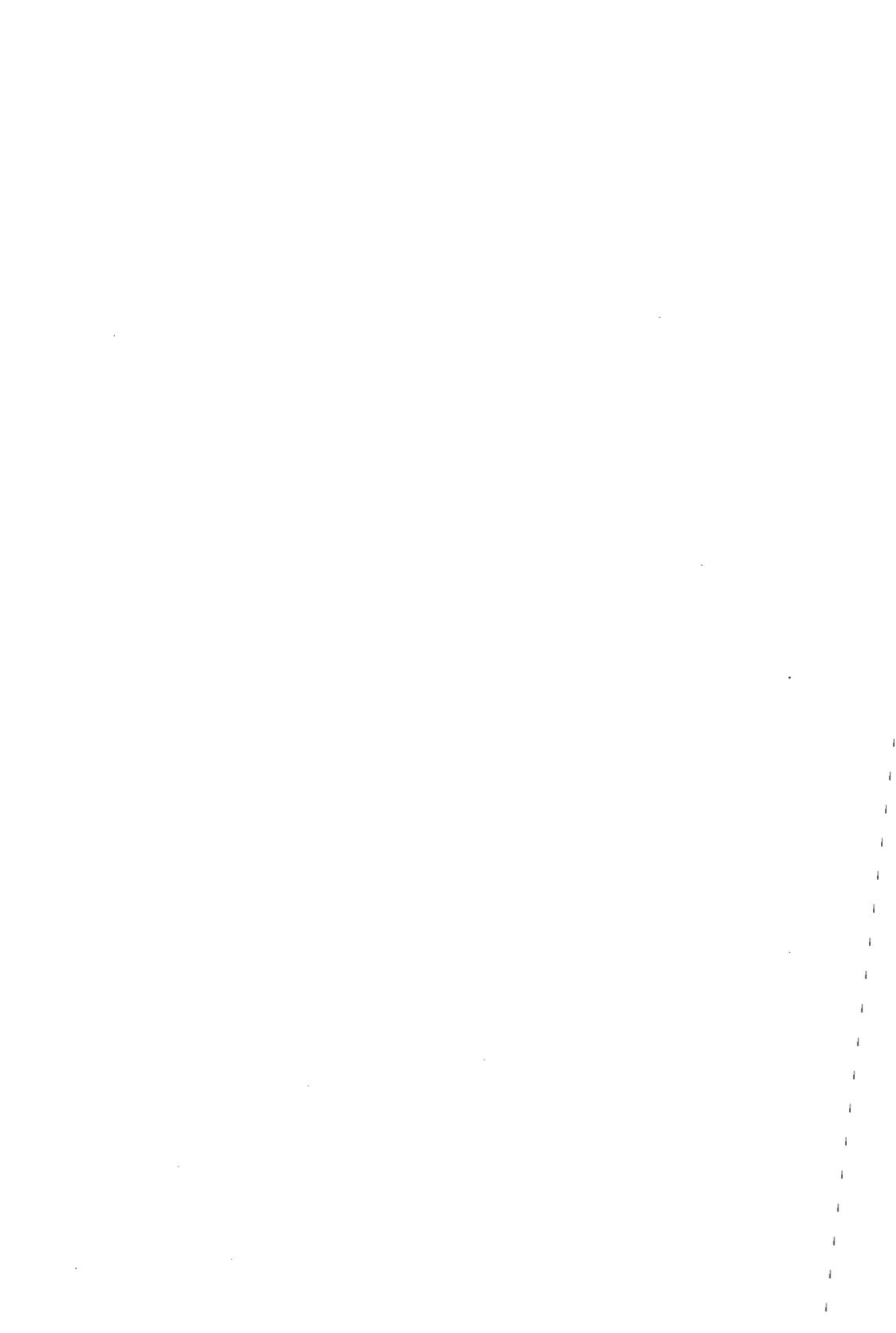
sendo \bar{p} a pressão correspondente à velocidade média (\bar{V}).

Para a obtenção de G são considerados:

- um fator de pico, função da frequência fundamental de vibração da estrutura e do intervalo de tempo utilizado para determinar a velocidade média (\bar{V});

- um fator de rugosidade, função da rugosidade do terreno e da altura da edificação;
- um fator de turbulência, função da altura da edificação;
- um fator de redução de dimensões, função da frequência reduzida e da relação largura/altura da edificação;
- uma relação de energia de rajada, função do número de ondas do vento na ressonância;
- a relação de amortecimento crítico, função do material usado na estrutura: aço ou concreto (inclui os amortecimentos estrutural e aerodinâmico).

O processo simplificado de Davenport serviu de base para a norma canadense.



5 – PESQUISAS EM TÚNEL DE VENTO

a) A determinação dos efeitos estáticos e dinâmicos do vento sobre uma edificação que se distinga das usuais por suas dimensões, formas ou concepção arquitetônica e/ou estrutural, tem sido feita, via de regra, por ensaios em túneis de vento.

