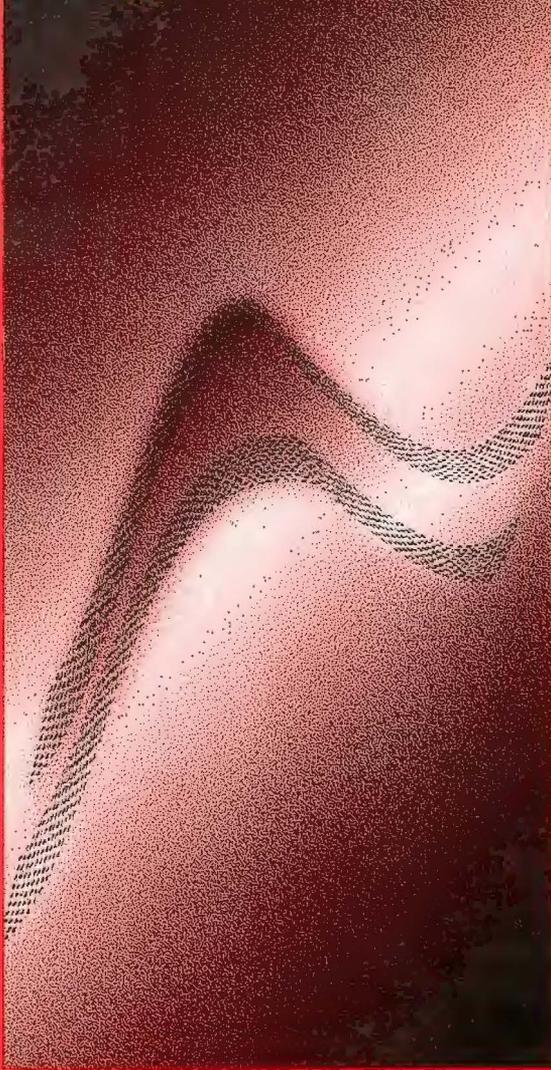




Editora  
da Universidade

Universidade Federal do Rio Grande do Sul



# O vento na engenharia estrutural

---

Joaquim Blessmann

V. 07  
V. 900

# O vento na engenharia estrutural

RESERVA TÉCNICA  
Editora da UFRGS



**Universidade  
Federal  
do Rio Grande  
do Sul**

---

Reitor  
**Hélgio Trindade**

Vice-Reitor  
**Sergio Nicolaiewsky**

Pró-Reitora de Extensão  
**Ana Maria de Mattos Guimarães**

---

**EDITORA DA UNIVERSIDADE**

Diretor  
**Sergius Gonzaga**

**CONSELHO EDITORIAL**

**Dina Celeste Araújo Barberena**

**Homero Dewes**

**Irion Nolasco**

**Luiz Osvaldo Leite**

**Maria da Glória Bordini**

**Newton Braga Rosa**

**Renato Paulo Saul**

**Ricardo Schneiders da Silva**

**Rômulo Krafta**

**Zita Catarina Prates de Oliveira**

**Sergius Gonzaga, presidente**



# O vento na engenharia estrutural

---

Joaquim Blessmann

RESERVA TÉCNICA  
Editora da UFRGS



Editora  
da Universidade

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

© de Joaquim Blessmann  
1ª edição: 1995

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

Capa: Paulo Antonio da Silveira  
Editoração: Geraldo F. Huff  
Revisão: Maria da Graça Storti Féres  
          Maria da Glória dos Santos Silveira  
Editoração eletrônica: Fernando Piccinini Schmitt  
Administração: Julio Cesar de Souza Dias

### **Joaquim Blessmann**

Mestre e doutor em Ciências pela Divisão de Engenharia Aeronáutica do Instituto Tecnológico da Aeronáutica. Professor na Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

---

B647v Blessmann, Joaquim.

O vento na engenharia estrutural / Joaquim Blessmann. –  
Porto Alegre : Ed. Universidade/UFRGS, 1995.

1. Engenharia civil – Estruturas – Normas. 2. Ventos – Normas. I. Título.

CDU 624.042.4(083.74)  
551.55(083.74)

---

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

ISBN 85-7025-362-1

*W<sup>2</sup> do registro : 3783*

*W<sup>2</sup> da obra : 1142*

*Data : 16/06/2010*

# SUMÁRIO

## PRIMEIRA PARTE – VELOCIDADE MÉDIA

### 1. Conceitos básicos

1.1. Aquecimento e movimento do ar .....	9
1.2. Estabilidade da atmosfera .....	15
1.3. Massas de ar e frentes .....	16
1.4. Ciclones e anticiclones .....	17

### 2. Ventos fortes

2.1. Considerações gerais .....	19
2.2. Tipos de vento	
2.2.1. Ciclones extratropicais .....	21
2.2.2. Ciclones tropicais .....	22
2.2.3. Torméncias elétricas .....	25
2.2.4. Linhas de tormenta .....	26
2.2.5. Tornados .....	26
2.2.6. Ventos regionais .....	28

### 3. Perfil vertical da velocidade média

3.1. Intervalo de tempo .....	29
3.2. Parâmetros de rugosidade	
3.2.1. Introdução .....	33
3.2.2. Velocidade de fricção .....	35
3.2.3. Coeficiente de arrasto superficial .....	38
3.2.4. Comprimento de rugosidade e lei logarítmica .....	39
3.2.5. Deslocamento do plano zero .....	41
3.2.6. Lei potencial .....	42
3.2.7. Valores dos parâmetros $z_0$ , $c_{as}$ , $\rho$ , $z_g$ .....	43
3.3. Terreno de rugosidade uniforme	
3.3.1. Categorias de rugosidade .....	49
3.3.2. Lei geral das velocidades médias .....	50
3.3.3. Fator de rajada .....	55
3.3.4. Fator $S_2$ .....	59
3.3.5. Exemplos .....	61
3.4. Alteração na rugosidade do terreno	
3.4.1. Considerações gerais .....	67
3.4.2. Expressões matemáticas .....	68
3.4.3. Exemplos .....	72
3.5. Morros e taludes	
3.5.1. Considerações gerais .....	74
3.5.2. Medidas ao vento natural .....	75
3.5.3. Recomendações CECM .....	75

3.5.4. Anteprojeto de Norma ISO, 1990 .....	77
3.5.5. Norma brasileira .....	78
3.6. Norma brasileira .....	80
<b>Referências .....</b>	<b>94</b>
 <b>SEGUNDA PARTE – TURBULÊNCIA</b>	
<b>4. Intensidade da turbulência</b>	
4.1. Turbulência .....	101
4.2. Parâmetros estatísticos .....	104
4.3. Propriedades da turbulência .....	105
4.4. Distribuição de probabilidade .....	106
4.5. Intensidade da turbulência	
4.5.1. Fórmula de Harris-Davenport .....	107
4.5.2. Variação de $\sigma_1$ com a altura .....	113
4.5.3. Componentes da turbulência .....	114
 <b>5. Escala da turbulência</b>	
5.1. Correlação	
5.1.1. Introdução .....	117
5.1.2. Função de autocorrelação .....	117
5.1.3. Função de correlação cruzada .....	120
5.2. Escalas da turbulência	
5.2.1. Introdução .....	123
5.2.2. Escala temporal da turbulência .....	123
5.2.3. Escalas espaciais da turbulência .....	124
5.2.4. Hipótese de Taylor .....	126
5.2.5. Escala longitudinal .....	128
5.2.6. Escalas lateral e vertical .....	131
 <b>6. Espectro da turbulência</b>	
6.1. Introdução .....	142
6.2. Espectro de potência – Conceituação física .....	143
6.3. Espectro de potência – Conceituação matemática .....	147
6.4. Espectro da componente longitudinal da turbulência na macrometeorologia .....	150
6.5. Espectro da componente longitudinal da turbulência na micrometeorologia	
6.5.1. Espectro de Davenport .....	151
6.5.2. Espectro de Harris .....	153
6.5.3. Espectro de von Kármán .....	154
6.5.4. Espectro de Kaimal e outros .....	155
6.5.5. Resumo .....	155
6.5.6. Curvas dos espectros .....	156
6.6. Espectros das componentes lateral e vertical da turbulência na micrometeorologia	
6.6.1. Espectro de Kármán .....	161
6.6.2. Espectro de Kaimal .....	161
6.6.3. Espectro de ESDU .....	162
 <b>Referências .....</b>	 <b>162</b>

**Primeira parte**  
**Velocidade média**



# Capítulo 1

## CONCEITOS BÁSICOS

### 1.1. AQUECIMENTO E MOVIMENTO DO AR

a) O movimento do ar sobre a superfície terrestre (vento) tem como causa imediata principal as diferenças na pressão atmosférica, causadas pela energia proveniente do sol que origina variações na temperatura do ar. As pressões desequilibradas originam forças que deslocam parcelas do ar atmosférico das zonas de maior pressão para as de menor pressão.

A energia do sol 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, mas em boa parte transforma-se em calor ao ser absorvida pela superfície terrestre. Outra parte é absorvida diretamente pela atmosfera ou refletida para o espaço exterior, dependendo das condições de poluição, umidade e cobertura por nuvens. Entretanto, a maior parte do aquecimento da atmosfera deve-se ao calor irradiado pela Terra.

Cerca de 42% da energia solar que atinge a Terra é refletida pela atmosfera (ar, nuvens, pó) e pela crosta terrestre (principalmente pelas partes cobertas por gelo e neve). Os restantes 58% são absorvidos pela atmosfera (vapor d'água, nuvens, ozônio, partículas de aerossol: 15%) e pela crosta (43%), provocando seu aquecimento. A crosta, uma vez aquecida, irradia este calor, em comprimentos de onda muito maiores (da ordem de 10  $\mu\text{m}$ ) que os da radiação incidente, provinda do sol.

b) Absorção e irradiação dependem das características do solo. Por exemplo, a absorção da energia solar é de cerca de 25% para a neve, 80 a 90% para campos gramados, 95% para florestas densas, 75% para areia seca, 75 a 95% para terreno arado e 60 a 90% para água (depende do ângulo de incidência dos raios solares).

c) Neste processo a atmosfera funciona à semelhança do vidro de uma estufa: a energia solar que a atmosfera deixa passar é absorvida pela superfície terrestre e irradiada por esta como calor (radiação infra vermelha), a maior parte do qual é impedido de escapar da atmosfera. Esta compõe-se principalmente de oxigênio (21%) e nitrogênio (78%), que são bastante "transparentes" tanto à radiação provinda do sol como à radiação infra vermelha que a superfície terrestre emite quando aquecida. Entretanto, o vapor d'água (em quantidade muito variável) e o bióxido de

carbono (0,03%) são bastante transparentes à radiação solar mas pouco ao infra vermelho, mantendo assim a atmosfera aquecida por um processo semelhante ao de uma estufa ("efeito de estufa").

d) O simples aquecimento do ar em uma certa região não causará imediatamente deslocamentos junto à superfície terrestre, pois a pressão aí não variou. A experiência ideal proposta por Humphreys e exposta por Simiu e Scanlan<sup>1</sup> é bastante elucidativa (Fig. 1.1):

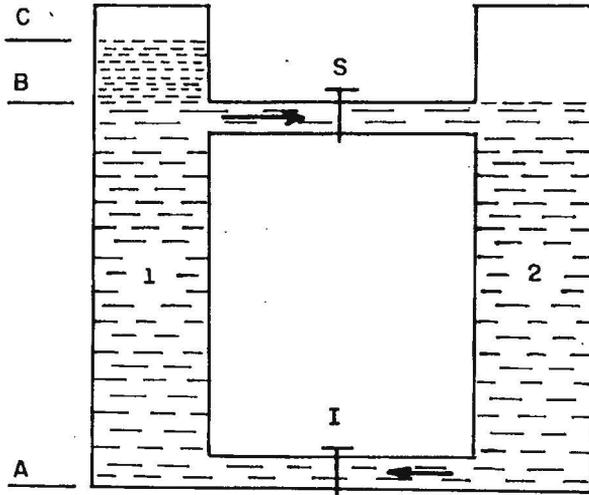


Fig. 1.1 - Circulação atmosférica

Consideremos os reservatórios 1 e 2, contendo um fluido de temperatura uniforme até o nível B, estando fechadas as torneiras dos tubos inferior (I) e superior (S). Se a temperatura no reservatório 1 é aumentada, o fluido neste reservatório expande-se, diminuindo sua densidade e alcançando um nível mais alto C. Entretanto, o peso total do fluido contido em 1 continua o mesmo e, conseqüentemente, continuará a mesma a pressão no nível A. Se a torneira do tubo I for aberta, não haverá fluxo entre 1 e 2, pois as pressões no nível A são iguais nos dois reservatórios. Entretanto, se for aberta a torneira do tubo S, haverá fluxo neste tubo, causado pela diferença de pressão C - B, entre os níveis C e B, com movimento de fluido de 1 para 2. Com isto diminui o peso de fluido no nível A do reservatório 1 e aumenta no mesmo nível do reservatório 2. Abrindo agora a torneira I, estabelecer-se-á no tubo inferior um fluxo de 2 para 1. Forma-se assim uma circulação que continua enquanto for mantida a diferença de temperatura entre os reservatórios 1 e 2.

e) Assim, pois, variações locais (em uma gama bastante extensa de dimensões) na temperatura do ar pelo aquecimento diferenciado causam diferenças nas pressões e estas originam o movimento do ar, que tende a ser deslocado de áreas de alta pressão para outras de baixa pressão, perpendicularmente às linhas isobáricas.

Este movimento, principalmente para grandes massa de ar, é afetado pela rotação da Terra, que provoca dois efeitos. O primeiro deles está relacionado com a aceleração centrífuga (que se manifesta mesmo em massas de ar sem movimento) e pode ser desprezado. O segundo efeito deve ser considerado e é ocasionado pela chamada aceleração de Coriolis, que se manifestará sempre que houver massas de ar em movimento em relação à superfície da Terra. A força correspondente a esta aceleração é denominada **força de Coriolis** e age perpendicularmente à direção do movimento da partícula de ar em estudo, causando um desvio no movimento das partículas de ar, para um observador situado na Terra.

Ainda temos as forças de inércia causadas pelas trajetórias curvas das partículas de ar (força centrífuga).

f) Vejamos com mais detalhes a força de Coriolis.

Seja **S** um sistema fixo de referência (coordenadas **x,y**) e **S'** um sistema de referência que gira em torno de **O** com uma velocidade angular constante  $\omega$ . Seja **P** uma partícula de massa **m** que se move em **S'** (Na Fig.1.2, em um plano perpendicular ao eixo **OO'**) ao longo de uma trajetória **T**, com uma velocidade **v'**. Aplicando a segunda lei de Newton ( $F = m a$ ) chega-se à conclusão de que devem ser consideradas duas forças fictícias: uma força de inércia (centrífuga) **F<sub>i</sub>** e a força de Coriolis **F<sub>C</sub>**, dadas, respectivamente, por:

$$F_i = m \omega^2 r'$$

$$F_C = 2 m \omega v' \sin \varphi \quad (\varphi : \text{ângulo entre os vetores } \vec{\omega} \text{ e } \vec{v}'^T).$$

A primeira delas atua na direção radial (**r'**), no sentido que se afasta do centro de rotação **O'**. A segunda tem a direção e sentido definidos girando o vetor  $\vec{v}'^T$  de 90 em sentido contrário ao da rotação  $\omega$ .

Para o caso da rotação da Terra pode ser escrito:

$$F_C = m f v'$$

sendo

**m** – massa da partícula de ar;

**v** – velocidade desta partícula para um sistema de referência fixo à Terra;

**f** – parâmetro de Coriolis :  $f = 2 \omega \sin \varphi$  ;

$\omega$  – velocidade angular da Terra;

$\varphi$  – latitude.

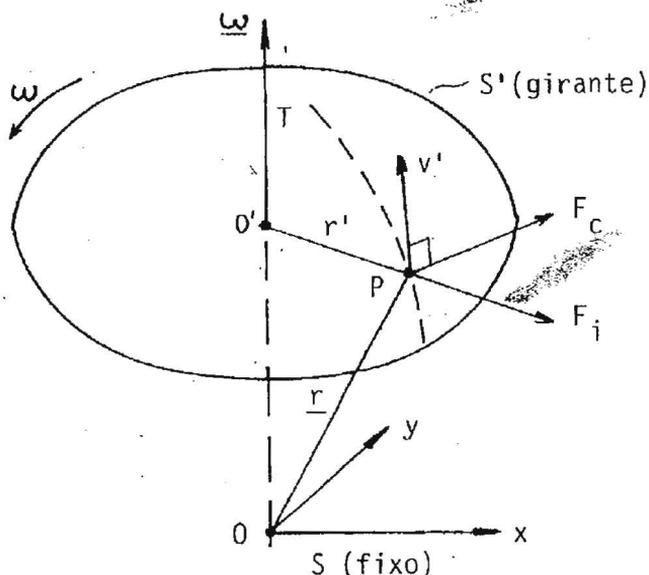


Fig. 1.2 - Força de Coriolis

Valores de  $f$  em função de  $\varphi$  são dados a seguir:

$\varphi$ :	0°	10°	20°	30°	45°	60°	75°	90°
$10^4 f(\text{s}^{-1})$ :	0	0,2533	0,4988	0,7292	1,0313	1,2630	1,4087	1,4584

g) Estudemos o equilíbrio das forças acima comentadas em região suficientemente afastada da superfície terrestre, de modo que não haja interferência das forças de atrito (portanto, em uma região fora da camada limite atmosférica; nesta a rugosidade da superfície terrestre origina forças de atrito ponderáveis). Admitamos também que o estado de pressões se mantenha constante por um tempo suficiente para o estabelecimento de um vento em condições permanentes. Neste caso, o equilíbrio deverá ser estabelecido entre as forças acima citadas. Temos dois casos a considerar:

### 1º - Isóbaras paralelas

Teremos equilíbrio entre a força de Coriolis e a força de pressão (respectivamente  $F_c$  e  $P$ ), ambas perpendiculares às isóbaras e de sentidos contrários. É o chamado **vento geostrófico**, paralelo às isóbaras. Esta afirmação merece maiores explicações, pois à primeira vista parece que a força causada pelo gradiente de pressão originará um vento per-

pendicular às isóbaras. Isto estaria correto se a força de pressão fosse a única força a ser considerada. Porém não podemos desprezar a força de Coriolis, originada pelo movimento de rotação da Terra. A teoria sobre a aceleração de Coriolis mostra, como vimos, que a força correspondente é perpendicular, em cada ponto, ao vetor velocidade da partícula de ar. Admitamos que a partícula de ar esteja se movendo perpendicularmente às isóbaras, em um campo de isóbaras paralelas (Fig.1.3.a). A força de Coriolis correspondente a esta partícula,  $F'_c$ , terá direção perpendicular à direção da força de pressão  $P$  (Fig.1.3.b), e a força resultante será  $R'$ . Porém, para o movimento da partícula na direção  $R'$  a força de Coriolis  $F''_c$  será perpendicular a  $R'$ , causando uma nova força resultante  $R''$  (Fig.1.3.c). E assim sucessivamente, até ser atingido um regime permanente, o que só acontecerá quando o movimento da partícula de ar se fizer na direção das isóbaras (Fig.1.3.d). A velocidade do vento geostrófico fica definida pelo equilíbrio entre as forças de pressão e a força de Coriolis.

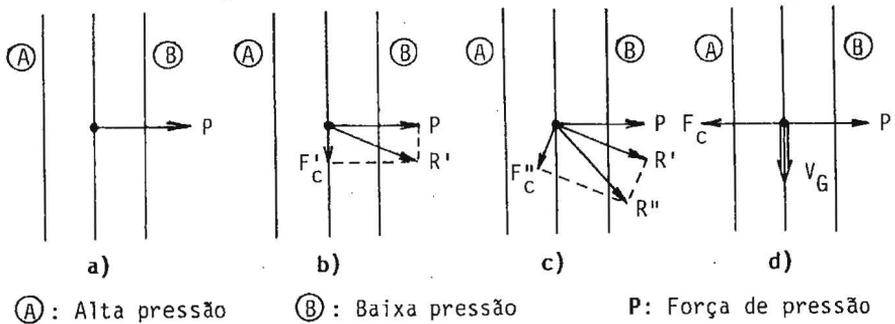


Fig. 1.3 - Isóbaras paralelas. Vento geostrófico

## 2º - Isóbaras curvas

Neste caso o equilíbrio se fará entre a força de pressão, a força de Coriolis e a força de inércia, centrífuga ( $F_f$ ). O vento correspondente é designado por **vento gradiente**, tangente às isóbaras. Em outras palavras, o gradiente de pressão causa uma força de pressão que é equilibrada por duas forças: uma ocasionada pela rotação da Terra (força de Coriolis) e outra pela curvatura das trajetórias das partículas de ar (força centrífuga), conforme indica a Fig.1.4.

O vento gradiente confunde-se com o vento geostrófico se as isóbaras forem paralelas.

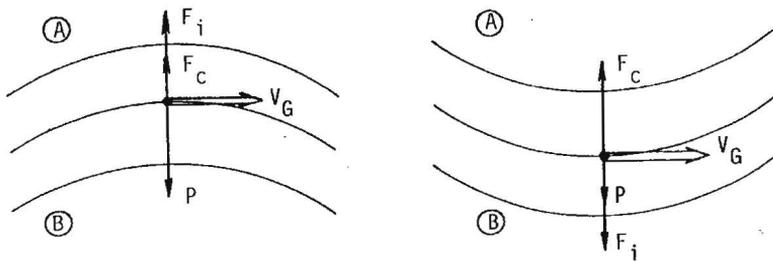


Fig. 1.4 - Isóbaras curvas. Vento gradiente no hemisfério sul

h) Denomina-se de **altura gradiente** a altura, medida a partir da superfície da Terra, na qual a velocidade do vento atinge a velocidade gradiente. esta altura situa-se, em geral, entre 250 e 600 metros. Há indícios de que, em certos casos, pode chegar a alturas bem superiores.

Abaixo da altura gradiente situa-se a **camada limite atmosférica**, na qual a velocidade do vento é alterada por diversas causas. Sua direção não será mais tangente às isóbaras. Nesta região as características do vento dependem principalmente da topografia do terreno, da forma, dimensões e distribuição dos obstáculos naturais e artificiais (a chamada **rugosidade superficial**) e da variação da temperatura na direção vertical. Todos estes fatores originam turbulência, que rapidamente se dissemina por toda a camada limite atmosférica. Nesta, a velocidade média do vento varia desde zero, junto à superfície, até a velocidade gradiente, na altura gradiente. Quanto maior a rugosidade superficial, tanto maior será a agitação mecânica provocada no ar, maior o intercâmbio turbulento de quantidade de movimento e maior a altura interessada neste processo. A altura gradiente é maior em uma cidade do que em campo aberto ou sobre o mar, por exemplo.

As forças de atrito que agem entre as partículas situadas na camada limite atmosférica,  $F_a$ , fazem com que o vetor velocidade da partícula seja oblíquo à isóbara, quer esta seja reta (Fig.1.5) ou curva. Esta obliquidade aumenta desde zero, na altura gradiente (onde os efeitos da rugosidade são desprezáveis), até um máximo junto ao terreno, onde pode atingir valores superiores a  $45^\circ$ , em terrenos de grande rugosidade. Sobre o oceano, esta obliquidade é de cerca de  $10^\circ$ .

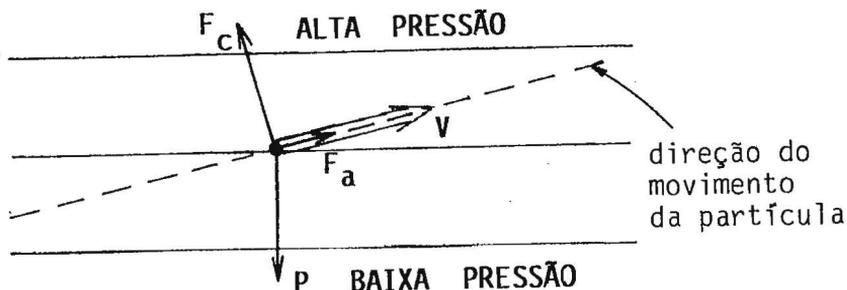


Fig. 1.5 - Vento na camada limite atmosférica

## 1.2. ESTABILIDADE DA ATMOSFERA

a) Também à atmosfera é aplicável a conceituação da mecânica dos sólidos de equilíbrio estável, indiferente (neuro) e instável. Lembraremos o clássico exemplo do cone de revolução reto. Para averiguar o tipo de equilíbrio existente, dá-se um pequeno deslocamento ao cone. Se ele voltar à posição inicial, o equilíbrio é estável (cone apoiado pela base); se permanecer na nova posição, o equilíbrio é indiferente ou neutro (cone apoiado lateralmente); se continuar a se deslocar, o equilíbrio é instável (cone apoiado pelo vértice).

b) A pressão atmosférica é proporcional à massa de ar acima do nível considerado e, portanto, diminuirá com o aumento da altitude. Se uma certa massa de ar sobe ou desce, ela será respectivamente expandida ou comprimida, para se adaptar à pressão existente na região para a qual se deslocou.

A uma diminuição de pressão (expansão) corresponde uma diminuição de temperatura (esfriamento) e a um aumento de pressão (compressão) corresponde um aumento de temperatura (aquecimento) da massa de ar deslocada, de acordo com as leis da termodinâmica.

Em geral o movimento vertical de uma massa de ar é suficientemente rápido para que possa ser desprezado o intercâmbio de calor entre ela e a atmosfera circundante; isto é, o processo pode ser considerado **adiabático**.

c) O gradiente térmico vertical do ar seco que sobe adiabaticamente é aproximadamente  $1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ . Este gradiente diminui com o aumento da umidade, podendo chegar a  $0,5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ .

Se uma massa de ar é deslocada para cima em condições que podem ser consideradas adiabáticas, ela sofre uma expansão e conseqüentemente sua temperatura baixará. Haverá equilíbrio térmico com o ar circundante se a diminuição da temperatura deste ar com a altitude for igual à diminuição da temperatura da massa de ar que sobe adiabaticamente. Nestas condições, a atmosfera está em **equilíbrio neutro** (ou estabilidade neutra) e a temperatura tem um **gradiente térmico vertical adiabático**.

d) Se a temperatura do ar circundante diminui mais rapidamente que o gradiente térmico vertical adiabático, uma massa de ar que sobe adiabaticamente ficará mais quente e mais leve que o ar circundante e continuará a subir. Formar-se-ão correntes de **convecção**, com intercâmbio de massas de ar de diferentes alturas. A atmosfera está em **equilíbrio instável** e sua temperatura tem um **gradiente térmico vertical superadiabático**.

e) Se a temperatura do ar circundante diminui menos rapidamente que o gradiente térmico vertical adiabático, ou mesmo aumenta com a altitude (**inversão**), uma massa de ar que sobe adiabaticamente ficará mais fria e mais pesada que o ar circundante e tenderá a voltar a sua posição inicial. A atmosfera está em **equilíbrio estável**.

### 1.3. MASSAS DE AR E FRENTES<sup>2</sup>

a) As **massas de ar** (senso stricto) são massas de alta pressão (anticiclones) caracterizadas por suas grandes dimensões (que podem ser comparáveis às dimensões de continentes e oceanos) e por uma razoável uniformidade de temperatura e umidade em planos horizontais.

Suas características físicas, adquiridas nas regiões onde se originaram, podem ser lentamente modificadas a medida que estas massas se deslocam sobre regiões com características diferentes.

De acordo com sua origem, são classificadas em **tropicais** e **polares**. Cada uma delas pode ser **marítima** ou **continental**.

b) Massas de ar que colidem, usualmente não podem se misturar (isto só acontece quando as massas de ar têm a mesma temperatura e umidade). Forma-se uma **superfície frontal** que separa as duas massas de ar. A intersecção desta superfície com a superfície terrestre constitui uma **frente**.

A massa de ar mais fria, sendo mais pesada, fica abaixo da mais quente e a ergue, independentemente de estar uma delas em movimento ou não. A frente é **estacionária** se a superfície frontal não se mover. Em

geral uma das massas de ar está em movimento; a frente toma o nome da massa de ar que está se deslocando. Assim, em uma **frente fria** é a massa de ar fria que se desloca e em uma **frente quente** é a massa de ar quente que se desloca.

c) A superfície frontal de uma frente fria, em um corte vertical perpendicular à frente, apresenta-se com a forma aproximada de uma elipse, devido ao retardo junto à superfície terrestre causado pela rugosidade desta superfície (Fig.1.2.a). Esta forma abrupta da superfície frontal causa uma subida rápida do ar quente, de modo que as tormentas em uma frente fria são geralmente breves, embora possam ser violentas.

Uma frente fria avança com uma velocidade variável, sendo 8m/s (30km/h) uma velocidade representativa. São mais rápidas no inverno que no verão, pois no inverno o ar é mais frio e exerce maior pressão. Frentes muito frias produzem trovoadas de extrema violência e, algumas vezes, tornados.

O avanço de uma frente quente é mais lento, em torno de 7m/s (25km/h) ou menos. A superfície frontal apresenta-se com a forma de um plano de pouca inclinação (Fig.1.6.b)

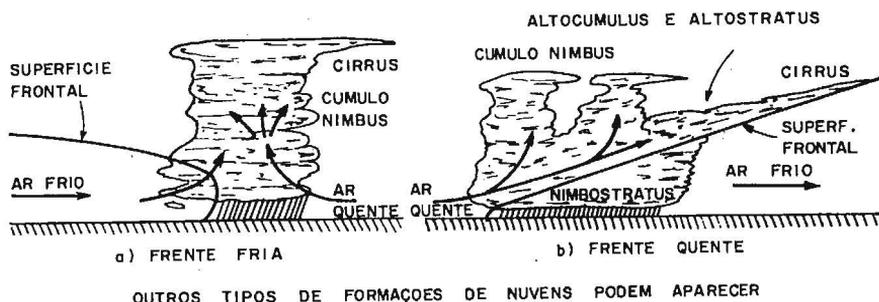


Fig. 1.6 - Superfícies frontais em frentes frias e quentes

#### 1.4. CICLONES E ANTICICLONES

a) Em meteorologia, **ciclone** indica um movimento circulatório do ar em torno de um centro de baixa pressão, independentemente de serem os ventos violentos ou não. Em um **anticiclone** o movimento circulatório dá-se em torno de um centro de alta pressão. Em um ciclone a circulação do ar faz-se no sentido horário no hemisfério sul e no sentido anti-horário no hemisfério norte. Em um anticiclone os sentidos de circulação são invertidos.

Os ventos nos anticiclones jamais atingem as altas velocidades que aparecem em ciclones bem desenvolvidos. Entretanto, os anticiclones podem atingir dimensões superiores às dos ciclones.

Os diâmetros dos ciclones são da ordem de 1000km. Geralmente eles trazem mau tempo, com precipitações e ventos fortes. Quanto a sua origem, eles são classificados em **tropicais e extratropicais**. Os tropicais formam-se sobre vastas extensões de oceanos, entre as latitudes 5° e 30°, tanto sul como norte, em ar úmido e quente. Sua energia provém do calor latente liberado pela condensação do vapor d'água. Os extra tropicais formam-se geralmente ao longo de frentes frias. Sua energia provém do gradiente de temperatura na região das frentes frias.

Os anticiclones geralmente trazem bom tempo, como temperaturas altas ou baixas por períodos relativamente longos sem alterações.

## Capítulo 2

# VENTOS FORTES

### 2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

a) Como já foi exposto, a causa básica do vento natural é o aquecimento não uniforme da atmosfera, principalmente a partir da energia solar absorvida pela crosta terrestre e irradiada para a atmosfera sob a forma de calor.

Designaremos por **tormentas** ("storms") aos sistemas meteorológicos que originam ventos de alta velocidade (ventos fortes), independentemente de seu mecanismo de formação.

b) Para a engenharia estrutural é de interesse conhecer a **velocidade média** do vento e as flutuações em torno desta média. A velocidade média é determinada para intervalos de tempo entre 10min e 1h. As flutuações instantâneas em torno da média são designadas por **rajadas**. Na prática as rajadas são determinadas como médias sobre pequenos intervalos de tempo, da ordem de segundos, pois os anemômetros não conseguem medir valores realmente instantâneos.

c) Estas flutuações têm sua origem tanto na agitação (**turbulência**) do escoamento médio causada pela rugosidade natural e artificial da superfície terrestre como nos processos de convecção causados por gradientes térmicos. Em tormentas de origem ciclônica e de longa duração, com ventos de alta velocidade, a rugosidade da superfície terrestre causa uma turbulência tão intensa que a mistura entre camadas adjacentes de ar impede processos de convecção. O gradiente térmico vertical pode ser considerado adiabático e, conseqüentemente, a estabilidade é neutra. As flutuações são quase que exclusivamente causadas por agitação mecânica do ar, com a formação de um grande número de **turbilhões** ou **redemoinhos**.

A estabilidade de ciclones de grandes dimensões (e, conseqüentemente, de longa duração), tanto os tropicais como os extratropicais, em seu estágio maduro, pode, portanto, ser considerada como neutra<sup>3</sup>.

Os ciclones extratropicais originam os ventos fortes que apresentam o melhor equilíbrio dinâmico com a rugosidade da superfície terrestre. São os ventos fortes mais bem estudados e servem de base para a maioria

das normas sobre forças causadas pelo vento. Estes ventos são chamados, na gíria profissional, de ventos "bem comportados".

Pelo que vimos, também os ciclones tropicais de grandes dimensões, em seu estágio maduro, podem, para fins de engenharia estrutural, ser considerados como atendendo às especificações das normas de vento no que se refere à variação da velocidade média com a altura e às características da turbulência, ambos fortemente influenciados pela rugosidade da superfície terrestre. A este respeito, Simiu e Lazier<sup>4</sup> apresentam o seguinte:

Pesquisas recentes de natureza preliminar sugerem que nas primeiras centenas de metros ("lowest few hundred meters") da atmosfera, as diferenças entre perfis de velocidades médias correspondentes a furacões (ciclones tropicais com ventos acima de 120km/h) maduros e tormentas extratropicais são relativamente pequenas e podem ser desprezadas nas aplicações da engenharia estrutural.

Entretanto, o mesmo Simiu<sup>5</sup>, em trabalho publicado pouco antes, chamara a atenção para diferenças conceituais no comportamento dos ciclones extratropicais e tropicais. Nos primeiros, o escoamento na atmosfera livre (acima da camada limite) pode ser considerado geostrófico (as forças de inércia causadas pela curvatura das isóbaras são desprezáveis). Em consequência, o perfil de velocidades médias próximo a terreno horizontalmente uniforme segue uma lei logarítmica ou, com boa aproximação, uma lei potencial. "Nos ciclones tropicais maduros a distribuição da pressão atmosférica é tal que a distâncias relativamente pequenas, da ordem de quilômetros do centro da tormenta, as velocidades do vento são muito altas. Nesta região de altas velocidades o escoamento é dominado pelas forças de inércia devidas à curvatura das isóbaras (o escoamento na atmosfera livre é chamado **ciclostrófico**). "É de esperar que a presença de grandes forças de inércia nos furacões (ciclones tropicais com ventos de alta velocidade) resulte em diferenças entre os perfis de velocidade de ventos de furacões e os perfis logarítmicos típicos de tormentas extratropicais", conclui Simiu.

Simiu discute os resultados de observações que mostram que a velocidade do vento aumenta menos com a altura nos furacões do que nas tormentas extratropicais. Entretanto, estas observações não são suficientemente confiáveis para conclusões definitivas. Assim, conclui Simiu, "devido a falta de observações conclusivas ou de estudos analíticos relevantes, nenhuma distinção entre perfis de ventos de furacões e de tormentas extratropicais é feita presentemente nas normas, apesar da necessidade, acima indicada, de tal distinção".

Também transcreveremos as conclusões de Davenport<sup>3</sup>: "Tormentas maduras de grandes dimensões, tropicais ou extratropicais, apresentam

estabilidade aproximadamente neutra, com nenhuma tendência marcada para intercâmbios térmicos violentos. A influência dominante no perfil de velocidades nestas tormentas não é estabilidade mas sim a rugosidade superficial". A mesma idéia é apresentada na Ref. 6: "Observações dos furacões Edna e Ione (...) aparentemente confirmam a afirmação geral de que a estabilidade de tormentas de grandes dimensões e maduras, da variedade tropical ou extratropical, é aproximadamente neutra".

d) Há tormentas que contêm componentes importantes de origem térmica, com ventos de características consideravelmente afastadas das indicadas em normas de vento, tais como furacões em seus estágios iniciais, linhas de tormentas e trovoadas ("thunderstorms"), estas últimas também conhecidas pelo nome de tormentas elétricas. As trovoadas, em algumas regiões situadas em latitudes temperadas, podem causar ventos de velocidades superiores às de ventos de origem ciclônica.

Também não se aplica o conceito de vento em equilíbrio dinâmico com a rugosidade da superfície terrestre a ventos locais causados ou influenciados pela costa marítima ou por encostas de montanhas. Muito menos aos tornados, movimentos turbilhonares muito intensos e localizados, de origem térmica.

Até que ponto os valores indicados nas normas de vento podem ser aplicados a ventos como os acima citados, é um problema ainda não resolvido e que necessita estudos e pesquisas adicionais. Estudos probabilísticos de Nanni e Riera<sup>7</sup> para trovoadas no Rio Grande do Sul mostram que estas originam velocidades extremas maiores que os ciclones extratropicais, velocidades estas medidas a 10 m acima do terreno. Lembremos, porém, que a velocidade média do vento nas trovoadas cresce menos rapidamente com a altura do que nos ciclones extratropicais.

## **2.2. TIPOS DE VENTO**

Não trataremos aqui de ventos oriundos da circulação geral da atmosfera (alísios, monções, etc.), mas apenas de ventos de superfície mais localizados e de alta velocidade, que são os que interessam à engenharia civil.

### **2.2.1. Ciclones extratropicais**

a) São movimentos circulatórios do ar em torno de centros de baixa pressão, originados ou pela ação mecânica de cadeias de montanhas sobre correntes atmosféricas de grandes dimensões ou pela interação de massas de ar ao longo de frentes. Estas tormentas, em seu estado

“maduro”, são conhecidas como “sistemas de pressão plenamente desenvolvidos”, ou simplesmente **tormentas EPS** (“extended mature pressure systems”, ou “extratropical pressure systems”). São caracterizadas por uma atmosfera verticalmente estável e sopram mantendo uma velocidade média razoavelmente constante por até algumas dezenas de horas. Attingem grandes dimensões, que em geral variam de algumas centenas a alguns poucos milhares de quilômetros de diâmetro.

b) Em geral uma frente quente move-se lentamente e não causa condições violentas de tempo. Frentes frias podem mover-se mais rapidamente e causam condições de tempo severas, como trovoadas e tornados. Perturbações na velocidade, temperatura e pressão causam ondas na superfície frontal que se propagam como ondas em um meio contínuo. Em casos extremos estas ondulações aumentam de amplitude, enrolam-se em forma de vórtices, dando origem aos ciclones ou tormentas extratropicais.

c) As tormentas extratropicais de maiores dimensões e duração são as que estão associadas ao mecanismo de transferência de calor do equador para os pólos através de sistemas de baixa pressão (ciclones) de grandes dimensões. A diferença de temperatura produz o escoamento básico na direção norte-sul, enquanto que a rotação da Terra gera o movimento na direção leste-oeste e determina o sentido de circulação do ciclone (sentido horário no hemisfério sul). Estes ciclones formam-se ao longo de frentes frias polares e constituem a fonte mais comum de ventos fortes em latitudes temperadas.

### **2.2.2. Ciclones tropicais**

a) São semelhantes na forma aos ciclones extratropicais, porém são mais intensos e mais localizados. 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 e originam-se entre as latitudes 5° e 30°, tanto norte como sul. Não se formam próximo ao Equador, pois aí a força de Coriolis é pequena (nula sobre o Equador) e não pode iniciar o movimento circulatório de grandes massas de ar.

Este movimento circulatório conduz o ar úmido e quente para o seu centro, forçando-o então a subir, expandir-se e esfriar-se. Com isto, o vapor d’água, contido em grande quantidade no ar inicialmente quente e úmido, é condensado. Este processo continua enquanto houver ar úmido e quente, aumentando constantemente as dimensões do ciclone. A vio-

lência dos ciclones tropicais deve-se às enormes quantidades de energia liberadas pela contínua condensação.

b) O centro de um ciclone tropical é uma zona de baixa pressão. O sentido de giro, para quem olha de cima para baixo, é, conforme já foi exposto anteriormente, horário no hemisfério sul e anti-horário no hemisfério norte. Ao menos durante sua formação os ciclones tropicais deslocam-se de leste para oeste. Formam-se no oceano Índico e no Pacífico, tanto ao norte como ao sul do Equador. No oceano Atlântico, formam-se somente ao norte do Equador, pois ao sul as condições não são favoráveis. Entretanto, a publicação *Windstorm – New loss dimensions of a natural hazard*, da Companhia de Resseguros de Munique, 1990, 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.”

Tal afirmativa baseia-se em estudos que indicam um aumento do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), da atmosfera de, no mínimo, 100% no próximo século, agravando o efeito de estufa, com um conseqüente aumento da temperatura dos oceanos e da atmosfera.

c) Ao se adentrarem nos continentes, as perdas por atrito aumentam e, além disso, cessa a fonte de energia, fazendo com que, paulatinamente, os ciclones tropicais se desfaçam poucos dias depois de alcançarem a costa. Também podem se desfazer por entrarem em zonas mais frias dos oceanos.

Nos primeiros 150 km sobre terra a velocidade do vento diminui, via de regra, entre 30 e 40%.

d) Ciclones tropicais com velocidades de ventos próximos à superfície (“ventos de superfície”) iguais ou superiores a 120 km/h recebem nomes especiais, variáveis com a região:

- furacão (“hurricane”, em inglês; “huracán”, em espanhol), nos Estados Unidos da América e no golfo do México;
- tufão (“typhoon”, em inglês), no oceano Índico e mares da China;
- “willy-willy”, na Austrália;
- “baguio”, nas Filipinas.

e) Os furacões têm uma ação destrutiva considerável, tanto pela ação direta dos ventos de superfície (que podem alcançar 250 km/h – 70 m/s – ou mais) como pelas violentas chuvas que os acompanham.

Embora possa se indicar 1000 km como uma dimensão típica dos ciclones tropicais, ventos de velocidades destrutivas raramente atingem uma distância acima de 100 km, a partir de seu centro, onde se situa o "olho", com um diâmetro em torno de 20 km.

f) Um esquema de um ciclone tropical típico, em corte vertical, pode ser examinado na Fig.2.1, onde estão indicadas quatro zonas com características bem definidas:

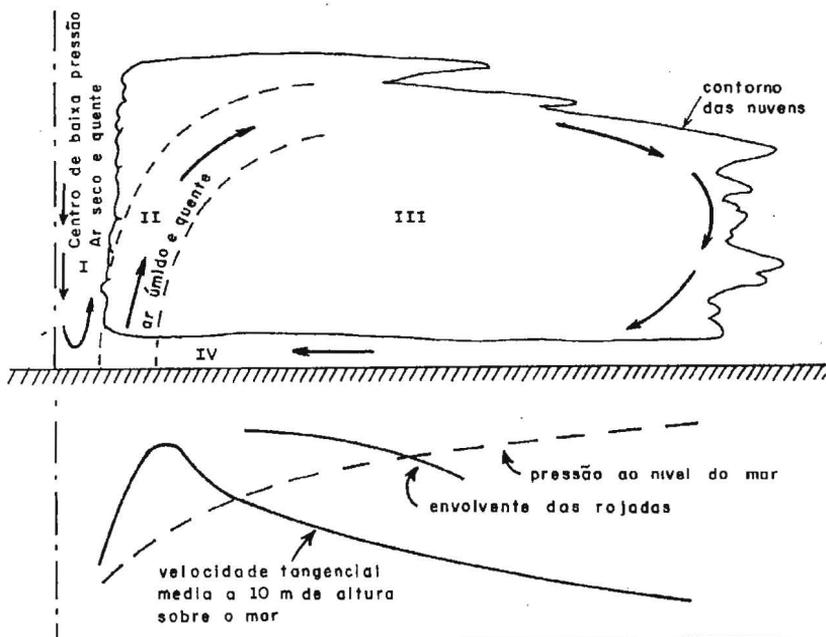


Fig. 2.1 - Esquema de um ciclone tropical.

I – O núcleo ou "olho" é um centro de baixa pressão, com ar seco e calmo ou com brisas suaves. O céu está geralmente sem nuvens. O ar seco de altitudes elevadas desce suavemente no centro e sobe junto à periferia desta zona.

II – Vórtice intenso, no qual ar úmido e quente sobe, expande-se e esfria, condensando-se o vapor d'água e liberando o calor latente de condensação, que aquece o ar circundante. É a zona das maiores velocidades tangenciais do vento.

III – Vórtice de velocidades tangenciais baixas, que diminuem à medida que aumenta a distância ao centro do ciclone.

IV – Camada limite atmosférica.

g) Grupamos a seguir os valores correspondentes a algumas características de três ciclones tropicais de violência excepcional<sup>8</sup>: Tracy, na Austrália, em 1974; Camille, USA (Costa do Golfo, zona do Mississippi), em 1969; Celia, Texas, USA, em 1970.

	Tracy	Camille	Celia
Pressão central (mbar)	940-950	905-915	940-950
Velocidade máxima do vento (m/s)	60-75	75-85	70-75
Diâmetro do núcleo (km)	8-10	8-10	20-30
Raio com ventos acima de 50m/s (km)	10-12	30-50	25-30
Velocidade de avanço (m/s)	1,7-2,2	5,6-6,9	5,6-6,9
(km/h)	6-8	20-25	20-25

### 2.2.3. Tormentas elétricas

a) Conhecidas também com as designações de **trovoadas** ou **tormentas TS**. São caracterizadas por uma atmosfera verticalmente instável, i.e., com gradiente térmico vertical considerado. Aparecem violentos movimentos verticais de ar, com formação de nuvens a grandes alturas, às vezes acima de 22 km.

A força ascensional que movimenta verticalmente o ar pode ter sua origem no aquecimento da superfície terrestre, em uma frente fria, na diferença de temperatura entre terra e mar ou no movimento do ar subindo a encosta de montanhas.

b) Três estágios podem ser caracterizados no desenvolvimento de uma tempestade elétrica:

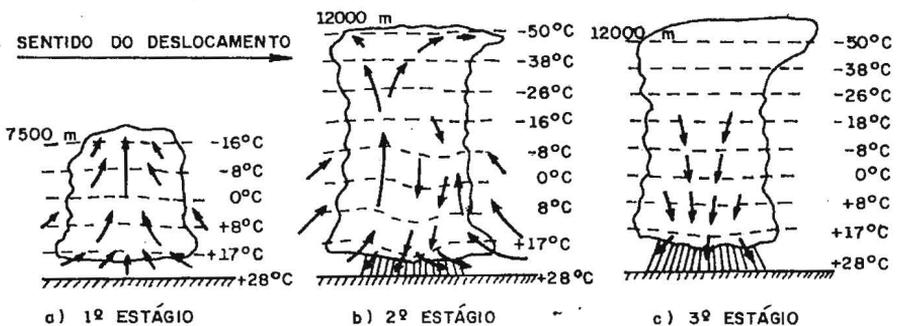


Fig. 2.2 - Desenvolvimento de uma tempestade elétrica

**1º estágio** (Fig.2.2.a) – Formação de uma nuvem cumulus, pela elevação de ar quente e úmido até uma altura de cerca de 8 km, sendo a

temperatura do ar circundante menor que a do ar ascendente. Trata-se de um caso de equilíbrio instável da atmosfera: o ar úmido continua subindo.

**2º estágio** (Fig.2.2.b) – A nuvem transforma-se em uma cumulonimbus, com uma altura de 12 km ou mais. As baixas temperaturas aí existentes (abaixo do ponto de congelamento da água) originam gotas de água, cristais de neve e partículas de gelo. Chega um momento em que estas gotas, cristais e partículas não podem se manter em equilíbrio com as correntes ascendentes de ar, e começa a precipitação. Chuva, neve e gelo, ao caírem esfriam o ar e a precipitação é intensificada. A fricção destes elementos com o ar origina correntes descendentes de ar, ao mesmo tempo que continuam correntes ascendentes de ar quente.