Até há poucos anos estes estudos eram realizados quase que exclusivamente em corrente de ar uniforme (excetuando-se a pequena camada limite naturalmente desenvolvida nas paredes do túnel – ou evitando-a com o emprego de uma plataforma biselada na borda de ataque).

b) A simulação razoavelmente correta de todas as principais características do vento natural em túneis aerodinâmicos (túneis construídos especificamente para fins aeronáuticos) é bastante difícil. O que se tem feito é reproduzir, da melhor maneira possível, aquela ou aquelas características que mais influem no problema em estudo. Assim, por exemplo:

- Grelha de madeira, formando um anteparo único com barras grandes: grandes escalas de turbulência, superposta esta a uma corrente de ar uniforme.
- Tela uniforme: turbulência superposta a uma corrente de ar uniforme.
- Grelha única de malha variável ou diversas grelhas superpostas: variação de velocidade com a altura e turbulência.
- Telas curvas: variação de velocidade e turbulência fina.
- Grelha graduada convenientemente e rugosidade no piso: gradiente de velocidade e turbulência com estrutura presumivelmente correta.⁴⁵

Para uma descrição mais completa de dispositivos empregados na simulação do vento natural consultar Blessmann.^{8,9}

c) Jensen e Frank^{24,29} mostraram que se pode obter no túnel uma escala apropriada da estrutura do vento natural cobrindo-se um comprimento considerável de seu piso com um material de rugosidade adequada. Este dispositivo corresponde à principal fonte de turbulência à baixa altitude, em ventos em condições de estabilidade neutra.

d) Todos os processos acima citados têm em comum o fato de empregarem corpos sólidos para a reprodução de uma ou mais características do vento natural. Todos eles, em menor ou maior grau, causam uma diminuição da velocidade obtida no túnel, em regime de vento uniforme, sem obstruções. Em casos extremos esta redução pode atingir a cerca de 80% (grelhas de elevado índice de área exposta).

Resultados promissores foram obtidos com um processo que procura reproduzir a estrutura do vento natural por meios puramente aerodinâmicos.^{7,9,12} Mais precisamente, com diversos jatos de ar, de velocidade superior a da corrente de ar longitudinal, lançados perpendicularmente a esta corrente.

Um ou diversos jatos de ar, com bocal de saída circular ou retangular, lançando os jatos perpendicularmente à corrente de ar longitudinal (a partir do piso ou das paredes do túnel), têm sido usados, em geral conjuntamente com obstáculos sólidos, por V. Nee (1973), Nagib et alii (1974) e J. Gandemer (1974).²⁷ Teunissen^{41,42} utiliza um grande número de jatos lançados longitudinalmente para obter o perfil de velocidades médias. A turbulência adequada é conseguida com obstáculos sólidos.

e) Tendo em vista a necessidade de resultados mais precisos, diversos laboratórios construíram túneis que designamos pelo termo *túneis de vento*: aqueles projetados para uma simulação adequada das características do vento natural que interessam ao estudo de construções civis. Os *túneis aerodinâmicos*, projetados para fins aeronáuticos e afins, geram ventos uniformes de baixa turbulência, porém, em geral, de velocidades bem maiores. Nos túneis de vento a relação *comprimento/altura da câmara de ensaios* é de aproximadamente dez; enquanto que nos túneis aerodinâmicos esta relação situa-se em torno de dois.

f) O túnel de vento TV-2 da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Figuras 17 e 18) permite desenvolver satisfatoriamente estudos de efeitos estáticos e dinâmicos do vento sobre construções civis em geral. Sua relação comprimento/altura da câmara de ensaios é de 10,3. Possui atualmente 3 mesas para ensaios estáticos e dinâmicos, com previsão de uma quarta mesa no retorno (secção transversal de 250 x 210cm) para estudos de dispersão de descargas de chaminés na atmosfera, influências topográficas, etc.