A chegada ao solo das correntes descendentes é geralmente brusca e caracterizada por rajadas violentas e chuva torrencial. Este estágio (estágio maduro) geralmente dura de 5 a 30 minutos.

**3º estágio** (Fig.2.2.c) -- As correntes descendentes aumentam em área transversal até tomarem conta de toda a nuvem. Como não há mais ar quente e úmido subindo, a precipitação diminui e cessa.

c) A fricção causada pela chuva e gelo origina cargas elétricas positivas e negativas, em diversas partes da nuvem. Quando a diferença de potencial elétrico entre partes de uma nuvem, ou entre nuvens, ou entre nuvem e solo torna-se suficientemente alta, resultam descargas elétricas (raios). O súbito aquecimento do ar causado por estas descargas causa sua rápida expansão, originando uma intensa vibração do ar (trovão).

#### **2.2.4. Linhas de tormenta**

As linhas de tormenta ("squall lines") são linhas de instabilidade de grande extensão na direção transversal à direção de movimento de uma frente fria, com tormentas em diversos estágios de desenvolvimento.

Originam-se quando uma frente fria de movimento rápido desloca-se contra uma massa de ar quente, úmido e de instabilidade acentuada. Esta situação origina, a cerca de 300 km adiante da frente, uma linha de tormentas de grande violência, com ventos excepcionalmente fortes.

Podem ocorrer entre os paralelos de 20° e 50°, em ambos os hemisférios.

#### **2.2.5. Tornados**

a) São os temporais mais violentos, com um múltiplo poder de destruição: pelas altas velocidades horizontais dos ventos tangentes ao movimento de circulação, pela depressão e altas velocidades verticais em seu núcleo ("olho") e pelos verdadeiros projéteis que arremessa. Estes

projéteis são formados por detritos e objetos que o tornado apanha em sua trajetória ou por escombros de edificações, veículos, árvores, pequenas construções, etc, danificados e/ou absorvidos pelo tornado e lançados com violência mais adiante.

b) Os tornados são movimentos ciclônicos que concentram uma quantidade enorme de energia em uma pequena região. Seu diâmetro geralmente situa-se entre 100 e 3000 m (300 m pode ser considerado um diâmetro típico), com velocidades horizontais tangenciais que podem ultrapassar 400 km/h (Alguns autores indicam 500 km/h ou mesmo mais).

Na maioria das vezes os tornados desenvolvem-se a partir de trovoadas muito violentas, principalmente nas originadas em frentes frias. Movem-se com uma velocidade entre 30 e 100 km/h (8 e 28 m/s), com uma trajetória entre 10 e 30 km (valores típicos). O movimento giratório começa na nuvem de tormenta (cumulonimbus) e gradualmente vai crescendo para baixo, terminando por tocar a superfície terrestre.

c) Devido à força centrífuga, que lança o ar para longe do centro de rotação, a pressão no núcleo é muito baixa, podendo estar a mais de 200 mbar ( $2 \times 10^4 \text{ Pa} = 2 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ ) abaixo da pressão atmosférica nas vizinhanças. Lembramos que a pressão atmosférica normal é de 1013,2 mbar (760 mm de mercúrio), sendo 1 mbar = 100 Pa. Em torno deste núcleo pode ocorrer condensação da umidade, formando o “funil” visível do tornado, com uma cor branca ou cinza claro. À medida que o tornado se desloca, o funil e a região externa vizinha a ele tornam-se escuros (cinza escuro ou preto), em virtude do pó e escombros levantados do solo.

As pressões extraordinariamente baixas do núcleo de tornado podem fazer uma edificação que esteja com suas aberturas fechadas (mantendo assim a pressão interna aproximadamente igual à pressão atmosférica existente fora do tornado) literalmente explodir, pela diferença de pressão entre o interior da edificação e o núcleo do tornado.

Além disso, o núcleo funciona como uma chaminé, com uma “tiragem” em que a corrente de ar ascendente pode atingir de 150 a 300 km/h (42 a 83 m/s). Esta tiragem ergue do solo o que resta de edificações explodidas pelo tornado (tijolos, vidros, portas, janelas, telhas, etc.) ou por ele danificadas, bicicletas, motocicletas, pequenos animais, pedaços de árvores, etc., transportando-os por dezenas ou mesmo algumas centenas de metros. Em tornados de extrema violência o mesmo acontece com carros, árvores, animais maiores e casas; caminhões, vagões e locomotivas têm sido tombados.

d) Excetuando-se os extremos superior (na nuvem de tormenta) e inferior (próximo ao solo), o vórtice combinado de Rankine é um modelo matemático aceitável de um tornado. Neste vórtice há um núcleo girando

como um sólido (vórtice forçado: velocidade tangencial proporcional à distância ao eixo de rotação –  $V = k r$ ) e uma parte externa girando como um vórtice livre (velocidade tangencial inversamente proporcional à distância ao eixo de rotação –  $V = k/r$ ), como uma zona de transição entre os dois. O modelo não se aplica ao núcleo do tornado, no qual a força centrífuga rarefaz o ar e as velocidades horizontais são muito baixas.

e) Os tornados formam-se isoladamente ou em grupos, sendo que uma mesma nuvem de tormenta pode originar vários. O maior conjunto de tornados de que se tem notícia ocorreu nos dias 3 e 4 de abril de 1974, nos Estados Unidos da América, com 148 tornados. Neste mesmo país, em 1925 ocorreram em um dia 119 tornados, com um número recorde de mortes: 794<sup>9</sup>.

No Brasil há ocorrência de tornados nos estados do sul, principalmente Rio Grande do Sul e Santa Catarina; muito raramente aparecem no oeste do Paraná. As velocidades tangenciais máximas situam-se em torno de 200 km/h (55 m/s). São, pois, menos violentos que os tornados que se formam em outros países, como Argentina, Estados Unidos da América e U.R.S.S. Nestes dois últimos países aparecem os tornados mais violentos de que se tem notícias.

Também no Uruguai tem sido registrada a ocorrência de tornados.

### **2.2.6. Ventos regionais**

São ventos em que condições locais peculiares originam características próprias, pela influência de vales, montanhas, desníveis bruscos no terreno, etc. Citamos, sem entrar em detalhes: minuano, zonda, bora, fohen.

## Capítulo 3

# PERFIL VERTICAL DA VELOCIDADE MÉDIA

### 3.1. INTERVALO DE TEMPO

a) Tendo em vista o que foi exposto no capítulo 2, o estudo que desenvolveremos neste e nos próximos capítulos aplica-se aos ventos fortes com estabilidade neutra, como são os oriundos de ciclones extratropicais e, com aproximação aceitável, de ciclones tropicais. São ventos que sopram mantendo uma velocidade média razoavelmente constante por dezenas de minutos ou mesmo por algumas poucas dezenas de horas (este último caso só nos ciclones extratropicais). As flutuações do escoamento de ar são quase que integralmente causadas por agitação mecânica do ar, formando um grande número de **turbilhões**, também designados **redemoinhos**.

Os turbilhões 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. Além destes turbilhões de origem mecânica podem aparecer outros, causados por transformações termodinâmicas, com movimentos circulatórios que podem atingir dezenas ou centenas de quilômetros. Quando de grandes dimensões, estes turbilhões são considerados, do ponto de vista da engenharia estrutural, como causadores de alterações lentas na direção e velocidade do vento médio. É o caso dos movimentos circulatórios da atmosfera, com centenas ou milhares de quilômetros de diâmetro, que constituem os ciclones tropicais e extratropicais.

Na engenharia estrutural considera-se o vento como uma superposição de turbilhões de dimensões bem diversas, desde os maiores, da ordem de grandeza da altura da camada limite atmosférica, até os menores, da ordem de grandeza do milímetro. A energia cinética, retirada do escoamento médio pelos maiores turbilhões, é transferida por um processo em cascata até os menores, terminando por dissipar-se em calor pela viscosidade do ar.

b) Na camada limite atmosférica a velocidade média do vento varia desde zero, junto à superfície terrestre, até a velocidade gradiente, na altura gradiente. Quanto maior a rugosidade do solo e mais importantes em número e dimensões 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 gradiente será maior em uma cidade do 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 sobre uma cidade será mais turbulento do que sobre campo aberto, continuando no mesmo exemplo. Por outro lado, em uma dada altura (dentro da camada limite e para uma mesma velocidade gradiente) a velocidade média será menor na cidade do que em campo aberto.

Quanto mais veloz uma rajada, menor seu tempo de atuação e menores as dimensões do turbilhão correspondente, sendo que um turbilhão muito pequeno não afetará todo o campo aerodinâmico nas vizinhanças da edificação e, conseqüentemente, não causará forças plenamente desenvolvidas sobre toda a edificação. Rajadas de poucos segundos são suficientes para causar pressões plenamente desenvolvidas em pequenas edificações e em elementos da estrutura secundária e do revestimento de paredes e coberturas; porém será necessária uma rajada de maior duração para a pressão correspondente desenvolver-se em toda a edificação, se ela não for muito pequena. A grosso modo os turbilhões têm a forma de um elipsóide, com seu eixo maior na direção do vento médio, com secção transversal aproximadamente circular. Para que o turbilhão seja plenamente efetivo suas dimensões devem ser sensivelmente maiores que as da edificação em estudo, pois a correlação de velocidade na periferia do turbilhão é fraca. Portanto, as dimensões do turbilhão devem ser tanto maiores (e maior sua duração) quanto maiores forem as dimensões da edificação. Como a velocidade diminui com o aumento das dimensões do turbilhão, edificações grandes estarão sujeitas a menores forças do vento por unidade de área do que edificações pequenas.

Com base nestas considerações, as normas britânicas<sup>10</sup> e brasileiras<sup>11</sup> adotaram os seguintes valores para a maior dimensão da edificação, para que esta seja convenientemente envolvida pelo turbilhão:

- |                             |               |
|-----------------------------|---------------|
| – rajadas de três segundos  | 0 - 20 m      |
| – rajadas de cinco segundos | 20 - 50 m     |
| – rajadas de 15 segundos    | acima de 50 m |

c) Ao definir a velocidade do vento devem ser considerados apenas turbilhões que tenham dimensões suficientes para envolver plenamente a edificação. As dimensões dos turbilhões são caracterizadas pelas correspondentes escalas espaciais. Cada uma delas é definida pelo comprimen-

to L de um retângulo de mesma área que a área A sob a curva de correlação espacial R da respectiva componente do vetor velocidade. Isto é (Fig.3.1):

$$L = (\text{área sob a curva}) / (\text{ordenada na origem}) = A / 1$$

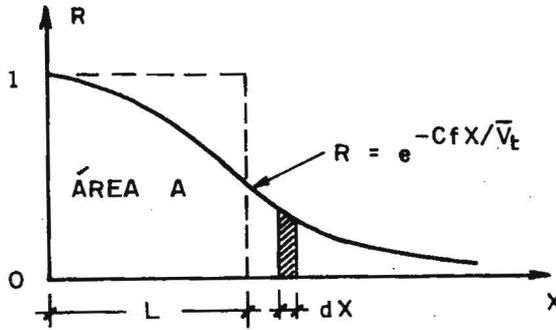


Fig. 3.1 - Correlação longitudinal da turbulência

A área A é obtida pela integral ( $1/f = t$ ):

$$A = \int_0^{\infty} e^{-CfX/\bar{V}_t} dX = \bar{V}_t t / C$$

sendo

f – frequência das flutuações de pressão

X – distância horizontal ou vertical entre os dois pontos em estudo

$\bar{V}_t$  – velocidade média de deslocamento do turbilhão.

A escala espacial será dada por

$$L = \bar{V}_t t / C \tag{3.1}$$

Portanto, a duração t de uma rajada plenamente efetiva será:

$$t = C L / \bar{V}_t \tag{3.2}$$

Para um turbilhão que envolva a edificação, nas condições indicadas anteriormente, L será a altura h da edificação ou sua largura, adotando-se o maior dos dois valores.  $\bar{V}_t$ , de acordo com estudo feito por Newberry, Eaton e Mayne<sup>12</sup>, é a velocidade média do vento sobre t segundos no topo

da edificação,  $V_t(h)$ . Quanto ao valor de C, o autor comparou, em outro trabalho<sup>13</sup>, um critério empírico com o processo adotado por Newberry, Eaton e Mayne<sup>12</sup> para a Torre dos Correios de Londres e com a expressão geral de Sfintesco e Wyatt<sup>14</sup>, na qual C varia com a altura da edificação. Um estudo gráfico mostrou que o critério empírico que propusemos conduz a valores intermediários aos dos outros dois estudos. Como a expressão é mais simples que a de Sfintesco e Wyatt, e por ficar a favor da segurança a esta, adotá-la-emos no presente trabalho. Portanto,  $C = 7,5$  e

$$t = 7,5 L / \bar{V}_t(h) \quad (3.3)$$

Com base na expressão (3.3) foi organizada a Fig.3.2, Válida para o caso de edificações alteadas, isto é, aquelas em que a maior dimensão é a altura.

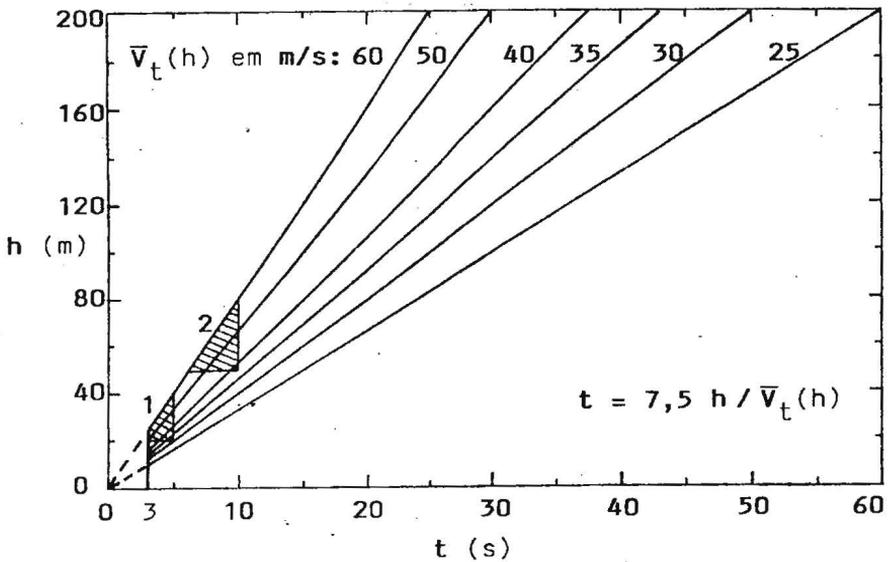


Fig.3.2 - Determinação do intervalo de tempo t

d) Newberry, Eaton e Mayne<sup>12</sup> observam que, de acordo com seus resultados, para algumas edificações o intervalo de tempo adotado pela norma britânica para a velocidade média do vento deveria ser reduzido. O mesmo pode ser dito em relação à norma brasileira NBR 6123<sup>11</sup>, se examinarmos a Fig.3.2. A região hachureada 1 mostra que em certos casos a adoção de uma rajada de cinco segundos (edificações com a maior di-

menção entre 20 e 50 m) está contra a segurança. Consideração análoga feita para rajada de 15 segundos (maior dimensão acima de 50m) mostrará que uma região ainda maior ficará contra a segurança, por este critério (linhas tracejadas na Fig.3.2). Por esta razão sugerimos que se adote, para edificações com a maior dimensão acima de 50 m, uma duração de rajada de 10 segundos. Mesmo assim teremos uma região (agora bem menor) contra a segurança (zona hachureada 2). Entretanto, face às simplificações e imprecisões inerentes, este critério nos parece suficientemente correto, para fins práticos. Seguindo este critério, a Comissão de Estudo para a Revisão da NBR 6123 adotou, para cada Categoria de terreno, valores de  $S_2$  para as três seguintes Classes de edificações<sup>15</sup>:

– maior dimensão abaixo de 20 m	$t = 3$ s
– maior dimensão entre 20 e 50 m	$t = 5$ s
– maior dimensão acima de 50 m	$t = 10$ s

Por outro lado, julgamos que é razoável permitir que, para edificações com a maior dimensão superior a 50 m se faça uma determinação do tempo de duração da rajada. Devido à grande influência da velocidade no valor de  $t$  (ver Fig.3.2), não nos parece recomendável especificar outras Classes de edificações na Norma (para  $h$  acima de 80 ou 100 m, por exemplo), pois as diferenças contra a segurança podem ser importantes.

## 3.2. PARÂMETROS DE RUGOSIDADE

### 3.2.1. Introdução

a) Nos ventos fortes “bem comportados” a influência da turbulência de origem térmica é desprezável dentro da camada limite atmosférica, na qual a turbulência de origem mecânica causada pela rugosidade da superfície terrestre, é preponderante. Isto porque a turbulência de origem mecânica provoca uma mistura muito eficiente das camadas de ar, evitando o crescimento de instabilidades térmicas e levando a atmosfera a uma estabilidade neutra. Além disso, em ventos fortes bem comportados a camada limite é completamente turbulenta; em ventos com turbulência desprezável (ventos “suaves”) a velocidade média não chega a atingir 60 km/h (17 m/s)<sup>16,17</sup>.

b) A rugosidade da superfície terrestre, que designaremos abreviadamente por rugosidade superficial, é caracterizada pelos efeitos acumulados estatisticamente de um grande número de obstáculos, tanto naturais como artificiais. Ela é definida pela forma, dimensões e densidade dos elementos que a constituem (terrenos naturais e cultivados, vegetação

rasteira e alta, bosques e florestas, lagos e mares, muros, casas, pavilhões industriais e agrícolas, edifícios, etc.).

c) O vento junto à superfície é frenado pelas forças de arrasto causadas pela rugosidade superficial (forças de arrasto, lembramos, são forças na direção do vento). Estas forças são causadas tanto pelo atrito direto contra a superfície (forças de atrito ou de fricção) como também, e principalmente, pelas forças que aparecem pelo intercâmbio de quantidade de movimento entre camadas horizontais de ar, devido à turbulência, e que fazem sentir seus efeitos em uma altura muito maior que a dos obstáculos que a causaram. Matematicamente, as tensões correspondentes a este intercâmbio de quantidade de movimento são designadas por **tensões** (aparentes ou virtuais) **de Reynolds**, e são superiores às tensões de fricção por várias potências de 10. Para a frenagem do vento interessa a componente das tensões de Reynolds na direção do escoamento de ar. Esta componente é expressa por

$$\tau_t = -\rho \overline{u v} \quad (3.4)$$

onde a barra indica média no tempo e sendo:

$u$  – componente das flutuações na direção do vento

$v$  – componente vertical das flutuações

$\rho$  – massa específica do ar.

Somente muito próximo à superfície, local onde a componente  $v$  é muito pequena ou mesmo nula (o que acontece junto à superfície), será necessário considerar as tensões de deslizamento correspondentes ao regime laminar (intercâmbio de quantidade de movimento entre moléculas, apenas). Em um ponto onde a velocidade média é  $\bar{V}$  ( $\mu$  : viscosidade dinâmica):

$$\tau_\ell = \mu \frac{\partial \bar{V}}{\partial z} \quad (3.5)$$

A tensão de deslizamento total será a soma

$$\tau = \tau_\ell + \tau_t = \mu \frac{\partial \bar{V}}{\partial z} - \rho \overline{u v} \quad (3.6)$$

Nas proximidades da superfície terrestre a eq.(3.6) reduz-se a

$$\tau_o = \mu \left( \frac{\partial \bar{V}}{\partial z} \right)$$

o índice  $o$  correspondendo a uma altura acima da superfície terrestre  $z=0$ .

d) Exceto para valores muito pequenos de  $z$ , a turbulência é, praticamente, a causadora da totalidade das tensões tangenciais, que costumamos designar por tensões de deslizamento:

$$\tau \cong \tau_t = - \rho \overline{u v} \quad (3.7)$$

Quanto mais rugosa a superfície terrestre, maiores a intensidade da turbulência, as tensões de Reynolds, a altura da camada limite atmosférica (altura gradiente) e a frenagem do vento próximo à superfície terrestre. Por exemplo, a uma dada altura acima do terreno a velocidade média será menor e a intensidade da turbulência será maior em uma cidade de que em campo aberto; e a altura gradiente será maior na cidade.

### 3.2.2. Velocidade de fricção ( $u^*$ )

a) Para o estudo do perfil vertical das velocidades do vento dentro da camada limite atmosférica, um parâmetro básico, que depende tanto da rugosidade superficial como da velocidade média do vento, é a chamada velocidade de fricção ou velocidade de cisalhamento. Esta parâmetro foi proposto por Prandtl<sup>18</sup> e é definido pela expressão

$$u^*(z) = \sqrt{|\tau_t(z)| / \rho} \quad (3.8)$$

Esta definição provém do conceito de Prandtl de “comprimento de mistura” (“Mischungsweg”): distância média percorrida na direção transversal ao escoamento (em nosso caso, na direção vertical) por uma partícula de fluido até ela adquirir a velocidade da região para a qual se deslocou. Este conceito tem ligação com o de “livre percurso médio” da teoria cinética dos gases. Nesta teoria, a transferência de quantidade de movimento é devida ao movimento de moléculas, enquanto que no conceito de Prandtl é devida ao intercâmbio de partículas fluidas, de dimensões algumas ordens de grandeza maiores.

b) Uma partícula fluida é deslocada da posição  $z$  (Fig.3.3), onde a velocidade média é  $\bar{V}(z)$ , por uma distância igual ao comprimento de

mistura,  $\ell$ , em uma direção perpendicular ao escoamento, para uma posição onde a velocidade média é  $\bar{V}(z+\ell)$ . A diferença de velocidades médias entre as duas posições é

$$\Delta\bar{V} = \bar{V}(z+\ell) - \bar{V}(z) \quad (3.9)$$

ou, aproximadamente,

$$\Delta\bar{V} = \ell \frac{\partial\bar{V}(z)}{\partial z} \quad (3.10)$$

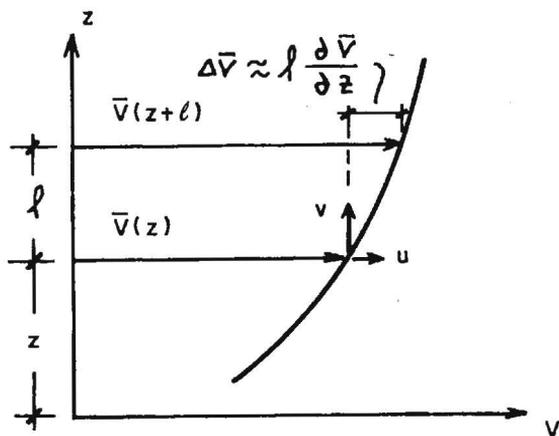


Fig.3.3 - Comprimento de mistura  $\ell$

Prandtl admite que as componentes de flutuação da velocidade média são proporcionais:

$$|u| \propto |v|$$

e que a diferença de velocidades entre as posições inicial e final da partícula,  $\Delta\bar{V}$ , é proporcional às flutuações:

$$\ell \frac{\partial\bar{V}(z)}{\partial z} \propto (|v| \text{ e } |u|)$$

Substituindo na (3.7) e admitindo que  $\ell$  inclua os coeficientes de proporcionalidade (e, para simplificar, fazendo  $\bar{V}(z) = \bar{V}$ ):

$$\tau = \rho \ell^2 \left| \frac{\partial \bar{V}}{\partial z} \right| \frac{\partial \bar{V}}{\partial z} \quad (3.11)$$

O módulo é tomado em apenas uma das derivadas para que a valores positivos de  $\partial \bar{V} / \partial z$  correspondam valores positivos das tensões de deslizamento e a valores negativos de  $\partial \bar{V} / \partial z$  correspondam valores negativos destas tensões.

A expressão acima, embora aproximada, mostra que as tensões de deslizamento causadas pela mistura turbulenta de partículas fluidas (isto é, tensões de Reynolds), são proporcionais ao quadrado da velocidade. Ela pode ser posta sob a forma:

$$\sqrt{|\tau| / \rho} = \ell \frac{\partial \bar{V}}{\partial z} \quad (3.12)$$

O termo da direita mostra facilmente que  $\sqrt{\tau / \rho}$  tem a dimensão de uma velocidade, tendo sido chamado por Prandtl de **velocidade de fricção**, e sendo geralmente representado por  $u^*$ :

$$u^* = \sqrt{|\tau| / \rho} \quad (3.13)$$

e, pela (3.7):

$$u^* = \sqrt{|uv|} \quad (3.14)$$

Pela (3.12) verifica-se que  $u^*$  depende tanto da rugosidade superficial (que influi na turbulência e, conseqüentemente, em  $\ell$ ) como do gradiente da velocidade média do escoamento. A velocidade de fricção pode ainda ser encarada como uma medida da intensidade da turbulência e da transferência de quantidade de movimento causada por esta turbulência.

Prandtl admite que  $\ell$  não é afetado pela viscosidade (hipótese esta confirmada experimentalmente), restando como única expressão dimensionalmente correta para  $\ell$ :

$$\ell = \text{constante} \times z = k_1 z .$$

Experimentalmente,  $k_1 = 0,417$ .

Considerando as expressões (3.12) e (3.13):

$$u^* = k_1 z \frac{\partial \bar{V}}{\partial z} \quad (3.15)$$

Na maioria das aplicações trabalha-se com a velocidade de fricção junto à superfície:

$$u_o^* = u^*(0) = \sqrt{\tau_o / \rho} \quad (3.16)$$

sendo  $\tau_o$  a tensão de deslizamento junto à parede.

### 3.2.3 Coeficiente de arrasto superficial ( $c_{as}$ )

a) A tensão de deslizamento junto à parede pode ser obtida por

$$\tau_o = \frac{1}{2} \rho \bar{V}_{ref}^2 c_{at} \quad (3.17)$$

sendo

$\bar{V}_{ref}$  – velocidade média de referência

$c_{at}$  – coeficiente de tensão de cisalhamento (ou de tensão de deslizamento ou de atrito local).

Este coeficiente  $c_{at}$  foi exaustivamente estudado para o caso de escoamento de ar uniforme sobre placas lisas e rugosas e sobre asas de aviões. Algumas indicações a respeito podem ser encontradas na Ref.19.

b) Para o caso do vento fluindo sobre a superfície terrestre, via de regra com uma rugosidade muito superior a das placas e asas, costuma ser usado outro coeficiente. Este coeficiente tem sido apresentado na literatura com diversas designações (coeficiente de arrasto superficial, de arrasto local, de resistência, de fricção de “pele”, etc) e símbolos ( $\kappa$ ,  $C_f$ ,  $C_D$ , etc). Adotaremos a designação de **coeficiente de arrasto superficial** e o símbolo  $c_{as}$ , coerentemente com a simbologia adotada na Ref.19. É definido por

$$c_{as} = \tau_o / (\rho \bar{V}_{ref}^2) \quad (3.18)$$

Em geral  $\bar{V}_{ref}$  corresponde à média horária ou sobre dez minutos, a uma altura de 10m acima da superfície terrestre.. Da (3.18):

$$\tau_o = c_{as} \rho \bar{V}_{ref}^2 \quad (3.19)$$

Comparando (3.19) com (3.17) conclui-se que

$$c_{as} = c_{at} / 2 \quad (3.20)$$

c)- O coeficiente de arrasto superficial está relacionado com a velocidade de fricção. De fato, combinando (3.18) e (3.16):

$$c_{as} = (u_o^* / \bar{V}_{ref})^2 \quad (3.21)$$

O coeficiente  $c_{as}$  tem sido determinado de quatro modos:

- por medidas ligadas ao vento geostrófico;
- a partir de perfis da velocidade do vento de superfície;
- por medidas diretas do arrasto em placas paralelas ao vento;
- por medida das tensões de Reynolds nas proximidades da superfície terrestre.

### 3.2.4. Comprimento de rugosidade ( $z_o$ ) e lei logarítmica

a) O parâmetro  $z_o$ , geralmente designado por **comprimento de rugosidade**, é o fator dominante na definição dos perfis verticais da velocidade média em ventos fortes com estabilidade neutra, dentro da camada limite atmosférica. Este parâmetro está diretamente ligado à altura dos obstáculos que formam a rugosidade da superfície terrestre, sendo uma pequena fração desta altura (Vickery<sup>20</sup>, por exemplo, indica, como uma aproximação grosseira,  $z_o \cong 1/20$  da altura média dos obstáculos) e constituindo uma referência para o grau de rugosidade superficial. Convém assinalar que  $z_o$  é muito influenciado pela não homogeneidade do escoamento e da distribuição dos obstáculos. Por exemplo, em zonas urbanas há indicações de  $z_o$  entre 0,20m e 4,0m e mesmo mais.

Do ponto de vista da engenharia estrutural o uso de valores baixos de  $z_o$  fica a favor da segurança<sup>1</sup>. Portanto, em caso de dúvida é recomendável usar valores próximos aos limites inferiores, dentro da gama de variação dos valores obtidos para  $z_o$ .

b) O parâmetro  $z_o$  usualmente é determinado ajustando o perfil de velocidades médias ao perfil teórico, logarítmico, conhecido como lei de Prandtl ou lei da parede. Excetuando-se a região muito próxima à superfí-

cie terrestre (sem interesse prático) e para uma altura que teoricamente vai só até 15% da altura da camada limite, Prandtl admite que a tensão de deslizamento permanece constante e com o mesmo valor que possui junto à superfície. Isto é,  $\tau_t(z) = \tau_0$ .

c) De acordo com diversos autores, a lei de Prandtl é acuradamente aplicável até cerca de 100m de altura.<sup>21,22</sup> Experimentalmente foi verificado que a região da camada limite atmosférica mais próxima à superfície terrestre caracteriza-se por tensões deslizantes aproximadamente constantes. Acima desta região estas tensões vão diminuindo com a altura, até um valor praticamente nulo na atmosfera livre (isto é, fora da camada limite). No caso de ventos fortes em estabilidade neutra a validade da lei de Prandtl até alturas de umas poucas centenas de metros tem sido confirmada por medições<sup>1</sup>.

A lei de Prandtl baseia-se nas duas hipóteses já comentadas:

- tensões deslizantes constantes;
- comprimento de mistura proporcional à altura sobre o terreno.

Esta lei tem a seguinte expressão:

$$\bar{V}(z) / u^*_0 = k^{-1} \ln(z/z_0) \quad (3.22)$$

sendo  $k \cong 0,4$  a constante de Kármán.

A (3.22) pode ser posta sob a forma

$$k \bar{V}(z) / u^*_0 = \ln z - \ln z_0$$

ou

$$\ln z = \ln z_0 + (k / u^*_0) \bar{V}(z)$$

que é a equação de uma reta com parâmetro linear igual a  $\ln z_0$  e parâmetro angular igual a  $k/u^*_0$  (Fig.3.4). Para  $\bar{V}(z) = 0$ ,  $\ln z = \ln z_0$  e  $z = z_0$ .

Valores mais precisos de  $z_0$  serão obtidos se a velocidade de fricção  $u^*_0$  for determinada experimentalmente por um dos seguintes modos:

- medida das tensões deslizantes na superfície:  $u^*_0 = (\tau_0/\rho)^{1/2}$ ;
- medida das tensões de Reynolds máximas:  $u^*_0 = |\bar{u} \bar{v}|^{1/2}$

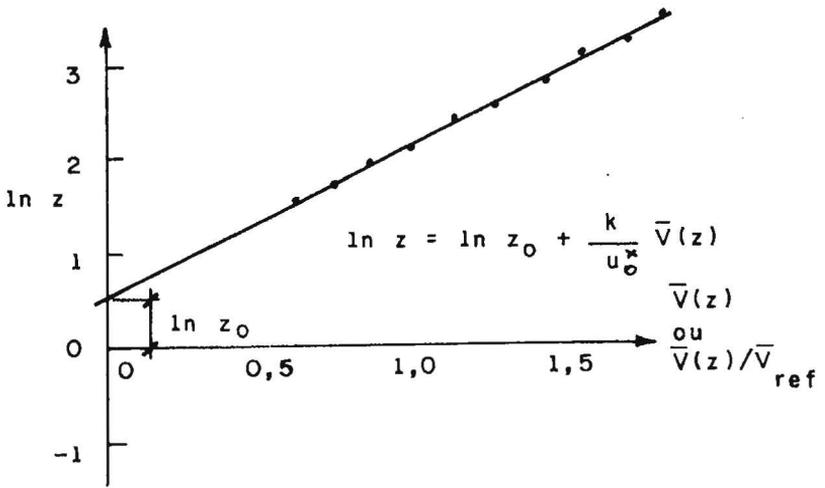


Fig. 3.4 - Determinação do comprimento de rugosidade  $z_0$ .

### 3.2.5. Deslocamento do plano zero ( $z_d$ )

a) Em terrenos muito rugosos, como os cobertos por plantações altas, árvores ou casas, o nível do terreno (origem da cota  $z$ ) não coincidirá com a origem do perfil logarítmico teórico. Nestes casos seria necessário, a rigor, efetuar um deslocamento do plano de referência ("plano zero"),  $z_d$ , de modo que a lei logarítmica ficará (Fig.3.5):

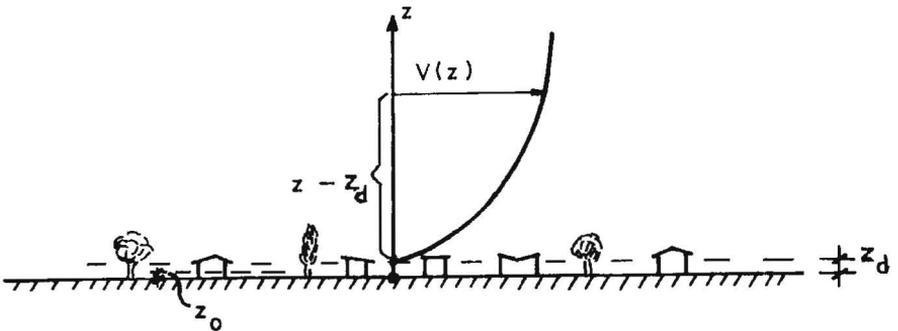


Fig.3.5 - Interpretação física de  $z_0$  e  $z_d$

$$\bar{V}(z) / u_*^* = (1/k) \ln [(z-z_d)/z_0] \quad (3.23)$$

Os parâmetros  $z_d, z_o$  e  $u_o^*$  podem ser determinados medindo a velocidade do vento em três níveis e resolvendo o sistema de três equações assim obtido. Entretanto, face às imprecisões das medidas tanto ao vento natural como em sua simulação em túnel de vento, e pelas diferenças entre o perfil real e seu modelo matemático, é recomendável o uso de processos que se baseiem em medidas feitas em um número maior de alturas. Entre estes citamos a solução numérica proposta por Robinson.<sup>23</sup>

O parâmetro  $z_o$  é muito sensível a alterações na forma, dimensões e densidade dos obstáculos que o definem, o que faz com que os valores obtidos devam ser considerados com muita cautela.

b) De acordo com Helliwell,<sup>24</sup> valores aproximados de  $z_d$  em cidades podem ser obtidos com a expressão

$$z_d = \bar{H} - z_o / k = \bar{H} - 2,5 z_o \quad (3.24)$$

sendo

$k$  – a constante de Kármán  $\approx 0,4$

$\bar{H}$  – a altura média das edificações na região circundante.

Simiu e Lozier<sup>4</sup>, por sua vez, sugerem que  $z_d$  seja considerado igual a zero, exceto no centro de grandes cidades, onde deve ser adotado o menor dos dois valores:

$$z_d = 20\text{m} \quad \text{e} \quad z_d = 0,75 \bar{H} \quad (3.25)$$

Contudo, o mesmo Simiu, em trabalho escrito com Biétry e Sacré<sup>25</sup>, lembra que este parâmetro em geral é determinado subjetivamente e que, além disso, medidas de velocidades do vento em cidades podem ser representadas satisfatoriamente, para fins de engenharia, pela lei logarítmica omitindo o parâmetro  $z_d$ .

### 3.2.6. Lei potencial

a) Além da lei de Prandtl há diversas expressões teóricas deduzidas para determinar a lei de variação da velocidade média do vento com a altura. As mais corretas baseiam-se, como a de Prandtl, nos efeitos do intercâmbio de quantidade de movimento em uma camada limite turbulenta, aplicando ao problema meteorológico os estudos feitos na teoria de camadas limites. Estas soluções diferem entre si pelas hipóteses admitidas para o intercâmbio de quantidade de movimento.

b) Entretanto; uma boa concordância com os dados experimentais pode ser obtida por uma simples lei de potência do tipo

$$\bar{V}(z) / \bar{V}(z') = (z / z')^p \quad (3.26)$$

que relaciona as velocidades médias em duas alturas quaisquer dentro da camada limite atmosférica,  $z$  e  $z'$ . Na prática fixa-se uma das alturas em um valor padrão. Este costuma ser ou a altura gradiente,  $z_g$ , ou a altura de 10m. Teremos, respectivamente:

$$\bar{V}(z) / \bar{V}(z_g) = (z / z_g)^p \quad (3.27)$$

$$\bar{V}(z) / \bar{V}(10) = (z / 10)^p \quad (3.28)$$

Usaremos a última destas expressões.

### 3.2.7. Valores dos parâmetros $z_0$ , $c_{as}$ , $p$ e $z_g$

a) Na tabela 3.1 são fornecidos valores dos parâmetros  $z_0$ ,  $c_{as}$ ,  $p$  e  $z_g$ , de acordo com diversas fontes. A velocidade de referência, sempre a 10 m de altura, em geral corresponde ao valor médio horário; em alguns poucos casos, ao valor médio sobre 10 min. A partir desta tabela foi organizado o gráfico da Fig.3.6, que apresenta curvas de  $c_{as}$ ,  $p$  e  $z_g$  em função de  $z_0$ . A curva de  $c_{as}$  referente ao trabalho de Simiu e Scanlan<sup>1</sup> foi traçada considerando a descrição da rugosidade e não os valores correspondentes de  $z_0$ , que ficam abaixo dos indicados nas outras referências.

Tabela 3.1 – Parâmetros de rugosidade

Fonte Ref:	Descrição do terreno	Parâmetros			
		$p$	$z_0$ (mm)	$c_{as} \cdot 10^3$	$z_g$ (m)
1	Areia		0,1 - 1	1,2 - 1,9	
	Superfície do mar		0,003 <sup>a</sup> - 5 <sup>b</sup>	0,7 - 2,6	
	Superfície com neve		1 - 6	1,9 - 2,9	
	Gramma aparada (~ 0,01 m)		1 - 10	1,9 - 3,4	
	Gramma baixa, estepe		10 - 40	3,4 - 5,2	
	Terra lavrada		20 - 30	4,1 - 4,7	
	Gramma alta		40 - 100	5,2 - 7,6	
	Palmeirais		100 - 300	7,6 - 13,0	
	Florestas de coníferas (árvores com altura média=15m; 1 por 10m <sup>2</sup> ; $z_d \approx 12m$ )		900 - 1000	28,0 - 30,0	
	Subúrbios		200 - 400	10,5 - 15,4	
	Centros de cidades pequenas		350 - 400	14,2 - 16,6	
	Centros de cidades grandes		600 - 800	20,2 - 25,1	
	a: velocidade do vento para $z=10m$ : 1,5 m/s				
	b: velocidade do vento para $z=10m$ : >15 m/s				

Fonte Ref:	Descrição do terreno	Parâmetros			
		p	z <sub>0</sub> (mm)	c <sub>a,0</sub> · 10 <sup>3</sup>	z <sub>0</sub> (m)
3	Mar aberto	0,10-0,11 0,10	0,25 - 2,5 0,3	0,5 - 2,2 0,5	275
	Campo aberto plano	0,14-0,19 0,16	15 - 60 30	4 - 7 5	
19	Floresta	0,25-0,34 0,28	200 - 900 300	11 - 27 15	400
	Área urbana	0,36-0,40 0,40	1200 - 5500 3000	30 - 50 50	
4	Região costeira <sup>a</sup>		5 - 10		
	Região aberta		30 - 100		
	Subúrbios		200 - 300		
	Centro de cidades pequenas		350 - 450		
	Centro de cidades grandes a: aplicável a estruturas diretamente expostas a ventos soprando de águas livres		600 - 800		
21	Mar aberto			0,5	
	Terreno com grama alta			5	
	Zona coberta de mato (Floresta de Munich)		1000	15 - 30	
25	Cidade grande		3000	50	
	Água livre	0,10	5		
	Terreno aberto	0,14	70		
	Subúrbios a considerável distância do centro, em cidades pequenas (zonas com poucas construções, com árvores, cercas vivas, etc.)	0,20	300		
26	Cidades pequenas, subúrbios densamente concentrados, terreno com mato	0,25	1000		
	Centros de cidades grandes	0,35	2500		
	Grandes extensões de água, pântanos, campos abertos de neve e grandes superfícies asfaltadas	0,12	3		
	Terreno gramado plano, parques ou solo nu, sem cercas vivas e com muito poucas obstruções isoladas	0,14	10		
27	Terreno aproximadamente plano ou levemente ondulado, campos com plantações, cercas ou cercas vivas baixas e poucas árvores	0,16	30		
	Terreno com diversas cercas vivas altas, algumas edificações rurais, casas e árvores	0,20	100		
	Matos densos, zonas com residências tipicamente entre 10% e 20% de área construída (densidade)	0,24	300		
	Centros de cidades, tendo a maior parte dos edifícios 4 ou mais andares, tipicamente entre 30% e 50% de área construída (densidade)	0,27	800		
	NOTA: expoente p válido para uma altura z-d entre 0 e 300m.				
27	Regiões planas geladas ou com lama		0,01		
	Terrenos planos ou ondulados cobertos de neve		0,1		
	Mar aberto calmo		0,1		
	Vento marítimo na região costeira		1		
	Deserto (plano)		0,5		
	Superfície natural de neve (fazendas)		2		
	Campos gramados aproximadamente planos: Gramma cortada (~3 cm)		8		
Poucas árvores, inverno		10			

Fonte Ref:	Descrição do terreno	Parâmetros			
		p	z <sub>0</sub> (mm)	c <sub>as</sub> · 10 <sup>3</sup>	z <sub>0</sub> (m)
27	Terreno típico de fazendas:				
	Gramma não cortada		20		
	Aeroportos (zona das pistas)		20		
	Gramma alta (~ 60 cm), plantações		40		
	Árvores isoladas		30		
	Poucas árvores (verão)		50		
	Muitas cercas vivas		80		
	Muitas árvores, cercas vivas, poucas edificações		150 - 300		
	Subúrbios de cidades pequenas *		350		
	Regiões arborizadas aproximadamente planas		350		
	Centros de cidades pequenas *		500		
	Centros de cidades médias e grandes *		600 - 1200		
Florestas		900			
Centros de cidades com edifícios muito altos *		1200 - 1300			
Zona montanhosa ou com muitos morros *		2000			
* Terreno heterogêneo					
30	Terreno aberto com muito poucos obstáculos	0,16		5	300
	Terreno uniformemente coberto com obstáculos de 10 a 15m de altura	0,28		15	430
	Terreno com obstáculos grandes e irregulares	0,40		50	560
36	Mar tempestuoso	0,12	5 - 10	1	250
	Campo aberto	0,16	10 - 100	5	300
	Florestas e áreas suburbanas	0,23	300 - 1000	15	400
	Centros de grandes cidades	0,40	1000 - 5000	50	500
38	Zona plana (pradarias, terra arável)	0,16		5	360
	Florestas e matos, subúrbios	0,28		15	450
	Cidades com edifícios altos	0,40		50	520
45	Areia		0,1 - 1	1,2 - 1,9	
	Superfície do mar		0,003 <sup>b</sup> - 4 <sup>b</sup>	0,7 - 2,6	
	Superfície de neve		1 - 6	1,9 - 2,9	
	Gramma cortada (~ 0,01m)		1 - 10	1,9 - 3,4	
	Gramma baixa, estepe		10 - 40	3,4 - 5,2	
	Terra lavrada		20 - 30	4,1 - 4,7	
	Gramma alta		40 - 100	5,2 - 7,6	
	Palmeirais		100 - 300	7,6 - 13,0	
	Florestas de coníferas (árvores com altura média = 15m; 1 árvore por 10m <sup>2</sup> ; z <sub>d</sub> ≈ 12m)		900 - 1000	28,0 - 30,0	
	Cidades grandes a: velocidade do vento para z=10: 1,5m/s b: velocidade do vento para z=10m: >15m/s		750 - 1500	20,0 - 45,0	
46	Mar tempestuoso (Mar aberto)	0,11	1 - 10		250
			3		
	Pradarias, fazendas	0,16	10 - 100		300
			30		
	Floresta, subúrbios	0,28	100 - 1000		400
	300				
Centros de cidades grandes	0,40	1000 - 3000		500	
47	Deserto		0,5		
	Mar		5		
	Carpo		50		
	Floresta		500		
	Cidades pequenas e grandes		500 - 2000 (?)		

Fonte Ref:	Descrição do terreno	Parâmetros			
		p	z <sub>0</sub> (mm)	c <sub>as</sub> · 10 <sup>3</sup>	z <sub>d</sub> (m)
48	Águas livres, tempestuosas			1 - 2	
	Campo aberto			3 - 5	
	Matos, florestas, áreas suburbanas			15 - 30	
	Centros urbanos			30 - 50 (?)	
49	Campo aberto sem obstruções (ex: pradaria, tundra ártica, deserto)	0,15		5	
	Terreno com obstruções baixas, tais como árvores e casas (menos de 10m de altura)	0,27		15-20	
	Zonas urbanas densamente construídas com edifícios altos	0,31			
		0,43			
50	Campo aberto		10 - 100		274
	Florestas e zonas suburbanas		300 - 1000		396
	Centros de cidades grandes		1000 - 5000		518
51	Grandes extensões de campo aberto em nível sem obstruções, superfície de água, gramados planos, pântanos	0,15		5	280
	Campo plano ou ondulado com algumas obstruções, tais como cercas vivas ou muros cercando campos, árvores esparsas e/ou edificações	0,22		8,8	360
	Superfícies cobertas por numerosas obstruções grandes. Parque e florestas com muitas árvores, áreas urbana e suburbanas com nível médio do topo dos telhados ou obstruções a aproximadamente 10 m.	0,28		15	400
	Superfícies muito irregulares, áreas cobertas por numerosas e grandes obstruções com nível médio do topo dos telhados ou obstruções acima de 25m. Centros de cidades grandes.	0,40		40	480
52	Terreno aberto, extremamente liso		10		
	Terra agrícola com fileiras de cercas vivas e edificações		100		
	Zonas com casas de 1 andar com jardins		1000		
	Zonas com edifícios de 5-6 pisos densamente construídas		10000		
53	Região costeira		5 - 10	z <sub>d</sub> : altura média do plano zero	
	Região aberta z <sub>d</sub> = 0		30 - 100		
	Subúrbios		200 - 300		
	Centros de cidades pequenas		400		
	Centros de cidades grandes = z <sub>d</sub> = 20m ou 0,75h		600 - 800	h: altura média dos obstáculos.	
54	Região costeira		5 - 10		
	Região aberta		30 - 100		
	Subúrbios		200 - 300		
	Centros de cidades pequenas		350 - 450		
	Centros de cidades grandes		600 - 800		
55	Mar (calmo - ventoso)		0,003 - 5		
	Zona gramada (cortada - alta)		1 - 10		
	Floresta de coníferas (15 m altura)		900 - 1000		
	Subúrbios		200 - 400	350 - 450	
	Centros de cidades pequenas				
Centros de cidades grandes		600 - 800			

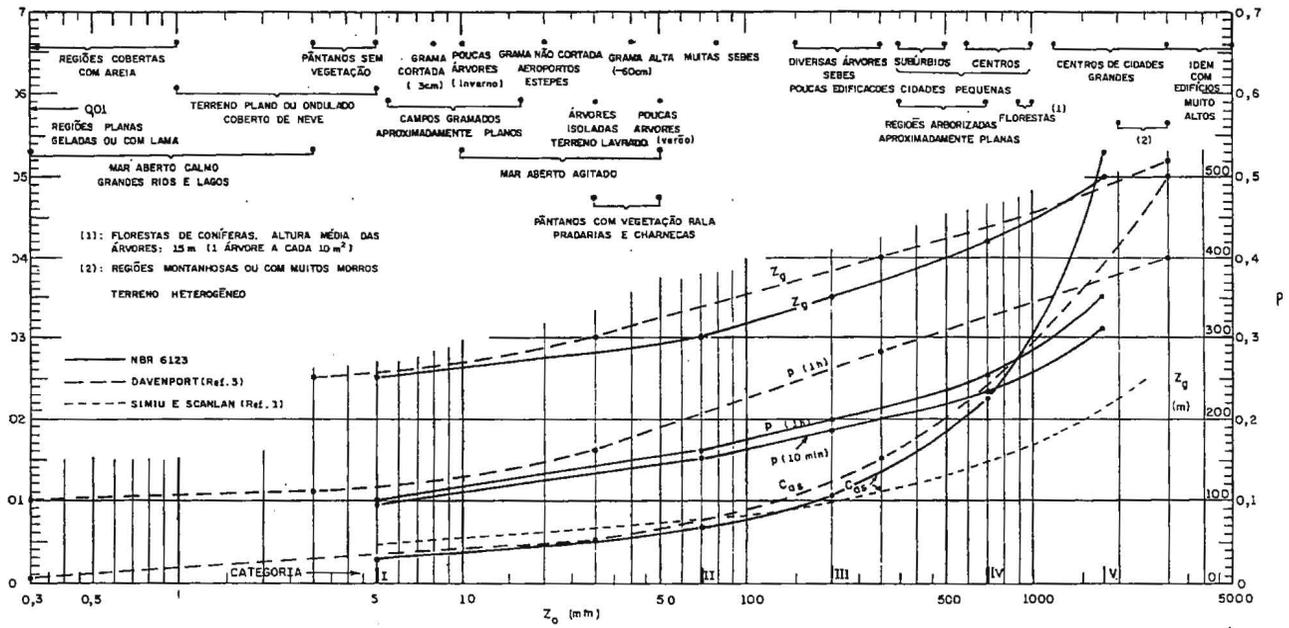
Fonte Ref:	Descrição do terreno	Parâmetros				
		$p$	$z_0$ (mm)	$c_{as} \cdot 10^3$	$z_0$ (m)	
56	Água livre com extensão de 5km ou mais		0,2	x: distancia típica entre obstáculos na direção do vento		
	Zonas planas com lama ou neve; ausência de vegetação e obstáculos		5			
	Terreno plano aberto; grama, poucos obstáculos isolados		30			
	Plantações baixas; ocasionais obstáculos grandes, $x/h > 20$		100			
	Plantações altas; obstáculos esparsos, $15 < x/h < 20$		250			
57	Parques, arbustos; numerosos obstáculos, $x/h < 10$		500	h: altura dos maiores obstáculos		
	Obstáculos grandes regularmente distribuídos (subúrbio, floresta)		1000			
58	Centros de cidades grandes com edifícios altos e baixos		?			
	57	Grandes extensões de água; regiões costeiras planas com vento marítimo; desertos	0,12	1		
		Campo plano ou pouco ondulado com alguns obstáculos (árvores isoladas ou cercas vivas)	0,15	10		
		Terreno com um certo número de obstáculos (habitações, edificações rurais, cercas vivas)	0,19	100		
		Subúrbios de cidades	0,26	500		
Centros de cidades grandes, concentrações de edificações muito altas		0,35	1500			
58	Terreno aberto	0,16		5	280	
	Cidades, matos	0,28		15	390	
	Centros de cidades	0,40		50	510	
(1)	Categorias da NBR-6123/1988					
	I	0,10	5	2,8	250	
	II	0,16	70	6,5	300	
	III	0,20	300	13	350	
	IV	0,25	1000	30	420	
(1)	V	0,35	2500	83	500	
	Idem, com alterações em $z_0$					
	I	0,10	5	2,8	250	
	II	0,16	70	6,5	300	
	III	0,20	200	10,5	350	
(1)	IV	0,25	700	22,6	420	
	V	0,35	1750	52,7	500	

(1) – Valores de  $c_{as}$  calculados com a expressão  $c_{as} = k^2 / [\ln^2(z/z_0)]$ , conforme Refs. 22,33, 38 e 45, sendo:

$k$  – constante de Kármán = 0,4

$z$  – altura de referência = 10 m

Fig. 3.6 - Coeficiente de arrasto superficial em função de  $z_0$



b) Há divergências quanto ao valor a considerar para o comprimento de rugosidade sobre grandes extensões de água, o qual depende do grau de agitação da água, função por sua vez da velocidade do vento.

Cook<sup>26</sup> apresenta a seguinte expressão, obtida a partir das informações disponíveis sobre a interação vento-onda, e que consta da Parte I de ESDU:<sup>28</sup>

$$z_o \cong 5 \times 10^{-5} \overline{V}_o^2 / g$$

sendo

$g$  -- aceleração da gravidade (9,81 m/s<sup>2</sup>)

$\overline{V}_o$  - velocidade básica horária (em m/s).

Assim, por exemplo, para  $\overline{V}_o = 20$  m/s,  $z_o \cong 2$  mm. Para  $\overline{V}_o = 30$  m/s,  $z_o \cong 5$  mm.

Devido às imprecisões inerentes, a expressão apresentada por Cook pode ser simplificada, a nosso entender, para:

$$z_o = 5 \times 10^{-6} \overline{V}_o^2 .$$

### 3.3. TERRENO DE RUGOSIDADE UNIFORME

#### 3.3.1. Categorias de rugosidade

A rugosidade da superfície terrestre é classificada, na NBR-6123/88,<sup>15</sup> em cinco Categorias, podendo o engenheiro estruturista adotar valores diferentes, desde que justificados. Estas Categorias são as seguintes:

**Categoria I** – Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente (a barlavento).

**Categoria II** – Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas. A cota média do topo dos obstáculos é considerada inferior ou igual a 1,0 m.

**Categoria III** – Terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 3,0 m.

**Categoria IV** – Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 10 m. Esta Categoria também inclui zonas com obstáculos maiores e que ainda não possam ser consideradas na Categoria V.

**Categoria V** – Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual ou superior a 25m.

### 3.3.2. Lei geral das velocidades médias

a) Apesar de ser cientificamente mais correta uma lei logarítmica para a descrição do perfil vertical de velocidades médias aplicável a grandes intervalos de tempo (10 min, 1 h, por exemplo), será adotada uma lei potencial, por ser de mais fácil tratamento, aplicável também a curtos intervalos de tempo e amplamente utilizada na engenharia civil. A expressão genérica desta lei, válida dentro da camada limite atmosférica, é a seguinte (Fig.3.7.):

$$\overline{V}_t(z) = \overline{V}_t(10) (z/10)^p \quad (3.29)$$

sendo

$\overline{V}_t(z)$  – velocidade média sobre t segundos, a 10 m de altura sobre o terreno;

$\overline{V}_t(10)$  – velocidade média sobre t segundos, a 10m de altura sobre o terreno.

O expoente p é função da rugosidade do terreno e do intervalo de tempo.

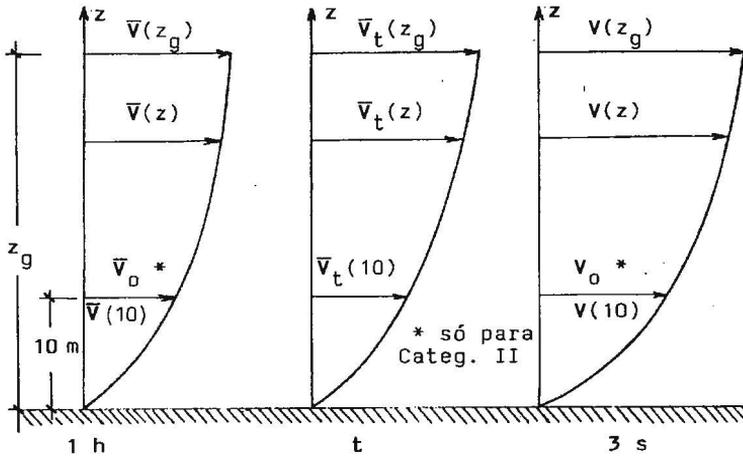


Fig. 3.7 - Simbologia básica para os perfis de velocidade

Quando forem definidas Categorias de rugosidade, para maior clareza a (3.29) pode ser escrita

$$\bar{V}_{t,i}(z) = \bar{V}_{t,i}(10) (z/10)^p \quad (3.30)$$

sendo  $i$  a Categoria em estudo. As alturas gradientes para as cinco Categorias adotadas na norma brasileira são fornecidas na Tabela 3.2.

b) A partir de uma expressão aproximada sugerida por Simiu<sup>17</sup> para a velocidade média sobre  $t$  segundos, na altura  $z$ , chegamos a

$$\bar{V}_t(z) = b \bar{V}_0 \left( \frac{z}{10} \right)^p \left( 1 + \frac{c \sqrt{\beta}}{2,5 \ln(z / z_0)} \right) \quad (3.31)$$

Esta expressão permite determinar o perfil de velocidades médias para um intervalo de tempo qualquer, entre 3 segundos e 1 hora. Estudemos seus termos:

- $c$  é um parâmetro que depende apenas do intervalo de tempo. O parâmetro  $\beta$  e o comprimento de rugosidade  $z_0$  dependem da rugosidade do terreno. Os valores de  $\beta$  e de  $z_0$  sugeridos por Simiu e adotados neste trabalho aparecem na Tabela 3.2 e os de  $c$  na Tabela 3.3.

- $\bar{V}_0$  é a velocidade básica horária: velocidade média horária excedida na média uma vez em 50 anos, a 10 m de altura, em terreno aberto e plano (Categoria II).

– Para uma dada Categoria de terreno (ou seja, para um certo comprimento de rugosidade  $z_0$ ) o parâmetro  $b$  (ou  $b_i$ ) é definido por

$$b_i = \bar{V}_{t,i}(10) / \bar{V}_{t,II}(10) \quad (3.32)$$

Ou seja,  $b_i$  é a relação entre a velocidade média sobre  $t$  segundos, a 10 m de altura, sobre terreno de Categoria  $i$ , e esta mesma velocidade sobre terreno de Categoria II.

c) Para cada uma das cinco Categorias, a partir da (3.31) calcularam-se valores de  $\bar{V}_t(z)/\bar{V}_0$  para diversas alturas  $z$  e para diversos intervalos de tempo  $t$ , obtendo-se perfis de velocidades adimensionais. Estes perfis permitiram obter curvas suavizadas da variação de  $p$  com  $t$ , com os extremos passando pelos valores de  $p$  para 3 segundos e para 1 hora. Para 3 segundos os parâmetros  $p$  e  $b$  foram definidos por curvas potenciais que pouco se afastaram dos perfis da norma brasileira NBR-6123, 1980. Para 1 hora os valores adotados basearam-se em estudos de Biétry, Sacré e Simiu,<sup>25</sup> Simiu<sup>17</sup> e na norma australiana.<sup>29</sup> Um ajuste final foi feito para ser obtida uma velocidade gradiente independente da Categoria, para cada intervalo de tempo.

Valores de  $p$  e de  $b$  são apresentados na Tabela 3.3 e, de uma forma gráfica nas Figs.3.8 e 3.9.

Tabela 3.2 - Parâmetros  $\beta$ ,  $z_0$ ,  $z_g$

Categoria de terreno	I	II	III	IV	V
$\beta$	6,00	6,00	5,25	4,85	4,00
$z_0$ (m)	0,005	0,07	0,30	1,00	2,50
$z_g$ (m)	250	300	350	420	500

Tabela 3.3 – Parâmetros  $c$ ,  $b$ ,  $F_r$ ,  $p$

Cat.	t(s)	3	5	10	15	20	30	45	60	120	300	600	3600
	$c$	2,72	2,56	2,32	2,14	2,00	1,73	1,43	1,25	0,92	0,54	0,32	0
I	$b$	1,10	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15	1,16	1,17	1,19	1,21	1,23	1,25
	Fr	1,00	0,99	0,97	0,95	0,93	0,91	0,89	0,87	0,83	0,79	0,77	0,74
	$p$	0,06	0,065	0,07	0,075	0,075	0,08	0,085	0,085	0,09	0,095	0,095	0,10
II	$b$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Fr	1,00	0,98	0,95	0,93	0,90	0,87	0,84	0,82	0,77	0,72	0,69	0,65
	$p$	0,085	0,09	0,10	0,105	0,11	0,115	0,12	0,125	0,135	0,145	0,15	0,16
III	$b$	0,94	0,94	0,93	0,92	0,92	0,91	0,90	0,90	0,89	0,87	0,86	0,85
	Fr	1,00	0,98	0,94	0,91	0,88	0,84	0,81	0,78	0,73	0,67	0,63	0,59
	$p$	0,10	0,105	0,115	0,125	0,13	0,14	0,145	0,15	0,16	0,175	0,185	0,20

Cat.	t(s)	3	5	10	15	20	30	45	60	120	300	600	3600
IV	c	2,72	2,56	2,32	2,14	2,00	1,73	1,43	1,25	0,92	0,54	0,32	0
	b	0,86	0,85	0,84	0,83	0,83	0,82	0,80	0,79	0,76	0,73	0,71	0,68
	Fr	1,00	0,97	0,93	0,90	0,87	0,83	0,78	0,75	0,68	0,61	0,57	0,51
V	p	0,12	0,125	0,135	0,145	0,15	0,16	0,17	0,175	0,195	0,215	0,23	0,25
	b	0,74	0,73	0,71	0,70	0,69	0,67	0,64	0,62	0,58	0,53	0,50	0,44
	Fr	1,00	0,97	0,91	0,88	0,84	0,79	0,73	0,69	0,60	0,52	0,47	0,39
	p	0,15	0,16	0,175	0,185	0,19	0,205	0,22	0,23	0,255	0,285	0,31	0,35

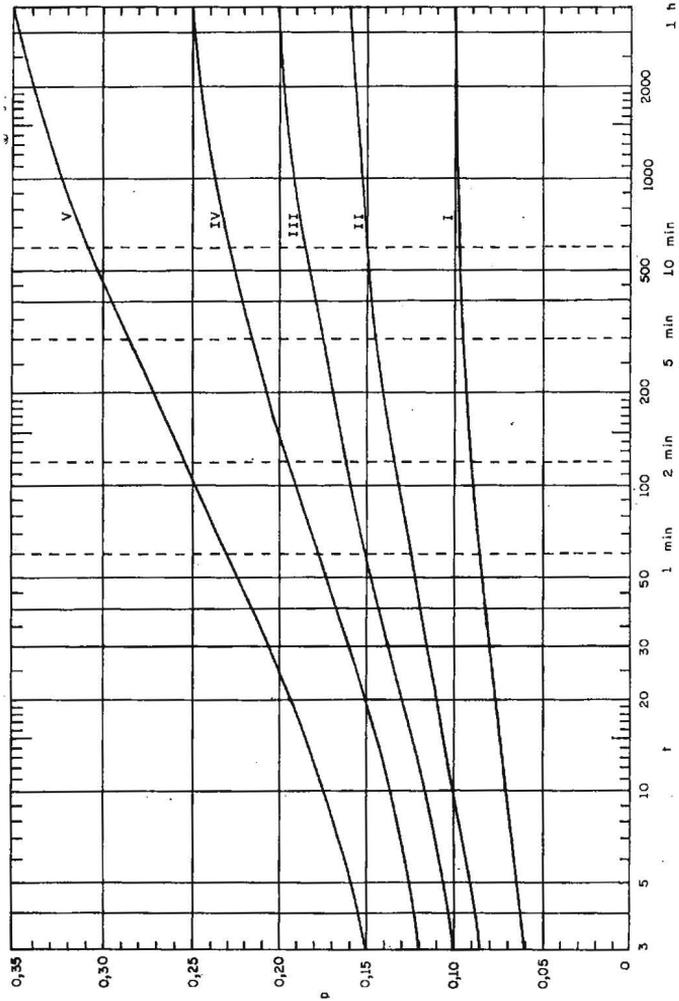


Fig. 3.8 - Expoente p

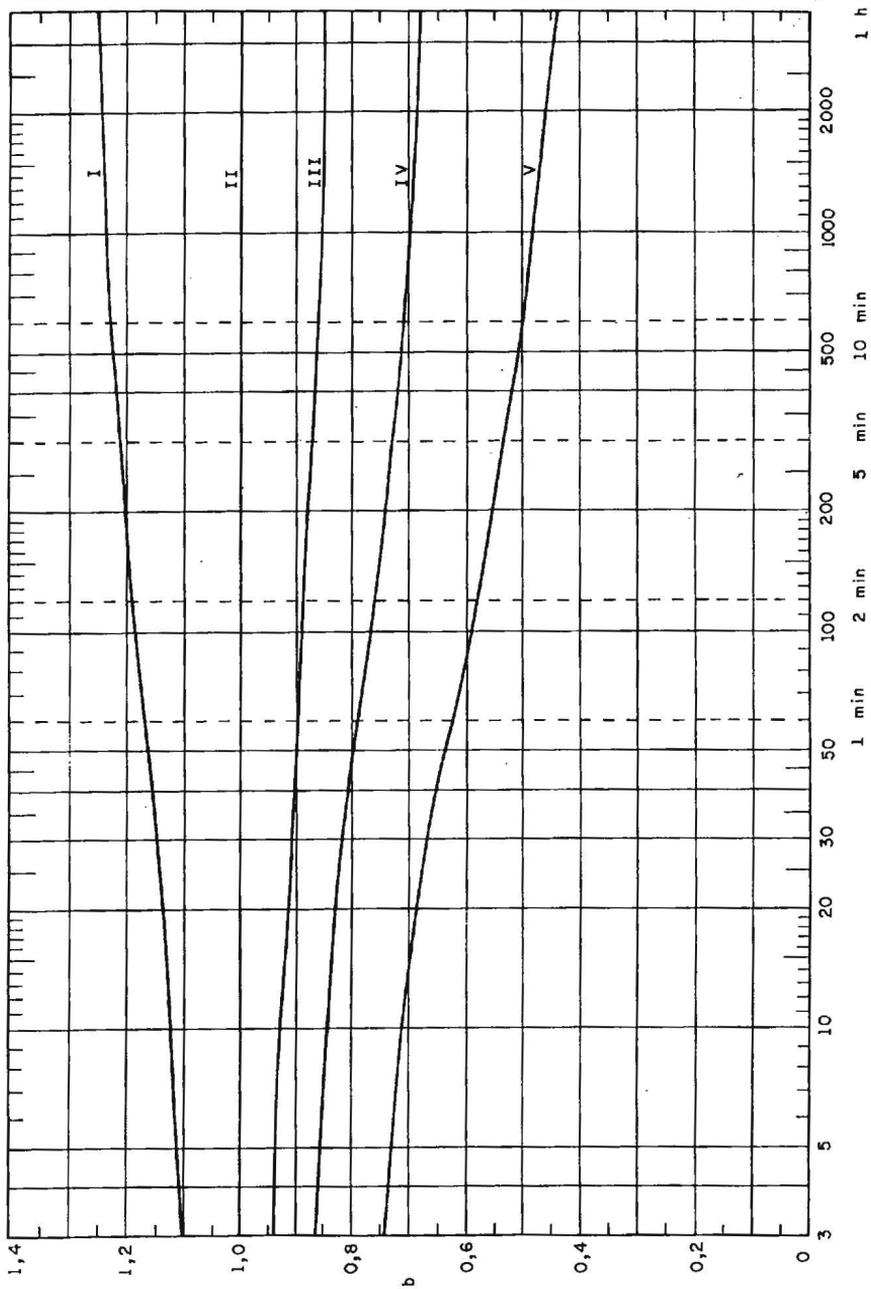


Fig. 3.9 - Parâmetro  $b$

### 3.3.3. Fator de rajada

a) Para rajadas de pequena duração interessa o perfil envolvente dos seus valores máximos, os quais não aparecem simultaneamente ao longo de toda a altura considerada. Este perfil envolvente será designado por **perfil de rajadas**. Para rajadas de 3 segundos a lei potencial fica

$$V_i(z) = b_i V_o (z/10)^p \quad (3.33)$$

sendo

$V_i(z)$  - velocidade de uma rajada de três segundos, na altura  $z$ , para a Categoria  $i$

$V_o$  -- velocidade básica: velocidade de uma rajada de 3s de duração, excedida na média uma vez em 50 anos, a 10 m de altura, em terreno aberto e plano (Categoria II).

b) Para passar da velocidade de rajada de 3s para a velocidade sobre um intervalo de tempo qualquer, é útil o conceito de **fator de rajada**,  $F_r$  (ou  $F_{r,i}$ ), definido como a relação entre a velocidade média sobre  $t$  segundos e a velocidade de rajada de 3s, ambos para uma mesma Categoria  $i$ , a 10 m de altura:

$$F_{r,i} = V_{t,i}(10) / V_i(10) \quad (3.34)$$

Na Fig.3.10 aparecem as curvas de  $F_{r,i}$  para as cinco Categorias da norma brasileira NBR-6123/88.<sup>15</sup> Valores de  $F_{r,i}$  para diversos intervalos de tempo fazem parte da Tabela 3.3.

Fig. 3.10 - Fatores de rajada

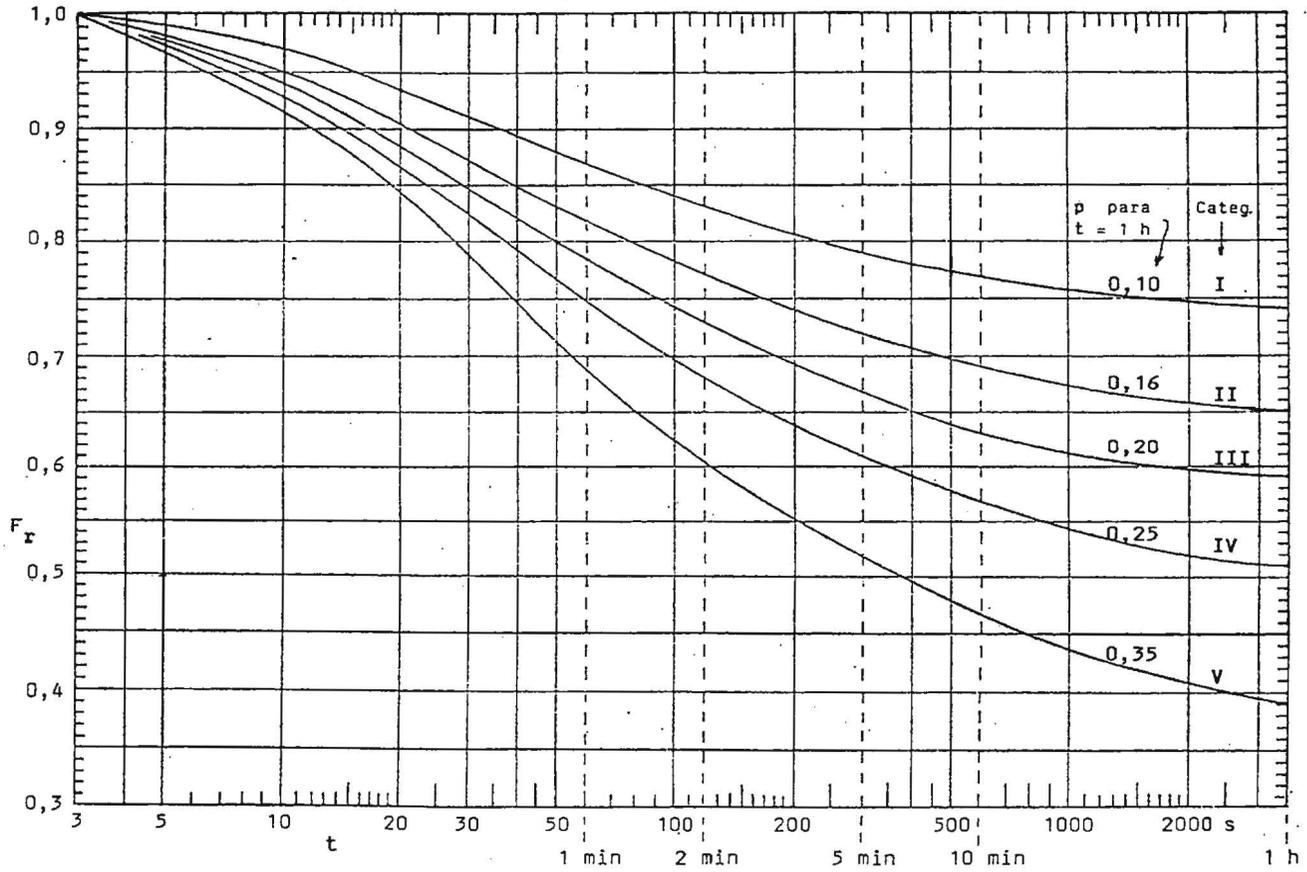


Tabela 3.4 – Velocidade normalizada  $S_2$

Cat.	z (m)	Valores de $S_2$ para t (s) =											
		3	5	10	15	20	30	45	60	120	300	600	3600
I	≤5	1,06	1,04	1,01	1,00	0,97	0,95	0,92	0,90	0,86	0,82	0,79	0,76
	10	1,10	1,09	1,06	1,05	1,02	1,00	0,97	0,96	0,92	0,87	0,85	0,81
	15	1,13	1,12	1,09	1,08	1,05	1,03	1,01	0,99	0,95	0,91	0,88	0,85
	20	1,15	1,14	1,12	1,11	1,08	1,06	1,03	1,02	0,98	0,93	0,91	0,87
	30	1,17	1,17	1,15	1,14	1,11	1,09	1,07	1,05	1,01	0,97	0,94	0,91
	40	1,20	1,19	1,17	1,17	1,14	1,12	1,09	1,08	1,04	0,99	0,97	0,93
	50	1,21	1,21	1,19	1,19	1,16	1,14	1,11	1,10	1,06	1,02	0,99	0,95
	60	1,22	1,22	1,21	1,20	1,17	1,15	1,13	1,12	1,08	1,03	1,01	0,97
	80	1,25	1,24	1,23	1,23	1,20	1,18	1,16	1,14	1,10	1,06	1,03	1,00
	100	1,26	1,26	1,25	1,25	1,22	1,20	1,18	1,17	1,13	1,08	1,06	1,02
	120	1,28	1,28	1,27	1,27	1,24	1,22	1,20	1,19	1,15	1,10	1,07	1,04
	140	1,29	1,29	1,28	1,28	1,25	1,24	1,21	1,20	1,16	1,12	1,09	1,06
	160	1,30	1,30	1,29	1,29	1,26	1,25	1,23	1,21	1,18	1,13	1,10	1,07
	180	1,31	1,31	1,31	1,31	1,27	1,26	1,24	1,23	1,19	1,15	1,12	1,08
	200	1,32	1,32	1,32	1,32	1,28	1,27	1,25	1,24	1,20	1,16	1,13	1,10
250	1,34	1,34	1,33	1,33	1-31	1,29	1,27	1,26	1,22	1,18	1,15	1,12	
II	≤5	0,94	0,92	0,89	0,86	0,83	0,80	0,77	0,75	0,70	0,65	0,62	0,58
	10	1,00	0,98	0,95	0,93	0,90	0,87	0,84	0,82	0,77	0,72	0,69	0,65
	15	1,04	1,02	0,99	0,97	0,94	0,91	0,88	0,86	0,81	0,76	0,73	0,69
	20	1,06	1,04	1,02	1,00	0,97	0,94	0,91	0,89	0,85	0,80	0,77	0,72
	30	1,10	1,08	1,06	1,04	1,02	0,99	0,96	0,94	0,89	0,84	0,81	0,77
	40	1,13	1,11	1,09	1,08	1,05	1,02	0,99	0,98	0,93	0,88	0,85	0,81
	50	1,15	1,13	1,12	1,10	1,07	1,05	1,02	1,00	0,96	0,91	0,88	0,84
	60	1,16	1,15	1,14	1,12	1,10	1,07	1,04	1,03	0,98	0,93	0,90	0,87
	80	1,19	1,18	1,17	1,16	1,13	1,11	1,08	1,06	1,02	0,97	0,94	0,91
	100	1,22	1,21	1,20	1,18	1,16	1,13	1,11	1,09	1,05	1,01	0,97	0,94
	120	1,24	1,23	1,22	1,21	1,18	1,16	1,13	1,12	1,08	1,03	1,00	0,97
	140	1,25	1,24	1,24	1,23	1,20	1,18	1,15	1,14	1,10	1,06	1,03	0,99
	160	1,27	1,26	1,25	1,24	1,22	1,20	1,17	1,16	1,12	1,08	1,05	1,01
	180	1,28	1,27	1,27	1,26	1,24	1,21	1,19	1,18	1,14	1,09	1,06	1,03
	200	1,29	1,28	1,28	1,27	1,25	1,23	1,20	1,19	1,15	1,11	1,08	1,05
250	1,31	1,31	1,31	1,30	1,28	1,26	1,24	1,23	1,19	1,15	1,12	1,09	
300	1,34	1,33	1,33	1,33	1,31	1,29	1,26	1,25	1,22	1,18	1,15	1,12	
III	≤5	0,88	0,86	0,82	0,78	0,75	0,72	0,68	0,67	0,61	0,55	0,52	0,48
	10	0,94	0,92	0,88	0,86	0,83	0,79	0,76	0,74	0,69	0,63	0,59	0,55
	15	0,98	0,96	0,93	0,90	0,87	0,84	0,80	-0,78	0,73	0,67	0,64	0,60
	20	1,01	0,99	0,96	0,93	0,90	0,87	0,84	0,82	0,77	0,71	0,67	0,63
	30	1,05	1,03	1,00	0,98	0,95	0,92	0,89	0,87	0,82	0,76	0,73	0,69
	40	1,08	1,06	1,04	1,02	0,99	0,96	0,92	0,91	0,86	0,80	0,77	0,73
	50	1,10	1,09	1,06	1,05	1,02	0,99	0,96	0,94	0,89	0,83	0,80	0,76
	60	1,12	1,11	1,09	1,07	1,05	1,02	0,98	0,97	0,91	0,86	0,83	0,79
	80	1,16	1,14	1,12	1,11	1,09	1,06	1,02	1,01	0,96	0,90	0,87	0,84
	100	1,18	1,17	1,15	1,14	1,12	1,09	1,06	1,04	0,99	0,94	0,91	0,88
120	1,20	1,20	1,18	1,17	1,14	1,12	1,08	1,07	1,02	0,97	0,94	0,91	
140	1,22	1,22	1,20	1,19	1,17	1,15	1,11	1,10	1,05	0,99	0,97	0,94	
160	1,24	1,23	1,22	1,21	1,19	1,17	1,13	1,12	1,07	1,02	0,99	0,96	
180	1,26	1,25	1,23	1,23	1,21	1,19	1,15	1,14	1,09	1,04	1,01	0,98	

Cat.	z (m)	Valores de $S_2$ para t (s) =											
		3	5	10	15	20	30	45	60	120	300	600	3600
III	200	1,27	1,26	1,25	1,24	1,22	1,20	1,17	1,16	1,11	1,06	1,03	1,01
	250	1,30	1,29	1,28	1,28	1,26	1,24	1,21	1,20	1,15	1,10	1,08	1,05
	300	1,32	1,32	1,31	1,31	1,29	1,27	1,24	1,23	1,18	1,14	1,11	1,09
	350	1,34	1,34	1,33	1,33	1,31	1,30	1,27	1,26	1,21	1,17	1,15	1,12
IV	≤5	0,86	0,76	0,73	0,70	0,67	0,64	0,60	0,57	0,51	0,45	0,42	0,37
	10	0,86	0,83	0,80	0,77	0,74	0,71	0,67	0,65	0,59	0,53	0,49	0,44
	15	0,79	0,88	0,84	0,82	0,79	0,76	0,72	0,70	0,63	0,57	0,54	0,49
	20	0,3	0,91	0,88	0,85	0,83	0,80	0,76	0,73	0,67	0,61	0,57	0,53
	30	0,8	0,6	0,93	0,90	0,88	0,85	0,81	0,79	0,73	0,67	0,63	0,58
	40	1,01	0,99	0,96	0,94	0,92	0,89	0,85	0,83	0,77	0,71	0,67	0,62
	50	1,04	1,02	0,99	0,97	0,95	0,92	0,88	0,86	0,80	0,74	0,71	0,66
	60	1,07	1,04	1,02	1,00	0,98	0,95	0,91	0,89	0,83	0,77	0,74	0,69
	80	1,10	1,08	1,06	1,04	1,02	0,99	0,96	0,93	0,88	0,82	0,79	0,74
	100	1,13	1,11	1,09	1,08	1,06	1,03	0,99	0,97	0,92	0,86	0,83	0,78
	120	1,16	1,14	1,12	1,11	1,08	1,06	1,03	1,00	0,95	0,90	0,87	0,82
	140	1,18	1,16	1,14	1,13	1,11	1,09	1,05	1,03	0,98	0,93	0,90	0,85
	160	1,20	1,18	1,16	1,15	1,13	1,11	1,08	1,05	1,00	0,95	0,93	0,88
	180	1,22	1,20	1,18	1,17	1,15	1,13	1,10	1,07	1,03	0,98	0,95	0,91
	200	1,23	1,21	1,20	1,19	1,17	1,15	1,12	1,09	1,05	1,00	0,97	0,93
	250	1,27	1,25	1,23	1,23	1,21	1,19	1,16	1,14	1,10	1,05	1,03	0,99
	300	1,29	1,27	1,26	1,26	1,24	1,23	1,20	1,17	1,13	1,09	1,07	1,03
	350	1,32	1,30	1,29	1,29	1,27	1,26	1,23	1,21	1,17	1,13	1,11	1,07
400	1,34	1,32	1,32	1,32	1,30	1,29	1,26	1,24	1,20	1,16	1,14	1,10	
420	1,35	1,33	1,33	1,33	1,31	1,30	1,27	1,25	1,21	1,17	1,16	1,12	
V	≤10	0,74	0,72	0,67	0,65	0,62	0,58	0,54	0,51	0,45	0,38	0,34	0,29
	15	0,79	0,76	0,72	0,70	0,67	0,63	0,59	0,56	0,50	0,43	0,39	0,33
	20	0,82	0,80	0,76	0,74	0,71	0,67	0,63	0,60	0,53	0,46	0,43	0,36
	30	0,87	0,85	0,82	0,80	0,77	0,73	0,69	0,65	0,59	0,52	0,48	0,42
	40	0,91	0,89	0,86	0,84	0,81	0,77	0,73	0,70	0,64	0,57	0,53	0,46
	50	0,94	0,93	0,89	0,88	0,84	0,81	0,77	0,74	0,67	0,60	0,57	0,50
	60	0,97	0,95	0,92	0,91	0,87	0,84	0,80	0,77	0,71	0,64	0,60	0,54
	80	1,01	1,00	0,97	0,96	0,92	0,89	0,85	0,82	0,76	0,69	0,66	0,59
	100	1,05	1,03	1,01	1,00	0,96	0,93	0,89	0,86	0,80	0,74	0,70	0,64
	120	1,07	1,06	1,04	1,03	1,00	0,97	0,93	0,90	0,84	0,77	0,75	0,68
	140	1,10	1,09	1,07	1,06	1,03	1,00	0,96	0,93	0,88	0,81	0,78	0,72
	160	1,12	1,11	1,0	1,09	1,05	1,03	0,99	0,96	0,91	0,84	0,81	0,75
	180	1,14	1,14	1,12	1,11	1,08	1,05	1,02	0,99	0,93	0,87	0,84	0,79
	200	1,16	1,16	1,14	1,13	1,10	1,08	1,04	1,01	0,96	0,90	0,87	0,82
	250	1,20	1,20	1,18	1,18	1,15	1,13	1,09	1,07	1,01	0,96	0,94	0,88
	300	1,23	1,23	1,22	1,22	1,19	1,17	1,14	1,11	1,06	1,01	0,99	0,94
	350	1,26	1,26	1,26	1,26	1,22	1,21	1,18	1,15	1,11	1,05	1,04	0,99
	400	1,29	1,29	1,29	1,29	1,25	1,24	1,21	1,19	1,14	1,09	1,08	1,04
450	1,32	1,32	1,32	1,32	1,28	1,27	1,24	1,22	1,18	1,13	1,12	1,08	
500	1,34	1,34	1,34	1,34	1,31	1,30	1,27	1,25	1,21	1,17	1,16	1,12	

Para a Categoria II a (3.34) fica:

$$F_{r,II} = \bar{V}_{t,II}(10) / V_o \quad (3.35)$$

c) Combinando-se convenientemente as expressões (3.30), (3.32) e (3.35) chega-se a

$$\bar{V}_{t,i}(10) = b_i F_{r,II} V_o$$

e

$$\bar{V}_{t,i}(z) = b_i F_{r,II} V_o (z/10)^p \quad (3.36)$$

que vem a ser uma lei geral para o perfil de velocidades médias, em função da velocidade básica  $V_o$  e do fator de rajada para a Categoria II,  $F_{r,II}$ .

### 3.3.4. Fator $S_2$

a) Este fator liga o estudo que estamos desenvolvendo a um parâmetro já bem conhecido, utilizado pela NBR-6123: o perfil de velocidades médias para qualquer intervalo de tempo pode ser obtido a partir do fator  $S_2$ , definido por

$$S_{2,i} = \bar{V}_{t,i}(z) / V_o \quad (3.37)$$

para cada Categoria  $i$  do terreno. O índice  $i$  será usado somente quando necessário para maior clareza de exposição.

$S_2$  pode ser encarado como uma velocidade adimensional normalizada em  $V_o$ , sendo função da altura acima do terreno, do comprimento de rugosidade  $z_o$  e do intervalo de tempo  $t$ .

Considerando as expressões (3.36) e (3.37):

$$S_{2,i} = b_i F_{r,II} (z/10)^p \quad (3.38)$$

Com esta expressão foram calculados os valores de  $S_2$  apresentados na tabela 3.4 e os perfis de  $S_2$  para 3s, 15s, 10min e 1h que aparecem na fig.3.11, para terrenos de Categorias II a V. Para 3s e 15s estão desenhados também os perfis correspondentes à redação anterior da NBR-6123.<sup>11</sup>

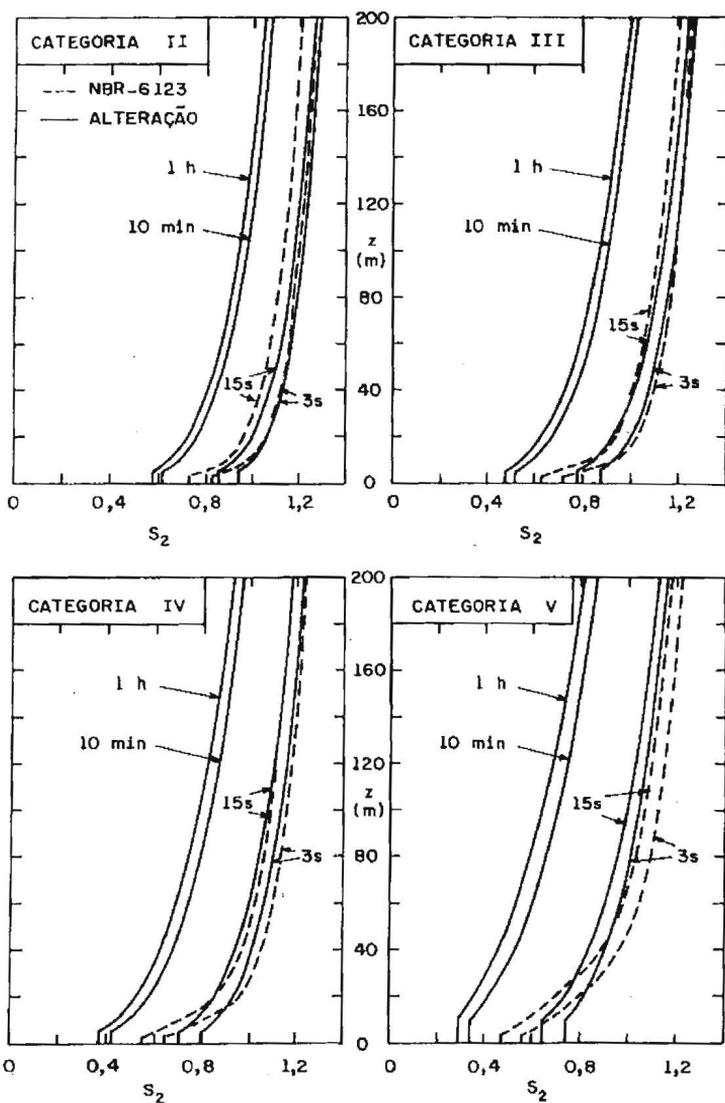


Fig. 3.11 - Perfis de  $s_2$  para diversos intervalos de tempo

$S_2$  é considerado constante para  $z$  entre 0 e 5m, nas Categorias I a IV, e entre 0 e 10m na Categoria V. Nas quatro primeiras porque a turbulência causada pela rugosidade do terreno e as trocas térmicas em certos tipos de ventos violentos (trovoadas, por exemplo) fazem com que a velocidade do vento seja aumentada junto ao terreno. Na Categoria V, a estas causas deve ser adicionada a deflexão do vento para baixo, causada por

obstáculos de grande altura, originando altas velocidades médias próximo ao terreno.

Observe-se que o fator de rajada pode também ser obtido por

$$F_{r,i} = S_{2,i}(10) / S_{2,i,3s}(10)$$

Isto é, a partir da velocidade adimensional  $S_2$  acima definida.

b) Da expressão (3.37) obtém-se:

$$\bar{V}_{t,i}(z) = S_{2,i} V_0 \quad (3.39)$$

Esta expressão permite determinar, com auxílio da tabela 3.4, a velocidade média sobre  $t$  segundos em uma altura  $z$ , para uma Categoria  $i$  do terreno, o que também pode ser feito pela expressão (3.36), lançando mão dos parâmetros contidos na tabela 3.3.

c) Pelo Anexo da norma australiana<sup>29</sup> chega-se a um fator  $S_{2i}$  para rajada de 3s, na altura gradiente, igual a 1,35. Os valores correspondentes na Tabela 3.4 variam entre 1,34 e 1,35. Por sua vez, os valores de  $p$  na Categoria II coincidem com medidas de Deacon<sup>30</sup> na Austrália:  $p_{3s} = 0,085$  e  $p_{1h} = 0,16$ .

### 3.3.5. Exemplos

a) Veremos a seguir como determinar o intervalo de tempo e respectivo perfil vertical de velocidades médias para edificações em que a maior dimensão horizontal ou vertical é superior a 50 m. Trataremos separadamente o caso de edificações alteadas e alargadas. Para o caso de profundidade superior à largura admite-se a adoção dos mesmos valores determinados para edificações alargadas.

#### b) Edificações alteadas

A este tipo de edificações aplica-se o gráfico da fig.3.2. A marcha de cálculo, por aproximações sucessivas, será indicada com dois exemplos:

**1º Exemplo** -- Terreno: Categoria III. Altura da edificação,  $h = 100\text{m}$ . Velocidade básica do vento,  $V_0 = 45\text{ m/s}$ .

1 - Tomar, como primeira aproximação,  $V = V_0$  e determinar  $t = t'$  pela (3.3), com  $L = h$ , ou pela fig.3.2

$$V = V_0 = 45\text{m/s}; t' = 7,5 \times 100/45 = 16,7\text{s}$$

2 - Conhecido  $t'$ , obter  $S_2(h)$  da Tabela 3.4, Cat.III:  $S_2(100)=1,145$

$$3 - \text{Calcular } \bar{V}_r(h) = S_2(h)V_0 : \bar{V}_r(100) = 1,145 \times 45 = 52\text{m/s}$$

4 - Determinar  $t = t''$  pela eq.(3.3) ou pela fig.3.2:

$$t'' = 7,5 \times 100 / 52 = 14,4 \text{ s}$$

5 - Se  $|t'' - t'| < 1,5$ ,  $t = t''$ . Caso contrário, repetir passos 2 a 4  
 $|t'' - t'| = |14,4 - 16,7| = 2,3 \text{ s}$ . Portanto, repetir passos 2 a 4.

2 - Conhecido  $t''$ , obter  $S_2(h)$  pela tabela 3.4:  $S_2(100) = 1,14$

3 -  $V_r(h) = S_2(h)V_0 = 1,14 \times 45 = 51 \text{ m/s}$

4 -  $t''' = 7,5 \times 100 / 51 = 15 \text{ s} = t$ , pois  $|t''' - t''| \leq 1,5$ .

**2º Exemplo** – Terreno: Categoria V. Altura da edificação,  $h = 100 \text{ m}$ .  
 Velocidade básica do vento,  $V_0 = 40 \text{ m/s}$ .

1 -  $V = V_0 = 40 \text{ m/s}$ ;  $t' = 7,5 \times 100 / 40 = 19 \text{ s}$  (ou da Fig.3.2)

2 - Da Tabela 3.4, Categoria V:  $S_2(100) = 0,97$

3 -  $V_r(100) = 0,97 \times 40 = 38,8 \text{ m/s}$

4 -  $t'' = 7,5 \times 100 / 38,8 = 19 \text{ s}$

Portanto,  $t = 19 \text{ s}$ .

**Comentários** – O passo 5 baseia-se em observações da convergência dos valores de  $t$ . Observe-se que para a mesma altura  $h$  das edificações,  $t$  variou em função da Categoria e da velocidade  $V_0$ . As tabelas 3.5 e 3.6 apresentam a marcha de cálculo para edificações com alturas entre 50 e 200 m, com  $V_0$  entre 30 e 50 m/s, para as Categorias III e V. Determinado o valor de  $t$ , o perfil de velocidades adimensionais,  $S_2$ , pode ser obtido a partir das tabelas de  $S_2$ , interpolando, ou a partir da eq.(3.38),  $S_2 = b_1 F_{r,II} (z/10)^p$  com os valores de  $b_1$ ,  $p$  e  $F_{r,II}$  retirados dos gráficos das figs. 3.9 e 3.11 ou da tabela 3.3. Estes valores de  $S_2$ ,  $b_1$ ,  $p$  e  $F_{r,II}$  também aparecem na Norma.