Fig. 17 – Túnel de vento TV-2, da UFRGS

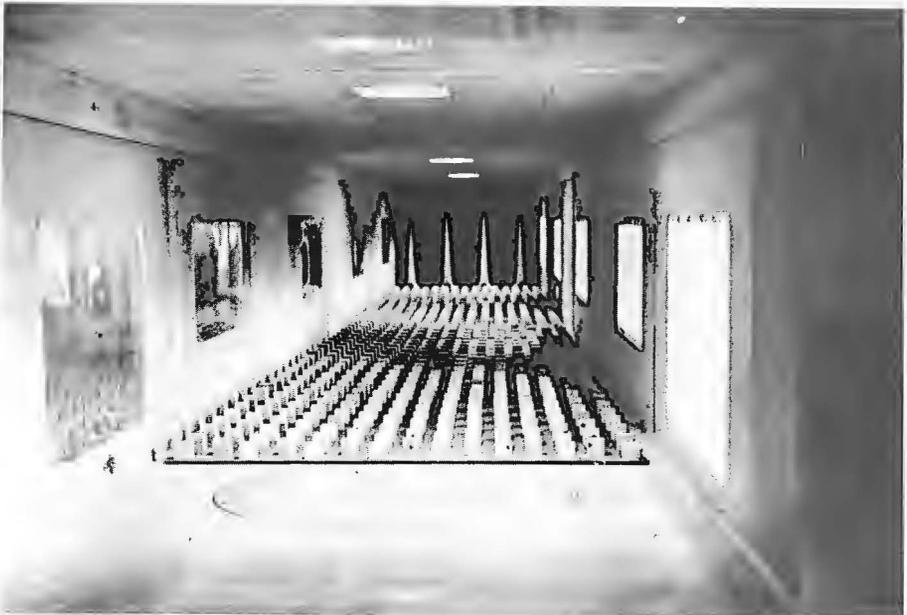


Fig. 18 – Vista interna da câmara de ensaios, com geradores de turbulência

g) A Tabela 3 apresenta dados comparativos de diversos túneis de vento, dos mais modernos. As menores dimensões do túnel da UFRGS são em parte compensados pela maior velocidade do vento nele gerado, o que pode ser constatado comparando-se o número de Reynolds (Re_T) dos diversos túneis.

O número de Reynolds (Re_T), dado pela expressão

$$Re_T = V \cdot L / \nu,$$

toma para dimensão característica (L) a altura da câmara de ensaios ($\nu \rightarrow$ viscosidade cinemática do ar).

TABELA 3 – Características de túneis de vento

Túnel	Secção comprimento (m)	comprimento altura*	Potência do motor (CV)	Velocidade máxima (km/h)	$Re/10^6$
(1) UWO	2,4 x 2,0 25,0	12,5	40	65	2,5
(2) CSU	1,8 x 1,8 18,0	10,0	75	97	3,3
(3) CSU	3,6 x 2,4 16,0	6,7	150	65	3,0
(4) CSTB	2,0 x 1,8 13,0	7,2	50	65	2,2
(5) BRS	2,0 x 1,0 8,0	8,0	76	72	1,4
(6) UFRGS	1,3 x 0,9 9,3	10,3	100	175**	3,0

- (1) Boundary layer wind tunnel. University of Western Ontario. London, Canada.
- (2) Industrial aerodynamics wind tunnel. Colorado State University. Fort Collins, USA.
- (3) Environmental wind tunnel. Colorado State University. Fort Collins, USA.
- (4) Soufflerie a couche limite turbulente. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. Nantes, França.

- (5) Boundary layer wind tunnel. Building Research Station. Garston, Grã-Bretanha.
 - (6) Túnel de Vento TV-2. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Brasil.
- * Para os túneis com altura variável está dada a altura média.
- ** Velocidade prevista com futura substituição da hélice. Atualmente, 144km/h (Re = $2,5 \times 10^6$).

6 – EFEITOS NOCIVOS DO VENTO

6.1 – *Danos a esquadrias, vidros, paredes e rebocos*

a) Incluímos neste item danos causados por oscilações da edificação. Observações feitas em edifícios de grande altura, com mais de 50 pavimentos e dotados de paredes de vedação externa e divisórias de alvenaria, mostraram que nos primeiros meses após sua construção estes edifícios inclinam-se na direção dos ventos dominantes. O edifício, neste estágio, não oscila como um todo; apenas apresenta *microvibrações*. Após alguns meses, com o crescimento da deformação permanente do edifício, a resistência dos painéis de alvenaria é vencida: eles trincam, separando-se da estrutura e o edifício passa a oscilar.

Além de paredes e rebocos, também esquadrias podem ser deformadas por este processo.

b) É bastante conhecido o problema que atingiu a John Hancock Tower, em Boston, USA, que ocasionou a ruptura de milhares de vidros, em uns poucos anos. Estes danos foram causados por oscilações torsionais do edifício. A estrutura foi reforçada e foram substituídos os vidros de todas as 10.344 janelas, a um custo de 15 milhões de dólares.⁴³

6.2 – *Danos a vidros, paredes e painéis de revestimento*

Pensamos aqui nos efeitos estáticos do vento. Vidros podem ser rompidos, painéis de revestimento e telhados arrancados, paredes demolidas, quer por ação preponderante de fortes sobrepressões ou sucções

externas, quer pela ação conjunta de sobrepressões internas e sucções externas ou vice-versa. Exemplos de acidentes deste tipo são dados nas Figuras 19 e 20. Também paredes internas podem ser atingidas, como se constata na Fig. 21. As Figuras 19 a 21 foram tiradas de um trabalho de Somes, Dijkers e Boone.³⁹