Tabela 3.5 – Determinação do intervalo de tempo – Categoria III

h (m)	V <sub>0</sub> (m/s)	1ª aprox.	2ª aproximação			3ª aproximação		
		t' (s)	S <sub>2</sub> (h)	$\bar{V}_r$ (h)	t' (s)	S <sub>2</sub> (h)	$\bar{V}_r$ (h)	t, t''' (s)
50	30	12,5	1,06	32	12	—	—	12
	35	10,5	1,07	37	10	—	—	10
	40	40	9,5	1,07	43	—	—	9
	45	8,5	1,07	48	8	—	—	8
	50	7,5	1,08	54	7	—	—	7
80	30	20	1,10	33	18	1,10	33	18
	35	17	1,10	39	15	1,11	39	15
	40	15	1,11	44	14	—	—	14
	45	13,5	1,12	50	12	1,12	51	12
	50	12	1,12	56	11	—	—	11

h (m)	V <sub>0</sub> (m/s)	1ª aprox.	2ª aproximação			3ª aproximação		
		t' (s)	S <sub>2</sub> (h)	$\bar{V}_t$ (h)	t' (s)	S <sub>2</sub> (h)	$\bar{V}_t$ (h)	t, t''' (s)
100	30	25	1,11	33	23	1,12	34	22
	35	21,5	1,12	39	19	1,125	39	19
	40	19	1,13	45	17	1,13	45	17
	45	16,5	1,145	52	14	1,14	51	15
	50	15	1,14	57	13	1,5	58	13
120	30	30	1,12	34	26	1,14	34	26
	35	25,5	1,14	40	23	1,145	40	23
	40	22,5	1,145	46	20	1,15	46	20
	45	20	1,15	52	17	1,16	52	17
	50	18	1,16	58	16	1,165	58	16
160	30	40	1,15	35	34	1,155	35	34
	35	34	1,155	40	30	1,16	41	29
	40	30	1,16	46	26	1,18	47	26
	45	27	1,17	53	23	1,185	53	23
	50	24	1,18	59	20	1,19	60	20
200	30	50	1,175	35	43	1,18	35	43
	35	43	1,18	41	37	1,19	42	36
	40	37,5	1,19	48	31	1,20	48	31
	45	33	1,20	54	28	1,21	54	28
	50	30	1,20	60	25	1,22	61	25
Passos:		(1)	(2)	(3)	(4)	(2)	(3)	(4)

$$t = 7,5 h / \bar{V}_t (h) \quad \bar{V}_t (h) = S_2 (h) V_0$$

Tabela 3.6 - Determinação do intervalo de tempo - Categoria V

h (m)	V <sub>0</sub> (m/s)	1ª aprox.	2ª aproximação			3ª aproximação		
		t' (s)	S <sub>2</sub> (h)	$\bar{V}_t$ (h)	t' (s)	S <sub>2</sub> (h)	$\bar{V}_t$ (h)	t, t''' (s)
50	30	12,5	0,92	28	13	—	—	13
	35	10,5	0,95	33	11	—	—	11
	40	9	0,955	38	10	—	—	10
	45	8	0,96	43	9	—	—	9
	50	7,5	0,965	48	8	—	—	8

h (m)	V <sub>0</sub> (m/s)	1ª aprox.	2ª aproximação			3ª aproximação		
		t' (s)	S <sub>2</sub> (h)	$\bar{V}_r$ (h)	t' (s)	S <sub>2</sub> (h)	$\bar{V}_r$ (h)	t, t''' (s)
80	30	20	1,01	30	20	—	—	20
	35	17	1,02	36	17	—	—	17
	40	15	1,03	41	15	—	—	15
	45	13	1,04	47	13	—	—	13
	50	12	1,04	52	12	—	—	12
100	30	25	1,03	31	24	—	—	24
	35	21,5	1,055	37	20	—	—	20
	40	19	1,05	42	18	—	—	18
	45	16,5	1,06	48	16	—	—	16
	50	15	1,07	54	14	—	—	14
120	30	30	1,05	32	28	1,04	31	29
	35	25,5	1,075	38	24	—	—	24
	40	22,5	1,09	44	20	1,10	44	20
	45	20	1,10	50	18	1,105	50	18
	50	18	1,105	55	16	1,11	56	16
160	30	40	1,09	33	36	1,10	33	36
	35	34	1,11	39	31	1,12	39	31
	40	30	1,12	45	27	1,14	46	26
	45	27	1,14	51	24	1,15	52	23
	50	24	1,15	58	21	1,14	57	21
200	30	50	1,14	34	44	1,145	34	44
	35	43	1,15	40	38	1,155	40	38
	40	38	1,16	46	33	1,17	47	32
	45	33	1,17	53	28	1,19	54	28
	50	30	1,18	59	25	1,20	60	25
Passos:		(1)	(2)	(3)	(4)	(2)	(3)	(4)

$$t = 7,5 h / V_t (h) \quad V_t (h) = S_2 (h) V_0$$

As velocidades adimensionais assim obtidas podem ser usadas no cálculo de forças totais nas edificações, as quais servirão para o dimensionamento da estrutura nos andares inferiores, para a determinação das ações nas fundações e para a verificação ao tombamento.

A NBR-6123<sup>15</sup> adota, para edificações com a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal acima de 50 m, um perfil potencial de velocidades médias correspondente a um intervalo de tempo de 10s.

Ao mesmo tempo fica aberta a possibilidade da determinação do tempo de duração da rajada (correspondente a um turbilhão que envolva convenientemente a edificação) pelo processo aqui sugerido. Como indicação prática, recomendamos que este cálculo somente seja feito para edificações com a maior dimensão acima especificada igual ou superior a 80 m. Para dimensões menores, a diferença entre o valor de  $S_2$  assim obtido e o correspondente à Classe C da Norma é desprezável. Além do que, 10s seria o menor intervalo de tempo a considerar em edificações correspondentes à Classe C da Norma, isto é edificações com a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal superior a 50 m.

Resultados do critério acima exposto aparecem na fig.3.12, na qual estão traçados os perfis de velocidades médias para edificações com altura acima de 50 m, de acordo com a NBR-6123.<sup>15</sup> Além destas curvas estão traçadas as correspondentes a edificações com altura  $h$  de 80, 120, 160 e 200 m, determinadas com intervalos de tempo calculados com o critério aqui sugerido. Esta figura mostra claramente a conveniência deste procedimento.

### c) Edificações alargadas

Para edificações alargadas (largura maior que altura) será necessário considerar características que originem pouca ou nenhuma continuidade estrutural ao longo de edificação, como, por exemplo:

- edificações com pouca rigidez na direção perpendicular ao vento, e por isso com pouca capacidade de redistribuição das cargas do vento, tais como pavilhões industriais para lingotamento contínuo e de laminação em usinas siderúrgicas, com comprimentos que podem chegar a 1km ou mais;
- coberturas com estruturas geodésicas, também com pouca capacidade de redistribuição de cargas;
- pavilhões industriais com pórticos auto-portantes, sem redistribuição de cargas horizontais entre eles;
- edificações com juntas de dilatação que separem a estrutura em duas ou mais partes estruturalmente independentes.

Neste caso a dimensão horizontal  $L$  será a dimensão entre juntas de dilatação ou, para os dois últimos exemplos, uma dimensão que o engenheiro estruturista definir como conveniente.

Exemplificaremos com duas cúpulas esféricas, para as quais não há o problema de juntas.

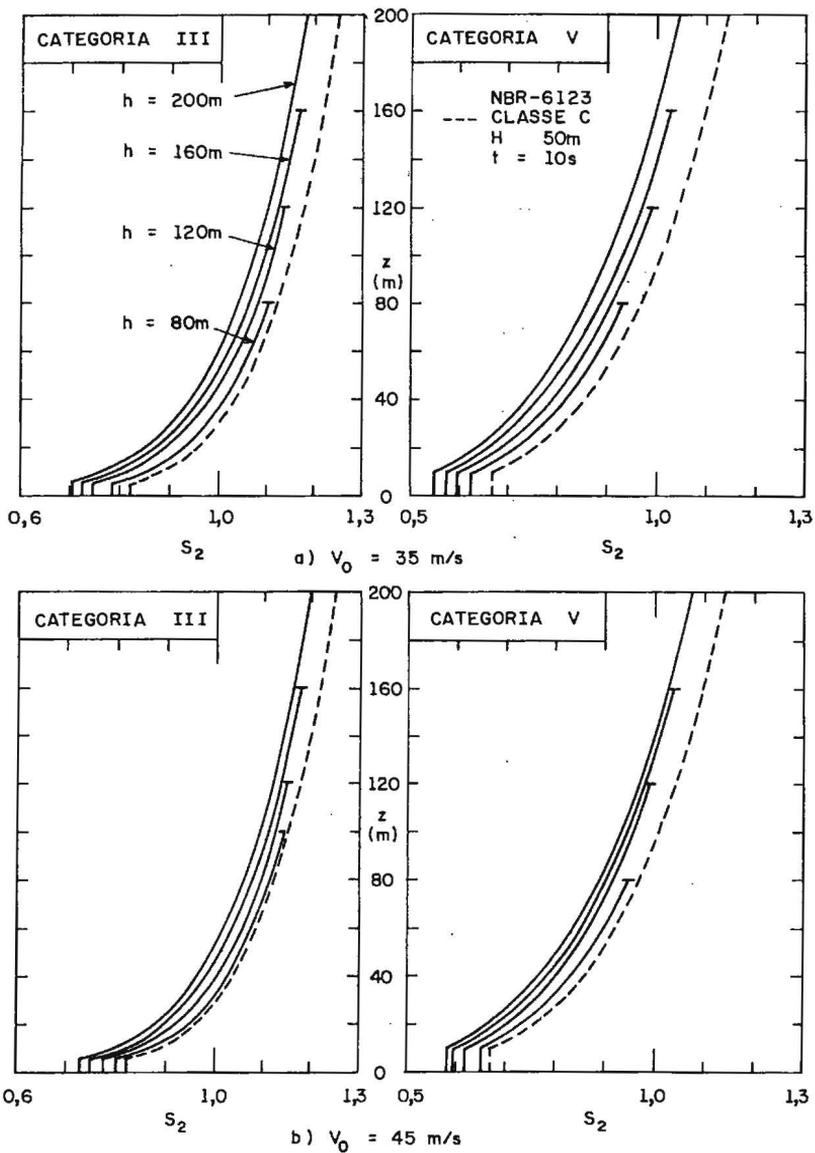


Fig.3.12 - Perfis de  $s_2$  para edificações de diversas alturas

**1º Exemplo** – Terreno: Categoria IV. Altura da cúpula,  $h=100$  m. Diâmetro da base da cúpula,  $L = 200$  m.  $V_o = 45$  m/s.

1 - Adotar, como primeira aproximação,  $V = V_o$  e determinar  $t = t'$  pela (3.3), com  $L = 200$  m, ou pela Fig.3.2:  $V = V_o = 45$  m/s;  $t' = 7,5 \times 200/45 = 33$  s.

2 - Conhecido  $t'$ , obter  $S_2(h)$  da Tabela 3.4. Categoria IV:  $S_2(100) = 1,03$ .

3 - Calcular  $V_t(h) = S_2(h) V_o$ :  $V_t(100) = 1,03 \times 45 = 46$  m/s

4 -  $t'' = 7,5 \times 200/46 = 33$  s =  $t'$ . Portanto,  $t = 33$  s.

**2º Exemplo** – Terreno: Categoria III. Altura da cúpula,  $h = 60$  m. Diâmetro da base da cúpula,  $L = 200$  m.  $V_o = 40$  m/s.

1 -  $V = V_o = 40$  m/s;  $t' = 7,5 \times 200/40 = 37,5$  s (ou da Fig.3.2)

2 - Da tabela 3.4, Categoria III:  $S_2(60) = 1,005$

3 -  $V_t(60) = 1,005 \times 40 = 40$  m/s

4 -  $t'' = 7,5 \times 200/40 = 37,5$  s =  $t'$ . Portanto,  $t = 38$  s.

### 3.4. ALTERAÇÃO NA RUGOSIDADE DO TERRENO

#### 3.4.1. Considerações gerais

Se houver uma alteração sensível na rugosidade média do terreno, o vento na camada limite atmosférica sofrerá modificações, com o perfil de velocidades a sotavento da linha de mudança de rugosidade adaptando-se gradualmente às novas condições, até se formar uma nova camada limite em equilíbrio com a rugosidade a sotavento desta linha. Nesta região de adaptação são distinguidas três **zonas** com características próprias, designadas, na Fig.3.13, por zonas **1**, **2** e **3**. O terreno a barlavento da linha de mudança de rugosidade será chamado de **região 1**, com comprimento de rugosidade  $z_{o1}$ , e o terreno a sotavento desta linha será chamado de **região 2**, com comprimento de rugosidade  $z_{o2}$ .

Na zona 1 o escoamento de ar está em equilíbrio com a rugosidade da região 1. A perturbação no escoamento causada pela mudança de rugosidade não atinge sensivelmente esta zona. Embora apareça um leve deslocamento das linhas de escoamento nesta zona, o perfil de velocidades pode ser considerado igual ao existente na região 1, em pontos situados bem a barlavento da linha de mudança de rugosidade.

A zona 2 é limitada pela chamada **camada limite interna**; nela o escoamento de ar está em equilíbrio com a rugosidade da região 2. O perfil de velocidades pode ser considerado como o correspondente a um terreno de comprimento de rugosidade  $z_{o2}$ .

Na zona 3, de transição, o perfil de velocidades será uma curva que une os perfis das duas zonas extremas.

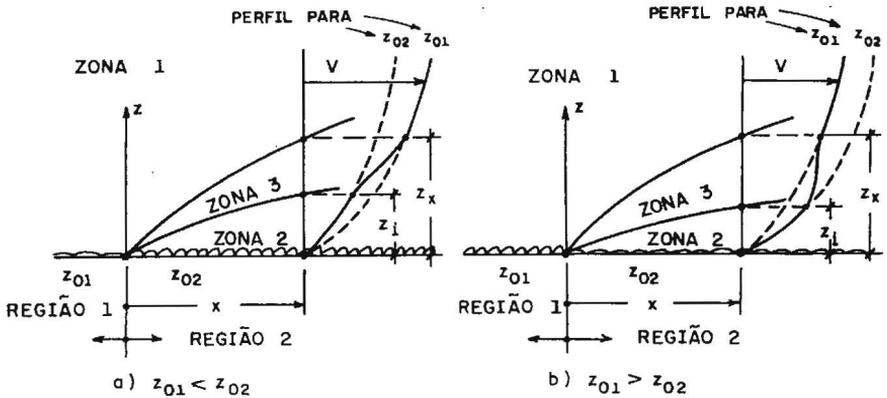


Fig.3.13 - Mudança de rugosidade do terreno

### 3.4.2. Expressões matemáticas

a) O desenvolvimento matemático das expressões que permitem determinar as cotas  $z_i$  e  $z_x$  (limite da zona de transição – Ver Fig.3.13) é encontrado nos extensos trabalhos de Deaves<sup>31</sup> e de Harris e Deaves.<sup>27</sup> Deaves, baseado em leis logarítmicas dos perfis de velocidades médias, estudou um grande número de casos de mudança de rugosidade e mostrou que, com erro tolerável, podem ser usadas as seguintes expressões empíricas:

$$z_{01} < z_{02}: z_i = 0,36 z_{02} (x/z_{02})^{0,75} \quad (3.40)$$

$$z_{01} > z_{02}: z_i = 0,07 x (z_{02}/z_{01})^{0,5} \quad (3.41)$$

$$z_{01} < \text{ou} > z_{02}: z_x = 10 z_0^+ (x/z_0^+)^{0,6} \quad (3.42)$$

sendo  $z_0^+$  o maior dos dois comprimentos de rugosidade.

b) Simiu e Scalan<sup>1</sup> adotam também o critério das três zonas e fornecem algumas indicações de ordem de grandeza:

- contorno superior da zona 2 com declividade média em torno de 1/100;
- contorno superior da zona 3 com declividade média de 1/12,5;

– perfil correspondente ao fator de rugosidade  $z_{02}$  completamente estabelecido a distâncias de mais de 5km a sotavento de linha de mudança de rugosidade.

c) Biétry, Sacré e Simiu<sup>25</sup> sugerem que, para  $x > 500$  m, sejam adotadas, como “aproximação aceitável”, as expressões

$$z_x = x/12,5 \quad \text{e} \quad z_i = x/100.$$

Além disso, comentam que medidas ao vento natural relatadas em trabalho de Panofsky e Petersen sugerem que pode ser aproximadamente admitido que  $z_i=0$ .

d) Em outro trabalho Simiu<sup>17</sup> propõe outras simplificações, adotadas nas Recomendações CECM,<sup>32</sup> e que levam ao abandono da zona 3, de transição.

As sugestões de Simiu são as seguintes:

– para  $x < 500$  m a velocidade é calculada para a categoria de terreno da região 1, isto é,  $z_x = 0$ ;

– para  $x > 5$ km a velocidade é calculada para a categoria de terreno da região 2;

– para  $5\text{km} > x > 500$  m a velocidade é calculada para a categoria de terreno da região 1 acima de uma altura  $z_x = 0,08x$ . Abaixo desta altura é adotado um perfil logarítmico, função de  $z_{02}$ , com velocidade zero junto ao terreno e velocidade na altura  $z_x$  calculada para a categoria de terreno da região 1.

Simiu faz a restrição de que as expressões acima indicadas são válidas somente para  $z_{01} < z_{02}$ , restrição esta que não encontramos nas recomendações CECM.

d) Diversos autores, principalmente em publicações anteriores a 1970, ou baseadas em estudos anteriores a este ano (Refs.10, 20, 22,27, 29 e 33 a 35), além de simplificarem o problema desprezando a zona de transição, indicam, como valor aproximado:

$$z_x = x/100.$$

Portanto, para estabelecer completamente uma camada limite em terreno de Categoria V (NBR-6123<sup>15</sup>), por exemplo, com  $z_g = 500$  m, seriam necessários cerca de 50km !

A partir de 1970 diversos trabalhos(Refs. 1, 17, 25, 30, 32, 36 a 39,59) sugerem:

$$z_x \cong x/10 \quad \text{ou} \quad z_x \cong x/12,5$$

o que leva a valores mais razoáveis.

f)- Elliot, citado na Ref.36, despreza a zona de transição e indica:

$$z_x = A z_{o2} (x/z_{o2})^{0,8} \quad (3.43)$$

sendo

$$A = 0,75 - 0,03 \ln(z_{o2}/z_{o1}) \quad (3.44)$$

Esta expressão tem o mérito de considerar a influência das rugosidades das duas regiões, e foi o ponto de partida para a sugestão apresentada à Comissão de Estudo para a Revisão da NBR-6123, e incorporada à NBR-6123/88<sup>15</sup>.

g) Uma fórmula aproximada, semelhante à eq.(3.43), porém com **A** constante (isto é, a influência de  $z_{o1}$  não é considerada) é sugerida por Pano-fsky e Ming<sup>37</sup> em trabalho recente:

$$z_x = 0,5z_{o2} (x/z_{o2})^{0,8} \quad (3.45)$$

h) Também recentemente, Reichmann<sup>38</sup> transcreve as indicações das Recomendações CECM, porém adota as seguintes expressões para o caso de  $z_{o1} < z_{o2}$ :

$x > 5000$  m: a nova camada limite está plenamente desenvolvida em toda sua altura;

$x < 500$  m : considerar a camada limite da região a barlavento da linha de mudança de rugosidade;

$$500 < x < 5000 \text{ m: } z_x = x/12,5 \quad \text{e} \quad z_i = x/100.$$

i) A partir destas expressões, e com auxílio de um estudo gráfico para verificar a compatibilidade interna dos resultados, chegamos às seguintes expressões:

**Transição para terreno de rugosidade maior ( $z_{o2} > z_{o1}$ ):**

$$z_x = A z_{o2} (x/z_{o2})^{0,8} \quad (3.46)$$

$$z_i = 0,36 z_{o2} (x/z_{o2})^{0,75} \quad (3.47)$$

sendo

$$A = 0,63 - 0,03 \ln(z_{o2}/z_{o1}) \quad (3.48)$$

Entre  $z_i$  e  $z_x$  considerar uma variação linear da velocidade.

**Transição para terreno de rugosidade menor ( $z_{o2} < z_{o1}$ ):**

$$z_x = A z_{o2} (x/z_{o2})^{0,8} \quad (3.49)$$

$$z_i = 0$$

sendo

$$A = 0,73 - 0,03 \ln(z_{o1}/z_{o2}) \quad (3.50)$$

j)- Gráficos correspondentes a algumas das expressões acima apresentadas aparecem nas Figs.3.14 e 3.15, sendo que:

- Na Fig.3.14:  $z_x$  versus  $x$ , pelas (3.46), (3.49) e CECM;
- Na Fig.3.15:  $z_i$  versus  $x$ , de acordo com (3.40), (3.41) e (3.47).

Os valores de  $z_o$  adotados nestas figuras foram os seguintes:

Categoria	I	II	III	IV	V
$z_o$ (mm)	5	70	300	1000	2500

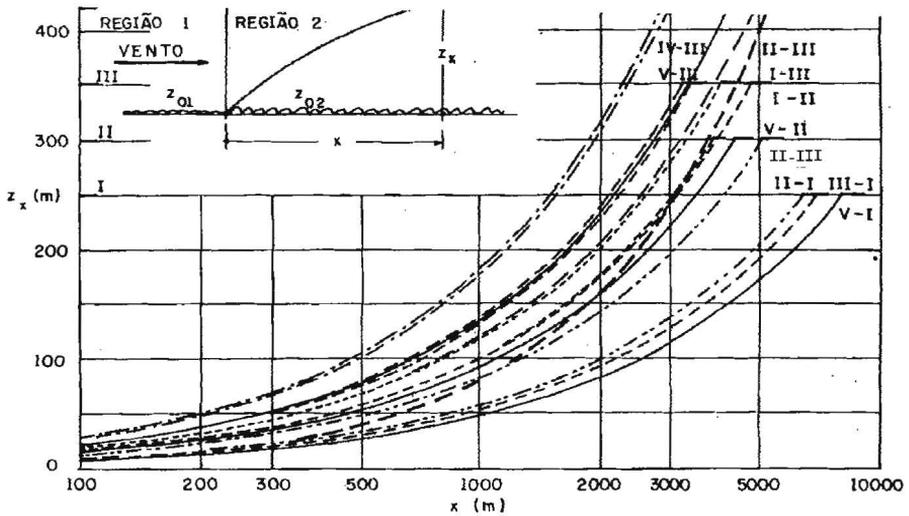


Fig.3.14 - Altura da camada limite ( $z_x$ )

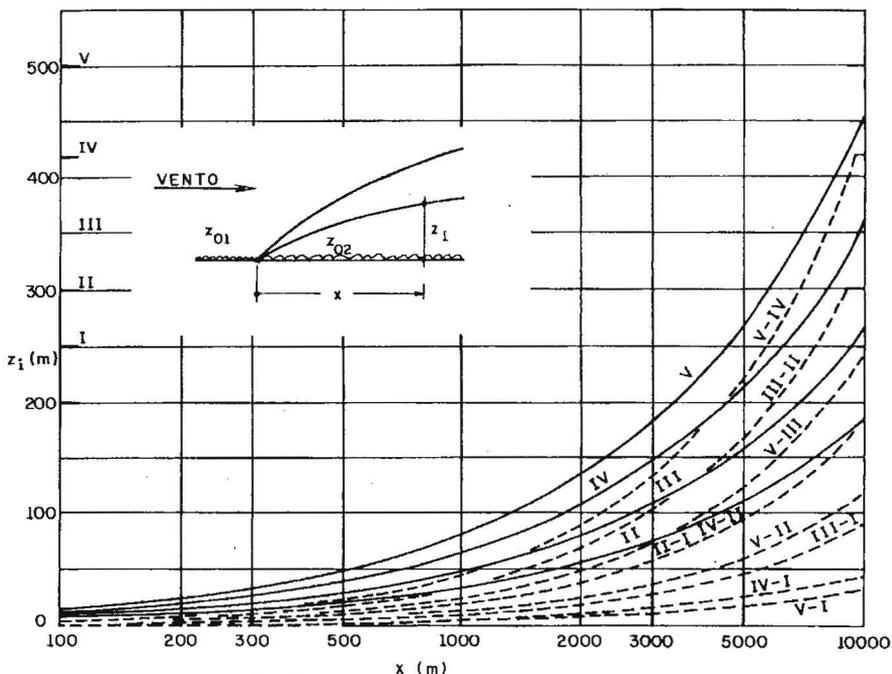


Fig.3.15 - Altura da camada limite interna ( $z_i$ )

### 3.4.3. Exemplos

Os valores de  $z_0$  indicados acima são os que constam da NBR-6123, edição 1988<sup>15</sup>. Os exemplos a seguir são calculados com os valores de  $z_0$  sugeridos posteriormente, e que levam a resultados mais coerentes no estudo teórico-empírico da intensidade, escala e espectro da turbulência, que serão tratados na segunda parte deste trabalho. Estes valores são os seguintes:

Categoria	I	II	III	IV	V
$z_0$ (mm)	5	70	200	700	1750

Os cálculos de  $z_x$  e  $z_i$  foram feitos com auxílio das expressões (3.46) a (3.50).

**1º Exemplo.** Região 1: Categoria I. Região II: Categoria V. Determinar o perfil de velocidades até uma altura de 350 m, sendo o intervalo de tempo para a determinação de  $S_2$  igual a 40s. A edificação está situada 1km a

sotavento da linha de mudança de rugosidade do terreno. Entre parênteses estão dados os valores obtidos com  $z_{05} = 2500\text{mm}$  (NBR-6123/88). A diferença relativa entre os valores é pequena. O mesmo vale para os outros exemplos.

$$A = 0,63 - 0,03 - 0,03 \ln(1,75/0,005) = 0,454 \quad (0,444)$$

$$z_x = 0,454 \times 1,75 \left(\frac{1000}{1,75}\right)^{0,8} = 128\text{m} \quad (134\text{m})$$

$$z_i = 0,36 \times 1,75 \left(\frac{1000}{1,75}\right)^{0,75} = 74\text{m} \quad (80\text{m})$$

**2º Exemplo.** A edificação está situada a 3km a sotavento da linha de mudança de rugosidade. Demais condições iguais as 1º exemplo.

$$z_x = 0,454 \times 1,75 \left(\frac{3000}{1,75}\right)^{0,8} = 307\text{m} \quad (323\text{m})$$

$$z_i = 0,36 \times 1,75 \left(\frac{3000}{1,75}\right)^{0,75} = 168\text{m} \quad (183\text{m})$$

**3º Exemplo.** Região 1: Categoria V. Região 2: Categoria I. Demais condições iguais ao 1º exemplo.

$$A = 0,73 - 0,03 \ln(1,75/0,005) = 0,554 \quad (0,544)$$

$$z_x = 0,554 \times 0,005 \left(\frac{1000}{0,005}\right)^{0,8} = 48\text{m} \quad (47\text{m})$$

**4º Exemplo.** Região 1: Categoria V. Região 2: Categoria I. Demais condições iguais ao 2º exemplo.

$$z_x = 0,554 \times 0,005 \left(\frac{3000}{0,005}\right)^{0,8} = 116\text{m} \quad (114\text{m})$$

Os perfis de velocidades médias para os quatro exemplos são apresentados na Fig.3.16.

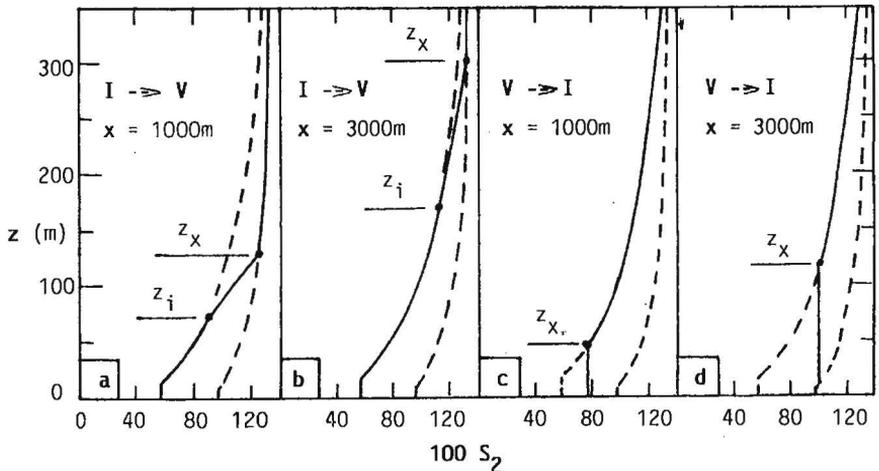


Fig.3.16 - Mudança de rugosidade: aplicação das expressões (3.46) a (3.50)

Nos exemplos 3 e 4, calculando  $z_i$  pela expressão (3.41), válida para  $z_{o1} > z_{o2}$ , teremos, respectivamente:

$$z_i = 0,07 \times 1000 (0,005/1,75)^{0,5} = 4\text{m} \quad (3\text{m})$$
$$z_i = 0,07 \times 3000 (0,005/1,75)^{0,5} = 11\text{m} \quad (9\text{m})$$

o que justifica a simplificação da norma brasileira, que considera  $z_i = 0$  nestes casos.

Para Categorias vizinhas,  $z_i$  é bem maior que nos exemplos acima; porém nestes casos os dois perfis de velocidade estão mais próximos e a simplificação da norma continua causando um erro pequeno, perfeitamente tolerável.

### 3.5. MORROS E TALUDES

#### 3.5.1. Considerações gerais

Um talude ou morro de altura  $d$  causam aumento na velocidade do vento em virtude de um efeito venturi. O efeito será máximo para vento soprando perpendicularmente à linha do cume e para um talude ou morro de grande largura (dimensão perpendicular ao vento), de modo que o escoamento possa ser considerado bidimensional.

Há uma altura de influência,  $h_i$ , medida a partir da base do morro ou talude, até a qual as linhas de corrente sofrem uma deflexão sensível no plano vertical e o vento é acelerado (Fig.3.17). Esta altura de influência depende da forma e dimensões do talude ou morro, bem como do gradiente térmico vertical. Para ventos fortes em estabilidade neutra a influência deste gradiente pode ser desprezada. A altura  $h_i$  em geral se situa entre  $3d$  e  $4d$ , de acordo com medidas feitas ao vento natural ou em túneis de vento. Os estudos matemáticos têm se limitado ao caso de morros e taludes de pequena inclinação.

Para inclinações até  $17^\circ$  o aumento da velocidade causada por esse efeito venturi aumenta com a inclinação. Para inclinações maiores o perfil de velocidades médias permanece constante, independentemente da inclinação<sup>26</sup>. Isto porque forma-se um vórtice na base da falda de barlavento do morro ou do talude que mantém praticamente inalteradas as linhas de corrente que se formaram com inclinação de  $17^\circ$ .

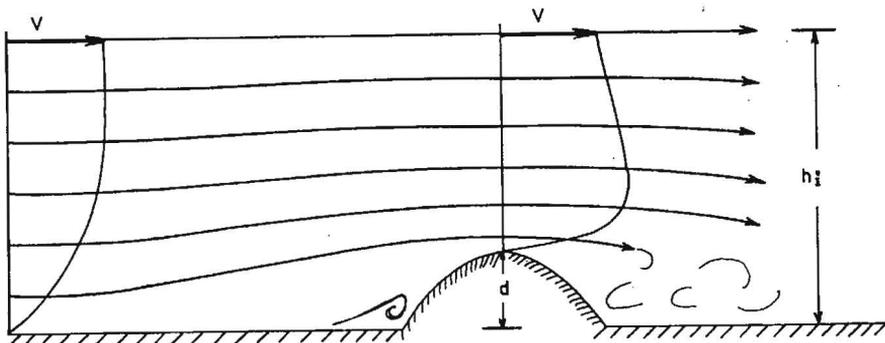


Fig. 3.17 - Alteração nas linhas de corrente nas proximidades de um morro

### 3.5.2. Medidas ao vento natural

Há diversos estudos feitos diretamente sobre o terreno; alguns deles com medições adicionais em modelo topográfico colocado em túnel de vento. A maioria destes estudos refere-se a alterações suaves do terreno, seja um talude, seja uma colina.

Para o caso de morros citamos:

Cheng e Chiu,<sup>40</sup> em um morro com desnível de 236 m, constataram um aumento da intensidade da turbulência de pouco mais de duas vezes, e um aumento da macro-escala da turbulência de cerca de 2,5 vezes.

Mitsuta<sup>41</sup>, em uma montanha com 700 m de altura sobre o nível do mar e situada a 20km da baía (local onde está situada a estação meteorológica), obteve um fator topográfico  $S_1(10)=1,95$ , para vento a 10 m de altura sobre o terreno, tanto na estação meteorológica como no topo da montanha. Os ventos fortes (tufões) que levaram a este valor de  $S_1(z)$  sopravam perpendicularmente ao cume alongado da montanha, ficando a estação meteorológica a barlavento da montanha.

Em Hong Kong, em situação semelhante,  $S_1(10) = 1,90$ .

### 3.5.3. Recomendações CECM

a) Na parte referente à influência de morros e taludes sobre o perfil vertical das velocidades médias do vento, a NBR-6123/88 adotou, com pequenas modificações, a recomendação da Convenção Européia da Construção Metálica.<sup>32</sup> A influência desses acidentes topográficos é considerada no parâmetro  $S_1$ , que passa a ser uma função  $S_1(z)$  da altura  $z$  acima do terreno no ponto em estudo (e não a partir do nível médio da base do morro ou talude).

As Recomendações da CECM consideram  $S_1(z) > 1$  para qualquer inclinação  $\theta$  do terreno diferente de zero. A norma brasileira admite  $S_1(z) = 1,0$  para  $\text{tg } \theta < 0,05$ , acompanhando o critério da norma belga.<sup>42</sup> A altura de influência  $h_i = 3,5d$ .

b) A segunda edição das Recomendações CECM, de 1987,<sup>43</sup> adota um critério completamente diferente, que também é adotado pela norma belga.<sup>42</sup> Por estas normas, o fator topográfico é dado por:

$$\begin{aligned} \text{tg } \theta < 0,05 & : S_1(z) = 1 \\ 0,05 \leq \text{tg } \theta < 0,3 & : S_1(z) = 1 + 1,2 s \text{ tg } \theta \\ \text{tg } \theta \geq 0,3 & : S_1(z) = 1 + 0,36 s \end{aligned} \quad (3.51)$$

sendo  $s$  tirado dos gráficos das figs. 3.18 (morro bidimensional) e 3.19 (talude bidimensional) e  $\text{tg } \theta = H/L$ .

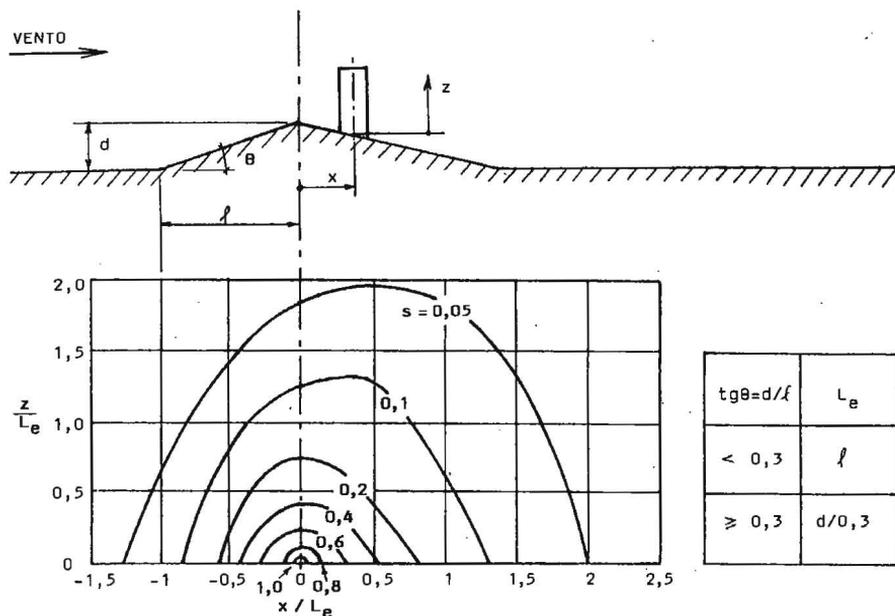


Fig. 3.18 - Valores de  $s$  para morros bidimensionais

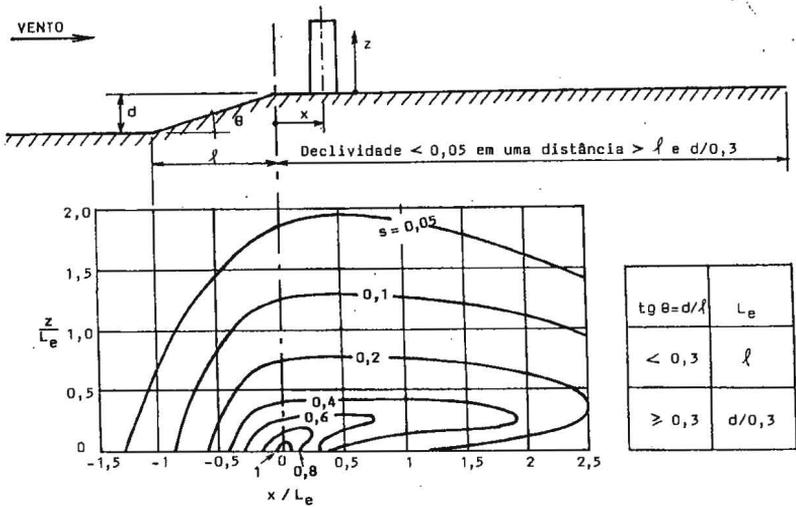


Fig. 3.19 - Valores de  $s$  para taludes bidimensionais

### 3.5.4. Anteprojeto de Norma ISO, 1990<sup>44</sup>

Em uma distância  $|x| \leq kL$  (Ver Fig.3.20 e Tabela 3.7) o parâmetro  $S_1(z)$  é dado por

$$S_1(z) = 1 + \Delta S_{\max} [1 - |x|/(kL)] e^{-az/L} \quad (3.52)$$

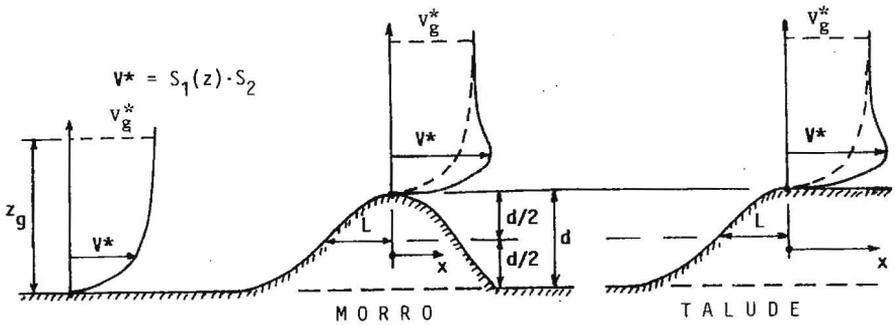
Para  $X = 0$  (isto é, no topo do morro ou talude), a (3.52) fica:

$$S_1(z) = 1 + \Delta S_{\max} e^{-az/L} \quad (3.53)$$

Observe-se que a Tabela 3.7 refere-se a morros baixos ("low hills"), o que limita o emprego das expressões acima indicadas.

Tabela 3.7 - Parâmetros para expressões (3.52) e (3.53)

Forma	$\Delta S_{\max}$	a	k	
			x < 0	x > 0
Morro bidimensional	2 d/L	3	1,5	1,5
Talude bidimensional	1,8 d/L	2,5	1,5	4
Morro tridimensional axissimétrico	1,6 d/L	4	1,5	1,5
Para d/L > 0,5, tomar d/L = 0,5				



### 3.5.5. Norma Brasileira

Em vista das informações anteriores, estamos propondo a seguinte alteração na NBR-6123/88<sup>15</sup> (O texto completo desta Norma, no que diz respeito à determinação da velocidade característica do vento, incluindo esta alteração, será dado no item 3.6):

O fator topográfico  $S_1(z)$  no topo do talude ou morro bidimensionais (ponto B da Fig.3.24) é dado por:

$$\begin{aligned} \text{tg } \theta \leq 0,05 : S_1(z) &= 1,0 \\ 0,10 \leq \text{tg } \theta < 0,31 : S_1(z) &= 1,0 + (2,5 - z/d) \text{tg } \theta \geq 1 \\ \text{tg } \theta \geq 0,31 : S_1(z) &= 1,0 + (2,5 - z/d) 0,31 \geq 1 \end{aligned} \quad (3.54)$$

Interpolar linearmente para  $0,05 < \text{tg } \theta < 0,1$   
 $[0,05 = \text{tg } 3^\circ; 0,10 = \text{tg } 5,7^\circ; 0,31 = \text{tg } 17^\circ]$ .

A velocidade característica,  $V_k$ , é obtida pelo produto  $V_0 S_1 S_2 S_3$ . Uma vez definido o fator probabilístico  $S_3$ , a variação da velocidade característica com a altura acima do terreno pode ser estudada pelo produto adimensional  $S_1 S_2$ , que engloba os efeitos da topografia, da rugosidade do terreno e das dimensões da edificação.

Na fig.3.21 são dados os perfis  $S_1 S_2$  em terreno de Categoria III para o topo de morros ou taludes com declividade  $\text{tg } \theta = 0,31$  e com alturas de 100, 300 e 500m. Como intervalos de tempo foram escolhidos  $t = 3\text{s}$  (Classe A) e  $t = 10\text{min}$  (para estudo de efeitos dinâmicos). A Classe A inclui unidades de vedação, seus elementos de fixação, peças individuais de estruturas sem vedação e toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal não exceda 20m. Para comparação, estão dados os correspondentes perfis em terreno plano. Estes dois perfis estão reproduzidos, com linhas de tracejado curto, nos perfis sobre os morros.

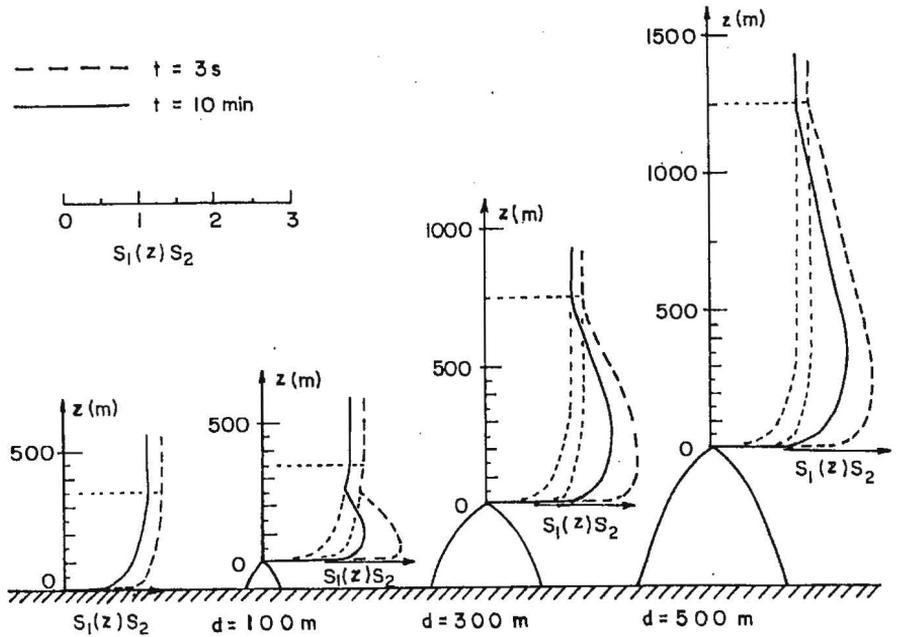


Fig.3.21 - Perfis de  $S_1(z) S_2$  no topo de morros íngremes

O gráfico da fig. 3.22 corresponde a aplicação das expressões (3.54) ao ponto B da fig.3.24, para diversas declividades do terreno.

Aplicando a expressão (3.54) ao caso de Mitsuta (item 3.5.2), a 10m de altura sobre o topo da montanha:

$$S_1(10) = 1,0 + (2,5 - 10/700) 0,31 = 1,77.$$

Esta valor é cerca de 9% inferior ao encontrado por Mitsuta. Outras fontes, como vimos, indicam valores ainda mais baixos. Cook<sup>26</sup>, por exemplo, indica  $S_1(10) = 1,6$ , para terreno com inclinação de  $17^\circ$ .

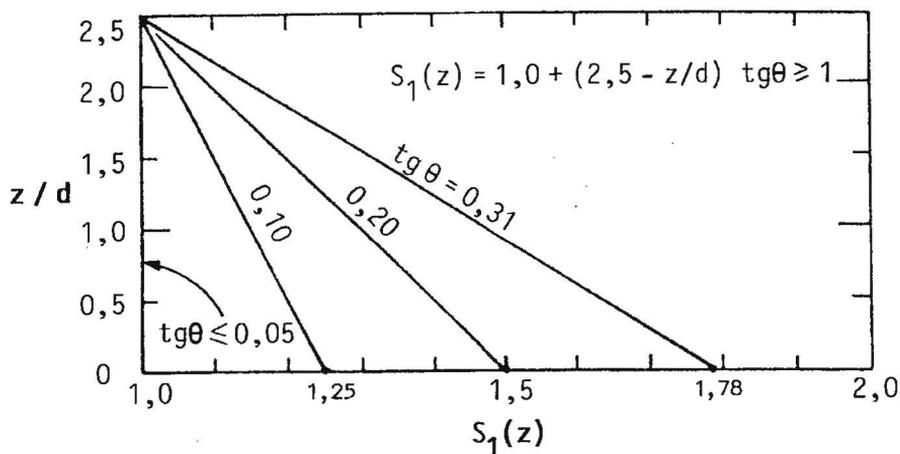


Fig. 3.22 - Fator topográfico  $S_1(z)$  conforme (3.54)

A Tabela 3.8 apresenta valores de  $S_1(10)$  e de  $S_1(50)$  no topo de morros e taludes com alturas  $d = 50\text{m}$  e  $500\text{m}$ , para diversas inclinações do terreno.

Tabela 3.8 - Fator topográfico  $S_1(z)$  a 10m e a 50m de altura

tg $\theta$	$\theta$	$S_1(10)$ para		$S_1(50)$ para	
		d = 50 m	d = 500 m	d = 50 m	d = 500 m
0,10	5,7°	1,23	1,25	1,15	1,24
0,15	8,5°	1,34	1,37	1,22	1,36
0,20	11,3°	1,46	1,50	1,30	1,48
0,25	14,0°	1,57	1,62	1,37	1,60
0,30	16,7°	1,69	1,74	1,45	1,72
0,31	17,2°	1,71	1,77	1,46	1,74

### 3.6. NORMA BRASILEIRA

A seguir apresentaremos o texto da edição 1988 da NBR-6123<sup>15</sup> referente à determinação da velocidade característica do vento. A numeração dos itens é a da Norma; porém tabelas e figuras seguem a numeração deste trabalho. Além disso, as expressões para cálculo de  $S_1(z)$  no ponto B são as deste trabalho.

## "5 VELOCIDADE CARACTERÍSTICA DO VENTO

### 5.1. Velocidade básica do vento, $V_0$

A velocidade básica do vento,  $V_0$ , é a velocidade de uma rajada de três segundos, excedida em média uma vez em 50 anos, a 10 metros acima do terreno, em campo aberto e plano.

A Figura 3.23 apresenta o gráfico das isopletas da velocidade básica no Brasil, com intervalos de 5m/s.

**5.1.1.** Como regra geral é admitido que o vento básico pode soprar de qualquer direção horizontal.

Em caso de dúvida quanto a 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.

### 5.2. Fator topográfico, $S_1$

O fator topográfico  $S_1$  leva em consideração as variações do relevo do terreno e é determinado do seguinte modo:

#### a) Terreno plano ou fracamente acidentado

$$S_1 = 1,0$$

#### b) Taludes e morros

Taludes e morros alongados nos quais pode ser admitido um escoamento de ar bidimensional soprando no sentido indicado na fig.3.24.

– No ponto A (morros) e nos pontos A e C (taludes):

$$S_1 = 1,0$$

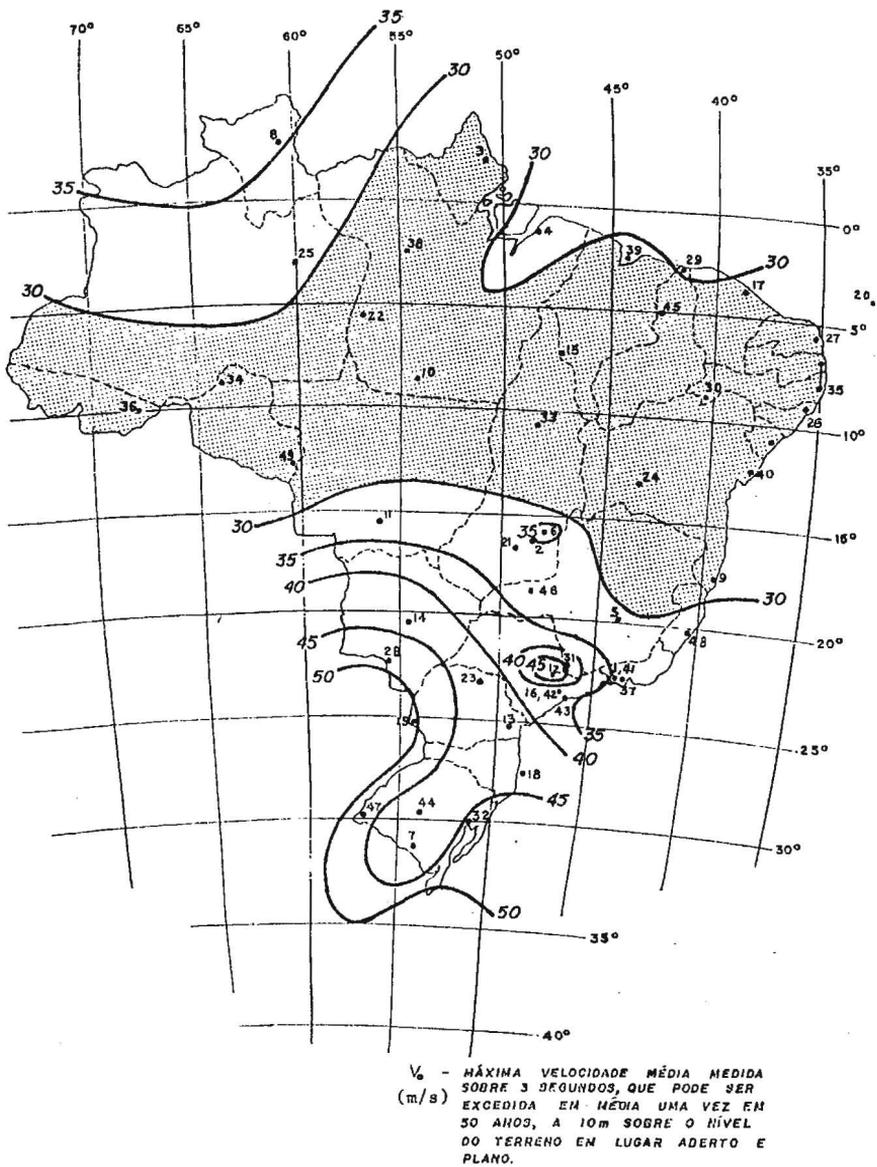


Fig. 3.23 - Isopletas da velocidade básica  $V_0$  - NBR 6123/88

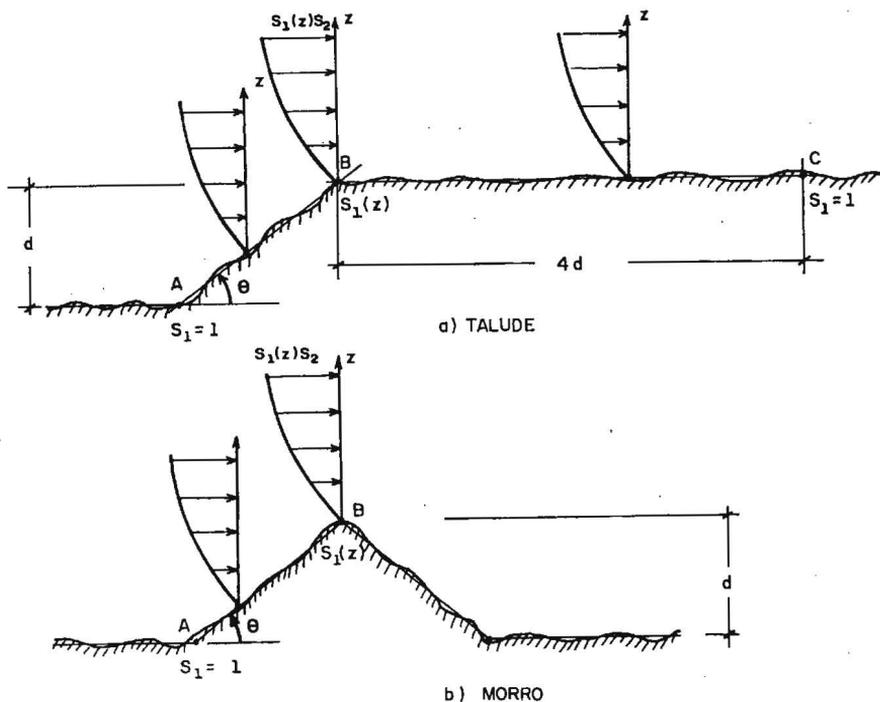


Fig. 3.24 - Parâmetro topográfico  $S_1(z)$  – NBR 6123/88

– No ponto B [ $S_1$  é uma função  $S_1(z)$ ]:

$$\text{tg } \theta \leq 0,05 : S_1(z) = 1,0$$

$$0,10 \leq \text{tg } \theta < 0,31 : S_1(z) = 1,0 + (2,5 - z/d) \text{tg } \theta \geq 1$$

$$\text{tg } \theta \geq 0,31 : S_1(z) = 1,0 + (2,5 - z/d) 0,31 \geq 1$$

(Interpolares linearmente entre  $0,05 < \text{tg } \theta < 0,1$ )

sendo:

$z$  – altura medida a partir da superfície do terreno no ponto considerado;

$d$  – diferença de nível entre a base e o topo do talude ou morro;

$\theta$  – inclinação média do talude ou encosta do morro.

Entre A e B e entre B e C o fator  $S_1$  é obtido por interpolação linear.

**c) Vales profundos**, protegidos de ventos de qualquer direção:

$$S_1 = 0,9.$$

Os valores indicados nos ítems **b** e **c** constituem uma primeira aproximação e devem ser usados com precaução.

Se for necessário um conhecimento mais preciso da influência do relevo, ou se a aplicação destas indicações tornar-se difícil pela complexidade do relevo, é recomendado o recurso a ensaios de modelos topográficos em túnel de vento ou a medidas anemométricas no próprio terreno.

### **5.3. Rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno: Fator $S_2$**

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 da edificação em consideração.

Em ventos fortes em estabilidade neutra a velocidade do vento 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 com um intervalo de tempo maior.

#### **5.3.1. Rugosidade do terreno**

Para fins desta Norma a rugosidade do terreno é classificada em cinco Categorias \*:

**Categoria I:** Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente. Exemplos:

- mar calmo\*\*;
- lagos e rios;
- pântanos sem vegetação.

**Categoria II:** Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas.

Exemplos:

- zonas costeiras planas;
- pântanos com vegetação rala;
- campos de aviação;
- pradarias e charnecas;
- fazendas sem sebes ou muros.

A cota média do topo dos obstáculos é considerada inferior ou igual a 1,0 m.

**Categoria III:** Terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas. Exemplos:

- granjas e casas de campo, com exceção das partes com matos;
- fazendas com sebes e/ou muros;
- subúrbios a considerável distância do centro, com casas baixas e esparsas.

A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 3,0 m.

**Categoria IV:** Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada. Exemplos:

- zonas de parques e bosques com muitas árvores;
- cidades pequenas e seus arredores;
- subúrbios densamente construídos de grandes cidades;
- áreas industriais plena ou parcialmente desenvolvidas.

A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 10 m.

Esta Categoria também inclui zonas com obstáculos maiores e que ainda não possam ser consideradas na Categoria V.

**Categoria V:** Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados. Exemplos:

- florestas com árvores altas de copas isoladas;
- centros de grandes cidades;
- complexos industriais bem desenvolvidos.

A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual ou superior a 25 m.

#### **Observações:**

\* A critério do projetista poderão ser consideradas Categorias intermediárias, interpolando convenientemente os valores de **p** e **b** ou de **S<sub>2</sub>** indicados no item 5.3.3 ou no Anexo A.

\*\* Para mar agitado o valor do expoente **p** para uma hora pode chegar a 0,15, em ventos violentos. Em geral,  $p \approx 0,12$ .

### **5.3.2. Dimensões da edificação**

A velocidade do vento varia continuamente e seu valor médio pode ser calculado sobre qualquer intervalo de tempo. Foi verificado que o intervalo mais curto das medidas usuais (três segundos) corresponde a rajadas cujas dimensões envolvem convenientemente obstáculos de até 20 metros na direção do vento médio. Quanto maior o intervalo de tempo usado no cálculo da velocidade média, tanto maior a distância abrangida pela rajada.

Para a definição das partes da edificação a considerar na determinação das ações do vento, é necessário considerar características construtivas ou estruturais que originem pouca ou nenhuma continuidade estrutural ao longo da edificação, tais como:

- edificações com juntas que separem a estrutura em duas ou mais partes estruturalmente independentes;
  - edificações com pouca rigidez na direção perpendicular à direção do vento, e por isso com pouca capacidade de redistribuição de cargas.
- Foram escolhidas as seguintes classes de edificações, partes de edificações e seus elementos, com intervalos de tempo para cálculo da velocidade média de, respectivamente, 3, 5 e 10 segundos:

**Classe A:** Todas as unidades de vedação, seus elementos de fixação e peças individuais de estruturas sem vedação. Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda 20 metros.

**Classe B:** Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 e 50 metros.

**Classe C:** Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 metros. Para toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 80 metros, o intervalo de tempo correspondente poderá ser determinado de acordo com as indicações do Anexo A.

### 5.3.3. Altura sobre o terreno

O fator  $S_2$  usado no cálculo da velocidade do vento em uma altura  $z$  acima do nível geral do terreno é obtida pela expressão

$$S_2 = b F_r (z/10)^p$$

sendo que o fator de rajada  $F_r$  é sempre o correspondente à Categoria II. A expressão acima é aplicável até a altura  $z_g$ , que define o contorno superior da camada limite atmosférica.

Os parâmetros que permitem determinar  $S_2$  para as cinco Categorias desta Norma são apresentados na tabela 3.9.

Os valores de  $S_2$  para as diversas Categorias de rugosidade do terreno e Classes de dimensões das edificações definidos nesta Norma são dados na tabela 3.10. Para o estudo dos elementos de vedação é recomendado usar o fator  $S_2$  correspondente ao topo da edificação. Esta recomendação é baseada no fato de que na fachada de barlavento e nas fachadas laterais o vento é defletido para baixo, com um conseqüente aumento da pressão dinâmica na parte inferior da edificação. Pela mesma

razão o fator  $S_2$  é considerado constante até 10 metros de altura na Categoria V.

**5.3.4.** O Anexo A desta Norma indica a determinação do fator  $S_2$  para intervalos de tempo entre três segundos e uma hora e para qualquer rugosidade do terreno.

Tabela 3.9 – Parâmetros meteorológicos

Categoria	$z_0$ (m)	Parâmetro	Classes		
			A	B	C
I	250	b	1,10	1,11	1,12
		p	0,06	0,065	0,07
II	300	b	1,00	1,00	1,00
		$F_r$	1,00	0,98	0,95
		p	0,085	0,09	0,10
III	350	b	0,94	0,94	0,93
		p	0,10	0,105	0,115
IV	420	b	0,86	0,85	0,84
		p	0,12	0,125	0,135
V	500	b	0,74	0,73	0,71
		p	0,15	0,16	0,175

Tabela 3.10 - Fator  $S_2$

z (m)	CATEGORIA														
	I			II			III			IV			V		
	Classe			Classe			Classe			Classe			Classe		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
≤5	1,06	1,04	1,01	0,94	0,92	0,89	0,88	0,86	0,82	0,79	0,76	0,73	0,74	0,72	0,67
10	1,10	1,09	1,06	1,00	0,98	0,95	0,94	0,92	0,88	0,86	0,83	0,80	0,74	0,72	0,67
15	1,13	1,12	1,09	1,04	1,02	0,99	0,98	0,96	0,93	0,90	0,88	0,84	0,79	0,76	0,72
19	1,15	1,14	1,12	1,06	1,04	1,02	1,01	0,99	0,96	0,93	0,91	0,88	0,82	0,80	0,76
30	1,17	1,17	1,15	1,10	1,08	1,06	1,05	1,03	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87	0,85	0,82
40	1,20	1,19	1,17	1,13	1,11	1,09	1,08	1,06	1,04	1,01	0,99	0,96	0,91	0,89	0,86
50	1,21	1,21	1,19	1,15	1,13	1,12	1,10	1,09	1,06	1,04	1,02	0,99	0,94	0,93	0,89
60	1,22	1,22	1,21	1,16	1,15	1,14	1,12	1,11	1,09	1,07	1,04	1,02	0,97	0,95	0,92
80	1,25	1,24	1,23	1,19	1,18	1,17	1,16	1,14	1,12	1,10	1,08	1,06	1,01	1,00	0,97
100	1,26	1,26	1,25	1,22	1,21	1,20	1,18	1,17	1,15	1,13	1,11	1,09	1,05	1,03	1,01
120	1,28	1,28	1,27	1,24	1,23	1,22	1,20	1,20	1,18	1,16	1,14	1,12	1,07	1,06	1,04
140	1,29	1,29	1,28	1,25	1,24	1,24	1,22	1,22	1,20	1,18	1,16	1,14	1,10	1,09	1,07
160	1,30	1,30	1,29	1,27	1,26	1,25	1,24	1,23	1,22	1,20	1,18	1,16	1,12	1,11	1,10

z (m)	CATEGORIA														
	I			II			III			IV			V		
	Classe			Classe			Classe			Classe			Classe		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
180	1,31	1,31	1,31	1,28	1,27	1,27	1,26	1,25	1,23	1,22	1,20	1,18	1,14	1,14	1,12
200	1,32	1,32	1,32	1,29	1,28	1,28	1,27	1,26	1,25	1,23	1,21	1,20	1,16	1,16	1,14
250	1,34	1,34	1,33	1,31	1,31	1,31	1,30	1,29	1,28	1,27	1,25	1,23	1,20	1,20	1,18
300	-	-	-	1,34	1,33	1,33	1,32	1,32	1,31	1,29	1,27	1,26	1,23	1,23	1,22
350	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,33	1,32	1,30	1,29	1,26	1,26	1,26
400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,32	1,32	1,29	1,29	1,29
420	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,35	1,35	1,33	1,30	1,30	1,30
450	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,32	1,32	1,32
500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,34

#### 5.4. 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 em 5.1, a velocidade básica  $V_0$  é a velocidade do vento que apresenta um período de recorrência médio de 50 anos. A probabilidade de que a velocidade  $V_0$  seja igualada ou excedida neste período é de 63%. O nível de probabilidade (0,63) e a vida útil (50 anos) adotados são considerados adequados para edificações normais destinadas a moradias, hotéis, escritórios, etc. (Grupo 2). Na falta de uma norma específica sobre segurança nas edificações, ou de indicações correspondentes na norma estrutural, os valores mínimos do fator  $S_3$  são os indicados na tabela 3.11.

Tabela 3.11 - Valores mínimos do fator estatístico  $S_3$

Grupo	Descrição	$S_3$
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.)	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.)	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.)	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos Grupos 1 a 3 durante a construção	0,83

**5.4.1.** O Anexo B desta Norma indica a determinação do fator  $S_2$  para outros níveis de probabilidade e para outros períodos de exposição da edificação a ação do vento.

## 5.5. Mudança de rugosidade do terreno

**5.5.1.** Se a Categoria de terreno mudar, com o comprimento de rugosidade passando de  $z_{01}$  para  $z_{02}$ , o vento percorrerá uma certa distância antes que se estabeleça plenamente um novo perfil de velocidades médias, com altura  $z_g$ . A alteração do perfil começa próximo ao solo e o novo perfil aumenta sua altura  $z_x$  a medida que cresce a distância  $x$  medida a partir da linha de mudança de Categoria. Este perfil de velocidades médias é determinado do seguinte modo:

### 5.5.2. Transição para Categoria de rugosidade maior ( $z_{01} < z_{02}$ )

Determinam-se as alturas  $z_x$  e  $z_i$  pelas expressões

$$z_x = A z_{02} (x/z_{02})^{0,8}$$

$$z_i = 0,36 z_{02} (x/z_{02})^{0,75}$$

sendo

$$A = 0,63 - 0,03 \ln(z_{02}/z_{01})$$

O perfil de velocidades médias (fatores  $S_2$ ) é assim definido (Fig.3.25.a):

(a) Da altura  $z_x$  para cima são considerados os fatores  $S_2$  correspondentes ao terreno mais afastado da edificação ( $z_{01}$ ).

(b) Da altura  $z_i$  para baixo são considerados os fatores  $S_2$  correspondentes ao terreno que circunda a edificação ( $z_{02}$ ).

(c) Na zona de transição entre  $z_i$  e  $z_x$  considerar uma variação linear do fator  $S_2$ .

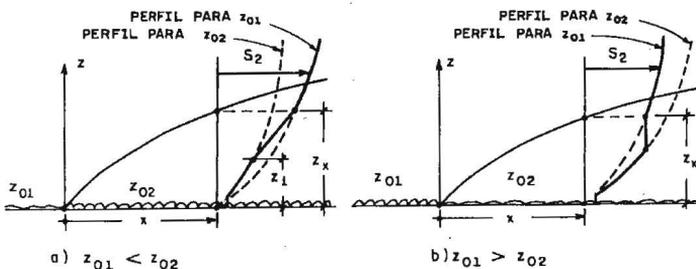


Fig. 3.25 - Perfil de  $S_2$  a sotavento de uma mudança de rugosidade

### 5.5.3. Transição para Categoria de rugosidade menor ( $z_{01} > z_{02}$ )

Determina-se a altura  $z_x$  pela expressão

$$z_x = A z_{02} (x/z_{02})^{0,8}$$

sendo

$$A = 0,73 - 0,03 \ln(z_{01}/z_{02})$$

O perfil de velocidades médias (fatores  $S_2$ ) é assim definido (Fig.3.25.b):

(a) Da altura  $z_x$  para cima são considerados os fatores  $S_2$  correspondentes ao terreno mais afastado da edificação ( $z_{01}$ ).

(b) Da altura  $z_x$  para baixo são considerados os fatores  $S_2$  correspondentes ao terreno que circunda a edificação, porém sem ultrapassar o valor de  $S_2$  determinado na altura  $z_x$  para o terreno de rugosidade  $z_{01}$  (item 5.5.3.a).

**5.5.4.** As alturas das camadas limites,  $z_g$ , nos perfis de velocidades médias plenamente desenvolvidos e os comprimentos de rugosidade,  $z_0$ , são os seguintes:

Categoria:	I	II	III	IV	V
$z_g$ (m):	250	300	350	420	500
$z_0$ (m):	0,005	0,07	0,30	1,0	2,5

## ANEXO A

### A.1. Fator $S_2$

O fator  $S_2$  pode ser considerado como uma velocidade adimensional, normalizada em  $V_0$ :

$$S_{2,i} = \overline{V}_{t,i}(z) / V_0$$

sendo

$i$  : Categoria de rugosidade do terreno;

$\overline{V}_{t,i}(z)$  : velocidade média sobre  $t$  segundos, na altura  $z$  acima do terreno, para a Categoria  $i$  (sem considerar os fatores  $S_1$  e  $S_3$ ).

A velocidade característica  $V_{k,i}$  é definida por

$$V_{k,i} = V_0 S_1 S_2 S_3$$

Independentemente das Categorias de rugosidade definidas nesta Norma, o fator  $S_2$  pode ser obtido pela expressão

$$S_2 = b F_{r,II} (z/10)^p$$

Valores dos parâmetros  $b$ ,  $F_{r,II}$  e  $p$ , para diversos intervalos de tempo e para as cinco Categorias desta Norma são apresentados na tabela 3.12. Os valores correspondentes de  $S_2$  são apresentados na tabela 3.4

Tabela 3.12 - Parâmetros  $b$ ,  $p$ ,  $F_{r,II}$

Cat.	t(s)	3	5	10	15	20	30	45	60	120	300	600	3600
I	b	1,10	1,11	1,12	1,13	1,14	1,15	1,16	1,17	1,19	1,21	1,23	1,25
	p	0,06	0,065	0,07	0,075	0,075	0,08	0,085	0,085	0,09	0,095	0,095	0,10
II	b	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	p	0,085	0,09	0,10	0,105	0,11	0,115	0,12	0,125	0,135	0,145	0,15	0,16
	$F_r$	1,00	0,98	0,95	0,93	0,90	0,87	0,84	0,82	0,77	0,72	0,69	0,65
III	b	0,94	0,94	0,93	0,92	0,92	0,91	0,90	0,90	0,89	0,87	0,86	0,85
	p	0,10	0,105	0,115	0,125	0,13	0,14	0,145	0,15	0,16	0,175	0,185	0,20
IV	b	0,86	0,85	0,84	0,83	0,83	0,82	0,80	0,79	0,76	0,73	0,71	0,68
	p	0,12	0,125	0,135	0,145	0,15	0,16	0,17	0,175	0,195	0,215	0,23	0,25
V	b	0,74	0,73	0,71	0,70	0,69	0,67	0,64	0,62	0,58	0,53	0,50	0,44
	p	0,15	0,16	0,175	0,185	0,19	0,205	0,22	0,23	0,255	0,285	0,31	0,35

## A.2. Intervalo de tempo

Para a determinação do intervalo de tempo,  $t$ , a usar na obtenção da velocidade média do vento que incide em uma edificação ou parte de edificação com a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal excedendo 80 metros, será utilizada a expressão

$$t = 7,5 L/V_1(h)$$

sendo

$L$  : altura ou largura da superfície frontal da edificação ou parte de edificação em estudo, adotando-se o maior dos dois valores;

$V_1(h)$ : velocidade média do vento sobre  $t$  segundos, no topo da edificação ou da parte de edificação em estudo –  $V_1(h) = S_1 S_2(h) V_0$

O cálculo de  $V_1(h)$  pode ser feito por aproximações sucessivas.

## ANEXO B

### Fator estatístico $S_3$ para a probabilidade $P_m$ e vida útil de edificação de $m$ anos.

Seja  $V_o^+$  a velocidade do vento que tem uma probabilidade  $p_m$  de ser excedida, no local em consideração, pelo menos uma vez em um período de  $m$  anos. Esta velocidade corresponde a rajadas de três segundos de duração, nas condições da Categoria de rugosidade II (item 5.3.1), na altura de 10 metros acima do terreno. A relação entre  $V_o^+$  e a velocidade básica definida em 5.1 é a seguinte:

$$V_o^+ = S_3 V_o$$

Na falta de uma norma específica sobre segurança nas edificações, ou de indicações correspondentes na norma estrutural em uso, cabe ao projetista fixar a probabilidade  $P_m$  e a vida útil  $m$  de acordo com as características da edificação.

A Tabela 3.13 apresenta valores típicos do fator  $S_3$ , cuja expressão matemática é

$$S_3 = 0,54 \left[ - \frac{\ln(1 - P_m)}{m} \right]^{-0,157}$$

Tabela 3.13 - Fator estatístico  $S_3$

m	Valores de $S_3$ para $P_m =$					
	0,10	0,20	0,50	0,63	0,75	0,90
2	0,86	0,76	0,64	0,60	0,57	0,53
10	1,10	0,98	0,82	0,78	0,74	0,68
25	1,27	1,13	0,95	0,90	0,85	0,79
50	1,42	1,26	1,06	1,00	0,95	0,88
100	1,58	1,41	1,18	1,11	1,06	0,98
200	1,77	1,57	1,31	1,24	1,18	1,09

Em nenhum caso pode ser adotado um fator  $S_3$  menor que o indicado na tabela 3.11 (Item 5.4). "

## APÊNDICE – Localização e altitude das estações meteorológicas

Os números junto a círculos cheios que aparecem na fig.3.23 identificam as estações meteorológicas do Serviço de Proteção ao Vôo do Ministério da Aeronáutica, cujos registros serviram de base para a elaboração das isopletas dessa figura. A tabela a seguir contém a relação alfabética destas estações, bem como suas coordenadas geográficas.

Nº	Estação	Latitude	Longitude	Alt.(m)
1	Afonso	22°52'S	43°22'W	31
2	Anápolis	16°22'S	48°57'W	1097
3	Amapá	02°04'N	50°32'W	10
4	Belém	01°23'S	48°29'W	16
5	Belo Horizonte	19°51'S	43°57'W	789
6	Brasília	15°52'S	47°55'W	1061
7	Bagé	31°23'S	54°07'W	180
8	Boa Vista	02°50'N	60°42'W	140
9	Caravelas	17°38'S	39°15'W	4
10	Cachimbo	09°22'S	54°54'W	432
11	Cuiabá	15°39'S	56°06'W	182
12	Campinas	23°00'S	47°08'W	648
13	Curitiba	25°31'S	49°11'W	910
14	Campo Grande	20°28'S	54°40'W	552
15	Carolina	07°20'S	47°26'W	181
16	Cumbica	23°26'S	46°28'W	763
17	Fortaleza	03°47'S	38°32'W	25
18	Florianópolis	27°40'S	48°33'W	5
19	Foz do Iguaçu	25°31'S	54°35'W	180
20	Fernando de Noronha	03°51'S	32°25'W	45
21	Goiânia	16°38'S	49°13'W	747
22	Jacareacanga	06°16'S	57°44'W	110
23	Londrina	23°20'S	51°08'W	570
24	Lapa	13°16'S	43°25'W	439
25	Manaus	03°09'S	59°59'W	84
26	Maceió	09°31'S	35°47'W	115
27	Natal	05°55'S	35°15'W	49
28	Ponta Porã	22°33'S	55°42'W	660
29	Parnaíba	02°54'S	41°45'W	5
30	Petrolina	09°24'S	40°30'W	376
31	Pirassununga	21°59'S	47°21'W	598
32	Porto Alegre	30°00'S	51°10'W	4
33	Porto Nacional	10°42'S	48°25'W	290
34	Porto Velho	08°46'S	63°54'W	125

Nº	Estação	Latitude	Longitude	Alt.(m)
35	Recife	08°08'S	34°55'W	11
36	Rio Branco	09°58'S	67°47'W	136
37	Rio de Janeiro (Santos Dumont)	22°54'S	43°10'W	5
38	Santarém	02°26'S	54°43'W	12
39	São Luiz	02°35'S	44°14'W	54
40	Salvador	12°54'S	38°20'W	13
41	Santa Cruz	22°56'S	43°43'W	4
42	São Paulo (Congonhas)	23°37'S	46°39'W	802
43	Santos	23°56'S	46°18'W	3
44	Santa Maria	29°43'S	53°42'W	85
45	Teresina	05°05'S	42°49'W	69
46	Uberlândia	18°55'S	48°14'W	923
47	Uruguaiana	29°47'S	57°02'W	74
48	Vitória	20°16'S	40°17'W	4
49	Vilhena	12°44'S	60°08'W	652

## REFERÊNCIAS

1. SIMIU, E. e SCANLAN, R.H. – “Wind effects on structures: an introduction to wind engineering”. Wiley, New York, 1977.
2. LEHR, P.E., BURNETT, R.W. e ZIM, H.S. – “Weather”. Simon & Schuster, New York.
3. DAVENPORT, A.G. – “Wind loading on structures”. Ottawa, National Research Council, 1960 (Technical Paper nº 88 of the Division of Building Research).
4. SIMIU, E. e LOZIER, D.W. – “The buffeting of tall structures by strong winds”. Washington, D.C., National Bureau of Standards, 1975.
5. SIMIU, E. – “Variation of mean winds with height in hurricanes”. Journal of the Engineering Mechanics Division, Proc. ASCE, v. 100, n.EM 4, p. 832 - 837, Aug. 1974.
6. DAVENPORT, A.G. – “Rationale for determining design wind velocities”. Journal of the Structural Division, Proc. ASCE, v. 86, n.ST 5, p. 39 - 67, May 1960.
7. NANNI, L.F. e RIERA, J.D. – “Estimativa de parâmetros, testes de aderência das distribuições de velocidades extremas de vento e temperaturas associadas e modelos de previsões”. Caderno Técnico CT.V-56, Curso de Pós-Graduação Eng. Civil da UFRGS, Porto Alegre, 1983.
8. MARSHALL, R.D. – “Engineering aspects of cyclone Tracy, Darwin, Australia, 1974”. National Bureau of Standards, Washington, D.C., NBS Building Science Series 86, June 1976.
9. SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL - FUERZA AEREA ARGENTINA – “Tornados”. Boletín Informativo nº 5, Buenos Aires.

10. BRITISH STANDARDS INSTITUTION – “Code of basic data for the design of buildings. Chapter V. Loading. Part 2: Wind loads”. London, 1972.
11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT – “NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações”. Rio de Janeiro, 1980.
12. NEWBERRY, C.W., EATON, K.J. e MAYNE, J.R. – “Wind pressures on the Post Office Tower, London”. Proc. 3rd International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures. Tokyo, 1971, Paper II.7, p.241-251.
13. BLESSMANN, J. – “Intervalo de tempo para cálculo da velocidade básica do vento”, 2º ed., Ed. da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1979 (Série Engenharia Estrutural, 3).
14. SFINTESCO, D. e WYATT, T.A. – “A proposed European code of practice: current work of the ECCS towards specification of the effect of wind on structures”. Proc. 4th International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures. Heathrow, England, 1975, p.643-654.
15. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT – “NBR-6123: Forças devidas ao vento em edificações”. Rio de Janeiro, 1988.
16. HUNT, J.C.R. e FERNHOLZ, H. – “Wind-tunnel simulation of the atmospheric boundary layer: a report on Euromech 50”. Journal of Fluid Mechanics, Cambridge University Press, London, v. 70, part 3, p.543-559, 12 August 1975.
17. SIMIU, E. – “Modern developments in wind engineering, Part 1”. Engineering Structures, v. 3, p.233-241, October 1981.
18. PRANDTL, L. – “Führer durch die Strömungslehre”, 5º ed., Friedr. Vieweg und Sohn, Braunschweig, 1957.
19. BLESSMANN, J. – “Aerodinâmica das construções”. 2ª edição, SAGRA, Porto Alegre, 1990.
20. VICKERY, B.J. – “On the assessment of wind effects on elastic structures”. The Civil Engineering Transactions of the Institution of Engineers, Australia, Oct. 1966, Paper 2116, p.183-192.
21. JENSEN, M. e FRANCK, N. – “Model-scale tests in turbulent wind, Part I”. The Danish Technical Press, Copenhagen, 1963.
22. DAVENPORT, A.G. – “The relationship of wind structure to wind loading”. Proc. Symposium nº 16: Wind Effects on Buildings and Structures”. National Physical Laboratory, Teddington, England, 1965, v. 1, Paper 2, p.53-102.
23. ROBINSON, S.M. – “Computing wind profile parameters”. Journal of the Atmospheric Sciences, v. 19, p.189-190, March 1962.
24. HELLIWELL, N.C. – “Wind over London”. Proc. 3rd International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, Tokyo, 1971, p.23-32, Paper I.3.
25. BIÉTRY, J., SACRÉ, C. e SIMIU, E. – “Mean wind profiles and change of terrain roughness”. Journal of Structural Division, Proc. ASCE, v. 104, n.ST 10, p.1585 - 1593, Oct. 1978.
26. COOK, N.J. – “The designer’s guide to wind loading of building structures. Part 1”. Butterworths, London, 1985.
27. HARRIS, R.I. e DEAVES, D.M. – “The structure of strong winds”, In: Wind Engineering in the Eighties. Proc. CIRIA Conference, London, p.4.1-4.93, 1980.

28. Engineering Sciences Data Unit. – “Strong winds in the atmospheric boundary layer, Part 1: mean hourly wind speeds. Data Item 82026”. London, ESDU, 1982.
29. AUSTRALIAN STANDARD – “Rules for minimum design loads on structures, AS 1170, Part 2 (wind forces) – 1975”. Standards Association of Australia, North Sydney, 1978.
30. HARRIS, R.I. – “The nature of the wind”. In: Proc. Seminar on the Modern Design of Wind-Sensitive Structures, 18 June 1970. The Institution of Civil Engineers, London, Paper 3, p.29-55.
31. DEAVES, D.M. – “Computation of wind flow over changes in surface roughness”. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Amsterdam, v. 7, n.1, p.65-94, Jan. 1981.
32. CONVENTION EUROPÉENNE DE LA CONSTRUCTION MÉTALLIQUE, CECM – “Calcul des effets du vent sur les constructions. Recommandations de la CECM. Construction Métallique, Rotterdam, n. 3, p.24-96, Sept. 1979.
33. BUREAU DE CONTROLE POUR LA SECURITÉ DE LA CONSTRUCTION (SECO) – “L’action du vent sur les constructions (Etude de synthèse préparatoire à la révision des normes belges NBN 460.01.02 et 03) Bruxelles, Sept. 1973.
34. NEWBERRY, C.W. e EATON, K.J. – “Wind loading handbook”. Building Research Establishment Report, England, 1974.
35. INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA INDUSTRIAL (INTI) – “Reglamento CIRSOC 102: Acción del viento sobre las construcciones”. Buenos Aires, 1982.
36. COUNCIL ON TALL BUILDINGS AND URBAN HABITAT – “Wind loading and wind effects”, in Monograph on the Planning and Design of Tall Buildings, Chapter CL-3. Vol. CL, ASCE, p.145-242, 1980.
37. PANOFSKY, H.A. e MING, Z. – “Characteristics of wind profiles over complex terrain”. In: 6th International Conference on Wind Engineering, Australia. Proc.: Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v. 15, n.1-3, p.177-183, Dec. 1983.
38. REICHMANN, K.H. – “Beurteilung der Sicherheit und Zuverlässigkeit turmartiger Bauwerke unter Windeinwirkung”. Beiträge zur Anwendung der Aeroelastik im Bauwesen (BAAB), 1984.
39. GOLDMAN, J.L. – “Time dependent variation of vertical storm wind profiles”. In: Proc. 2nd USA-Japan Research Seminar on Wind Effects on Structures, Hawaii, p.53-67, 1976.
40. CHENG, E.D.H. e CHIU, A.N.L. – “Topographical effects on wind patterns”, In Proc. 2nd USA-Japan Research Seminar on Wind Effects on Structures, Hawaii, 1976, p.39-44.
41. MITSUTA, Y., TSUKAMOTO, O. e NENOI, M. – “Wind characteristics over complex terrain”, In: 6th International Conference on Wind Engineering, Australia. Proc.: Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v. 15, n.1-3, p.185-196, Dec. 1983.
42. INSTITUT BELGE DE NORMALISATION (IBN). Norma NBN, BO3-002-1: “Action du vent sur les constructions”, 2<sup>o</sup> ed., 1988.
43. CONVENTION EUROPÉENNE DE LA CONSTRUCTION MÉTALLIQUE (CECM): “Recommendations for calculating the effects of wind on constructions”, 2<sup>o</sup> ed., 1987.

44. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). Projeto de Norma ISO: "Draft International Standard ISO/DIS 4354:" Wind actions on structures", 1990.
45. SIMIU, E. – "Logarithmic profiles and design wind speeds". Journal of the Engineering Mechanics Division, Proc. ASCE, v. 99, n.EM 5, p.1073-83, Oct. 1973.
46. DAVENPORT, A.G. – "The interaction of wind and structures", in Engineering Meteorology, Elsevier, Amsterdam, Chapter 12, 1982, p.527-572.
47. DAVENPORT, A.G. – "The design of structure to resist wind", in ASCE-ICE-CSCCE Joint Conference on Predicting and Designing for Natural and Man-Made Hazards, Williamsburg, Va, 1978, p.83-116.
48. DAVENPORT, A.G. – "The buffeting of large superficial structures by atmospheric turbulence". Annals of the New York Academy of Sciences, v. 116, Article 2, June 26, 1964, p.135-159.
49. DAVENPORT, A.G. – "The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds". Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, London, v. 87, n.372, April 1961, p.194-211.
50. DAVENPORT, A.G. e SURRY, D.J. – "The pressures on low rise structures in turbulent wind", in Canadian Structural Engineering Conference, 1974, p.1-39.
51. RIERA, J.D., GALINDEZ, E.E. e BLESSMANN, J. – "A code-oriented approach to the along-wind dynamic response of structures". Relatório interno do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, 1980.
52. JENSEN, M. e FRANCK, N. – "Model-scale tests in turbulent wind. Part II". The Danish Technical Press, Copenhagen, 1963.
53. SIMIU, E. – "Equivalent static wind loads for tall building design", In: Proc. 4th International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, London, 1975, p.721-733.
54. SIMIU, E. – "Estimation of extreme wind speeds. Application to the Philippines", In: Building to resist the effect of wind. Vol. 2. NBS Building Science Series 100-2. National Bureau of Standards, Washington, D.C., 1977, p.1-12.
55. SCANLAN, R.H. – "Central problems in structural loading by the natural wind". In: Structural Engineering and Structural Mechanics, Prentice-Hall, 1980, p.36-56.
53. WIERINGA, J. – "Description requirements for assessment of non-ideal wind stations - for example Aachen". In: 5th Colloquium on Industrial Aerodynamics. Building Aerodynamics. Aachen, 1982. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v. 11, n.1-3, May 1983, p.121-131.
57. ROULLE, C. – "Simulation de la couche limite atmosferic au 1/150 E." Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. Établissement de Nantes. EN. ADYM 80-10-2, 1980.
58. NIEMANN, H.J. – "Dynamische Windwirkung bei Naturzugkühltürmen auf der Grundlage eines statistischen Sicherheitsbegriffs". Ruhr-Universität Bochum, Bochum, Nov. 1976.
59. PANOFSKY, H.A. – "Summary paper for Session 1: Wind Structure". In: Proc. 4th International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, Heathrow, England, p.3-6, 1977.



**Segunda parte**  
.....  
**Turbulência**



## Capítulo 4

# INTENSIDADE DA TURBULÊNCIA

### 4.1. TURBULÊNCIA

a) Como vimos em 2.1.c, em condições de estabilidade neutra as flutuações da velocidade são causadas quase que exclusivamente por agitação mecânica do ar, com a formação de um grande número de **turbilhões** ou **redemoinhos**. Portanto, para ventos “bem comportados” (ciclones tropicais e, com boa aproximação, ciclones extratropicais em seu estágio maduro) pode ser admitido, na prática, que as flutuações têm sua origem na agitação (**turbulência**) do escoamento médio causada pela rugosidade natural e artificial da superfície terrestre, formando-se os turbilhões acima citados. As dimensões dos turbilhões assim gerados vão desde a ordem de grandeza da altura da camada limite atmosférica até a ordem de grandeza do milímetro. Parte da energia cinética, retirada do escoamento médio pelos maiores turbilhões, é transferida por um processo em cascata, até os menores, onde é dissipada em calor pela viscosidade dinâmica. Porém a maior parte desta energia é transferida pelas tensões de Reynolds para o terreno, onde é dissipada pela rugosidade da superfície.

b) As flutuações da velocidade do vento em torno de um valor médio são designadas pelo termo **rajadas**. Estas flutuações ocorrem em uma seqüência aleatória de freqüências e de intensidades. As rajadas mais velozes são de menor duração (fração de segundo) e atuam sobre uma pequena região. Correspondem à chegada simultânea, ao ponto em estudo, de turbilhões de diversas dimensões e em condições tais que seus efeitos se superpõem.

c) Além da solicitação estática do vento, que depende de sua velocidade média, aparecem solicitações dinâmicas, que dependem da energia cinética contida nas flutuações e de como esta energia se distribui pelas diversas freqüências. A resposta da estrutura depende muito mais da energia contida em uma seqüência de rajadas do que da intensidade de uma única rajada. E, nesta seqüência, serão mais importantes as componentes em ressonância com a estrutura.

Turbilhões de dimensões tais que envolvam toda a estrutura ocasionarão forças de baixa freqüência, que poderão estar em fase, ao menos aproximadamente, ao longo de toda a estrutura. Por outro lado, as rajadas

mais violentas são oriundas de turbilhões de dimensões bem menores, que agem local e desordenadamente. As forças são de freqüências mais altas que as anteriores, porém de intensidades menores; pouca influência terão na excitação da estrutura como um todo. Deverão ser consideradas no estudo de painéis de revestimento, vidros e estrutura das janelas, etc.

d) Durante muito tempo o estudo da turbulência foi inteiramente empírico. Seu estudo matemático parece ter sido iniciado por Theodore von Kármán, que definiu turbulência como "flutuações irregulares da velocidade, governadas por equilíbrio estatístico".<sup>1</sup>

e) Estão dadas, nesta simples e tão expressiva definição, as duas palavras-chave para o estudo matemático da turbulência: flutuações e irregularidade.

As **flutuações**, no decorrer do tempo, em torno de um valor médio, já indicam uma maneira de encarar o problema: considerar um **vetor velocidade média**,  $\bar{V}(r)$ , função do vetor posição  $r$ , e componentes variáveis (flutuações) segundo três eixos coordenados retangulares. O sistema de eixos de direções 1, 2 e 3, tem o eixo de direção 1 (eixo das abscissas  $x$ ) orientado na direção e sentido do vetor velocidade média. Em um dado instante  $t$ , o **vetor velocidade** no ponto  $r$  será dado por

$$V(r; t) = \bar{V}(r) + v(r; t), \quad (4.1)$$

sendo  $v(r; t)$  o **vetor flutuação de velocidade (vetor rajada)**, que pode ser decomposto em suas componentes (Fig.4.1.a):

$$v(r; t) = v_1(r; t) + v_2(r; t) + v_3(r; t) \quad (4.2)$$

A **velocidade de rajada** é definida como o módulo do vetor rajada,

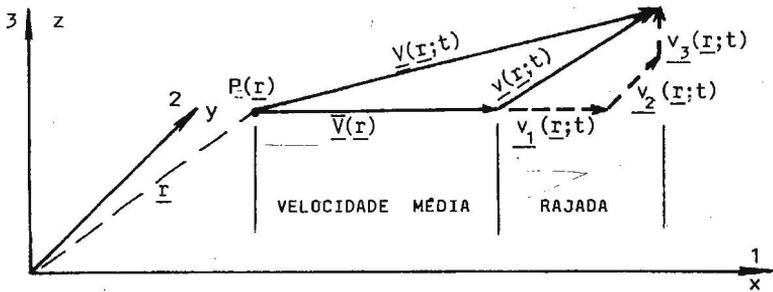
$v(t)$ :

$$v(t) = |v(t)| = [v_1^2(t) + v_2^2(t) + v_3^2(t)]^{1/2} \quad (4.3)$$

A simbologia neste campo é muito variada. Em certos casos não é tão explícita quanto a apresentada acima. Por exemplo, como o vento usualmente é considerado uniforme em cada plano horizontal, com suas características variando apenas com a altura, as expressões (4.1) e (4.2) ficarão (Fig.4.b):

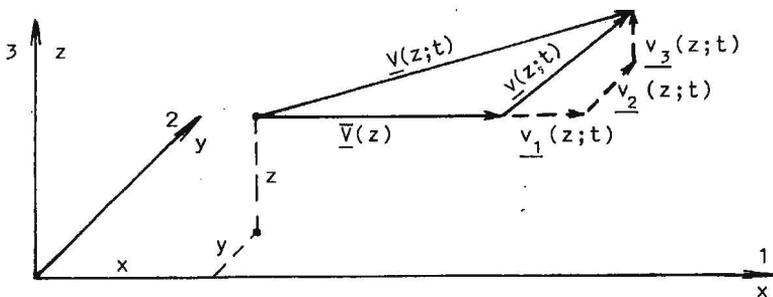
$$V(z;t) = \bar{V}(z) + v(z;t) \quad (4.1.a)$$

$$v(z;t) = v_1(z;t) + v_2(z;t) + v_3(z;t) \quad (4.2.a)$$



a) CASO GERAL

1, 2, 3 : direções ; x, y, z : coordenadas



b) VENTO HORIZONTALMENTE UNIFORME

Fig. 4.1 – Componentes do vetor velocidade

Quando não se tornar dúbio, as expressões matemáticas serão apresentadas de um modo ainda mais simples, suprimindo a cota  $z$ . Por exemplo:

$$\mathbf{V}(t) = \mathbf{v} + \mathbf{v}(t) \quad (4.1.b)$$

$$\mathbf{v}(t) = \mathbf{v}_1(t) + \mathbf{v}_2(t) + \mathbf{v}_3(t) \quad (4.2.b)$$

f) A **irregularidade** das flutuações, que não permite um tratamento determinístico, conduz a um estudo por meio da teoria da probabilidade e de médias estatísticas. Trata-se de um fenômeno aleatório. Os registros (isto é, as amostras) de um processo aleatório diferem entre si. Entretanto, podem apresentar alguma regularidade no sentido estatístico, efeito que pode ser detectado se o número de amostras for suficientemente grande.

Um processo aleatório é **estacionário** se os seus parâmetros estatísticos (média, variância, autocorrelação, etc) determinados sobre a totalidade dos registros possíveis são invariantes para qualquer deslocamento da origem dos tempos.

Um processo aleatório estacionário é **ergódico** se qualquer de seus parâmetros estatísticos, calculado sobre um conjunto de registros possíveis, é igual ao correspondente parâmetro calculado ao longo do tempo sobre qualquer registro representativo do processo. Um processo ergódico é necessariamente estacionário.

g) Para o caso do vento, em suas aplicações à engenharia civil, é admitido que as rajadas constituem um processo ergódico. Na prática, a descrição das características do escoamento turbulento é feita por meio de um número limitado de parâmetros estatísticos.

## 4.2. PARÂMETROS ESTATÍSTICOS

a) Serão definidos a seguir os parâmetros estatísticos necessários ao estudo da intensidade da turbulência. Outros parâmetros serão definidos nos capítulos seguintes, à medida que se fizerem necessários.

– **velocidade média:**

$$\bar{V}(z) = \frac{1}{T} \int_0^T V(z; t) dt = \langle V(z; t) \rangle \quad (4.4)$$

sendo que o símbolo  $\langle \rangle$  indica média temporal

– **valor quadrado médio:**

$$\overline{V^2}(z) = \frac{1}{T} \int_0^T V^2(z; t) dt = \langle V^2(z; t) \rangle \quad (4.4a)$$

– **variância** das flutuações de velocidade:

$$\sigma_v^2(z) = \frac{1}{T} \int_0^T v^2(z; t) dt = \langle v^2(z; t) \rangle \quad (4.5)$$

Para as componentes dessas flutuações a variância é dada por:

$$\sigma_i^2(z) = \frac{1}{T} \int_0^T v_i^2(z; t) dt = \langle v_i^2(z; t) \rangle ; i = 1, 2, 3 \quad (4.6)$$

A variância coincide com o valor quadrado médio quando são consideradas apenas as flutuações em torno da velocidade média

O intervalo de tempo  $T$ , que matematicamente tende para infinito, é, fisicamente, um intervalo de tempo suficientemente longo para ser obtido um valor representativo como média estatística. Para fins de engenharia

estrutural a velocidade média é calculada para um intervalo de tempo que vai de alguns minutos a uma hora. Consideram-se como flutuações (rajadas) as variações de duração entre alguns segundos e algumas dezenas de segundos, de acordo com a finalidade. O intervalo de tempo T deve ser suficientemente longo em relação à duração das flutuações consideradas. Por outro lado, deve ser pequeno em relação às oscilações lentas do vento, para que estas não influam na velocidade média.

– **desvio padrão**: é o valor positivo da raiz quadrada da variância.

$$\sigma_v(z) = [\langle v^2(z; t) \rangle]^{1/2} \quad (4.7)$$

sendo que, para as componentes do vetor rajada o desvio padrão é dado por:

$$\sigma_i(z) = [\langle v_i^2(z; t) \rangle]^{1/2}; i = 1, 2, 3 \quad (4.8)$$

O **valor rms** (“root mean square”), ou **média quadrática**, é o valor positivo da raiz quadrada do valor quadrado médio.

O desvio padrão coincide com a média quadrática quando são estudadas apenas as flutuações em torno da velocidade média.

Tanto a variância como o desvio padrão constituem medidas da dispersão das flutuações em torno da velocidade média. No capítulo 6 veremos que a variância indica, também, a energia cinética contida nessas flutuações.

Das expressões (4.2), (4.5) e (4.8) segue que:

$$\sigma_v^2(z) = \langle v^2(z; t) \rangle = \langle v_1^2(z; t) + v_2^2(z; t) + v_3^2(z; t) \rangle = \sigma_1^2(z) + \sigma_2^2(z) + \sigma_3^2(z) \quad (4.9)$$

### 4.3. PROPRIEDADES DA TURBULÊNCIA

a) Um conhecimento tão exato quanto possível das propriedades da turbulência, é necessário tanto para o cálculo matemático da resposta dinâmica das estruturas às rajadas de vento como para a simulação correta do vento em túneis de vento. Atualmente o processo mais usado para o estudo dessas propriedades dá-se por meio da teoria estatística da turbulência, utilizando-se para descrevê-las:

– a **distribuição de probabilidade** de cada uma das três componentes das flutuações;

- a **intensidade da turbulência** de cada uma dessas componentes. Trata-se de uma medida adimensional da energia cinética contida na respectiva componente das flutuações;
- as **correlações espaciais** das flutuações em pontos distintos. Elas permitem determinar a macroescala da turbulência (item 5.2).
- o **espectro de potência** (densidade espectral da variância) das flutuações. Indica a distribuição, em frequência, da energia cinética contida nessas flutuações (Capítulo 6).
- o **espectro cruzado**, que estuda flutuações em dois pontos.