Fig. 19 – Danos a vidros

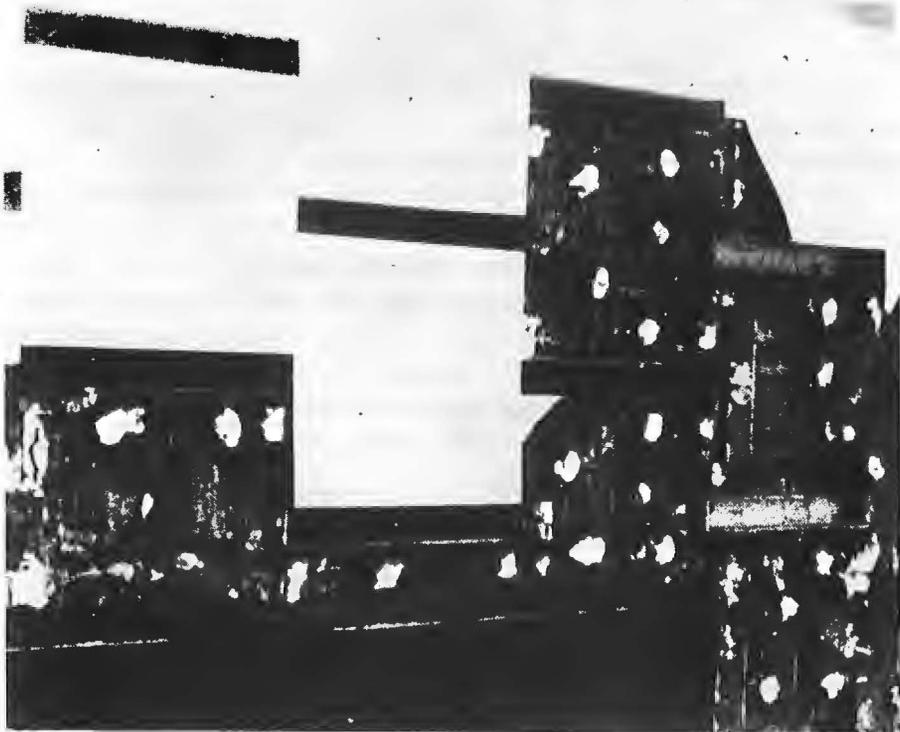


Fig. 20 – Danos a painéis de revestimento (Mármore)



Fig. 21 – Danos à parede interna

6.3 – Conforto dos usuários

a) As oscilações das edificações não devem ser percebidas pelos usuários. Em alguns dos edifícios mais altos do mundo há pessoas mais sensíveis que enjoam em dias de forte ventania.

A perceptibilidade é função da amplitude e da freqüência de oscilação, sendo proporcional à aceleração do movimento da edificação. Nem sempre enrijecer a estrutura para diminuir a amplitude resolve o problema, pois a estrutura mais rígida terá uma freqüência maior, e pode-se no final continuar com a mesma sensação de mal-estar ou enjôo. Admite-se apenas uma leve percepção, em casos extremos de ventos de violência excepcional, em estruturas muito esbeltas. Indicações quantitativas deste problema podem ser vistos na Fig. 22, retirada de um trabalho de Chang.¹⁵

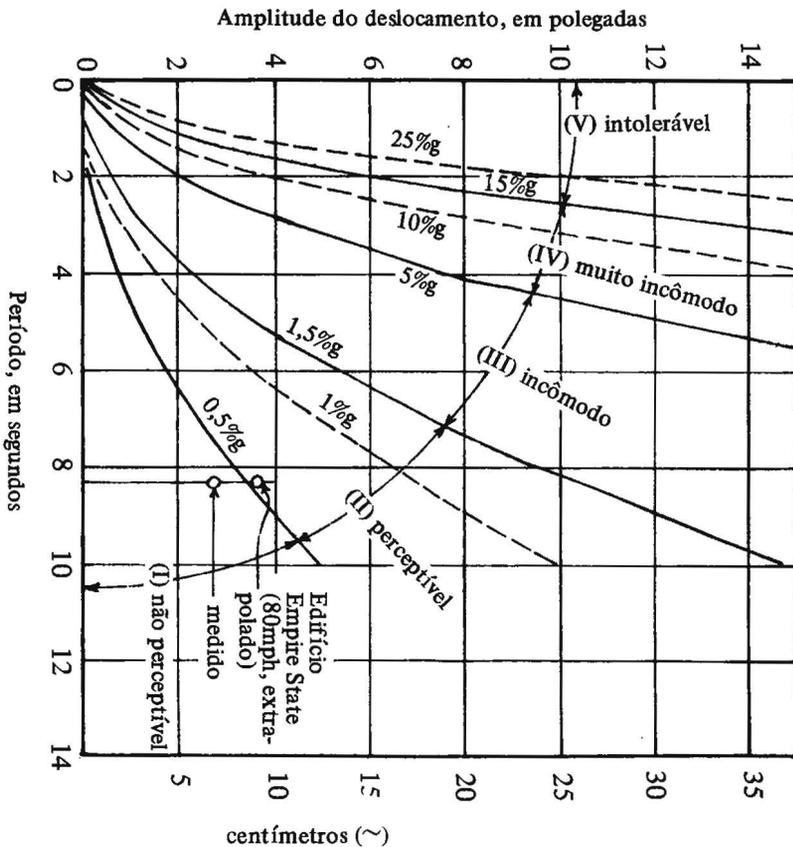


Fig. 22 – Movimento de um edifício alto e conforto humano, conforme Chang¹⁵

b) Ao se pensar em conforto humano, deve-se levar em conta também o problema do ruído de janelas que trepidam, de quebra-sois que vibram e o próprio ruído do vento.

c) Também há o problema da entrada de água e pó, que tanto mais se fará sentir quanto maiores as pressões devidas ao vento.

6.4 – Conforto dos transeuntes

a) Há duas parcelas a considerar (Fig. 23). Uma primeira parte do fluxo perturbador é devido à distribuição de pressões na face diretamente exposta ao vento, até a altura do ponto de estagnação. Como estas pressões estão relacionadas com a pressão dinâmica do vento e como a velocidade do vento aumenta com a altura, o ponto de estagnação pode subir até cerca de 75% ou mesmo 80% da altura da edificação. Deste ponto para baixo temos um fluxo descendente, em virtude do gradiente de pressões. Este fluxo, junto com aquele frenado pela edificação junto ao solo, vai formar um vórtice de pé de fachada que se desenvolve em forma helicoidal e causa altas velocidades junto ao solo.

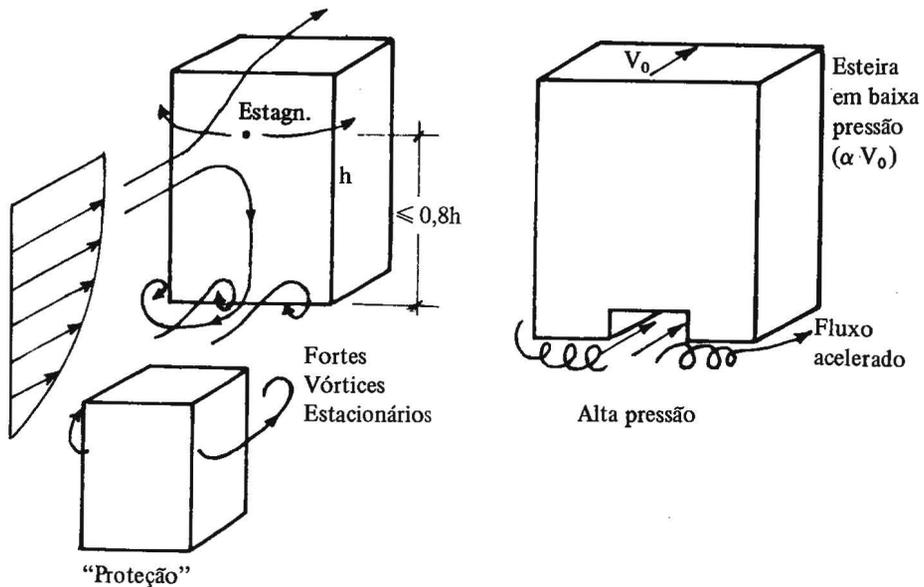


Fig. 23 – Altas velocidades do vento próximo ao terreno

Este problema é pouco sensível em edificações de forma côncava exposta ao vento — por exemplo, um edifício de secção circular — em que o fluxo escapa lateralmente e quase não há corrente de ar descendente. Uma construção mais baixa situada a barlavento pode aumentar as velocidades e a turbulência na zona compreendida entre as duas.

b) Outra parte do problema é causada pelo gradiente de pressão na direção horizontal: temos sobrepressão a barlavento e sucção nas faces laterais e a sotavento, na esteira. Esta diferença de pressões acelera o fluxo longitudinalmente. E como as sucções na esteira aumentam com o Alçamento, conclui-se que, para uma mesma secção horizontal, o vento será tanto mais veloz junto ao terreno quanto mais alto for a edificação. Este aceleração do fluxo aparece não só na região de barlavento, junto às paredes laterais, como também em passagens abertas junto ao terreno. Em ensaios realizados no Centro Técnico Aeroespacial¹³ obtivemos, no teto inferior do modelo de um edifício sobre pilares, em corrente de ar uniforme, um coeficiente de pressão externa de $-2,17$, próximo à quina de barlavento, vento soprando a 60° com a fachada. Há casos em que placas de revestimento de tetos nestas condições são arrancadas pela sucção.

c) Melbourne e Joubert³², que estudaram detalhadamente este assunto, sugerem velocidades limites que não devem ser ultrapassadas nas zonas de acesso público. "Uma área é recomendada como sendo inaceitável se velocidades induzidas em locais de acesso público têm a probabilidade de exceder 23m/s (83km/h) uma vez ao ano, ou 15m/s (54km/h) em 1% do tempo."

Estes dois pesquisadores mostraram que, com um conhecimento dos registros meteorológicos locais, as condições do fluxo induzido por um edifício projetado podem ser determinadas muito facilmente a partir de testes em túnel de vento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - ALI, Barkat. Variation of wind with height. *Quarterly Journal of the Meteorological Society*. London, 58:285-8. 1932.
- 2 - A.S.C.E. TASK COMMITTEE ON WIND FORCES, New York. Wind bracing in steel buildings: final report of subcommittee 31, committee on steel of the structural division. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*. New York, NY, 89:1713-39, 1940.
- 3 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro, Norma Brasileira NB-599. *Forças devidas ao vento em edificações*. Rio de Janeiro.
- 4 - BAILEY, A.; VINCENT, N. D. G. Wind pressure on buildings including effects of adjacent buildings. *Journal ICE*, London, Paper 5.367, October 1943.
- 5 - BLESSMANN, J. Um Estudo Quantitativo do Fenômeno de Interferência. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 11., São Paulo, 20-5 junho 1966. p.585-600.
- 6 - ———. Pressão Interna. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 15., Porto Alegre, 28 nov. 4 dez. 1971. v.1, p.303-39.
- 7 - ———. Comunicação Sobre um Novo Processo Para Simulação, em Túnel Aerodinâmico, de Características de Vento Naturais. In: REGIONAL CONFERENCE ON THE PLANING AND DESIGN OF TALL BUILDING, Varsóvia, 27-30 nov. 1972. v.1, p.396-9.
- 8 - ———. Obtenção de Perfis de Velocidade Média em Túnel de Vento. *Revista Brasileira de Tecnologia*, São Paulo, 3(4):219-28, dez. 1972.
- 9 - ———. Simulação da Estrutura do Vento Natural em um Túnel Aerodinâmico. Tese apresentada no Instituto Tecnológico de Aeronáutica, como parte para a obtenção do título de Doutor em Ciências, São José dos Campos, 16/10/1973.
- 10 - ———. Efeitos Dinâmicos do Vento em Estruturas. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 14., Buenos Aires. 22-7 abril 1974. v.1, p.328-55.
- 11 - ———. Efeitos Dinâmicos do Vento em Torres de Microondas em Concreto Armado. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 17., Caracas, 8-12 dez. 1975. p.JB 1-14.
- 12 - ———. The use of cross-jets to simulate wind characteristics. *Journal of Industrial Aerodynamics*, Amsterdam, 2(1):37-47, Dec. 1976.
- 13 - ———. Efeitos do Vento em Construções Cívicas. In: *Manual do Engenheiro Globo*, v.7, tomo 1, p.285-373.
- 14 - BRADSHAW, P. The understanding and prediction of turbulent flow. *Aeronautical Journal*, p.403-17, July 1972.
- 15 - CHANG, Fu-Kuei. Wind and movement in tall buildings. *Civil Engineering*, ASCE. New York, 37(8):70-72, Aug. 1967.

- 16 – DAVENPORT, A. G. The relationship of wind structure to wind loading. In: WIND EFFECTS ON BUILDINGS AND STRUCTURES. *Symposium*, 16., Teddington, National Physical Laboratory, 1963, v.1, p.53-102, Paper 2.
- 17 – ———. *Wind loads on structures*. Ottawa, National Research Council of Canada, 1960. (Technical Paper of the Division of Building Research, 88).
- 18 – ———. The buffeting of large superficial structures by atmospheric turbulence. *Annals of the New York Academy of Sciences*, New York, NY, 116:135-59, June 1964.
- 19 – ———. Note on the distribution of the largest value of a random function with application to gust loading. *Proceedings Institution of Civil Engineers*, London, v.28, p.187-96, Paper 6739, 1964.
- 20 – ———. The treatment of wind loading on tall buildings. In: SYMPOSIUM ON TALL BUILDINGS, Southampton, 1966. *Proceedings*, Southampton, 1966, p.441-82.
- 21 – D'HAVÉ, R. *Action du vent sur les bâtiments*. Report des recherches faites par le Bureau SECO avec l'appui de l'Irsia. Bruxelles, Bureau de Contrôle pour la Sécurité de la Construction en Belgique. 1963. 2v.
- 22 – ———. *L'action du vent sur les bâtiments*. Bruxelles, A.B.E.M., 1965. 11p. (Publication, 321).
- 23 – DRYDEN, H. L.; HILL, G. C. Wind pressure on structures. *Scientific Papers of the Bureau of Standards*, Washington. 20:697-732, 1924-26.
- 24 – FRANCK, N. Model law and experimental technique for determination of wind loads on buildings. In: WIND EFFECTS ON BUILDINGS AND STRUCTURES: *Symposium* 16., Teddington, National Physical Laboratory, 1963. v.1; p.181-96. Paper 15.
- 25 – HARRIS, C. L. Influence of neighboring structures on the wind pressure on tall buildings. *Bureau of Standards Journal of Research*, Washington, D.C., v.12, Jan.1934.
- 26 – HARRIS, R. I. The nature of the wind. *The Modern Design of Wind Sensitive Structures*. Construction Industry Research and Information Association. London. 1970. p.29-55, Paper 3.
- 27 – HUNT, J. C. R.; FERNHOLZ, H. Wind-tunnel simulation of the atmospheric boundary layer: a report on Euromech 50. *Journal Fluid Mechanics*, 70(Part 3):543-59. 1975.
- 28 – ISHIZAKI, H.; SUNG, I. W. Influence of adjacent buildings to wind. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND EFFECTS ON BUILDINGS AND STRUCTURES, 3., Toquio, 1971. p.145-52. Paper I.5.
- 29 – JENSEN, M.; FRANCK, N. Model scale tests in turbulent wind. *The Danish Technical Press*, Copenhagen, Part I, 1963; Part II, 1965.
- 30 – KELNHOFER, W. J. Influence of a neighboring building on flat roof wind loading. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND EFFECTS ON BUILDINGS AND STRUCTURES, 3., Tokyo, 1971. p.221-30, Paper II.5.
- 31 – LEUTHEUSSER, H. J. Static wind loading of grouped buildings. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND EFFECTS ON BUILDINGS AND STRUCTURES, 3., Tokyo, 1971. p.211-9, Paper II.4.
- 32 – MELBOURNE, W. H.; JOUBERT, P. N. Problems of wind flow at the base of tall buildings. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND EFFECTS ON BUILDINGS AND STRUCTURES, 3., Tokyo, 1971. *Proceedings*, Tokyo, 1971. p.105-114.
- 33 – MUTO, K. Fluttering design of Keio Plaza Hotel. *Tokyo Meeting of ASCE-IABSE Joint Committee*. Technical Committee n.7: Wind Loading and Wind Effects. September 1971. (Technical Report TC 7-2).
- 34 – NOVAK, M. Galloping and vortex induced oscillations of structures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIND EFFECTS ON BUILDINGS AND STRUCTURES, 3., Tokyo, 1971. p.799-809. Paper IV.16.

- 35 – PLANNING AND DESIGN OF TALL BUILDINGS. Tall building, criteria and loading. Wind loading and wind effects. v.150, chapter 7. Impressão preliminar.
- 36 – RICE, S. O. Mathematical analysis of random noise. In: WAX, Nelson. *Selected papers on noise and stochastic processes*, New York, Dover Publications Inc., 1954, p.133-294.
- 37 – SCRUTON, C.; NEWBERRY, C. W. On the estimation of wind loads for buildings and structural design. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. London, 25:97-126, June 1963.
- 38 – SHERLOCK, R. H. Gust factors for the design of buildings. In: ASSOCIATION INTERNATIONALE DES PONTS ET CHARPENTES: *Mémoires*, 1947. v.8, p.207-36.
- 39 – SOMES, N. F.; DIKKERS, R. D.; BOONE, T. H. *Lubbock Tornado: A survey of building damage in an urban area*. National Bureau of Standards, Washington, D.C. March 1971. (NBS Technical Note 558).
- 40 – STEINMAN, D. B. Design of bridges against wind. *Civil Engineering*, New York, v.1, n.10, October 1945.
- 41 – TEUNISSEN, H. W. Simulation of the planetary boundary layer in a multiple-jet wind tunnel. *UTIAS Report 182*, Canada, University of Toronto, 1972.
- 42 – ———. Simulation of the planetary boundary layer in a multiple-jet wind tunnel. *Atmospheric Environment*, Oxford, 9:145-74, 1975.
- 43 – TIME, p.24, October 11, 1976.
- 44 – VICKERY, B. J.; WATKINS, R. D. Flow induced vibrations of cylindrical structures. In: AUSTRALASIAN CONFERENCE OF HYDRAULICS AND FLUID MECHANICS, 1. *Proceedings*, Pergamon Press, 1962.
- 45 – VICKERY, B. J. On the flow behind a coarse grid and its use as a model of atmospheric turbulence in studies related to wind loads on buildings. In: NATIONAL PHYSICAL LABORATORY, Teddington, 1965. (NPL Aero Report 1143).
- 46 – WHITBREAD, R. E.; PACKER, M. A. *Wind-tunnel tests to determine the effectiveness of a ridge ventilator for alleviating the wind loading on a light-weight roof*. Teddington, National Physical Laboratory, Aerodynamics Division, 1963. (NPL Aero Report 1077).
- 47 – WHITBREAD, R. E.; WOOTTON, L. R. *An aerodynamics investigation for the five 50-storey tower blos proposed for the Ping Shek Estate, Hong Kong*. Teddington, National Physical Laboratory, September 1967. (NPL Aero Special Report 002).
- 48 – WHITBREAD, R. E. On the introduction of turbulence into wind-tunnel investigations for the determination of wind-induced amplitudes of oscillation. In: WIND EFFECTS ON BUILDINGS AND STRUCTURES. *Symposium*, Loughborough, Loughborough University of Technology, 1968. v.2, Paper 32.
- 49 – WOOTTON, L. R.; SCRUTON, C. Aerodynamic stability. *The Modern Design of Wind Sensitive Structures*. Construction Industry Research and Information Association, London. p.65-81, Paper 5, 1970.

Composto na Editora da URGs e
impresso na Livraria e Editora Pallotti em
agosto de 1978

RESERVA TÉCNICA
Editora da UFRGS

EFEITOS DO VENTO EM EDIFICAÇÕES

Joaquim Blessmann

O estudo da ação do vento em construções civis, tanto em obras terrestres como marítimas, deve ser encarado em seu duplo aspecto: meteorológico e aerodinâmico. É isso que faz o Autor em **Efeitos do Vento em Edificações**.

Com relação ao aspecto meteorológico, são considerados a velocidade máxima do vento a esperar durante a vida útil da edificação, bem como a estrutura do vento: perfil material de velocidades médias e sua relação com as rajadas mais violentas; intensidade, macroescala, correlação cruzada e espectro de potência da turbulência atmosférica. Com relação ao aspecto dinâmico, por sua vez, são estudados na obra os diversos coeficientes aerodinâmicos: coeficiente de pressão, de forma, de força global e suas componentes e de torção.

Influência da forma e proporções da edificação, zonas em sucções elevadas, altas sucções locais, pressão interna, interação entre edificações ou elementos estruturais vizinhos são assuntos tratados na parte relativa à ação estática do vento, enquanto no que concerne à ação dinâmica são descritos sucintamente fenômenos de vibração da edificação.

Joaquim Blessmann é Engenheiro Civil, Mestre e Doutor em Ciências pela Divisão de Engenharia Aeronáutica do Instituto Tecnológico da Aeronáutica. Atualmente é professor do curso de pós-graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Outras edições urg

Administração da Ciência
Roy Charles Stubbs

O Anel de Félix Klein
Clóvis Vilanova

Curso de Teoria da Semelhança
Victor Freire Motta

Economia Mineira Nacional
José do Patrocínio Motta

**As Empresas e Sua Administração:
um Enfoque Sistemico**
Bertram M. Gross

Fim do Futuro?
Manifesto Ecológico Brasileiro
José A. Lutzenberger

The Finite Element Technique
C. Brebbia & A. J. Ferrante

Formação da Sociedade
Rio-Grandense
Laudelino T. de Medeiros

Governo Municipal e Desenvolvimento Industrial
Astor Eugênio Hexsel

**Oferta e Procura Educacional;
Pesquisa Realizada no Interior
do Rio Grande do Sul**
Achim Schrader et alii

Petrogênese das Rochas Metamórficas
Helmut G. F. Winkler

**Porto Alegre:
História e Vida da Cidade**
Francisco Riopardense de Macedo

Viga Curva Circular Engastada
Danilo C. Smith & Moacir M. da Silva

SÉRIE ENGENHARIA ESTRUTURAL
Joaquim Blessmann

- 1 — **Efeitos do Vento em Edifícios e Cúpulas (2ª edição)** — Noções de aerodinâmica; vento em edifícios e cúpulas.
- 2 — **Acidentes Causados Pelo Vento (2ª edição)** — Causas aerodinâmicas e estruturais dos acidentes; exemplos de acidentes; conclusões e recomendações.
- 3 — **Intervalo de Tempo Para Cálculo da Velocidade Básica do Vento** — Intervalo de tempo; mudança de intervalo de tempo; conclusões e recomendações.
- 4 — **Considerações Sobre Alguns Tópicos Para Uma Norma de Vento** — Ações locais; inclinação do telhado; forma e proporções da construção; interação e proteção; resumo.
- 5 — **Pressão Interna** — Ensaios: permeabilidade das paredes e lanternins; cálculo da pressão interna; normas; conclusões e recomendações.
- 6 — **Comentários de Alguns Tópicos de Normas de Vento** — Normas francesa, inglesa e belga; relatório da ASCE; conclusões e recomendações.
- 7 — **Efeitos do Vento em Edificações** — Meteorologia: estrutura do vento; aerodinâmica: ação estática e dinâmica do vento; pesquisas em túnel de vento; efeitos nocivos do vento.



Pedidos pelo reembolso postal:

Editora da URS, Rua Jacinto Gomes, 540, 5º andar
90.000 — Porto Alegre — RS