#### 4.4. DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE

a) A distribuição de probabilidade fornece a frequência relativa de ocorrência das velocidades. Davenport<sup>2</sup> cita vários autores que estudaram a distribuição de probabilidade da velocidade do vento, mostrando que esta distribuição concorda bem com a distribuição normal (distribuição de Gauss). Davenport cita a conclusão de Huss e Portmann: “A adoção de uma curva de frequência normal para representar a distribuição, embora não seja precisa para nenhum caso, parece ser justificável para um grande número de casos”.

b) Também Counihan,<sup>3</sup> examinando os estudos de distribuição de probabilidade da componente longitudinal da turbulência feitos por diversos autores, chega às mesmas conclusões: “Embora muitas das distribuições, medidas em condições adiabáticas, tenham algum grau de distorção (“skew”) positiva ou negativa, não há uma tendência consistente para nenhuma delas. Portanto, pode ser razoavelmente admitido que as distribuições são aproximadamente gaussianas. Uma vez que os dados disponíveis aplicam-se a terreno rural, deve ser admitido que distribuições urbanas são, do mesmo modo, gaussianas” (Ref. 3, p. E.8). Como vemos, trata-se de uma extensão das observações feitas o considerar também para rugosidades maiores do terreno (cidades, por exemplo), uma distribuição gaussiana.

c) Em conclusão, podemos dizer que uma distribuição de Gauss em geral fornece uma representação adequada da distribuição de velocidades na turbulência atmosférica. A vantagem desta distribuição é que ela é perfeitamente definida por apenas dois valores: a velocidade média e o desvio padrão.

## 4.5. INTENSIDADE DA TURBULÊNCIA

a) É definida pelo quociente entre o desvio padrão das flutuações e uma velocidade de referência. Esta tanto pode ser a velocidade no ponto em que foi determinado o desvio padrão (intensidade **local** da turbulência), como uma velocidade de referência,  $V_{ref}$  (intensidade **normalizada** da turbulência). As definições são, respectivamente:

– intensidade local da turbulência (três componentes):

$$I_i(\mathbf{r}) = \sigma_i(\mathbf{r}) / \overline{V}(\mathbf{r}) ; i = 1, 2, 3 \quad (4.10)$$

– intensidade normalizada da turbulência (três componentes):

$$I_{io}(\mathbf{r}) = \sigma_i(\mathbf{r}) / V_{ref} ; i = 1, 2, 3 \quad (4.11)$$

b) Para vento considerado horizontalmente uniforme pode-se escrever:

$$I_i(z) = \sigma_i(z) / \overline{V}(z) ; i = 1, 2, 3 \quad (4.10.a)$$

$$I_{io}(z) = \sigma_i(z) / V_{ref} ; i = 1, 2, 3 \quad (4.11.a)$$

### 4.5.1. Fórmula de Harris-Davenport

a) Harris<sup>4</sup>, a partir de estudos de Davenport,<sup>5</sup> chegou à seguinte expressão para a componente longitudinal do desvio padrão das flutuações, a partir de medidas feitas ao vento natural:

$$\sigma_1(z) = 2,58 (c_{as})^{1/2} \overline{V}(10) \quad (4.12)$$

sendo:

$c_{as}$  – coeficiente de arrasto superficial, estudado em 3.2.3;

$\overline{V}_{10}$  - velocidade média sobre uma hora, a dez metros de altura.

Observe-se que pela (4.12) o desvio padrão (e também seu quadrado, a variância) não depende da altura sobre o terreno, o que corresponde a medidas experimentais feitas na época com aproximação razoável. O próprio Harris<sup>6</sup> comenta que medidas feitas em Rugby mostram que  $\sigma_1(z)$  decresce muito lentamente com a altura e que, para fins de projetos estruturais, pode ser adotado, até  $z=180m$  (altura máxima das medidas), um valor de  $\sigma_1(z)$  invariável com a altura e igual ao valor medido a dez metros de altura. Com isto fica-se a favor da segurança.

Davenport<sup>5</sup> admite que o espectro das flutuações longitudinais da velocidade é independente da altura. Como será visto em 6.2, a esta simplificação corresponde também uma invariância de  $\sigma_1$  com a cota  $z$ .

Uma consideração mais correta da variação de  $\sigma_1(z)$  com a altura será vista no item 4.5.2.

Lembrando a lei potencial de variação de  $V(z)$  dada pela (3.28), podemos escrever (Ver Fig.3.7):

$$\begin{aligned} \bar{V}(z_g) / \bar{V}(10) &= (z_g / 10)^p \\ \bar{V}^{(10)} &= (10 / z_g)^p \bar{V}(z_g) \end{aligned} \quad (4.13)$$

e a (4.12) fica :

$$\sigma_1(z) = 2,58 (c_{as})^{1/2} (10/z_g)^p \bar{V}(z_g) \quad (4.14)$$

b) Na Tabela 4.1 aparecem valores de  $c_{as}$  e de  $z_g$  tirados da Ref. 4, na qual Harris cita valores sugeridos por Davenport, que estudou um grande número de medidas feitas em diversos tipos de terreno. A partir deste estudo Davenport sugeriu três categorias típicas de terreno, com valores de  $p$ ,  $z_g$  e  $c_{as}$  que variam um pouco com o trabalho em que aparecem.

Tabela 4.1 – Categorias de terreno, conforme Davenport

Categoria de terreno	p	$z_g$ (m)	$c_{as}$
A - Terreno aberto com muito poucos obstáculos	0,16	300	0,005
B - Terreno uniformemente coberto com obstáculos de 10 a 15m de altura	0,28	430	0,030
C - Terreno com obstáculos grandes e irregulares	0,40	560	0,050

Substituindo os valores de  $z_g$  e de  $c_{as}$  da tabela 4.1 na (4.14):

$$\begin{aligned} - \text{Categoria A: } \sigma_1(z) &= 0,106 \bar{V}(z_g) \\ - \text{Categoria B: } \sigma_1(z) &= 0,110 \bar{V}(z_g) \\ - \text{Categoria C: } \sigma_1(z) &= 0,115 \bar{V}(z_g) \end{aligned} \quad (4.15)$$

Ou, para qualquer tipo de terreno, com aproximação muito boa:

$$\sigma_1(z) \cong 0,11 \bar{V}(z_g) \quad (4.16)$$

Tomando para velocidade de normalização a velocidade média horária a dez metros de altura, em campo aberto e plano, Harris sugere o valor constante

$$\sigma_1(z) \cong 0,19 \overline{V}(10) \quad (4.16.a)$$

c) Para a intensidade normalizada da componente longitudinal da turbulência teremos:

$$I_{10}(z) = \sigma_1(z) / \overline{V}(z_g) ; \quad I_{10}(z) = 0,11 \quad (4.17)$$

d) Conforme a (4.12), a intensidade local da componente longitudinal da turbulência será dada por:

$$I_{10}(z) = \sigma_1(z) / \overline{V}(z_g) = 2,58 (c_{as})^{1/2} \overline{V}(10) / \overline{V}(z)$$

e, conforme (3.28):

$$I_1(z) = 2,58 (c_{as})^{1/2} (10/z)^p \quad (4.18)$$

As curvas da intensidade local da componente longitudinal da turbulência, para as três categorias de terreno da Tabela 4.1, estão traçadas na Fig.4.2. A intensidade normalizada corresponde ao topo de cada uma das curvas.

De acordo com a expressão (3.21), e nela substituindo  $V^{ref}$  por  $\overline{V}(10)$ , a (4.18) fica:

$$I_1(z) = 2,58 u_o^* (10/z)^p / \overline{V}(10) \quad (4.19)$$

Por sua vez, da (3.22):

$$u_o^* = \overline{V}(z) k / \ln(z/z_o)$$

Para  $z = 10m$ :

$$u_o^* = \overline{V}(10) k / \ln(10/z_o)$$

Substituindo na (4.19) – estamos assim admitindo a equivalência entre a lei de Prandtl (3.22) e a lei de potência (3.28):

$$I_1(z) = 2,58 k (10/z)^p / \ln(10/z_o) \quad (4.20)$$

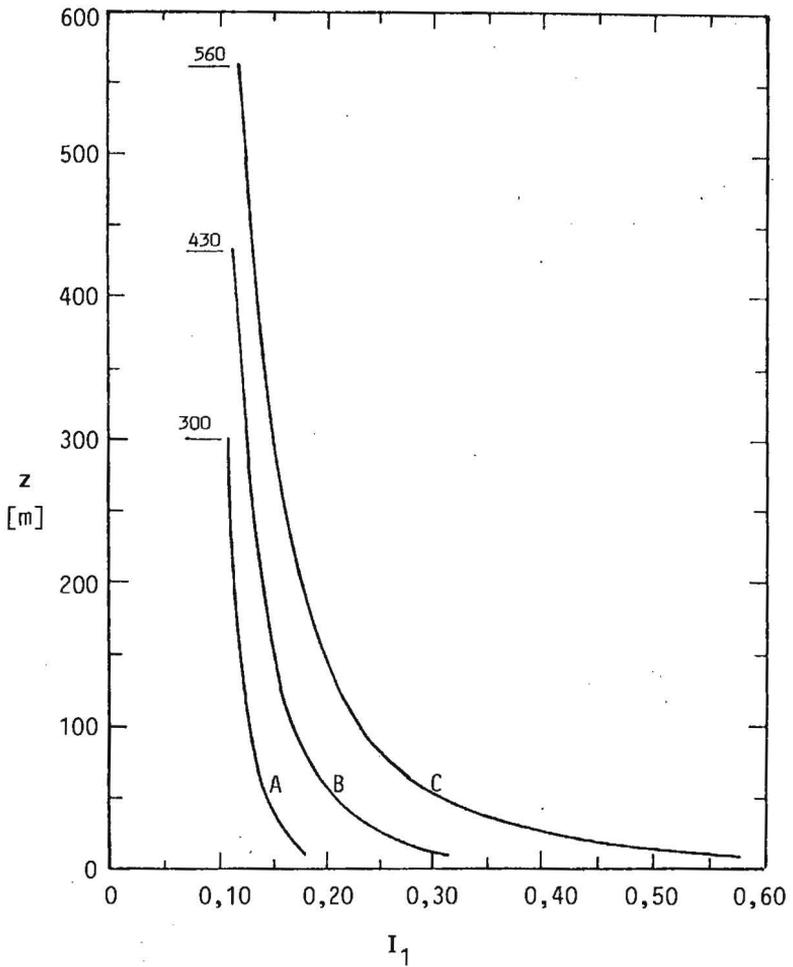


Figura 4.2 – Intensidade local da turbulência longitudinal para os três terrenos típicos, conforme Davenport

Considerando, como é usual, a constante de Kármán,  $k$ , igual a 0,4:

$$I_1(z) = 1,032 (10/z)^P / \ln(10/z_0) \quad (4.21)$$

Substituindo a (3.22) na (4.19):

$$I_1(z) = 2,58[k/\ln(z/z_0)] [\bar{V}(z)/\bar{V}(10)] (10/z)^P \quad (4.22)$$

Da (3.28):

$$\bar{V}(10) / \bar{V}(z) = (10/z)^p$$

Portanto, a (4.22) fica:

$$I_1(z) = 2,58 k / \ln(z/z_0)$$

E, considerando  $k = 0,4$ :

$$I_1(z) = 1,032 [\ln(z/z_0)]^{-1} \quad (4.23)$$

Ou, aproximadamente:

$$I_1(z) \approx [\ln(z/z_0)]^{-1} \quad (4.24)$$

A fig. 4.3 apresenta as cinco curvas correspondentes à expressão (4.18), ou (4.21).

Esta expressão é indicada, por exemplo, nas referências 6 e 7.

A Tabela 4.2 apresenta os valores de  $10^3 I_1(z)$  calculados com as expressões (4.18) e (4.23) para as cinco categorias de terreno da norma brasileira NBR-6123/88. O expoente  $p$  corresponde a um intervalo de tempo de dez minutos (é o indicado por esta norma para ações dinâmicas). O parâmetro  $c_{as}$  foi calculado com a expressão indicada na Tabela 3.1:  $c_{as} = 0,16 / [\ln^2(10/z_0)]$ . Para comprimentos de rugosidade,  $z_0$ , adotaram-se os valores que estão sendo sugeridos para alteração da NBR-6123. Vê-se claramente que a (4.17) não é satisfeita, com  $I_{10}(z_g)$  variando de 0,10 (Categoria I) a 0,18 (Categoria V). Para um mesmo  $z$ , os valores de  $10^3 I_1(z)$  calculados com as expressões (4.18) e (4.21) são iguais ou diferem de  $\pm 1$ .

Tabela 4.2 - Valores de  $10^3 i_1(z)$  calculados com as expressões (4.18) e (4.23) para as cinco categorias de terreno da NBR-6123

Z (m)	Categorias de terreno									
	I		II		III		IV		V	
	(4.18)	(4.23)	(4.18)	(4.23)	(4.18)	(4.23)	(4.18)	(4.23)	(4.18)	(4.23)
10	137	136	208	208	264	264	388	388	592	592
20	128	124	187	182	233	224	331	308	478	424
30	123	119	176	170	216	206	301	275	421	363
50	117	112	163	157	196	187	268	242	360	308
100	110	104	147	142	173	166	228	208	290	255
150	106	100	139	135	160	156	208	192	256	232
200	103	097	133	130	152	149	195	182	234	218
250	101	095	128	126	146	145	185	176	218	208
300	-	-	125	123	141	141	177	170	206	201
350	-	-	-	-	137	138	171	166	197	195
400	-	-	-	-	-	-	166	163	189	190
420	-	-	-	-	-	-	164	161	186	188
450	-	-	-	-	-	-	-	-	182	186
500	-	-	-	-	-	-	-	-	176	182
$z_0$ (m)	0,005		0,07		0,20		0,70		1,75	
$p(10\text{min})$	0,095		0,15		0,185		0,23		0,31	
$c_{as}$	0,0028		0,0065		0,0105		0,0226		0,0527	

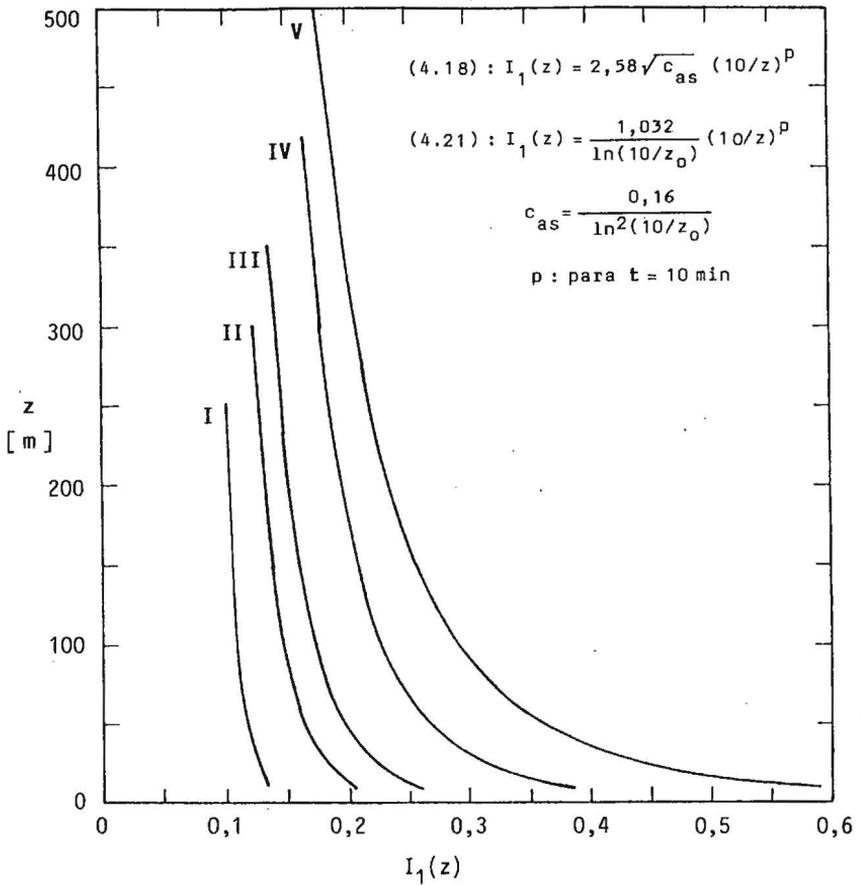


Figura 4.3 – Valores de  $I_1(z)$  pelas (4.18) e (4.21) para as cinco categorias de terreno da NBR-6123/88

#### 4.5.2. Variação de $\sigma_1$ com a altura

a) Sfintesco e Wyatt<sup>B</sup> comentam que, embora diversos autores indiquem uma constância de  $\sigma_1$  com a altura, medidas feitas na década de 70 mostram uma diminuição de  $\sigma_1$  com a altura. Também observam que os valores especificados para velocidades de picos de rajadas de certas normas (por exemplo, a norma britânica<sup>B</sup>) implicam em decréscimo de  $\sigma_1$  com a altura. Sugerem a seguinte lei de potência para a determinação de  $\sigma_1$ , em função da altura:

$$\sigma_1(z) = \sigma_{1ref} (z/z_{ref})^{-0,09} \quad (4.25)$$

sendo  $\sigma_{1ref}$  o desvio padrão da componente longitudinal das rajadas em uma altura de referência,  $z_{ref}$ .

b) Os autores salientam que a (4.25) não é uma boa aproximação para alturas acima do terreno menores que vinte metros. Há também poucos dados para alturas próximas à gradiente ( $z_g$ ), de modo que a expressão (4.25) não deve ser aplicada para  $z$  menor que vinte metros e  $z$  próximo à altura gradiente.

Tomando  $z_{ref} = 20m$ , a (4.25) fica:

$$\sigma_1(z) / \sigma_1(20) = (z/20)^{-0,09} \quad (4.26)$$

c) A Tabela 4.3 apresenta valores de  $\sigma_1(z)/\sigma_1(20)$  para diversas alturas acima do terreno, calculados com a (4.26).

Tabela 4.3 – Variação de  $\sigma_1(z)$  com a altura  $z$

$z$ (m)	20	30	50	100	150	200	250	300
$\sigma_1(z)/\sigma_1(20)$	1,00	0,96	0,92	0,87	0,83	0,81	0,80	0,78

d) Choi,<sup>10</sup> estudando tufões no mar do sul da China, concluiu que tanto a intensidade de turbulência como a variância são dependentes da altura. Quanto a  $I_1$ , nada de novo. Para  $\sigma_1$ , está de acordo com os comentários de Sfintesco e Wyatt.

Lembremos também que o modelo físico da estrutura dos ventos fortes, na camada limite atmosférica (turbulência gerada pela rugosidade da superfície terrestre), sugere que a turbulência e, portanto, as flutuações da velocidade em torno do valor médio, devem tender para zero em alturas próximas à altura gradiente.

### 4.5.3. Componentes da turbulência

a) A componente da turbulência mais estudada é a componente longitudinal, à qual corresponde um desvio padrão  $\sigma_1$  e uma intensidade da turbulência  $I_1$ . Para as componentes lateral e vertical, tem-se, respectivamente,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ ,  $I_2$  e  $I_3$ . A relação entre estas componentes é dada por expressões empíricas obtidas a partir de informações experimentais. Estas informações estão disponíveis até uma altura de 300m, e este será o limite de validade das expressões que serão apresentadas a seguir.

b) Diversos modelos de camadas limites mostram que as três componentes da intensidade da turbulência tendem a se tornarem iguais nas proximidades da altura gradiente. Isto é, a turbulência torna-se isotrópica, com

$$\sigma_1 \equiv \sigma_2 \equiv \sigma_3 .$$

Além do que, conforme comentado em 4.5.2.d, devem tender para zero acima da camada limite atmosférica.

c) Próximo ao terreno, a relação entre as três componentes é, de acordo com Cook (Ref. 11, p.153):

$$\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = 1 : 0,68 : 0,45$$

relação esta "confirmada por várias medidas ao vento natural".

d) Para as alturas que usualmente interessam à engenharia estrutural, a tabela 4.4 apresenta as indicações de diversos autores.

Tabela 4.4 – Relação entre as componentes da turbulência

AUTOR	Referência Bibliográfica	$I_1 : I_2 : I_3$ ou $\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3$ :
Reichman	12	1,0 : (0,8 a 0,65) : (0,52 a 0,43)
Teunissen	13	1,0 : 0,8 : 0,5
Irwin	14	1,0 : 0,52 -
Davenport	7	1,0 : 0,8 : 0,5
Davenport	15	1,0 : 0,88 : 0,5
Cook	11	Expressão (4.27)
Cook simplificado	-	Expressão (4.28) e tabela 4.5

Tomando como condições de contorno as indicadas em 4.5.3.b e 4.5.3.c, para  $z-d = 0$  e  $z-d = z_g$ , Cook sugere as seguintes expressões:

$$\begin{aligned} \sigma_2(z) / \sigma_1(z) &= 1 - 0,32 [1 - (z - z_d) / z_g]^2 \\ \sigma_3(z) / \sigma_1(z) &= 1 - 0,55 [1 - (z - z_d) / z_g]^2 \end{aligned} \quad (4.27)$$

Pelo que foi visto em 3.2.5.b, para fins de engenharia civil pode-se considerar  $z_d = 0$ . As (4.27) ficarão:

$$\sigma_2(z) / \sigma_1(z) = 1 - 0,32 (1 - z/z_g)^2$$

$$\sigma_3(z) / \sigma_1(z) = 1 - 0,55 (1 - z/z_0)^2 \quad (4.28)$$

A tabela 4.5 apresenta valores dessas relações para as cinco categorias de terreno da NBR-6123/88..

Tabela 4.5 – Valores de  $10^3 \sigma_2(z)/\sigma_1(z)$  e de  $10^3 \sigma_3(z)/\sigma_1(z)$  calculados com as expressões (4.28)

Z (m)	Categoria do terreno									
	I		II		III		IV		V	
	$z_0=250m$		$z_0=300m$		$z_0=350m$		$z_0=420m$		$z_0=500m$	
	$\sigma_2/\sigma_1$	$\sigma_3/\sigma_1$	$\sigma_2/\sigma_1$	$\sigma_3/\sigma_1$	$\sigma_2/\sigma_1$	$\sigma_3/\sigma_1$	$\sigma_2/\sigma_1$	$\sigma_3/\sigma_1$	$\sigma_2/\sigma_1$	$\sigma_3/\sigma_1$
10	705	493	701	486	698	481	695	476	693	472
20	729	534	721	521	716	511	710	501	705	493
30	752	574	741	555	733	540	724	526	717	514
50	795	648	778	618	765	596	752	573	741	555
100	885	802	858	756	837	719	814	681	795	648
150	949	912	920	863	896	820	868	773	843	731
200	987	978	964	939	941	899	912	849	885	802
250	1000	1000	991	985	974	955	948	910	920	863
300	–	–	1000	1000	993	989	974	955	949	912
350	–	–	–	–	1000	1000	991	985	971	951
400	–	–	–	–	–	–	999	999	987	978
420	–	–	–	–	–	–	1000	1000	992	986
450	–	–	–	–	–	–	–	–	997	995
500	–	–	–	–	–	–	–	–	1000	1000

## Capítulo 5

# ESCALA DA TURBULÊNCIA

### 5.1. CORRELAÇÃO

#### 5.1.1. Introdução

a) As características espaciais da turbulência, como um todo, podem ser definidas a partir das funções de correlação. Temos a correlação temporal e as correlações espaciais. A correlação temporal permite o estudo da natureza repetitiva das rajadas, e as correlações espaciais o estudo da não uniformidade da ação das rajadas sobre as estruturas. As correlações espaciais, a considerar em cada caso, dependem da forma e do comportamento dinâmico da estrutura.

#### 5.1.2. Função de autocorrelação (correlação temporal)

a) A função de autocorrelação descreve a dependência geral entre o valor de uma das componentes da flutuação em um instante de tempo  $t$  e o valor em outro instante  $t+\tau$ , da mesma componente e no mesmo ponto.

Este relacionamento entre dois valores afastados de  $\tau$  no tempo pode ser encarado como uma “memória” do processo aleatório. Se a memória for grande, a figura limitada pela curva de autocorrelação será de forma alargada; se a memória for pequena, essa figura será de forma estreita.

Alguns autores denominam esta função de função de autocovariância. Matematicamente, a **função de autocorrelação**  $R_i(\mathbf{r};\tau)$  da componente  $i$  do vetor rajada em um ponto  $\mathbf{r}$  é dada por

$$R_i(\mathbf{r};\tau) = \langle v_i(\mathbf{r};t) \cdot v_i(\mathbf{r};t+\tau) \rangle \quad (5.1)$$

Ou, para o caso do vento horizontalmente uniforme:

$$R_i(z;\tau) = \langle v_i(z;t) \cdot v_i(z;t+\tau) \rangle \quad (5.1.a)$$

b) A autocorrelação pode ser encarada como uma medida da informação que o valor de um sinal aleatório em um dado instante fornece

sobre o valor que será medido  $\tau$  segundos após, ou que foi medido  $\tau$  segundos antes. Se  $\tau$  é pequeno, o segundo valor é muito próximo do primeiro, pois o sinal varia de um modo contínuo. Com  $\tau$  aumentando, como o processo é aleatório, o valor da autocorrelação deverá diminuir, pois a memória do processo diminui quando os dois valores do sinal se afastam no tempo. Quando  $\tau$  é suficientemente grande, os dois valores são praticamente independentes; neste caso a primeira medida nada informará sobre a segunda.

c) Destacamos as seguintes propriedades da função de autocorrelação (Fig.5.1):

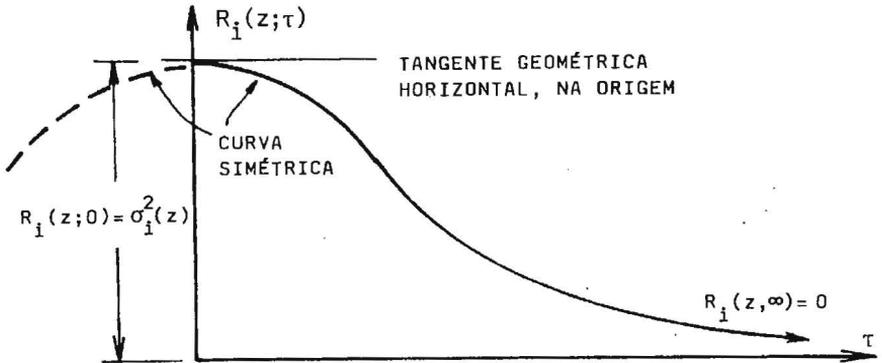


Fig. 5.1 – Curva de autocorrelação

1º –  $R_i(z; 0) = \sigma_i^2(z)$  (5.2)

– a função de autocorrelação para um retardo nulo é igual à variância.

De fato, para  $\tau = 0$  teremos, conforme (5.1):

$$R_i(z; 0) = \langle v_i(z; t) \cdot v_i(z; t) \rangle = \langle v_i^2(z; t) \rangle$$

e, conforme (4.6):

$$\langle v_i^2(z; t) \rangle = \sigma_i^2(z)$$

2º –  $R_i(z; \tau) \leq R_i(z; 0)$  (5.3)

– o maior valor da função de autocorrelação está na origem dos retardos, sendo sempre positivo neste ponto.

3º –  $R_i(z; \tau) = R_i(z; -\tau)$  (5.4)

– a função de autocorrelação é uma função par (simétrica).

4º –  $R_i(z; \tau) \rightarrow 0$  quando  $|\tau| \rightarrow \infty$  (5.5)

– isto é,  $v_i(z;t)$  não tem correlação consigo mesma para um retardo suficientemente grande; os dois valores são independentes (foi ultrapassada a capacidade de memória do sistema).

d) Para cada componente do vetor rajada, e usando uma simbologia mais sintética, teremos (Fig.5.2):

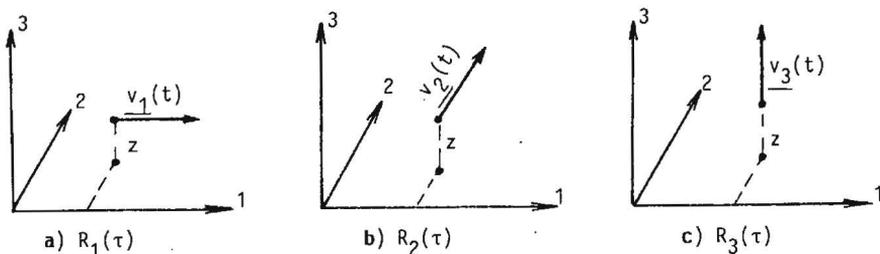


Fig. 5.2 – Funções de autocorrelação – componentes (vetor  $v$  ou  $\underline{v}$ )

– autocorrelação longitudinal (Fig.5.2.a):

$$R_1(\tau) = \langle v_1(t) \cdot v_1(t+\tau) \rangle$$

$$\text{Para } \tau = 0: R_1(0) = \langle v_1^2(t) \rangle = \sigma_1^2 \quad (5.2.a)$$

– autocorrelação lateral (Fig.5.2.b):

$$R_2(\tau) = \langle v_2(t) \cdot v_2(t+\tau) \rangle$$

$$\text{Para } \tau = 0: R_2(0) = \langle v_2^2(t) \rangle = \sigma_2^2 \quad (5.2.b)$$

– autocorrelação vertical (Fig.5.2.c):

$$R_3(\tau) = \langle v_3(t) \cdot v_3(t+\tau) \rangle$$

$$\text{Para } \tau = 0: R_3(0) = \langle v_3^2(t) \rangle = \sigma_3^2 \quad (5.2.c)$$

e) A fim de facilitar a comparação entre diversas curvas de autocorrelação, e para evitar a influência das unidades adotadas, é comum normalizar a autocorrelação, dividindo-a pelo seu valor na origem, ou seja, pela variância.

A **autocorrelação normalizada**, ou coeficiente de autocorrelação, é definida por:

$$\rho_i(z;\tau) = R_i(z;\tau) / R_i(z;0) = R_i(z;\tau) / \sigma_i^2(z) \quad (5.6)$$

Para cada componente:

- i=1:  $\rho_1(\tau)$  – coeficiente de autocorrelação longitudinal
- i=2:  $\rho_2(\tau)$  – coeficiente de autocorrelação lateral
- i=3:  $\rho_3(\tau)$  – coeficiente de autocorrelação vertical.

Conforme (5.2):

$$\rho_i(0) = 1 \quad (5.7)$$

Conforme (5.5):

$$\rho_i(\tau) \rightarrow 0 \text{ quando } |\tau| \rightarrow \infty. \quad (5.8)$$

### 5.1.3. Função de correlação cruzada (correlação espacial)

a) No caso da autocorrelação estávamos interessados na interdependência de dois valores de um mesmo sinal defasados no tempo. Na correlação cruzada temos dois sinais em dois pontos diferentes e queremos determinar a interdependência de dois valores, um em cada sinal, com um retardo de tempo  $\tau$  entre eles.

A **função de correlação cruzada** da componente  $i$  do vetor rajada no ponto  $\underline{r}$  e da componente  $k$  do vetor rajada no ponto  $\underline{r}'$  é dada por (Fig.5.3):

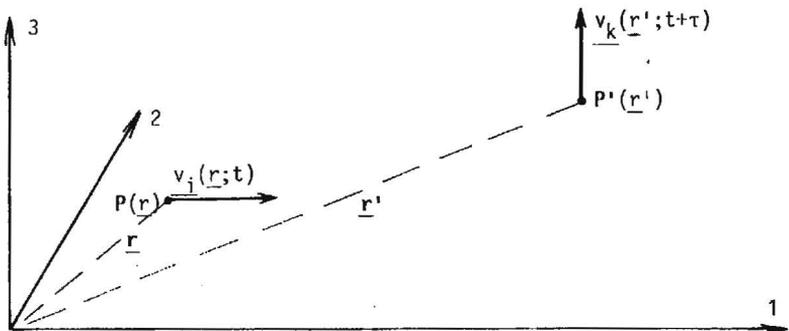


Fig. 5.3 – Função de correlação cruzada – caso geral

$$R_{ik}(r, r'; \tau) = \langle v_i(r; t) \cdot v_k(r'; t + \tau) \rangle \quad ; i = 1, 2, 3 \quad ; k = 1, 2, 3 \quad (5.9)$$

São possíveis nove funções de correlação cruzada. Elas constituem os nove elementos do tensor de correlação cruzada dos vetores rajadas nos pontos  $r$  e  $r'$ .

b) Na prática considera-se a mesma componente  $v_i$  em ambos os pontos e um retardo nulo. A (5.9) ficará:

$$R_{ii}(r, r') = \langle v_i(r; t) \cdot v_i(r'; t) \rangle \quad (5.10)$$

Além do que, usualmente os dois pontos estão alinhados em uma das direções do sistema de coordenadas retangulares, com um afastamento  $s_j$  nesta direção:

$$R_{ii}(s_j) = \langle v_i(t) \cdot v_i(s_j; t) \rangle \quad (5.11)$$

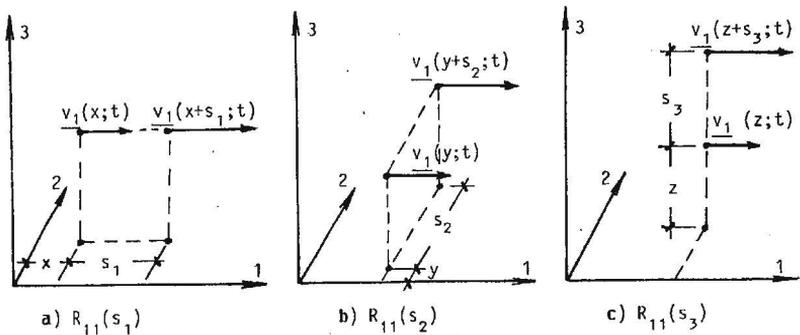


Fig 5.4 – Funções de correlação cruzada da componente longitudinal, com retardo nulo ( $i=k=1$ ;  $\tau=0$ )

Para o caso bastante comum de  $i = 1$  :

– Correlação cruzada longitudinal (Fig.5.4.a):

$$R_{11}(s_1) = \langle v_1(x; t) \cdot v_1(x+s_1; t) \rangle$$

– Correlação cruzada lateral (Fig.5.4.b):

$$R_{11}(s_2) = \langle v_1(y; t) \cdot v_1(y+s_2; t) \rangle$$

– Correlação cruzada vertical (Fig.5.4.c):

$$R_{11}(s_3) = \langle v_1(z; t) \cdot v_1(z+s_3; t) \rangle$$

Diversos estudos, como os de Mackey<sup>16</sup> e de Duchène-Marullaz,<sup>17</sup> mostram que a curva de correlação cruzada vertical é diferente, conforme sua determinação seja feita no sentido ascendente (fixando o ponto inferi-

or, com afastamento  $s_3$  positivo) ou no sentido descendente (fixando o ponto superior, com  $s_3$  negativo).

c) A **correlação cruzada normalizada**, ou coeficiente de correlação cruzada, é definida por

$$\rho_{ik}(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; \tau) = R_{ik}(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; \tau) / [R_{ii}(\mathbf{r}, \mathbf{r}; 0) \cdot R_{kk}(\mathbf{r}', \mathbf{r}'; 0)]^{1/2}$$

Conforme (5.1):

$$R_{ii}(\mathbf{r}, \mathbf{r}; 0) = R_i(\mathbf{r}; 0)$$

$$R_{kk}(\mathbf{r}', \mathbf{r}'; 0) = R_k(\mathbf{r}'; 0)$$

Portanto:

$$\rho_{ik}(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; \tau) = R_{ik}(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; \tau) / [R_i(\mathbf{r}; 0) \cdot R_k(\mathbf{r}'; 0)]^{1/2} ; i = 1, 2, 3 ; k = 1, 2, 3 \quad (5.12)$$

Para qualquer valor de  $i$  e de  $k$ ,  $\rho_{ik}(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; \tau)$  situa-se entre +1 e -1, para todos os pares de pontos  $\mathbf{r}$  e  $\mathbf{r}'$  e para qualquer retardo  $\tau$ . Em geral o coeficiente de correlação cruzada (bem como a correlação cruzada) não é uma função simétrica de  $\tau$ :

$$\rho_{ik}(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; \tau) \neq \rho_{ik}(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; -\tau)$$

De acordo com a (5.2):

$$R_i(\mathbf{r}; 0) = \sigma_i^2(\mathbf{r}) \quad \text{e} \quad R_k(\mathbf{r}'; 0) = \sigma_k^2(\mathbf{r}') \quad (5.13)$$

Para o caso de turbulência homogênea (características independentes do ponto considerado):

$$\sigma_k(\mathbf{r}') = \sigma_k(\mathbf{r})$$

e a (5.13) pode ser escrita:

$$\rho_{ik}(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; \tau) = R_{ik}(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; \tau) / [\sigma_i(\mathbf{r}) \cdot \sigma_k(\mathbf{r}')]$$

Para os casos usuais da prática, nos quais  $\tau = 0$  e  $i = k$ :

$$\rho_{ii}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = R_{ii}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') / \sigma_i^2(\mathbf{r})$$

Com os dois pontos alinhados em uma das direções do sistema de coordenadas, com um afastamento  $s_j$  nesta direção (Fig.5.4):

$$\rho_{ii}^{(s_j)} = R_{ii}^{(s_j)} / \sigma_i^2 \quad (5.14)$$

Para o caso de  $i = 1$ :

$$\rho_{11}^{(s_j)} = R_{11}^{(s_j)} / \sigma_1^2 \quad (5.15)$$

Especificamente, para cada uma das três componentes:

– Coeficiente de correlação cruzada longitudinal ( $j = 1$ ):

$$\rho_{11}^{(s_1)} = R_{11}^{(s_1)} / \sigma_1^2$$

– Coeficiente de correlação cruzada lateral ( $j = 2$ ):

$$\rho_{11}^{(s_2)} = R_{11}^{(s_2)} / \sigma_1^2$$

– Coeficiente de correlação cruzada vertical ( $j = 3$ ):

$$\rho_{11}^{(\pm s_3)} = R_{11}^{(s_3)} / \sigma_1^2$$

O sinal positivo indica uma correlação ascendente (fixando o ponto inferior) e o sinal negativo uma correlação descendente (fixando o ponto superior).

## 5.2. ESCALAS DA TURBULÊNCIA

### 5.2.1. Introdução

a) As características espaciais da turbulência, como um todo, podem ser quantitativamente definidas a partir das funções de correlação. Praticamente isto é feito pelas **escalas** da turbulência, que são parâmetros que servem para avaliar as dimensões dos maiores turbilhões. A maior parte da energia cinética do vento está contida nestes turbilhões.

A dispersão dos resultados é considerável, dependendo muito do grau de estacionaridade real do vento (teoricamente admitido como sendo um fenômeno ergódico, e, portanto, estacionário), grau este que depende inclusive do intervalo de tempo usado para o registro e sua análise. Mackey e Ko<sup>18</sup>, estudando características do vento em Cape d'Aguilar, Hong-Kong, observaram que todas as escalas da turbulência que determinaram aumentavam com o tempo de amostragem, concluindo que "parece que apenas registros de meia hora ou mais de duração darão estimativas acuradas das escalas da turbulência na atmosfera" (Ref.18, pag. 49).

b) Mesmo em túnel de vento observa-se isto. Se o cálculo de uma certa escala de turbulência for feito por um processo rápido, cálculos feitos sucessivamente ao longo de um mesmo registro, acusarão variações consideráveis nos resultados. Para obter uma escala representativa, ao longo do registro, será necessário tomar a média de várias escalas "rápidas". Ou então usar processo de determinação da escala (processo eletrônico ou computacional) que utilize um intervalo de tempo de registro suficientemente longo para que, ao menos para efeitos de ordem prática, o vento gerado no túnel possa ser considerado como estacionário (e ergódico, pois, caso contrário, não será possível estudar o fenômeno com um único registro).

### 5.2.2. Escala temporal da turbulência

a) Pelo que foi exposto em 5.1.2, a função de autocorrelação constitui uma medida da "escala" de tempo do processo aleatório, uma medida do intervalo de tempo no qual existe uma dependência entre os valores médios das flutuações de velocidade. Mais precisamente, definimos como **escala temporal** da turbulência, ou **tempo característico**, a área sob a curva de auto correlação longitudinal normalizada

$$T_c(r) = \int_0^{\infty} \rho_1(r; \tau) d\tau$$

ou, simplificando a simbologia, para vento horizontalmente uniforme:

$$T_c(z) = \int_0^{\infty} \rho_1(z; \tau) d\tau \quad (5.16)$$

Vem a ser a largura, sobre o eixo dos retardos, de um retângulo de altura unitária e de área igual a área sob a curva (Fig.5.5).

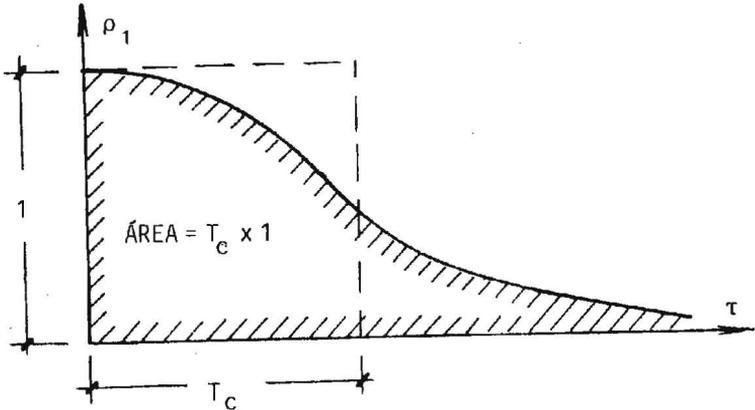


Fig. 5.5 – Escala temporal ou tempo característico,  $T_c$

- b) A escala temporal caracteriza a “memória” do processo aleatório:
- se  $\tau < T_c$ , as medidas do sinal dão informações razoáveis sobre o valor do sinal  $\tau$  segundos depois;
  - se  $\tau > T_c$ , pequena ou nenhuma informação, dependendo de quanto  $\tau$  supera  $T_c$ .

### 5.2.3. Escalas espaciais da turbulência

a) Também denominadas **escalas integrais** da turbulência ou **macroescalas** da turbulência, ou ainda, mais, simplesmente, **escalas** da turbulência.

Analogamente à escala temporal, cada escala espacial é definida como a área sob a respectiva curva da correlação cruzada normalizada:

$$L_{ij}(r) = \int_0^{\infty} \rho_{ii}(s_j) ds_j \quad (5.17)$$

sendo:  $i$  – indica a componente  $v_i$  do vetor rajada em ambos os pontos ( $r$  e  $r'$ );

$j$  – direção da componente da escala em estudo e, conseqüentemente, direção do segmento de reta que liga  $r$  e  $r'$  (Fig.5.6).

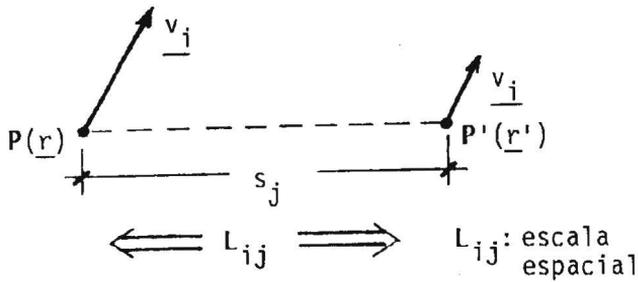


Fig. 5.6 – Escala espacial da componente  $v_i$  na direção  $j$

Considerando a componente  $v_i$  e admitindo uniformidade em cada plano horizontal, a (5.17) fica:

$$L_{i1}(z) = \int_0^{\infty} \rho_{i1}(s_j) ds_j$$

com as três componentes:

$$j = 1 - \text{escala longitudinal} : L_{i1}(z) = \int_0^{\infty} \rho_{i1}(s_1) ds_1$$

$$j = 2 - \text{escala lateral} : L_{i2}(z) = \int_0^{\infty} \rho_{i1}(s_2) ds_2$$

$$j = 3 - \text{escala vertical} : L_{i3}(z) = \int_0^{\infty} \rho_{i1}(s_3) ds_3$$

distinguindo-se nesta última, quando necessário, entre escala vertical ascendente,  $L_{i3}(z^+)$  e descendente,  $L_{i3}(z^-)$ . Cada uma dessas escalas é uma medida do tamanho médio dos maiores redemoinhos; indica a dimensão média desses redemoinhos na respectiva direção (Fig.5.7). Melhor seria designá-las de “dimensões características da turbulência”. Entretanto, este termo não é usual.

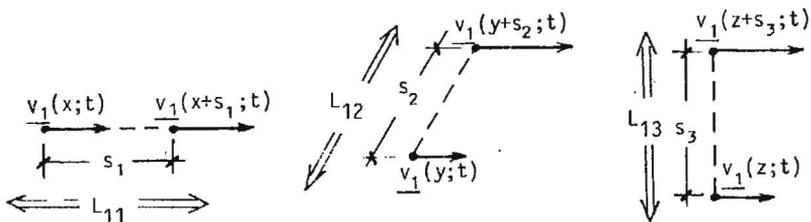


Fig. 5.7 – Escalas espaciais da componente longitudinal da turbulência

Para simplificar a simbologia, quando se trata da componente  $v_1$ , é usual substituir  $L_{1j}$  por  $L_j$ . Ter-se-á  $L_1$ ,  $L_2$  e  $L_3$ , em substituição, respectivamente, a  $L_{11}$ ,  $L_{12}$  e  $L_{13}$ .

### 5.2.4. Hipótese de Taylor

a) A hipótese de Taylor permite relacionar a escala longitudinal com a escala temporal. Taylor, estudando a turbulência gerada em um túnel aerodinâmico por uma grelha uniforme de barras, admitiu que os redemoinhos se deslocam com a velocidade média do vento, sem alteração sensível em uma curta distância. Em outras palavras, a alteração na forma de um redemoinho durante sua passagem pela zona de medidas é tão suave que ele pode ser considerado “congelado” durante esta passagem, deslocando-se com a velocidade média do vento.

Podemos ter uma visualização desta hipótese observando nuvens que se deslocam no céu. Se a turbulência não for demasiadamente grande, cada nuvem se desloca sem modificações sensíveis em curtas distâncias, e com a velocidade média do vento naquela zona.

Diversos estudos teóricos e experimentais mostraram que a hipótese de Taylor é satisfatória, desde que a turbulência não seja demasiadamente alta.<sup>19</sup>

b) Em termos mais precisos, da hipótese de Taylor conclui-se que a correlação cruzada (Fig.5.8):

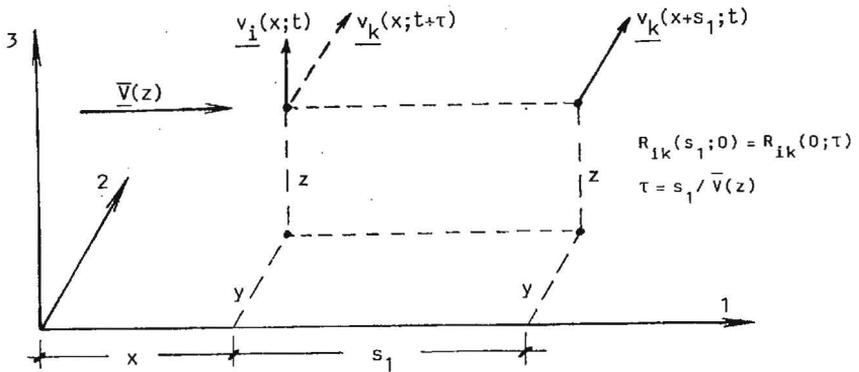


Fig. 5.8 – Hipótese de Taylor

$$R_{ik}(s_1; 0) = \langle v_i(x;t) \cdot v_k(x+s_1;t) \rangle \quad (5.19)$$

entre duas componentes quaisquer do vetor rajada em dois pontos separados apenas por uma distância  $s_1$  na direção do vento médio, é igual à correlação cruzada:

$$R_{ik}(0; \tau) = \langle v_i(x;t) \cdot v_k(x;t+\tau) \rangle \quad (5.20)$$

medida em um único ponto, para as mesmas componentes do vetor rajada e com um retardo dado por:

$$\tau = s_1 / \overline{V}(z) \quad (5.21)$$

sendo  $\overline{V}(z)$  a velocidade média do vento na altura  $z$ .

Resumindo:

$$R_{ik}(s_1;0) = R_{ik}(0;\tau) \quad (5.22)$$

Para  $i = k = 1$ :

$$R_{11}(s_1;0) = R_{11}(0;\tau) = R_1(\tau)$$

ou, mais sinteticamente:

$$R_{11}(s_1) = R_{11}(\tau) = R_1(\tau) \quad (5.23)$$

E, para a correlação normalizada:

$$\rho_{11}(s_1) = \rho_{11}(\tau) = \rho_1(\tau)$$

ou, explicitando a cota  $z$ :

$$\rho_{11}(z,s_1) = \rho_{11}(z;\tau) = \rho_1(z;\tau) \quad (5.24)$$

c) O que foi exposto acima mostra que a correlação cruzada longitudinal  $R_{11}(s_1;0)$  pode ser obtida a partir da correlação temporal  $R_1(\tau)$ , desde que se tome

$$s_1 = \overline{V}(z) \cdot \tau \quad (5.25)$$

Portanto, separações no espaço podem ser substituídas por separações no tempo, levando-se em conta a velocidade média do escoamento. Exemplificando, em um vento com velocidade média de 30m/s, uma separação no espaço de 15m equivale a uma diferença no tempo de  $15/30=0,5s$ .

d) Tomando a diferencial de  $s_1$  (5.25):

$$ds_1 = \overline{V}(z) d\tau \quad (5.26)$$

Substituindo na (5.18), com  $j = 1$ :

$$L_{11}(z) = \int_0^{\infty} \rho_{11}(s_1) \cdot \overline{V}(z) \cdot d\tau$$

Conforme (5.24):

$$L_{11}(z) = \int_0^{\infty} \rho_1(z; \tau) \cdot \overline{V}(z) \cdot d\tau.$$

Considerando a (5.16):

$$L_{11}(z) = \overline{V}(z) \cdot T_c(z) \quad (5.27)$$

Portanto, a escala longitudinal em uma certa altura  $z$  pode ser obtida multiplicando a velocidade média nesta altura pela correspondente escala temporal.

### 5.2.5. Escala longitudinal

a) Whithbread<sup>20</sup> chegou a uma lei de variação da componente longitudinal da turbulência,  $L_{11}$ , partindo do espectro de Davenport (a ser tratado em 6.5.1), e considerando que essa componente pode ser obtida a partir do pico da curva do espectro normalizado, obteve a seguinte expressão ( $L_{11}$  em metros):

$$L_{11} = 110 [\overline{V}(z) / \overline{V}(10)] = 110 (z/10)^p \quad (5.28)$$

pela qual  $L_{11}$  aumenta com a altura sobre o terreno na mesma relação que a velocidade média.

b) Harris<sup>4</sup> partiu também do espectro da turbulência. Considerando que espectro (a rigor, densidade espectral da variância) e autocorrelação formam um par de Fourier, determinou a segunda dessas funções a partir da primeira, e, por integração [Ver (5.16)] chegou a:

$$T_c = 0,084 L / \overline{V}(10) \quad (5.29)$$

Como  $L$  é uma constante, segue que  $T_c$  não varia com a altura. Conforme as expressões (5.27) e (3.28):

$$L_{11}(z) = \overline{V}(z) \cdot T_c(z) = 0,084 \overline{V}(z) L / \overline{V}(10)$$

$$L_{11}(z) = 0,084 L (z/10)^p \quad (5.30)$$

A “constante de comprimento”, L, segundo Withbread,<sup>20</sup> Davenport<sup>5</sup> e outros, é igual a 1200m. Harris<sup>4</sup> sugere L = 1800m, tendo em vista resultados experimentais que consultou. Teremos, para os dois casos:

$$L = 1200\text{m} : L_{11}(z) = 101 (z/10)^p \quad (5.31)$$

$$L = 1800\text{m} : L_{11}(z) = 151 (z/10)^p \quad (5.32)$$

c) Diversos autores apresentam resultados (próprios ou alheios) sob essa mesma forma:

$$L_{11}(z) = K (z / z_{ref})^n \quad (5.33)$$

Valores de K e  $z_{ref}$  são dados na tabela 5.1. Expressões da forma  $L_{11}(z) = K z^n$  foram incluídas na tabela 5.1, fazendo-se na (5.33)  $z_{ref} = 1\text{m}$ .

Acima de 300m, conforme Counihan, a influência de  $z_0$  é desprezável e  $L_{11}$  diminui. Roulle e Counihan limitam a aplicabilidade de suas expressões a 240m, altura até a qual há informações suficientes.

d) Alguns autores, entre eles Stathopoulos<sup>23</sup> e Cook,<sup>11,24</sup> apresentam a expressão, devida a Kármán:

$$L_{11}(z) = 25 (z - z_d)^{0,35} z_0^{-0,063} \text{ metros} \quad (5.34)$$

Como vimos em 3.2.5.b, na prática pode-se fazer  $z_d = 0$ , ficando:

$$L_{11}(z) = 25 z^{0,35} z_0^{-0,063} \text{ metros} \quad (5.35)$$

É a expressão adotada pela ESDU,<sup>25</sup> indicada na referência 26. Conforme Cook, esta expressão é válida até 200m de altura. Acima, não há dados suficientes.

e) Entretanto, Harris critica esta expressão, por ser “fundamentalmente incorreta, visto que viola princípios de similaridade”, conforme justifica em seu trabalho.<sup>26</sup>

f) Algumas das expressões indicadas na tabela 5.1 e mais a (5.35) foram usadas na determinação de  $L_{11}(z)$  correspondente às Categorias de rugosidade I, III e V da NBR-6123/88. As da tabela 5.1 são as expressões de número de ordem 2, 3, 5, 7, 8 e 9. Os resultados aparecem na tabela

5.2. Para as Categorias II e V as curvas correspondentes podem ser vistas na fig.5.9.

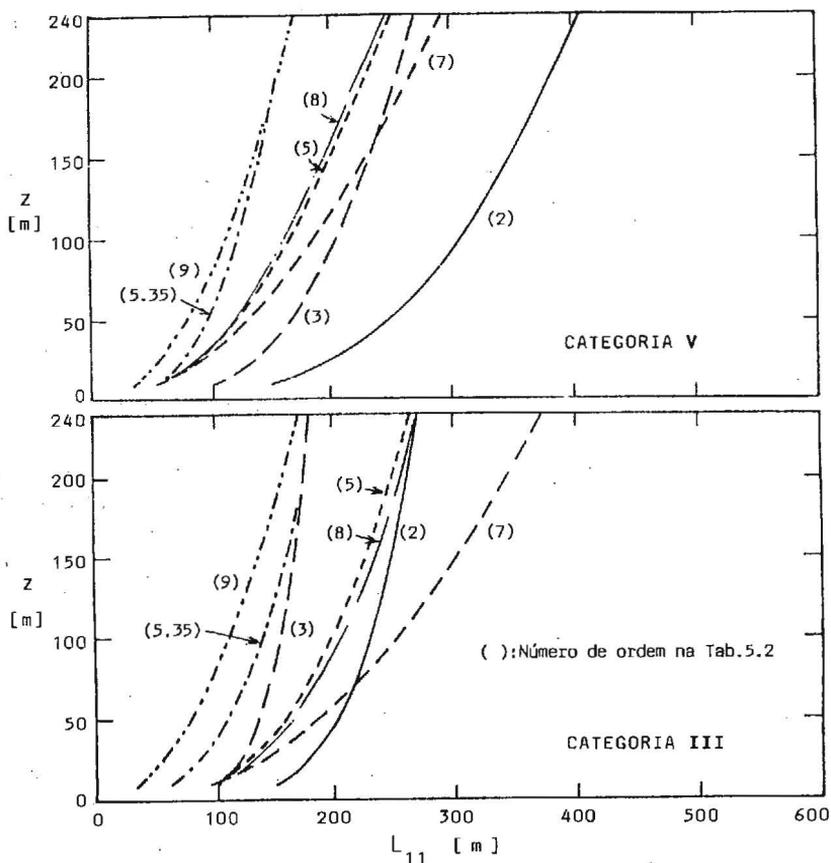


Fig. 5.9 – Valores de  $L_{11}$  para categoria III da NBR-6123/88. Diversos autores

Observe-se a grande dispersão dos valores, que está a indicar a complexidade do fenômeno e a falta de informações suficientes para resultados mais coerentes. Talvez o mais razoável atualmente seja indicar apenas uma faixa de valores, na qual se situe a maioria dos dados, com um certo grau de confiabilidade.

Tabela 5.1 – Valores de K,  $z_{ref}$ , E n – Expressão (5.33)

Nº ordem	Autor	Ref.	K (m)	$z_{ref}$ (m)	n	Observações
1	Whithbread	20	110	10	p (1)	—
2	Harris	4	151	10	p (1)	L = 1800m (Harris)
3	Harris	4	101	10	p (1)	L = 1200m (Davenport)
4	Mackey e Ko	18°	210	10	0,55	Para diversos tufões em Cape d'Aguilar, Hong Kong
5	Reichman	12	300	350	(2)	Fórmula de Reichman $0,01 \leq z_0 \leq 10m$
6	Shiotani e Iwatani	21	53	1	0,42	$20 \leq z \leq 50m$
			90	1	0,19	$50 \leq z \leq 150m$
						Costa de Nakagawwa, Japão
7	Rouille	22	(3)	1	(4)	$10 \leq z \leq 240m$ $0,1 \leq z_0 \leq 10m$
8	Counihan	12	(5)	1	(2)	$10 \leq z \leq 240m$ $0,01 \leq z_0 \leq 10m$
9	Teunissen	13	11	1	0,5	—

(1) - p: expoente da lei potencial de velocidade, para  $t = 10min$   
(2) -  $n = 0,437 + 0,153 \log z_0$ , para  $0,01 \leq z_0 \leq 10m$   
Fórmula de Reichman, a partir de gráficos de Duchêne-Marullaz<sup>17</sup>  
(3) -  $K = 20 (1 / z_0)^{0,32}$   
(4) -  $n = 0,5 z_0^{0,08}$   
(5) -  $K = 10^{1,365 - 0,4 \log z_0}$

### 5.2.6. Escalas lateral e vertical

a) A dispersão de resultados é considerável não só na escala longitudinal mas também, como seria de esperar, nas escalas lateral e vertical. Do mesmo modo, há uma grande imprecisão quando se procura definir uma relação entre as componentes da turbulência. Por exemplo, Davenport<sup>7</sup> indica  $L_{11} \approx 100m$  e  $L_{12}$  e  $L_{13}$  entre 30 e 60m, para  $z = 10m$ . Simiu,<sup>27</sup> para campo aberto, cita os valores de  $L_{11}$  encontrados por Shiotani e grupados na tabela 5.3.

Além disso, as escalas da turbulência aumentam com a altura sobre o terreno apenas até certo ponto, que se situa, segundo Cook,<sup>11</sup> entre  $z_g/3 < z - z_d < z_g/2$ . Isto é, segundo Cook as escalas crescem até uma altura entre 1/3 e 1/2 da altura da camada limite, decrescendo a partir daí.

Rouille (Ref. 22, p.6), por sua vez, diz que “acima de 300m  $L_{11}$  parece decrescer e ser independente de  $z_0$ ”. O mesmo acontecerá com  $L_{12}$  e  $L_{13}$ , que dependem de  $L_{11}$ , como veremos a seguir.

Tabela 5.2 –  $L_{11}$  para categorias I, II e V da NBR-6123/88 – 1ª parte

z (m)	$L_{11}(z)$ [metros]								
	Expressão 2 Categoria			Expressão 3 Categoria			Expressão 5 Categoria		
	I	III	V	I	III	V	I	III	V
10	151	151	151	101	101	101	188	93	56
20	161	172	187	108	115	125	206	117	77
30	168	185	212	112	124	142	217	133	94
50	176	203	249	118	136	166	232	158	119
100	188	231	308	126	155	206	255	198	166
150	195	249	350	131	167	234	270	227	201
200	201	263	382	134	176	256	279	249	230
240	204	272	404	137	182	271	286	265	251
$z_0$ (m)	-	-	-	-	-	-	0,01*	0,20	1,75

Tabela 5.2 –  $L_{11}$  para categorias I, III e V da NBR-6123/88 – 2ª parte

z (m)	$L_{11}(z)$ [metros]									
	Expressão 7 Categoria			Expressão 8 Categoria			Expr.9 Categ.	Expressão (5.35) Categoria		
	I	III	V	I	III	V	I a V	I	III	V
10	109	92	56	198	94	55	35	78	62	54
20	145	125	80	216	119	77	49	100	79	69
30	172	149	99	228	136	93	60	115	91	79
50	213	187	129	244	160	118	78	137	109	95
100	284	253	186	267	202	164	110	175	139	121
150	336	303	230	282	231	199	135	202	160	139
200	378	344	267	293	254	229	156	223	177	154
240	408	372	294	300	269	249	170	-	-	-
$z_0$ (m)	0,1*	0,20	1,75	0,01*	0,20	1,75	-	0,005	0,20	1,75

\* Valor mínimo indicado pelo autor.

Valores de  $p(10\text{min})$ : respectivamente 0,095; 0,185 e 0,31, para I, III e V

Tabela 5.3 – valores de  $L_{11}$  – Shiotani

z (m)	$L_{11}$ (metros)	
	variação	média
30,8	60 a 460	200
80,8	60 a 650	240
110,8	110 a 690	350
150,8	120 a 630	400

b) Nos parágrafos seguintes transcreveremos comentários, valores e razões entre as escalas das componentes da turbulência, apresentados por diversos pesquisadores e autores.

c) Counihan, 1972.<sup>3</sup> Cita vários resultados, que transcreveremos a seguir:

– Schmidt (1953):

$$L_{13} \cong 15m \quad (z \geq 6m)$$

– Shiotani (1953): sugere que a forma dos turbilhões é tal que:

$$L_{11} > L_{12} > L_{13}$$

na parte inferior da camada limite atmosférica, o que foi confirmado por medida de Harris (1970). Entretanto, devido à falta de informações sobre  $L_{13}$ , “é provavelmente razoável admitir que  $L_{12} = L_{13}$ ”, comenta Counihan.

– Harris (1970). A Tabela 5.4 apresenta valores de  $L_{11}$  e  $L_{12}$  indicados por Harris, aos quais acrescentamos a relação entre eles.

Tabela 5.4 – Componentes de  $L_{11}$  E  $L_{12}$  – Harris

z (m)	Escala (m)		Razão
	$L_{11}$	$L_{12}$	$L_{11} / L_{12}$
18	168	57	3,0
100	226	68	3,3
182	252	74	3,4

d) Gandemer e Barnaud, 1974.<sup>28</sup> Apresentam os seguintes valores aproximados:

– Região de campo:

$L_{11}$  entre 100m e 300m

$L_{12}$  entre 20m e 100m

$L_{13}$  entre 30m e 100m

– Região de subúrbios e pequenas cidades:

$L_{11}$  entre 300m e 600m

$L_{12}$  entre 40m e 150m

$L_{13}$  entre 40m e 150m.

Os valores vão aumentando com a altura sobre o terreno, até certo ponto, como foi visto em 5.2.6.a.

e) Counihan, 1975.<sup>29</sup> Para  $z$  entre 10m e 240m:

$$L_{12} = 0,3 L_{11} \text{ a } 0,4 L_{11}$$

$$L_{13} = 0,5 L_{11} \text{ a } 0,6 L_{11}$$

Tomando a média, obteremos:

$$L_{12} \cong 0,35 L_{11} ; L_{13} \cong 0,55 L_{11}$$

e, conseqüentemente:

$$L_{12} / L_{13} \cong 0,64 ,$$

e as razões:

$$L_{11} : L_{12} : L_{13} = 1 : 0,35 : 0,55$$

Pela teoria da turbulência isótropa:

$$L_{11} : L_{12} : L_{13} = 1 : 0,5 : 0,5$$

que Counihan indica para  $z$  entre 240m e 600m.

f) Mackey e Ko, 1975.<sup>18</sup> As medidas foram feitas em uma série de torres de 61m de altura, abrangendo uma superfície vertical de, aproximadamente, 61m x 61m. Esta instalação está situada em Cape d'Aguilar, Hong Kong. Das expressões que estes pesquisadores indicam, correspondentes a medidas feitas em tufões que incidiram nessa instalação, e que são:

$$\begin{aligned} L_{11} &= 210 (z/10)^{0,55} \\ L_{12} &= 55 (z/10)^{0,75} \\ L_{13} &= 60 (z/10)^{0,28} \end{aligned} \quad (5.36)$$

chega-se a :

$$\begin{aligned} L_{11} / L_{12} &= 3,82 (z/10)^{-0,20} \\ L_{11} / L_{13} &= 3,50 (z/10)^{0,27} \\ L_{12} / L_{13} &= 0,92 (z/10)^{0,47} \end{aligned} \quad (5.37)$$

A última das (5.37) permite determinar a forma da secção transversal dos turbilhões, a qual, por esta expressão, é variável com a altura. Valores das relações entre as dimensões, calculados pelas (5.37), aparecem na tabela 5.5.

A secção transversal do turbilhão (a qual tem a forma de um elipsóide) torna-se cada vez mais achatada, com o aumento de  $z$ .

Valores medidos nessa mesma instalação, já em 1970, aparecem na tabela 5.6. Outros valores são apresentados na tabela 5.7.

Tabela 5.5 – Escalas da turbulência para tufões, em Hong Kong – Mackey e Ko<sup>18</sup>

z (m)	Escalas (m)			Razões		
	L <sub>11</sub>	L <sub>12</sub>	L <sub>13</sub>	L <sub>11</sub> /L <sub>12</sub>	L <sub>11</sub> /L <sub>13</sub>	L <sub>12</sub> /L <sub>13</sub>
10	210	55	60	3,8	3,5	0,9
20	307	92	73	3,3	4,2	1,3
30	384	125	82	3,1	4,7	1,5
40	450	156	88	2,9	5,1	1,8
50	509	184	94	2,8	5,4	2,0
60	563	211	99	2,7	5,7	2,1

Tabela 5.6 – Escalas da turbulência para tufões, em Hong Kong – Mackey e Ko<sup>18</sup>

Data	z (m)	Escalas (m)			Razões		
		L <sub>11</sub>	L <sub>12</sub>	L <sub>13</sub>	L <sub>11</sub> /L <sub>12</sub>	L <sub>11</sub> /L <sub>13</sub>	L <sub>12</sub> /L <sub>13</sub>
20/03/70	30	234	63	51	3,7	4,6	1,2
	60	450	–	69	–	6,5	–
05/04/70	30	417	75	90	5,6	4,6	0,8
	60	870	109	120	8,0	7,3	0,9

Tabela 5.7 – Escalas da turbulência para tufões, em Hong Kong – Mackey e Ko<sup>18</sup>

z (m)	Escalas de v <sub>1</sub>			Razões		
	L <sub>11</sub>	L <sub>12</sub>	L <sub>13</sub>	L <sub>11</sub> /L <sub>12</sub>	L <sub>11</sub> /L <sub>13</sub>	L <sub>12</sub> /L <sub>13</sub>
10	205	55	56	3,7	3,7	1,0
13	230	62	60	3,7	3,8	1,0
28	386	133	75	2,9	5,1	1,8
43	450	170	86	2,6	5,2	2,0
61	555	193	94	2,9	5,9	2,1

– As escalas indicadas são médias dos registos

– Valores a 10m foram obtidos pelas expressões (5.36)

g) Duchène-Marullaz, 1975.<sup>17</sup> Medidas feitas em zona suburbana, em três torres com 60m de altura. Dos resultados destacamos:

$$L_{12} \cong L_{11} / 3 \quad ; \quad L_{13}(z^-) \cong L_{11} / 5$$

A tabela 5.8 apresenta os valores médios das três escalas da componente longitudinal das rajadas, L<sub>1j</sub>, e as respectivas razões. A tabela 5.9, por sua vez, apresenta valores médios das três escalas da componente lateral das rajadas, L<sub>2j</sub>, e as respectivas razões.

Tabela 5.8 – Escalas da componente longitudinal  
Das rajadas,  $v_1$  – Duchêne-Marullaz<sup>17</sup>

z (m)	Escalas de $v_1$ (m)				Razões			
	$L_{11}$	$L_{12}$	$L_{13+}$	$L_{13-}$	$L_{11}/L_{12}$	$L_{11}/L_{13+}$	$L_{12}/L_{13+}$	$L_{12}/L_{13-}$
10	75	25	40	–	3,0	1,9	0,6	–
20	95	30	–	–	3,2	–	–	–
30	125	–	45	25	–	2,8	–	–
40	145	45	–	–	3,2	–	–	–
50	170	–	–	–	–	–	–	–
60	190	60	–	35	3,2	–	–	1,7

h) Choi, 1978.<sup>10</sup> Estudo de tufões na parte inferior da atmosfera, até 60m de altura, em Cape d'Aguilar, Hong Kong. Nas mesmas instalações experimentais usadas por Mackey e Ko, as quais ficam frente ao mar aberto, com incidência direta de tufões. Valores das escalas da turbulência para o tufão Freda são dados na tabela 5.10. Estas três escalas definem, como em outros estudos, um elipsóide com o eixo maior orientado na direção do vento médio. Choi propõe:

Tabela 5.9 – Escalas da componente lateral  
das rajadas,  $V_2$  – Duchêne-Marullaz<sup>17</sup>

z (m)	Escalas de $v_2$ (m)				Razões			
	$L_{21}$	$L_{22}$	$L_{23+}$	$L_{23-}$	$L_{21}/L_{22}$	$L_{21}/L_{23+}$	$L_{22}/L_{23+}$	$L_{22}/L_{23-}$
10	35	30	15	–	1,2	2,3	2,0	–
20	45	30	–	–	1,5	–	–	–
30	55	–	20	10	–	2,8	–	–
40	65	45	–	–	1,4	–	–	–
50	85	–	–	–	–	–	–	–
60	85	55	–	20	1,5	–	–	2,8

$$\begin{aligned}
 L_{11} &= 50 z^{0,58} \\
 L_{12} &= 4,5 z^{0,74} \\
 L_{13} &= 20 z^{0,33}
 \end{aligned}
 \tag{5.38}$$

das quais tiramos:

$$\begin{aligned}
 L_{11}/L_{12} &= 11,1 z^{-0,16} \\
 L_{11}/L_{13} &= 2,5 z^{0,25} \\
 L_{12}/L_{13} &= 0,23 z^{0,41}
 \end{aligned}
 \tag{5.39}$$

A partir destas expressões foi organizada a tabela 5.11.

Tabela 5.10 – Escalas da turbulência medidas em Cape d'Aguilar, Hong Kong. tufão Freda – Choi<sup>10</sup>

z (m)	Escalas (m)			Razões		
	L <sub>11</sub>	L <sub>12</sub>	L <sub>13</sub>	L <sub>11</sub> /L <sub>12</sub>	L <sub>11</sub> /L <sub>13</sub>	L <sub>12</sub> /L <sub>13</sub>
12,8	216	29	48	7,4	4,5	0,6
27,8	312	62	–	5,0	–	–
42,9	423	72	–	5,9	–	–
59,4	532	93	80	5,7	6,7	1,2

Choi comparou essas escalas com as medidas em monções, concluindo que, em monções a escala longitudinal (L<sub>11</sub> de cerca de 1000m, z=60m) é maior que em tufões. As outras duas escalas são aproximadamente iguais nos dois tipos de vento. As razões L<sub>11</sub>:L<sub>12</sub> valem aproximadamente 9:1 e 6:1 para monção e tufão, respectivamente. Como se constata, razões muito superiores às encontradas por outros pesquisadores.

j) Teunissen, 1979.<sup>30</sup> As medições foram feitas em um pequeno aeroporto suburbano, em Ottawa, Canadá, por meio de uma torre móvel, com 33m de altura, várias pequenas torres de 3m de altura e um helicóptero, com o qual foram feitas medidas até 600m de altura. A rugosidade do terreno pode ser considerada como de subúrbios ou de cidades pequenas.

Tabela 5.11 – Escalas da turbulência para tufões – Expressões de Choi<sup>10</sup>

z (m)	Escalas (m)			Razões		
	L <sub>11</sub>	L <sub>12</sub>	L <sub>13</sub>	L <sub>11</sub> /L <sub>12</sub>	L <sub>11</sub> /L <sub>13</sub>	L <sub>12</sub> /L <sub>13</sub>
10	190	25	43	7,7	4,4	0,6
20	284	41	54	6,9	5,3	0,8
30	360	56	61	6,4	5,9	0,9
40	425	69	68	6,2	6,3	1,0
50	483	81	73	5,9	6,6	1,1
60	537	93	77	5,8	7,0	1,2

Os resultados indicaram que L<sub>12</sub> e L<sub>13</sub> tendem a aumentar com a altura, até cerca de 450m, decrescendo para maiores alturas. Essas escalas são aproximadamente iguais, embora L<sub>12</sub> em geral seja um pouco maior que L<sub>13</sub>. Em vista da dispersão existente, Teunissen sugere que se considere

$$L_{12} = L_{13} = 0,40 z$$

para alturas de até cerca de 400m (pela figura de seu trabalho, cremos que pode ser até 450m). Para alturas maiores, nas quais o vento pode ser considerado isotrópico:

$$L_{12} = L_{13} = 0,5 L_{11}$$

Para  $L_{11}$ , conforme já foi indicado na tabela 5.1:

$$L_{11} \approx 11 \sqrt{z}$$

k) Shiotani e Iwatani, 1979.<sup>21</sup> Medidas feitas em ventos fortes, em terreno aberto, próximo ao mar. Os autores chamam a atenção de que a relação entre  $L_{11}$  e  $z_0$  não é tão definida como aquela entre  $l_1$  e  $z_0$ . Aliás, pelo que temos visto até agora, são vários os autores que não consideram influência de  $z_0$ ; isto é, as escalas podem ser consideradas, segundo esses autores, independentes da categoria de rugosidade do terreno.

Para  $z = 40\text{m}$ , os autores indicam:.

– para vento marítimo (11 casos):

$$L_{11} = 195 \pm 55\text{m} ; L_{12} = 55 \pm 35\text{m}$$

– para vento terrestre (4 casos):

$$L_{11} = 135 \pm 29\text{m} ; L_{12} = 55 \pm 20\text{m} .$$

l) Roulle, 1980<sup>22</sup>:

– para  $z \leq 200\text{m}$  :

$$L_{11} : L_{12} : L_{13} = 1 : 0,3 : 0,5$$

– para  $z > 200\text{m}$  :

$$L_{11} : L_{12} : L_{13} = 1 : 0,5 : 0,5$$

isto é, a turbulência é admitida isotrópica acima de 200m.

“Até 200 ou 300m,  $L_{11}$  é uma função crescente da altura e decrescente da rugosidade”. (Ver Tabela 5.1). “Acima desta altura ( $z = 300\text{m}$ )  $L_{11}$  parece decrescer e ser independente da rugosidade do terreno”. Considerando a razão  $L_{11} : L_{12} : L_{13}$ , também à  $L_{12}$  e  $L_{13}$  aplica-se o comentário de Roulle transcrito acima.

m) Cook, 1985.<sup>11</sup> Além de expressões para a determinação das escalas da componente longitudinal das rajadas, Cook indica também expressões para as outras componentes:

– Escalas na direção longitudinal (j = 1)

$$L_{11} = 25 (z-d)^{0,35} z_0^{-0,063}$$

$$L_{21} = 5,1 (z-d)^{0,48} z_0^{-0,086} \quad (5.40)$$

$$L_{31} = 0,35 (z-d)$$

para  $(z-d) < 500m$ .

“Há uma incerteza nestas expressões de cerca de  $\pm 30\%$ , sendo este erro maior que a fraca dependência do comprimento de rugosidade,  $z_0$ ”.

As escalas da turbulência alcançam um máximo a uma altura entre

$$z_g/3 < z-d < z_g/2 .$$

Cook salienta também que as escalas da turbulência parecem ser independentes da velocidade do vento.

– Escalas na direção lateral e vertical (j = 2 e 3):

$$L_{12} = 10 (z-d)^{0,38} z_0^{-0,068}$$

$$L_{12} = 0,35 (z-d) \quad (5.41)$$

$$L_{13} = 6,3 (z-d)^{0,45} z_0^{-0,081}$$

$$L_{23} = 3,1 (z-d)^{0,55} z_0^{-0,099}$$

para  $(z-d) \leq 500m$  .

“ $L_{22}$  e  $L_{33}$  não são relevantes no que diz respeito a cargas do vento”.

A partir dessas expressões vamos determinar as razões entre as três escalas da componente longitudinal das rajadas,  $v_1$  . Adotaremos a simplificação, já comentada, de fazer  $z_d = 0$ :

$$L_{11} = 25 z^{0,35} z_0^{-0,063}$$

$$L_{12} = 10 z^{0,38} z_0^{-0,068}$$

$$L_{13} = 6,3 z^{0,45} z_0^{-0,081}$$

(5.42)

Teremos:

$$L_{11}/L_{12} = 2,5 z^{-0,03} z_0^{0,005}$$

$$L_{11}/L_{13} = 4,0 z^{-0,10} z_0^{0,018}$$

$$L_{12}/L_{13} = 1,6 z^{-0,07} z_0^{0,013}$$

(5.43)

Valores de  $L_{11}$ ,  $L_{12}$ ,  $L_{13}$  e das razões acima aparecem nas tabelas 5.12 e 5.13, respectivamente para as Categorias III e V da NBR-6123/88.

n) Flay e Stevenson, 1988.<sup>31</sup> Terreno de zona rural. As medidas foram feitas em uma torre com 20m de altura, para separação na direção longitudinal e na direção vertical. Para separações laterais foi usado um conjunto de oito torres de 10m de altura, dispostas em um plano perpen-

dicular à direção do vento. O comprimento de rugosidade, determinado de perfis de velocidade média, foi  $z_0 = 0,03\text{m}$ .

Tabela 5.12 – Escalas da componente longitudinal da turbulência, conforme (5.42) e (5.43) – Categoria III da NBR-6123/88 ( $z_0 = 0,20\text{m}$ )

z (m)	Escalas de $v_1$			Razões		
	$L_{11}$	$L_{12}$	$L_{13}$	$L_{11}/L_{12}$	$L_{11}/L_{13}$	$L_{12}/L_{13}$
10	62	27	20	2,3	3,1	1,3
20	79	35	28	2,3	2,9	1,3
30	91	41	33	2,2	2,8	1,2
50	109	49	42	2,2	2,6	1,2
100	139	64	57	2,2	2,5	1,1
150	160	75	68	2,1	2,4	1,1
200	177	84	78	2,1	2,3	1,1
250	191	91	86	2,1	2,2	1,1
300	204	97	93	2,1	2,2	1,1
350	215	103	100	2,1	2,2	1,0

Tabela 5.13 – Escalas da componente longitudinal da turbulência, conforme (5.42) e (5.43) – Categoria V da NBR-6123/88 ( $z_0 = 1,75\text{m}$ )

z (m)	Escalas de $v_1$			Razões		
	$L_{11}$	$L_{12}$	$L_{13}$	$L_{11}/L_{12}$	$L_{11}/L_{13}$	$L_{12}/L_{13}$
10	54	23	17	2,3	3,2	1,4
20	69	30	23	2,3	3,0	1,3
30	79	35	28	2,3	2,9	1,3
50	95	43	35	2,2	2,7	1,2
100	121	55	48	2,2	2,5	1,2
150	139	65	57	2,2	2,4	1,1
200	154	72	65	2,1	2,4	1,1
250	167	78	72	2,1	2,3	1,1
300	178	84	78	2,1	2,3	1,1
350	188	89	84	2,1	2,2	1,1
400	196	94	89	2,1	2,2	1,1
450	205	98	94	2,1	2,2	1,1
500	212	102	99	2,1	2,2	1,0

Na tabela 5.14 aparecem diversas escalas da turbulência. Para a direção 1 elas foram determinadas a partir das curvas de autocorrelação, adotando para  $T_c$  (item 5.2.2.) o tempo necessário para a autocorrelação cair para um valor igual a  $1/e$  ( $= 0,37$ ). Com este procedimento evita-se o problema que aparece quando a curva de autocorrelação não chega a

zero (por variações muito lentas da velocidade, mais ou menos periódicas, ou por insuficiência do retardo máximo – isto é, por truncamento da curva).

Tabela 5.14 – Escalas nas direções longitudinal ( $z = 10,3m$ ) e vertical das três componentes da velocidade.

Escalas em metros					
$L_{11}$	$L_{12}$	$L_{13}$	$L_{31}$	$L_{32}$	$L_{33}$
88	34	11	20-25	6-8	6-8

Desta tabela tiramos as razões:

$$L_{11}/L_{12} = 2,6 ; \quad L_{11}/L_{13} = 8,0 ; \quad L_{12}/L_{13} = 3,1.$$

## Capítulo 6

# ESPECTRO DA TURBULÊNCIA

### 6.1. INTRODUÇÃO

a) Vimos em 3.1.a que, em ventos fortes em estabilidade neutra, as flutuações de velocidade são quase que exclusivamente causadas por agitação mecânica do ar (pela existência de rugosidades naturais e artificiais na superfície terrestre). Forma-se um grande número de turbilhões, em uma vasta gama de dimensões, desde os maiores, da ordem de grandeza da altura da camada limite atmosférica, até os menores, da ordem de grandeza do milímetro. A energia cinética, que passa do escoamento médio para os maiores turbilhões, é transferida, por um processo em cascata, até os menores, terminando por dissipar-se em calor, pela viscosidade do ar.

b) Este processo em cascata consiste, por assim dizer, na desagregação dos grandes turbilhões em turbilhões cada vez menores, que começam a ser dissipados em calor quando atingem uma escala da ordem do centímetro ou ainda menos. Esta desagregação dá-se em uma zona situada entre os grandes turbilhões (processo de geração de energia cinética, no qual esta passa do escoamento médio para os turbilhões) e os menores (processo de dissipação, por ação da viscosidade), sendo conhecida como **zona inercial** (de Kolmogorov). É uma zona de equilíbrio energético, sem produção ou dissipação de energia. A fig.6.1 procura mostrar, graficamente, o que foi exposto acima.

A distribuição da energia, se considerada em função da frequência, constitui o que é designado por **espectro** de energia, e que será objeto de estudo nos próximos itens.

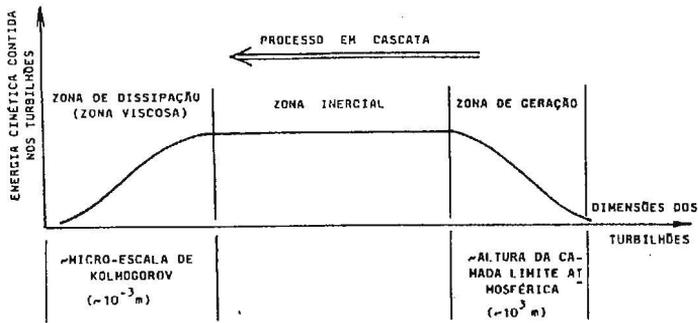


Fig. 6.1 – Esboço da energia cinética contida nos turbilhões de ventos fortes em estabilidade neutra

## 6.2. ESPECTRO DE POTÊNCIA – CONCEITUAÇÃO FÍSICA

a) Este conceito é fundamental para o estudo probabilístico da turbulência do vento. Procuraremos chegar a uma definição mais precisa de um modo intuitivo e por analogias simples tiradas de conceitos mais familiares.

Suponhamos que a turbulência do vento é devida a uma flutuação muito simples, dada por uma função harmônica;<sup>32</sup>

$$v_1(t) = v_0 \cos 2\pi f t \quad (6.1)$$

sendo:

$v_0$  – amplitude

$f$  – frequência;  $1/f = T$  (período)

Calculemos a autocorrelação para  $\tau = 0$ .

Conforme (5.2.a) e (4.5):

$$R_1(0) = \langle v_1^2(t) \rangle = \sigma_1^2 = \frac{1}{T} \int_0^T v_1^2(t) dt \quad (6.2)$$

$$R_1(0) = \frac{1}{T} \int_0^T v_0^2 \cos^2(2\pi f t) dt = \frac{v_0^2}{T 2\pi f} \left[ \frac{1}{2} 2\pi f t + \frac{1}{4} \sin 4\pi f t \right]_0^T \quad (6.3)$$

$$R_1(0) = \sigma_1^2 = v_0^2 / 2$$

O que representa este valor? Uma medida da energia cinética ou da potência média contida nas flutuações do vento. Isto é mais facilmente

percebido lembrando o caso de uma corrente elétrica alternada, de voltagem  $e$ , para a qual

$$e = e_0 \text{ sen } \omega t \quad (\omega = 2 \pi f)$$

$$e_{\text{eficaz}} = e_{\text{rms}} = e_0 / \sqrt{2}$$

Se tivermos uma corrente contínua com voltagem  $e_{\text{rms}}$  a potência dissipada em uma resistência  $R = 1 \text{ ohm}$  será:

$$P = e^2 / R = (e_0 / \sqrt{2})^2 = e_0^2 / 2$$

análoga à (6.3).

O quadrado do valor rms, ou seja, a variância, nos fornece o teor de potência, ou potência média contida no processo harmônico.

De um modo mais geral define-se como **teor de potência** de uma função periódica  $x(t)$  no período  $T$  (ou seu múltiplo) ao valor quadrado médio

$$\langle x^2(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt = \text{variância } \sigma^2 = \text{autocorrelação na origem,}$$

$R(0)$ . (6.4)

Esta definição é válida também para fenômenos aleatórios estacionários, desde que se tome  $T \rightarrow \infty$  :

$$\langle x^2(t) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt$$

Nas aplicações  $T$  é um intervalo de tempo suficientemente longo para que seja obtido um valor representativo como média estatística.

Voltando ao nosso exemplo do vento, (6.3):

$$\text{Potência média} = \sigma_1^2 = R_1(0) = v_0^2 / 2 \quad (6.5)$$

Admitindo que as flutuações do vento não constituam uma única onda harmônica, mas sim uma função periódica mais complexa, o teorema da série de Fourier nos diz que esta função pode ser encarada como uma superposição de funções harmônicas simples, com diversas amplitudes, frequências e fases. Neste caso, para este conjunto de ondas a variância será :

$$\text{Potência média} = \sigma_1^2 = R_1(0) = \sum_{i=1}^N (v_{oi}^2 / 2) \quad (6.6)$$

sendo:

$v_{oi}$  – amplitude da componente harmônica de ordem  $i$  ;  
 $N$  – número de ondas harmônicas.

Podemos dizer que a variância total é constituída pela soma das variâncias (ou potências médias) correspondentes a todas as freqüências individuais presentes nas flutuações. Em seu conjunto elas formarão um espectro discreto.

Na realidade, as flutuações do vento constituem um processo aleatório, com uma distribuição contínua de freqüências dentro de certos limites. Teremos um espectro contínuo, e o **espectro de potência**, ou, mais precisamente, a **densidade espectral da variância**,  $S(f)$ , será tal que

$$\sigma_v^2 = R(0) = \int_0^{\infty} S(f) df \quad (6.7)$$

e, para as componentes das flutuações:

$$\sigma_i^2 = R_i(0) = \int_0^{\infty} S_i(f) df \quad (6.8)$$

Está implícito nas expressões acima que a densidade espectral tende para zero em freqüências muito altas, a fim de que a integral em um intervalo infinito seja finita.

b) Uma analogia muito elucidativa – da qual provém o nome de espectro – é o da luz passando através de um prisma. O espectro luminoso assim obtido exprime a distribuição da energia luminosa pelos diversos comprimentos de onda (ou freqüências). De modo análogo, o espectro de potência das rajadas indica a distribuição da energia contida nestas rajadas entre os diversos comprimentos de onda ou freqüências.

c) Para o engenheiro estruturista será mais familiar, embora fisicamente mais distante, a analogia com uma carga  $q$ , distribuída ao longo de uma viga segundo uma lei qualquer. A taxa de carga  $q$  vem a ser a “densidade” do carregamento. A área total do diagrama de carga será a carga total :

$$\text{Carga total} = \int_0^l q dx$$

(corresponde à potência média de todo o processo aleatório).

A área de um certo trecho do diagrama será a carga aplicada a este trecho:

$$\text{Carga parcial no trecho } (x, x + s) = \int_x^{x+s} q dx$$

(corresponde à potência média em um certo intervalo de freqüências  $f, f + \Delta f$ ).

d) Uma terceira analogia, tirada da acústica:<sup>32</sup>

“Suponhamos um conjunto de diapasões, arranjados na ordem crescente de suas frequências naturais, submetido a um ruído aleatório. Cada diapasão vibrará naquela frequência do ruído que coincidir com sua frequência natural. A energia absorvida por um certo diapasão é uma medida de sua contribuição para a energia ou potência total. Se os valores destas energias individuais forem levados a um gráfico de coordenadas “energia x frequência natural”, obter-se-á a distribuição da energia entre as frequências naturais dos diapasões. A única diferença entre esta ilustração e o conceito de espectro de potência está no fato de que os diapasões têm frequências discretas, enquanto que o espectro de potência é uma função contínua sobre um intervalo contínuo de frequências”.

e) Podemos chegar ao conceito de espectro de potência de um outro modo, através de um dos processos usados na prática para sua determinação:

As flutuações do vento são transformadas em um sinal elétrico por um anemômetro de fio aquecido e passadas em um filtro passa-faixa estreito, de largura de faixa  $\Delta f$ , de frequência central  $f_0$ , a qual pode variar ao longo do intervalo de frequências que interessa. A densidade espectral de potência da componente  $v_i$  do vetor rajada é determinada com as seguintes operações:

1ª – Filtragem do sinal, passando-o em um filtro de faixa estreita, de largura de faixa  $\Delta f$ , em torno de uma frequência central  $f_0$ :  $v_i(t, f_0, \Delta f)$ .

2ª – Os valores instantâneos do sinal filtrado são elevados ao quadrado:  $v_i^2(t, f_0, \Delta f)$ .

3ª – É calculada a média dos valores quadrados em um intervalo de tempo  $T$ :  $\langle v_i^2(t, f_0, \Delta f) \rangle$ .

4ª – O valor quadrado médio é dividido pela largura de faixa  $\Delta f$ :

$$S_i(f_0) = (1/\Delta f) \langle v_i^2(t, f_0, \Delta f) \rangle$$

5ª – Variando-se a frequência central  $f_0$  determinam-se os valores da densidade espectral para diversas frequências.

A partir destas operações podemos definir:

**Valor quadrado médio** (variância) de  $v_i(t)$  na faixa de frequência de largura  $\Delta f$ , com frequência central  $f_0$ , por

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T v_i^2(t, f_0, \Delta f) dt \quad (6.9)$$

**Densidade espectral de potência** para a frequência central  $f_0$  por

$$S_i(f_0) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \left[ \frac{1}{\Delta f} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T v_i^2(t, f_0, \Delta f) dt \right] \quad (6.10)$$

Como  $f_0$  pode assumir qualquer valor no intervalo de freqüências presentes nas flutuações do vento, podemos substituir  $S_i(f_0)$  por  $S_i(f)$ .

### 6.3. ESPECTRO DE POTÊNCIA – CONCEITUAÇÃO MATEMÁTICA

a) A seguir veremos o conceito de densidade espectral de potência de um ponto de vista diferente, sem nos determos, entretanto, em demonstrações matemáticas. Para tanto podem ser consultados, por exemplo, Papoulis<sup>33</sup> e Bendat e Piersol.<sup>34</sup>

Definiremos como **densidade espectral completa**  $\tilde{S}_i(f)$  de uma componente  $v_i$  do vetor rajada à transformada de Fourier de sua autocorrelação:

$$\tilde{S}_i(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_i(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (6.11)$$

A função  $\tilde{S}_i(f)$  é uma função real, par, não negativa.

Pela fórmula de inversão de Fourier,  $R_i(\tau)$  pode ser expressa em termos de  $\tilde{S}_i(f)$  :

$$R_i(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{S}_i(f) e^{i2\pi ft} df \quad (6.12)$$

O par de Fourier (6.11) e (6.12) é conhecido como 'teorema de Wiener-Khintchine.'

Para  $\tau = 0$ , a (6.12) fica

$$R_i(0) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{S}_i(f) df \quad (6.13)$$

Relembremos a (6.8), que corresponde a uma densidade espectral fisicamente realizável ( $f \geq 0$ ):

$$\sigma_i^2 = R_i(0) = \int_0^{\infty} S_i(f) df \quad (6.8)$$

Sendo  $S_i(f)$  uma função par, e comparando (6.8) com (6.13), chegamos a conclusão de que (Ver também Fig.6.2):

$$s_i^2 = R_i(0) = \int_0^{\infty} S_i(f) df = 2 \int_0^{\infty} \tilde{S}_i(f) df \quad (6.14)$$

Considerando a integral como o limite do caso discreto – ver, respectivamente, (6.8) e (6.6):

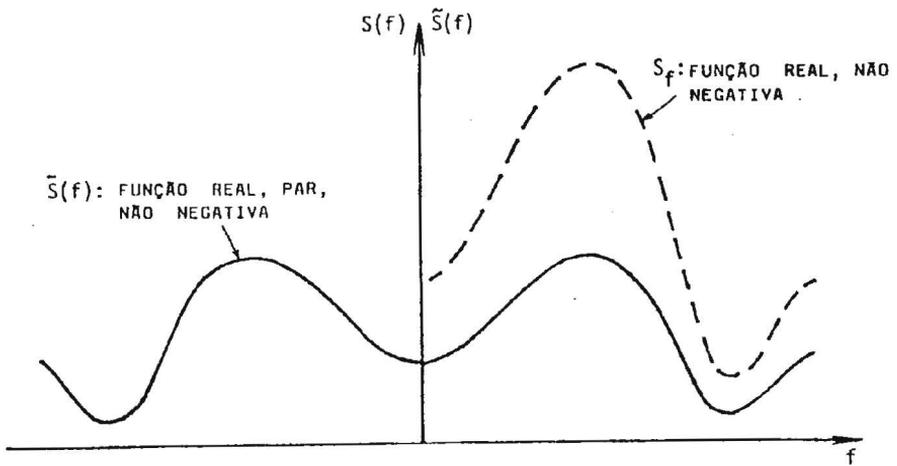


Fig. 6.2 – Densidades espectrais da variância (espectros de potência)

$$S_i(f) = 2 \tilde{S}_i(f) \quad (6.15)$$

Sendo  $\tilde{S}_i(f)$  e  $R_i(\tau)$  pares, as expressões (6.11) e (6.12) ficam :

$$\tilde{S}_i(f) = 2 \int_0^{\infty} R_i(t) e^{-i2\pi ft} dt = 2 \int_0^{\infty} R_i(t) \cos(2\pi ft) dt \quad (6.16)$$

$$R_i(t) = 2 \int_0^{\infty} \tilde{S}_i(f) e^{i2\pi ft} df = 2 \int_0^{\infty} \tilde{S}_i(f) \cos(2\pi ft) df \quad (6.17)$$

e, pela (6.15):

$$S_i(f) = 4 \int_0^{\infty} R_i(\tau) \cos(2\pi f\tau) d\tau \quad (6.18)$$

$$R_i(\tau) = \int_0^{\infty} S_i(f) \cos(2\pi f\tau) df \quad (6.19)$$

b) A densidade espectral da velocidade do vento,  $S_i(f)$ , tem por unidade  $(\text{veloc.})^2 / \text{Hz}$ . Multiplicando pela frequência,  $f S_i(f)$  será dado em  $(\text{velocidade})^2$ , ou, mais precisamente, com as unidades que adotamos, em  $(\text{m/s})^2$ . Inicialmente este valor era normalizado dividindo-o pelo quadrado da velocidade média na altura de observação:

$$f S_i(z; f) / \bar{V}^2(z) \quad (6.20)$$

Posteriormente passou a ser mais usada a variância como elemento de normalização:

$$f S_i(z; f) / \sigma_i^2(z) \quad (6.21)$$

Para abscissa toma-se a freqüência  $f$ , o número de ondas  $f / \bar{V}(z)$  – ciclos por metro – ou o seu inverso, o comprimento de onda  $\bar{V}(z) / f$  – metros por ciclo. Estas unidades foram sugeridas por Davenport, que admitia ser a forma espacial da turbulência invariante com a velocidade do vento e dependente apenas da altura: “o efeito de uma velocidade do vento maior será de aumentar a intensidade das flutuações e ‘varrer’ a forma espacial sobre um ponto do terreno mais rapidamente, mas sem realmente alterar a forma (Este conceito está implícito na hipótese original de Taylor da equivalência dos espectros de tempo e espaço)”. (Ref. 5, p.199).

Entretanto, conforme constatou o próprio Davenport, os resultados obtidos foram demasiadamente esparsos para confirmar se é melhor tomar para abscissas a freqüência ou  $f / \bar{V}(z)$ .

Pode-se tornar a freqüência adimensional multiplicando o número de ondas por um comprimento. São usados:

- altura em que é feita a medida do espectro,  $z$  ;
- altura da camada limite,  $z_g$  ;
- uma dimensão característica do modelo,  $D$  .

Isto é, respectivamente, as abscissas adimensionais

$$f z / \bar{V}(z) , f z_g / \bar{V}(z) \text{ e } f D / \bar{V}(z) .$$

Diversos trabalhos apresentam  $f z / \bar{V}(z)$ , tais como os de Wardlaw,<sup>35</sup> Standen, Dalgliesh e Templin,<sup>36</sup> Fichtl, Kaufman e Vaughan,<sup>37</sup> Singer, Busch e Frizzola [38].

c) Lembremos a (6.8):

$$\sigma_i^2 = \int_0^{\infty} S_i(f) df$$

que pode ser escrita

$$\sigma_i^2 = \int_0^{\infty} f S_i(f) d(\ln f) \tag{6.22}$$

pois  $d(\ln f) = df / f$  .

Se a função  $f S_i(f)$  for plotada versus o logaritmo da freqüência, conforme a (6.22) a área sob a curva entre duas freqüências será proporcional à energia total, isto é, à variância. Isto é interessante tanto para cálculos planimétricos como para estudos comparativos da energia contida em diversos espectros ou zonas de espectros por uma estimativa visual.

Mesmo tomando para ordenada  $f S_i(f) / \sigma_i^2$ , ainda teremos as áreas proporcionais à energia nos respectivos intervalos de freqüência, embora não se possa mais comparar a energia de espectros com variâncias diferentes diretamente pela área.

Se substituirmos, nas abscissas,  $\log f$  por  $\log[f / \bar{V}(z)]$  ou por  $\log[f z / \bar{V}(z)]$ , ainda teremos a área proporcional à energia do respectivo intervalo. Naturalmente, a cota  $z$  deve ser a mesma em todos os espectros. Como caso particular,  $z = z_g$  .

## 6.4. ESPECTRO DA COMPONENTE LONGITUDINAL DA TURBULÊNCIA NA MACROMETEOROLOGIA

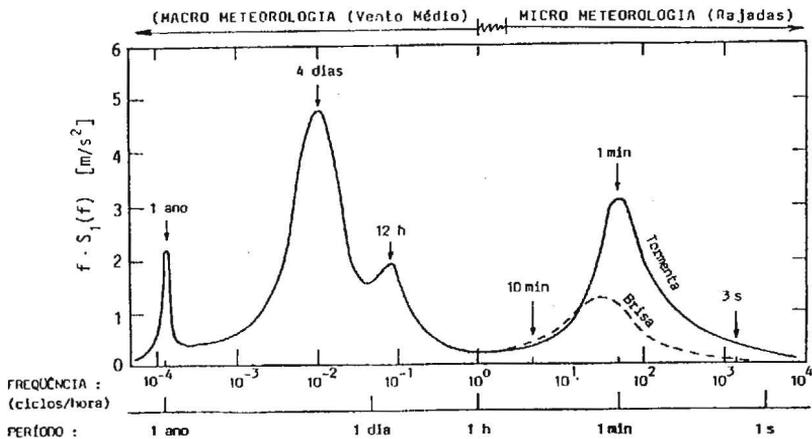


Fig. 6.3 – Idealização do espectro da velocidade longitudinal do vento a 100m de altura (Van der Hoven)

a) A fig. 6.3 reproduz o já clássico espectro da componente longitudinal da velocidade do vento, determinado por van der Hoven a 100m de altura, em Brookhaven, Long Island, USA. Esta figura inclui flutuações que vão de um ciclo por ano a um ciclo por segundo. No que diz respeito a aplicações na construção civil, esse espectro pode ser dividido em duas partes bem distintas:

- Flutuações com períodos superiores a uma hora. Por sua lentidão causam alterações na velocidade média do vento, como esta é definida para aplicações à construção civil. É uma região que pertence à **macrometeorologia** (ou mesometeorologia, segundo alguns autores). Nela distinguem-se dois picos: um pico anual e um pico centrado em, aproximadamente, quatro dias. Este último corresponde ao movimento dos grandes sistemas de pressão. Além disso, há um pico atenuado, que corresponde às variações diárias, ou, em certos casos, a variações semidiárias.

- Flutuações com períodos inferiores a uma hora, com um pico em um período de, aproximadamente, um minuto. Esta é a região da **micrometeorologia**, na qual aparecem as **rajadas** do vento. As flutuações mais importantes situam-se entre dez minutos e um segundo, aproximadamente. A altura desse pico depende da velocidade do vento, pois a energia cinética contida na turbulência é aproximadamente proporcional ao quadrado da velocidade média

do vento. Portanto, em ventos de alta velocidade esse pico será mais alto que em ventos de baixa velocidade (por exemplo, em uma brisa, com o espectro em linha tracejada na fig. 6.3).

Entre estas duas regiões estende-se uma região de pouca energia, centrada em cerca de meia hora; o que permite uma distinção bem nítida entre velocidade média e rajadas. Para a estrutura, uma distinção entre ação estática e ação dinâmica, respectivamente.

b) Estamos considerando ventos "bem comportados", comentados em 2.1 (ciclones tropicais e extratropicais). Não se aplica a tormentas de outros tipos, como tormentas elétricas e tornados.

A região intermediária de pouca energia justifica plenamente a adoção de um intervalo de tempo entre dez minutos e uma hora para a determinação da velocidade média usada na construção civil, pois conduz a valores médios muito estáveis. Davenport estudou exaustivamente este problema, concluindo que o intervalo de tempo usual (entre uma hora e dez minutos) é suficientemente longo para minimizar não-estacionariedades dentro do intervalo, definindo uma velocidade média e outras variáveis, tais como a resposta de estruturas; associada à velocidade média ter-se-á uma ação estática, e associada às rajadas uma ação dinâmica.

c) A norma brasileira usa, para fins dinâmicos, uma velocidade média do vento calculada sobre um intervalo de tempo de dez minutos. Entretanto, para efeitos estáticos, a velocidade de referência (velocidade básica,  $V_0$ ) corresponde a rajadas de três segundos. Isto porque esta norma baseou-se em registros de rajadas de três segundos e de médias determinadas para trinta segundos. Extrapolar para dez minutos seria afastar-se demasiadamente dos intervalos de tempo usados na determinação das ações estáticas. Este intervalo raramente ultrapassa 15 segundos.

## **6.5. ESPECTRO DA COMPONENTE LONGITUDINAL DA TURBULÊNCIA NA MICROMETEOROLOGIA.**

### **6.5.1. Espectro de Davenport**

a) É nesta zona do espectro que se concentra o interesse do engenheiro de estruturas. Há um grande número de expressões matemáticas, com distintos graus de refinamento. Não há uma curva que represente a totalidade dos casos; em um gráfico 'frequência x energia' os pontos experimentais mais sugerem uma faixa ou mesmo uma nuvem imprecisa do que uma curva. Apresentaremos apenas quatro expressões.

Baseado em um grande número de medidas feitas em terrenos de diversas rugosidades, e em alturas que variaram entre 8m e 151m, Da-

venport<sup>2, 5, 39</sup> sugeriu a seguinte expressão para o espectro de energia da componente longitudinal da turbulência, em ventos fortes:

$$f S_1(f) / [c_{as} \bar{V}^2(10)] = 4 X_1^2 / (1 + X_1^2)^{4/3} \quad (6.23)$$

sendo:

$S_1(f)$  - densidade espectral da componente longitudinal da turbulência na frequência  $f$  (e em uma cota  $z$ , geralmente não incluída no símbolo);

$f$  - frequência em Hertz;

$c_{as}$  - coeficiente de arrasto superficial referido à velocidade média a 10m de altura (item 3.2.3);

$\bar{V}(10)$  - velocidade média horária a 10m de altura, em m/s;

$X_1$  - frequência adimensional:  $X_1 = f L / \bar{V}(10)$  (6.24)

Segundo Davenport, o melhor ajuste entre pontos experimentais e curva correspondente à expressão (6.23) é obtido com  $L = 1200m$ .

A expressão (6.23) é também indicada pela norma norte americana ANSI A58.1 e canadense (National Building Code of Canada).

Por integração da (6.23) obtém-se a variância :

$$\sigma_1^2 = \int_0^{\infty} S_1(f) df = 6,0 c_{as} \bar{V}^2(10) \quad (6.25)$$

o que permite escrever :

$$f S_1(f) / \sigma_1^2 = 2 X_1^2 / [3 (1 + X_1^2)^{4/3}] \quad (6.26)$$

O pico neste espectro aparece em  $X_1 = \sqrt{3}$  (Ref. 39, p. 37).

b) O espectro de Davenport não representa bem os valores obtidos em baixas frequências (de pouco interesse para a engenharia estrutural) e, além disso, não considera a influência da cota  $z$ . Por outro lado, é uma expressão fácil de integrar e tem sido muito usada, pois, como justifica Davenport<sup>7</sup>, “esta expressão está em boa concordância com os dados em uma variedade de terrenos nas frequências de interesse para aplicações na engenharia estrutural (3Hz a 0,1Hz, normalmente), e que se situam na parte à direita do espectro”.

O próprio Davenport<sup>39</sup> sugere que se considere a influência da cota, tomando para  $X_1$  :

$$X_1(z) = f L_{11}(z) / \bar{V}(z) \quad (6.27)$$

sendo:

$\bar{V}(z)$  - velocidade média horária na cota  $z$ ;

$$L_{11}(z) = 200 \sqrt{3} z^{0,25} \text{ metros} \quad (6.28)$$

$L_{11}(z)$  é obtido a partir do comprimento de onda no pico do espectro, o qual, segundo Berman (Ref. 32 de Davenport), é dado por :

$$\lambda_{\text{pico}} = [\bar{V}(z) / f]_{\text{pico}} = 200 z^{0,25} \text{ metros}$$

A curva correspondente à expressão (6.26), juntamente com outras que veremos a seguir, aparece na fig. 6.4.

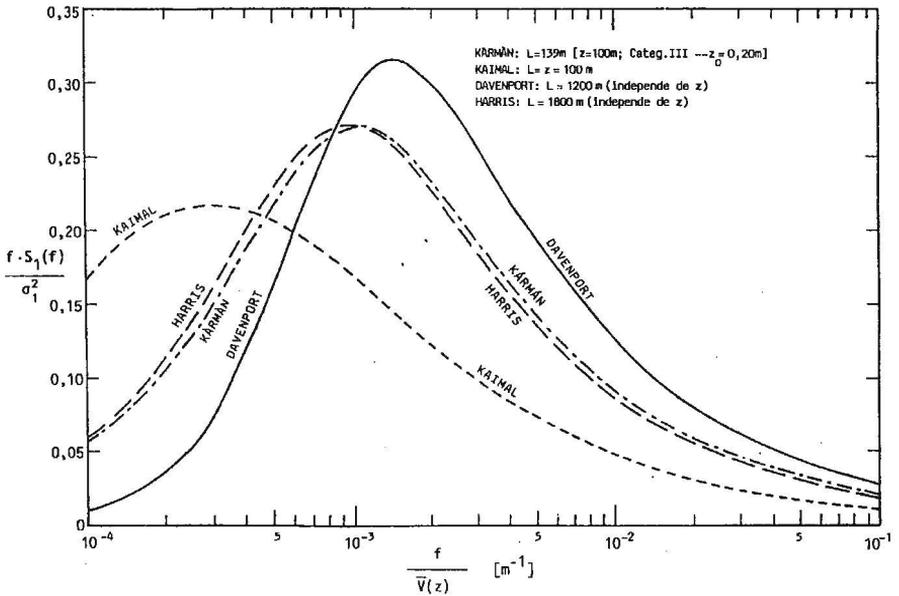


Fig. 6.4 – Espectros de Davenport, Harris, Kármán e Kaimal

### 6.5.2. Espectro de Harris

a) Harris<sup>4, 40</sup> sugere:

$$f S_1(f) / [c_{as} \bar{V}^2(10)] = 4 X_1 / (2 + X_1^2)^{5/6} \quad (6.29)$$

Por integração :

$$\sigma_1^2 = S_1(f) df = 6,66 c_{as} \bar{V}^2(10) \quad (6.30)$$

Substituindo na anterior :

$$f S_1(f) / \sigma_1^2 = 0,6 X_1 / (2 + X_1^2)^{5/6} \quad (6.31)$$

Como para a expressão de Davenport, também para a de Harris o espectro de potência da componente longitudinal das rajadas, em ventos fortes, independe da altura sobre o terreno, dentro do âmbito de validade da mesma. Harris baseou-se em medidas feitas entre 18m e 180m.<sup>40</sup> Neste âmbito o espectro parece ser universal e função apenas da rugosidade do terreno (parâmetro  $c_{as}$ ) e do quadrado da velocidade média do vento na altura de referência.

b) Medidas posteriores indicaram que uma melhor concordância com resultados experimentais é obtida fazendo  $L = 1800m$  na (6.24).<sup>4, 40</sup>

### 6.5.3. Espectro de von Kármán

a) Templin<sup>41</sup> apresenta a expressão de von Kármán na seguinte forma :

$$f S_1(f) / \sigma_1^2 = 4 L^* N / [1 + 70,78 (L^* N)^{2,5/6}] \quad (6.32)$$

sendo:

$$N = f z_g / \bar{V}(z) \quad (6.33)$$

$$L^* = L_{11} / z_g$$

Templin,<sup>41</sup> bem como Klebanoff e Diehl,<sup>42</sup> adotam  $L^* = 0,4$ , independentemente da altura  $z$  em que é medido  $\bar{V}(z)$ . Estes últimos autores justificam esta simplificação dizendo que "a escala da turbulência longitudinal,  $L_{11}$ , em uma camada limite plenamente desenvolvida, é proporcional à sua altura  $z_g$ , com um valor de  $L^*$  de aproximadamente, 0,4 ,e, exceto próximo à superfície, é constante através da camada limite".

Substituindo  $L^*$  por 0,4, a (6.32) fica:

$$f S_1(f) / \sigma_1^2 = 1,6 N / (1 + 11,325 N^{2,5/6}) \quad (6.34)$$

Esta curva foi traçada na Fig. 6.4, juntamente com as já citadas curvas de Davenport e de Harris, em gráfico semilogarítmico, tomando para abscissa  $\log f / \bar{V}(z)$  e para ordenada  $f S_1(f) / \sigma_1^2$ . Observe-se a pequena diferença entre as curvas de Harris e de von Kármán.

b) O termo  $L^* N$  da (6.32) pode ser escrito:

$$L^* N = [L_{11} / z_g] [f z_g / \bar{V}(z)] \quad (6.35)$$

e, considerando  $L_{11}$  variável com  $z$ , teremos a mesma expressão (6.27):

$$X_1 = f L_{11}(z) / \bar{V}(z) \quad (6.27)$$

Considerando a (6.27) e (6.35), a (6.32) fica:

$$f S_1(f) / \sigma_1^2 = 4 X_1 / (1 + 70,78 X_1^{2,5/6}) \quad (6.36)$$

Esta última expressão é recomendada por Teunissen<sup>43</sup> e aparece no manual ESDU (Ref. 11, p. 262), o qual "adverte que estes dados não são confiáveis para  $X_1 < 0,1$ , mas em ventos fortes esta região está bem abaixo das frequências modais das construções". Para  $L_{11}(z)$  o manual ESDU indica a expressão (5.34), do item 5.2.5.d. Ou, admitindo  $z = 0$ , ter-se-á a expressão (5.35), usada para compor a Fig.5.9.

c) Irwin<sup>14</sup> comenta que outras expressões empíricas aparecem na literatura, mas elas não levam a uma melhor representação analítica dos dados obtidos ao vento natural que a expressão de von Kármán. Esta expressão tem a vantagem de também ter o comportamento assintótico corre-

to tanto em pequenos como em grandes valores de  $X_1$ . Para grandes valores de  $X_1$ ,  $S_1(f)$  torna-se proporcional a  $X_1^{-5/3}$  como indica a teoria de Kolmogorov para a zona inercial. Para pequenos valores de  $X_1$ ,  $S_1(f)$  torna-se proporcional a  $L_{11}(z) / \bar{V}$ , como é indicado pela teoria da turbulência.

#### 6.5.4. Espectro de Kaimal e outros

a) Estes autores sugerem (Ref. 2.66 de Simiu e Scanlan):<sup>44</sup>

$$f S_1(f) / u_*^2 = 200 Y_1 / (1 + 50 Y_1)^{5/3} \quad (6.37)$$

Esta expressão, por integração, leva a :

$$\sigma_1^2 = 6 u_*^2 \quad (6.38)$$

sendo que a velocidade de fricção,  $u_*$ , é dada pela (3.8) e faz parte da lei logarítmica de velocidades médias (3.22).

Substituindo a (6.38) na (6.37):

$$f S_1(f) / \sigma_1^2 = [100/3] [Y_1 / (1 + 50 Y_1)^{5/3}] \quad (6.39)$$

sendo  $Y_1 = f(z - z_d) / \bar{V}(z)$

ou, com a simplificação que temos adotado ( $z_d = 0$ ):

$$Y_1 = f z / \bar{V}(z) \quad (6.40)$$

Esta simplificação é admitida por Davenport,<sup>45</sup> Simiu e Scanlan<sup>44</sup> e Reed,<sup>46</sup> entre outros. Esta expressão é conhecida pelos nomes de coordenada de Monin, coordenada de semelhança ou frequência adimensional.

#### 6.5.5. Resumo

a) As quatro expressões estudadas nos itens anteriores podem ser substituídas por uma única:

$$f S_1(f) / \sigma_1^2 = A X_1^m / (B + C X_1^k)^n \quad (6.41)$$

sendo  $X_1 = f L / \bar{V}(z)$

Os valores dos parâmetros numéricos estão dados na tabela 6.1. Quando for o caso, o valor de  $L$  corresponde à Categoria III de terreno da NBR-6123/88, a 100m de altura. A grande diferença entre os valores de  $L$

mostra que não é possível, ao comparar resultados, incluir L na abscissa dos espectros a serem comparados.

Tabela 6.1 – Espectros a 100m de altura – Diversos autores

Autor	Parâmetros numéricos						L para z=100 m	Nota s
	A	B	C	m	n	k	(m)	
Davenport	2/3	1	1	2	4/3	2	1200	(1)
Harris	0,6	2	1	1	5/6	2	1800	(1)
Kármán	4	1	70,78	1	5/6	2	139	(2)
Kaimal	100/3	1	50	1	5/3	1	100	(3)

(1): independe de z  
(2):  $L = L_{11}(z) = 25 z^{0,35} z_0^{-0,063}$  ;  $z_0 = 0,20\text{m}$  (Categoria III)  
(3):  $L = z$

### 6.5.6. Curvas dos espectros

a) Para os quatro espectros aqui estudados, a fig. 6.4 apresenta as respectivas curvas, nas coordenadas  $f / \bar{V}(z) \times f S_1(f) / \sigma_1^2$ . Lembramos que, sendo as ordenadas dos espectros multiplicadas pela freqüência f, haverá uma forte e crescente alteração nas ordenadas à medida que f cresce. Por exemplo, para  $f = 1000\text{Hz}$  teremos uma ampliação de mil vezes na ordenada do espectro,  $S_1(f)$ .

b) Para a engenharia estrutural é de interesse conhecer as freqüências, para determinar as que se situam no âmbito das freqüências naturais das estruturas. Por isso, em vez de  $X_1$  é mais interessante tomar para abscissa  $f / \bar{V}(z)$ , ou diretamente a freqüência f. A adoção de  $f / \bar{V}(z)$  torna o gráfico independente de  $\bar{V}(z)$  e, portanto, de uso mais amplo. Em cada aplicação prática, torna-se fácil determinar a freqüência multiplicando essa abscissa pela velocidade  $\bar{V}(z)$  do caso em estudo.

Na Fig. 6.5 estamos apresentando a curva do espectro de Davenport ( $L = 1200\text{m}$ ) em várias coordenadas, em gráficos lineares, monologarítmicos e bilogarítmicos.

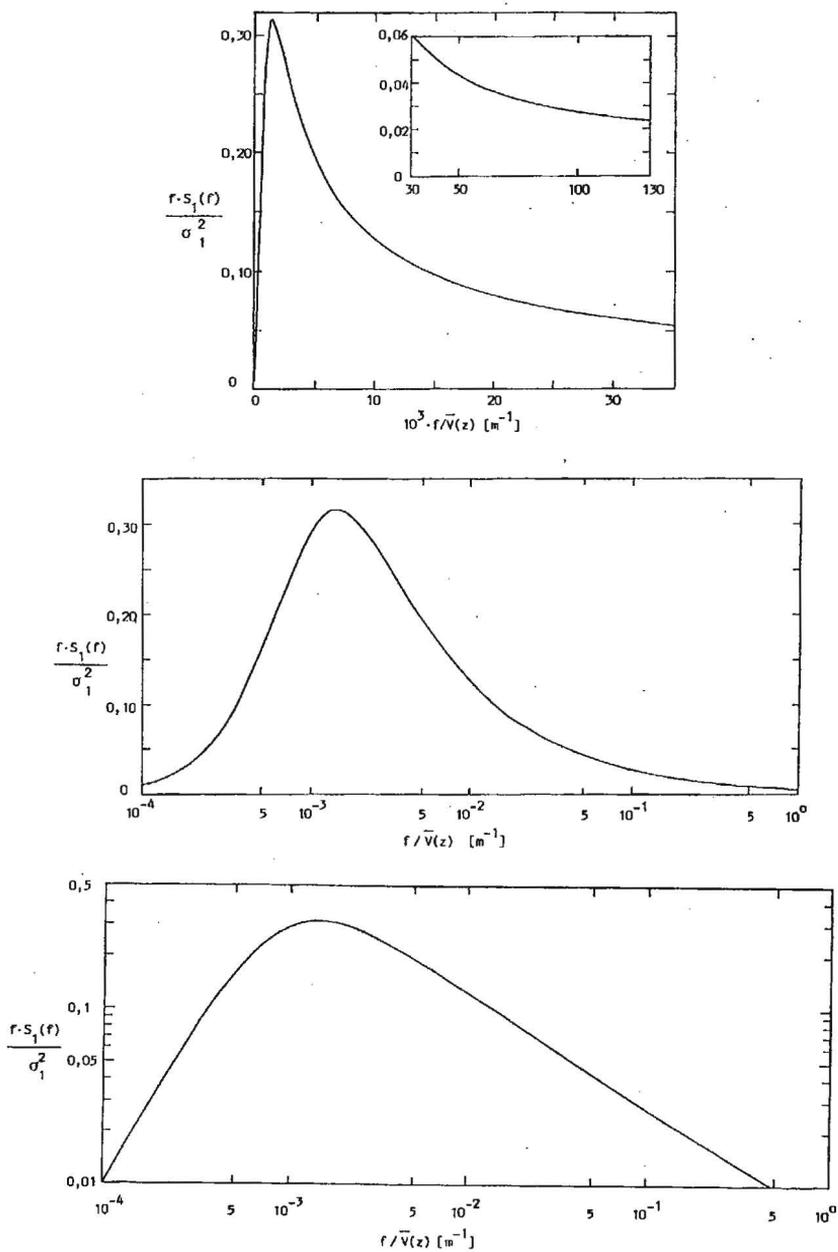


Fig. 6.5.a – Espectro de Davenport em gráficos linear, monologarítmico e bilogarítmico. Coordenadas  $f / \bar{V}(z) \times f \cdot S_1(f) / \sigma_1^2$

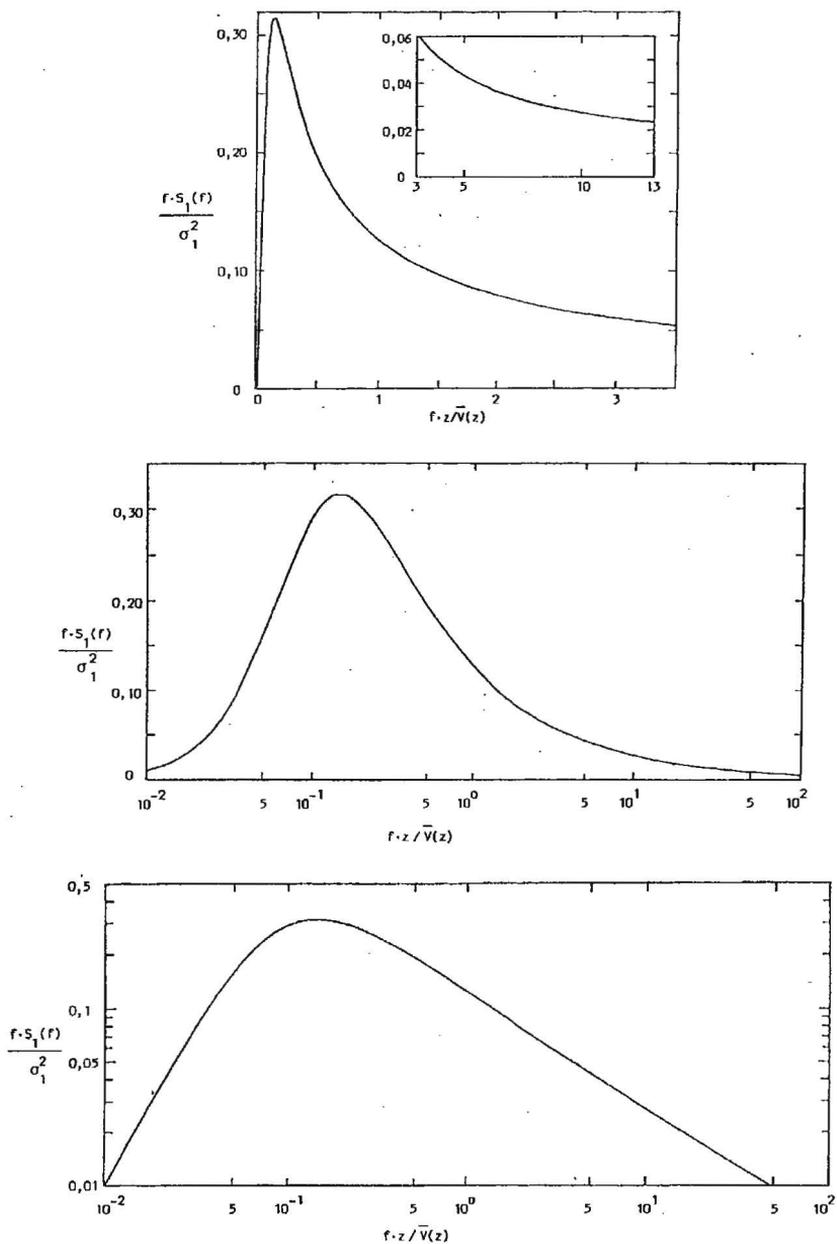


Fig. 6.5.b – Espectro de Davenport em gráficos linear, monologarítmico e bilogarítmico. Coordenadas  $f \cdot z / \bar{V}(z)$  x  $f \cdot S_1(f) / \sigma_1^2$  ( $z=100\text{m}$ )

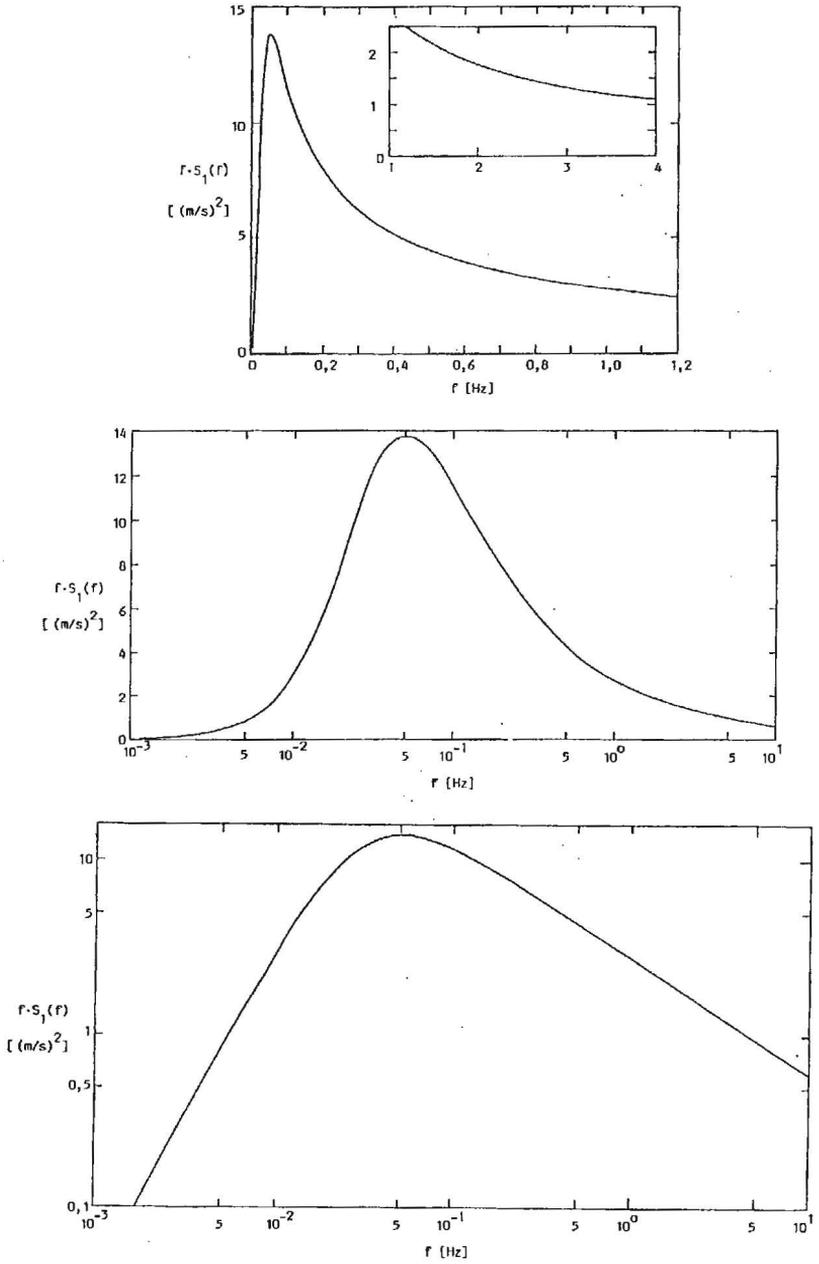


Fig. 6.5.c – Espectro de Davenport em gráficos linear, monologarítmico e bilogarítmico. Coordenadas  $f \times f \cdot S_1(f)$

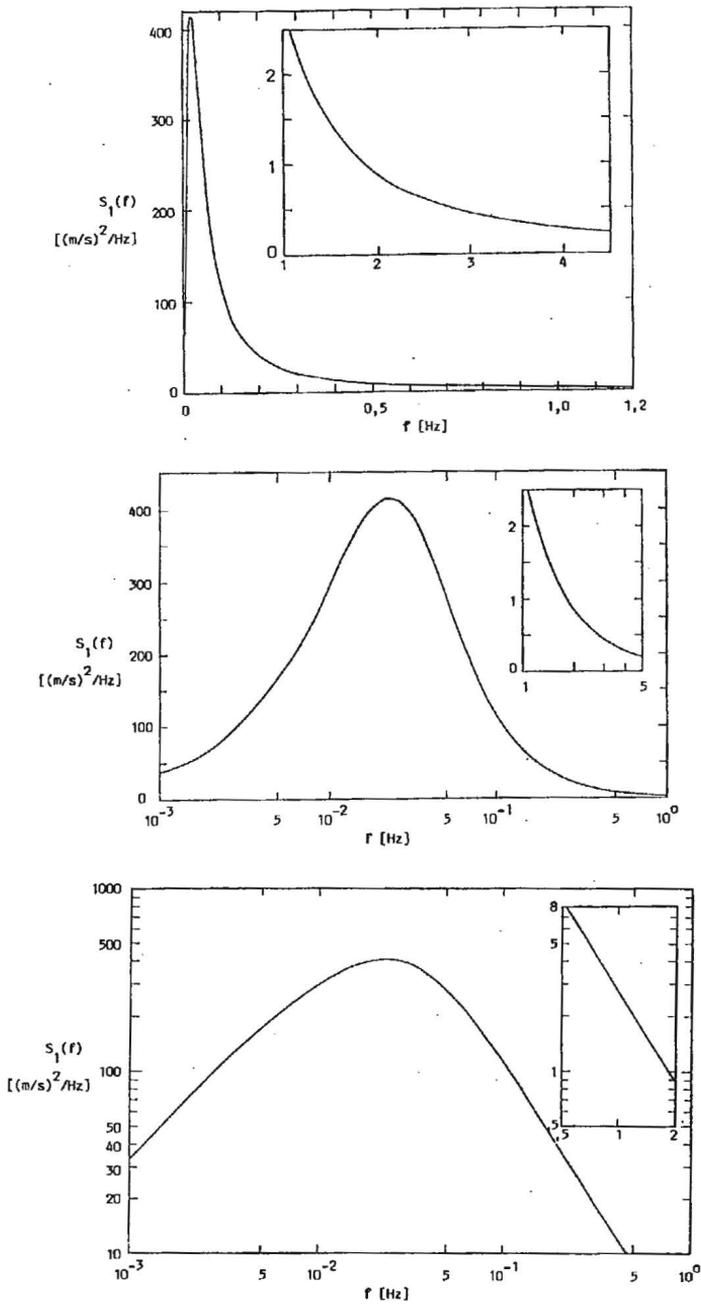


Fig. 6.5.d – Espectro de Davenport em gráficos linear, monologarítmico e biloga-rítmico. Coordenadas  $f \times S_1(f)$

## 6.6. ESPECTROS DAS COMPONENTES LATERAL E VERTICAL DA TURBULÊNCIA NA MICROMETEOROLOGIA

Estes espectros não têm sido tão estudados como o da componente longitudinal, da qual apresentamos anteriormente quatro expressões, sem pretensão de esgotar o assunto. Indicaremos, a seguir, as expressões dos espectros das componentes lateral e vertical sugeridos por von Kármán, Kaimal e manual ESDU.

### 6.6.1. Espectros de Kármán<sup>47</sup>

a) Espectro da componente lateral da turbulência:

$$f S_2(f) / \sigma_2^2 = 4 X_2 [1 + 188,4 (2 X_2)^2] / [1 + 70,78 (2 X_2)^2]^{11/6} \quad (6.43)$$

com  $X_2 = f L_{21}(z) / \bar{V}(z)$

b) Espectro da componente vertical da turbulência:

$$f S_3(f) / \sigma_3^2 = 4 X_3 [1 + 188,4(2X_3)^2] / [1 + 70,78 (2X_3)^2]^{11/6} \quad (6.44)$$

com  $X_3 = f L_{31}(z) / \bar{V}(z)$

$L_{21}(z)$  e  $L_{31}(z)$  são as escalas longitudinais ( $j = 1$ ) das componentes lateral ( $i = 2$ ) e vertical ( $i = 3$ ) da turbulência, respectivamente (Ver item 5.2.3).

Teunissen<sup>47</sup> encontrou, em zona rural,  $L_{21}(z) = 11\text{m}$  e  $L_{31}(z) = 4,9\text{m}$ , sendo que  $L_{11}(z) = 62\text{m}$ .

### 6.6.2. Espectros de Kaimal<sup>48</sup>

a) Espectro da componente lateral da turbulência:

$$f S_2(f) / \sigma_2^2 = 0,164 Y_2 / [1 + 0,164 Y_2^{5/3}] \quad (6.45)$$

com  $Y_2 = Y_1 / 0,0265 = 37,7 Y_1$

b) Espectro da componente vertical da turbulência:

$$f S_3(f) / \sigma_3^2 = 0,164 Y_3 / [1 + 0,164 Y_3^{5/3}] \quad (6.46)$$

com  $Y_3 = Y_1 / 0,0962 = 10,4 Y_1$

### 6.6.3. Espectros de ESDU<sup>11</sup>

São os espectros de Kármán, com o adendo de expressões para determinar as escalas da turbulência  $L_{21}(z)$  e  $L_{31}(z)$ .

Espectro da componente lateral da turbulência:

$$f S_2(f) / \sigma_2^2 = 4 X_2 (1 + 755 X_2^2) (1 + 283 X_2^2)^{-11/6} \quad (6.47)$$

com  $X_2 = f L_{21}(z) / \bar{V}(z)$

$$e L_{21}(z) = 5,1 (z - z_d)^{0,48} z_0^{-0,086} \cong 5,1 z^{0,48} z_0^{-0,086}$$

b) Espectro da componente vertical da turbulência:

$$f S_3(f) / \sigma_3^2 = 4 X_3 (1 + 755 X_3^2) (1 + 283 X_3^2)^{-11/6} \quad (6.48)$$

com  $X_3 = f L_{31}(z) / \bar{V}(z)$

$$e L_{31}(z) = 0,35(z - z_d) \cong 0,35 z .$$

c) Estas expressões aplicam-se para  $(z - z_d) \cong z < 500\text{m}$ , com incerteza de cerca de  $\pm 30\%$ . Como já tinha sido observado para  $S_1(f)$ , os resultados não são confiáveis quando  $X_2$  e  $X_3$  forem menores que 0,1.

### REFERÊNCIAS

1. KÁRMÁN, T. von - "Aerodynamic". Genebra, Interavia, 1956.
2. DAVENPORT, A.G. - "The relationship of wind structure to wind loading". Proc. 1st Conference on Wind Effects on Buildings and Structures". National Physical Laboratory, Teddington, England, 1965 [Symposium nº 16, 26-28/06/1963].
3. COUNIHAN, J. - "The structure and the wind tunnel simulation of rural and urban adiabatic boundary layers". Symposium on External Flows, University of Bristol, 4-6/07/1972. Proc., p. E.1-E.15.
4. HARRIS, R.I. - "The nature of the wind". In: The Modern Design of Wind Sensitive Structures, London, Construction Industry Research and Information Association, 1970, Paper 3, p.29-55.
5. DAVENPORT, A.G. - "The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds". Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, London, v. 87, n.372, p.194-211, April 1961.
6. ISO - "Draft International Standard ISO/DIS 4354 - Wind action on structures", 1990.

7. DAVENPORT, A.G. - "The structure of wind and climate". In: The application of wind engineering principles to the design of structures – Course by A.G.Davenport, B.J.Vickery e J.A. Hertig, Lausanne, Suíça, Fev. 1987, v.1, Cap.4, 54 pp.
8. SFINTESCO, D. e WYATT, T.A. - "A proposed European code of practice: current work of the ECCS towards specification of the effect of wind on structures". Proc. 4th International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, Heathrow, England, 1975, p.643-54
9. BRITISH STANDARD INSTITUTION, Londres, 1972 - "Code of basic data for the design of buildings. Chapter 5, Loading. Part 2, Wind loads.
10. CHOI, E.C.C. - "Characteristics of the typhoons over the south China sea". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v.3, n.4, 1978, p.353-65.
11. COOK, N.J. - "The designer's guide to wind loading of building structures. Part 1". Butterworths, Londres, 1985.
12. REICHMAN, K.H. - "Beurteilung der Sicherheit und Zuverlässigkeit turmartiger Bauwerke unter Windeinwirkung". Beiträge zur Anwendung der Aeroelastik im Bauwesen. Heft 19, 1984.
13. TEUNISSEN, H.W. - "Simulation of the planetary boundary layer in a multiple-jet wind tunnel". Institute for Aerospace Studies. University of Toronto. UTIAS Report n. 182, June, 1972,
14. IRWIN, H.P.A.H. - "Wind tunnel and analytical investigations of the response of Lion's Gate Bridge to a turbulent wind". National Research Council, Ottawa, Canada, Laboratory Technical Report LTR-LA-210, June 1977.
15. DAVENPORT, A.G. - "The interaction of wind and structures". In: Engineering Meteorology, E.J. Plate, Elsevier, 1982 [Chapter 12].
16. MACKEY, S. - "Études de la turbulence atmosphérique en rapport avec le calcul dynamique des bâtiments". Construction Métallique, Paris, v.7, n.1, p.25-34, Jan. 1971.
17. DUCHÈNE-MARULLAZ, P. - "Full-scale measurements of atmospheric turbulence". Proc. 4th International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, Heathrow, England, 1975, p.23-31.
18. MACKEY, S. e KO, K.L. - "Spatial configuration of gusts". Proc. 4th International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, Heathrow, England, 1975, p. 41-52.
19. COMTE-BELLOT, G. e CORRSIN, S. - "Simple Eulerian time correlation of full- and narrow-band velocity signals in grid-generated, "isotropic turbulence". Journal of Fluid Mechanics, London, v.48, Part 2, p.273-337, 1971.
20. WHITBREAD, R.E. - "On the introduction of turbulence into wind-tunnel investigations for the determination of wind induced amplitudes

- of oscillation". Proc. Symposium on Wind Effects on Buildings and Structures. Loughborough, Loughborough University of Technology, 1968, v.2, Paper 32.
21. SHIOTANI, M. e IWATANI, Y. - "Gust structures over flat terrains and their modification by a barrier". Proc. 5th International Conference on Wind Engineering, Fort Collins, Colorado, USA, 1979. Preprints, Paper II-10, 12 pp.
  22. ROULLE, C. - "Simulation de la couche limite atmospherique an 1/150e". Centre Scientifique et Technnique du Bâtiment. Établissement de Nantes, França. Relatório EN. ADYM 80-10-L, 1980, 25 pp.
  23. STATHOPOULOS, T. - "Design and fabrication of a wind tunnel for building aerodynamics". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v.16, n.2-3, 1984, p.361-76.
  24. COOK, N.J. - "On simulating the atmospheric boundary layer in wind tunnels". Building Research Establishment Current Paper CP 71/78, 1978, 24 pp.
  25. ESDU - "Wind Engineering Data Sheet 74031", ESDU International Ltd., London, 1974.
  26. HARRIS, R.I. - "Longer turbulence length scales". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v.24, n.1, 1986, p.61-68.
  27. SIMIU, E. - "Modern development in wind engineering; Part 1". Engineering Structures, v.3, 1981, p.233-41.
  28. GANDEMER, J. e BARNAUD, G. - "Simulation des proprietés dynamiques du vent en stabilité neutre dans la soufflerie à couche limite du C.S.T.B.". Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. Établissement de Nantes, França. Relatório ADYM 9.74, 1974, 39p.
  29. COUNIHAN, J. - "Adiabatic atmospheric boundary layers: a review and analysis of data from the period 1880-1972". Atmospheric Environment, v.9, 1975, p.871-905.
  30. TEUNISSEN, H.W. - "Measurements of planetary boundary layer wind and turbulence characteristics over a small suburban airport". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v.4, n.1, p.1-34, 1979.
  31. FLAY, R.G.J. e STEVENSON, D.C. - "Integral length scales in strong winds below 20m". Proc. 7th International Conference on Wind Engineering, Aachen, 1987. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v.28, n.1-3, 1988, p.21-30.
  32. ANTHONY, K.C. - "The background to the statistical approach". In: The Modern Design of Wind Sensitive Structures, London, Construction Industry Research and Information Association, 1970, Paper 2, p.17-27.
  33. PAPOULIS, A. - "Probability, random variables and stochastic processes". New York, McGraw-Hill, 1965.

34. BENDAT, S.J. e PIERSOL, A.G. - "Measurement and analysis of random data". New York, John Wiley & Sons, Inc., 1967.
35. WARDLAW, R.L. - "A wind tunnel investigation of the galloping response of an octogon cylinder". Ottawa, National Aeronautical Establishment, 1971 [Laboratory Technical Report LTR-LA-90].
36. STANDEN, N.M. , DALGLIESH, W.A. e TEMPLIN, R.J. - "A wind tunnel and full-scale study of turbulent wind pressures on a tall building". In: 3rd International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures , Tokyo, 1971, Paper II.3, p.199-210.
37. FICHTL, G.H. , KAUFMAN, J.W. e VAUGHAN, W.W. - "The characteristics of atmospheric turbulence as related to wind loads on tall structures". In: Technical Meeting Concerning Wind Loads on Buildings and Structures, Washington, D.C., National Bureau of Standards, 1969, p.27-41 [Building Science Series 30].
38. SINGER, I.A., BUSCH, N.E. e FRIZZOLA, J.A. - "The micro-meteorology of the turbulent flow field in the atmospheric surface boundary layer". In: 2nd International Research Seminar on Wind Effects on Buildings and Structures, Ottawa, 1967, v.1, Paper 21, p.557-94.
39. DAVENPORT, A.G. - "The dependence of wind loads on meteorological parameters". In: 2nd International Research Seminar on Wind Effects on Buildings and Structures, Ottawa, 1967, v.1, Paper 2, p.19-82.
40. HARRIS, R.I. - "Measurements of wind structures at heights up to 598ft above ground level". In: Symposium on Wind Effects on Buildings and Structures, Loughborough, Loughborough University of Technology, 1968, v.1, Paper 1.
41. TEMPLIN, R.J. - "Interim progress note on simulation of earth's surface winds by artificially thickened wind tunnel boundary layers". Ottawa, National Aeronautical Establishment, 1969 . [Laboratory Technical Report LTR-LA-22].
42. KLEBANOFF, P.S. e DIEHL, Z.W. - "Some features of artificially thickened fully developed turbulent boundary layers with zero pressure gradient". Washington, D.C., NACA, 1952. [Report 1110].
43. TEUNISSEN, H.W. - "Characteristics of the mean wind and turbulence in the planetary boundary layer". Institute for Aerospace Studies. University of Toronto. UTIAS Review no. 32. October, 1970, 57p.
44. SIMIU, E. e SCANLAN, R.H. - "Wind effects on structures". John Wiley & Sons, New York, 2nd ed., 1986.
45. DAVENPORT, A.G. - "The dynamic response of structures to wind turbulence". Seminar on Structural Aerodynamics, St-Remy-les-Chevreaux, April 20-22, 1982, 39p.

46. REED, D.A. - "Use of field parameters in wind engineering design". Journal of Structural Engineering, ASCE, v.113, n.7, Jul. 1987, p.1570-85.
47. TEUNISSEN, H.W. - "Planetary boundary layer wind and turbulence structure over rural terrain". Proc. 4th Colloquium on Industrial Aerodynamics. Buildings Aerodynamics. Part 1. Aachen, June 1980, p.211-226.
48. FLAGA, A. e WRANA, B. - "Analysis of empiric formulae of power spectral densities of three wind velocity vector components". Proc. 7th International Conference on Wind Engineering, Aachen, July 1987. Preprints, v.1, p.11-20.



*Fotolitos*

Fotolito Cromo 3 Ltda.  
Av. Assis Brasil, 115, conj. 203 - Porto Alegre, RS  
Fone (051) 343-9999

*Impressão*

EDELBRA - Indústria Gráfica e Editora Ltda.  
Av. Sete de Setembro, 466 - 1º andar - Erechim, RS  
Fone (054) 321-3619

## O vento na engenharia estrutural

trata das características e parâmetros meteorológicos de ventos de superfície, no que possa interessar à engenharia estrutural e ambiental.

É dividida em duas partes.

A primeira parte

("Velocidade média")

apresenta as características físicas do vento, com uma descrição sucinta dos principais tipos de ventos de superfície.

São estudados os parâmetros de rugosidade que influem na definição do perfil vertical de velocidades médias:

velocidade de fricção,

coeficiente de arrasto superficial,

comprimento de rugosidade,

expoente da lei potencial e altura da camada limite atmosférica.

Para o caso de terreno

de rugosidade uniforme,

é proposta uma lei geral

para o perfil de velocidades

médias, aplicável a qualquer

categoria de rugosidade

e a qualquer intervalo de tempo, entre três segundos e uma hora.

São dados exemplos

de aplicação e a parte da norma brasileira de vento referente à determinação da velocidade característica do vento.

A segunda parte

("Turbulência") estuda

a estrutura da turbulência

de ventos de superfície,

começando com a definição

dos parâmetros estatísticos fundamentais.

São apresentados valores

medidos ao vento natural

e expressões matemáticas

para o estudo da variância,

intensidade da turbulência,

funções de correlação

e escalas da turbulência.

O estudo do espectro

da turbulência inicia-se

com a conceituação física

e matemática deste parâmetro.

São apresentadas

e discutidas expressões

sugeridas por diversos autores

e é feito um estudo comparativo

entre diversos modos

de apresentação gráfica.

**O vento na engenharia estrutural** apresenta as características físicas do vento e os parâmetros de rugosidade que influem na definição do perfil vertical de velocidades médias.

Também é estudada a estrutura da turbulência de ventos de superfície: definições dos parâmetros estatísticos, valores medidos, expressões matemáticas, intensidade, funções e escalas.

ISBN 85-7025-362-1



**Editora  
da Universidade**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul