

ROGÉRIO ALEXANDRE FRANCISCO DA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO DE TÚNEL DE VENTO DE
CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA**

**Dissertação apresentada ao
Departamento de Engenharia
Mecânica da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Mestre em
Engenharia**

**São Paulo
2005**

04

ROGÉRIO ALEXANDRE FRANCISCO DA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO DE TÚNEL DE VENTO DE
CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA**

**Dissertação apresentada ao
Departamento de Engenharia
Mecânica da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Mestre em
Engenharia**

**Área de concentração :
Engenharia Mecânica**

**Orientador :
Marcos Tadeu Pereira**

**São Paulo
2005**



31200011432



Universidade de São Paulo
Biblioteca da Escola Politécnica

FD-4099
Ed. rev.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 21 de ^{setembro} dede 2005

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

Silva, Rogério Alexandre Francisco da

Caracterização de túnel de vento de camada limite atmosférica. São Paulo, 2005-07-1

212p.

Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica,

1. Modelagem física 2. Camada limite atmosférica I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais

À minha esposa

Aos meus irmãos

DEDICATÓRIA ESPECIAL

Ao meu filho (*in utero*)

Rodrigo Brito Francisco da Silva

**que representa, da forma mais bela, toda a alegria da vida; e é promessa
viva de um futuro melhor, dedico o resultado deste trabalho.**

AGRADECIMENTOS

Na busca infindável do saber e na nobre tarefa de expandir os limites do saber, ninguém é absoluto. Uma comunhão de esforços faz-se necessária, e cada pesquisa, cada descoberta, por sutil que se apresente hoje, enseja toda a grandiosidade do homem na união de muitas pessoas e na soma dos esforços de todos.

Quero expressar minha gratidão a algumas pessoas que tornaram este trabalho possível, e ousou dizer, foram determinantes no sucesso dessa empreitada.

Em primeiro lugar, agradeço ao Prof. Dr. Marcos Tadeu Pereira, orientador, pela possibilidade que me ofereceu, quando aceitou dirigir o nosso trabalho nesses anos turbulentos e inconstantes, pelo apoio constante e pela forma que dirigiu esta pesquisa;

Ao amigo Paulo Jabardo, abnegado colaborador, sempre disposto a um ensaio a complementar, ou à uma abordagem adicional dos fenômenos em estudo;

Aos profs. Podalyro Amaral de Souza e Sílvio de Oliveira Jr., que prontamente atenderam ao meu apelo, quando se fez necessário;

Ao IPT, por disponibilizar, em seus laboratórios, uma estrutura única na América Latina, peça-chave nos ensaios e estudos desta pesquisa;

Aos colegas do CTA/IFI, que ao longo de quase um ano compreenderam e apoiaram minhas ausências e minhas manias;

Aos colegas do Programa *Trainee* da PETROBRAS, pelo apoio no longo e incerto período da nossa provação;

Aos colegas da PETROBRAS que, mesmo sobrecarregados, souberam entender e apoiar minha dedicação aos estudos;

Aos colegas da FEI, que me apoiaram mesmo quando não me compreendiam;

Simplesmente,

OBRIGADO A TODOS.

SUMARIO

Agradecimentos	iv
Lista de símbolos	xi
Resumo	xiv
Abstract	xiv
Lista de Figuras	
Lista de Tabelas	
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO – ENGENHARIA DO VENTO	1
1.1 Acidentes históricos causados pela ação dinâmica do vento	5
1.2 Acidentes históricos causados pela ação estática do vento	5
1.3. Exemplo de aplicação dos estudos em túnel de vento	6
1.3.1 Objetivo do estudo	6
1.3.2 Descrição simplificada do procedimento	6
1.3.3 Resultado e discussão	10
1.4 Objetivo da Dissertação	14
CAPÍTULO 2. O ESCOAMENTO NA NATUREZA E SUA MODELAGEM	16
2.1. Divisões da atmosfera	16
2.1.1 Camada Limite Planetária (CLP) ou Camada Limite Atmosférica (CLA)	17
2.1.2 Atmosfera livre	17
2.2.O vento na atmosfera	18
2.3 Forças influentes na atmosfera	19
2.3.1 Força de pressão	19
2.3.2 Força de Coriolis	20

2.3.3 Força de Inércia ou centrífuga	21
2.4 Vento geostrófico	21
2.5 Vento gradiente	22
2.6 Vento na Camada Limite Atmosférica	23
2.7 Estabilidade da atmosfera	25
2.8 A modelagem física na Natureza	26
2.9 Requisitos básicos para a simulação física	28
2.10 Abordagem da norma ABNT	33
2.11 O vento atmosférico e o terreno	37
CAPÍTULO 3 CARACTERÍSTICAS DE PROJETO E FUNCIONAMENTO	40
3.1 Túnel de vento de sucção de circuito aberto	41
3.2 Túnel de vento de circuito fechado	43
3.3 Túnel de vento de circuito aberto de impulsão	44
3.4 Características do Túnel de Vento Atmosférico do IPT	45
3.5 Descrição do túnel de vento	46
3.6 Características construtivas do equipamento	48
3.7 Instrumentação	48
CAPITULO 4. CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO	50
4.1 Subcamada rugosa	50
4.2 Subcamada inercial ou logarítmica	51
4.3 Subcamada potencial ou de esteira	53
4.4 Subcamada interior	54
4.5 Caracterização dos componentes flutuantes da velocidade	56
4.6 Condições de conforto	64
4.6.1 Condições de conforto no ambiente interno de construções	65

4.6.2 Estudo da resposta humana às vibrações induzidas pelo vento	66
4.6.3 Critérios de conforto	69
4.6.4 Relações entre as velocidades do vento e as acelerações dos prédios	70
4.6.5 Frequência de ocorrência dos ventos indutores de acelerações críticas	72
4.7 Critérios de conforto para áreas externas	73
4.8 Velocidades do vento e o desconforto do pedestre	75
4.9 Critérios de conforto	80
4.10 Zonas de fortes ventos superficiais dentro de um ambiente construído	81
4.10.1 Escoamento dos ventos próximos de construções altas	81
4.11 Técnicas de visualização do escoamento	86
4.11.1 Saltação de areia – A técnica de erosão	88
CAPÍTULO 5 MÉTODOS DE MODELAGEM DA CLA	93
5.1 Método de Cook	94
5.2 Método de Gartshore	96
5.3 Método de Counihan	96
5.4 Método de Standen	102
5.5 Metodologia para o ensaio de saltação	107
5.6 Procedimentos	109
5.6.1 Preparação da rugosidade	109
5.6.2 Condições de operação	114
5.6.3 Medição de temperatura e calibração da sonda	115
5.6.4 Medição de velocidades	115

5.6.5	Processamento dos dados	116
5.6.6	Incerteza	116
CAPÍTULO 6 ENSAIOS, RESULTADOS E DISCUSSÃO		118
6.1	Ensaio de rugosidades típicas com o túnel vazio	118
6.1.1	Primeira rugosidade	121
6.1.2	Segunda rugosidade	125
6.1.3	Terceira rugosidade	129
6.1.4	Quarta rugosidade	133
6.1.5	Quinta rugosidade	137
6.1.6	Sexta rugosidade	141
6.1.7	Sétima rugosidade	146
6.1.8	Oitava rugosidade	150
6.1.9	Nona rugosidade	155
6.1.10	Décima rugosidade	160
6.1.11	Comparação entre as rugosidades	165
6.2	Análise do escoamento próximo ao solo pelo método de saltação de areia	169
CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES		176
7.1	Caracterização do escoamento	176
7.2	Saltação de areia	177
7.3	Conclusões gerais e recomendações	178
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		127

Lista de Símbolos

A	área de atuação da força de pressão
A, B, n	coeficientes de ajuste pela lei de King
a, b	constantes que intervêm na lei logarítmica
B	número Beaufort
c	constante da equação 4.3.2 de valor próximo à 0,03
c_p	coeficiente de pressão
C	parâmetro que intervém na expressão do calculo da escala integral longitudinal da turbulência
C_p	calor específico a pressão constante
D	diâmetro de um corpo não aerodinâmico
E_c	número de Eckert
F	Força atuante
F_c	força de Coriolis
f	freqüência <i>parâmetro de Coriolis</i>
f^*	freqüência correspondente ao máximo de espectro de potência adimensional
g	aceleração da gravidade
H	altura de referência
K	condutividade térmica
k	altura dos elementos de rugosidade
L	dimensão característica
m	massa da partícula de ar considerada
n	freqüência

n_s	freqüência de desprendimento de vórtices
Pr	número de Prandtl
Re	número de Reynolds
Ri	número de Richardson
Ro	número de Rossby
r'	distância instantânea entre a partícula e o centro de rotação de referência;
St	número de Strouhal
T	temperatura média local
t	tempo característico
U, V, W	componentes longitudinal, lateral e vertical da velocidade média, respectivamente
U_{ref}	velocidade média de referência
U_H	velocidade mediada altura H do solo
$U_{equivalente}$	velocidade equivalente conforme a norma ABNT 6123;
$U_{isopleta}$	velocidade básica
u', v', w'	componentes flutuantes longitudinal, lateral e vertical da velocidade respectivamente
v'	velocidade da partícula em relação a um referencial fixo na superfície terrestre
u^*	velocidade de atrito ou de cisalhamento
Y	freqüência adimensionalizada
z	altura
z_d	altura do plano de deslocamento nulo
z_g	altura do início
z_L	altura da subcamada limite

z_0	comprimento de rugosidade
z_r	altura da subcamada rugosa
S	escala de modelagem
δ	altura da camada limite atmosférica
δ_i	altura da camada limite interior
Δ	diferença
Δp	diferença de pressão
Ω	velocidade angular de rotação da Terra
ε	dissipação da turbulência
α	constante de Kolmogorov de valor próximo a 0,55; expoente da camada potencial
μ	viscosidade dinâmica do fluido
ρ	massa específica
λ_e	distância entre os elementos de rugosidade
κ	Constante de von Karman
τ	tensão de cisalhamento
ϕ	latitude da partícula no instante considerado
ν	viscosidade cinemática
θ	temperatura absoluta
ref	valor de referência

Resumo

Neste trabalho é apresentado um estudo experimental do comportamento da camada limite em túnel de vento de baixa velocidade. Analisa-se o comportamento do escoamento no túnel de vento de camada limite. Questões de conforto humano sob a ação do vento são abordadas. Foram realizados ensaios com 10 diferentes rugosidades e também um ensaio de saltação de areia.

A análise é feita através da comparação entre os perfis de velocidade média, intensidade de turbulência, distribuição espectral de potência da componente longitudinal da turbulência e escala integral da turbulência.

Utiliza-se anemometria de fio quente para as medições de velocidade e flutuações de velocidades. A aquisição dos dados foi feita por meio de uma placa conversora A/D conectada a um computador pessoal. Os resultados das medições com o túnel vazio mostraram um campo de velocidades uniforme e baixa intensidade de turbulência. A análise das simulações da camada limite atmosférica pelo método de Counihan mostrou a adequação do túnel para simulações dos ventos atmosféricos.

Abstract

This work presents the evaluation of characteristics of the open-loop low speed wind tunnel to verify its applicability to similarity studies and to experimental simulations of the atmospheric boundary layer. It was performed experiments with several roughness length and too a test of sand erosion.

For this purpose a hot-wire anemometry system was implemented for the measurements of mean velocity and velocity fluctuations. Data acquisition was performed by means of an A/D converter board connected to a personal computer. Experimental results are presented in form of velocity profiles and turbulence intensities. Results of measurements in the empty tunnel showed a uniform velocity field and low turbulence. Counihan methods showed the adequacy of the tunnel for natural wind simulations.

Lista de Figuras

Figura (1.1): Furacão Catarina alcança a costa do Brasil, entre Santa Catarina e Rio Grande do Sul;

Figura (1.2): Tornado atinge o bairro de Jardim Leonor de Indaiatuba. ;

Figura (1.3.2.1): Posicionamento do modelo na seção de ensaio;

Figura (1.3.2.2): Vista aérea da região em estudo;

Figura (1.3.1.3): Vista em planta do modelo;

Figura (1.3.2.4) Vista frontal do modelo;

Figura (1.3.3.1): Perfil de velocidade e de intensidade de turbulência do escoamento incidente;

Figura (1.3.3.2): Perfil de velocidade e de intensidade de turbulência do escoamento sobre o ponto 1;

Figura (1.3.3.3): Perfil de velocidade e de intensidade de turbulência do escoamento sobre o ponto 2;

Figura (1.3.3.4): Padrões erodidos pelo vento sob diferentes condições;

Figura (2.1.1): Camadas constituintes da atmosfera;

Figura (2.4.1): Vento Geostrófico “ V_G ”;

Figura (2.5.1): Vento Gradiente no Hemisfério Sul;

Figura (2.6.1): Vento na camada limite atmosférica no hemisfério sul;

Figura (2.10.1): Gráfico das isopletas da velocidade básica do vento, em m/s, para o Brasil;

Figura (2.10.1.2): Isopletas da velocidade básica do vento, em m/s, para o Estado de São Paulo;

Figura (2.11.1) Perfis de velocidade média do vento em km/h de acordo com a rugosidade do terreno;

Figura (3.1.1): Diagrama de Túnel de Vento de sucção de circuito aberto;

Figura (3.2.1): Túnel de vento de sucção de circuito fechado;

Figura (3.3.1): Túnel de vento de impulsão de circuito aberto;

Figura (3.4.1): Visão geral do túnel de camada limite;

Figura (3.5.1): Esquema do túnel de vento do Instituto de Pesquisas Tecnológicas;

Figura (4.1): Regiões de uma CL;

Figura (4.4.1): Camadas limites originadas por mudanças de rugosidade da superfície;

Figura (4.5.1): Espectro de potência da velocidade horizontal do vento. Medições de van der Haven a 100 m de altura;

Figura (4.5.2) Flutuação temporal da velocidade;

Figura (4.5.3): Ilustração do espectro de potência e da frequência de pico;

Figura (4.6.4.1) Velocidades de vento indutoras de acelerações em construções;

Figura (4.7.1): - A Rajada. Litografia de Marlet, coleção da Biblioteca da Vile de Paris (foto Roger-Viollet, Paris);

Figura (4.10.1.1): Escoamento do vento em frente de uma construção de elevada altura (vento soprando da esquerda para a direita);

Figura (4.10.1.2): Escoamento do vento próximo à face de barlavento de uma construção de elevada altura (vento soprando da esquerda para a direita);

Figura (4.10.1.3): Regiões de intensos ventos superficiais ao redor de uma construção alta;

Figura (4.10.1.4) – Escoamento transversal entre duas construções altas;

Figura. (4.11.1):Relacionamento entre o número de Froude e o número de Reynolds;

Figura (4.11.2): Tensão de cisalhamento na superfície produzida pela interação de um jato circular com uma placa plana;

Figura (5.1.1): Método proposto por Cook (1973). Vista lateral. Reproduzido de Cataldo (1992);

Figura (5.1.2): Método proposto por Cook (1973). Detalhe da tela. Vista a partir da jusante.

Figura (5.3.1): Vista em perfil do sistema de simulação Counihan;

Figura (5.3.2) Vista em planta do sistema de simulação Counihan;

Figura (5.3.3): Detalhe do gerador de vórtices de Counihan;

Figura (5.3.4): Geradores de vórtices de Counihan;

Figura (5.4.1): Ilustração da configuração do método de Standen;

Figura (5.4.2) Detalhe das dimensões da agulha;

Figura (5.4.3) Detalhe da agulha;

Figura (5.4.4): Ilustração da posição dos elementos do método Standen;

Figura (5.4.5): Vista em perfil dos elementos do método Standen;

Figura (5.4.6): Esboço da configuração empregada para as simulações;

Figura (5.5.1) Dimensões do modelo para o modelo de ensaio de saltação de arei

Figura (5.6.1.1): Arranjo retangular de elementos de rugosidade;

Figura (5.6.1.2): Arranjo em diamante de elementos de rugosidade;

Figura (5.6.1.3): Posicionamento da sonda. Rugosidade r2;

Figura (5.6.3.1): Comparação entre as calibrações;

Figura (6.1.1): Posição relativa da vertical para as medições;

Figura (6.1.2): Arranjo retangular e arranjo em diamante.

Figura (6.1.3): Posicionamento da sonda. Rugosidade r2.

Figura (6.1.1.1) Disposição dos elementos de rugosidade na rugosidade r1;

Figura (6.1.1.2): Perfis de velocidade e de intensidade de turbulência para 200, 300 e 400 rpm, respectivamente. Rugosidade utilizada: r1;

Figura (6.1.1.3): Perfis de velocidade e de distribuição de intensidade de turbulência,

para r1, adimensionalizados com $h_{ref} = 1000$ mm, $\overline{V}_{ref} = \overline{V}_{1000}$;

Figura (6.1.2.1) Disposição dos elementos de rugosidade na rugosidade r2;

Figura (6.1.2.2): Perfis de velocidade e de intensidade de turbulência para 200, 300 e 400 rpm, respectivamente. Rugosidade utilizada: r2;

Figura (6.1.2.31) Perfis de velocidade e de distribuição de intensidade de turbulência,

para r2, adimensionalizados com $h_{ref} = 1000$ mm, $\overline{V}_{ref} = \overline{V}_{1000}$;

Figura (6.1.3.1): Disposição dos elementos de rugosidade na rugosidade r3.

Figura (6.1.3.2): Perfis de velocidade e de intensidade de turbulência, obtidos com r3, para 200, 300 e 400 rpm, respectivamente;

Figura (6.1.3.3): Perfil de velocidade e de distribuição de intensidade de turbulência,

para r3, adimensionalizados com $h_{ref} = 1000$ mm, $\overline{V}_{ref} = \overline{V}_{1000}$;

Figura (6.1.4.1): Disposição dos elementos de rugosidade na rugosidade r4;

Figura (6.1.4.2): Perfis de velocidade e de intensidade de turbulência, obtidos com rugosidade r4, para 200, 300 e 400 rpm, respectivamente;

Figura (6.1.4.3): Perfis de velocidade e de distribuição de intensidade de turbulência,

para r4, adimensionalizados com $h_{ref} = 1000$ mm, $\overline{V}_{ref} = \overline{V}_{1000}$;

Figura (6.1.5.1): Disposição dos elementos de rugosidade na rugosidade r5;

Figura (6.1.5.2): Perfis de velocidade e de intensidade de turbulência, obtidos com a rugosidade r5, para 200, 300 e 400 rpm, respectivamente;

Figura (6.1.5.3): Perfis de velocidade e de distribuição de intensidade de turbulência,

para r5, adimensionalizados com $h_{ref} = 1000$ mm, $\overline{V}_{ref} = \overline{V}_{1000}$;

Figura (6.1.6.1): Disposição dos elementos de rugosidade na rugosidade r6;

Figura (6.1.6.2): Perfis de velocidade e de intensidade de turbulência, obtidos com a rugosidade r6, para 200, 300 e 400 rpm, respectivamente;

Figura (6.1.6.3): Perfis de velocidade e de distribuição de intensidade de turbulência, para r6, adimensionalizados com $h_{ref} = 1000$ mm, $\overline{V}_{ref} = \overline{V}_{1000}$;

Figura (6.1.7.1): Disposição dos elementos de rugosidade na rugosidade r7;

Figura (6.1.7.2): Perfis de velocidade e de intensidade de turbulência, obtidos com a rugosidade r7, para 200, 300 e 400 rpm, respectivamente;

Figura (6.1.7.3): Perfil de velocidade e de distribuição de intensidade de turbulência, para r7, adimensionalizados com $h_{ref} = 1000$ mm, $\overline{V}_{ref} = \overline{V}_{1000}$,

Figura (6.1.4.3): Perfis de velocidade e de distribuição de intensidade de turbulência, para r4, adimensionalizados com $h_{ref} = 1000$ mm, $\overline{V}_{ref} = \overline{V}_{1000}$;

Figura (6.1.5.1): Disposição dos elementos de rugosidade na rugosidade r5;

Figura (6.1.5.2): Perfis de velocidade e de intensidade de turbulência, obtidos com a rugosidade r5, para 200, 300 e 400 rpm, respectivamente;

Figura (6.1.5.3): Perfis de velocidade e de distribuição de intensidade de turbulência, para r5, adimensionalizados com $h_{ref} = 1000$ mm, $\overline{V}_{ref} = \overline{V}_{1000}$;

Figura (6.1.6.1): Disposição dos elementos de rugosidade na rugosidade r6;

Figura (6.1.6.2): Perfis de velocidade e de intensidade de turbulência, obtidos com a rugosidade r6, para 200, 300 e 400 rpm, respectivamente;

Figura (6.1.6.3): Perfis de velocidade e de distribuição de intensidade de turbulência, para r6, adimensionalizados com $h_{ref} = 1000$ mm, $\overline{V}_{ref} = \overline{V}_{1000}$;

Figura (6.1.7.1): Disposição dos elementos de rugosidade na rugosidade r7;

Figura (6.1.7.2): Perfis de velocidade e de intensidade de turbulência, obtidos com a rugosidade r7, para 200, 300 e 400 rpm, respectivamente;

Figura (6.1.7.3): Perfil de velocidade e de distribuição de intensidade de turbulência, para r7, adimensionalizados com $h_{ref} = 1000$ mm, $\overline{V}_{ref} = \overline{V}_{1000}$;

Figura (6.1.8.1): Disposição dos elementos de rugosidade na rugosidade r8;

Figura (6.1.8.2) Perfis de velocidade e de intensidade de turbulência, obtidos com a rugosidade r8, para 200, 300 e 400 rpm, respectivamente;

Figura (6.1.8.3): Perfis de velocidade e de distribuição de intensidade de turbulência, para r8, adimensionais com $h_{ref} = 1000$ mm, $\overline{V}_{ref} = \overline{V}_{1000}$;

Figura (6.1.9.1): Disposição dos elementos de rugosidade na rugosidade r9;

Figura (6.1.9.2): Perfis de velocidade e de intensidade de turbulência, obtidos com a rugosidade r9;

Figura (6.1.9.3): Perfil de velocidade e de distribuição de intensidade de turbulência, para r9, adimensionalizados com $h_{ref} = 1000$ mm, $\overline{V}_{ref} = \overline{V}_{1000}$;

Figura (6.1.10.1): disposição dos elementos de rugosidade na rugosidade r10.

Figura (6.1.10.2): Perfis de velocidade e de intensidade de turbulência para 200, 300 e 400 rpm, respectivamente;

Figura (6.1.10.3): Perfis de velocidade e de distribuição de intensidade de turbulência, para r10, adimensionalizados com $h_{ref} = 1000$ mm, $\overline{V}_{ref} = \overline{V}_{1000}$;

Figura (6.1.11.1): Perfil de velocidade e de distribuição de intensidade de turbulência, adimensionalizados com $h_{ref} = 1000$ mm, $\overline{V}_{ref} = \overline{V}_{1000}$, Rotação fixa em 400 rpm;

Figura (6.2.1): Características do escoamento incidente. $z_0 = 1.34$ mm, $\alpha = 0,20$;

Figura. (6.2.2):Seqüência fotográfica dos padrões erodidos na areia;

Figura (6.2.3): Distribuição da velocidade de cisalhamento $\frac{\mu_*}{U_*^0}$ observada ao redor das

estruturas relacionada com os valores das mesmas a montante;

Figura (6.2.4): Distribuição da velocidade de cisalhamento, $\frac{\mu_*}{U_*^0}$, para o modelo

ensaiado;

Lista de Tabelas

Tabela 2.3.2.1 Variação do coeficiente f com a latitude;

Tabela 2.11.1 Classificação dos tipos de terreno;

Tabela 4.6.1: Graus de desconforto relatados;

Tabela 4.8.1: Resumo dos efeitos do vento;

Tabela 4.9.1: Critérios de conforto para varias áreas de pedestres;

Tabela (5.3.1) Dimensões dos componentes dos sistemas de simulação;

Tabela 5.4.1 Dimensões das agulhas e dos elementos de rugosidade;

Tabela 6.1.11.1: Valores da velocidade de cisalhamento em função da rugosidade e da condição de operação;

Tabela 6.1.11.2 Valores do comprimento de rugosidade em função da rugosidade e da condição de operação;

Tabela 6.1.11.3: Valores do expoente α em função da rugosidade e da condição de operação;

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO – ENGENHARIA DO VENTO

Nos últimos 20 anos, o desenvolvimento tecnológico da chamada “Engenharia do Vento” tem ocorrido de forma constante no exterior. Muito se avançou nas pesquisas e nos estudos sobre a interação entre o vento e a sociedade.

Pode-se dividir a Engenharia do Vento em dois ramos principais, considerando os fenômenos envolvidos: um ramo focado no estudo das cargas sobre estruturas expostas ao vento e outro orientado para o estudo de aspectos como conforto humano, dispersão de poluentes etc.

No Brasil os estudos da ação do vento, ponderados pelas dimensões continentais do nosso território, são ainda incipientes, com grande parte dos engenheiros desconhecendo totalmente as possibilidades ofertadas pelo estudo da Engenharia do Vento, existindo poucos laboratórios dedicados aos temas e os estudos ainda são esparsos.

Na seara dos esforços impingidos pelo vento, os acidentes têm ocorrido, no Brasil, com incidência crescente o que reforça a necessidade de se entender os fenômenos que o regem e de dominar a Engenharia do Vento. Como exemplo, alguns acidentes recentemente relatados pela imprensa nacional:

- Em 4 de novembro de 1997 dez torres de alta tensão para transmissão de energia elétrica foram derrubadas no Paraná;
- Em 22 de janeiro de 1998 ventos derrubaram propaganda “outdoor” com 30 m de altura no supermercado Carrefour em Osasco, matando 2 pessoas e ferindo outras 25.

- Em 12 de março de 1998, ventos fortes inclinaram e quase derrubaram uma torre de TV com 80m de altura instalada sobre um edifício na Avenida Paulista;
- Em 16 de abril de 1998, ventos de 150 km/h derrubaram torres de transmissão de energia elétrica no Paraná, ocasionando a mais extensa falta de energia já ocorrida no Estado de São Paulo;
- Ventos de 120 km/h provocaram oscilações de mais de 45 cm de amplitude na ponte Rio - Niterói.
- Em 28 de março de 2004, o furacão Catarina atingiu a divisa dos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, desde Laguna (SC) até Torres (RS) chamando a atenção da sociedade para a possibilidade de ocorrência desses fenômenos no Brasil. Com ventos sustentados de 150 km/h e rajadas de até 178 km/h, a tormenta provocou destruição em várias cidades (Torres, RS; Arroio do Silva, Araranguá, Criciúma e Sombrio, em SC;), com mais de 100 mil casas destruídas e pelo menos seis mortes. A Figura (1.1) apresenta uma imagem aérea do furacão Catarina atingindo a costa brasileira.



Figura (1.1): Furacão Catarina alcança a costa do Brasil, entre Santa Catarina e Rio Grande do Sul Disponível em [\[http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/gallery/?2004087-0327/Brazil2.A2004087.1355.1km.jpg\]](http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/gallery/?2004087-0327/Brazil2.A2004087.1355.1km.jpg)www.inpe.gov]. Acesso em 12 junho de 2005.

- Em 26 de maio de 2005, a região de Indaiatuba, a 102 km de São Paulo, foi atingida por um tornado que durou vários minutos, tombou 18 vagões estacionados no Bairro Pimenta, destelhou cerca de 400 casas e destruiu cerca de 30 indústrias causando um prejuízo estimado em 97,2 milhões de reais. A Figura (1.2) apresenta uma imagem do bairro Jardim Leonor, próximo ao centro da cidade de Indaiatuba no momento em que o fenômeno apresentava ventos médios estimados em 250 km/h.



Figura (1.2): Tornado atinge o bairro de Jardim Leonor de Indaiatuba. [O Estado de São Paulo, 27 junho de 2005]

O emprego dos painéis de revestimento e de formas construtivas arrojadas, tendências que vêm se consolidando no projeto arquitetônico, exigirão dos engenheiros maior conhecimento dos efeitos do vento, para os cálculos e para poderem fazer, com segurança, as tomadas de decisões.

No outro grande ramo da Engenharia do Vento, o problema de dispersão de poluentes em cidades como São Paulo, Cubatão, Paulínia, Sorocaba, pode ser estudado, de forma a se obter melhor entendimento, possibilitando a proposição de soluções estruturadas. Por exemplo, pode-se analisar qual a melhor localização de uma chaminé em uma fábrica, ou a influência da poluição originada em uma nova rodovia sobre a fauna e a flora, ou ainda, os efeitos de um incêndio em uma refinaria sobre a região, etc.

1.1 Acidentes históricos causados pela ação dinâmica do vento

A incidência do vento em rajadas e a turbulência do escoamento conduzem a falhas por fadiga ou por ressonância e, quando a falha ocorre em razão desses esforços consideramos a ocorrência da ação dinâmica do vento.

Quando em novembro de 1940, a ponte de Tacoma (*Tacoma Narrows Bridge*) ruiu sob a ação de um vento de 68 km/h, os critérios de projeto passaram a ser questionados. Tendo sido calculada para resistir aos esforços estáticos impingidos por ventos de 160 km/h, oscilações torcionais provocaram a queda sob ventos 42 % menores que o considerado. Posteriormente se verificou que a estrutura de apoio das pistas possuía rigidez insuficiente para suportar os esforços causados pelo desprendimento de vórtices alternados.

1.2 Acidentes históricos causados pela ação estática do vento

As pressões impostas pelo vento podem comprometer uma estrutura ao alterar o balanço de forças para o qual tenha sido projetada, considerando-se a estática do vento.

Um dos acidentes de maiores proporções, senão o maior, tendo em vista a perda de vidas humanas, foi a destruição de 13 vãos de 74 m da ponte *Tay Bridge*, Escócia, justamente quando passava um trem com 90 passageiros, em 1879. O desastre foi total, não havendo sobreviventes. A ponte havia sido calculada para resistir aos esforços do vento, porém nos cálculos se considerou apenas a estrutura da ponte; não foi considerada a ação do vento contra o próprio trem, razão pela qual a ponte ruiu justamente na passagem do comboio.

Outro exemplo clássico é o colapso do *Meyer-Kiser Bank Building*, Flórida (EUA) pelo furacão de 18 de setembro de 1926. Tratava-se de um edifício estreito, estrutura de aço, com 17 andares e 13,7 m X 42,7 m em planta; o edifício, como um todo, foi severamente torcido, ficando completamente inutilizado.

A maioria dos acidentes estáticos ocorre em construções menores, geralmente construções leves ou de grandes vãos livres, tais como hangares, pavilhões de feiras e de exposições, pavilhões industriais, oficinas, grandes mercados, depósitos de cereais, armazéns portuários, estações ferroviárias, sedes de clubes, coberturas de estádios e hipódromos, ginásios cobertos, cinemas, teatros, pavilhões para fins agrícolas e pecuários, igrejas, etc.

Isoladamente, em um acidente com ponte ou grande edifício o prejuízo é muito maior do que com uma das construções citadas acima. Mas, somados, o prejuízo causado à sociedade nesses pequenos acidentes mostra-se, facilmente superior ao prejuízo dos acidentes em grandes construções.

1.3 Exemplo de aplicação dos estudos em túnel de vento (Prata, A.R.)

1.3.1 Objetivo do estudo

Estudo do efeito do bloqueio dos prédios da orla marítima sobre a brisa marinha.

1.3.2 Descrição simplificada do procedimento

Para análise das condições de conforto e da influência do efeito de bloqueio dos prédios da orla marítima da cidade de Santos, um modelo em escala de 1:1.000 (capítulo 4) foi posicionado no túnel de vento e sobre ele foi provocado um escoamento

semelhante ao observado na realidade. Para a produção da camada-limite atmosférica (capítulo 2) de interesse para o estudo, foi utilizado o método de Counihan (capítulo 5), sem a utilização de elementos de rugosidade no piso do túnel, visto que a direção de interesse dos ventos a camada limite se desenvolve sobre o mar.

A Figura (1.3.2.1) apresenta o posicionamento do modelo na seção de ensaios, permitindo notar os geradores de vórtices e a barreira ao fundo. Observe também que o piso do túnel está liso, ou seja, não há elementos de rugosidade distribuídos sobre o piso do túnel.

A Figura (1.3.2.2) apresenta uma vista aérea da região estudada, retratando o mar, a faixa de areia da praia e as construções na faixa próxima a orla.



Figura (1.3.2.1): Posicionamento do modelo na seção de ensaio. Reproduzido de Prata (2004).

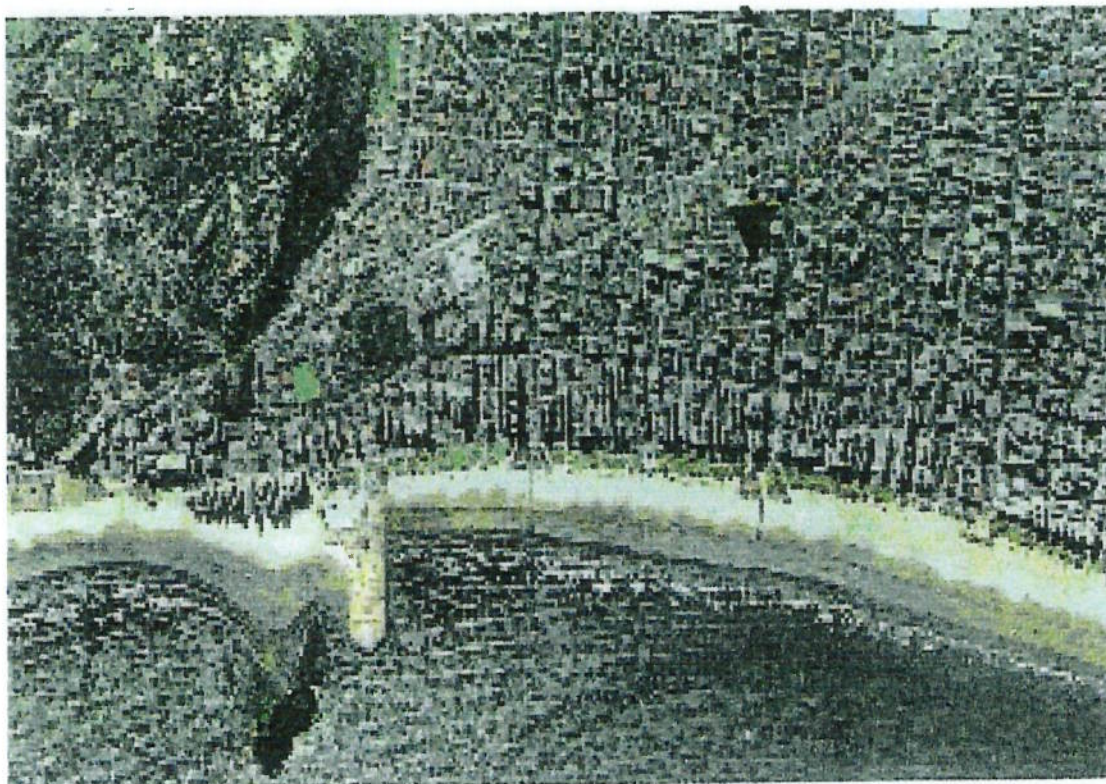


Figura (1.3.2.2): Vista aérea da região em estudo. Reproduzido de Prata (2004).

A Figura (1.3.2.3) apresenta os pontos sobre os quais foram levantados os perfis de velocidade e de intensidade de turbulência em função da altura (capítulos 2 e 4). Esses perfis permitem avaliar as condições qualitativas e quantitativas do escoamento sobre o modelo, e se, de fato o comportamento do escoamento sobre o modelo é similar ao observado na escala real.

A Figura (1.3.2.4) apresenta uma vista frontal do modelo, permitindo observar as diferentes alturas das construções representadas e o posicionamento da sonda (anemômetro de fio quente, vide capítulo 5) no ponto de medição p2, localizado mais internamente ao modelo.

O procedimento de ensaio foi similar ao descrito no capítulo 5.

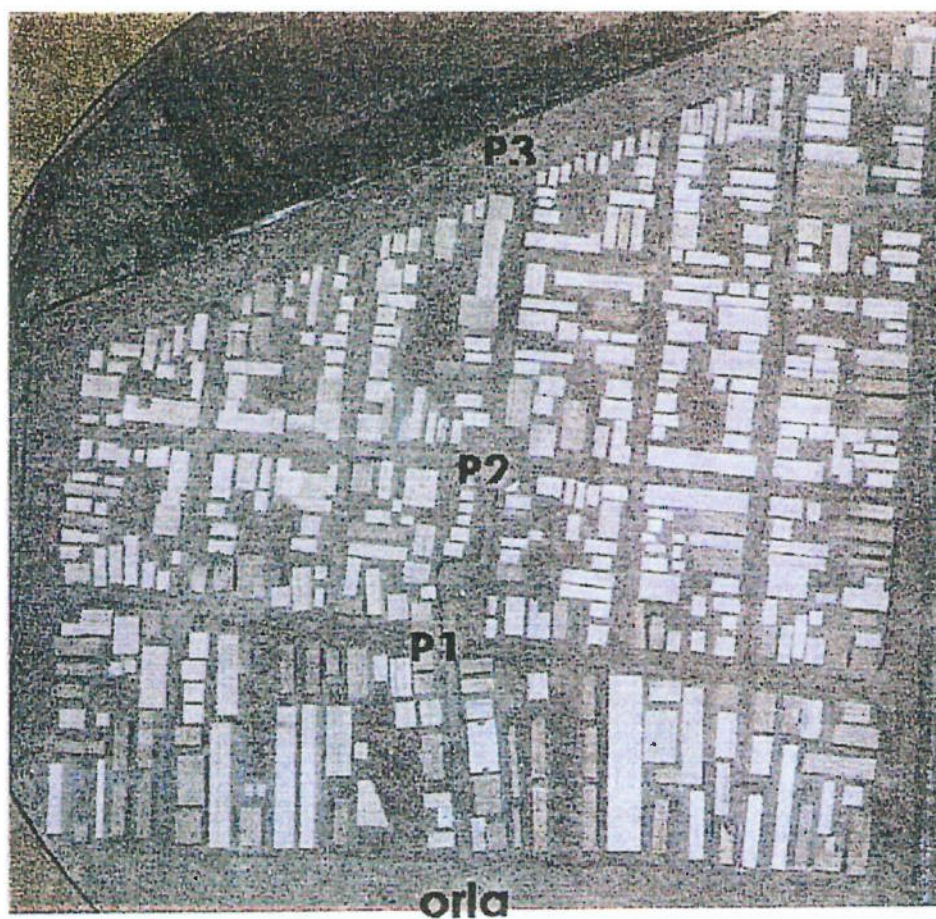


Figura (1.3.1.3): Vista em planta do modelo. Reproduzido de Prata (2004).

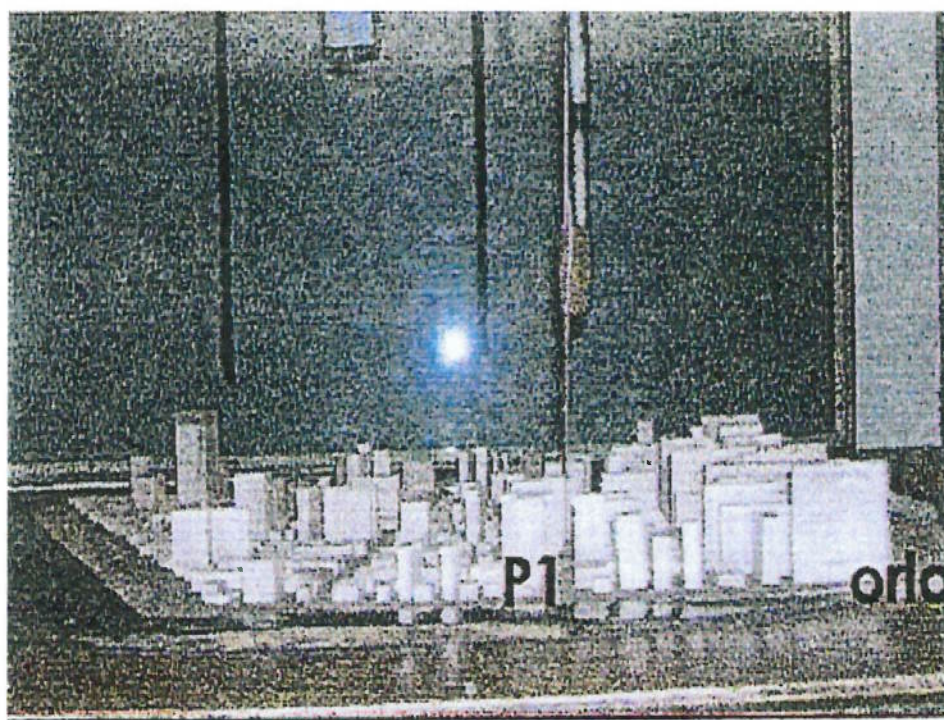


Figura (1.3.2.4) Vista frontal do modelo. Reproduzido de Prata (2004).

1.3.3 Resultados e discussão

A Figura (1.3.3.1) apresenta os perfis de velocidade e de intensidade de turbulência para o escoamento incidente desenvolvido sobre o mar. Observa-se o comportamento do perfil de velocidades, claramente logarítmico. As alturas estão indicadas em metros e foram levantadas em milímetros no ensaio nos modelos em função da escala utilizada (1:1000). Os perfis apresentados representam o comportamento do escoamento sobre a região da faixa de areia, antes de sofrer a influência das estruturas da região da orla.

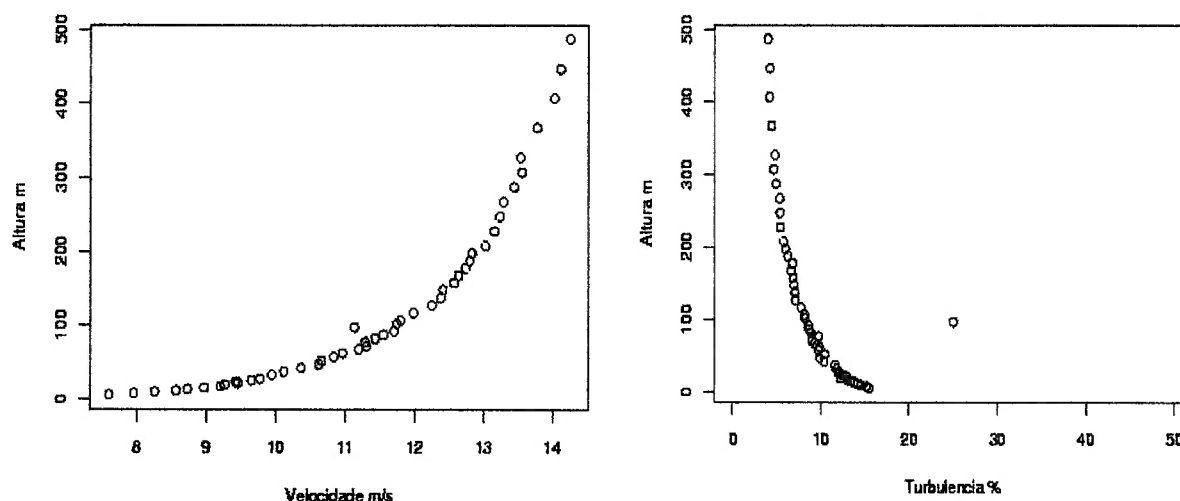


Figura (1.3.3.1): Perfil de velocidade e de intensidade de turbulência do escoamento incidente. Reproduzido de Prata (2004).

A Figura (1.3.3.2) apresenta os perfis de velocidade e de intensidade de turbulência para o escoamento incidente desenvolvido sobre o mar e sobre os obstáculos observados no trecho entre o mar e o ponto 1. Observa-se, no perfil de velocidades, um deslocamento da altura a partir da qual se observa o comportamento logarítmico do perfil de velocidades assim como uma mudança em seu aspecto, em decorrência da alteração na rugosidade sobre a qual o escoamento se desenvolve. A

intensidade de turbulência mais elevada denota a influência das estruturas do modelo, causando maior perturbação no escoamento. Da mesma forma que para a Figura (1.3.3.1), as alturas estão indicadas em metros, tendo sido levantadas em milímetros no ensaio nos modelos em função da escala utilizada (1:1.000). Os perfis apresentados representam o comportamento do escoamento sobre o ponto 1, após percorrer a primeira linha de construções representadas no modelo.

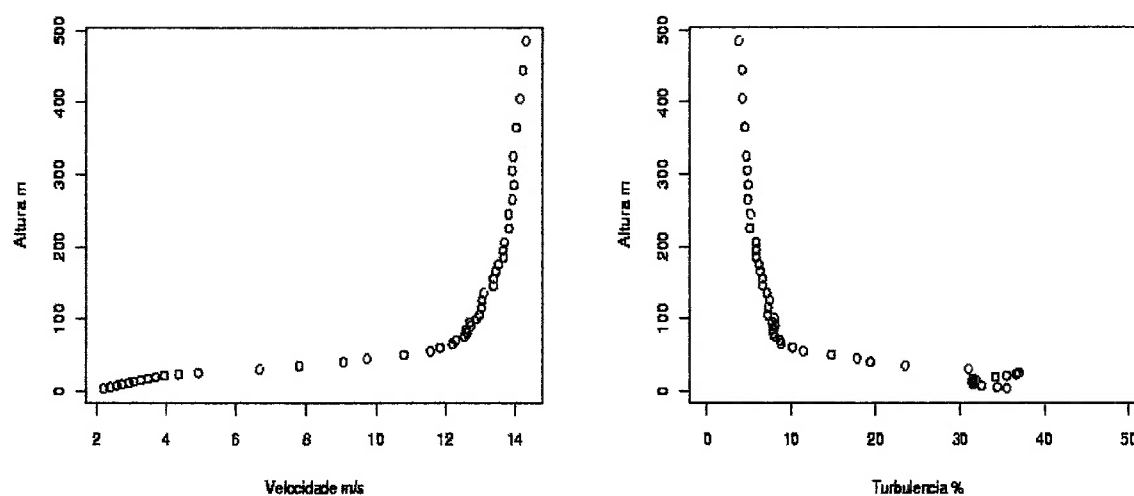


Figura (1.3.3.2): Perfil de velocidade e de intensidade de turbulência do escoamento sobre o ponto 1. Reproduzido de Prata (2004).

A Figura (1.3.3.3) apresenta os perfis de velocidade e de intensidade de turbulência para o escoamento incidente desenvolvido sobre o mar e sobre os obstáculos observados no trecho entre o mar e o ponto 2. Observa-se, no perfil de velocidades, um deslocamento da altura a partir da qual se observa o comportamento logarítmico do perfil de velocidades assim como uma mudança em seu aspecto, em decorrência da alteração na rugosidade sobre a qual o escoamento se desenvolve. A intensidade de turbulência mais elevada denota a influência das estruturas do modelo, causando maior perturbação no escoamento. Da mesma forma que para as Figuras

(1.3.3.1) e (1.3.3.2), as alturas estão indicadas em metros, tendo sido levantadas em milímetros no ensaio nos modelos em função da escala utilizada (1:1.000). Os perfis apresentados representam o comportamento do escoamento sobre o ponto 2, após percorrer as duas primeiras linhas de construções representadas no modelo.

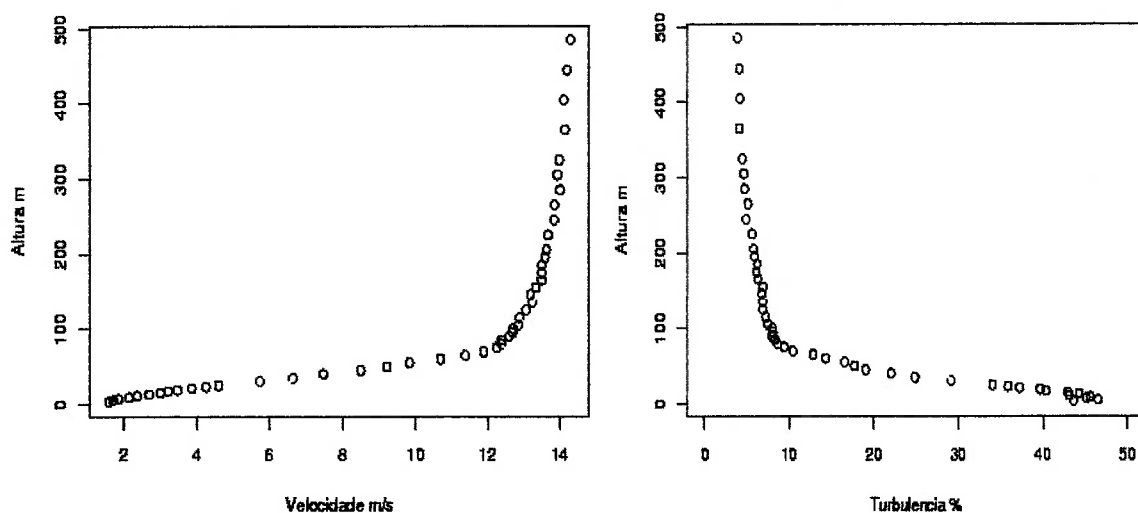


Figura (1.3.3.3): Perfil de velocidade e de intensidade de turbulência do escoamento sobre o ponto 2. Reproduzido de Prata (2004).

A Figura (1.3.3.4) apresenta os padrões erodidos pelo vento sobre uma camada de areia de espessura aproximadamente constante, representativos das condições de escoamento observadas ao nível do pedestre. As áreas erodidas estão destacadas em colorido.

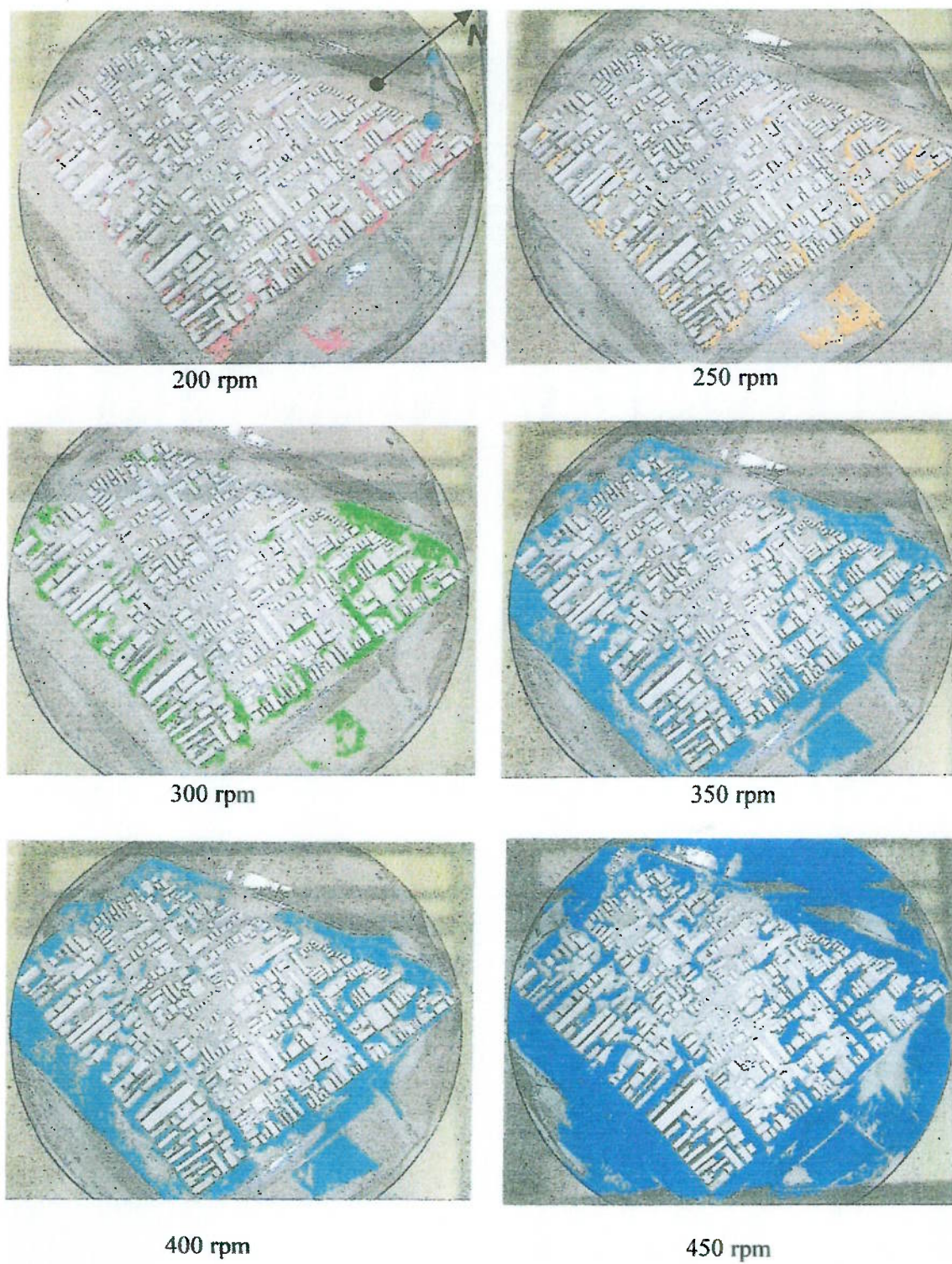


Figura (1.3.3.4): Padrões erodidos pelo vento sob diferentes condições. Reproduzido de Prata (2004).

De forma simplificada, o método do ensaio de saltação de areia é recobrir o modelo é com uma camada de areia de espessura aproximadamente constante e, em seguida, soprar sobre ele ar com velocidades crescentes. As áreas nas quais primeiro se verifica a remoção da areia são áreas nas quais se observa, para uma mesma velocidade de escoamento não perturbado, maior intensidade de velocidade ao nível do solo. Essas áreas podem representar regiões de desconforto ou mesmo de perigo aos transeuntes, em função das velocidades observadas no escoamento não perturbado e em sua probabilidade de ocorrência (capítulos 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10).

As regiões onde a camada de areia não é removida antes de se alcançar condições de velocidade de escoamento elevadas são áreas nas quais o ambiente se apresenta “estagnado”, ou seja, o ar nessas regiões está quase parado se comparado com as demais regiões. Nessas áreas o processo de troca térmica, assim como o processo de difusão de poluentes é prejudicado pela baixa velocidade observada.

A técnica de saltação de areia é apresentada nos capítulos 4.11.1 e 5.5.

1.4 Objetivo da dissertação

Tendo em vista este quadro complexo caracterizado pelos fatos narrados e referentes à Engenharia do Vento, essa dissertação trata de apresentar o túnel de vento de camada limite atmosférica e suas aplicações, discutindo a modelagem física que pode ser desenvolvida e os fenômenos que estão associados.

Para tanto os ensaios foram divididos em duas seqüências:

1º Foram preparadas sete rugosidades de piso distintas, obtidas de combinações de elementos 4 tipos de elementos de rugosidade, ensaiadas com o método de Counihan

e para três dessas rugosidades, ensaiadas também com uma variação do método, obtida através da remoção dos geradores de vórtices e da barreira;

2º Foi simulado o escoamento, ao nível do solo, para um modelo de configuração clássica, para permitir a análise dos padrões de erosão observados e das condições de conforto a dois metros de altura do solo.

Em síntese, busca-se aprender a caracterizar um túnel de vento, possibilitando o avanço dos ensaios futuros de investigação dos fenômenos do efeito do vento em estruturas e de dispersão de poluentes, através do tratamento das informações da literatura, dos ensaios de camada limite complementados por um ensaio de visualização do escoamento pelo método de saltação de areia.

Dessa forma, os ensaios propostos propiciarão melhores condições de pesquisa dos fenômenos observados na camada-limite atmosférica, facilitando o processo interativo de escolha da rugosidade adequada para a caracterização da região de interesse, através do levantamento das camadas-limites passíveis de serem implementadas em túnel de vento com os elementos de rugosidade disponíveis e da complementação dessas informações com o estudo do comportamento do escoamento ao nível do solo através do método de saltação de areia.

CAPÍTULO 2

O ESCOAMENTO NA NATUREZA E A SUA MODELAGEM FÍSICA

Para o estudo do comportamento da atmosfera e do fluido que a compõe, faz-se necessário o entendimento dos diversos fenômenos envolvidos e das particularidades do escoamento sob análise. Este capítulo apresenta os fenômenos e as características do vento atmosférico, bem como discute a modelagem física do escoamento atmosférico, no túnel de vento.

2.1. Divisões da atmosfera

A atmosfera terrestre pode ser repartida em diferentes regiões, conforme a influência exercida pela Terra sobre cada uma delas. A Figura (2.1.1) apresenta algumas camadas da atmosfera e as dimensões usuais que as limitam. Para esse estudo, é necessário tratar brevemente de duas regiões de interesse.

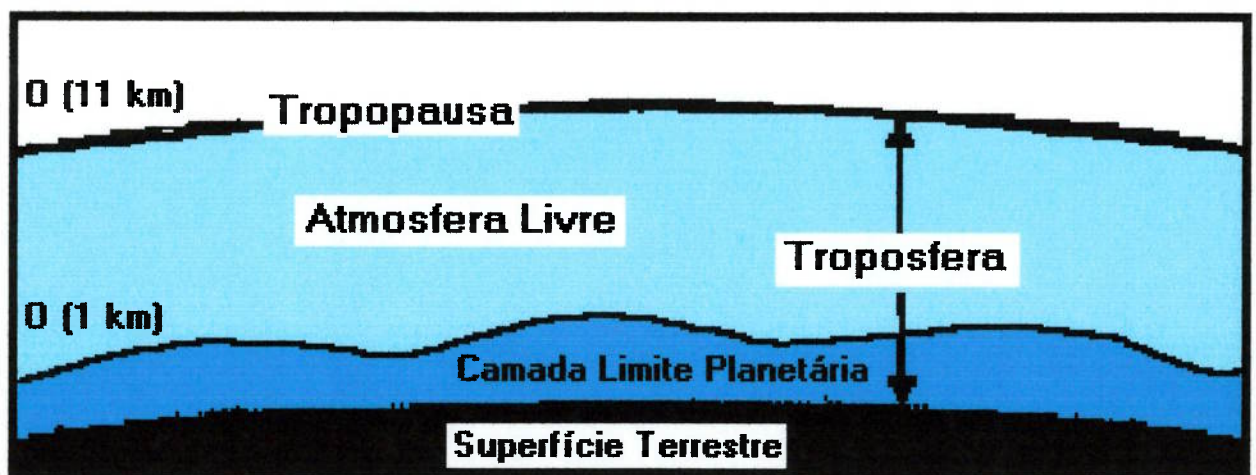


Figura (2.1.1): Camadas constituintes da atmosfera. Adaptado de Stull (1988)

2.1.1 Camada Limite Planetária (CLP) ou Camada Limite Atmosférica (CLA)

A CLA (ou CLP) é a região da atmosfera mais próxima da superfície da Terra. O ar em movimento relativo é influenciado pelo atrito exercido pela Terra. A energia necessária para produzir o escoamento na CLA é obtida através da interação da superfície da Terra em movimento e o ar, bem como, dos gradientes de pressão e de temperatura originados com o aquecimento diferencial da atmosfera pela radiação solar.

A espessura dessa camada varia em função da altura dos obstáculos que se interpõem ao livre movimento do ar, mas pode-se considerar que sua espessura é da ordem de 1 km.

2.1.2 Atmosfera livre

Ao se distanciar da superfície terrestre, a camada subsequente é denominada como Atmosfera Livre e corresponde à porção da atmosfera na qual o movimento das massas de ar não é influenciado pela força de atrito entre a Terra e a atmosfera. A espessura dessa camada também varia, sendo da ordem de 11 km.

Nessa região, a energia para movimentação do ar é obtida do gradiente horizontal de pressão, dos gradientes de temperatura, da força centrífuga e da força de Coriolis devido ao movimento de rotação da Terra.

2.2. O vento na atmosfera

O movimento do ar (vento) em relação à superfície terrestre é originado pelo aquecimento diferencial da camada gasosa que envolve a Terra e que impõe diferenças na pressão atmosférica.

A energia solar atinge o planeta sob a forma de ondas eletromagnéticas. Essa radiação solar é composta do somatório de diferentes comprimentos de onda (ondas luminosas, radiação infravermelha, radiação ultravioleta, etc.).

Parte da energia incidente na atmosfera, na ordem de 40%, é refletida pela atmosfera e pela superfície da terra não resultando, dessa forma, em aquecimento. Dessa forma, cerca de 60 % do total de energia incidente, resultará em aquecimento da Terra, através de dois mecanismos principais:

- Aquecimento direto. Aproximadamente 15% da energia total incidente é absorvida pela atmosfera, com esse percentual variando em função das suas características (teor de partículas de aerossol, de vapor d'água, presença de nuvens, teor de ozônio, etc.);
- Aquecimento indireto. Os 45% restantes do total de energia incidente são absorvidos pela superfície da Terra e posteriormente irradiados em comprimentos de ondas muito maiores que os da energia incidente. A energia emitida pela superfície da Terra nesses comprimentos de onda, da ordem de $10\mu\text{m}$, por sua vez é absorvida pela atmosfera com maior eficiência.

A intensidade com que a absorção e a irradiação ocorrem depende das características da superfície. Tal intensidade varia desde aproximadamente 25% para neve, passando por 75% para areia seca e alcançando aproximadamente 95% em florestas densas.

A atmosfera funciona de maneira análoga aos vidros de uma estufa exposta ao sol. Os principais componentes da atmosfera (21% oxigênio, 78% nitrogênio) são, à semelhança do vidro, bastante transparentes aos dois tipos de ondas energéticas (radiação solar e radiação infravermelho emitida pela superfície aquecida), mas o vapor de água e o dióxido de carbono, embora bastante transparentes à radiação solar, são pouco transparentes à radiação infravermelha, o que propicia o aquecimento da atmosfera.

2.3 Forças influentes na atmosfera

2.3.1 Força de pressão

A diferença de pressão entre duas regiões da atmosfera implicará na imposição de uma força, que tenderá a mover a massa de ar de forma a restabelecer o equilíbrio. Essa força será tão mais intensa quanto maior for a diferença de pressão observada entre as áreas em estudo. Sua direção será sempre perpendicular à isóbara e orientada da isóbara de maior pressão para a isóbara de menor pressão atmosférica. A força de pressão está denotada por P nas Figuras (2.4.1) e (2.5.1).

2.3.2 Força de Coriolis

A força de Coriolis descreve a influência da rotação da Terra sobre uma “partícula de ar” que esteja em movimento relativo à superfície terrestre. É expressa pelo produto entre a velocidade angular da Terra e a velocidade da massa de ar em relação a um referencial fixo na superfície terrestre. A intensidade dessa força varia sensivelmente com a latitude.

A força de Coriolis pode ser expressa para o caso da rotação da Terra por:

$$F_c = m \cdot f \cdot v' \quad (2.3.2.1)$$

sendo:

m – massa da partícula de ar considerada;

v' – velocidade da partícula, em relação a um referencial fixo na superfície terrestre;

f – parâmetro de Coriolis.

O parâmetro de Coriolis, (f) é função da velocidade angular de rotação e da posição da partícula em observação e pode ser determinado por:

$$f = 2 \cdot \Omega \cdot \text{sen}\phi \quad (2.3.2.2)$$

onde:

f – parâmetro de Coriolis;

Ω – velocidade angular de rotação da Terra;

ϕ – latitude da partícula no momento considerado.

A Tabela 2.3.2.1 apresenta alguns valores da constante f para diferentes latitudes

Tabela 2.3.2.1 Variação do coeficiente f com a latitude. Reproduzido de Blessmann (1995).

Latitude (graus)	f $\times 10^{-4} \text{ (s}^{-1}\text{)}$	Latitude (graus)	f $\times 10^{-4} \text{ (s}^{-1}\text{)}$	Latitude (graus)	f $\times 10^{-4} \text{ (s}^{-1}\text{)}$
0	0	35	0,8365	70	1,3705
5	0,1271	40	0,9375	75	1,4087
10	0,2533	45	1,0313	80	1,4363
15	0,3775	50	1,1172	85	1,4629
20	0,4988	55	1,1947	90	1,4584
25	0,6164	60	1,2630		
30	0,7292	65	1,3218		

2.3.3 Força de Inércia ou centrífuga

A partícula, ao se deslocar sobre a superfície terrestre, em trajetórias curvas fica sujeita à ação da força de inércia ou centrífuga, expressa como:

$$F_i = m \cdot \Omega^2 \cdot r' \quad (2.3.3.1)$$

onde

r' – distância instantânea entre a partícula de ar em movimento e o centro de giro de referência.

2.4 Vento Geostrófico

Ocorre quando há equilíbrio entre a força de Coriolis (F_c) e a força de pressão (P). Em função da altitude, a influência da força de atrito do solo sobre o fluido é desprezível, e dessa as isóbaras são paralelas e a trajetória da partícula de ar pode ser considerada uma reta. Nessa condição o vento será paralelo às isóbaras.

A força de pressão (P) induzirá o movimento da partícula na direção perpendicular às isóbaras, e em direção a região de baixa pressão (condição a). Em razão da rotação da Terra, surge uma força de Coriolis de intensidade (F_c') que ao compor com a força de pressão P forma uma resultante R' que define a nova trajetória da partícula (condição b). Esse processo se repete de forma interativa (condição c) até que se alcance o equilíbrio entre as forças de pressão e de Coriolis (condição d).

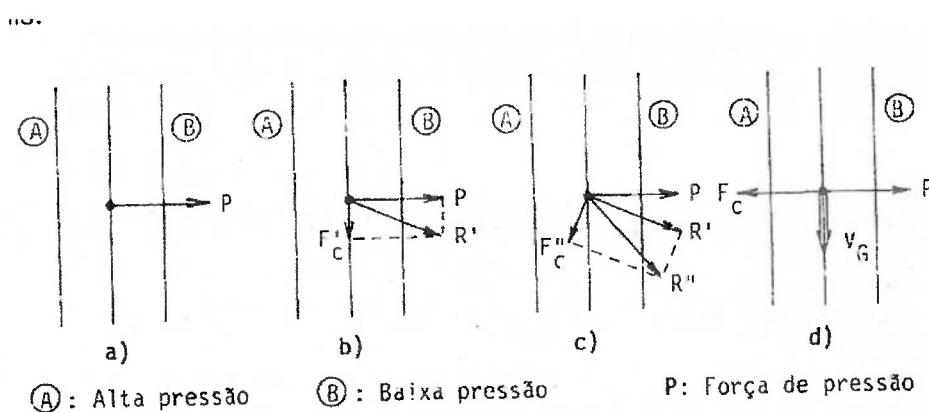


Figura (2.4.1): Vento Geostrófico “ V_G ”. Reproduzido de Blessmann (1995)

2.5 Vento Gradiente

Quando a força de pressão P é equilibrada pela ação conjunta de duas forças, ou seja, pela ação da força de Coriolis somada à força de inércia (isóbaras curvas), têm-se o vento gradiente. O processo de equilíbrio é análogo ao apresentado para o vento geostrófico.

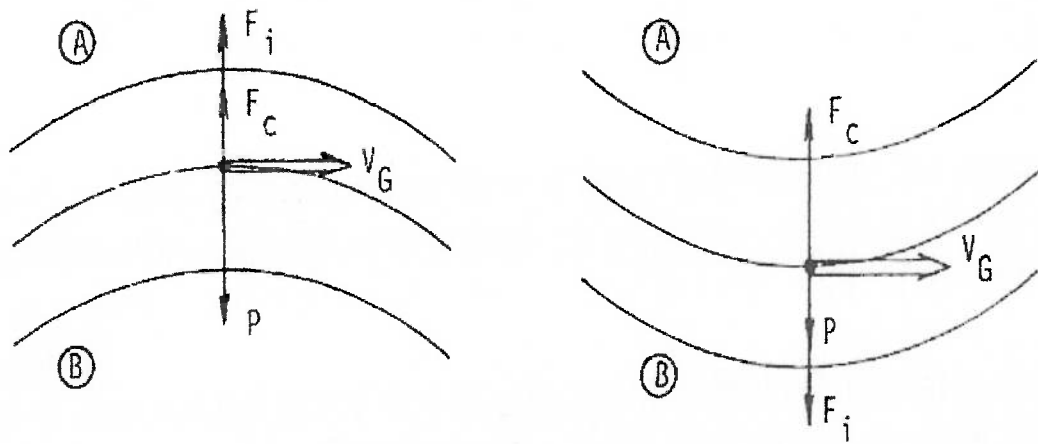


Figura (2.5.1): Vento Gradiente no Hemisfério Sul. Reproduzido de Blessmann (1995)

2.6 Vento na Camada Limite Atmosférica

Sob a influência da força de atrito (F_a) a partícula será desviada de sua trajetória tangente às isóbaras para uma nova trajetória, influenciada agora, pela rugosidade do terreno sobre o qual o escoamento se desenvolve, e também pelos gradientes de temperatura na direção vertical, como ilustrado na Figura (2.6.1).

A influência do atrito da superfície terrestre diminui com a altitude considerada, sendo máxima ao nível da superfície terrestre e podendo ser considerada nula no extremo superior da camada-limite atmosférica.

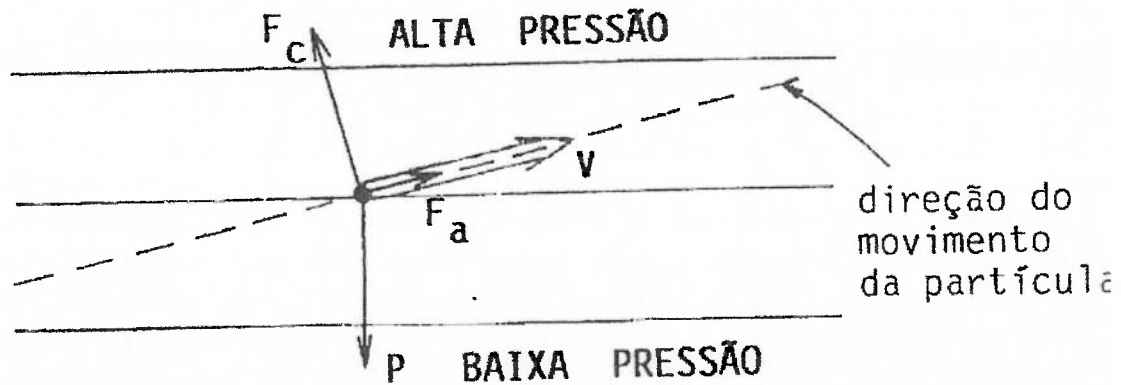


Figura (2.6.1): Vento na camada limite atmosférica no hemisfério sul.

F_c : Força de Coriolis, P : Força de pressão. Reproduzido de Blessmann (1995)

Essa mudança de direção da velocidade média ocorre no sentido anti-horário no hemisfério sul e no sentido horário no hemisfério norte. O ângulo da mudança de direção imposta pelo atrito é nulo no extremo superior da camada-limite atmosférica e varia crescentemente com a maior proximidade da superfície terrestre, até alcançar valores superiores a 45° , em função da rugosidade do terreno. (Pedlosky, 1986; Holton, 1992; Blessmann, 1995).

O escoamento na CLA, exceto sob condições atmosféricas fortemente estáveis, é altamente turbulento e se desenvolve sobre uma superfície aerodinamicamente rugosa. Schlichting (1979) apresenta a teoria clássica das camadas limites e o estudo matemático das equações que governam seu movimento. Hinze (1975) aprofunda a análise da camada limite turbulenta. Hama (1954) registra algumas experiências sobre o desenvolvimento da camada limite em superfícies lisas e rugosas de túneis de vento.

Raupach *et al.* (1991) e Maruyama & Ishizaki (1998) estudam características comuns apresentadas pelos escoamentos turbulentos desenvolvidos sobre superfícies rugosas

e os escoamentos na CLA. Plate (1982) discute a influência dos diversos estados da atmosfera no desenvolvimento da CLA.

2.7 Estabilidade da atmosfera

Na atmosfera também se observa a ocorrência de situações de equilíbrio estável, neutro e instável.

Uma vez que a pressão atmosférica local é decorrente do peso da massa de ar acima do nível considerado, decrescendo, portanto, com o aumento da altitude, certa massa de ar ao se deslocar verticalmente será expandida ao subir e comprimida ao descer, para que se adapte às condições existentes no nível alcançado.

Ao se expandir (queda de pressão), a massa de ar se resfria e ao sofrer um aumento de pressão (compressão), essa massa de ar se aquece.

O movimento vertical de uma massa de ar ocorre com velocidades suficientemente elevadas para permitir que se considere que não ocorre troca de energia térmica entre a massa de ar em movimento e a atmosfera circunvizinha. Ou seja, o escoamento pode ser considerado adiabático.

Pode-se considerar que o gradiente térmico do ar seco em movimento ascendente é de aproximadamente $-1^{\circ}\text{C} / 100\text{m}$. Com o aumento da umidade, esse valor decresce, podendo chegar à metade desse valor.

Dessa forma, uma massa de ar estará em equilíbrio neutro, se a queda de temperatura da massa de ar ascendente, for igual à variação de temperatura da atmosfera com a elevação da altitude. Nessas condições, diz-se que a temperatura possui um gradiente vertical adiabático.

Caso a temperatura do ar circunvizinho decresça de forma mais intensa que o gradiente térmico adiabático, uma massa de ar que suba adiabaticamente possuirá maior temperatura e ficará mais leve que o ar circundante e continuará a subir, formando correntes de convecção, com o intercâmbio de massas de ar de diferentes altitudes. Assim, se observa que a atmosfera está em equilíbrio instável e que sua temperatura apresenta um gradiente vertical super adiabático.

Caso a queda de temperatura do ar circundante seja menos intensa que o gradiente vertical adiabático, ou mesmo caso a temperatura do ar circundante aumente com altitude (inversão térmica), uma massa de ar que sobe adiabaticamente ficará mais fria e pesada que o ar que a envolve e tenderá a retornar à sua posição de origem. Diz-se, nessa situação, que a atmosfera está em equilíbrio estável.

2.8 A modelagem física das condições reais

Quando, em face ao elevado custo e mesmo, às vezes, à impossibilidade técnica de se trabalhar com a realidade em estudos de campo, busca-se a solução na modelagem, física ou matemática.

Os modelos matemáticos podem ser divididos em analíticos e numéricos. Os modelos analíticos estão fundamentados em soluções particulares das equações básicas que regem o processo em estudo. Porém, as equações de Navier-Stokes, por serem não-lineares e de elevada complexidade, possuem poucas soluções analíticas, restringindo fortemente a aplicação de modelos analíticos.

Os modelos numéricos trabalham com uma malha de pontos para descrever o escoamento dentro da fronteira, para a qual são impostas as condições de contorno conhecidas. As equações básicas em derivadas parciais são substituídas neste caso por

diferenças finitas ou volumes finitos que, por sua vez, são resolvidas nos nós da malha através de programas interativos em computadores digitais (Plate, 1999).

Contudo, os modelos numéricos ainda não são capazes de detalhar o campo de turbulência com precisão suficiente, e nem permitem estudar problemas que envolvam escalas geométricas em um intervalo muito amplo, como indicado em Plate (1999).

Nos modelos físicos, geralmente, tanto por economia quanto por comodidade, trabalha-se com uma versão reduzida da realidade. Para estudar a transição do regime de laminar para o turbulento, por exemplo, a instalação ideal deve ser capaz de desenvolver escoamentos altamente uniformes e com níveis de turbulência ínfimos. Para estudar o comportamento de uma estrutura submetida à ação dos ventos, intrinsecamente dotados de considerável turbulência, a ferramenta mais adequada para a modelagem física é o túnel de vento de camada limite.

O uso do túnel de vento de camada limite permite cotejar os resultados da modelagem numérica com os observados experimentalmente, para validação das hipóteses assumidas na modelagem numérica e para propiciar ao pesquisador maiores informações sobre os fenômenos estudados.

Pode-se dizer que os túneis de vento se comportam como computadores analógicos, integrando as equações em derivadas parciais que governam a Mecânica dos Fluidos (Gorecki, 1998).

Na busca de um modelo para um fenômeno da natureza, frequentemente se observa a impossibilidade de atender a todos os critérios de semelhança, salvo se a escala de comprimentos for 1:1. Dessa forma, o investigador precisará contornar as limitações, respeitando sempre, os parâmetros relevantes para o caso em estudo (Simiu & Scanlan, 1996).

Uma característica importante da modelagem física, como a executada em túneis de vento, é que ao trabalhar com um fluido real, as equações de Navier-Stokes são plenamente

atendidas, permitindo a modelagem das condições de contorno de forma sensivelmente apurada (Durañona, 2003).

2.9 Requisitos básicos para a simulação física

O escoamento tipo CLA pode ser descrito através das equações de conservação da massa, da quantidade de movimento e da energia térmica, além da equação de estado do fluido (Cermak, 1981; Plate, 1982; Cermak, 1987).

Trabalhando-se com o teorema dos π 's de Buckingham (veja, e.g., Streeter, 1909), obtêm-se parâmetros adimensionais que representam as relações entre as grandezas físicas influentes no fenômeno. Impondo a igualdade entre esses parâmetros adimensionais do modelo e do protótipo, respeitam-se as mesmas condições físicas para ambos, e pode-se afirmar que os resultados obtidos em escala são representativos, em escala, dos fenômenos reais. Denomina-se semelhança completa quando todos os grupos adimensionais do protótipo e do modelo possuem o mesmo valor.

Como exemplo de aplicação do teorema dos π 's, considere um corpo imerso em um escoamento, submetido a uma força F , função de seis parâmetros apenas: massa específica, ρ ; velocidade do escoamento, U ; alguma dimensão característica, L ; alguma frequência, n ; viscosidade do fluido, μ ; e a aceleração da gravidade, g . Dessa forma, pode-se exprimir a dependência dimensional como (Simiu & Scanlan, 1996):

$$F = \rho^\alpha \cdot U^\beta \cdot L^\gamma \cdot n^\delta \cdot \mu^\epsilon \cdot g^\zeta \quad (2.9.1)$$

na qual α , β , γ , δ , ϵ e ζ são os expoentes a serem determinados. Há três grandezas básicas: massa, M; comprimento, L e tempo, T; às quais todos os parâmetros acima são

dimensionalmente relacionados. Substituindo cada parâmetro acima pelo seu equivalente dimensional, obtém-se:

$$\frac{M \cdot L}{T^2} = \left(\frac{M}{L^3}\right)^\alpha \left(\frac{L}{T}\right)^\beta (L)^\gamma \left(\frac{1}{T}\right)^\delta \left(\frac{M}{L \cdot T}\right)^\varepsilon \left(\frac{L}{T^2}\right)^\zeta \quad (2.9.2)$$

da qual pode-se obter três equações independentes, em função dos expoentes de cada grandeza:

$$\begin{aligned} \text{M: } 1 &= \alpha + \varepsilon \\ \text{L: } 1 &= -3\alpha + \beta + \gamma - \varepsilon + \zeta \\ \text{T: } -2 &= -\beta - \delta - \varepsilon - 2\zeta \end{aligned} \quad (2.9.3)$$

Essas equações podem ser resolvidas para qualquer conjunto de três expoentes, em função dos outros três expoentes, como por exemplo:

$$\begin{aligned} \alpha &= 1 - \varepsilon \\ \beta &= 2 - \varepsilon - \delta - 2\zeta \\ \gamma &= 2 - \varepsilon + \delta + \zeta \end{aligned} \quad (2.9.4)$$

De tal forma que a expressão (3.1.1) pode ser apresentada como:

$$F = \rho^{1-\varepsilon} \cdot U^{2-\varepsilon-\delta-2\zeta} \cdot L^{2-\varepsilon+\delta+\zeta} \cdot n^\delta \cdot \mu^\varepsilon \cdot g^\zeta \quad (2.9.5)$$

A equação 3.1.5 pode ser rearranjada para:

$$F = \rho \cdot U^2 \cdot L \cdot \left(\frac{L \cdot n}{U}\right)^\delta \left(\frac{\mu}{\rho \cdot U \cdot L}\right)^\varepsilon \left(\frac{L \cdot g}{U^2}\right)^\zeta \quad (2.9.6)$$

Desse relacionamento, conclui-se que os coeficientes adimensionais de força são funções dos números adimensionais $\frac{L \cdot n}{U}$, $\frac{\mu}{\rho \cdot U \cdot L}$, e $\frac{L \cdot g}{U^2}$.

De forma análoga, aplicando a análise dimensional à equação de conservação de massa, percebe-se que a semelhança cinemática depende da semelhança geométrica. Deve-se,

portanto, reduzir os objetos imersos no escoamento na mesma proporção aplicada para a altura da camada do escoamento em estudo, além de outras características da realidade física em estudo como:

- A distribuição de velocidades médias;
- A distribuição de intensidade de turbulência;
- As escalas de turbulência;
- O espectro das flutuações turbulentas.

Analogamente, da equação da conservação da quantidade de movimento, conclui-se que haverá semelhança dinâmica se cada um dos seguintes parâmetros se mantiver igual em ambos os sistemas:

- Número de Reynolds, $Re = \frac{U \cdot L}{\nu}$; (2.9.7)

- O número de Richardson, $Ri = \frac{\Delta\theta}{\theta} \left(\frac{L \cdot g}{U^2} \right)$; (2.9.8)

- E o número de Rossby, $Ro = \frac{U}{L \cdot f_c}$. (2.9.9)

A semelhança térmica será obtida se for possível assegurar que não ocorra variação dos adimensionais abaixo entre o modelo e o protótipo.

- Número de Prandtl, $Pr = \frac{\mu \cdot Cp}{K}$; (2.9.10)

- Número de Eckert, $Ec = \frac{U^2}{Cp \cdot \theta}$; (2.9.11)

- Número de Reynolds, $Re = \frac{U \cdot L}{\nu}$; (2.9.7)

- Número de Strouhal, $St = \frac{L \cdot n_s}{U}$. (2.9.12)

Nas expressões acima, C_p é o calor específico a pressão constante, K é a condutividade térmica, θ é a temperatura absoluta e n_s é a frequência de desprendimento de vórtices de um corpo não aerodinâmico de diâmetro D .

O número de Re expressa a relação entre as forças viscosas e as forças de inércia, o número de Eckert expressa a relação entre a energia cinética do escoamento e a energia interna do fluido. O número de Prandtl descreve a relação entre as espessuras relativas das camadas limite hidrodinâmica e térmica.

Para assegurar que, o estudo no modelo em túnel de vento seja representativo das condições em que se deseja avaliar o protótipo, é necessário acrescentar à semelhança geométrica e à igualdade dos adimensionais pertinentes, semelhança nas condições iniciais e de contorno com a realidade em estudo.

Por exemplo, no caso de modelagem de escoamentos do tipo CLA seria ideal assegurar, adicionalmente a semelhança entre a rugosidade do terreno, a distribuição de temperatura ao nível do solo, as estruturas do escoamento acima da CLA e os gradientes horizontais de pressão e que a camada limite simulada se encontre em equilíbrio.

Deve-se atentar que na modelagem do escoamento da CLA sobre um prédio, por exemplo, “modelo” não é apenas a maquete do edifício, mas também as condições iniciais e de contorno. Dessa forma, pode ser necessário impor semelhança entre os valores observados pelo protótipo e pelo modelo de características que não pertençam à região da maquete, mas que condicionem o escoamento sobre ela, como, por exemplo, a rugosidade do terreno, as distribuições de temperatura ao nível do solo, as estruturas do escoamento acima da CLA e os gradientes horizontais de pressão.

A exigência de igualdade do número de Reynolds pode ser desconsiderada se o escoamento é turbulento e completamente desenvolvido em ambas as situações. Uma vez que

o escoamento se desenvolve sobre superfícies rugosas, tanto na realidade quanto no modelo, a partir de um valor suficientemente alto desse parâmetro.

O número de Rossby descreve o efeito de Coriolis na rotação do vetor velocidade do escoamento com a altura; e seu valor, em um modelo, será normalmente, várias ordens de grandeza maior que o número de Rossby no protótipo correspondente, porque o vetor da velocidade média não trocará de direção com a altura como na CLA do protótipo (Cermak (1987); Plate (1982)). Pode-se dizer que esta diferença entre modelo e protótipo é de pequena relevância, por exemplo, no efeito do vento sobre um edifício de grande altura (*e.g.*, 200 m), devendo ser considerada no estudo dos processos de dispersão de poluentes a distâncias superiores a 5 km. Esta dependência condiciona a distância até a qual pode ser feita, com segurança, a modelagem de fenômenos difusivos em túneis de vento de camada limite.

Deve-se assegurar a igualdade do número de Richardson do modelo e do protótipo, para estudar fluxos termicamente estratificados, ou quando o escoamento é alterado por efeitos convectivos. Nessas situações, é possível o uso de túneis de água com estratificação na densidade ou túneis de vento cujos pisos e/ou tetos possam ser esfriados ou aquecidos.

O número de Strouhal, aplicado a CLA, representa a variação das condições do escoamento atmosférico não estacionário. Geralmente pode ser desconsiderado em razão do processo de modificação ocorrer de forma lenta, no transcorrer de horas. No processo de emissão de vórtices ao redor de uma estrutura, que permitirá o estudo da oscilação da construção e dos efeitos no conforto humano, pela frequência de vibração imposta pelo vento, este parâmetro deve ser considerado.

2.10 Abordagem da norma ABNT 6123

O esforço impingido pelo vento sobre a estrutura pode ser expresso por:

$$F = A\Delta p = Ac_p\rho U^2 \quad (2.10.1)$$

onde

F é a força atuante na estrutura;

A é a área sobre a qual a diferença de pressão atua;

Δp é a diferença de pressão;

c_p é o coeficiente de pressão;

ρ é a massa específica do fluido;

U é a velocidade média do escoamento.

A norma brasileira de forças devido ao vento em edificações trabalha com uma velocidade básica, de referência, cujo valor é majorado ou reduzido em função de alguns fatores. Esses fatores consideram as condições da localidade da estrutura, as dimensões da edificação, a responsabilidade e a vida útil esperada para a estrutura através de cálculos estatísticos. São valores conservadores, determinados para geometrias pouco complexas. Construções que fogem do usual, quer na geometria, quer na localização ou na responsabilidade devem ser objeto de estudos específicos.

Dessa forma, para a norma brasileira pode-se determinar uma velocidade equivalente, expressa por:

$$U_{equivalente} = U_{isopleta} \cdot Fatores \quad (2.10.2)$$

A Figura (2.10.1) apresenta e.g., as isopletas do Brasil e a Figura (2.10.2), as isopletas do Estado de São Paulo. As isopletas são curvas obtidas por tratamento estatístico das velocidades registradas e representam a máxima velocidade média medida sobre 3s, que pode ser excedida em média uma vez em 50 anos, em terreno aberto e plano, a 10 m de altura.

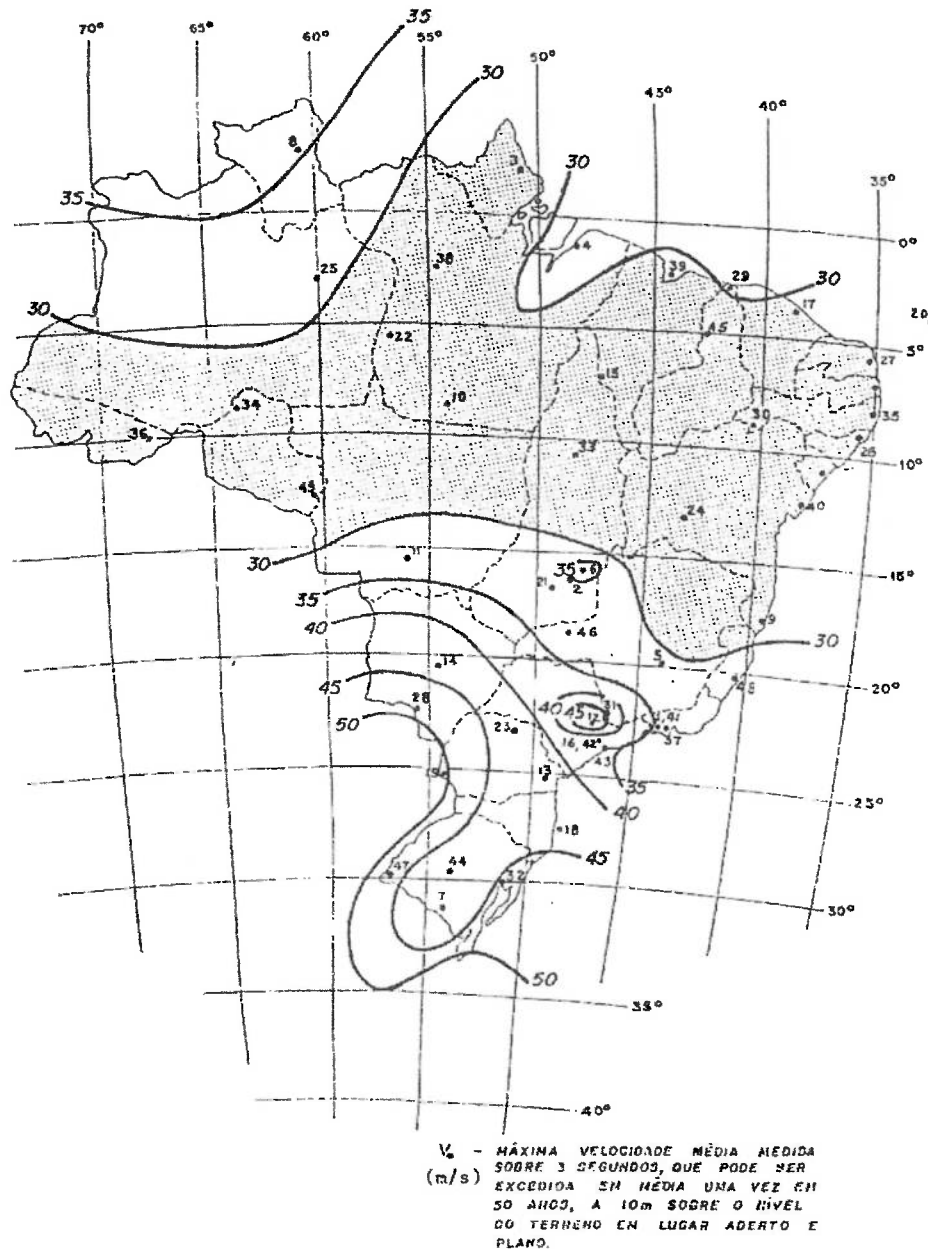


Figura (2.10.1): Gráfico das isopletas da velocidade básica do vento, em m/s, para o Brasil. Reproduzido de NBR 6123.

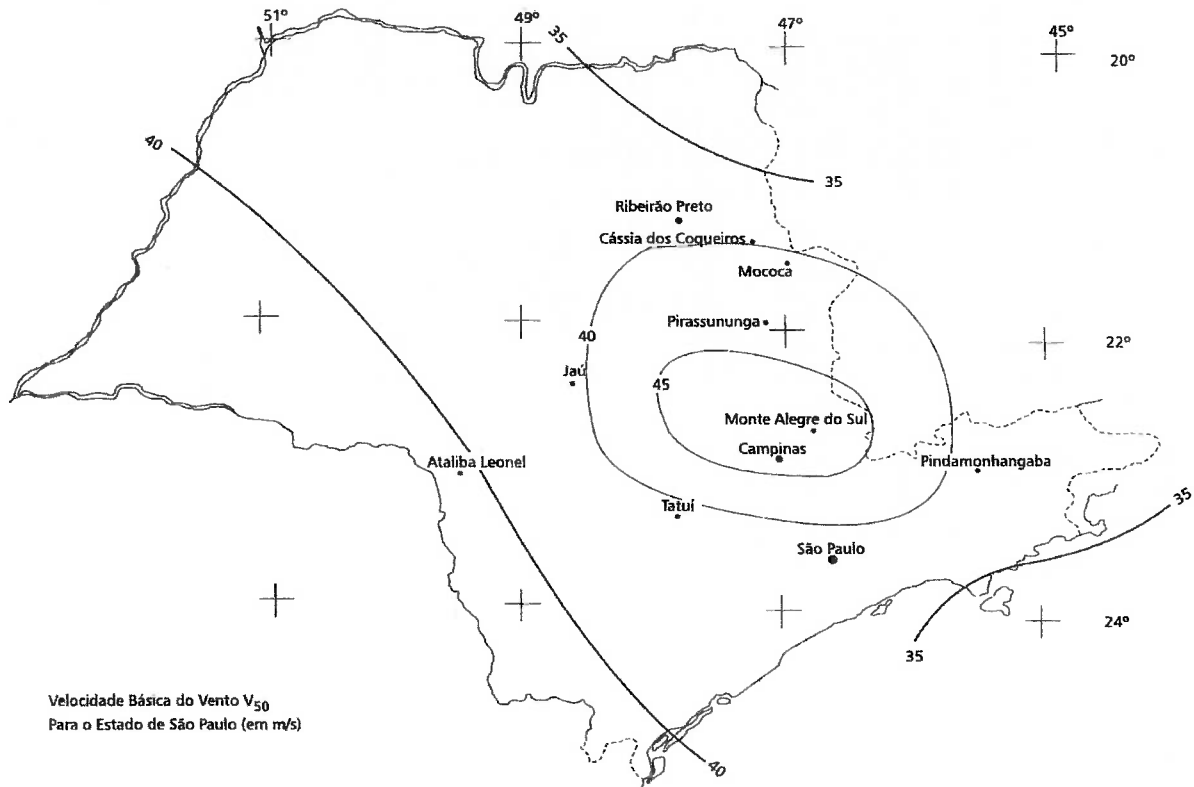


Figura (2.10.1.2): Isopletas da velocidade básica do vento, em m/s, para o Estado de São Paulo. Reproduzido Pitta, 2001.

Para a determinação dos fatores, a norma ABNT NBR 6123 trabalha com:

1. Cinco categorias de rugosidade do terreno

- Categoria I: Terreno liso (mar calmo);
- Categoria II: Terreno aberto, em nível, com poucos obstáculos isolados (pradaria);
- Categoria III: Terreno plano ou ondulado com obstruções, tais como sebes e muros (subúrbios);
- Categoria VI: Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, (subúrbios densamente construídos de grandes cidades, florestas);

- Categoria V: Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados (centros de grandes cidades e complexos industriais bem desenvolvidos).

2. Três variações de topografia;

- Terrenos planos ou fracamente acidentados;
- Taludes e morros;
- Vales profundos

3. Três classes de dimensões de edifícios;

- Classe A : maior extensão horizontal ou vertical não exceda 20 m.
- Classe B : (superfície frontal) entre 20 m e 50 m.
- Classe C : (superfície frontal) exceda 50 m.

4. Cinco grupos para avaliação estatística;

- Grupo 1: hospitais, quartéis de bombeiros, centrais de comunicação;
- Grupo 2: hotéis, residências, escritórios, comércios;
- Grupo 3: depósitos, silos, armazéns;
- Grupo 4: vedações (telhas, vidros, etc.);
- Grupo 5: estruturas temporárias.

2.11 O vento atmosférico e o terreno

Como o movimento das massas de ar na camada-limite atmosférica é altamente turbulento, o fenômeno pode ser estudado em função da rugosidade do terreno sobre o qual a camada limite se desenvolve.

A altura da camada-limite atmosférica cresce com o incremento da altura das estruturas. Davenport (1960) sugere uma lei exponencial para a determinação da velocidade média (U_z) do vento a uma altura z do solo em função da relação entre a altura na qual se deseja determinar a velocidade média e a altura gradiente:

$$U_z = U_g \cdot \left(\frac{z}{z_g} \right)^\alpha \quad (2.11.1)$$

Davenport considera a altura gradiente, z_g , como aquela na qual se atinge a velocidade gradiente, $U_g = 160$ km/h.

A Figura (2.11.1) apresenta valores típicos de ambas as constantes: altura gradiente e α como proposto por Davenport, para três superfícies típicas.

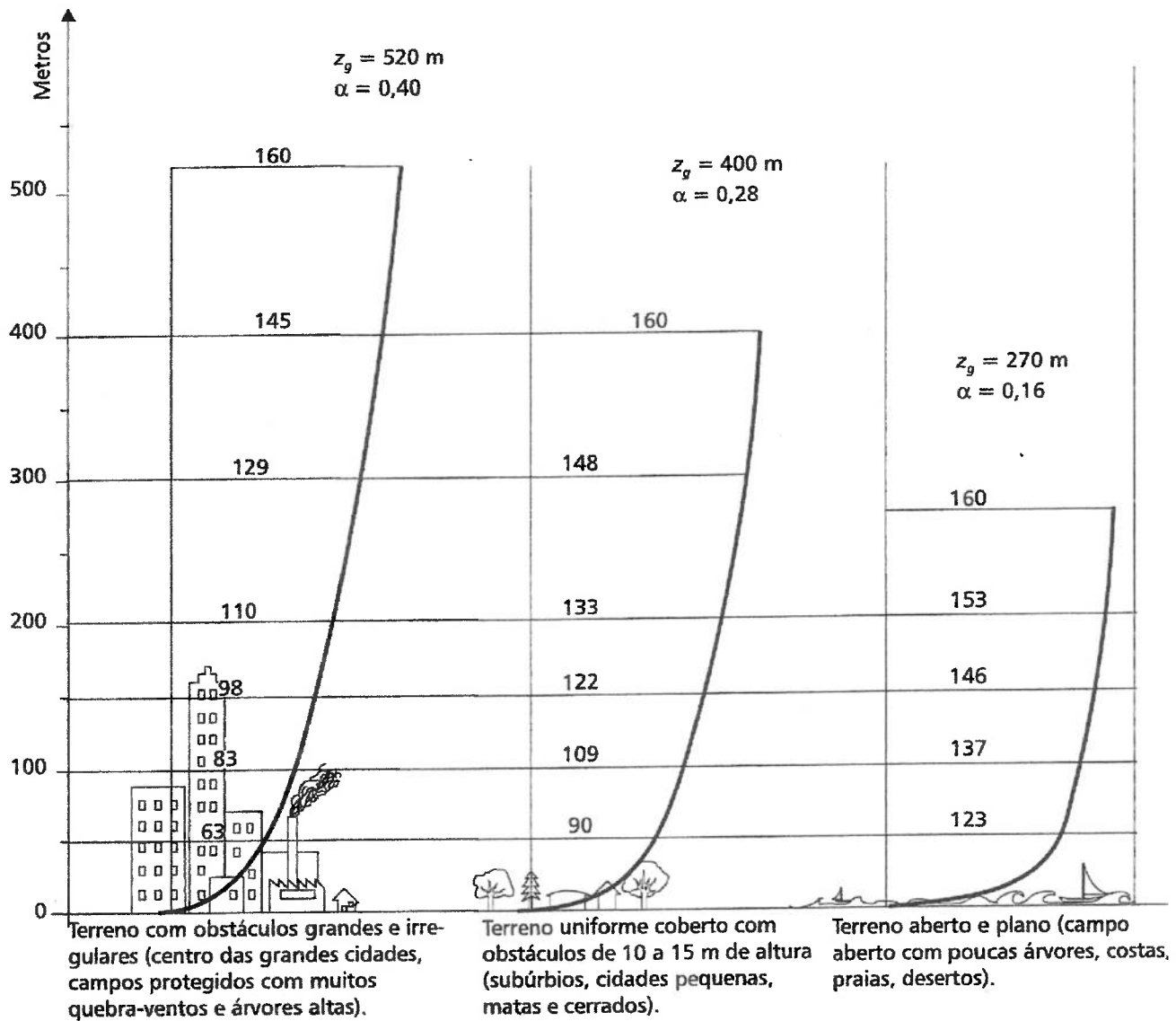


Figura (2.11.1) Perfis de velocidade média do vento em km/h de acordo com a rugosidade do terreno. Reproduzido Pitta, 2001.

A Tabela 2.11.1 apresenta uma classificação dos terrenos em função do comprimento de rugosidade z_0 .

Tabela 2.11.1 Classificação dos tipos de terreno. Reproduzido de Counihan (1975)

Tipo de terreno	z_0 (cm)
Liso	0,001 – 0,1
Rural	0,1 – 20
Sub-urbano	100 – 150
Urbano	150 – 400

CAPÍTULO 3

CARACTERÍSTICAS DE PROJETO E FUNCIONAMENTO

Essencialmente, um túnel de vento é uma instalação cujo objetivo é produzir um fluxo de ar em movimento relativo ao objeto de estudo.

Os ensaios aerodinâmicos começaram com o modelo sendo movimentado através do meio como o uso da queda livre de braços rotatórios descritos por Rae & Pope (1984) ou observando o seu comportamento sob a ação do vento natural. O desenvolvimento dessas instalações ocorreu basicamente em razão da indústria aeronáutica. Rae & Pope (1984) e Bradshaw & Pankhurst (1964) descrevem alguns tipos de túneis de vento existentes, critérios de projeto e aplicações, dando maior ênfase aos usos aeronáuticos, enquanto que em Cermak (1975), em Gorek (1998) e Holmes (2001), a abordagem privilegiou a evolução dos túneis de vento não aeronáuticos.

O primeiro túnel de vento, movido por uma máquina a vapor, foi construído aparentemente por Francis Herbert Wenham na Inglaterra em 1871, para a Sociedade Aeronáutica da Grã Bretanha, como descreve Gorecki (1998). Por outro lado, se acredita que o primeiro uso de um túnel de vento para medir os esforços devido aos ventos sobre edifícios, se deve a Kernot, de Melbourne (Austrália) e data de 1839, conforme relata Holmes, 2001. Kernot utilizou o túnel de vento para estudar o esforço sobre cubos, pirâmides, cilindros e tetos de diferentes inclinações. Quase ao mesmo tempo, em 1840, em Copenhague (Dinamarca), Irminger utilizou a tiragem de uma chaminé para estudar as pressões devidas a ação do vento sobre corpos de formas simples.

Mais adiante o uso de túneis de vento de tipo aeronáutico foi estimulado pelo desenvolvimento da aviação, no começo do século XX, conforme se registra em Rae & Pope (1984) e Bradshaw & Pankhurst (1964). Dessa maneira se construíram muitos túneis de vento

pequenos, de potências próximas de 5 hp, na Europa e nos Estados Unidos, para se proceder a investigações básicas nessa área.

Em meados 1930, o túnel de vento gradualmente começa a ser utilizado como ferramenta para solução de problemas relacionados à engenharia do vento (Gorecki (1998), Cermak (1975)). Naquele momento se buscava estudar a ação do vento sobre edifícios, torres, pontes e outros tipos de estruturas, porém sem se ater às características do escoamento na natureza. É a partir do trabalho de Jensen (1958) que se começa a reconhecer a necessidade de se modelar não só a distribuição de velocidades do vento atmosférico com a altura, como a distribuição de sua turbulência para se obter resultados mais representativos.

Em função da forma construtiva, os túneis podem ser classificados como proposto por Holmes (2001):

- De circuito aberto ou de circuito fechado;
- De sucção ou de impulsão.

3.1 Túnel de vento de sucção de circuito aberto

Na zona de trabalho de um túnel de vento de sucção se obtém um escoamento do ar de melhor qualidade, mais próximo de um escoamento uniforme, mas se tem uma pressão significativamente menor que a pressão atmosférica, o que pode induzir um escoamento de ar exterior, caso haja comunicação entre as duas regiões. A Figura (3.1.1) ilustra as diversas regiões de um túnel de vento de sucção de circuito aberto, com duas seções de ensaios.

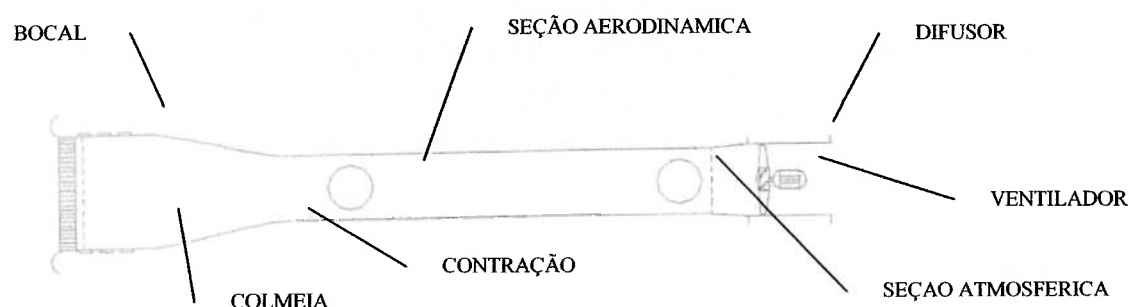


Figura (3.1.1): Diagrama de Túnel de Vento de sucção de circuito aberto

O escoamento ingressa no túnel por um bocal especialmente projetado para evitar que surjam assimetrias no escoamento ou que ocorra o descolamento da camada limite. Segue através de uma colméia, passando por uma tela para uniformizar o escoamento, destruindo os vórtices gerados pela admissão.

Em seguida, é conduzido por uma contração, projetada para impedir o desprendimento da camada limite e assegurar baixa turbulência no escoamento admitido.

Na zona de trabalho, são introduzidas perturbações ao escoamento para se obter no túnel, as características do vento atmosférico sobre a região em estudo. são utilizados diversos tipos de dispositivos para a produção dessa perturbação, como por exemplo, correntes, telas, jatos, blocos, barreiras, etc. No capítulo 5 serão apresentados alguns métodos de desenvolvimento da camada limite em túneis de vento atmosféricos e os elementos utilizados em cada método para alcançar as características desejadas no escoamento.

3.2 Túnel de vento de circuito fechado

Nessa configuração a entrada é eliminada e é acrescentado um circuito de retorno do ar, precisando, para isso de quatro curvas de 90° ou de duas de 180°. A Figura (3.2.1) apresenta um esquema de um túnel de vento com essas características.

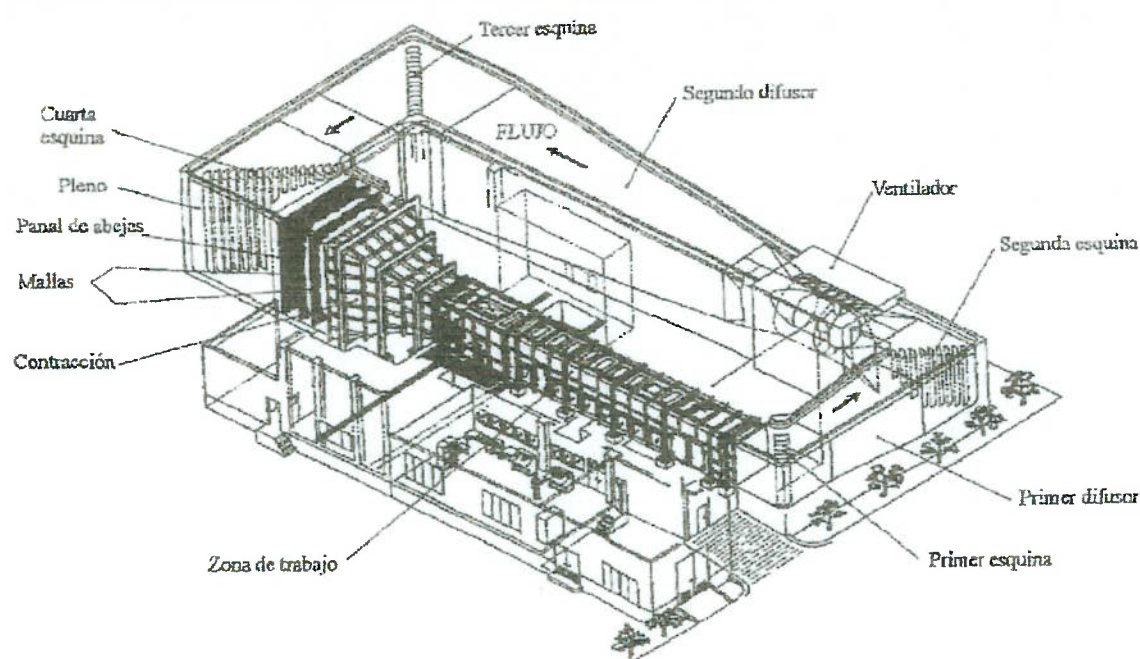


Figura (3.2.1): Túnel de vento de sucção de circuito fechado. Reproduzido de Cataldo (1986)

Da mesma forma que nos túneis de vento abertos, nesse caso também é necessária a presença de colméias e de telas para uniformização do escoamento e estes elementos são normalmente instalados no pleno. Estes túneis contam, além disso, com uma contração, uma zona de trabalho e um circuito de retorno de ar (com esquinas nas quais são instalados orientadores de fluxo especialmente projetados para guiar o escoamento de maneira a se obter uma boa uniformidade), o ventilador e um ou mais difusores. Os túneis de vento de circuito fechado podem ser projetados para consumir uma potência menor que os túneis de

vento de circuito aberto de mesma velocidade e de dimensões da zona de trabalho semelhantes, e as características do escoamento do ar em seu interior são independentes das perturbações externas, inclusive a baixas velocidades. Nesse tipo de túnel geralmente se faz necessário contar com resfriadores para retirar o calor aportado ao escoamento pelo motor do ventilador e também o originado nos diferentes processos que implicam perda, para que não ocorra contínua elevação da temperatura do escoamento. Por outro lado, esses túneis podem ser empregados para gerar camadas limites termicamente estratificadas utilizando sistemas de aquecimento e de resfriamento com menor consumo de energia. Esse tipo de camada limite é necessário, por exemplo, para realizar alguns estudos de transporte de poluentes. Obtêm-se como vantagem adicional, por exemplo, um menor nível de ruído, e a possibilidade de trabalhar com a zona de trabalho na pressão atmosférica ou contar com outra zona de trabalho de características diferentes no ramo de retorno. Contudo, estes túneis de vento exigem uma maior disponibilidade de espaço, maior investimento inicial, e um sistema de controle de temperatura.

3.3 Túnel de vento de circuito aberto de impulsão

Outra forma construtiva possível é instalar o ventilador, geralmente centrífugo, a montante da zona de trabalho, obtendo um túnel de vento de impulsão. Essa configuração exige retificadores de escoamento e telas para diminuir a rotação impingida ao escoamento. Porém, obtêm-se uma zona de trabalho com uma pressão mais próxima da pressão ambiente e um escoamento na seção de ensaios, menos influenciável pelas condições do ambiente ao redor do túnel. A Figura (3.3.1) apresenta uma visão geral de um túnel de vento de impulsão de circuito aberto.

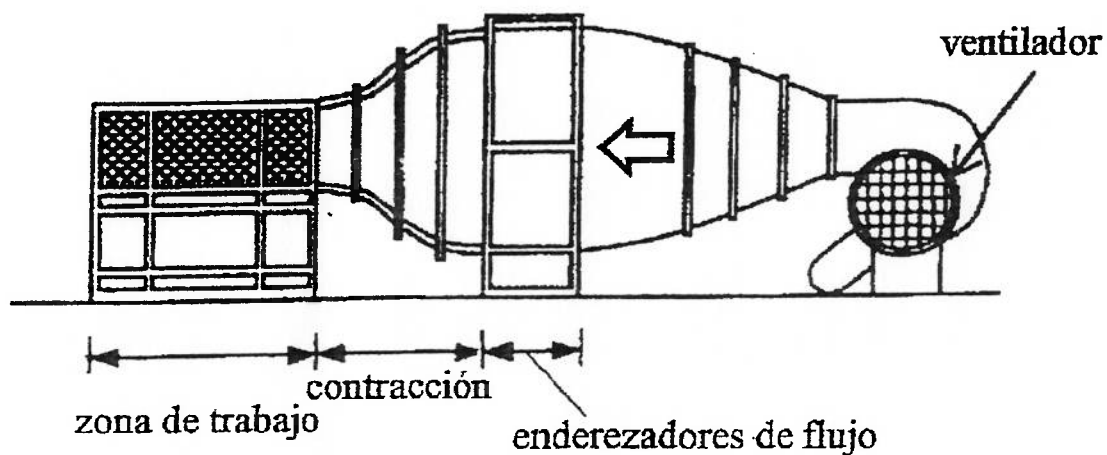


Figura (3.3.1): Túnel de vento de impulsão de circuito aberto. Reproduzido de Cataldo (1986).

3.4 Características do Túnel de Vento Atmosférico do IPT

O equipamento utilizado nesse trabalho possui duas seções de testes, permitindo executar ensaios aerodinâmicos, que exigem escoamento uniforme e intensidades de turbulência muito baixas, assim como também ensaios de camada limite atmosférica que demandam perfis de velocidade e de intensidade de turbulência específicos.

A Figura (3.4.1) apresenta uma imagem do túnel de vento utilizado nas medições deste trabalho.



Figura (3.4.1): Visão geral do túnel de camada limite.

3.5 Descrição do túnel de vento

O túnel de vento do Centro de Metrologia de Fluidos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (CMF/IPT) é um túnel de vento de sucção de circuito aberto, com uma zona de trabalho de 28 metros de comprimento, 2 metros de altura e 3 de largura e trabalha com velocidades de até 25 m/s. Em razão dos estudos pretendidos, o projeto do túnel buscou adicionalmente, à redução das perdas de carga, assegurar, na seção de entrada da zona de trabalho, alta uniformidade do escoamento e reduzida turbulência. A Figura (3.5.1) apresenta os componentes principais do túnel.

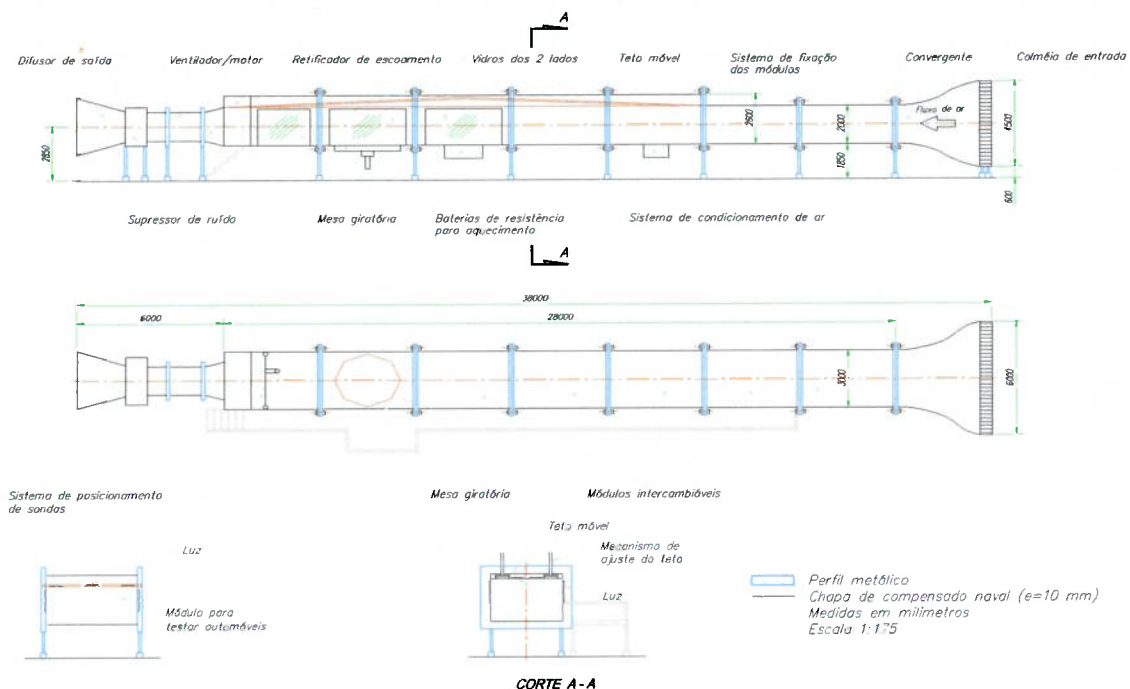


Figura (3.5.1): Esquema do túnel de vento do Instituto de Pesquisas Tecnológicas

O ingresso do escoamento ao interior do túnel ocorre através do bocal de admissão, especialmente projetado para conduzir o escoamento evitando assimetrias e desprendimentos da camada limite. Em seguida passa através de um retificador de escoamento constituído de uma colméia de tubos hexagonais de 450 mm de comprimento, duas telas de malha, ambas com mesma malha. Na sequência, há um convergente, dimensionado para não gerar descolamento da camada limite, conduzindo o escoamento para a zona de trabalho.

Na zona de trabalho, há duas seções de ensaios. A primeira, próxima da seção de entrada, é voltada para o estudo de fenômenos aerodinâmicos, exigindo reduzida turbulência e escoamento uniforme. Essa seção tem dimensões de 3 m de comprimento, 3 m de largura e de 2 m de altura. A segunda, mais próxima do ventilador, é voltada para o estudo do ambiente atmosférico e exige, em sua seção de entrada, condições específicas de perfil de velocidades e de intensidades de turbulências. Nessa seção, as dimensões são de 3 m de comprimento, 3 de largura e com a possibilidade de variar a altura, entre 2 m e 2,60 m. Em ambas as seções, há

mesas giratórias de 2,8 m de diâmetro, que possibilitam a rotação do modelo, de forma a se obter diferentes direções de incidência do escoamento.

O teto da zona de trabalho pode ser elevado, permitindo controlar o gradiente de pressões ao longo do túnel. O ventilador do túnel, axial de 8 pás, é acionado por um motor de corrente alternada. A sua rotação é controlada através de um inversor de frequência.

3.6 Características construtivas do equipamento

As características construtivas e operacionais mais importantes são

- Comprimento total: 38,6 m
- Comprimento da zona de trabalho: 28 m
- 2 seções de testes: piso rotativo de Ø 2,8 m.
- Altura da seção de teste: 2 m
- Largura da seção de testes: 3 m
- Faixa de velocidade do ar: de 0 a 25m/s

3.7 Instrumentação

O Laboratório de Medições Ambientais, que abriga o túnel de vento, possui anemômetros de fio quente DANTEC, bocais de calibração DISA TYPE 55D45, tubos de Pitot-Prandtl conectados a um sistema de aquisição de tomadas de pressão com 16 canais SCANIVALVE. Para a aquisição do sinal do anemômetro de fio quente, o laboratório possui

uma placa conversora A/D National Instruments ATMI016E10 controlada por um computador pessoal.

Para o deslocamento da sonda o túnel está equipado com um robô posicionador de três eixos, com incerteza de posicionamento próxima de 0,3 mm.

Para a medição de temperaturas foram utilizados termistores e termômetros de resistência do tipo PT100.

CAPÍTULO 4

CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO

Na camada-limite do escoamento turbulento pode ser observada a ocorrência de três regiões com características diferentes. Para propiciar melhor compreensão das diferentes regiões, opta-se por dividir a camada desenvolvida sobre uma superfície em três regiões:

- Subcamada rugosa;
- Subcamada logarítmica;
- Subcamada potencial.

A Figura (4.1) apresenta uma ilustração dessas três regiões.

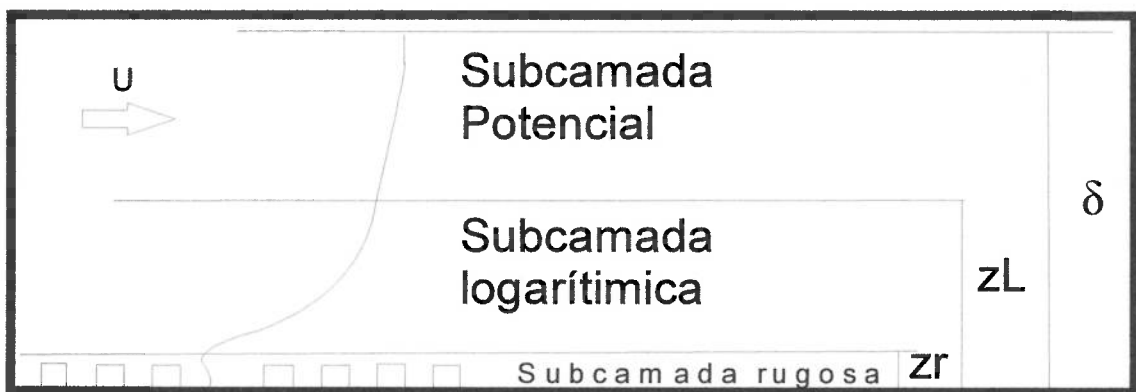


Figura (4.1): Regiões de uma CL

4.1 Subcamada rugosa

A região mais próxima da superfície sobre a qual se desenvolve a camada limite é denominada subcamada rugosa. Nessa região, o escoamento médio sofre a influência direta da presença dos obstáculos que se encontram sobre a superfície, que exercem uma tensão de cisalhamento τ_o sobre o fluido em escoamento.

Dessa forma, as características do escoamento dependem fortemente da geometria dos obstáculos, variando sensivelmente com a posição relativa dos elementos da rugosidade (Hama (1954)). O trabalho de Raupach *et al.* (1991) demonstra que o escoamento nesta subcamada é tridimensional, fortemente heterogêneo, e se desenvolve até uma altura z_r , que varia entre 1 a 5 vezes a altura média dos elementos de rugosidade.

4.2 Subcamada inercial ou logarítmica

Imediatamente acima da subcamada logarítmica, ocorre a subcamada inercial ou logarítmica, que se desenvolve até uma altura z_L , próxima de 15 % da altura total da CLA. Nessa camada as características do escoamento dependem da tensão de cisalhamento média exercida em sua base, de valor igual ao da tensão de cisalhamento média τ_o que a superfície exerce na subcamada rugosa, sendo independente das outras propriedades da superfície, como sugerido por Jackson (1981). Esta subcamada se caracteriza por apresentar uma distribuição de velocidade média na altura que se ajusta aproximadamente a uma lei logarítmica e um fluxo vertical turbulento da quantidade de movimento aproximadamente constante com a altura, como se tem podido comprovar experimentalmente, devido às características das componentes turbulentas de pequena escala.

Nessa camada, a velocidade varia de acordo com a lei que representa a continuidade sob condições neutras:

$$U = \frac{u_*}{\kappa} \cdot \text{Log} \left(\frac{z - z_d}{z_0} \right) \text{ para } z_r < z < z_L \quad (4.2.1)$$

Nesta expressão, U é a velocidade média a uma altura z , $u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$ é a velocidade de atrito, κ é uma constante universal, denominada constante de von Karman ($\kappa \sim 0,4$ a $0,41$), z_d é a altura do plano de deslocamento nulo e z_o o comprimento de rugosidade.

O trabalho de Schlichting (1979) demonstra que u_* é uma velocidade característica das flutuações turbulentas da velocidade e também uma medida da transferência de quantidade de movimento devida a essas flutuações. Jackson (1981) apresenta uma interpretação dos parâmetros que intervêm na formulação anterior, enquanto que Wieringa (1993) discute os fatores que intervêm nos valores de z_o .

No caso de superfícies lisas, não existe problema na definição da origem da camada inercial ($z_d=0$). A camada inercial é universal e vale para superfícies lisas e rugosas, dependendo apenas das tensões de cisalhamento que surgem na superfície. Quando os elementos rugosos são grandes, as forças na superfície que resultarão na tensão de cisalhamento estão atuando na superfície propriamente dita e ao longo dos elementos rugosos. Com isso, o ponto de aplicação das forças aerodinâmicas não se encontra na superfície e, portanto a origem, no que se refere a camada inercial, é deslocada de uma altura z_d . Esta altura é, de acordo com Jackson (1981), a altura onde o arrasto médio da superfície age, ou seja, na posição onde o momento desta força é nulo.

Plate (1982) apresenta uma formulação do perfil de velocidades nesta subcamada sob condições de atmosferas estáveis e não estáveis, através da teoria do comprimento de mistura. O trabalho de Davenport (1960) demonstra que, em condições de ventos moderados ou fortes (superiores a 6 m/s), a atmosfera se apresenta geralmente em um estado neutro.

4.3 Subcamada potencial ou de esteira

A terceira subcamada é denominada de subcamada potencial ou subcamada de esteira, ($z_L < z < \delta$) e ocupa a maior parte da CLA. Nessa camada a distribuição de velocidade se desvia da lei logarítmica, e a intensidade de turbulência e as tensões de Reynolds decrescem com a altura. Experimentalmente tem se notado que a distribuição de velocidade média nesta subcamada pode ser ajustada a uma lei potencial do tipo:

$$\frac{U}{U_H} = cte \cdot \left(\frac{z - z_d}{H} \right)^\alpha \quad \text{para } z_L < z < \delta \quad (4.3.1)$$

Nesta expressão U_H é a velocidade média na altura H e α , chamado de índice potencial, é um expoente que depende da rugosidade do terreno que se encontra a jusante, como indicado em Counihan (1975).

Counihan (1975) e Wieringa (1993) apresentam os resultados de medidas realizadas em camadas limites atmosféricas, permitindo inferir os valores de z_0 , z_d e α para diversos tipos de exposições, sob condições de atmosfera neutra.

A altura δ da CLA depende da velocidade do vento atmosférico, das condições de estado da atmosfera, da rugosidade do terreno e também da latitude, variando tipicamente entre 100 m em noites com condições de estado fortemente estáveis até vários quilômetros em dias com condições altamente convectivas em latitudes baixas.

Counihan (1975) e Simiu & Scanlan (1986), *e.g.*, apresentam resultados de diferentes medições da altura da CLA e da subcamada logarítmica para diversos tipos de exposição em condições de estado neutro, enquanto que o trabalho de Arya (1981) apresenta algumas parametrizações da altura da CLA, segundo o tipo de condição de estado.

Simiu & Scanlan (1986), apresentaram a seguinte estimativa da altura da sub camada logarítmica, deduzida a partir de medições micro-meteorológicas:

$$z_L = c \cdot \frac{u_*}{f} \quad (4.3.2)$$

onde c é uma constante de valor 0,015 a 0,03 e f é o parâmetro de Coriolis, calculado através da equação:

$$f = 2 \cdot \Omega \cdot \text{sen}\phi \quad (2.3.2.2)$$

Nesta expressão Ω é a velocidade de rotação da Terra ($\Omega = 7,27 \times 10^{-5}$ rad/s) e, a latitude, foi apresentada na Tabela 2.3.2.1.

O trabalho de Benkley & Schulman (1979), *apud* Arya (1981), indica a expressão (4.4) para estimar a altura da CLA em condições de estado neutro;

$$\delta = a \cdot \frac{u_*}{f} \quad (4.3.3)$$

onde a é uma constante de valor próximo de 0,3.

4.4 Subcamada interior

Durante o desenvolvimento de uma CLA pode ocorrer alguma mudança no tipo de rugosidade superficial. Nesses casos, há a ocorrência de uma camada limite interior (CLI),

cuja altura δ_l cresce com o incremento da distância ao ponto de alteração da rugosidade, como indicado na Figura (4.4.1).

Na subcamada exterior, a qual se posiciona por cima da CLI, as características do escoamento que se encontram associadas ao tipo de terreno existente a jusante da mudança de rugosidade, assim como a distribuição de velocidade seguem a lei logarítmica correspondente. Dentro da CLI pode-se observar uma região próxima ao solo, na qual o perfil de velocidade se adapta a uma lei logarítmica. Esse perfil e a lei logarítmica que o caracteriza, dependem das novas condições de rugosidade e também das características do escoamento na camada exterior. Entre as duas regiões, se desenvolve uma camada de transição, de certa extensão, em que a distribuição de velocidade muda gradualmente de uma para a outra. A partir de uma distância afastada o suficiente do ponto de mudança da rugosidade, o crescimento da CLI encerra e termina por se estabelecer o regime correspondente ao tipo de terreno mais próximo. Cataldo (1998) sugere que o valor de z_{02} , obtido através do ajuste de uma lei logarítmica à distribuição de velocidade próxima do solo, dependerá da estrutura apresentada pela região superior do escoamento e não apenas das características da nova superfície. A Figura (4.4.1) ilustra as diversas subcamadas que ocorrem quando há mudança de rugosidade à montante do ponto de estudo.

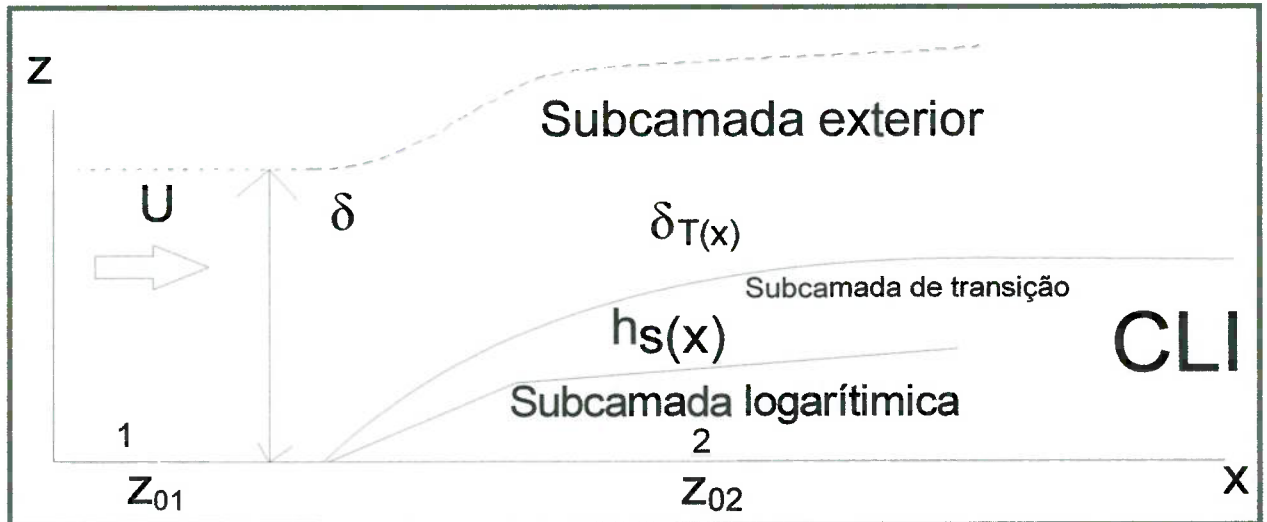


Figura (4.4.1): Camadas limites originadas por mudanças de rugosidade da superfície.

Não há, atualmente, consenso de como varia a altura de uma CLI com a distância a um ponto de mudança da rugosidade. Têm-se realizado medidas na CLA e em camadas limites desenvolvidas em túneis de vento, com mudanças de rugosidade de diferentes características, a partir das quais se verificaram os modelos analíticos e numéricos propostos. Mas as variáveis intervenientes, como a distância ao ponto de mudança de rugosidade, a magnitude da relação entre os comprimentos de rugosidade corrente acima e abaixo da mudança, e as dificuldades dos ensaios na CLA têm dificultado a comparação dos resultados.

4.5 Caracterização dos componentes flutuantes da velocidade

Davenport (1963) estudou o espectro horizontal do vento a uma altura de 100 m do solo, e observou que há alguns picos no espectro, intercalados por regiões de baixa amplitude. Davenport considera que esse comportamento pode ser observado em outros tipos de terreno e em outras localizações geográficas. A Figura (4.5.1) apresenta o espectro de potência da velocidade horizontal do vento.

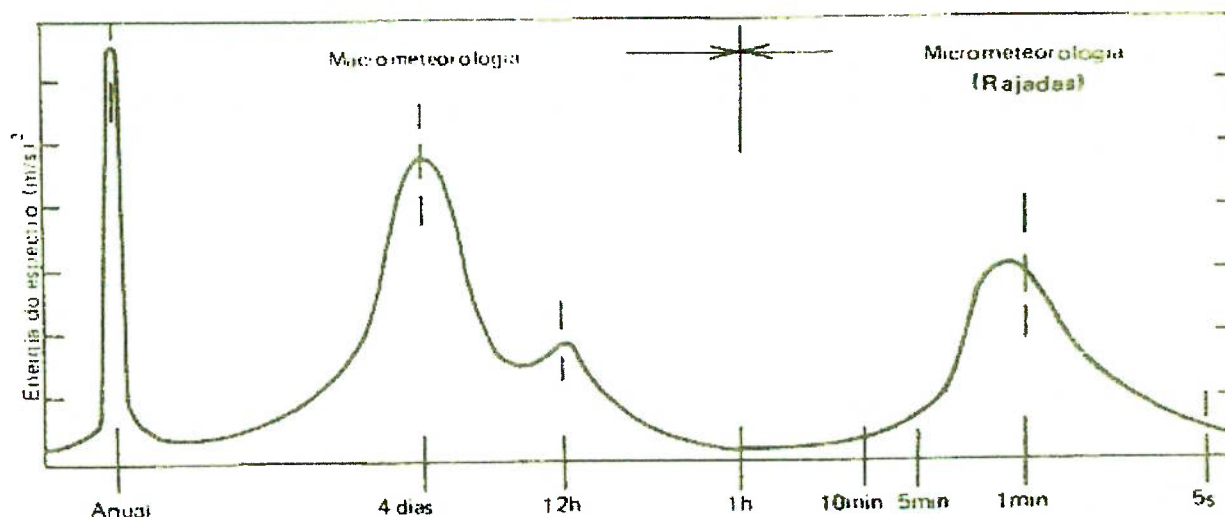


Figura (4.5.1): Espectro de potência da velocidade horizontal do vento. Medições de van der Haven a 100 m de altura. Reproduzido de Blessmann (1979).

Ao caracterizar a estrutura da CLA é interessante descrever, além das características do escoamento médio, a distribuição das componentes turbulentas da velocidade. Nos parágrafos seguintes se caracterizará a distribuição da intensidade de turbulência, a distribuição da escala integral longitudinal da turbulência e a distribuição do espectro das flutuações longitudinais da velocidade que tem lugar nas camadas limites atmosféricas que se desenvolvem sobre as diferentes superfícies rugosas.

A turbulência é tratada estatisticamente através da descrição da velocidade como o somatório entre uma parcela invariável no tempo (média) e a flutuação de seu valor instantânea em torno do valor médio. A Figura (4.5.2) apresenta uma ilustração da flutuação temporal da velocidade.

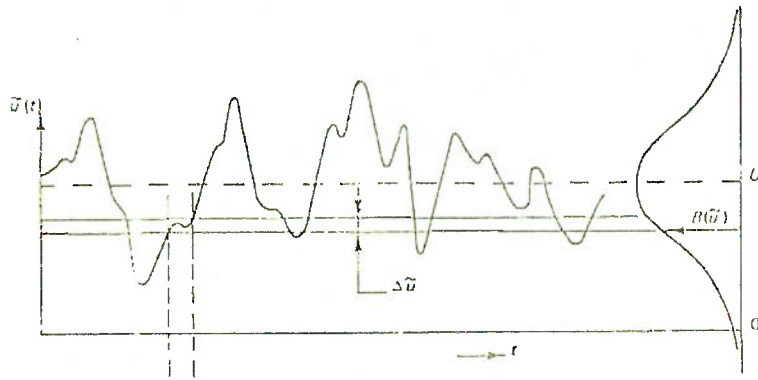


Figura (4.5.2) Flutuação temporal da velocidade. Reproduzido de Blessman (1995)

$$U(t) = \bar{U} + u'(t) \quad (4.5.1)$$

$$\bar{u}' = 0 \quad (4.5.2)$$

A intensidade de turbulência é o parâmetro mais acessível para descrever a turbulência atmosférica. A intensidade de turbulência longitudinal se define como:

$$I_u(z) = \frac{\sqrt{u'^2(z)}}{U(z)} \quad (4.5.3)$$

onde $u'(z)$ é a componente flutuante da velocidade na direção da velocidade média $U(z)$ a uma altura z . A distribuição da intensidade de turbulência com a altura depende da rugosidade apresentada pela superfície e também das condições de estado da atmosfera.

Observa-se do trabalho de Raupach *et al.* (1991), que a componente da velocidade aumenta de maneira pronunciada com a altura na subcamada rugosa. Na subcamada logarítmica, por outro lado, existiria uma região onde as tensões cisalhantes permanecem essencialmente constantes. O limite superior desta região se posiciona a uma altura próxima de $0,1\delta$. Após essa região, o valor de u' diminui com a altura.

Counihan (1975); Simiu & Scanlan (1986), ESDU (1985), Harris (1969) e Plate (1982) apresentam resultados de medições da intensidade de turbulência longitudinal realizadas na CLA para diversos tipos de rugosidade.

O modelo conceitual convencional da turbulência em camadas limites consiste em considerar que o fluxo médio transporta um grande número de vórtices, que variam em tamanho e orientação. Considera-se que as flutuações turbulentas da velocidade são causadas pela superposição de vórtices de tamanhos e frequências de rotação diferentes.

Segundo a teoria de Kolmogorov, nos escoamentos de camadas limites turbulentas, os vórtices de maior ordem extraem energia cinética do escoamento médio e a transferem para vórtices de menor ordem mediante um processo denominado “cascata de energia”, até que essa energia seja dissipada na forma de calor pelos vórtices de menor escala através dos efeitos viscosos. Pode-se considerar que a energia cinética total da componente turbulenta da velocidade em uma região do escoamento corresponda à soma das contribuições de cada tamanho de vórtice apresentado pelo escoamento.

O espectro de potência das flutuações turbulentas caracteriza a forma em que se distribui a energia cinética da turbulência em escalas (ou frequências, aplicando a hipótese de Taylor $t = x/U$), segundo os diversos tamanhos de vórtices. Como demonstrado por Plate (1982) e por Tennekes & Lumley (1972), a hipótese de Taylor consiste em supor que a correlação entre eventos simultâneos que ocorrem em dois pontos separados por uma distância x na direção do escoamento médio é a mesma que a correlação existente entre dois eventos que ocorrem em um mesmo ponto, separados por um tempo t , se $t = x/U$.

Existe um espectro de potência associado a cada componente turbulenta, de forma que podem ser definidos os espectros de turbulência longitudinal, lateral e vertical. Tennekes & Lumley (1972) e Plate (1982) apresentam a teoria e discutem as características do espectro das flutuações turbulentas. Lumley & Panofsky (1964) e Raupach *et al.* (1991) apresentam as

características e medidas do espectro da turbulência na CLA. Os estudos de Lumley & Panofsky (1967) demonstram, teórica e experimentalmente, que as características desses espectros variam em função da altura em relação à superfície.

Pode-se observar, no espectro de potencia longitudinal, três faixas de frequências associadas a processos distintos. A faixa de baixa frequência, ou de maior escala, corresponde a produção de turbulência, enquanto que a faixa de maiores frequências, ou de menor escala corresponde à dissipação da turbulência. Entre essas duas faixas existe uma faixa denominada inercial, associada à transmissão de energia entre as escalas próximas e independente dos efeitos viscosos.

Como apresentado por Plate (1982) pode-se estabelecer, com o uso a teoria de Kolmogorov, e usando argumentos dimensionais, que na faixa inercial, o espectro longitudinal de potência apresenta a forma:

$$S(z, f) = \kappa \cdot \left(\frac{\varepsilon \cdot U(z)}{2 \cdot \pi} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot f^{-\frac{5}{3}} \quad (4.5.4)$$

onde $S(z, f)$ é a componente espectro da componente turbulenta longitudinal da velocidade associada à frequência f é a uma a altura z acima da superfície, ε é a dissipação da turbulência, f é a frequência e κ é uma constante, conhecida como constante de Kolmogorov, de valor próximo a 0,55, e que pode ser determinada experimentalmente.

A partir da expressão (4.5), e considerando apenas essa faixa, pode-se concluir:

$$\frac{f \cdot S(z, f)}{u'^2} \propto Y^{-\frac{2}{3}} \quad (4.5.5)$$

na qual $\frac{f \cdot S(z, f)}{u'^2}$ é o espectro de potência adimensionalizado e $Y = \frac{f \cdot z}{U(z)}$ é uma frequência adimensional.

Raupach *et al.* (1991) demonstraram que, na faixa de produção de turbulência:

$$S(z, f) \approx \text{cte} \quad (4.5.6)$$

de forma que, para essa faixa:

$$\frac{f \cdot S(z, f)}{u'^2} \propto Y. \quad (4.5.7)$$

Uma das formulações propostas para condições de atmosfera neutra é a fórmula empírica de von Karman para o espectro adimensionalizado de potência que só pode ser utilizada para o espectro no intervalo de frequências fora da região de dissipação:

$$\frac{S(z, f) \cdot f}{u'^2} = \frac{4 \cdot \frac{f \cdot L_u^x(z)}{U(z)}}{\left[1 + 70,8 \cdot \left(\frac{f \cdot L_u^x(z)}{U(z)} \right)^2 \right]^{\frac{5}{6}}} \quad (4.5.8)$$

Nessa expressão L_u^x é a escala integral longitudinal da turbulência, medida em m, e U é a velocidade média no ponto onde se avalia a escala integral, em m/s.

Counihan (1975) analisa algumas formulações empíricas para a avaliação do espectro, desenvolvidas por Harris (1968), Fuchtl & Mc Vehil (1969) e por Davenport (1961).

Dessas formulações, a de Harris não considera a variação do espectro com a altura, e a desenvolvida por Davenport superestima a energia na região de espectro correspondente a baixas frequências, região das escalas de produção.

Lumley & Panofsky (1964), Plate (1982) e Simiu & Scanlan (1986), apresentam uma coletânea das formulações desenvolvidas por outros autores.

A distribuição das escalas integrais de turbulência é outro dos parâmetros utilizados para caracterizar os escoamentos turbulentos. A escala integral da turbulência atmosférica é uma medida do tamanho médio dos vórtices turbulentos presentes na CLA nos quais se registra o maior conteúdo de energia.

A escala integral depende da altura acima da superfície, do comprimento de rugosidade da mesma, assim como das condições de estado da atmosfera. A escala integral longitudinal da turbulência corresponde ao tamanho médio dos vórtices na direção longitudinal.

A escala integral longitudinal aumenta com a altura e diminui com a rugosidade do terreno até uma altura em que esta escala passa a ser independente da rugosidade do terreno (Counihan, 1975).

Counihan (1975) apresenta o equacionamento (4.5.9), para a variação da escala integral longitudinal com a altura, em condições de atmosfera neutra. Esse equacionamento é válido em toda a subcamada logarítmica e até uma altura aproximada de 250 m:

$$L_u^x(z) = C \cdot \sqrt[3]{z} \quad (4.5.9)$$

Nessa expressão, C e n são valores que dependem unicamente do comprimento de rugosidade z_0 apresentado graficamente em Counihan (1975).

A partir do espectro de potências do escoamento, pode-se determinar o comprimento de escala integral através da equação:

$$L_u^x = \frac{1}{2\pi} \frac{f_*}{U} \quad (4.5.10)$$

onde f_* é a frequência na qual se observa o pico do espectro de turbulência e U é a velocidade média do escoamento.

A Figura (4.5.3) apresenta o espectro de potência e a frequência para a qual se observa o pico espectral..

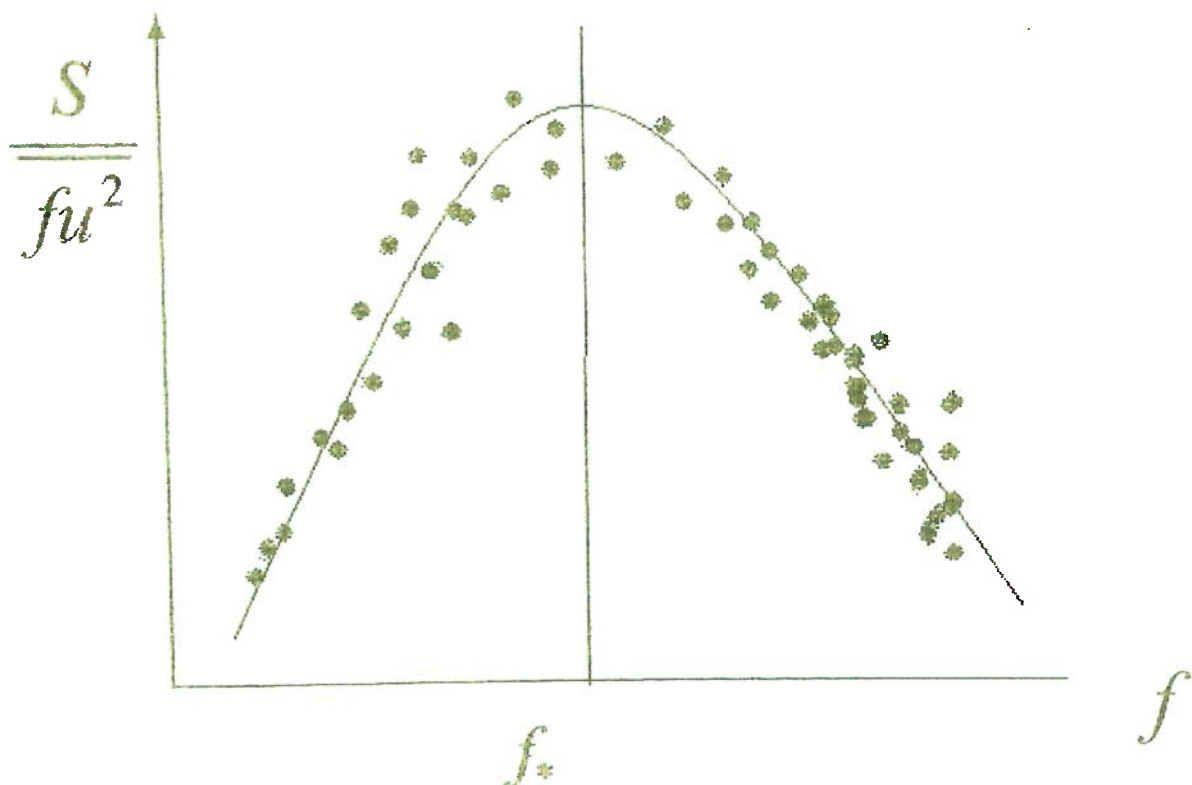


Figura (4.5.3): Ilustração do espectro de potência e da frequência de pico.

Cook (1978) apresenta uma aproximação determinística para o fator de escala do modelo, S , usando as propriedades dimensionais do equacionamento empírico proposto por ESDU (1974, 1975) para o comprimento de escala integral longitudinal, L_u^x . Substituindo cada parâmetro da escala integral pelo produto do fator de escala pode ser expresso por:

$$S = \frac{91.3 \cdot (z - z_d)_{LM}^{0.491L}}{L_u^{1.403} \cdot z_{0M}^{0.088}} \quad (4.5.11)$$

Foi utilizada a equação (4.5.11), proposta por Cook (1978) para a determinação das escalas de modelagem para modelos dentro da camada logarítmica.

4.6 Condições de conforto

Para o conforto humano, são necessárias as sensações de segurança e de tranquilidade, assim como a facilidade de se manter o organismo em uma temperatura agradável. Dessa forma, deve-se dedicar atenção especial às sensações esperadas pelos usuários de uma nova construção. As condições de troca térmica, de ruído, de velocidade do vento e de estabilidade, entre outras, precisam ser analisadas. Para propiciar melhor abordagem, o conforto humano pode ser estudado através da separação entre as necessidades de conforto interno em uma construção e as de conforto externo.

Nessa revisão só serão abordados os aspectos de velocidade do vento e da estabilidade.

4.6.1. Condições de conforto no ambiente interno de construções.

O conforto humano dentro das construções é influenciado pelas condições de ventilação, de temperatura e de estabilidade. Dessas condições, aquela mais influenciada pelo escoamento ao redor da construção é a sensação de equilíbrio, observada pela oscilação da construção.

A sensação de desconforto dentro de uma construção, pela sensação de desequilíbrio é resultado do grau de percepção da oscilação da construção sob a ação do vento incidente. A oscilação da construção será determinada pela rigidez da estrutura, pela frequência e intensidade dos esforços impingidos à construção pelo escoamento incidente.

A rigidez da estrutura será resultado, grosso modo, dos materiais empregados e da geometria da construção. Ao se comparar as construções esbeltas, de elevada altura com as estruturas de menor altura, nota-se que, nas construções mais altas, a oscilação é mais intensa, sob a ação de escoamentos similares, considerando que ambas as construções são compostas de materiais de igual resistência.

A ação do vento incidente será representada, principalmente pela emissão de vórtices e pela variação temporal de energia do escoamento absorvida pela estrutura.

A noção de desconforto inaceitável, que apresenta um papel central no estabelecimento dos requisitos de serventia, pode ser apresentada como função dos graus de desconforto e da probabilidade de ocorrência. Em uma dada situação de projeto, vários graus de desconfortos induzidos pelo vento podem ser esperados, ocorrendo com uma determinada frequência, que dependerá do grau de desconforto, das características de projeto e das condições de vento na localidade sob análise. O desconforto será inaceitável se qualquer dessas frequências for julgada como alta demais. Os requisitos especificando a frequência

máxima média de ocorrência dos vários graus de desconforto são conhecidos como critérios de conforto.

Nos critérios de conforto desenvolvidos para uso em projeto, é pouco prática a referência explícita às diferentes sensações desagradáveis experimentadas pelos ocupantes da construção. Em vez disso, é usual a referência ser feita a um parâmetro representativo, associado aos vários graus de desconforto. No caso do movimento do prédio, induzido pelos ventos, esse parâmetro é a aceleração horizontal do prédio.

O processo de verificação da adequação de um projeto aos requisitos adotados em um dado conjunto de critérios de conforto, envolve dois passos.

Primeiro, deve-se obter uma estimativa das velocidades do vento sob a qual o parâmetro em análise excederia os valores especificados para o critério de conforto (valores frequentemente notados como críticos).

Segundo, as freqüências de ocorrência dessas velocidades devem ser estimadas com base nas informações climatológicas de vento apropriadas. Se a freqüência assim estimada, é inferior àquela freqüência máxima admissível, então o projeto é considerado como adequado do ponto de vista da serventia.

4.6.2 Estudo da resposta humana às vibrações induzidas pelo vento.

Estudos da resposta humana aos diversos níveis de vibrações mecânicas têm sido conduzidos, ao longo das duas últimas décadas, principalmente pela indústria aeroespacial. Uma vez que as freqüências de vibração de interesse nas aplicações da indústria aeroespacial são relativamente altas (freqüentemente entre 1 Hz e 35 Hz), a plena utilidade desses estudos para o engenheiro estrutural é limitada. Mesmo assim, os resultados obtidos para altas

freqüências têm sido extrapolados, *e.g.*, no trabalho de Chang (1973) para freqüências menores que 1 Hz, com a seguinte correspondência sendo proposta entre os vários graus de desconforto do usuário e a aceleração causadora deles:

A Tabela 4.6.1 apresenta, em linhas gerais as impressões relatadas pelos entrevistados no trabalho de Chang (1973).

Tabela 4.6.1: Graus de desconforto relatados

Grau de desconforto	Aceleração (em porcentagem da aceleração da gravidade g)
Imperceptível	Menor que 0,5 % g
Perceptível	Entre 0,5 % g e 1,5 % g
Inoportuno	Entre 1,5 % g e 5 % g
Muito inoportuno	Entre 5 % g e 15% g
Intolerável	Maior que 15 % g

Os resultados dos experimentos visando o estabelecimento de um limiar de percepção para movimentos periódicos de 0,067 Hz até 0,2 Hz foram registrados por Chen & Robertson (1973). Os experimentos, executados com 112 voluntários, em um simulador de movimentos representando o ambiente de um escritório, foram projetados para considerar a influência sobre os limiares de percepção de orientação corporal, movimento do corpo, postura corporal e a extensão para qual a movimentação é antecipada pelos colaboradores dos experimentos. Os limiares de percepção, como descritos por 50 % dos voluntários, foram determinados como sendo aproximadamente 1% g , 0,9% g , e 0,6% g para freqüências de vibração, respectivamente, de 0,067 Hz, 0,1 Hz e 0,2 Hz. Nota-se que, dentro dessa faixa de freqüência, o limiar de percepção decresce com o incremento da freqüência. No trabalho de Chen & Robertson (1973), são utilizados resultados experimentais adicionais como base para uma

tentativa de relacionamento entre a aceleração horizontal do piso e a porcentagem de indivíduos naquele piso para os quais a aceleração será perceptível.

Yamada & Goto (1975) e Goto (1981) apresentam estudos das respostas humanas às vibrações de um simulador de movimento para frequências na faixa de 0,1 Hz até 1 Hz. O limiar de percepção médio foi determinado variando a partir de 0,6 % *g* para frequências de 0,1 Hz até algo próximo de 0,6 % *g* para frequências de 0,25 Hz. A movimentação era diferentemente sentida sendo relatada como sendo incômoda, quando, trabalhando em suas escrivaninhas, a aceleração excedia 1,2 % *g*. Acima de 4 % *g* o sentimento relatado era de forte desconforto e os participantes do experimento experimentavam dificuldades ao caminhar. O movimento foi descrito como extremamente inoportuno ou intolerável para acelerações superiores à ordem de 5 % *g* ou 6 % *g*. Khan & Parmelee (1972) registraram resultados similares em seus estudos.

Hansen *et al.* (1973) e Reed (1971) apresentaram estudos baseados na observação da resposta humana em ambientes reais submetidos a acelerações superiores àquelas usualmente simuladas como tendo sido induzidas pelo vento. Seus trabalhos cobriram o comportamento, durante uma tempestade, de dois prédios e seus ocupantes. As estimativas dos valores rms das acelerações do andar mais alto, durante a tempestade, foram baseadas nas medições das reações para um dos prédios, e nas velocidades do vento medidas, nos testes de túnel de vento para o outro. Essas estimativas representam médias (1) no tempo sobre o período mais alto na intensidade da tempestade (20 min a 30 min) e (2) no espaço sobre a área inteira do andar – a média espacial sendo feita para levar em conta o movimento torsional induzido pelo vento. Os valores rms assim obtidos foram 0,2% *g* para o primeiro e 0,5% para o segundo dos dois prédios. Entrevistas com os ocupantes dos prédios então revelaram que 35% das pessoas nos andares mais elevados no primeiro prédio, experimentaram sintomas de enjôo por movimento durante a tempestade. Para o segundo prédio, o porcentual relatado foi de aproximadamente,

45%. O trabalho de Reed (1971) indica que os rangidos que ocorrem durante a movimentação do prédio, aumentam significativamente a sensação de desconforto, devendo, portanto serem minimizados pelo adequado detalhamento estrutural.

4.6.3 Critérios de conforto

Os critérios de conforto devem, em princípio, serem baseados em um extenso conhecimento do grau para o qual os usuários dos prédios estão preparados para suportar, associado com as acelerações induzidas pelo vento. Contudo, no momento esse conhecimento é escasso.

Feld (1971) propõe um critério simplificado de conforto, que corroborado pelo trabalho de Chen & Robertson (1973), limita o número de ocorrências de acelerações de 1% g, no andar mais alto ocupado, ao máximo de 7 por ano.

Hansen *et al.* (1973) apresentam outro critério, baseado nas reclamações registradas pelos usuários dos prédios à recorrência de vibrações induzidas pelo vento e nas estimativas de proprietários ou de empresários de construção da possível repercussão econômica da insatisfação dos usuários com o desempenho do prédio. Hansen *et al.*, a partir de entrevistas com os ocupantes que tinham experimentado um valor de aceleração de 0,5% g, no andar mais elevado, estimaram que cerca de 2% das pessoas no terço mais alto de uma construção serão objeto de mais do que uma ocorrência de tais movimentos ao longo de um período de seis anos. Entrevistas com proprietários de prédios e empresários de construção, indicavam, por outro lado, que o aluguel ou as vendas não seriam sensivelmente afetados se um máximo de 2% dos ocupantes no terço mais alto das construções observasse um balanço reclamável. Eles expressaram essas constatações, no critério de projeto: “o período de retorno, para

tempestades causando uma aceleração horizontal de 0,5% g, no topo do prédio, deverá ser não inferior a seis anos. Para essa avaliação, a aceleração rms representará uma média de período de 20 minutos da intensidade máxima da tempestade e será uma média espacial sobre o andar do prédio”.

Verifica-se que o critério de conforto proposto por Feld (1971) é mais restritivo que o proposto por Hansen *et al.* (1973).

4.6.4 Relações entre as velocidades do vento e as acelerações dos prédios

O primeiro passo na verificação da conformidade de um projeto com o conjunto de requerimentos futuros em critérios de conforto, consiste na estimação, para cada direção possível do vento, das velocidades que induziriam o nível de aceleração de interesse. Os resultados de testes em túneis de vento permitem a obtenção de gráficos da velocidade contra as direções para as velocidades de vento que induzem acelerações críticas nas construções (veja, *e.g.*, a Figura (4.1.1)).

As informações sobre as acelerações correspondentes às várias velocidades do vento, podem ser obtidas a partir de testes em túneis de vento, desde que se consiga a modelar satisfatoriamente o comportamento elástico da estrutura, *e.g.*, através da reprodução dos modos torcionais.

Deve-se dedicar atenção especial para contornar duas restrições principais: Primeiramente, as acelerações na direção do escoamento são fortemente dependentes do espectro de flutuações da velocidade longitudinal, na faixa de frequência mais elevada. Dessa forma, é interessante buscar assegurar a adequada simulação do espectro de turbulência

atmosférica nessa faixa. Pode ser necessário ajustar os resultados dos testes para considerar as diferenças entre o espectro de turbulência do túnel de vento e o espectro atmosférico. Em segundo lugar, as acelerações nas direções transversais à do vento dependem fortemente da natureza da esteira turbulenta derramada da estrutura, que é influenciada pelo número de Reynolds do escoamento, o qual não é usualmente reproduzido em simulações de engenharia civil em túneis de vento.

Mantendo presente a preocupação com as incertezas inerentes às simulações de laboratório, podem-se usar os resultados de ensaios em túneis de vento para obter gráficos da velocidade contra a velocidade do vento, para cada direção de incidência do vento, que induzem acelerações críticas ao prédio.

Na Figura (4.6.4.1), as velocidades correspondentes aos pontos fora da curva induzirão acelerações tais que, se um critério do tipo proposto por Hansen *et al.* (1973), for utilizado, $\bar{\sigma} > \bar{\sigma}^*$, onde $\bar{\sigma}$ é o valor da média espacial rms da aceleração no andar mais alto, e $\bar{\sigma}^*$ é o valor crítico de $\bar{\sigma}$ especificado pelo critério de conforto (*e.g.*, no estudo de Hansen *et al.* (1973), $\bar{\sigma}^* = 0,5\% g$).

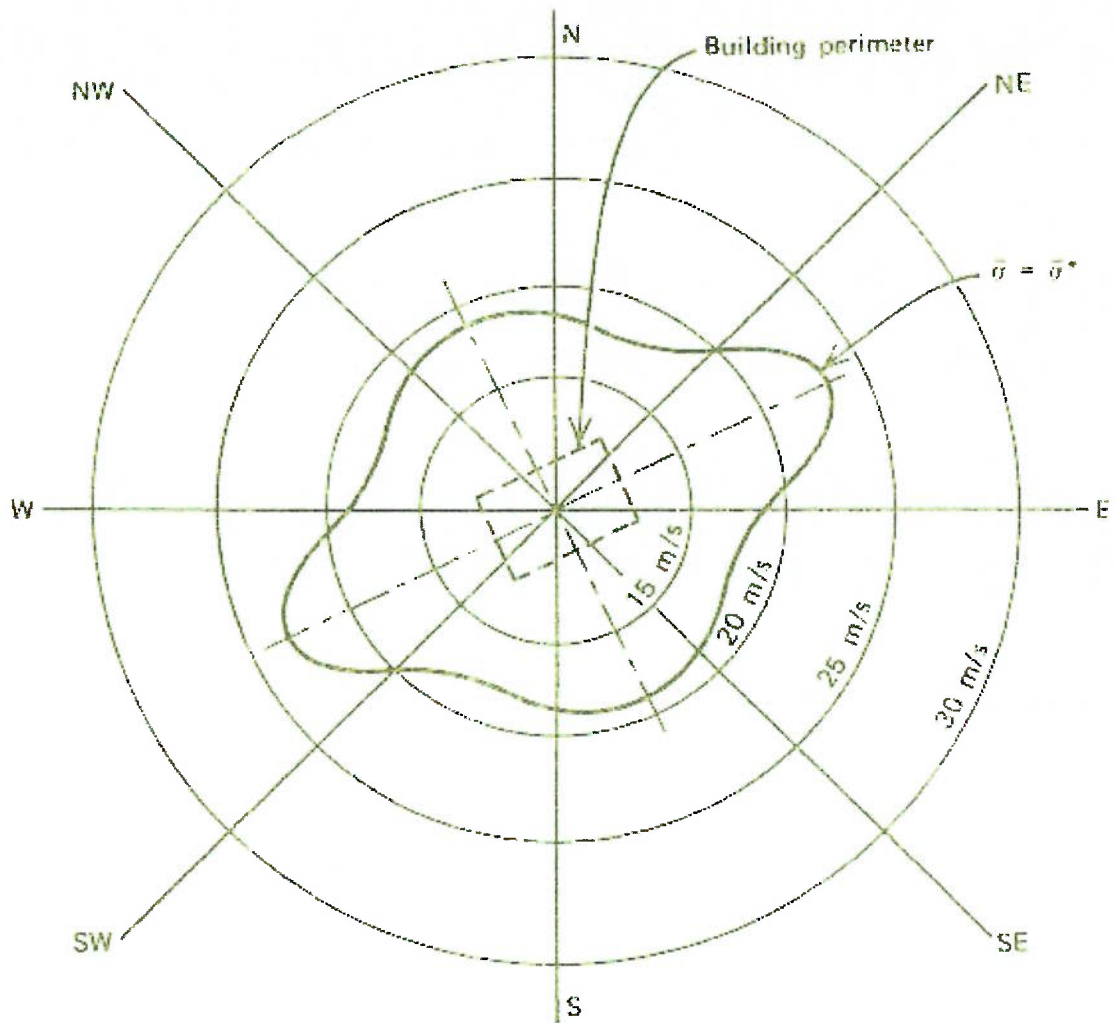


Figura (4.6.4.1) Velocidades de vento indutoras de acelerações em construções. Reproduzido de Simiu & Scanlan (1996)

4.6.5 Freqüência de ocorrência dos ventos indutores de acelerações críticas.

O segundo passo na verificação de adequação de um projeto, do ponto de vista da utilidade, é estimar a freqüência de ocorrências de acelerações, $\bar{\sigma}$, mais intensas que o valor crítico, $\bar{\sigma}^*$, especificado pelo critério de conforto. Khan & Parmelee (1972) propõem definir essa freqüência como o número médio por ano, $N_S(\bar{\sigma} > \bar{\sigma}^*)$ de tempestades causadoras de

acelerações $\bar{\sigma} > \bar{\sigma}^*$. Na prática, pode-se aproximar $N_S(\bar{\sigma} > \bar{\sigma}^*)$ do número de dias por ano, $N_D(\bar{\sigma} > \bar{\sigma}^*)$, durante os quais a velocidade máxima do vento excede os valores correspondentes à curva da Figura (4.1.1).

Pode-se argumentar que, para um prédio de escritórios, a ocorrência de velocidades elevadas ao longo da noite poderia não ser considerada na contagem para determinação da frequência média N_D . Contudo, considerando as muitas incertezas inerentes ao processo de projeto de um prédio de escritórios, tal refinamento não aparenta ser seguro, uma vez que, através dele pode-se reduzir a frequência N_D , em um fator da ordem de dois.

A frequência média anual estimada, $N_D(\bar{\sigma} > \bar{\sigma}^*)$, deve ser comparada com a máxima frequência anual admissível de ocorrência de acelerações, $\bar{\sigma} > \bar{\sigma}^*$, especificada pelo critério de conforto. É conveniente notar essa frequência por $N_A(\bar{\sigma} > \bar{\sigma}^*)$, *e.g.*, o valor de $N_A(\bar{\sigma} > \bar{\sigma}^*)$ proposto por Hansen *et al.* (1973) é de 0,17 por ano.

4.7 Critérios de conforto para áreas externas.

O desconforto induzido pelo vento também pode ser importância no contexto global da aplicabilidade de áreas externas imersas em um ambiente construído. Certas construções e configurações de espaços abertos podem originar ventos relativamente intensos. Por outro lado, a ocorrência de áreas de atmosfera inerte, também pode criar desconforto, ao dificultar a troca térmica. Dessa forma, é tarefa do projetista averiguar, na etapa de planejamento, a possível existência de zonas nas quais as condições do escoamento possam causar um

desconforto inaceitável aos usuários das áreas externas de importância. Decisões de projeto apropriadas devem ser feitas para eliminar tais zonas, se elas existirem.

De forma análoga ao exposto sobre os inconvenientes de se tratar as condições de conforto, explicitando as sensações desagradáveis observadas, na avaliação do conforto humano em ambientes externos, também é vantajoso o trato da questão com base em parâmetros de conforto representativos dos graus de desconforto possíveis.

No critério pertinente a serventia das áreas de trânsito de pedestres, o parâmetro empregado é uma medição apropriada da velocidade do vento próxima ao solo na posição de interesse. Claramente, para desenvolver critérios de conforto, é necessário que os valores dos parâmetros estabeleçam uma correlação clara com os graus de desconforto humanos. Além disso, é necessário que os vários graus de desconforto – ou, de forma equivalente, os valores dos parâmetros correspondentes a eles – estejam associados à probabilidade máxima admissível de ocorrência.

A relevância da análise dos problemas de desconforto induzido pelo vento, em áreas externas, não é recente, como ilustrado na Figura (4.7.1). Contudo, nos anos recentes, os novos tipos de construção e novas as configurações de espaços abertos têm propiciado condições de escoamento raramente encontradas antes. Essa combinação pode permitir, sob certas condições desfavoráveis, a ocorrência de zonas de ventos superficiais intensos, causando um grau de desconforto inaceitável aos usuários de áreas de pedestres. Tipicamente, mas não exclusivamente; tais configurações envolvem prédios altos, elevando-se bem acima das construções da região ao redor, e adjacentes a espaços abertos como shoppings ou praças (Gandemer, 1975).

Como indicado anteriormente, para definir a notação de desconforto inaceitável quantitativamente são necessárias duas condições complementares; sendo a primeira, a existência de correspondência entre os vários graus de desconforto aos pedestres e as

velocidades dos ventos causadores deles; e a segunda, que a máxima frequência admissível de ocorrência seja especificada para essas velocidades do vento. A sessão atual é dedicada a uma breve discussão desses dois requisitos.



Figura (4.7.1): - A Rajada. Litografia de Marlet, coleção da Biblioteca da Vile de Paris (foto Roger-Viollet, Paris). Reproduzido de Simiu & Scanlan (1996)

4.8 Velocidades do vento e o desconforto do pedestre.

Considerando que V denote a velocidade média do vento, medida a aproximadamente 2 m acima do solo, e seja resultante da média durante 10 min a 1 hr. Penwarden (1973) e Penwarden & Wise (1975) propõem, baseados em observações dos efeitos dos ventos nas pessoas e em cálculos envolvendo a taxa de dificuldade do avanço contra o vento, que os seguintes graus de desconforto são induzidos pelas várias velocidades do vento, U :

U = 5 m/s	começo do desconforto;
U = 10 m/s	definitivamente desconfortável;
U = 20 m/s	perigoso.

Uma descrição mais detalhada dos efeitos de ventos de várias intensidades (como definido na clássica escala de Beaufort) está representada na Tabela 4.8.1 apresentada por Penwarden (1973). Lawson & Penwarden (1976) apresentam uma informação preliminar sobre a sensação de conforto de pedestres, sob várias condições de exposição ao sol, temperatura ambiente, vestimentas, e as condições de velocidade do vento.

Tabela 4.8.1: Resumo dos efeitos do vento. Adaptada de (Penwarden, 1973).

Número Beaufort	Descrição do vento	Velocidade (m/s)	Descrição dos efeitos do vento
0	Calmaria	Menor que 0,4	Não se nota vento. Folhas não se movem. Fumaça sobe verticalmente.
1	Bafagem	0,4 – 1,5	Não se nota vento Folhas não se movem. Fumaça trêmula.
2	Brisa leve	1,6 – 3,3	Vento roça a face
3	Brisa fraca	3,4 – 5,4	Vento estende as bandeiras; Cabelo é perturbado; Roupas drapejam (ondulam).
4	Brisa Moderado	5,5 – 7,9	Força do vento roçando no corpo; Folhas e papeis voam.

5	Brisa forte	8,0 – 10,7	Pequenas árvores começam a balançar. Bandeiras bem agitadas.
6	Vento fresco	10,8 – 13,8	Vento assobia ao passar pelos fios. Guardas-chuvas são utilizados com dificuldade;
7	Vento forte	13,9 – 17,1	Árvores inteiras se agitando. Sente-se resistência ao andar contra o vento.
8	Borrasca Ventania	17,2 – 20,7	
9	Vento Duro Ventania forte	10,8 – 24,4	Impossível caminhar contra o vento. Casas destelhadas. Quebra de galhos grossos.
10	Tempestade	24,5 – 28	Árvores quebradas ou arrancadas, dano estrutural considerável.
11	Tempestade Violenta	28,5 – 33	Danos generalizados em árvores e construções.
12	Furacão	> 34	Danos graves e generalizados.

A Tabela 4.8.1, também conhecida como Escala Beaufort, relaciona a velocidade do vento com o comportamento dos objetos imersos no escoamento, foi desenvolvida por Beaufort em 1805. Em 1903, foi introduzida a equação:

$$U = 1,87 \cdot B^{3/2} \quad (4.8.1)$$

onde U é a velocidade média do vento em milhas náuticas por segundo e B é o número Beaufort.

Poulton *et al.* (1975) sugerem, sendo corroborados por Hunt *et al.* (1976), que o conforto do pedestre não é função apenas da velocidade média do vento, mas também da intensidade das rajadas. Considerando a influência das rajadas, é conveniente, para o estudo dos efeitos do vento sobre as pessoas, trabalhar com o conceito de velocidade efetiva do vento, U_e , definida por:

$$U_e = U \left[1 + \eta \frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{U} \right] \quad (4.8.1);$$

expressão na qual U é a velocidade média, $\sqrt{\overline{u'^2}}$ é o valor rms da flutuação longitudinal da velocidade e η , uma constante que reflete o grau de relevância das rajadas para o estudo. Para a constante η , Poulton *et al.* (1975) e Hunt *et al.* (1976), apresentam como apropriado o valor de $\eta \approx 3,0$, que se ajusta bem aos resultados dos seus experimentos. Contudo, outros investigadores propõem o valor de $\eta = 1,5$ como, *e.g.*, Isyumov & Davenport (1976) ou $\eta = 1,0$ como proposto por Gandemer (1975).

Experimentos em túneis de vento e observações feitas sobre o desempenho dos pedestres por Hunt *et al.* (1976) com $\eta \approx 3,0$, indicaram a correspondência entre as velocidades efetivas, U_e , e os vários graus de desconforto:

$$U_e = 6 \text{ m/s}$$

início do desconforto;

$U_e = 9 \text{ m/s}$	desempenho afetado;
$U_e = 15 \text{ m/s}$	afetado o controle da caminhada;
$U_e = 20 \text{ m/s}$	perigoso.

Observações realizadas por Murakami & Deguchi (1981) sobre o desempenho de pedestres em um grande túnel de vento e na base de construções de elevada altura, conduzidos no Japão com mais de 2000 pedestres, levaram-no a propor o critério:

$U_3 < 5 \text{ m/s}$	desempenho não afetado;
$5 \text{ m/s} < U_3 < 10 \text{ m/s}$	desempenho afetado;
$10 \text{ m/s} < U_3 < 15 \text{ m/s}$	desempenho fortemente afetado;
$15 \text{ m/s} < U_3$	desempenho muito fortemente afetado;

onde U_3 é a média da velocidade do vento sobre um período de 3 s.

Murakami & Deguchi (1981) concluíram que esses critérios são equivalentes ou marginalmente mais severos que aqueles apresentados por Hunt *et al.* (1976).

A habilidade dos pedestres de se ajustar aos ventos fortes é prejudicada pela ocorrência súbita de tal exposição, como é o caso em regiões nas quais, os escoamentos são fortemente não uniformes no espaço. Hunt *et al.* (1976) observaram que, quando a velocidade média varia de 70% ou mais em uma distância menor que 2 m, os efeitos do vento nas pessoas são mais severos que os descritos acima.

O trabalho de Penwarden *et al.* (1978), registra as forças de arrasto devido ao vento em pessoas, para diversas velocidades do vento.

4.9 Critérios de conforto.

Penwarden & Wise (1975), baseados em extensas avaliações dos efeitos do vento no nível do solo em ambientes externos, observam que é improvável ocorrerem objeções sobre as condições do vento se, os ventos com velocidade média superior a 5 m/s, ocorrem menos que 10% do tempo. Adicionalmente, registram que, ocorrerão reclamações se tais velocidades ocorrerem entre 10% e 20% do tempo. Caso a frequência de ocorrência ultrapasse 20%, será necessária a tomada de ações corretivas para reduzir a velocidade dos ventos.

Apperley & Vickery (1974) registram, em seu trabalho, uma coletânea de critérios, em função da aplicação da área sob análise. Essa coletânea é reproduzida na Tabela 4.9.1. Melbourne & Joubert (1972) e Isyumov & Davenport (1976) também apresentaram estudos visando a determinação de critérios que pudessem ser generalizados para um maior número de situações.

Tabela 4.9.1: Critérios de conforto para varias áreas de pedestres. Reproduzido de Simiu & Scanlan (1996)

Critério	Descrição da área	Velocidade limite do vento	do	Frequência de ocorrência	de
1	Praças e parques	Rajadas ocasionais de cerca de 6 m/s	de	10% do tempo ou cerca de 1000 h/a	ou
2	Calcadas e outras áreas sujeitas ao acesso de pedestres	Rajadas ocasionais de 12 m/s	de	12 1 ou 2 vezes por mês ou cerca de 50 h/a	

3	Todas as acima	Rajadas ocasionais de 20 m/s	Cerca de 5 h/a
4	Todas as acima	Rajadas ocasionais de 25 m/s	Menos que 1 h/a

Nessa Tabela, o critério 1 é equivalente ao de Penwarden & Wise (1975). O critério 4 faz referência à uma velocidade limite da rajada de 25 m/s, correspondendo a ventos que podem derrubar uma pessoa frágil ao chão e foi proposto por Melbourne e Joubert (1972).

4.10 Zonas de s ventos fortes superficiais dentre de um ambiente construído.

4.10.1 Escoamento dos ventos próximo de construções altas.

Penwarden & Wise (1975) estudando a ocorrência de altas velocidades do vento no nível do solo sugerem que o fenômeno é associado a um dos seguintes tipos de escoamento

1. Escoamento reverso desenvolvido próximo ao solo, ilustrado na Figura (4.10.1.1).
2. Escoamento descendente, passando ao redor das quinas no barlavento, ilustrado na Figura (4.10.1.2).
3. Escoamento ao nível do piso do solo, em áreas abertas ligando a região de barlavento com a região de sotavento de uma construção, ilustrado Figura (4.10.1.2); ou escoamentos transversais, originados no lado de barlavento de uma construção em direção ao lado de sotavento de uma construção vizinha.

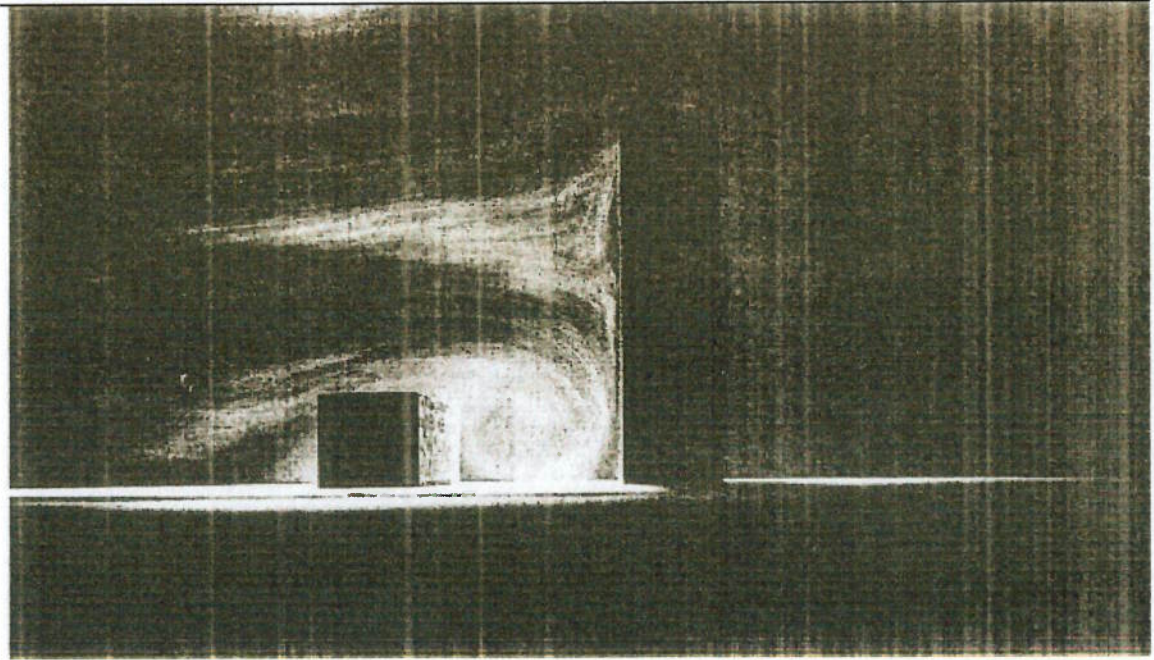


Figura (4.10.1.1): Escoamento do vento em frente de uma construção de elevada altura (vento soprando da esquerda para a direita). Reproduzido de Simiu & Scanlan (1996)

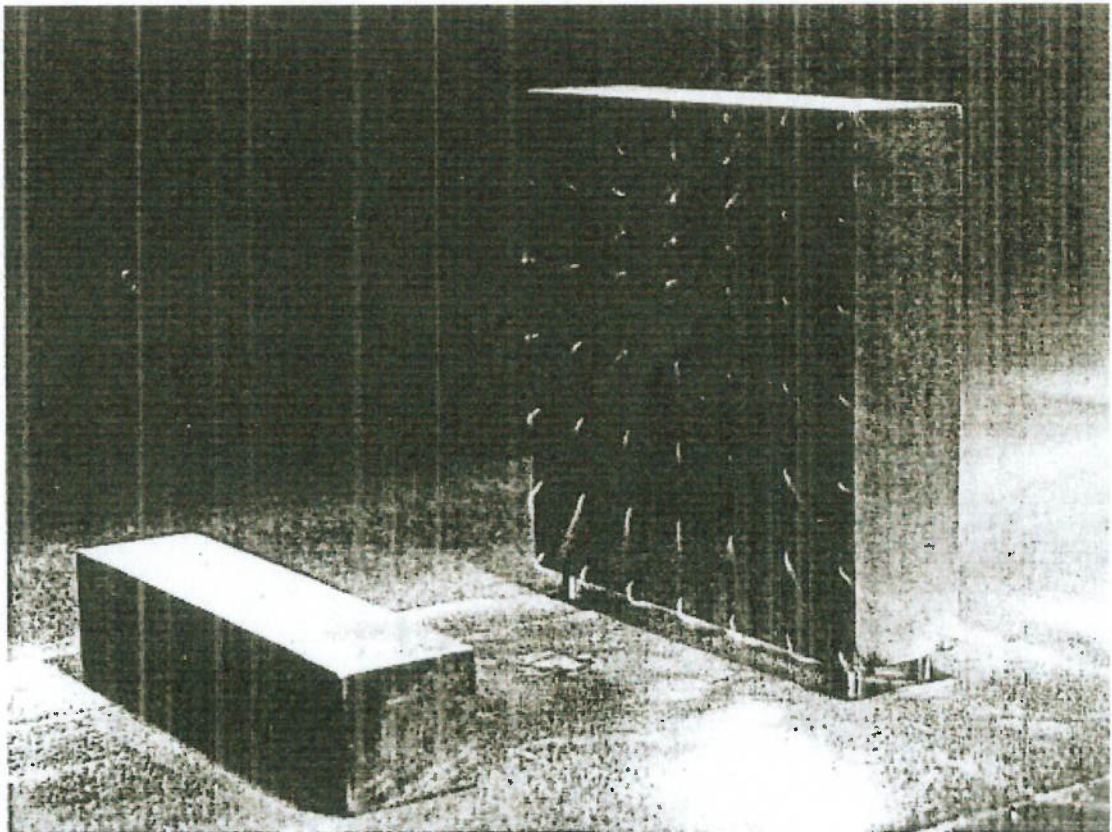


Figura (4.10.1.2): escoamento do vento próximo à face de barlavento de uma construção de elevada altura (vento soprando da esquerda para a direita). Reproduzido de Simiu & Scanlan (1996)

A visualização do escoamento nas Figuras (4.10.1.1) e (4.10.1.2) foi obtida pela injeção de fumaça de parafina ao escoamento.

Observa-se que os padrões dos escoamentos, em uma vizinhança contínua à face de barlavento, são consistentes com as distribuições de pressões que ocorrem na face de barlavento (*i.e.*, o escoamento do ar a partir das zonas de alta pressão para as zonas de baixas pressões).

Parte do ar defletido para baixo pela construção forma um vórtice, ilustrado na Figura (4.10.1.3), que varre o solo em um escoamento reverso. Observe a área A, marcada “escoamento reverso” na Figura (4.10.1.3). Outra parte é acelerada ao redor das quinas da construção, ilustradas na Figura (4.10.1.3) e forma jatos que varrem as regiões próximas dos lados da construção. Note as áreas B, marcadas “correntes de cantos” na Figura (4.10.1.3).

Se uma abertura, unindo o barlavento ao sotavento de uma construção, é apresentada próxima ao solo ou ao nível do solo, parte da corrente descendente, é succionada em direção à zona de baixas pressões na região de sotavento (veja a Figura 4.10.1.3). Um escoamento através da estrutura varrerá a área C, mostrada na Figura (4.10.1.3).

Escoamentos de passagem desse tipo têm causado sério desconforto aos usuários do prédio de ciências da terra do MIT (MIT Earth Sciences Building), em Cambridge, Massachusetts; uma estrutura de 20 andares de altura e são tratados no trabalho de O'Hare (1968). Escoamentos transversais entre pares de construções são causados por diferenças de pressão, de forma semelhante, como mostrado na Figura (4.10.1.4).

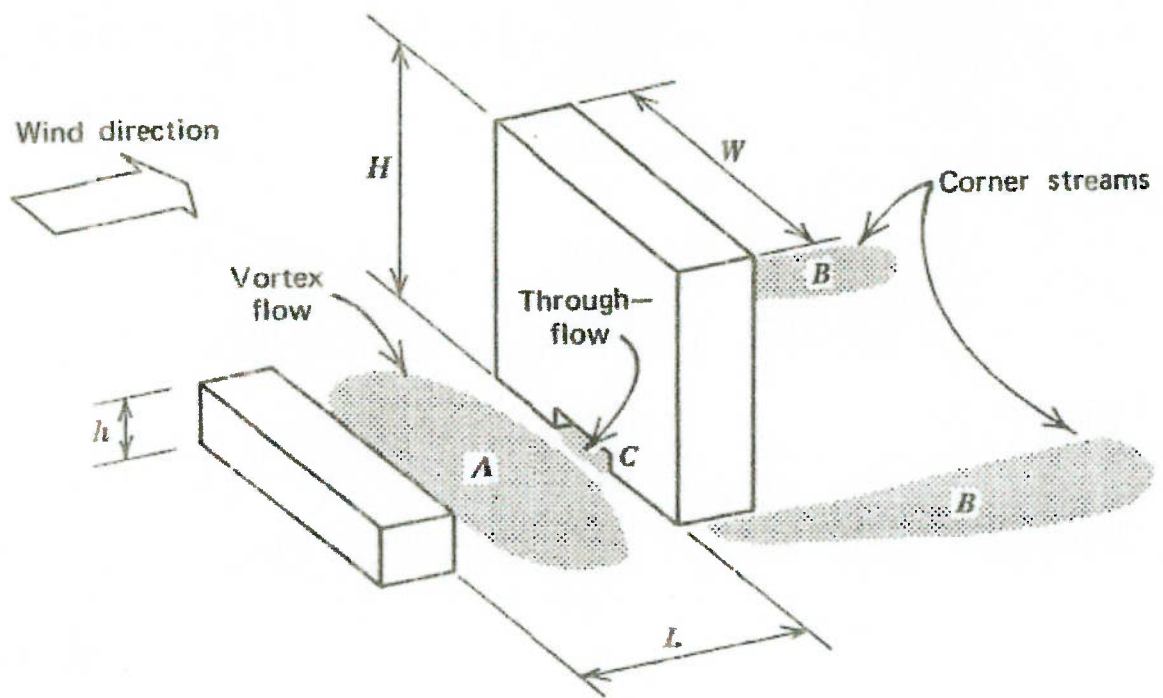


Figura (4.10.1.3): Regiões de intensos ventos superficiais ao redor de uma construção alta.

Reproduzido de Simiu & Scanlan (1996)

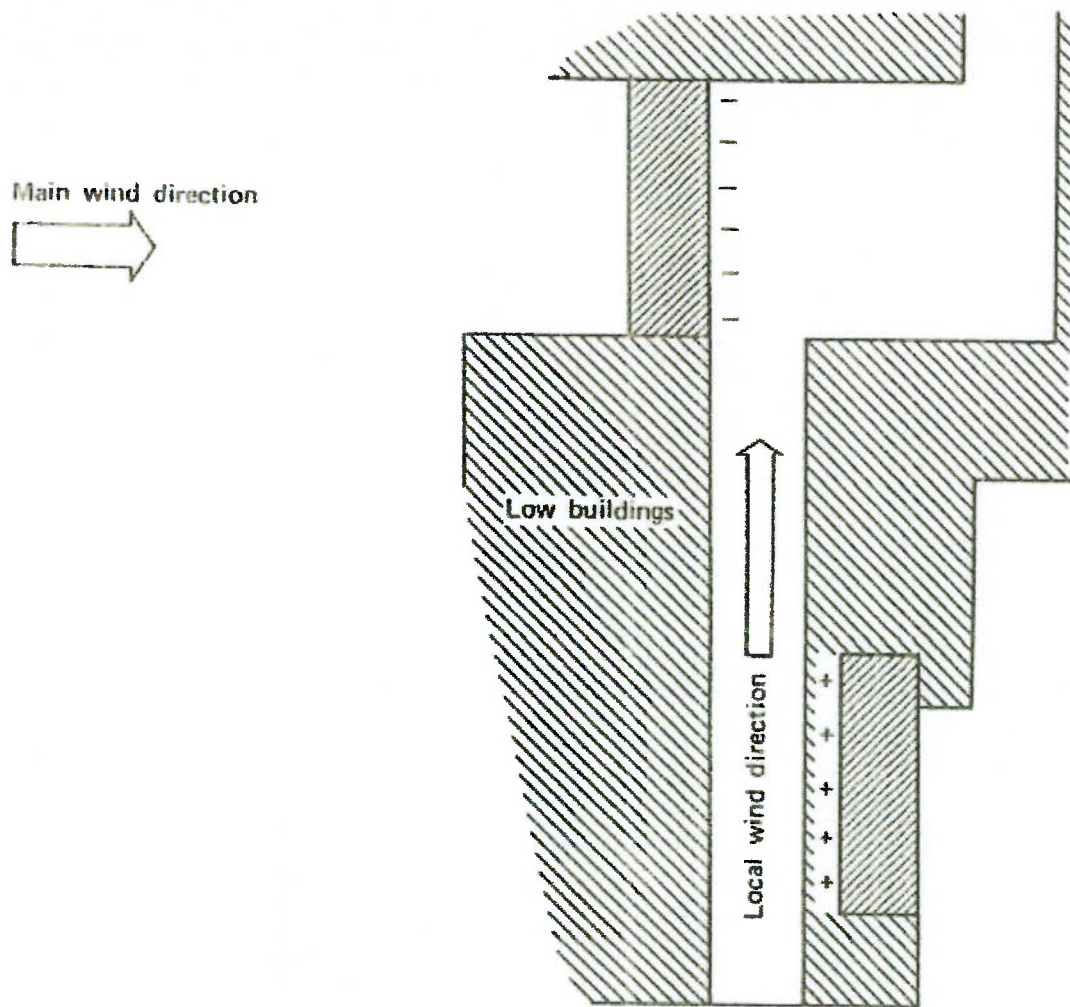


Figura (4.10.1.4) – escoamento transversal entre duas construções altas. Reproduzido de Penwarden e Wise (1975).

O padrão do escoamento superficial do vento em certa região, depende de um vasto conjunto de fatores, entre eles: as posições relativas das construções próximas, as dimensões das construções, a forma das construções; e, certamente, das características arquitetônicas (*e.g.*, aberturas ao nível do solo) das construções envolvidas, das rugosidades e das características topográficas dos terrenos ao redor do local; e da possível presença de um ou vários prédios de elevada altura na região próxima ao local.

O estudo em túnel de vento da situação, modelada em escala reduzida, permite o compreensão das condições de escoamento que ocorreriam na escala real, permitindo a proposição de soluções para as condições inadequadas observadas.

O estudo aerodinâmico de uma referência básica, como a representada na Figura (4.10.3), permite a obtenção de informações preliminares para a análise dos ventos superficiais em situações mais complexas (Penwarden e Wise, 1975).

O trabalho de Beranek (1984) estuda de forma mais detalhada as condições de escoamento em áreas externas ao redor de construções isoladas e também de conjuntos de construções.

4.11 Técnicas de visualização do escoamento

No processo de análise de estruturas de grande porte, deve ser dedicada especial atenção às alterações das condições de ação do vento envolvidas. Podem ocorrer situações desconfortáveis, inseguras ou mesmo perigosas. Os efeitos de interferência observados *in locu* dependem, em particular, dos obstáculos à montante da área em estudo, das condições do terreno, da geometria e da disposição espacial das estruturas vizinhas e de sua orientação em relação à direção do vento. Dependendo do nível de interferência aerodinâmica, seus efeitos podem afetar sensivelmente a segurança da estrutura, a eficiência dos sistemas de ventilação, a intensidade dos esforços eólicos, a qualidade do ar e o nível de conforto ao nível do pedestre, entre outros.

Diversos estudos têm focado os efeitos da interferência das construções na indução de alterações no escoamento ao redor da construção em análise. O trabalho de Kandhuri *et al.* (1997), trabalha com uma rede neural para estabelecer algumas regras de generalização,

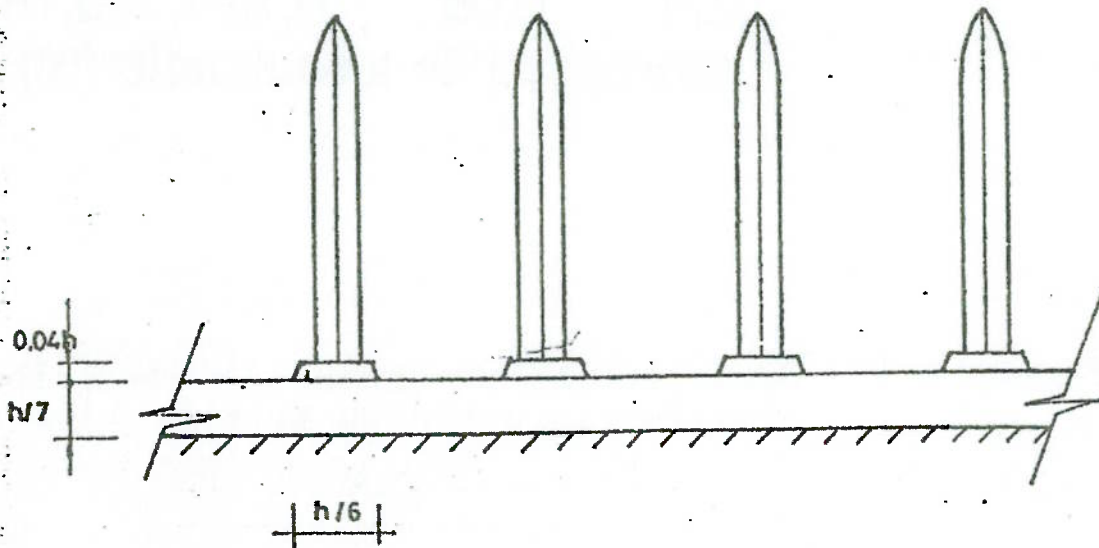


Figura (5.3.4): Geradores de vórtices de Counihan. Reproduzido de Cataldo (1992)

Esse método tem sido utilizado para gerar escoamentos tipo CLA correspondentes tanto a terrenos rurais como a terrenos urbanos. Os estudos de Counihan (1969) e (1970) registram a aplicação do método para efetuar simulações de terrenos rurais e o trabalho de (1972) para terrenos urbanos.

O trabalho de Robins (1979) descreve algumas simulações correspondentes aos dois tipos de terreno, em escala sensivelmente maior que as utilizadas por Counihan. Nos dois casos, foram utilizados os mesmos tipos de simuladores. A Tabela 5.3.1 apresenta as dimensões dos diversos componentes utilizados nas simulações de Counihan e de Robins seguindo a simbologia apresentada nas Figuras (5.3.1) a (5.3.4).

Tabela (5.3.1) Dimensões dos componentes dos sistemas de simulação. Reproduzido de Cataldo, (1992).

Autor	Terreno	h (m)	b / h	x_2 / h	x_1 / h	s / h
Counihan	Rural	0,15	0,143	0,833	2,4	
	Urbano	0,15	0,20	0,833	1,7	
Robins	Rural	0,6	0,13	1,33	6,4	0,04
	Rural	1,2	0,13	1,33	5,8	0,04
	Urbano	2,0	0,17	0,9	3,8	

É interessante notar algumas diferenças entre os dois conjuntos de simuladores. Em primeiro lugar, Counihan mede a distância x_l a partir da seção de saída da contração do túnel de vento no qual ele desenvolveu seus trabalhos até a barreira, enquanto que Robins o faz a partir do bordo de ataque do piso removível sobre o qual ele posicionou seu sistema de simulação até a barreira.

Ambos os autores escolheram a altura da barreira de forma a obter uma adequada distribuição de velocidade média ao longo da altura. Na Tabela 5.3.1, nota-se que Counihan e Robins obtiveram diferenças nas alturas relativas de barreira, em função da altura dos seus simuladores. A diferença registrada nesta altura pode ser devida às diferenças nas características dos escoamentos incidentes sobre os sistemas de simulação.

Nota-se que a altura da camada limite atmosférica simulada por Robins é consideravelmente maior que a simulada por Counihan. Tanto Counihan quanto Robins propõem colocar suplementos sobre a barreira em frente a cada simulador. A Tabela 5.3.1 apresenta a altura relativa dos suplementos (s/h) utilizados por Robins.

A Tabela 5.3.2 apresenta as dimensões características dos elementos utilizados para proporcionar rugosidade ao piso, à jusante dos simuladores. Nesse aspecto também se nota diferenças entre as duas modelagens. Cada autor utiliza diferentes elementos de rugosidade. Counihan utiliza placas e blocos “Lego”, enquanto que Robins utiliza elementos cúbicos.

Counihan em 1969 apresenta a equação 5.3.1, considerando o uso de elementos de rugosidade no piso do tipo blocos “Lego” de diferentes alturas e sempre sob uma mesma distribuição:

$$z_0 = \frac{k}{12,5} \quad (5.3.1)$$

sendo k a altura dos elementos de rugosidade.

Dependendo do parâmetro z_0 de forma, das dimensões e do espaçamento dos elementos de rugosidade, não se pode comparar com a extensão de rugosidade equivalente aos elementos cúbicos através da mesma expressão. Cataldo (1992) determinou a relação entre a área frontal e a área plana de cada autor para comparar as rugosidades utilizadas em cada método.

Cataldo, (1992) observa que, nas modelagens correspondentes ao terreno tipo rural, não se nota diferenças significativas entre os resultados obtidos pelos dois autores, apesar da existência de diferenças nas modelagens correspondentes ao terreno tipo urbano, apresentando a simulação de Robins uma área frontal sensivelmente maior que a utilizada por Counihan.

Tabela 5.3.2. Dimensões dos elementos de rugosidade. Reproduzido de Cataldo, (1992).

Autor	Terreno	comprimento(mm) x largura (mm)	altura(mm)	$A_p / A^{(1)}$	A_F / A
Counihan	Rural	Placa "Lego"	1,6		0,08
	Urbano	15,9 x 15,9	9,5	0,15	0,09
Robins	Rural	32 x 32	11,0	0,25	0,086
	Urbano	28 x 28	18,0	0,25	
	Urbano	28 x 100	38,0	0,08 ⁽²⁾	0,27
<p>(1) A_p / A é a porção de área plana ocupada pelos elementos de rugosidade. A_F é a área frontal dos elementos de rugosidade. (2) Robins utiliza dois tipos de elementos de rugosidade, apresentando-se na tabela as dimensões dos dois tipos assim como a porção de área que cada um ocupa.</p>					

5.4 Método de Standen

Esse método consiste em perturbar o escoamento com placas planas triangulares – agulhas – dispostas perpendicularmente ao escoamento e um piso aerodinamicamente rugoso à jusante das agulhas.

A Figura (5.4.1) apresenta um esquema do método proposto por Standen (1972), Reinhold (1978) e Irwin (1981).

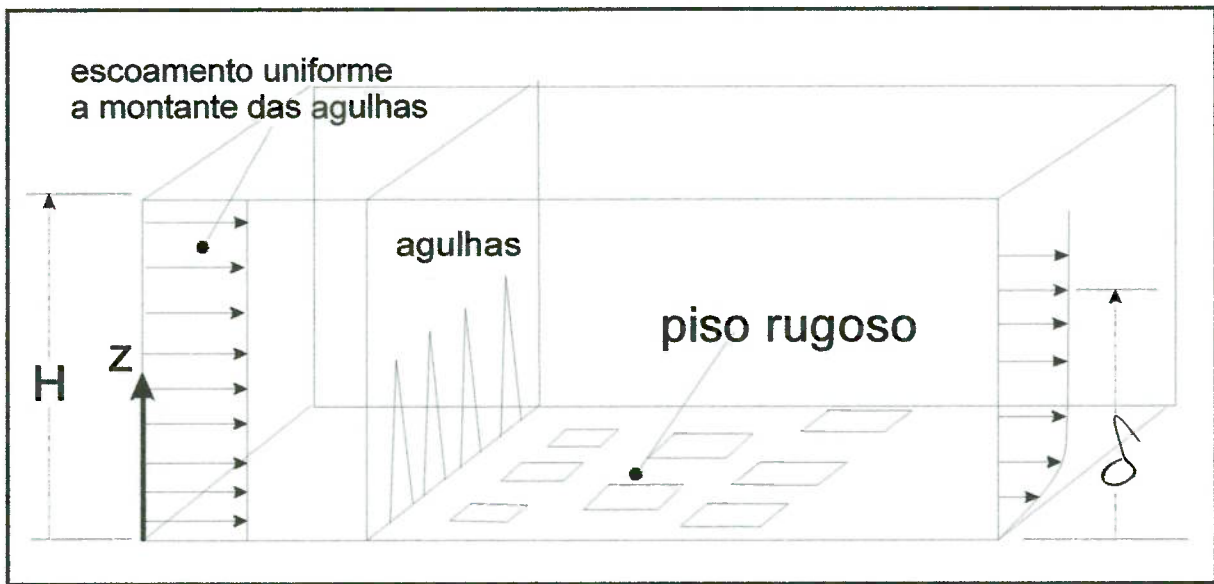


Figura (5.4.1): Ilustração da configuração do método de Standen. Reproduzido de Irwin (1981)

As Figuras (5.4.2) e (5.4.3) ilustram a geometria das agulhas. A agulha consiste de uma placa plana de forma triangular (triângulo isósceles) de base b e altura h e que à jusante possui outra placa de forma de triângulo retângulo de altura h e base $b/2$ solidária a primeira para dar rigidez estrutural ao conjunto.

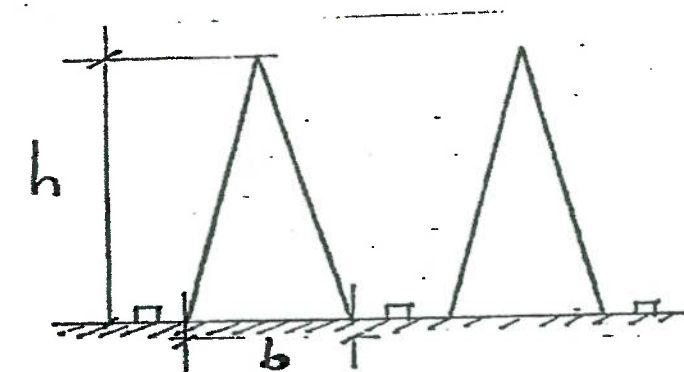


Figura (5.4.2) Detalhe das dimensões da agulha. Reproduzido de Cataldo (1992)

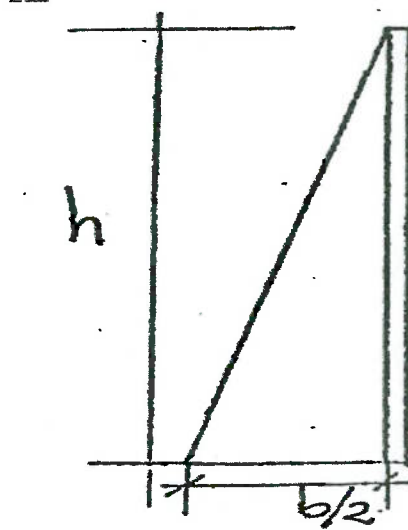


Figura (5.4.3) Detalhe da agulha. Reproduzido de Cataldo (1992)

Os elementos destinados a fornecer a rugosidade ao piso são cubos dispostos como indicado na Figura (5.4.4) Em todas as realizações aqui apresentadas a distância entre centros dos cubos consecutivos de uma mesma fila, D , é a mesma que separa filas consecutivas.

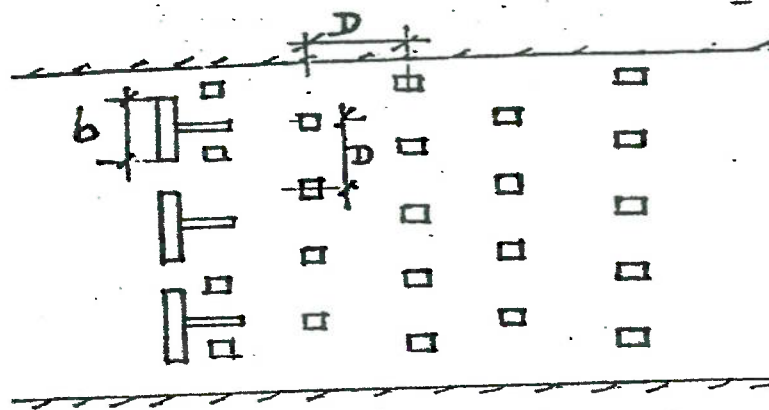


Figura (5.4.4): Ilustração da posição dos elementos do método Standen. Reproduzido de Cataldo (1952)

Irwin (1981) apresenta um conjunto de relações semi-empíricas que permite dimensionar as agulhas e os elementos de rugosidade a partir da camada limite e do expoente da distribuição de velocidade média com a altura, suposta do tipo potencial, que se deseja

obter, e das dimensões da seção de trabalho do túnel de vento utilizado. Em seu trabalho, Irwin afirma que dimensionando o sistema dessa forma se obterá, a uma distancia de seis alturas da agulha a jusante, um escoamento bidimensional com características similares às de uma camada limite atmosférica.

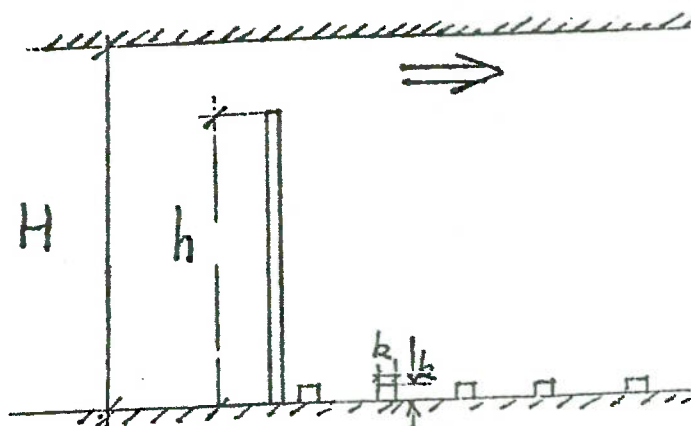


Figura (5.4.5): Vista em perfil dos elementos do método Standen. Reproduzido de Cataldo (1992)

Reinhold (1978) apresenta um experimento em que as agulhas têm altura igual à altura da seção de trabalho do túnel de vento ($h=H$ na Figura 5.4.5) e atende aproximadamente às relações empíricas propostas por Irwin. A Tabela 5.4.1 apresenta as dimensões das agulhas e dos elementos de rugosidade como descritas por Reinhold, e as equações semi-empíricas propostas por Irwin.

Reinhold simulou com seu método um escoamento tipo camada limite atmosférica correspondente a um terreno do tipo urbano. A partir das relações empíricas desenvolvidas por Irwin é possível dimensionar o método para simular a camada limite atmosférica correspondendo tanto a um terreno tipo rural como a um terreno tipo urbano.

Tabela 5.4.1 Dimensões das agulhas e dos elementos de rugosidade.

Reinhold	h = 180 mm	b = 216 mm	Quantidade de
	k = 102 mm	D = 305 mm	agulhas
			3
Irwin	$h = 1,39 \cdot \frac{\delta}{1 + 0,5 \cdot \alpha}$	$\frac{b}{h} = \frac{\Psi \left(\frac{H}{\delta} \right) \cdot (1 + 0,5 \cdot \alpha)}{2 \cdot (1 + \Psi)}$	
em que	$\Psi = \frac{\beta}{(1 - \beta)^2} \cdot \left[\frac{2}{1 + 2 \cdot \alpha} + \beta - \frac{1}{1 + \alpha} \right]$	$\beta = \frac{\delta}{H} \cdot \frac{\alpha}{1 + \alpha}$	
sendo	H altura de seção de trabalho do túnel de vento		
	$\frac{k}{\delta} = e^{\frac{2}{3} \cdot L \cdot \frac{D}{\delta} - 0,1161 \sqrt{14,706 \cdot \left(\frac{1 + \alpha}{\alpha} \right)^2 + 2,05}}$		
	Válida para		
	$30 < \frac{\delta \cdot D^2}{k^3} < 2000$		

Foram analisados os métodos de Standen e de Counihan, escolhendo o método de Counihan para os ensaios, uma vez que já se tinha disponível os elementos desse método, o que propicio sensível redução no tempo a ser dispendido na preparação para os ensaios.

A Figura (5.4.6) apresenta um esboço do túnel preparado para ensaio com o método de Counihan. Com essa configuração foram feitos 7 ensaios, alterando a altura dos elementos de rugosidade de forma gradativa. Em seguida foram removidos os geradores de vórtices e a barreira e procedeu-se de forma inversa, ou seja, a cada ensaio a altura dos elementos de rugosidade utilizados era inferior ao ensaio anterior. Dessa forma foram feitos 3 ensaios. Foi ensaiado, de forma complementar aos ensaios descritos acima, um modelo básico de arranjo de estruturas, pelo método de saltação de areia. Esse método permite a visualização

dos padrões formados pelo escoamento ao nível do solo, em uma região que a intensidade de turbulência é elevada e na qual a velocidade não segue a lei logarítmica.

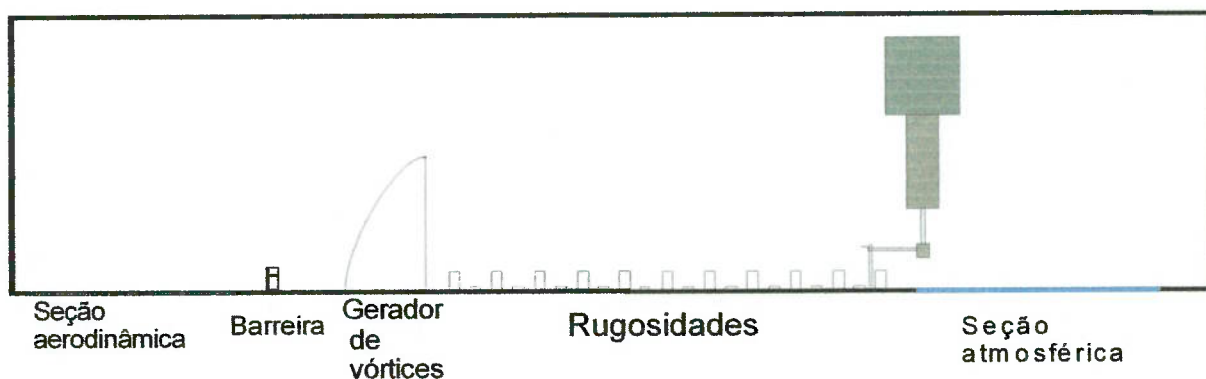


Figura (5.4.6): Esboço da configuração empregada para as simulações.

5.5 Metodologia para o ensaio de saltação

A Figura (5.5.1) apresenta as dimensões do modelo analisado e o seu arranjo. O modelo é composto de duas peças prismáticas de madeira, aparelhadas e lixadas de forma a assegurar que as superfícies fossem planas e lisas e os cantos dotados de ângulo retos. Os modelos foram posicionados de forma a receber o vento incidente perpendicularmente à face frontal.

A camada limite foi simulada pelo método de Counihan (1971), de tal forma a gerar uma camada limite de aproximadamente 500 mm. A rugosidade utilizada propiciou características do vento incidente similares àquelas encontradas em ambientes rurais com poucas edificações, caracterizando um terreno tipo II, de acordo com a norma ABNT 6123.

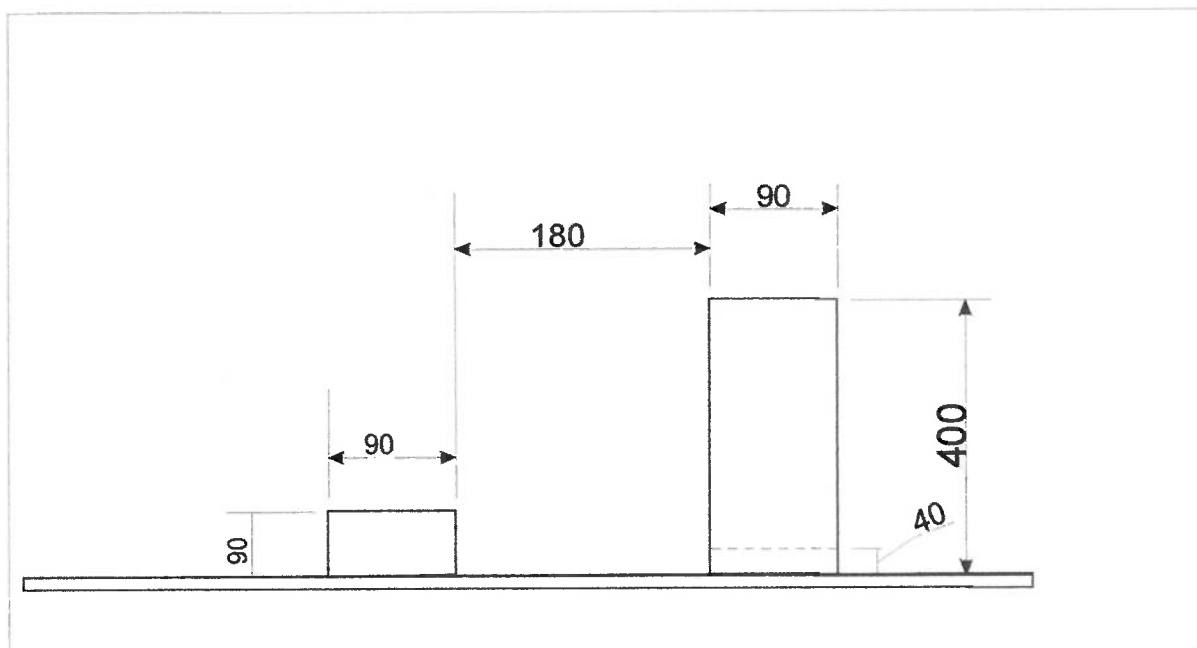


Figura (5.5.1) Dimensões do modelo para o modelo de ensaio de saltação de areia.

Para este trabalho, foi selecionada a metodologia de Counihan, por já haver disponível, no laboratório os elementos a serem utilizados. Em complementação aos ensaios de caracterização de túnel, foi realizado um estudo de saltação de areia, como apresentado a seguir.

No ensaio de saltação de areia, foi espalhada uma camada de areia de espessura uniforme e reduzida, com granulometria aproximadamente constante e pequena. A areia utilizada foi preparada pelo laboratório de areias do IPT para ensaios de resistência de concretos; possuindo diâmetro médio dos grãos de 300 μm . Cada rotação do ensaio foi mantida constante por um período próximo de três minutos. Após o padrão de cada rotação surgir, o ventilador era desligado e de forma a não alterar os registros na areia, tiram-se fotos seqüenciais, assegurando que a distância focal e o ângulo sejam sempre os mesmos, através de suporte adequado.

5.6 Procedimentos

Para a caracterização do escoamento no túnel de vento foi seguida uma seqüência lógica de etapas, compreendendo para cada ensaio, a preparação da rugosidade, ajustes nas condições de operação, registro das condições ambientes, aquisição e processamento dos dados e interpretação dos resultados obtidos. De forma simplificada, a rotina de ensaios consistiu das seguintes etapas:

- 1° Preparação da rugosidade;
- 2° Ajuste das condições de operação;
- 3° Registro das condições ambientes para correções;
- 4° Aquisição dos dados;
- 5° Processamento dos dados;
- 6° Análise dos resultados.

5.6.1 Preparação da rugosidade

Das dez configurações ensaiadas, sete configurações foram obtidas utilizando o Método de Counihan completo como descrito em 5.3, e três combinações utilizando o Método de Counihan modificado, através da remoção da barreira e dos geradores de vórtices.

As configurações de rugosidade obtidas com o uso do Método de Counihan completo foram denominadas r1, r2, r3, r4, r5, r6 e r7. Para a obtenção de cada uma dessas rugosidades foram mantidas constantes a geometria e a posição da barreira, da mesma forma que não foram alteradas a geometria e o posicionamento dos geradores de vórtices. As sete diferentes

rugosidades foram obtidas, portanto, através da variação da altura dos elementos de rugosidade e de duas distribuições uniformes ao longo do piso da seção de trabalho.

As três configurações obtidas com o uso do método de Counihan modificado foram denominadas r8, r9 e r10. Para a obtenção dessas rugosidades foram removidos os geradores de vórtices e a barreira. As três diferentes rugosidades foram obtidas, portanto, através da variação da altura dos elementos de rugosidade e de duas distribuições uniformes ao longo do piso da seção de trabalho.

A distribuição dos elementos de rugosidade, tanto para os ensaios pelo método de Counihan completo quanto para os ensaios pelo método de Counihan modificado, foi feita em dois padrões, denominados “arranjo retangular” e “arranjo em diamante”. O arranjo retangular foi obtido preenchendo linhas alternadas com nove elementos de rugosidade em cada linha. Dessa forma, o espaçamento entre cada elemento de uma mesma linha é de 300 mm e o espaçamento observado entre duas linhas preenchidas sucessivas é de 600 mm. A Figura (5.6.1.1) ilustra a disposição conforme o arranjo retangular. O arranjo retangular foi utilizado nas rugosidades r1, r3, r5, r8 e r9.

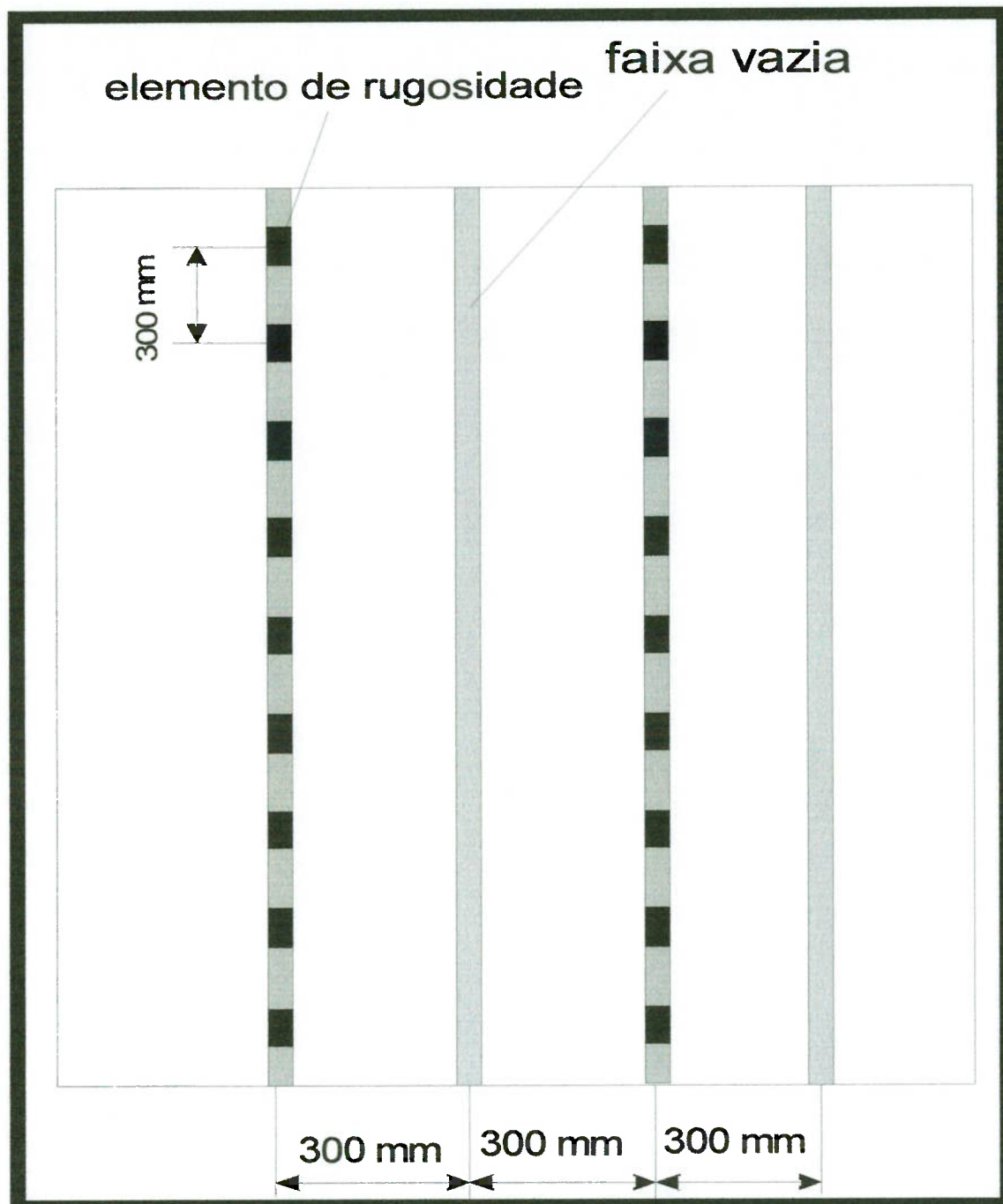


Figura (5.6.1.1): Arranjo retangular de elementos de rugosidade

Para o arranjo em diamante, as linhas intermediárias, vazias no arranjo retangular, foram preenchidas com dez elementos de rugosidade cada. Dessa forma, o espaçamento entre cada elemento de uma mesma linha é de 300 mm e o espaçamento observado entre duas

linhas preenchidas sucessivas é de 300 mm. A Figura (5.7.1.2) ilustra a disposição conforme o arranjo retangular. O arranjo em diamante foi utilizado nas rugosidades r2, r4, r6, r7 e r10.

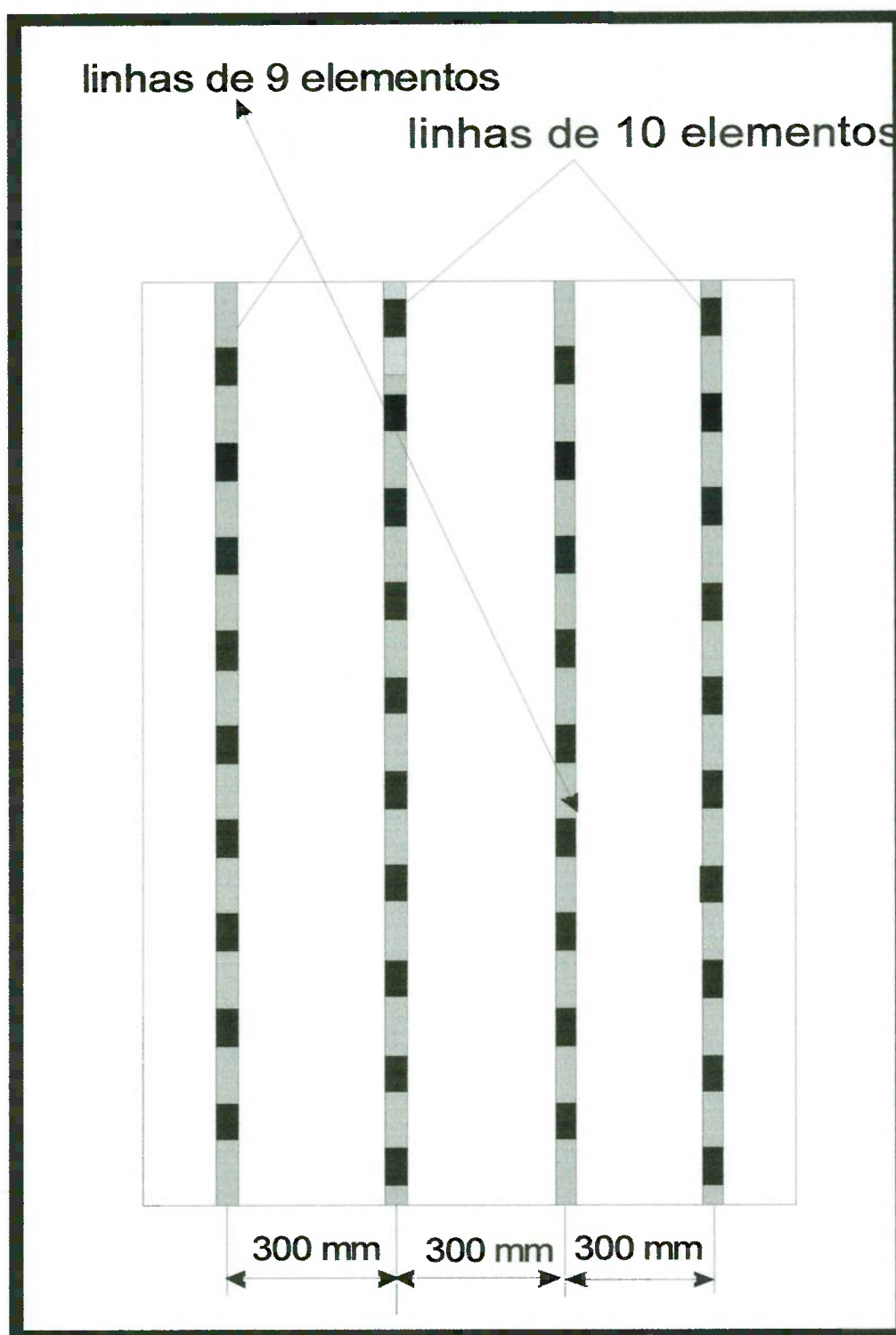


Figura (5.6.1.2): Arranjo em diamante de elementos de rugosidade

Para cada rugosidade foi utilizada uma combinação de elementos de rugosidade com base de dimensões constantes e de diferentes alturas. Uma vez fixados através das faixas de Velcro®, os elementos de rugosidade utilizados nos ensaios possuíam alturas de 15 mm, 25 mm, 65 mm e 85 mm, medidas a partir do piso do túnel.

Para a simulação pelo método de Counihan, onde a espessura da camada limite completa é simulada, foram empregadas quatro elipses altas (1400 mm) como geradores de vórtices e uma barreira de 200 mm, distante 1800 mm a montante da borda de fuga dos geradores de vórtices. Essa configuração foi alterada para as três últimas rugosidades, removendo os geradores de vórtices e também, a barreira.

Cada rugosidade foi ensaiada com a rotação do motor fixada em 200 rpm, em seguida para 300 rpm e em finalmente para 400 rpm.

A Figura (5.6.1.3) apresenta a sonda posicionada na seção de ensaio, ao longo da vertical sobre a qual as medições foram feitas. Apresenta também a rugosidade r_2 , compostas por elementos de rugosidade do tipo I, com 15 mm de altura, medidos a partir do piso do túnel, dispostos em arranjo diamante.

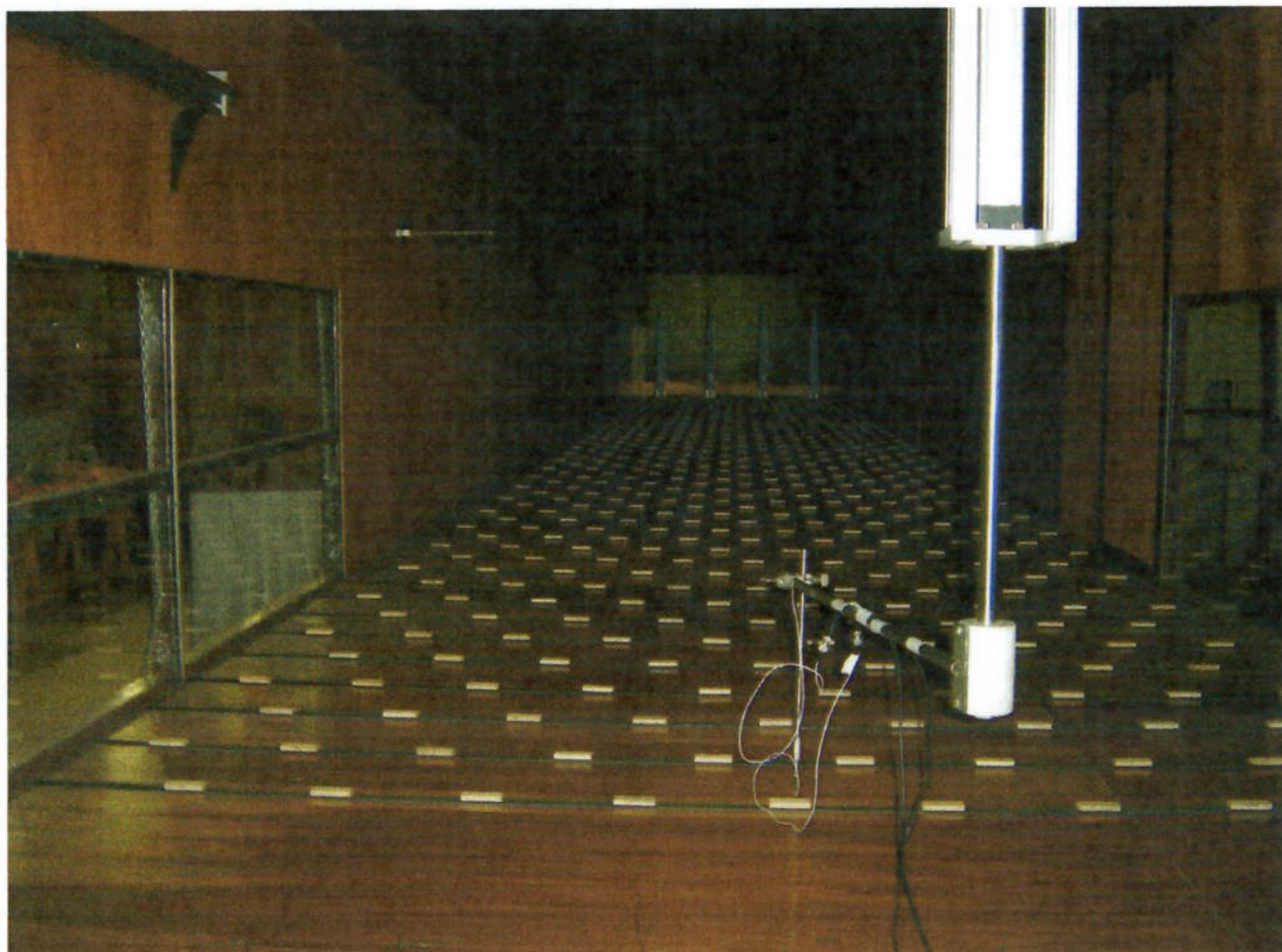


Figura (5.6.1.3): Posicionamento da sonda. Rugosidade r2.

5.6.2 Condições de operação

A rotação foi controlada através de um inversor de frequência. Cada uma das dez rugosidades foi ensaiada sob três condições de operação: 200 rpm, 300 rpm e 400 rpm. Para evitar interferências, a velocidade foi mantida constante por cerca de um minuto antes de cada medição no ponto. Para maior observação o ensaio de saltação de areia foi executado sob 11 rotações, mantendo-se cada uma por cerca de 3 minutos. A condição inicial do ensaio de saltação de areia foi 100 rpm e a rotação foi incrementada por um valor constante de 20 rpm até alcançar 300 rpm.

5.6.3 Medição de temperatura e calibração da sonda

Foram utilizados termistores e PT100 ao longo de cada ensaio. A sonda foi calibrada antes de cada seqüência de ensaios, não tendo sido observada variação expressiva entre as calibrações. A Figura (5.6.3.1) apresenta uma comparação entre as duas calibrações. Observa-se boa concordância entre as duas calibrações.

Na calibração foi utilizada a lei de King:

$$Tensão^2 = A + BU^n \quad (5.7.3.1)$$

onde A, B e n são coeficientes de ajuste.

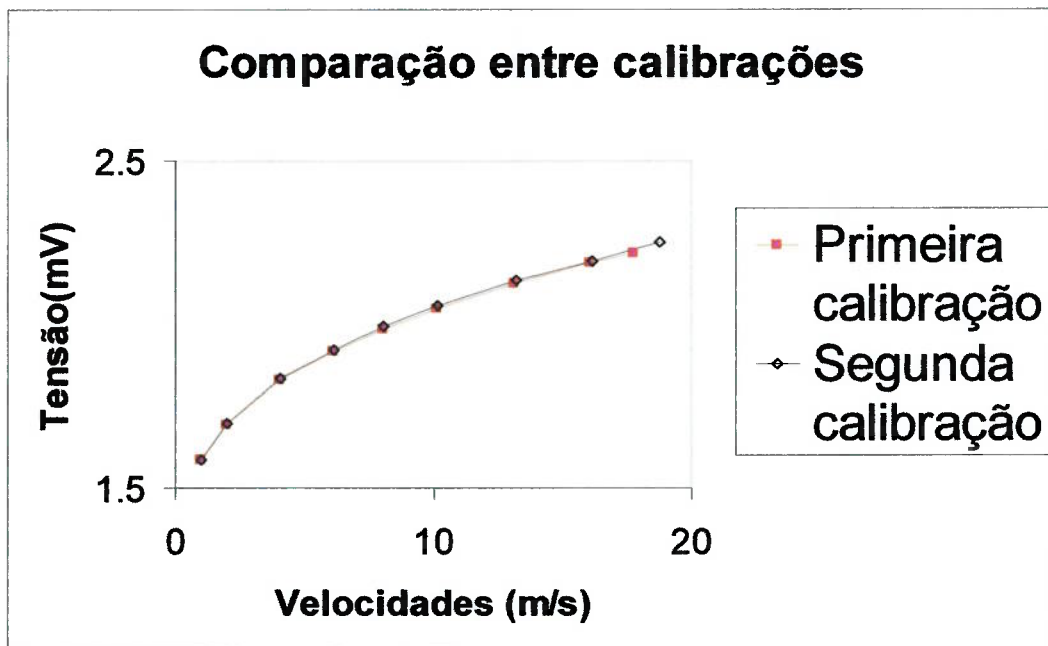


Figura (5.6.3.1): Comparação entre as calibrações.

5.6.4 Medição de velocidades

Foi utilizado um sistema de anemometria DANTEC composto por:

- Anemômetro :DANTEC STREAMLINE 90N10, com filtro para baixas frequências incorporado ;
- Sondas: DANTEC, tipo 55P01, ponte de fio quente;
- Placa de aquisição A/D: National Instruments ATMI016E10.

5.6.5 Processamento dos dados

Para o tratamento das séries temporais foram utilizadas rotinas de programação já escritas, baseadas no equacionamento apresentado no capítulo 4.

Os valores de z_0 e α foram obtidos pelo ajuste dos dados a um perfil logarítmico no trecho que segue a lei logarítmica e potencial na região externa a camada logarítmica, com o uso das equações (4.2.1) e (4.3.1).

A intensidade de turbulência foi obtida com o uso da equação (4.5.3).

Os valores de escala integral foram obtidos através do espectro de potências (equação 4.5.10). e as escalas de simulação através da equação (4.5.11) proposta por Cook (1978).

5.6.6 Incerteza

A incerteza dos resultados obtidos com o anemômetro de fio quente CTA (DANTEC) é uma combinação das incertezas das aquisições individuais de voltagens convertidas em velocidade e a incerteza da análise estatística das séries de velocidade.

A incerteza de cada amostra individual de velocidade é determinada na base do conhecimento detalhado sobre a instrumentação, a calibração do equipamento e das condições ambientes sob o qual o experimento é realizado (pressão, temperatura, umidade, etc.).

A incerteza da amostra de velocidade adquirida nas condições de calibração é tipicamente 1% com um intervalo de confiança de 95 %. Quando a incerteza do próprio calibrador é incluída, a incerteza total pode aumentar para cerca de 3 %, dependendo da qualidade da calibração.

A incerteza dos dados tratados depende tanto da incerteza de cada amostra como também do procedimento de amostragem e do número de amostras.

CAPITULO 6

ENSAIOS, RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para que se possa modelar o escoamento atmosférico, os túneis de vento tipo CLA precisam permitir o desenvolvimento de camadas-limites representativas do ambiente em estudo. Dessa forma, é necessário contar com escoamentos uniformes e com baixos níveis de turbulência, (Marshall, 1985 ou Bradshaw e Pankhurst, 1964), por isso se deseja avaliar os valores máximos de não uniformidade na velocidade de média e intensidade de turbulência.

Os ensaios para a investigação desses parâmetros foram realizados, conforme previsto, em duas séries:

1º Foram simuladas dez rugosidades, sendo sete pelo método de Counihan e três pelo método de Counihan modificado, obtido com a remoção dos geradores de vórtices e da barreira.

2º Foi simulado o escoamento, ao nível do solo, para um modelo de configuração clássica, usando o método de saltação de areia.

6.1 Ensaios de rugosidades típicas com o túnel vazio

Com o objetivo de caracterizar a distribuição de velocidade média, de intensidade de turbulência e o comprimento da escala integral de turbulência, foram ensaiadas dez combinações de rugosidades com o túnel trabalhando em vazio, ou seja, sem nenhum modelo. Foram levantados os perfis de velocidade média e de intensidade de turbulência para a seção central do túnel, a uma distância de 20,4 m a jusante da barreira.

As medições foram feitas ao longo de uma linha vertical, na seção central do túnel de vento, e a posição da vertical para o levantamento das curvas características do escoamento foi mantida para o método de Counihan modificado.. A Figura (6.1.1) ilustra a posição da linha vertical ao longo da qual foram levantadas as características do escoamento em relação aos elementos do Método de Counihan.

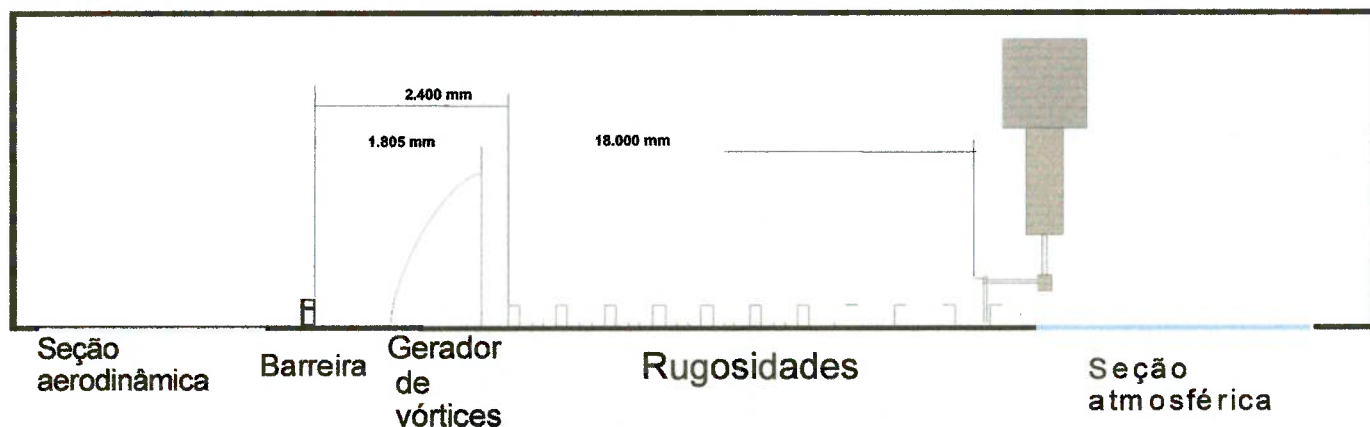


Figura (6.1.1): Posição relativa da vertical para as medições

Das dez configurações ensaiadas, sete configurações foram obtidas utilizando o Método de Counihan completo como descrito em 5.3, e três combinações utilizando o Método de Counihan modificado, através da remoção da barreira e dos geradores de vórtices.

As configurações de rugosidade estão descritas no capítulo 5.7.1.

A Figura (6.1.2) apresenta os dois tipos de arranjos utilizados.

A figura (6.1.3) apresenta o posicionamento da sonda, para o ensaio da rugosidade r2. Observa-se os elementos, do tipo I, dispostos sob o arranjo diamante.

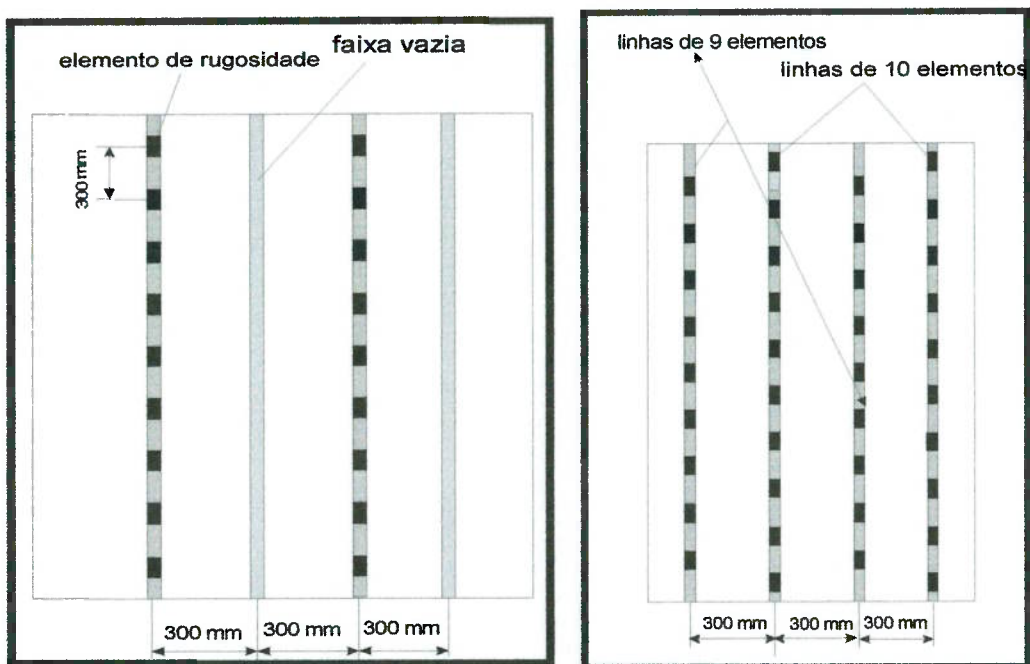


Figura (6.1.2): Arranjo retangular e arranjo em diamante.

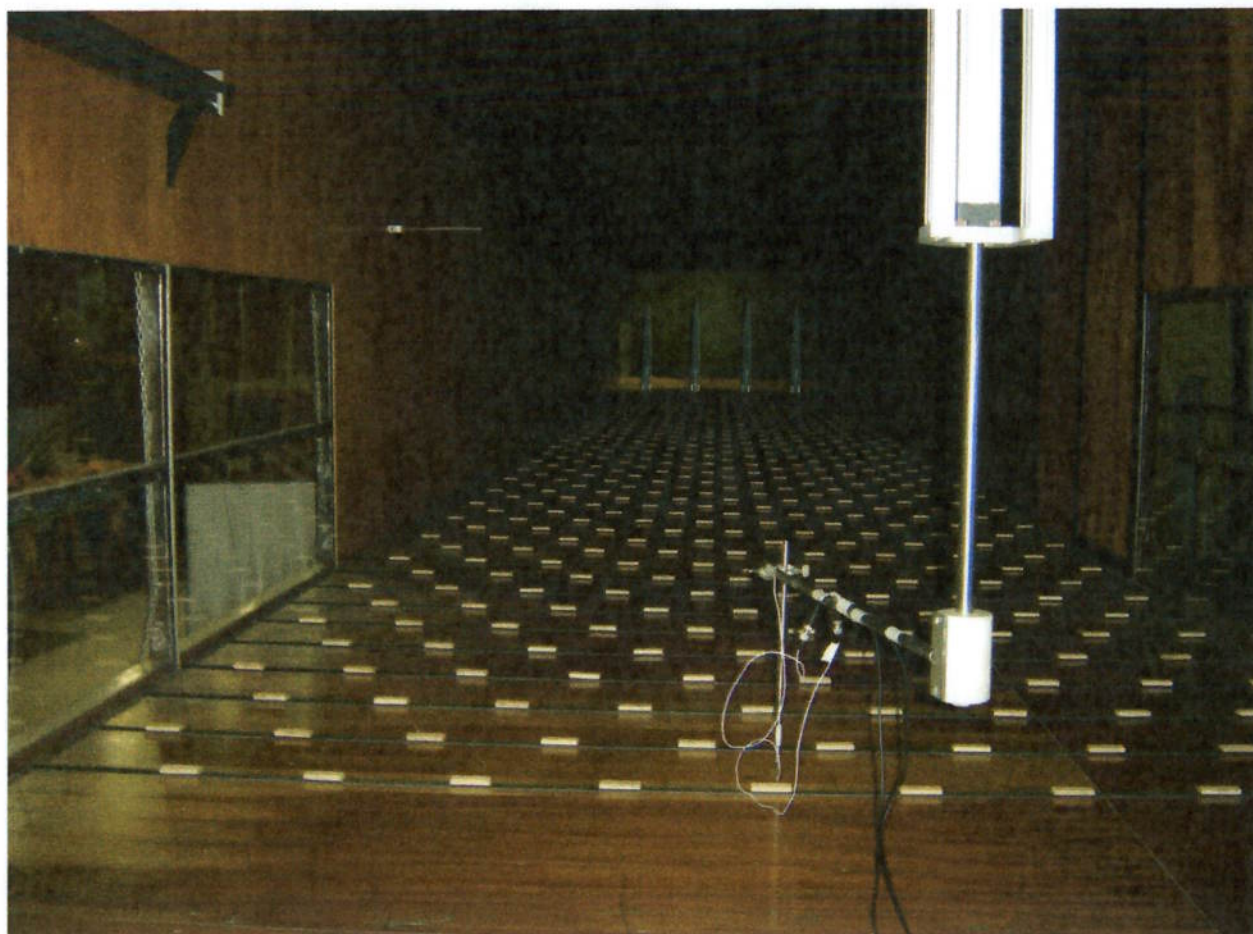


Figura (6.1.3): Posicionamento da sonda. Rugosidade r_2 .

6.1.1 Primeira rugosidade

Foi obtida preenchendo-se 30 linhas com nove elementos de rugosidade cada. Foram utilizados elementos de rugosidade do tipo I, com 15 mm de altura em relação ao piso do túnel. Os elementos foram dispostos sob o arranjo retangular, ao longo de 17 m do piso do túnel, iniciando o preenchimento a 2.430 mm a jusante da barreira. Os elementos de rugosidade foram posicionados de forma uniforme, com espaçamento, entre cada elemento de rugosidade de uma mesma linha, de 300 mm e espaçamento entre duas linhas sucessivas de 600 mm. A Figura (6.1.1.1) ilustra a disposição dos elementos de rugosidade para a rugosidade r1.

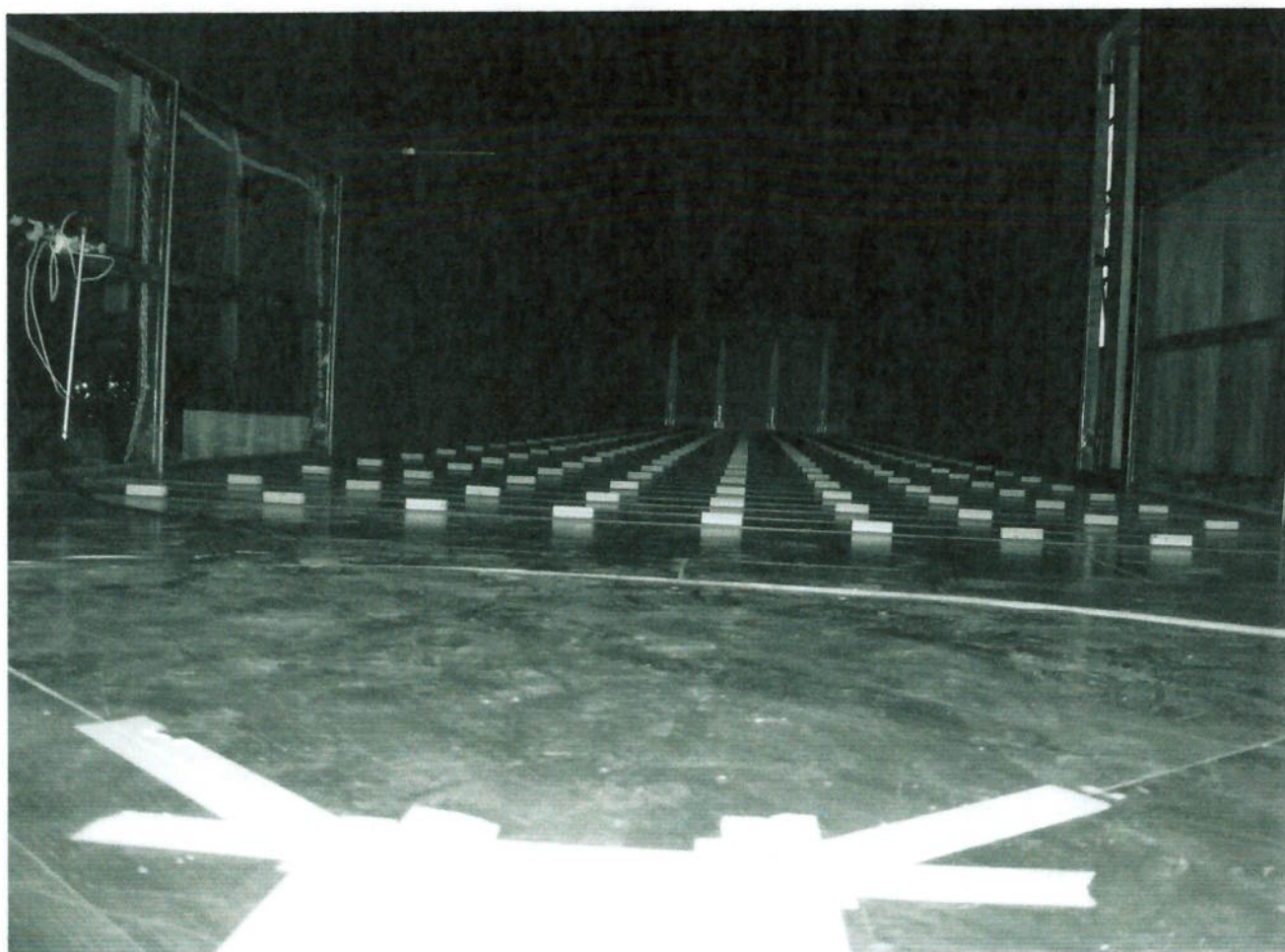


Figura (6.1.1.1) Disposição dos elementos de rugosidade na rugosidade r1.

As medições foram feitas ao longo de uma linha vertical no centro do túnel, em uma posição a 20,4 m a jusante da barreira.

A Figura (6.1.1.2) apresenta, para a rugosidade r_1 , os perfis de velocidade e de intensidade de turbulência observados para cada rotação de ensaio. Nota-se claramente o perfil logarítmico do perfil de velocidades e a baixa intensidade de turbulência do escoamento não perturbado, da ordem de 0,01%.

Observa-se pequena variação no parâmetro z_0 com o incremento da rotação. Para a rotação de 200 rpm, obteve-se $z_0 = 0,09$ m e para a condição de 400 rpm, $z_0 = 0,1$ m. A velocidade de cisalhamento u_τ , porém variou expressivamente entre as duas condições. foi observado, para a condição de 200 rpm, $u_\tau = 0,34$ m/s e para a condição de 400 rpm, $u_\tau = 0,71$ m/s.

Os perfis de velocidade média e de intensidade de turbulência para 200 rpm apresentam comportamento menos uniforme que os perfis observados para 300 rpm e 400 rpm, possivelmente em função da presença de ruído no sinal.

A Figura (6.1.1.3) apresenta, para a rugosidade r_1 , os perfis de velocidade e de intensidade de turbulência adimensionalizados para uma altura de referência de 1.000 mm e toma, para velocidade de referência, a velocidade observada a 1.000 mm.

As curvas de velocidade e de intensidade de turbulência para cada rotação foram sobrepostas e apresentam boa concordância, sem descolamento entre os perfis para as diferentes condições de operação.

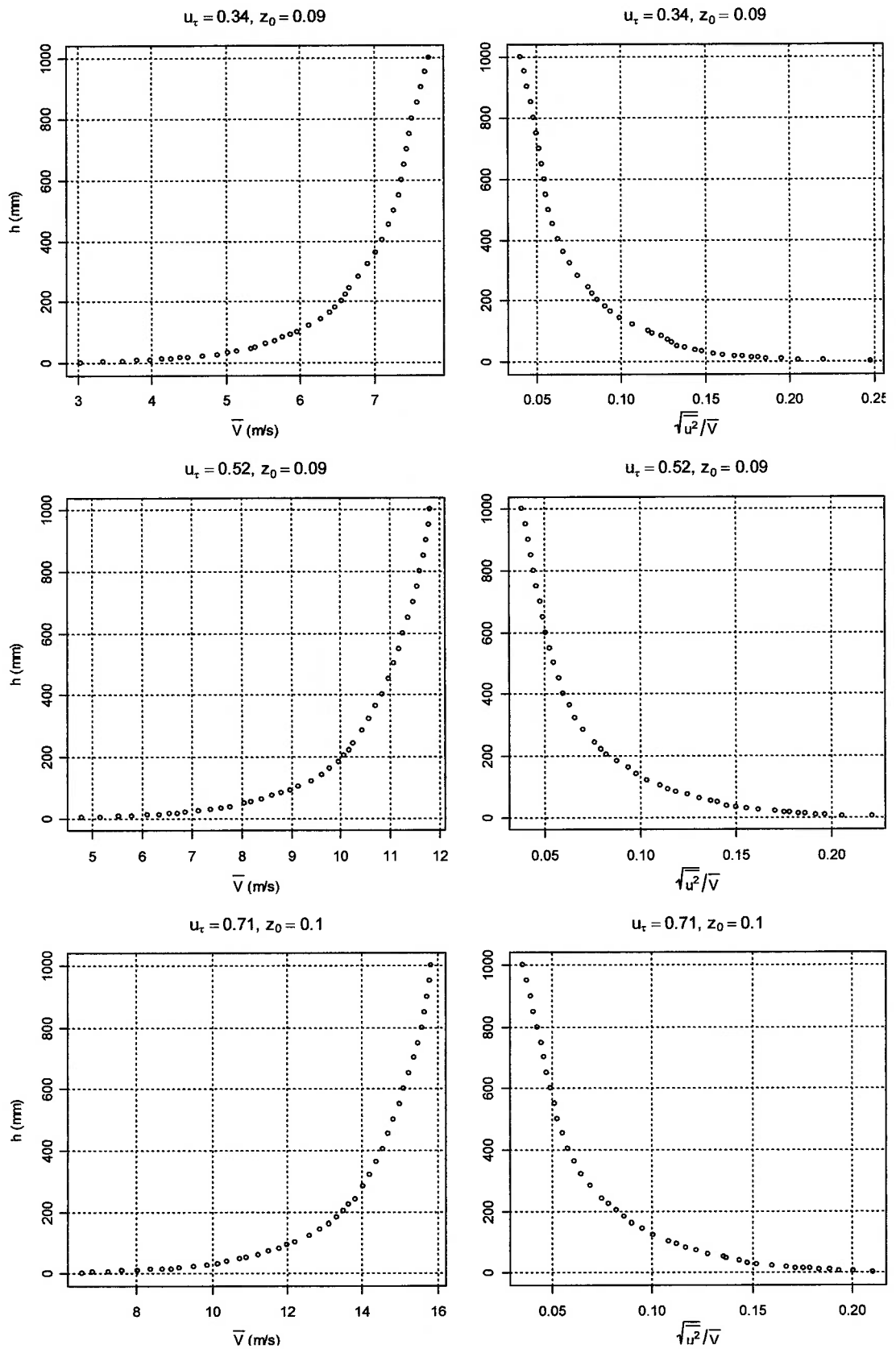


Figura (6.1.1.2): Perfis de velocidade e de intensidade de turbulência para 200, 300 e 400 rpm, respectivamente. Rugosidade utilizada: r1.

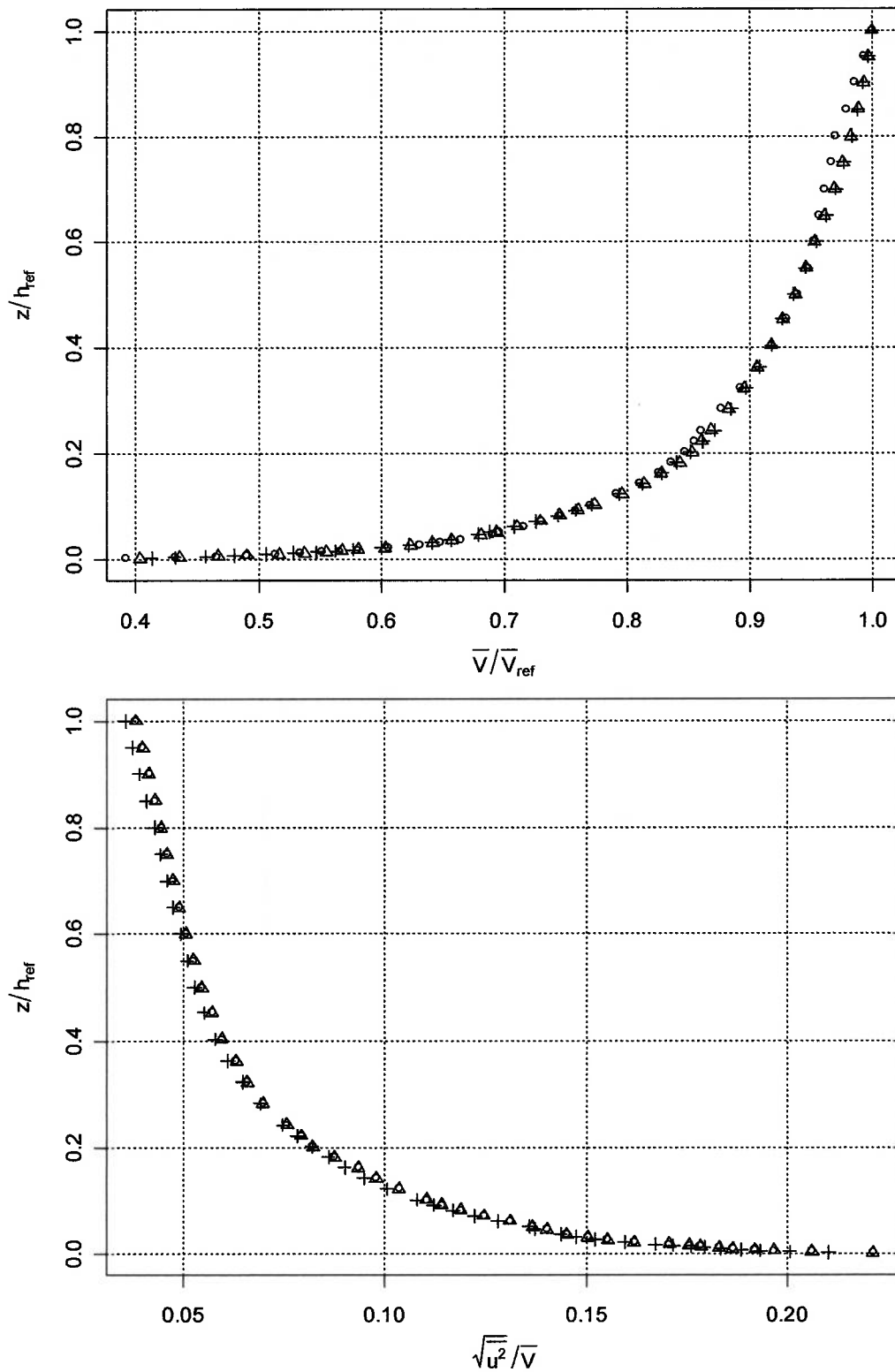


Figura (6.1.1.3): Perfis de velocidade e de distribuição de intensidade de turbulência, para $r1$, adimensionalizados com $h_{ref} = 1000$ mm, $\bar{V}_{ref} = \bar{V}_{1000}$, \circ 200 rpm, Δ 300 rpm e $+$ 400 rpm.

6.1.2 Segunda rugosidade

Foi obtida preenchendo-se, adicionalmente à r1, 29 linhas com dez elementos de rugosidade cada. Foram utilizados elementos de rugosidade do tipo I, com 15 mm de altura em relação ao piso do túnel. Os elementos foram dispostos sob o arranjo diamante, ao longo de 17 m do piso do túnel, iniciando o preenchimento a 2.400 mm a jusante da barreira. Os elementos de rugosidade foram posicionados de forma uniforme, com espaçamento, entre cada elemento de rugosidade de uma mesma linha, de 300 mm e espaçamento entre duas linhas sucessivas de 300 mm. A Figura (6.1.2.1) ilustra a disposição dos elementos de rugosidade para a rugosidade r2.

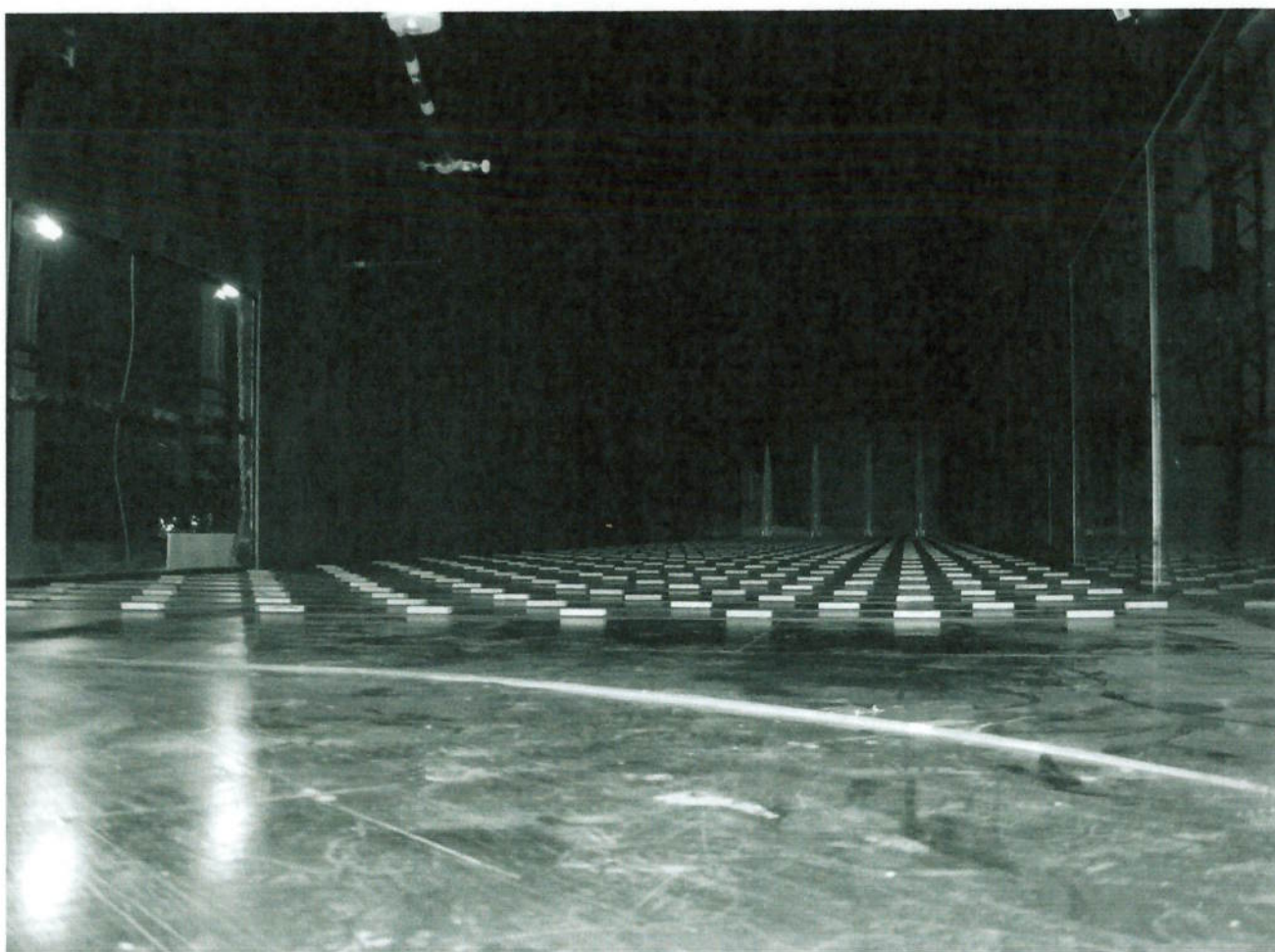


Figura (6.1.2.1) Disposição dos elementos de rugosidade na rugosidade r2.

A Figura (6.1.2.2) apresenta, para a rugosidade r_2 , os perfis de velocidade e de intensidade de turbulência observados para as condições de 200 rpm, 300 rpm e 400 rpm. Nota-se claramente o perfil logarítmico do perfil de velocidades e a baixa intensidade de turbulência do escoamento não perturbado, da ordem de 0,01%. Para essa rugosidade, o comportamento do parâmetro z_0 difere do observado com a rugosidade r_1 . Com o incremento da rotação de 200 rpm para 300 rpm, observa-se que o parâmetro z_0 passa de 0,2 para 0,3. Porém com a elevação da rotação para 400 rpm, o valor de z_0 decresce novamente para 0,2 m.

O comportamento da velocidade de cisalhamento, u_τ , manteve-se similar ao observado para a primeira rugosidade. Variando entre 0,39 m/s para a condição de 200 rpm até 0,8 m/s para a condição de 400 rpm, passando por 0,66 m/s para a condição de 300 rpm.

A maior perturbação impingida ao escoamento é observada no incremento da espessura da camada-limite desenvolvida. Enquanto para a condição 300 rpm, na rugosidade r_1 , observou-se a 1000 mm de altura velocidade inferior a 12 m/s, para a rugosidade r_2 , sob a mesma condição e a mesma altura, foi observada uma velocidade superior a 12 m/s.

Observa-se maior intensidade de turbulência na região próxima ao piso do túnel, efeito da perturbação no escoamento provocada pelo incremento da altura dos elementos de rugosidade próximos da sonda.

A Figura (6.1.2.3) apresenta, para a rugosidade r_2 , os perfis de velocidade e de intensidade de turbulência adimensionalizados para uma altura de referência de 1.000 mm e toma, para velocidade de referência, a velocidade observada a 1.000 mm.. As curvas de velocidade e de intensidade de turbulência para cada rotação foram sobrepostas e apresentam boa concordância, sem descolamento entre os perfis para as diferentes condições de operação. Todos os valores foram obtidos de medições ao longo de uma linha vertical no centro do túnel, em uma posição a 20,4 m a jusante da barreira.

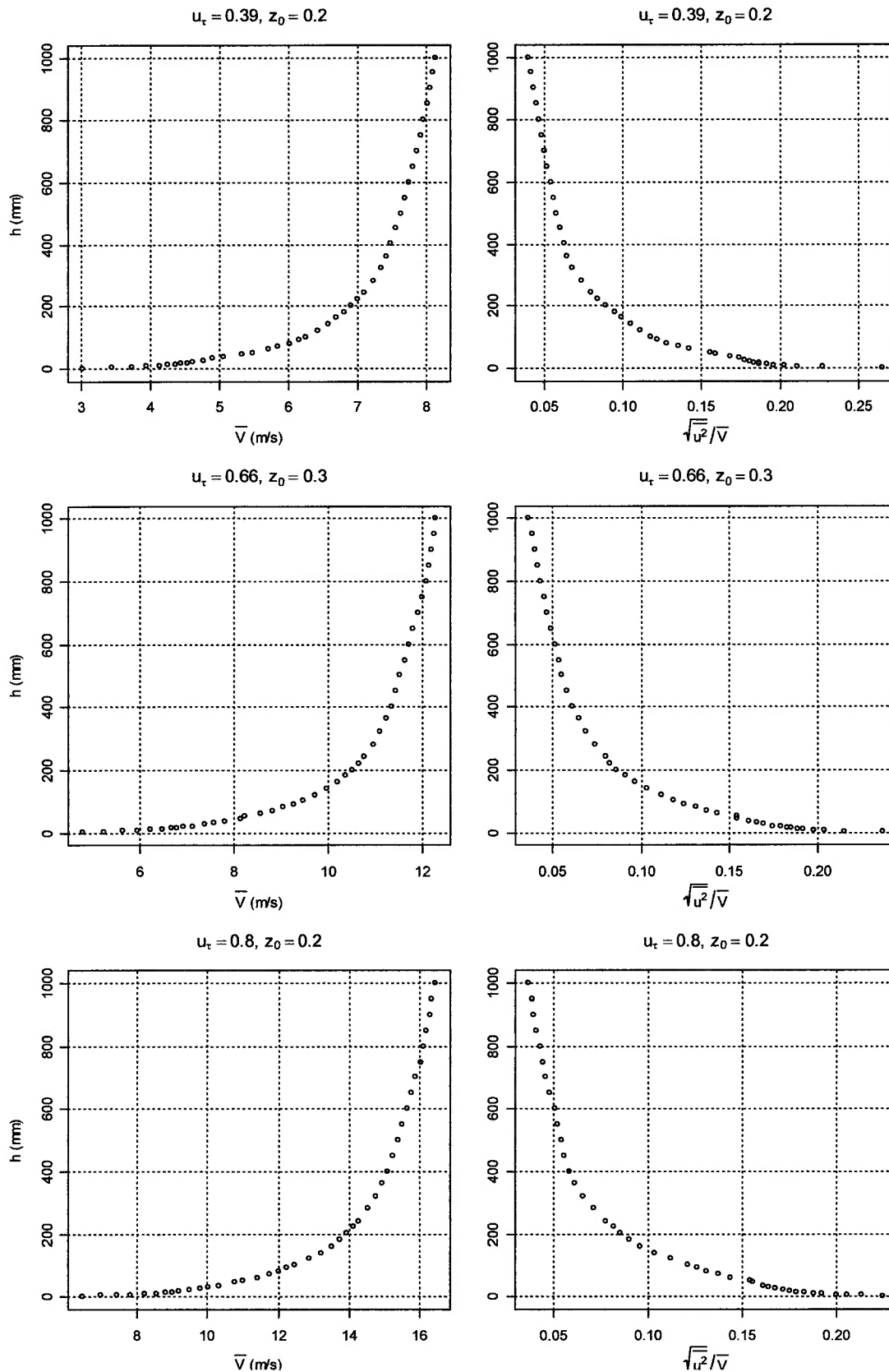


Figura (6.1.2.2): Perfis de velocidade e de intensidade de turbulência para 200, 300 e 400 rpm, respectivamente. Rugosidade utilizada: r2.

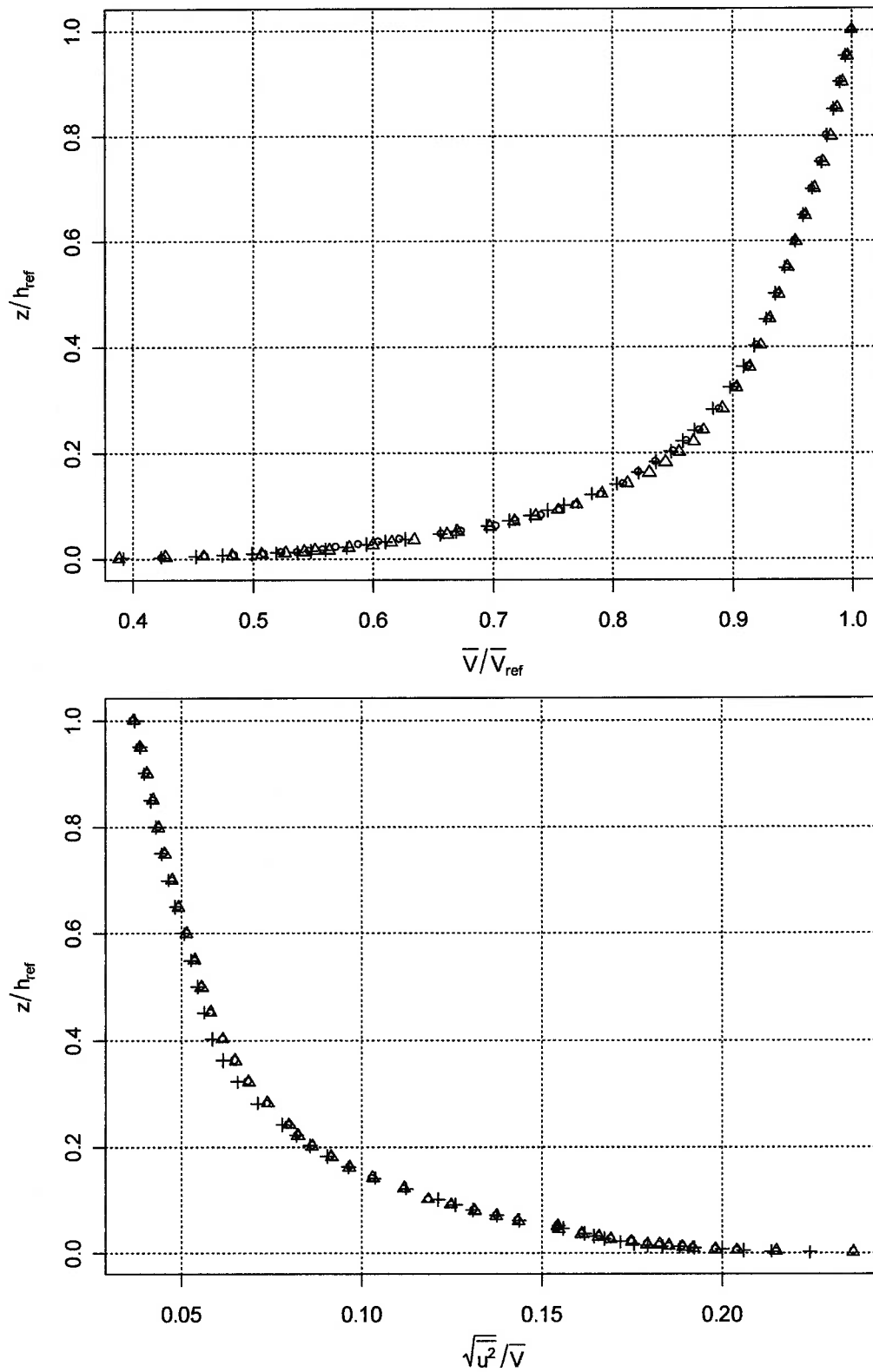


Figura (6.1.2.31) Perfis de velocidade e de distribuição de intensidade de turbulência, para r_2 , adimensionalizados com $h_{ref} = 1000$ mm, $\bar{V}_{ref} = \bar{V}_{1000}$, \circ 200 rpm, Δ 300 rpm e $+$ 400 rpm.

6.1.3 Terceira rugosidade

Foi obtida preenchendo-se 30 linhas com nove elementos de rugosidade cada. Foram utilizados elementos de rugosidade do tipo II, com 25 mm de altura em relação ao piso do túnel. Os elementos foram dispostos sob o arranjo retangular, ao longo de 17 m do piso do túnel, iniciando o preenchimento a 2.430 mm a jusante da barreira. Os elementos de rugosidade foram posicionados de forma uniforme, com espaçamento entre cada elemento de rugosidade de uma mesma linha, de 300 mm e espaçamento entre duas linhas sucessivas de 600 mm. A Figura (6.1.3.1) ilustra a disposição dos elementos de rugosidade para a rugosidade r3.



Figura (6.1.3.1): Disposição dos elementos de rugosidade na rugosidade r3.

A Figura (6.1.3.2) apresenta, para a rugosidade r3, os perfis de velocidade e de intensidade de turbulência observados para as condições de 200 rpm, 300 rpm e 400 rpm,

respectivamente. Nota-se claramente o perfil logarítmico do perfil de velocidades e a baixa intensidade de turbulência do escoamento não perturbado, da ordem de 0,01%. Para essa rugosidade, o comportamento do parâmetro z_0 difere do observado com a rugosidade r_1 e apresenta um comportamento análogo ao observado com a rugosidade r_2 . Com o incremento da rotação de 200 rpm para 300 rpm, observa-se que o parâmetro z_0 passa de 0,2 m para 0,4 m. Porém, com a elevação da rotação para 400 rpm, o valor de z_0 decresce novamente, agora para o valor intermediário de 0,3 m.

O comportamento da velocidade de cisalhamento, u_τ , manteve-se similar ao observado para a primeira rugosidade. Variando entre 0,38 m/s para a condição de 200 rpm até 0,82 m/s para a condição de 400 rpm, passando por 0,64 m/s para a condição de 300 rpm.

Observa-se maior intensidade de turbulência na região próxima ao piso do túnel, efeito da perturbação no escoamento provocada pelo incremento na altura dos elementos de rugosidade próximos da sonda.

A Figura (6.1.3.3) apresenta, para a rugosidade r_3 , os perfis de velocidade e de intensidade de turbulência adimensionalizados para uma altura de referência de 1.000 mm e toma, para velocidade de referência, a velocidade observada a 1.000 mm.

Na Figura (6.1.3.3), as curvas de velocidade e de intensidade de turbulência para cada rotação foram sobrepostas e apresentam boa concordância, sem descolamento entre os perfis para as diferentes condições de operação. No perfil de intensidade de turbulência adimensionalizado, nota-se claramente a influência da altura do elemento de rugosidade no crescimento da espessura de subcamada rugosa obtida, representada, *grosso modo*, pela inflexão na curva.

Todos os valores foram obtidos de medições ao longo de uma linha vertical no centro do túnel, em uma posição a 20,4 m a jusante da barreira.

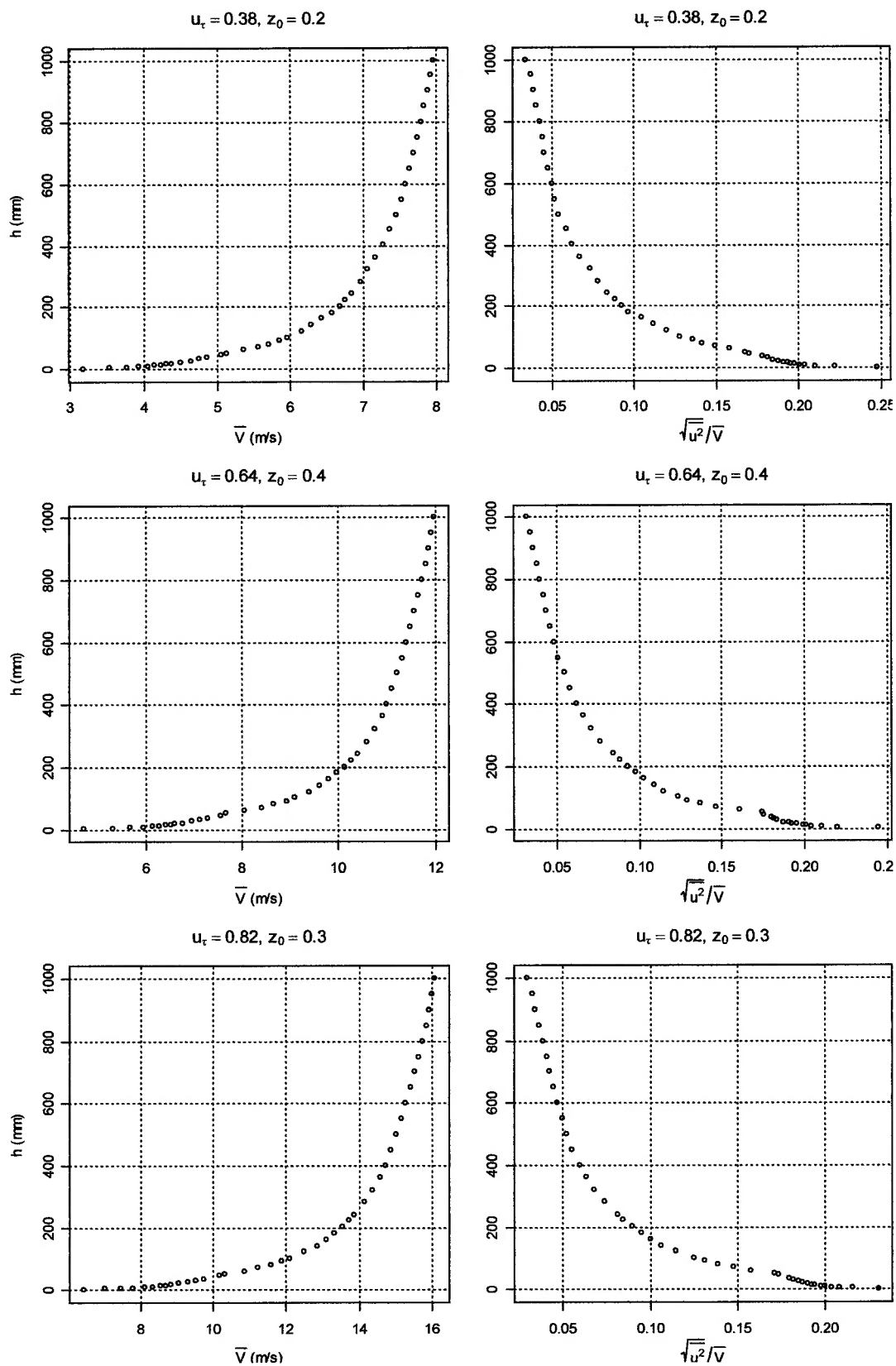


Figura (6.1.3.2): Perfis de velocidade e de intensidade de turbulência, obtidos com r3, para 200, 300 e 400 rpm, respectivamente.

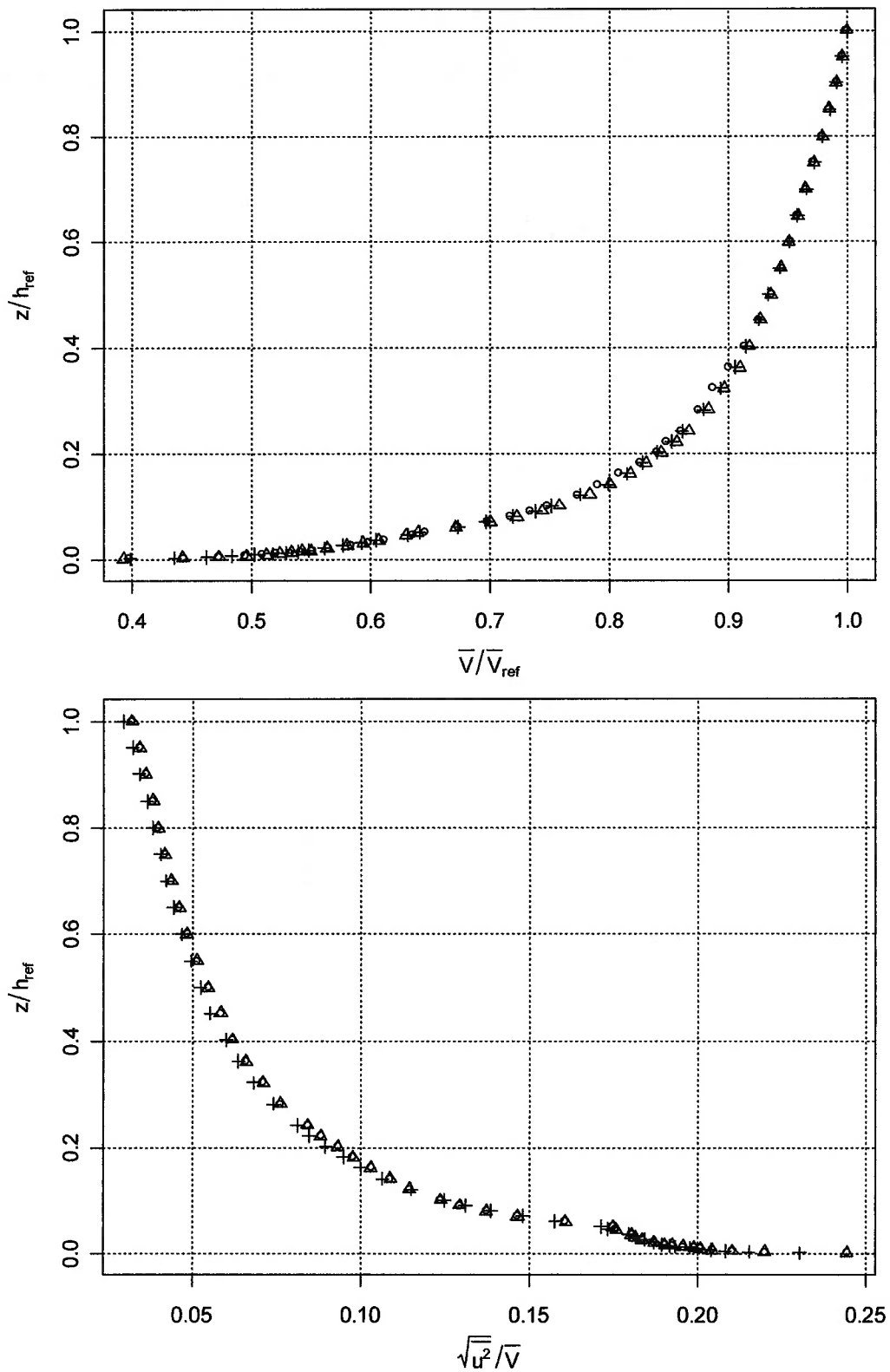


Figura (6.1.3.3): Perfil de velocidade e de distribuição de intensidade de turbulência, para $r3$, adimensionalizados com $h_{ref} = 1000$ mm, $\bar{V}_{ref} = \bar{V}_{1000}$, \circ 200 rpm, Δ 300 rpm e $+$ 400 rpm.

6.1.4 Quarta rugosidade

Foi obtida preenchendo-se, adicionalmente à r3, 25 linhas com dez elementos de rugosidade cada. Foram utilizados elementos de rugosidade do tipo II, com 25 mm de altura em relação ao piso do túnel. Os elementos foram dispostos inicialmente sob arranjo retangular, com linhas de 9 elementos ao longo de 1.500 mm, o preenchimento a 2.430 mm a jusante da barreira, com uma linha de nove elementos. As quatro primeiras linhas de dez elementos não foram preenchidas, de forma que o preenchimento com padrão diamante inicia em uma posição a 2.610 mm a jusante da barreira. Os elementos de rugosidade foram posicionados de forma uniforme, com espaçamento, entre cada elemento de rugosidade de uma mesma linha, de 300 mm e espaçamento entre duas linhas sucessivas de 300 mm. A Figura (6.1.4.1) ilustra a disposição dos elementos de rugosidade para a rugosidade r2.

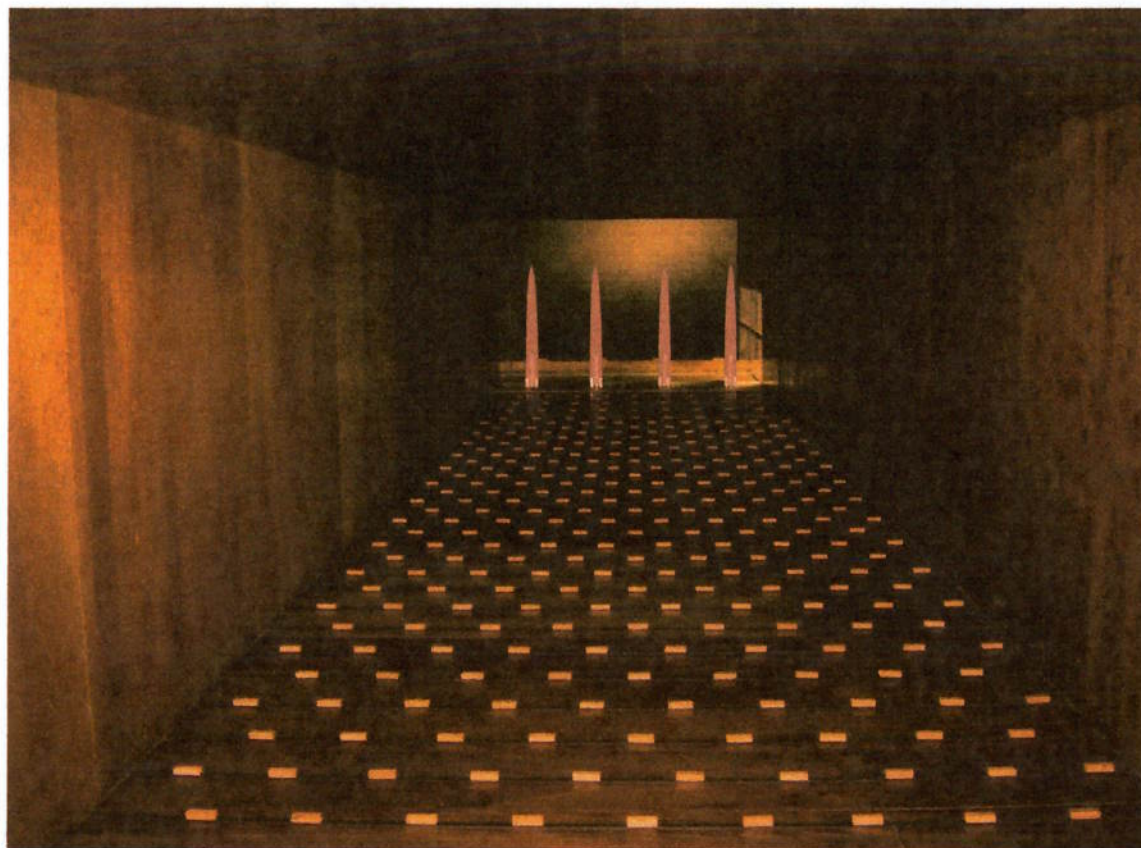


Figura (6.1.4.1): Disposição dos elementos de rugosidade na rugosidade r4.

A Figura (6.1.4.2) apresenta, para a rugosidade r_4 , os perfis de velocidade e de intensidade de turbulência observados para as condições de 200 rpm, 300 rpm e 400 rpm, respectivamente. Nota-se claramente o perfil logarítmico do perfil de velocidades e a baixa intensidade de turbulência do escoamento não perturbado, da ordem de 0,01%. Para essa rugosidade, o comportamento do parâmetro z_0 difere do observado com a rugosidade r_1 e também do comportamento observado com as rugosidades r_2 e r_3 . Com o incremento da rotação de 200 rpm para 300 rpm, observa-se que o parâmetro z_0 passa de 0,5 m para 0,6 m. Mantendo-se constante em 0,6 m para a condição de 400 rpm.

O comportamento da velocidade de cisalhamento, u_τ , manteve-se similar ao observado com as rugosidades r_1 , r_2 e r_3 . Observou-se 0,44 m/s sob 200 rpm e 0,89 m/s para a condição de 400 rpm. Para a condição intermediária de 300 rpm obteve-se 0,64 m/s.

Observa-se maior intensidade de turbulência na região próxima ao piso do túnel, efeito da perturbação no escoamento provocada pelo incremento na altura dos elementos de rugosidade próximos.

A Figura (6.1.4.3) apresenta, para a rugosidade r_4 , os perfis de velocidade e de intensidade de turbulência adimensionalizados para uma altura de referência de 1.000 mm e toma, para velocidade de referência, a velocidade observada a 1.000 mm.

Na Figura (6.1.4.3), as curvas de velocidade e de intensidade de turbulência para cada rotação foram sobrepostas e apresentam boa concordância, sem descolamento entre os perfis para as diferentes condições de operação. No perfil de intensidade de turbulência adimensionalizado, nota-se claramente a influência da altura do elemento de rugosidade no crescimento da espessura de subcamada rugosa obtida, representada, *grosso modo*, pela inflexão na curva.

Todos os valores foram obtidos de medições ao longo de uma linha vertical no centro do túnel, em uma posição a 20,4 m a jusante da barreira.

visando o estudo das cargas de projeto. Contudo, como observado por Kandhuri *et al.* (1998), as tentativas de se obter recomendações padronizadas não têm logrado êxito, devido à natureza complexa do problema e às expressivas diferenças de abordagem, exigidas nos diferentes estudos. De fato, He & Song (1999) demonstraram, em seu trabalho, que cada situação é, em grande parte, única, exigindo estudo específico do arranjo físico e das condições de ambiente da área de interesse.

O foco do estudo, nesses casos, é o escoamento nas áreas sob análise, modificado pela influência combinada das construções adjacentes, de dimensões variáveis e dispostas em arranjos espaciais particularmente específicos.

A complexidade inerente aos escoamentos no campo faz das investigações em túneis de vento o único método disponível para estudos precisos e detalhados para tais problemas.

A metodologia experimental a ser utilizada deve fornecer uma descrição detalhada e precisa das medições, combinada com rapidez de obtenção de resultados; e também ser versátil, atendendo às consideráveis alterações no modelo demandadas na determinação de soluções para uma situação inadequada.

Frequentemente, o engenheiro de túnel de vento está de frente com o problema primário, mas não menor, de convencer o arquiteto e o planejador que seus projetos ou planos, apesar de satisfazerem as especificações gerais, são deficientes do ponto de vista estrutura ou ambiental e que as alterações sugeridas merecem ser consideradas. A visualização dos detalhes do escoamento sob discussão torna a argumentação mais sólida e o entendimento dos processos envolvidos mais intuitivo, propiciando melhor aceitação.

Para permitir a visualização do escoamento, trabalha-se com diferentes técnicas, tais como:

- Injeção de fumaças e gases;
- Saltação de partículas;

- Posicionamento de linhas.

Dentre essas técnicas, a saltação de partículas (areias, pós metálicos, pós orgânicos) permite ao pesquisador avaliar o escoamento na região próxima ao solo de forma qualitativa e, através de expressões empíricas, determinar as características quantitativas do escoamento rente ao solo.

Para demonstrar algumas características dos métodos de visualização de escoamento, é apresentado o método de Saltação de areia e, em seguida o processo será ilustrado com o ensaio de um modelo típico.

4.11.1 Saltação de areia – A técnica de erosão

Quando o vento sopra sobre uma camada de areia solta espalhada sobre uma superfície horizontal e contínua, nota-se que é necessária uma velocidade relativamente bem definida para o início do processo de saltação dos grãos.

O estudo de Owen (1964) permite, considerando que os grãos são aproximadamente de tamanho uniforme, de diâmetro pequeno e define o número de Reynolds:

$$R = \frac{u_* \cdot d}{\nu} \quad (4.11.1)$$

baseado no diâmetro médio do grão, d ; e na velocidade de atrito u_* , ser inferior a 5; concluir que a camada de areia depositada na superfície será mais delgada que a subcamada viscosa do escoamento, fazendo com que a camada compacta se comporte como aerodinamicamente lisa.

Borges & Saraiva (1979) demonstram que sob essas condições, pode-se considerar que o limiar da velocidade de saltação não é fortemente dependente das características do escoamento como perfil de velocidade e espessura da camada limite.

Dessa forma, Borges e Saraiva (1979) demonstram que, para grãos de uma determinada geometria, espalhados com concentração uniforme, por uma superfície contínua, o número de Froude de saltação será função do número de Reynolds:

$$F = \frac{\rho \cdot \mu_*^2}{\rho_s \cdot g \cdot d} \quad (4.11.2).$$

Nessa expressão, ρ_s é a massa específica da areia, d é o diâmetro médio dos grãos de areia e g , a aceleração da gravidade.

O estudo de Owen (1964) indica que, ao iniciar a trajetória de saltação os grãos se deslocam verticalmente, reduzindo a dependência do fenômeno das propriedades características da superfície de base (rugosidade, ângulo de atrito, etc.).

Ao alcançar um limiar de velocidade de corrente livre, U , suficientemente elevado, ocorrerá o início do processo de saltação. Para escoamento tridimensional, mantendo uma determinada velocidade U constante no tempo, após um período de acomodação, se observa um padrão de limpeza (remoção de areia). O contorno da superfície assim obtida representa a região na qual a velocidade de cisalhamento do escoamento alcança o limiar de saltação. Procedendo a variação da velocidade de corrente livre do escoamento, pode-se obter uma família de linhas, na qual cada elemento da família terá relação direta com um valor particular de velocidade de corrente livre, respeitando para todas elas, o mesmo valor de u_* .

Borges & Saraiva (1979), apresentam a Figura (4.11.1), obtida através de experimentos com areia de praia oceânica peneirada em seis tamanhos diferentes, a partir de 0,15 mm até 0,60 mm, espalhada com uma concentração superficial variando de 5 mg/cm² até 9 mg/cm² sobre a superfície de uma placa de laminado do tipo utilizado para a produção de quadros-negros. O escoamento foi produzido por um jato circular turbulento ($3,5 \times 10^3 < R_0 < 10^4$) incidindo perpendicularmente à placa e também escoando paralelamente à placa.

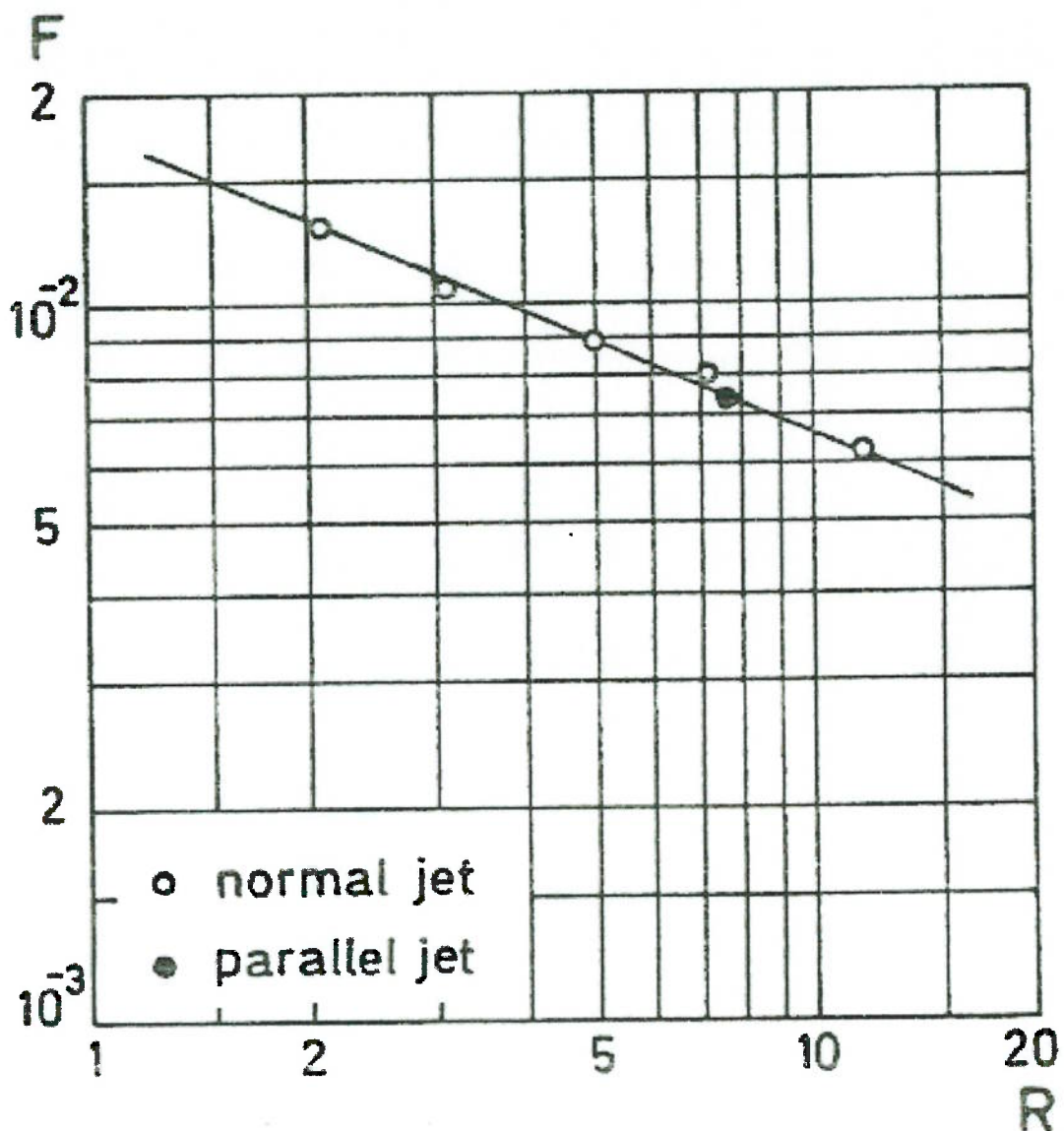
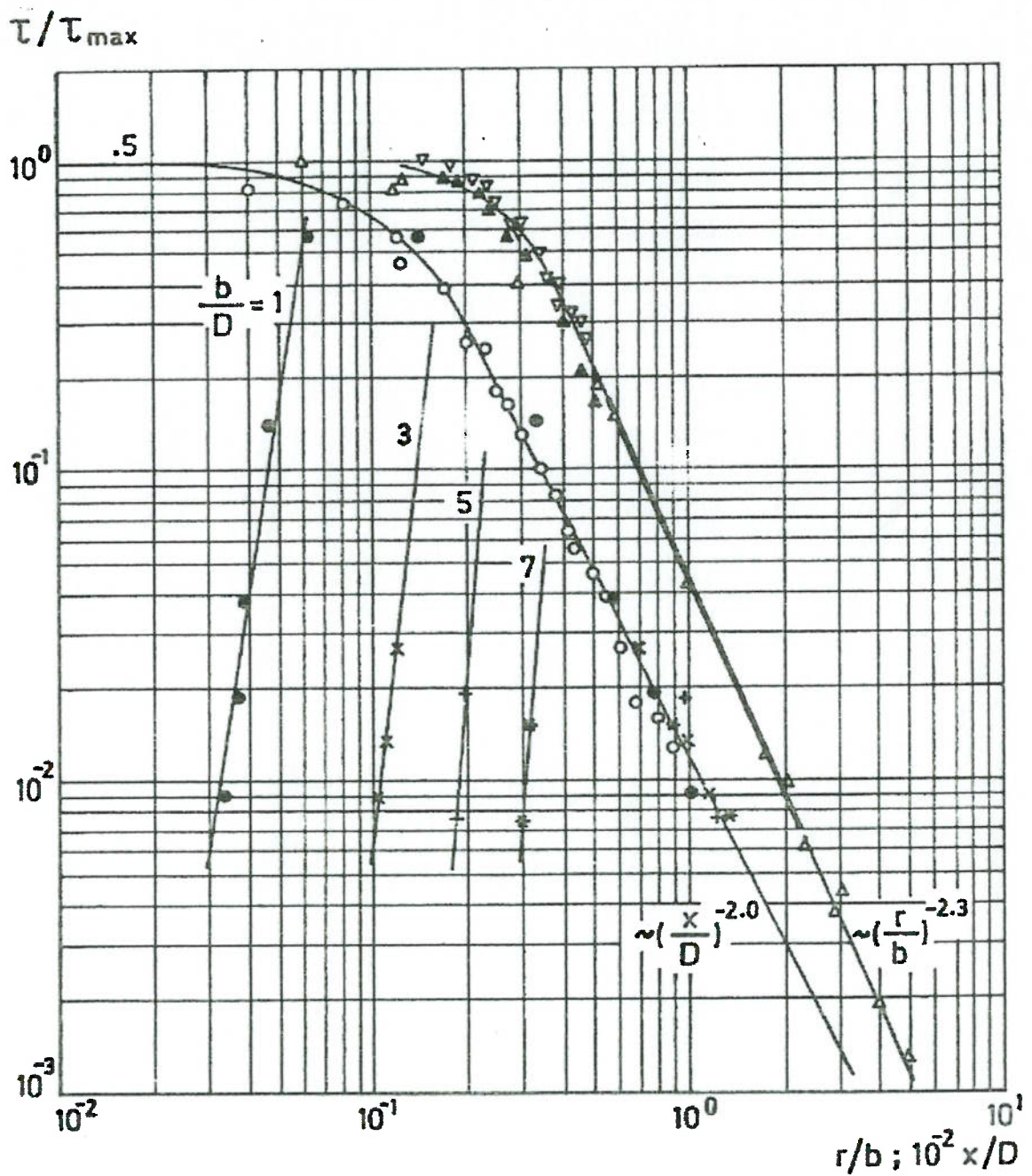


Figura. (4.11.1):Relacionamento entre o número de Froude e o número de Reynolds.

Reproduzido de Borges & Saraiva (1979)

A Figura (4.11.2) apresenta um exemplo dos resultados experimentais obtidos da medição do diâmetro, para jatos normais e do comprimento ao longo da direção longitudinal, para jatos paralelos; dos padrões de limpeza formados.



Parallel jet: $\circ \frac{b}{d} = .5 (4)$; $\bullet \frac{b}{d} = 1$; $\times \frac{b}{d} = 3$; $+$ $\frac{b}{d} = 5$; $*$ $\frac{b}{d} = 7 (3)$
 Normal jet: $\triangle (3)$; $\nabla (5)$; $\triangle (\delta)$; $— (7)$

Figura (4.11.2): Tensão de cisalhamento na superfície produzida pela interação de um jato circular com uma placa plana. Reproduzido de Borges & Saraiva (1979)

Borges e Saraiva (1979) demonstram que os resultados apresentados são comparáveis aos resultados de Beltaos & Rajaratnam (1974), de Bradshaw & Love (1959) e de Poreh *et al.* (1967), que empregaram técnicas diferentes em seus experimentos.

Dessa forma, o ajuste dos dados experimentais, permitiu a Borges & Saraiva (1979) determinarem os valores absolutos de u_* e os pontos na Figura (4.11.1) e proporem a expressão:

$$F = 0,0180 Re^{-0,432} \quad (4.11.1).$$

onde F é o número de Froude e Re, o número de Reynolds.

CAPÍTULO 5

MÉTODOS DE MODELAGEM DA CLA

Os métodos utilizados para gerar escoamentos tipo CLA em túneis de vento podem ser classificados em dois grupos: métodos naturais e métodos artificiais (Cataldo (1992)). Os métodos naturais consistem em permitir que a camada limite se desenvolva sobre uma extensão suficiente de superfície com a rugosidade adequada. Os métodos artificiais consistem em perturbar o escoamento mediante o uso de um conjunto de obstáculos colocados a montante de um piso aerodinamicamente rugoso para obter, a certa distância a jusante, um escoamento com as características desejadas. A escolha do tipo de método de simulação da CLA é feita de acordo com as dimensões das instalações com que se conta. Quando a distância necessária para se desenvolver uma CLA mediante os métodos naturais supera a extensão da zona de trabalho do túnel, deve ser utilizado um dos métodos artificiais para a sua simulação física.

Existem diversos métodos artificiais para se simular a CLA, que se diferenciam nas características dos obstáculos que são interpostos ao escoamento. Em Cataldo (1992), se apresenta um resumo dos mesmos. Em todos os casos é necessária obter uma adequada distribuição da velocidade média, da intensidade e das escalas integrais da turbulência com a altura, de forma a representar as condições reais, na posição da zona de trabalho onde se instalará o modelo físico do objeto de estudo. As características das distribuições a serem simuladas dependem basicamente do tipo de terreno que se encontra ao redor do local real, da escala da simulação selecionada e das condições de estado da atmosfera que se deseja representar.

5.1 Método de Cook

Quando não se é necessário modelar a totalidade da CLA, é recomendável o uso do método proposto por Cook (1973), uma vez que esse método permite trabalhar com modelos de maiores dimensões. Este método é recomendado para a simulação do terço inferior da CLA, que inclui a subcamada logarítmica e parte da subcamada potencial, e que consiste na perturbação do escoamento mediante uma tela, uma barreira e um piso rugoso. A tela introduz mudanças no escoamento incidente de tal maneira a adequar suas características para modelar a região de esteira de uma camada limite, enquanto que o piso rugoso introduz o déficit de quantidade de movimento necessário próximo ao solo para modelar a subcamada inercial e seu desenho se encontra vinculado ao tipo de terreno que se deseja modelar. Com a barreira, que pode ser sólida ou perfurada em sua superfície superior, se obtém, na zona de trabalho, a mistura das duas regiões, de maneira a se conseguir um escoamento similar a uma camada limite. Este método foi estudado posteriormente e apresentado por Hunt (1982), variando a altura da barreira e dos elementos rugosos, assim como a extensão do piso rugoso. As Figuras (5.1.1) e (5.1.2) ilustram o método de Cook.

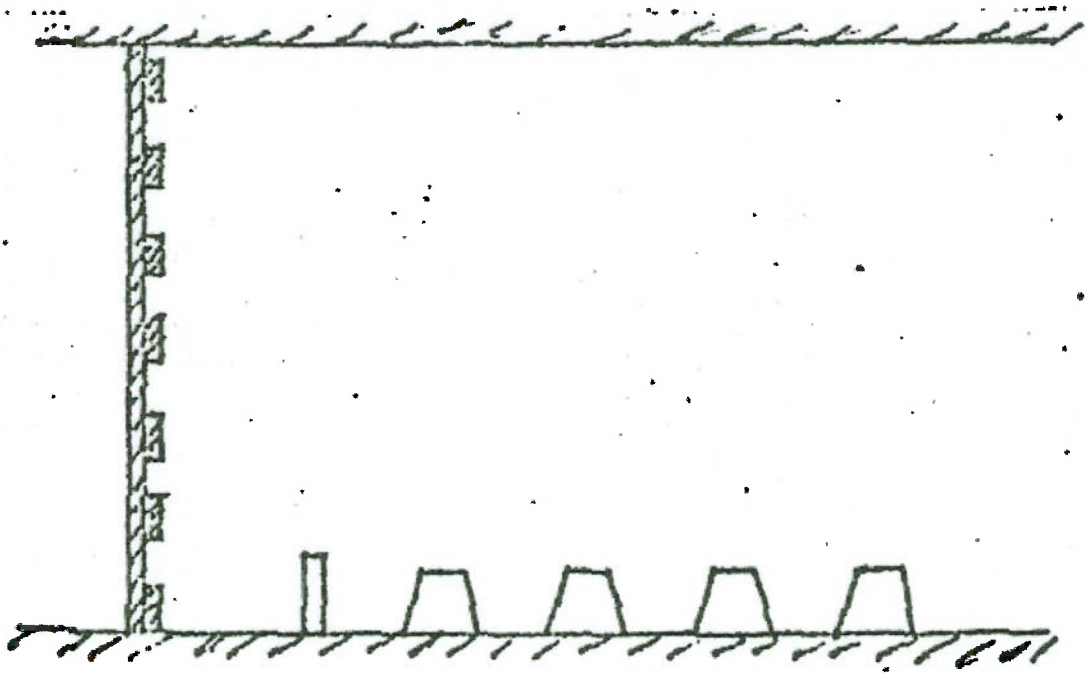


Figura (5.1.1): Método proposto por Cook (1973). Vista lateral. Reproduzido de Cataldo (1992)

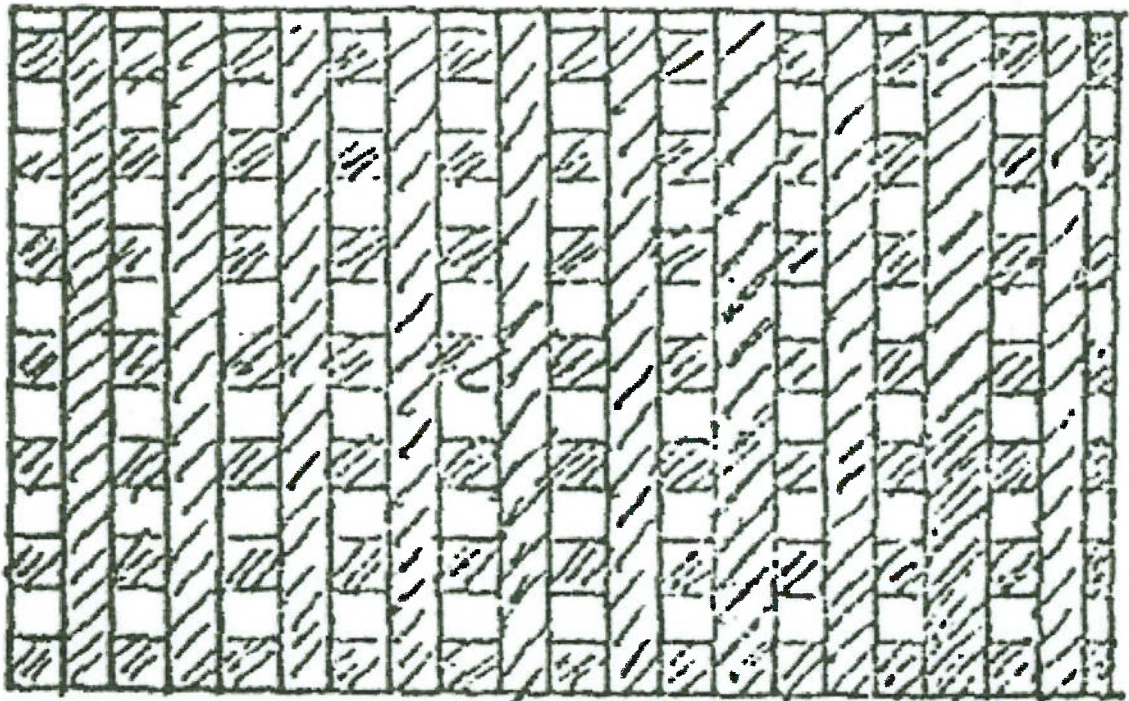


Figura (5.1.2): Método proposto por Cook (1973). Detalhe da tela. Vista a partir da jusante. Reproduzido de Cataldo (1992)

5.2 Método de Gartshore

O método de Gartshore (1973) utiliza um modelo integral da turbulência e consiste em interpor obstáculos ao escoamento de maneira eqüidistante, que podem consistir em barreiras transversais ao escoamento ou em cubos dispostos sobre o piso da zona de trabalho do túnel.

Uma vez selecionado o método de simulação da CLA e estimadas as dimensões dos obstáculos a serem interpostos ao escoamento, deve-se verificar se a distribuição de velocidade e de intensidade de turbulência no local onde se instalará o modelo no túnel de vento corresponde ao escoamento tipo CLA que se deseja simular, na escala escolhida. Quando não se alcançam essas condições é necessário ajustar as dimensões dos obstáculos até que se obtenha a distribuição pretendida. Dependendo da aplicação pode ser necessário verificar adicionalmente, após alcançar as condições desejadas de distribuição de velocidade média e de intensidade de turbulência, que as distribuições das escalas integrais da turbulência e do espectro de potência adimensionalizado com a altura também estejam adequadas. A relevância destas distribuições dependerá das características do estudo a ser realizado.

5.3 Método de Counihan

Esse método, apresentado pela primeira vez em Counihan (1969), consiste em produzir uma perturbação do escoamento com a ajuda de uma barreira, uma fileira de elementos de perfil elíptico e de seção triangular (denominados posteriormente de simuladores) e finalmente um piso aerodinamicamente rugoso à jusante dos simuladores.

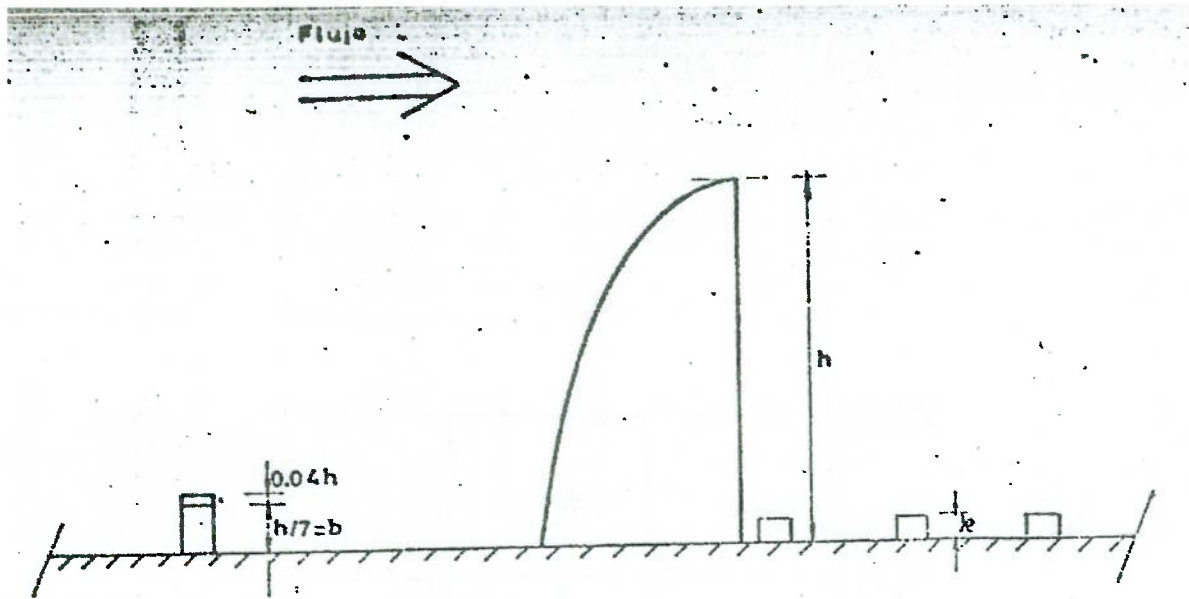


Figura (5.3.1): Vista em perfil do sistema de simulação Counihan. Reproduzido de Cataldo (1992)

A Figura (5.3.1) apresenta um esquema geral do sistema. A Figura (5.3.3) apresenta detalhes dos simuladores. Counihan recomenda que se escolha a altura dos simuladores (h) igual a altura da camada limite atmosférica que se deseja simular, o ângulo do vértice seja $\alpha = 12^\circ$ (Figura 5.3.3), e que sejam dispostos com uma separação de $0,5 h$ a $0,6 h$. Counihan propõe a altura da barreira como $h / 7$ e a posiciona a uma distância de $(5/6)h$ da ponta dos simuladores, recomendando que se agregue um suplemento trapezoidal na frente de cada simulador (Figuras 5.3.3 e 5.3.4). As dimensões desses suplementos se encontram definidas no trabalho de Robins (1979).

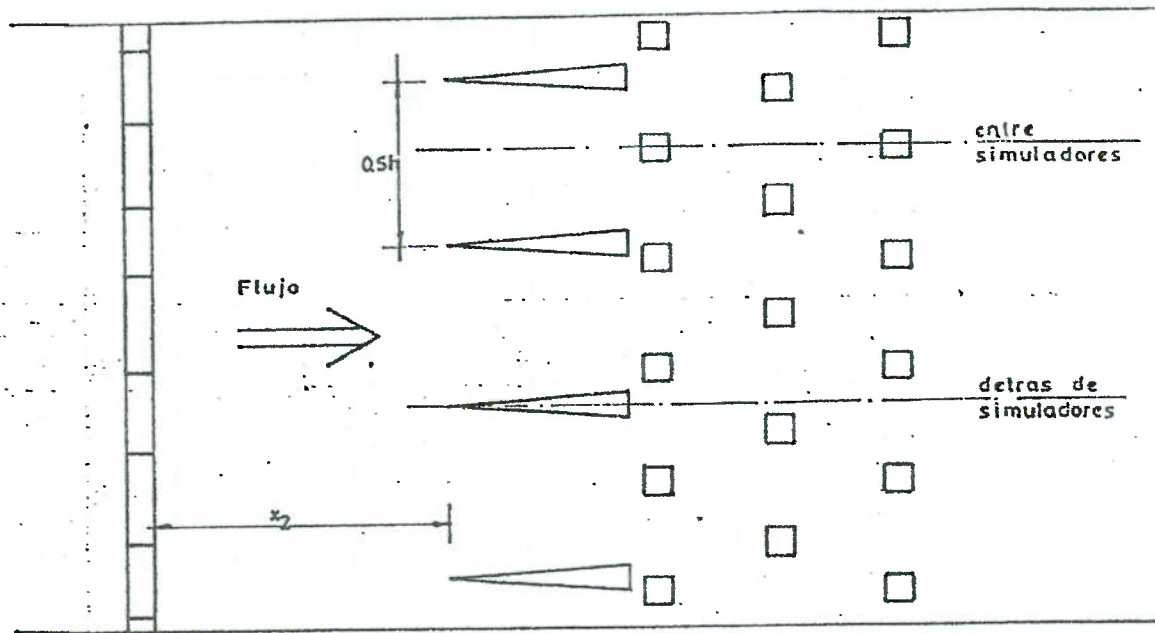


Figura (5.3.2) Vista em planta do sistema de simulação Counihan. Reproduzido de Cataldo (1992)

A partir das medidas efetuadas por Counihan observa-se que a uma distância de $4.5h$ a jusante o escoamento não é bidimensional. Esta conclusão é baseada na não uniformidade transversal apresentada pelo escoamento. Counihan registrou tanto em Counihan (1969) como em Counihan (1970) medições de distribuições de velocidade média e de intensidade de turbulência com a variação da altura, assim como também os espectros de potência e as distribuições de coeficientes de correlação efetuadas $4.5 h$ à jusante dos simuladores.

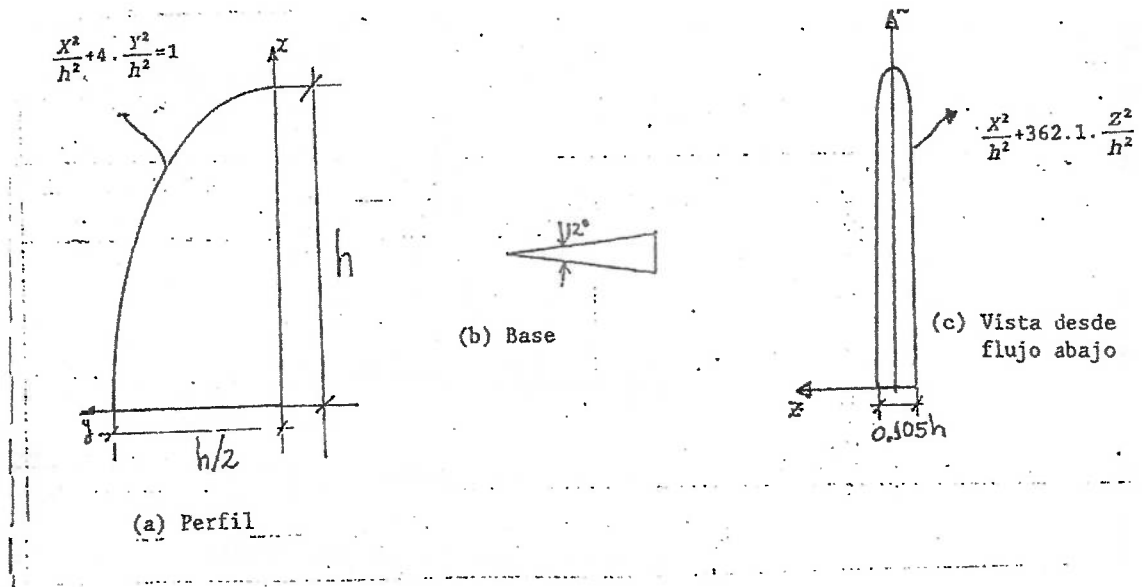


Figura (5.3.3): Detalhe do gerador de vórtices de Counihan. Reproduzido de Cataldo (1992)

A não uniformidade transversal foi observada em todos os ensaios feitos por Counihan, pois forneceram resultados diferentes ao passar de posições atrás dos simuladores a posições entre os simuladores (Fig. 5.3.2).

Robins (1979) nota que o nível de turbulência de um escoamento sofre uma degradação a partir do bordo de fuga dos simuladores até uma distância aproximadamente igual a $8h$ a jusante dos mesmos, sendo que, a partir dessa posição não se notam mudanças significativas. Robins observa, no mesmo trabalho, que esta redução no nível de turbulência é coerente com o sobrepujamento da dissipação turbulenta sobre a produção turbulenta que ocorre até essa mesma posição. Dessa forma, a uma distância de $8h$ a jusante dos simuladores o escoamento é bidimensional e está em quase equilíbrio.

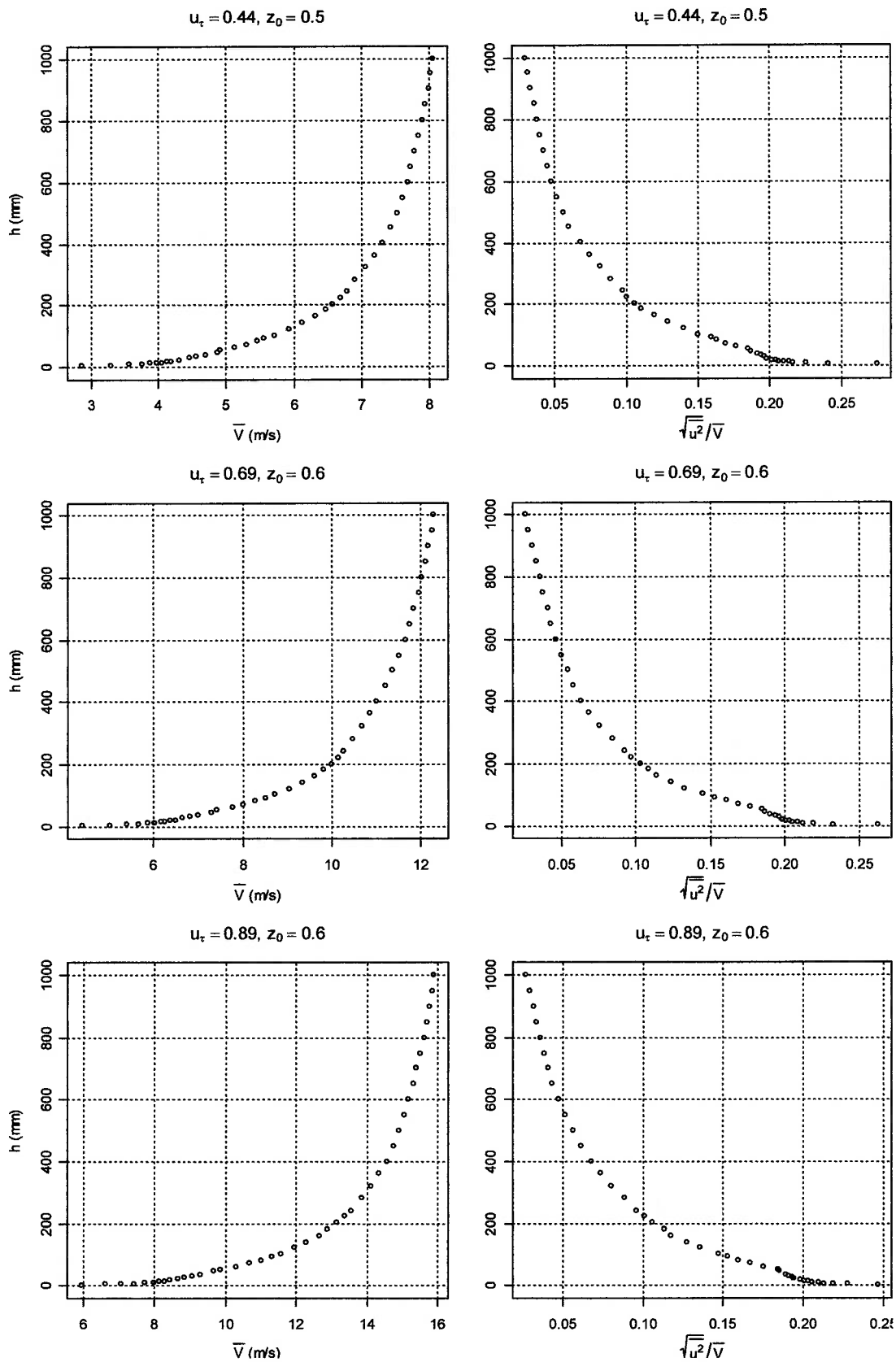


Figura (6.1.4.2): Perfis de velocidade e de intensidade de turbulência, obtidos com rugosidade r4, para 200, 300 e 400 rpm, respectivamente.

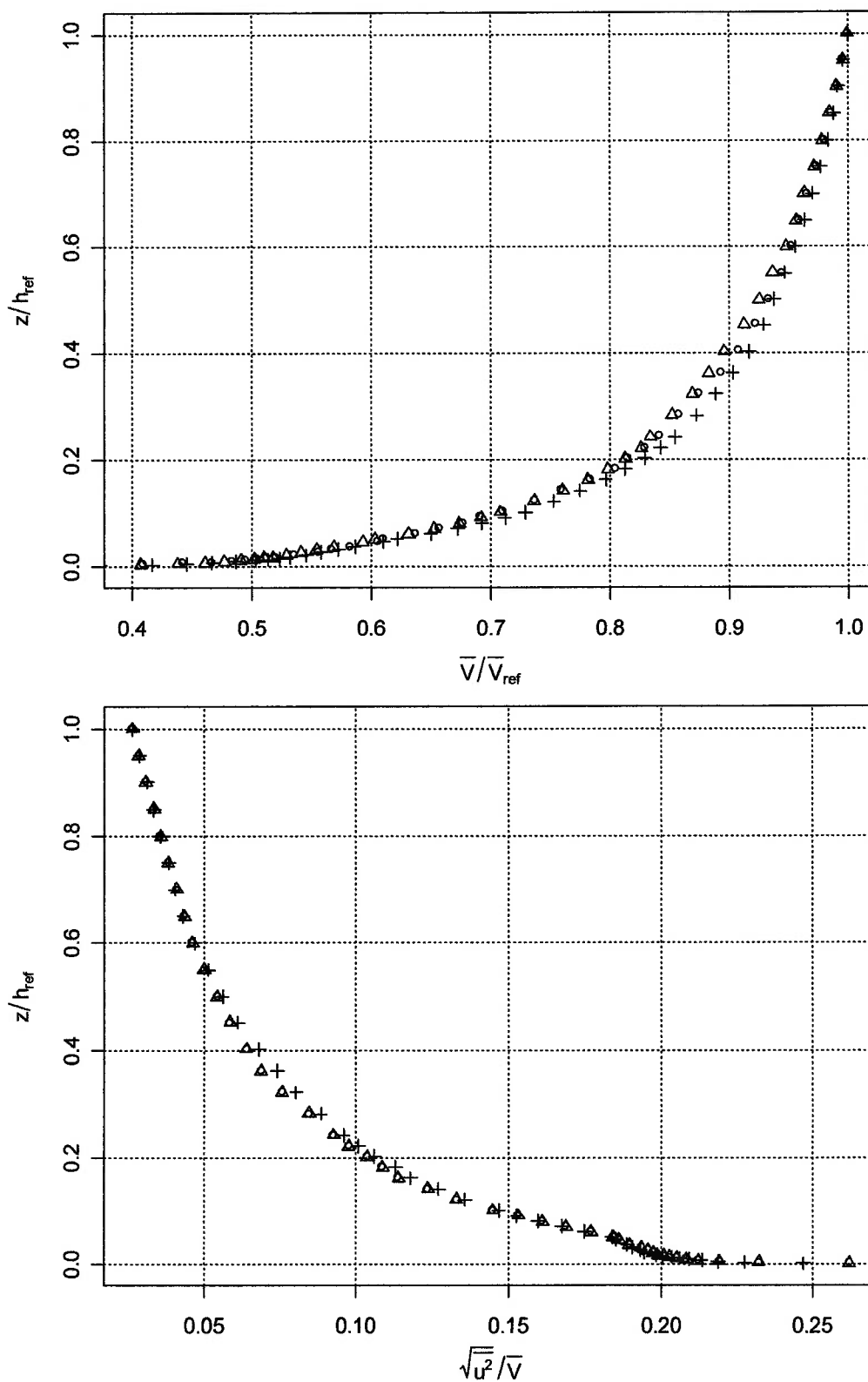


Figura (6.1.4.3): Perfis de velocidade e de distribuição de intensidade de turbulência, para r4, adimensionalizados com $h_{ref} = 1000$ mm, $\bar{V}_{ref} = \bar{V}_{1000}$, \circ 200 rpm, Δ 300 rpm e $+$ 400 rpm.

6.1.5 Quinta rugosidade

Foi obtida preenchendo-se 30 linhas com nove elementos de rugosidade cada. Foram utilizados elementos de rugosidade do tipo III, com 65 mm de altura em relação ao piso do túnel. Os elementos foram dispostos sob o arranjo retangular, ao longo de 17 m do piso do túnel, iniciando o preenchimento a 2.430 mm a jusante da barreira. Os elementos de rugosidade foram posicionados de forma uniforme, com espaçamento, entre cada elemento de rugosidade de uma mesma linha, de 300 mm e espaçamento entre duas linhas sucessivas de 600 mm. A Figura (6.1.5.21) ilustra a disposição dos elementos de rugosidade para a rugosidade r5.

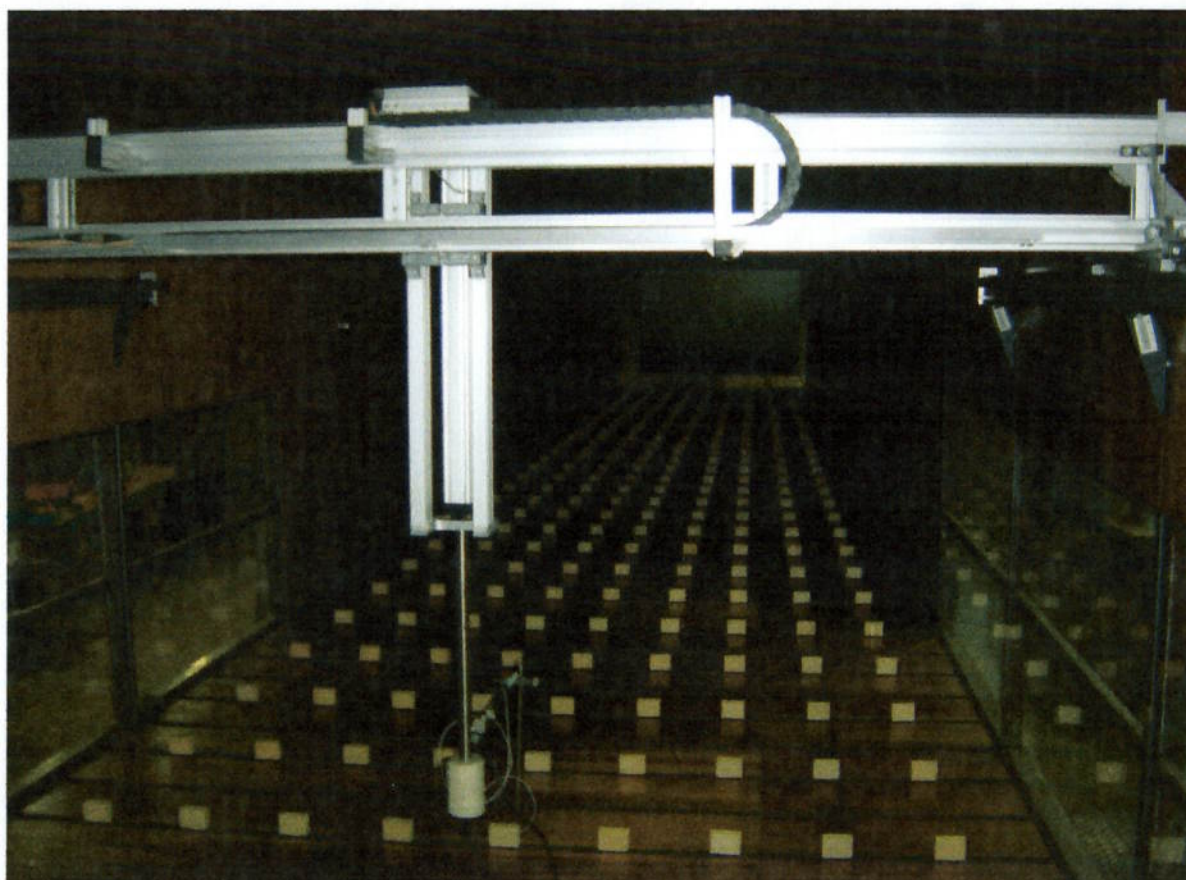


Figura (6.1.5.1): Disposição dos elementos de rugosidade na rugosidade r5.

A Figura (6.1.5.2) apresenta, para a rugosidade r_5 , os perfis de velocidade e de intensidade de turbulência observados para as condições de 200 rpm, 300 rpm e 400 rpm, respectivamente. Nota-se claramente o perfil logarítmico do perfil de velocidades e a baixa intensidade de turbulência do escoamento não perturbado, da ordem de 0,01%.

Para essa rugosidade, o comportamento do parâmetro z_0 difere do observado com as rugosidades r_1 , r_2 , r_3 e r_4 , mantendo-se constante em 3 m para as três condições de rotação ensaiadas.

O comportamento da velocidade de cisalhamento, u_τ , manteve-se similar ao observado com as rugosidades r_1 , r_2 , r_3 e r_4 . Variando entre 0,56 m/s para a condição de 200 rpm até 1,1 m/s para a condição de 400 rpm, passando por 0,82 m/s para a condição de 300 rpm.

Observa-se maior intensidade de turbulência na região próxima ao piso do túnel, efeito da perturbação no escoamento provocada pelo incremento na altura dos elementos de rugosidade próximos a sonda.

A Figura (6.1.5.3) apresenta, para a rugosidade r_5 , os perfis de velocidade e de intensidade de turbulência adimensionalizados para uma altura de referência de 1.000 mm e toma, para velocidade de referência, a velocidade observada a 1.000 mm.

Na Figura (6.1.5.3), as curvas de velocidade e de intensidade de turbulência para cada rotação foram sobrepostas e apresentam boa concordância, sem descolamento entre os perfis para as diferentes condições de operação. No perfil de intensidade de turbulência adimensionalizado, nota-se claramente a influência da altura do elemento de rugosidade no crescimento da espessura de subcamada rugosa obtida, representada, *grosso modo*, pela inflexão na curva.

Todos os valores foram obtidos de medições ao longo de uma linha vertical no centro do túnel, em uma posição a 20,4 m a jusante da barreira.

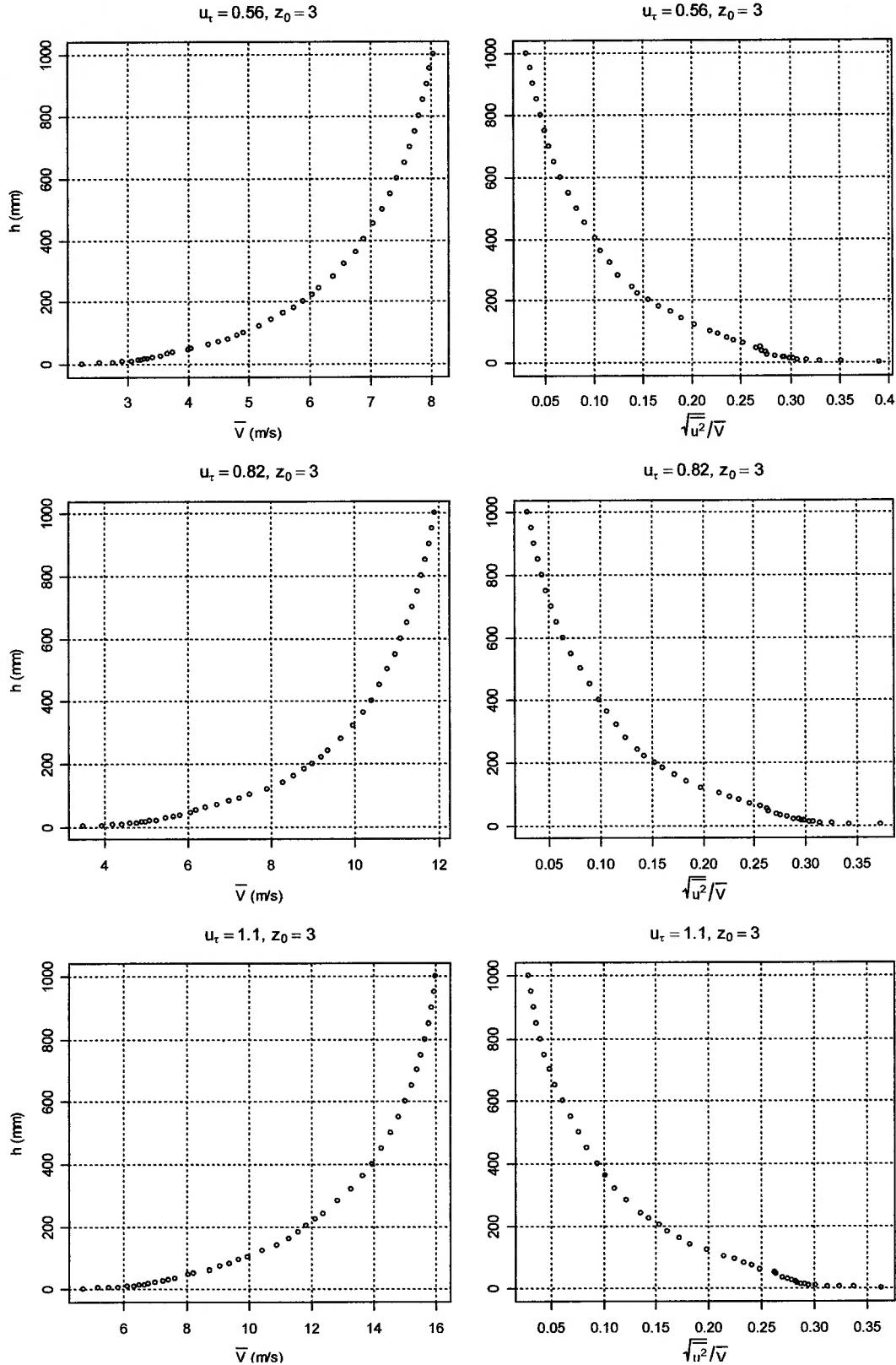


Figura (6.1.5.2): Perfis de velocidade e de intensidade de turbulência, obtidos com a rugosidade r_5 , para 200, 300 e 400 rpm, respectivamente.

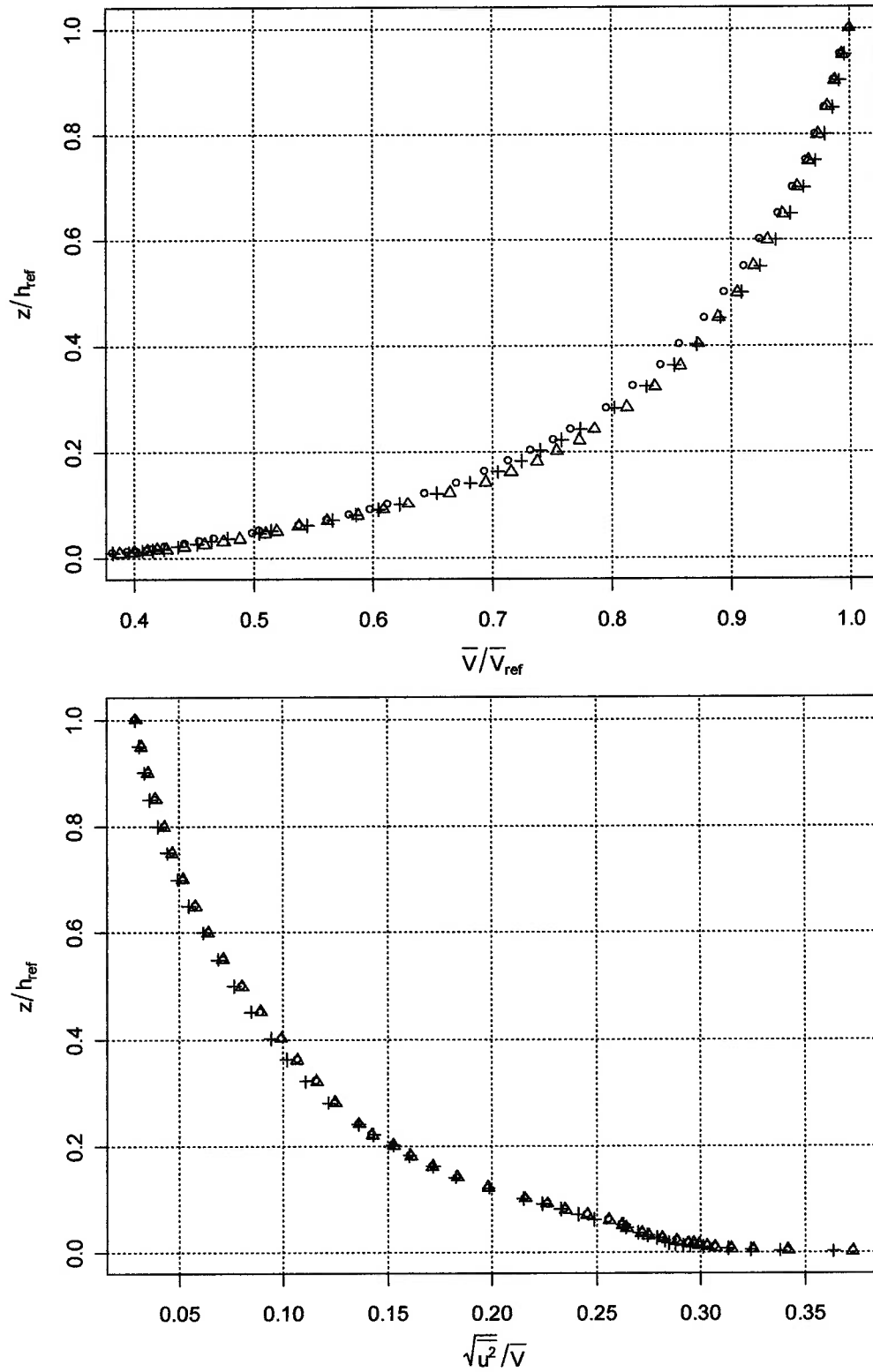


Figura (6.1.5.3): Perfis de velocidade e de distribuição de intensidade de turbulência, para r_5 , adimensionalizados com $h_{ref} = 1000$ mm, $\bar{V}_{ref} = \bar{V}_{1000}$, \circ 200 rpm, Δ 300 rpm e $+$ 400 rpm.

6.1.6 Sexta rugosidade

Foi obtida preenchendo-se, adicionalmente à r5, 12 linhas com dez elementos de rugosidade cada. Foram utilizados elementos de rugosidade do tipo III, com 65 mm de altura em relação ao piso do túnel. As primeiras linhas de elementos de rugosidade foram preenchidas com arranjo retangular, cobrindo 10.800 mm com linhas de 9 elementos, a partir da posição de 2.430 mm a jusante da barreira. As dezoito primeiras linhas de dez elementos não foram preenchidas, de forma que o preenchimento com padrão diamante inicia em uma posição a 13.200 mm a jusante da barreira, com 12 linhas de 10 elementos e 13 linhas de 9 elementos ao longo de 7.200 mm. Os elementos de rugosidade foram posicionados de forma uniforme, com espaçamento entre cada elemento de rugosidade de uma mesma linha, de 300 mm e espaçamento entre duas linhas sucessivas de 300 mm. A Figura (6.1.6.1) ilustra a disposição dos elementos de rugosidade para a rugosidade r6.



Figura (6.1.6.1): Disposição dos elementos de rugosidade na rugosidade r6.

A Figura (6.1.6.2) apresenta, para a rugosidade r_6 , os perfis de velocidade e de intensidade de turbulência observados para as condições de 200 rpm, 300 rpm e 400 rpm, respectivamente. Nota-se claramente o perfil logarítmico do perfil de velocidades e a baixa intensidade de turbulência do escoamento não perturbado, da ordem de 0,01%.

Para a rugosidade r_6 , o comportamento do parâmetro z_0 é análogo ao observado com a rugosidade r_1 , mantendo-se constante em 7 m para as condições de 200 rpm e 300 rpm. Quando se opera a 400 rpm, o valor de z_0 observado é de 5 m.

O comportamento da velocidade de cisalhamento, u_τ , manteve-se similar ao observado com as rugosidades r_1 , r_2 , r_3 , r_4 e r_5 . Variando entre 0,7 m/s para a condição de 200 rpm até 1,3 m/s para a condição de 400 rpm, passando por 1,1 m/s para a condição de 300 rpm.

Observa-se, no perfil de velocidades para a condição de 300 rpm, uma inflexão na curva, possivelmente resultante da influência da camada-limite desenvolvida sobre o teto do túnel. A possibilidade de ser influência da estrutura do robô posicionador é pequena, visto que este comportamento não foi observado em rugosidades anteriores, ensaiadas através do mesmo procedimento. Uma possível variação de temperatura ao longo do ensaio também pode ser descartada, visto que após a condição de 300 rpm, foi ensaiada a condição de 400 rpm e não se observou nenhuma alteração qualitativa em relação à condição de 200 rpm.

Observa-se maior intensidade de turbulência na região próxima ao piso do túnel, como efeito da perturbação no escoamento provocada pelos elementos de rugosidade próximos da sonda.

Todos os valores foram obtidos de medições ao longo de uma linha vertical no centro do túnel, em uma posição a 20,4 m a jusante da barreira.

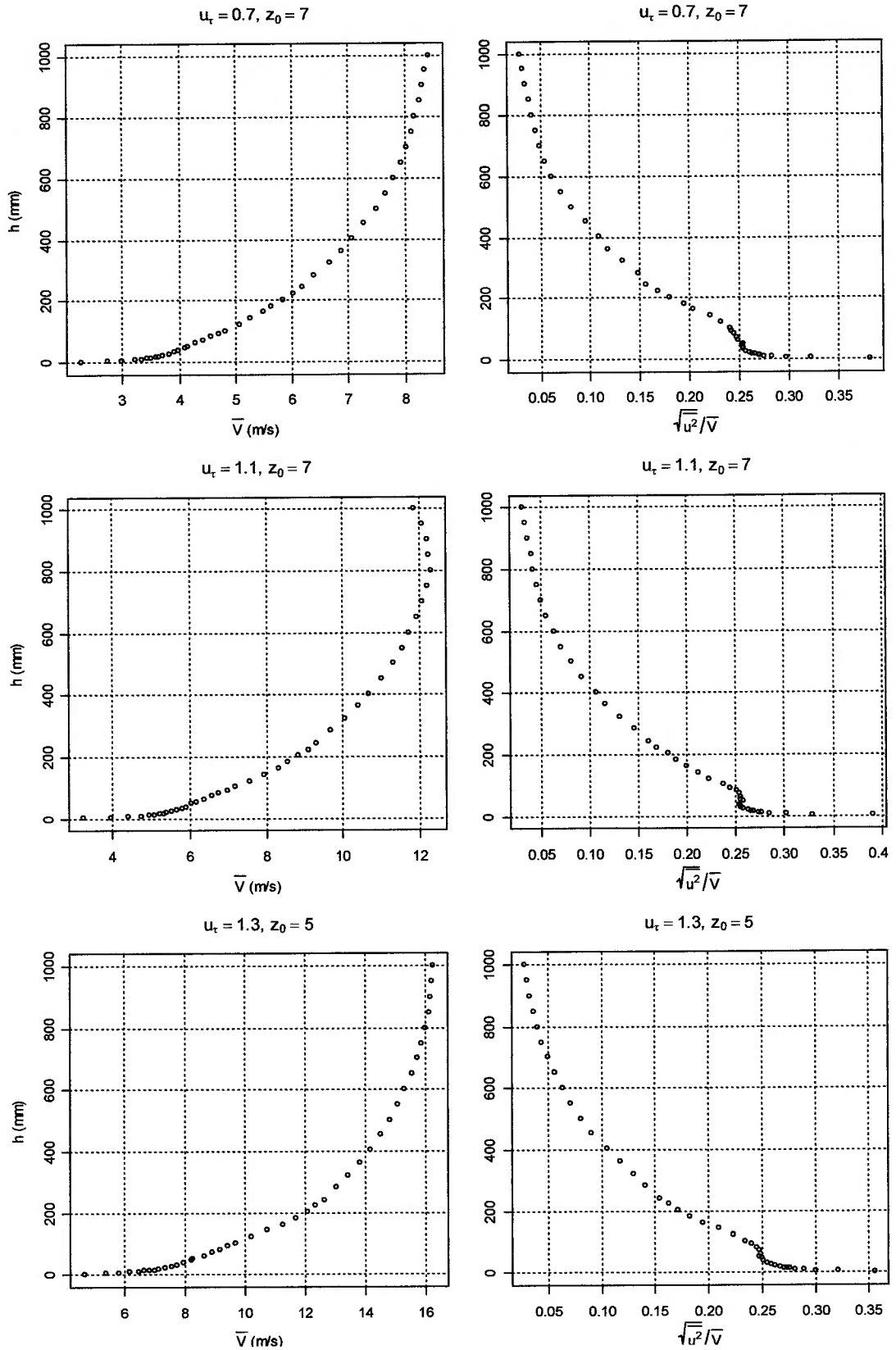


Figura (6.1.6.2): Perfis de velocidade e de intensidade de turbulência, obtidos com a rugosidade r_6 , para 200, 300 e 400 rpm, respectivamente.

A Figura (6.1.6.3) apresenta, para a rugosidade r_6 , os perfis de velocidade e de intensidade de turbulência adimensionalizados para uma altura de referência de 1.000 mm e toma, para velocidade de referência, a velocidade observada a 1.000 mm.

Na Figura (6.1.6.3), as curvas de velocidade e de intensidade de turbulência para cada rotação foram sobrepostas e observa-se, para os perfis de intensidade de turbulência, boa concordância, sem descolamento entre os perfis para as diferentes condições de operação. No perfil de intensidade de turbulência adimensionalizado, nota-se claramente a influência da altura do elemento de rugosidade no crescimento da espessura de subcamada rugosa obtida, representada, *grosso modo*, pela inflexão na curva.

Na Figura (6.1.6.3), para os perfis de velocidades adimensionalizados, observa-se o descolamento entre os perfis para as condições de 200 rpm e 400 rpm, possivelmente devido à influência da camada limite desenvolvida sobre o teto do túnel.

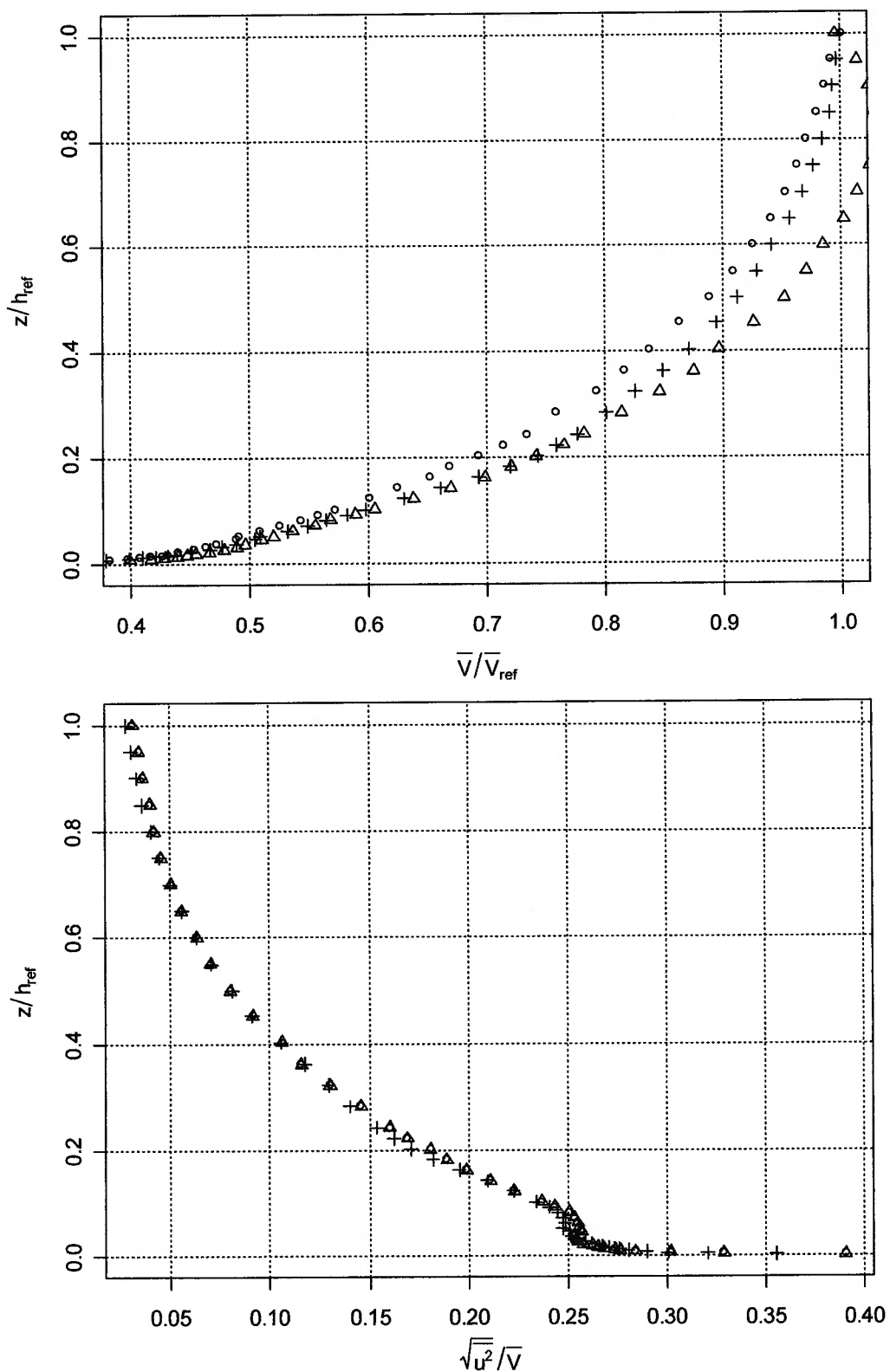


Figura (6.1.6.3): Perfis de velocidade e de distribuição de intensidade de turbulência, para r_6 , adimensionalizados com $h_{ref} = 1000$ mm, $\bar{V}_{ref} = \bar{V}_{1000}$, \circ 200 rpm, Δ 300 rpm e $+$ 400 rpm.

6.1.7 Sétima rugosidade

Foi obtida preenchendo-se, adicionalmente à r6, 13 linhas com dez elementos de rugosidade (tipo IV) cada e uma com oito elementos de rugosidade (tipo IV). Foram utilizados elementos de rugosidade do tipo III e do tipo IV, com 65 mm e 85 mm de altura em relação ao piso do túnel, respectivamente.

As quatro primeiras linhas de elementos de rugosidade foram preenchidas com arranjo retangular, cobrindo 10.800 mm com linhas de 9 elementos do tipo III, a partir da posição de 2.430 mm a jusante da barreira. Em seguida, foi montado um arranjo diamante com 13 linhas de nove elementos (tipo III), 13 linhas de dez elementos (tipo IV) e uma linha de oito elementos (tipo IV). Completando a rugosidade, foram posicionadas 13 linhas de 9 elementos e 12 de dez elementos, ambas com elementos do tipo III.

Os elementos de rugosidade foram posicionados de forma uniforme, com espaçamento entre cada elemento de rugosidade de uma mesma linha, de 300 mm e espaçamento entre duas linhas sucessivas de 300 mm. A Figura (6.1.7.1) ilustra a disposição dos elementos de rugosidade para a rugosidade r6.

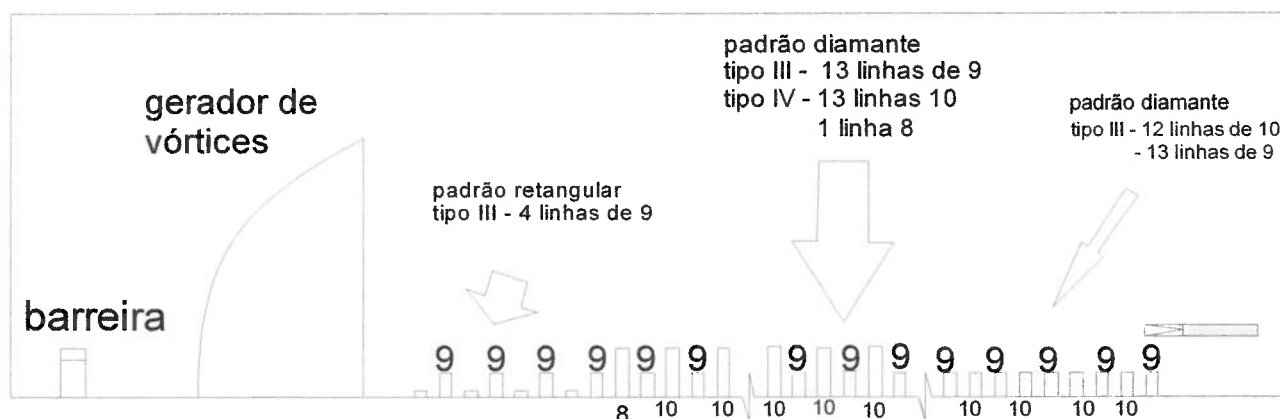


Figura (6.1.7.1): Disposição dos elementos de rugosidade na rugosidade r7.

A Figura (6.1.7.2) apresenta, para a rugosidade r7, os perfis de velocidade e de intensidade de turbulência observados para as condições de 200 rpm, 300 rpm e 400 rpm, respectivamente. Nota-se claramente o perfil logarítmico do perfil de velocidades e a baixa intensidade de turbulência do escoamento não perturbado, da ordem de 0,01%.

Para essa rugosidade, o comportamento do parâmetro z_0 , difere do observado com as rugosidades r1, r2, r3, r4 e r6, mas de forma análoga ao observado para r5, mantendo-se constante em 5 m para as três condições de rotação ensaiadas.

O comportamento da velocidade de cisalhamento, u_τ , manteve-se similar ao observado com as rugosidades r1, r2, r3 e r4. Variando entre 0,65 m/s para a condição de 200 rpm até 1,3 m/s para a condição de 400 rpm, passando por 0,97 m/s para a condição de 300 rpm.

Observa-se maior intensidade de turbulência na região próxima ao piso do túnel, efeito da perturbação no escoamento provocada pelo incremento na altura dos elementos de rugosidade próximos a sonda.

A Figura (6.1.7.3) apresenta, para a rugosidade r7, os perfis de velocidade e de intensidade de turbulência adimensionalizados para uma altura de referência de 1.000 mm e toma, para velocidade de referência, a velocidade observada a 1.000 mm.

Na Figura (6.1.7.3), as curvas de velocidade e de intensidade de turbulência para cada rotação foram sobrepostas e apresentam boa concordância, sem descolamento entre os perfis para as diferentes condições de operação. No perfil de intensidade de turbulência adimensionalizado, nota-se claramente a influência da altura do elemento de rugosidade no crescimento da espessura de subcamada rugosa obtida, representada, *grosso modo*, pela inflexão na curva.

Todos os valores foram obtidos de medições ao longo de uma linha vertical no centro do túnel, em uma posição a 20,4 m a jusante da barreira.

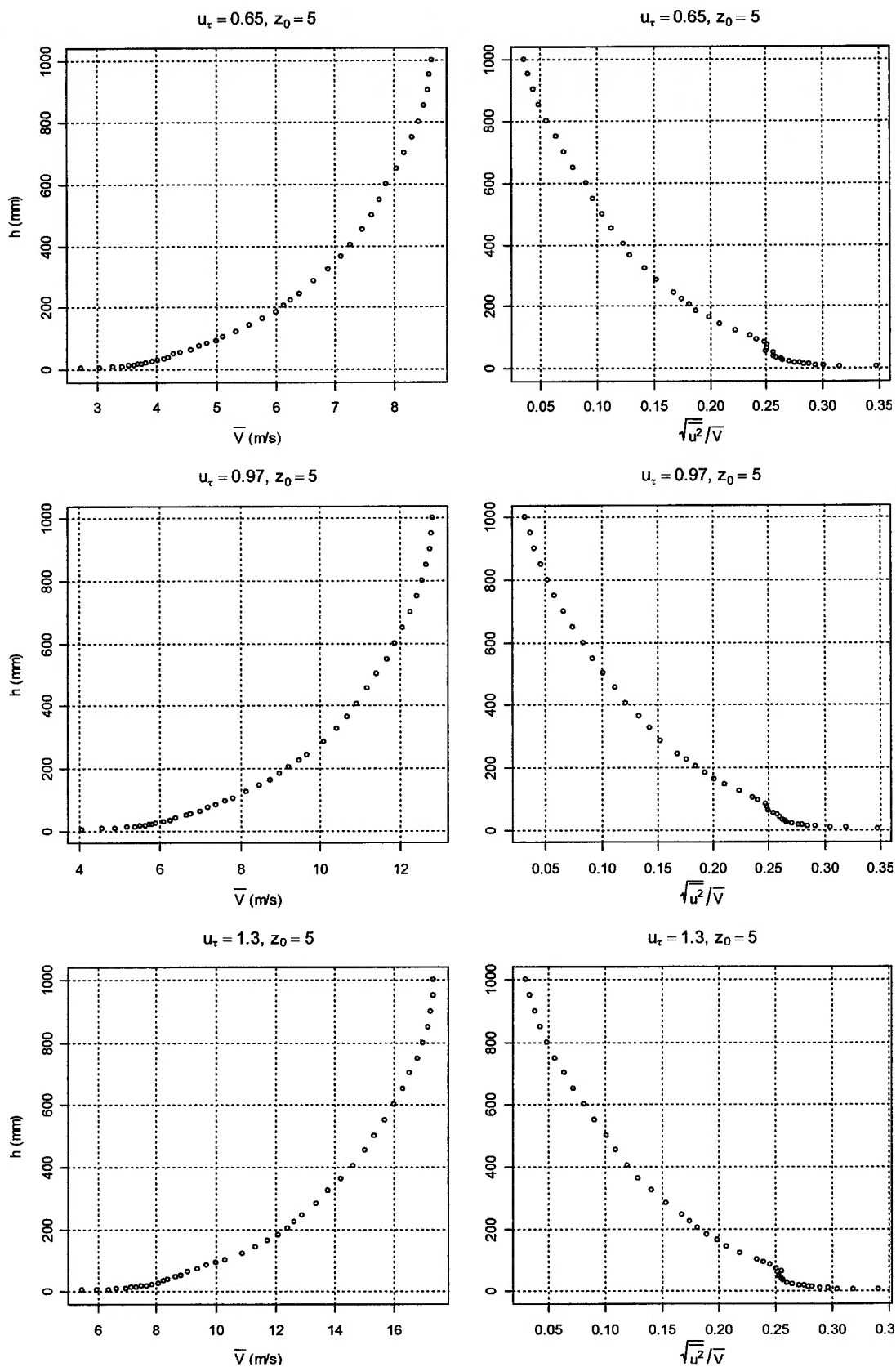


Figura (6.1.7.2): Perfis de velocidade e de intensidade de turbulência, obtidos com a rugosidade r7, para 200, 300 e 400 rpm, respectivamente.

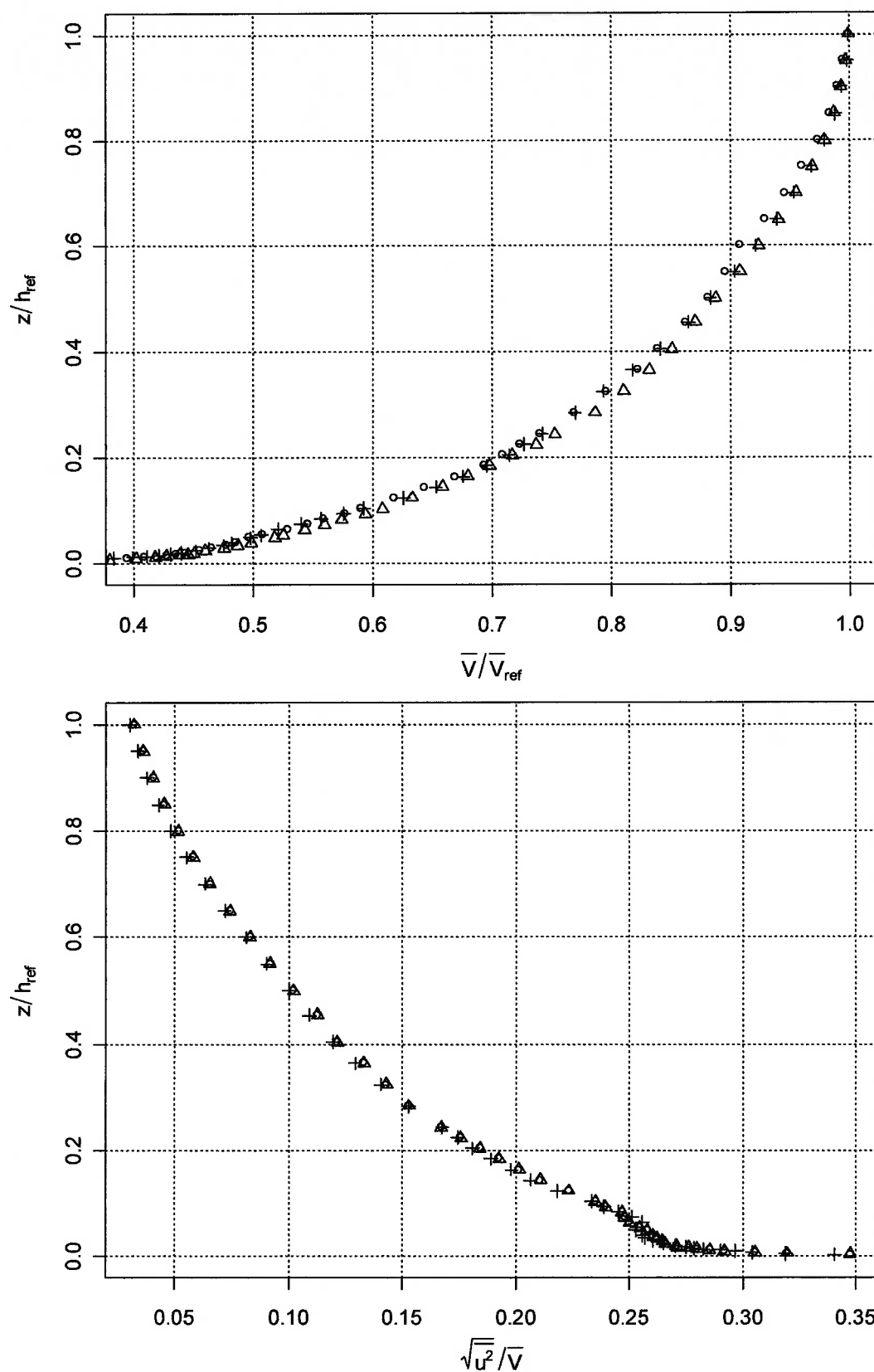


Figura (6.1.7.3): Perfil de velocidade e de distribuição de intensidade de turbulência, para r7, adimensionalizados com $h_{ref} = 1000$ mm, $\bar{V}_{ref} = \bar{V}_{1000}$, \circ 200 rpm, Δ 300 rpm e $+$ 400 rpm.

6.1.8 Oitava rugosidade

Foi obtida preenchendo-se 30 linhas com nove elementos de rugosidade cada. Foram utilizados elementos de rugosidade do tipo III, com 65 mm de altura em relação ao piso do túnel. Os elementos foram dispostos sob o arranjo retangular, ao longo de 17 m do piso do túnel, iniciando o preenchimento a 2.430 mm a jusante da barreira. Os elementos de rugosidade foram posicionados de forma uniforme, com espaçamento, entre cada elemento de rugosidade de uma mesma linha, de 300 mm e espaçamento entre duas linhas sucessivas de 600 mm.

A barreira e o gerador de vórtices foram removidos.

A Figura (6.1.8.1) ilustra a disposição dos elementos de rugosidade para a rugosidade r5.



Figura (6.1.8.1): Disposição dos elementos de rugosidade na rugosidade r8.

A Figura (6.1.8.2) apresenta, para a rugosidade r7, os perfis de velocidade e de intensidade de turbulência observados para as condições de 200 rpm, 300 rpm e 400 rpm, respectivamente. Nota-se claramente o perfil logarítmico do perfil de velocidades e a baixa intensidade de turbulência do escoamento não perturbado, da ordem de 0,01%.

Para essa rugosidade, o comportamento do parâmetro z_0 , difere do observado com as rugosidades r1, r2, r3, r4 e r6, e de forma análoga ao observado para r5 e r7, mantém-se constante em 10 mm para as três condições de rotação ensaiadas.

O comportamento da velocidade de cisalhamento, u_τ , manteve-se similar ao observado com as rugosidades r1, r2, r3 e r4. Variando entre 0,86 m/s para a condição de 200 rpm até 1,7 m/s para a condição de 400 rpm, passando por 1,3 m/s para a condição de 300 rpm.

Observa-se maior intensidade de turbulência na região próxima ao piso do túnel, efeito da perturbação no escoamento provocada pelo incremento na altura dos elementos de rugosidade próximos a sonda. ,

Reforçando o comportamento observado na rugosidade r6 quando, no perfil de velocidades para a condição de 300 rpm registrou-se uma inflexão na curva, na rugosidade r8 esse comportamento é observado em todas as condições de rotação. Dessa forma, reforça-se a indicação de que tal comportamento seja decorrente da influência da camada-limite desenvolvida sobre o teto do túnel. Nesse ensaio a camada-limite desenvolvida sobre o piso rugoso é da ordem de 800 mm, observando-se acima desse valor as condições de escoamento livre e de camada-limite desenvolvida sobre o teto do túnel. A possibilidade de ser influência da estrutura do robô posicionador é pequena, visto que este comportamento não foi observado em rugosidades anteriores, ensaiadas através do mesmo procedimento. Uma possível variação de temperatura ao longo do ensaio também pode ser descartada, visto

que após a condição de 300 rpm, foi ensaiada a condição de 400 rpm e não se observou nenhuma alteração qualitativa em relação à condição de 200 rpm.

A Figura (6.1.8.3) apresenta, para a rugosidade r_8 , os perfis de velocidade e de intensidade de turbulência adimensionalizados para uma altura de referência de 1.000 mm e toma, para velocidade de referência, a velocidade observada a 1.000 mm.

Na Figura (6.1.8.3), as curvas de velocidade e de intensidade de turbulência para cada rotação foram sobrepostas e apresentam boa concordância, sem descolamento entre os perfis para as diferentes condições de operação. No perfil de intensidade de turbulência adimensionalizado, nota-se claramente a influência da altura do elemento de rugosidade no crescimento da espessura de subcamada rugosa obtida, representada, *grosso modo*, pela inflexão na curva.

Todos os valores foram obtidos de medições ao longo de uma linha vertical no centro do túnel, em uma posição a 20,4 m a jusante da barreira.

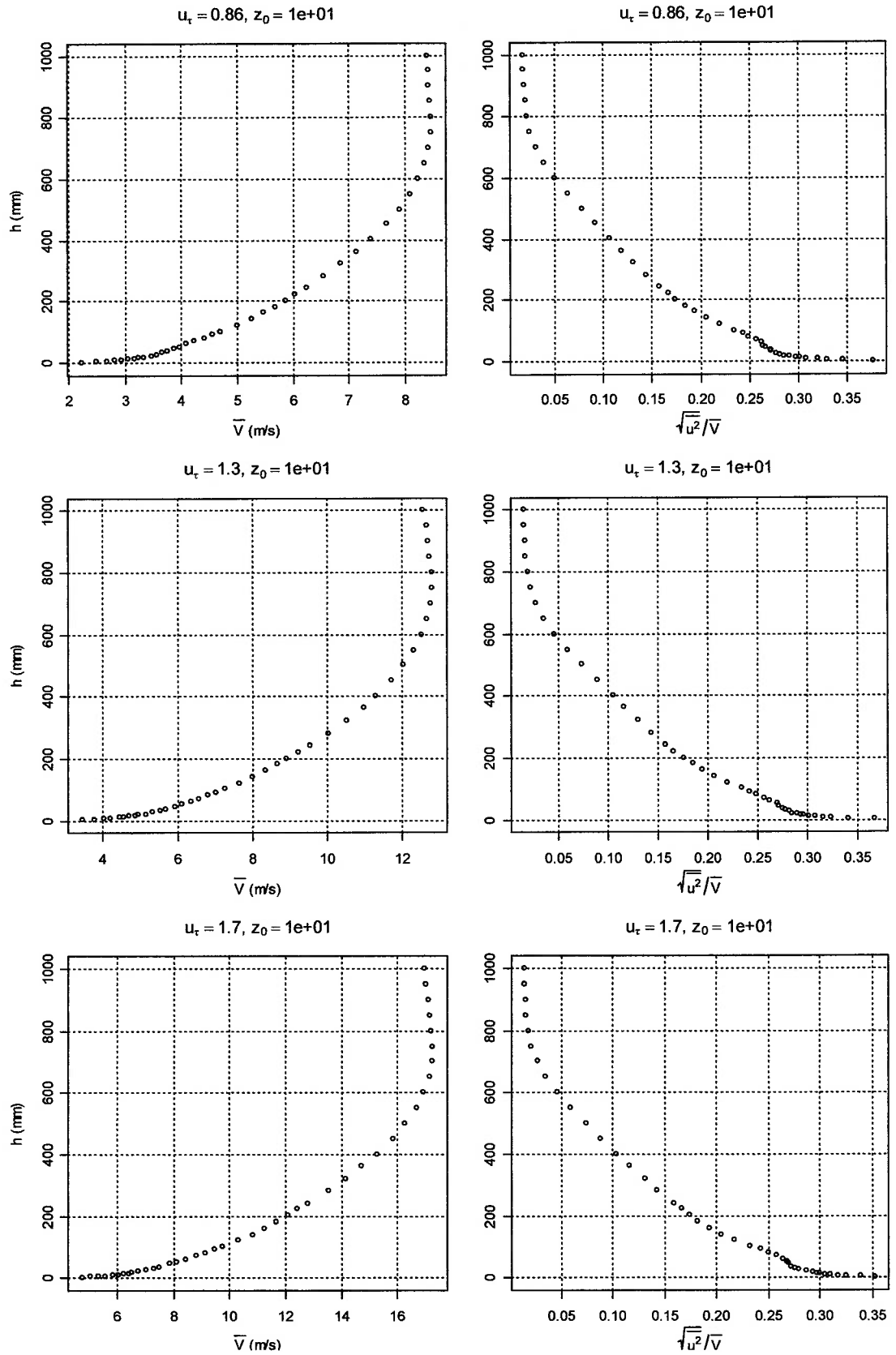


Figura (6.1.8.2) Perfis de velocidade e de intensidade de turbulência, obtidos com a rugosidade r_8 , para 200, 300 e 400 rpm, respectivamente.

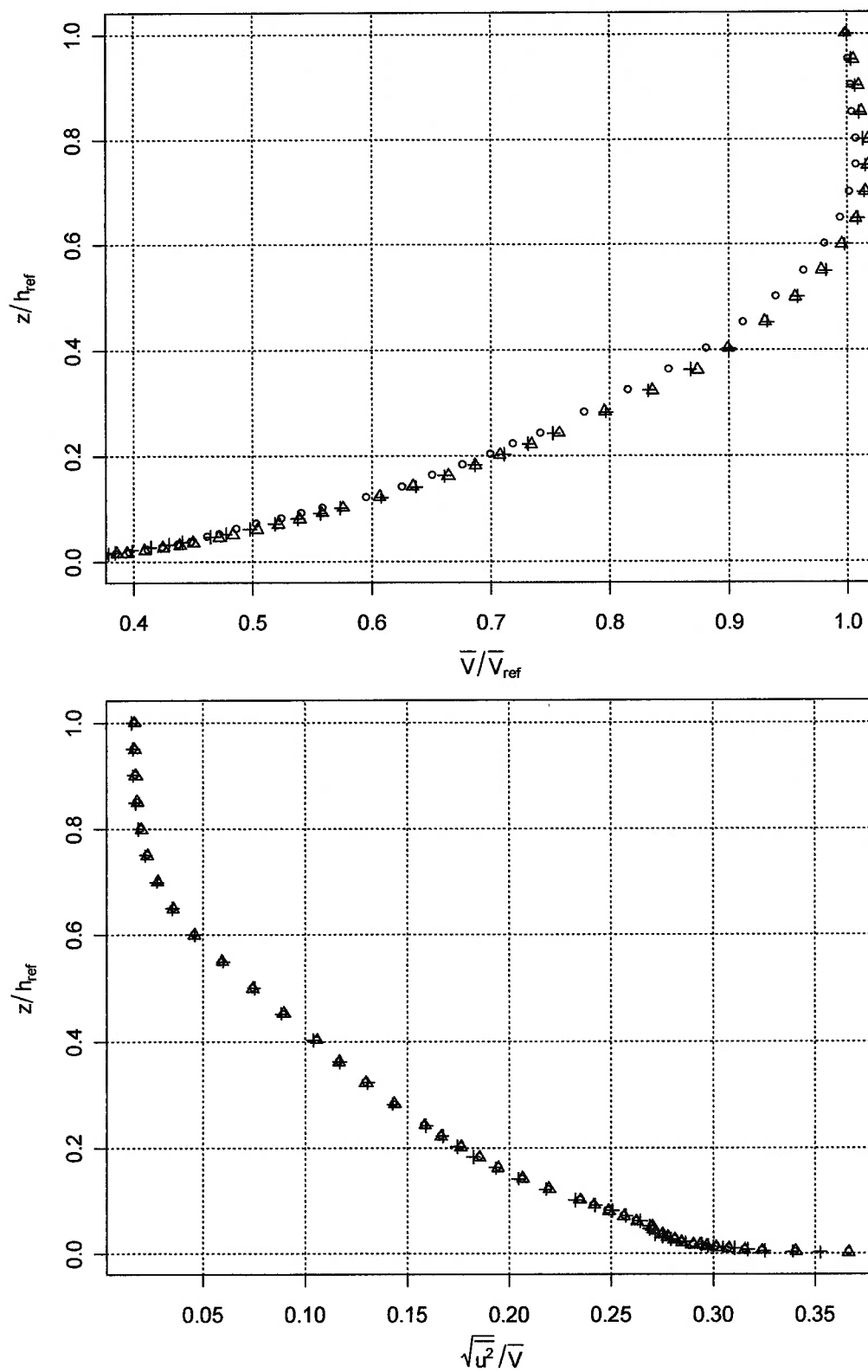


Figura (6.1.8.3): Perfis de velocidade e de distribuição de intensidade de turbulência, para r_8 , adimensionais com $h_{ref} = 1000$ mm, $\bar{V}_{ref} = \bar{V}_{1000}$, \circ 200 rpm, Δ 300 rpm e $+$ 400 rpm.

6.1.9 Nona rugosidade

Foi obtida preenchendo-se 30 linhas com nove elementos de rugosidade cada. Foram utilizados elementos de rugosidade do tipo II, com 25 mm de altura em relação ao piso do túnel. Os elementos foram dispostos sob o arranjo retangular, ao longo de 17 m do piso do túnel, iniciando o preenchimento a 2.430 mm a jusante da barreira. Os elementos de rugosidade foram posicionados de forma uniforme, com espaçamento, entre cada elemento de rugosidade de uma mesma linha, de 300 mm e espaçamento entre duas linhas sucessivas de 600 mm.

A barreira e o gerador de vórtices foram removidos.

A Figura (6.1.9.1) ilustra a disposição dos elementos de rugosidade para a rugosidade r5.

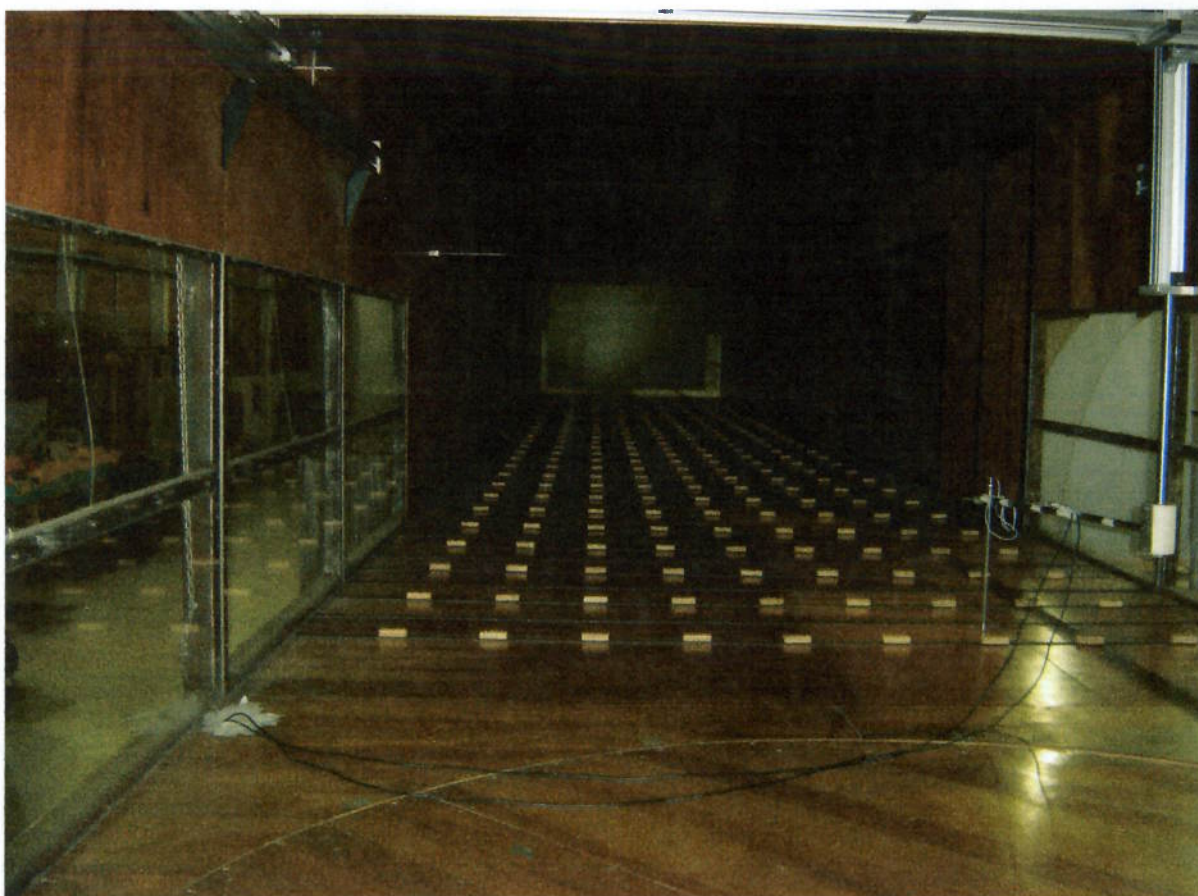


Figura (6.1.9.1): Disposição dos elementos de rugosidade na rugosidade r9.

A Figura (6.1.9.2) apresenta, para a rugosidade r9, os perfis de velocidade e de intensidade de turbulência observados para as condições de 200 rpm, 300 rpm e 400 rpm, respectivamente. Nota-se claramente o perfil logarítmico do perfil de velocidades e a baixa intensidade de turbulência do escoamento não perturbado, da ordem de 0,01%.

Para essa rugosidade, o comprimento de rugosidade observado na condição de 200 rpm foi de 3 mm, decrescendo para 1 mm nas condições de 300 rpm e de 400 rpm.

O comportamento da velocidade de cisalhamento, u_τ , manteve-se similar ao observado com as rugosidades r1, r2, r3, r4, r5, r6, r7 e r8. Variando entre 0,67 m/s para a condição de 200 rpm até 1,1 m/s para a condição de 400 rpm, passando por 0,87 m/s para a condição de 300 rpm.

Observa-se maior intensidade de turbulência na região próxima ao piso do túnel, efeito da perturbação no escoamento provocada pelo incremento na altura dos elementos de rugosidade próximos a sonda. ,

De forma similar ao o comportamento observado nas rugosidades r6 e r8, os perfis de velocidade apresentam uma inflexão na curva na altura aproximada de 800 mm. Provavelmente esse comportamento seja decorrente da influência da camada-limite desenvolvida sobre o teto do túnel. Nesse ensaio a camada-limite desenvolvida sobre o piso rugoso é da ordem de 800 mm, observando-se acima desse valor as condições de escoamento livre e de camada-limite desenvolvida sobre o teto do túnel. A possibilidade de ser influência da estrutura do robô posicionador é pequena, visto que este comportamento não foi observado em rugosidades anteriores, ensaiadas através do mesmo procedimento. Uma possível variação de temperatura ao longo do ensaio também pode ser descartada, visto que após a condição de 300 rpm, foi ensaiada a condição de 400 rpm e não se observou nenhuma alteração qualitativa em relação à condição de 200 rpm.

A Figura (6.1.9.3) apresenta, para a rugosidade r_8 , os perfis de velocidade e de intensidade de turbulência adimensionalizados para uma altura de referência de 1.000 mm e toma, para velocidade de referência, a velocidade observada a 1.000 mm.

Na Figura (6.1.9.3), as curvas de velocidade e de intensidade de turbulência para cada rotação foram sobrepostas e apresentam boa concordância, sem descolamento entre os perfis para as diferentes condições de operação. No perfil de intensidade de turbulência adimensionalizado, nota-se claramente a influência da altura do elemento de rugosidade no crescimento da espessura de subcamada rugosa obtida, representada, *grosso modo*, pela inflexão na curva.

Todos os valores foram obtidos de medições ao longo de uma linha vertical no centro do túnel, em uma posição a 20,4 m a jusante da barreira.

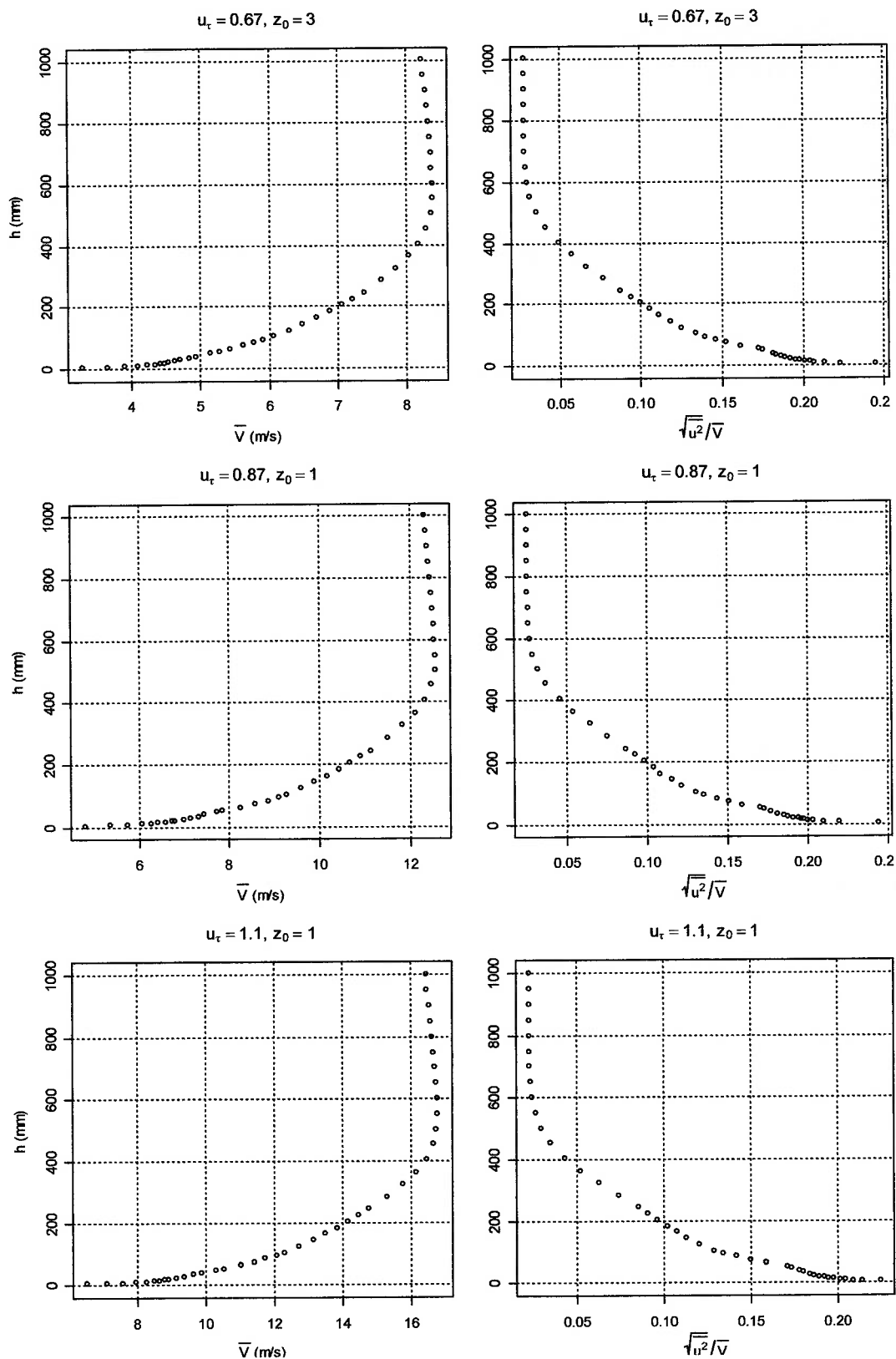


Figura (6.1.9.2): Perfis de velocidade e de intensidade de turbulência, obtidos com a rugosidade r_9 , para 200, 300 e 400 rpm, respectivamente.

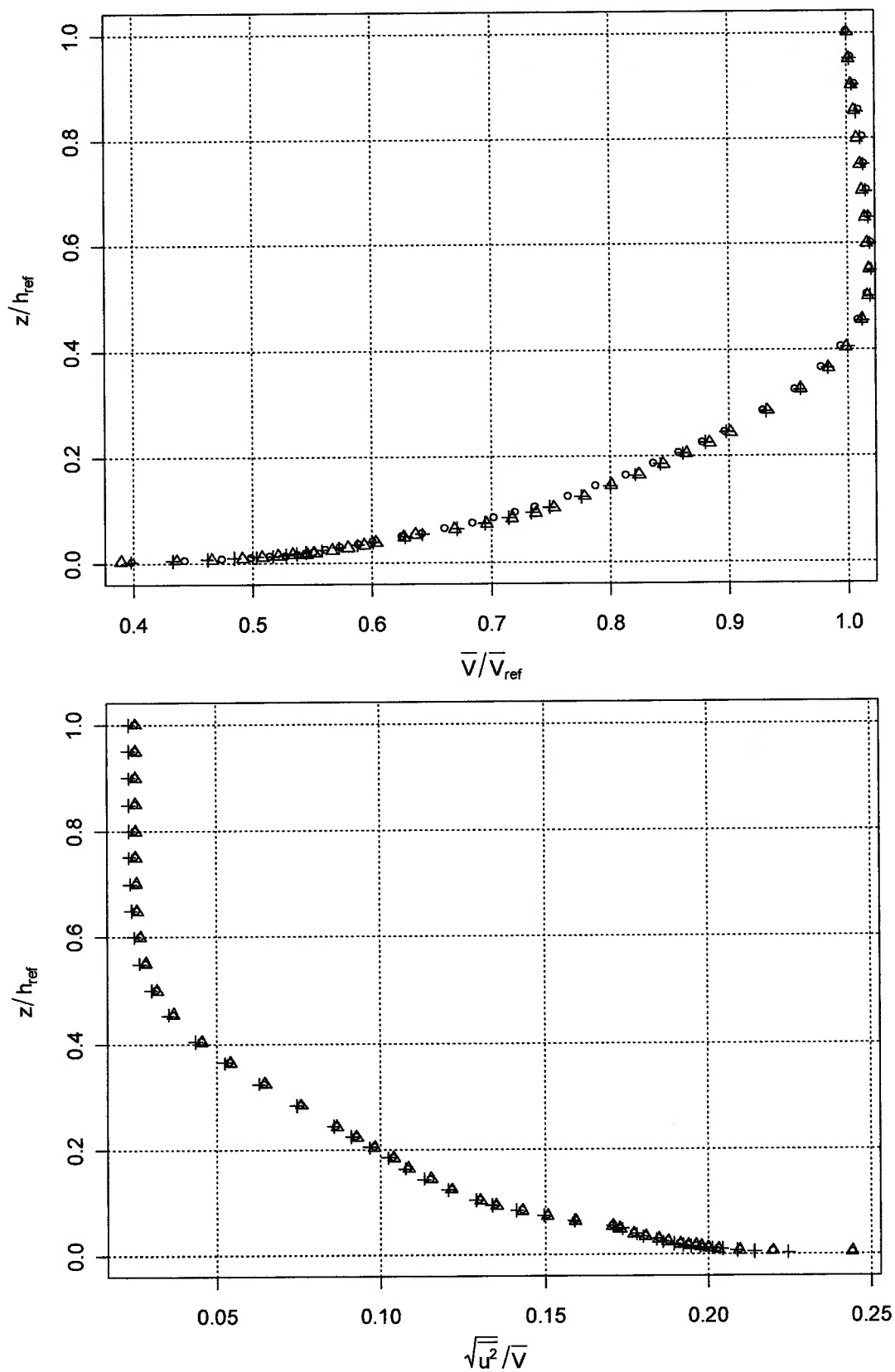


Figura (6.1.9.3): Perfil de velocidade e de distribuição de intensidade de turbulência, para r^9 , adimensionalizados com $h_{ref} = 1000$ mm, $\bar{V}_{ref} = \bar{V}_{1000}$, \circ 200 rpm, Δ 300 rpm e $+$ 400 rpm.

6.1.10 Décima rugosidade

Foi obtida preenchendo-se, 30 linhas de nove elementos de rugosidade cada e 29 linhas com dez elementos. Todos os elementos são do tipo I com 15 mm de altura em relação ao piso do túnel, e foram distribuídos conforme o arranjo diamante, ao longo de 17 m do piso do túnel, iniciando o preenchimento a 2.400 mm a jusante da barreira. Os elementos de rugosidade foram posicionados de forma uniforme, com espaçamento, entre cada elemento de rugosidade de uma mesma linha, de 300 mm e espaçamento entre duas linhas sucessivas de 300 mm. A Figura (6.1.10.1) ilustra a disposição dos elementos de rugosidade para a rugosidade r2.

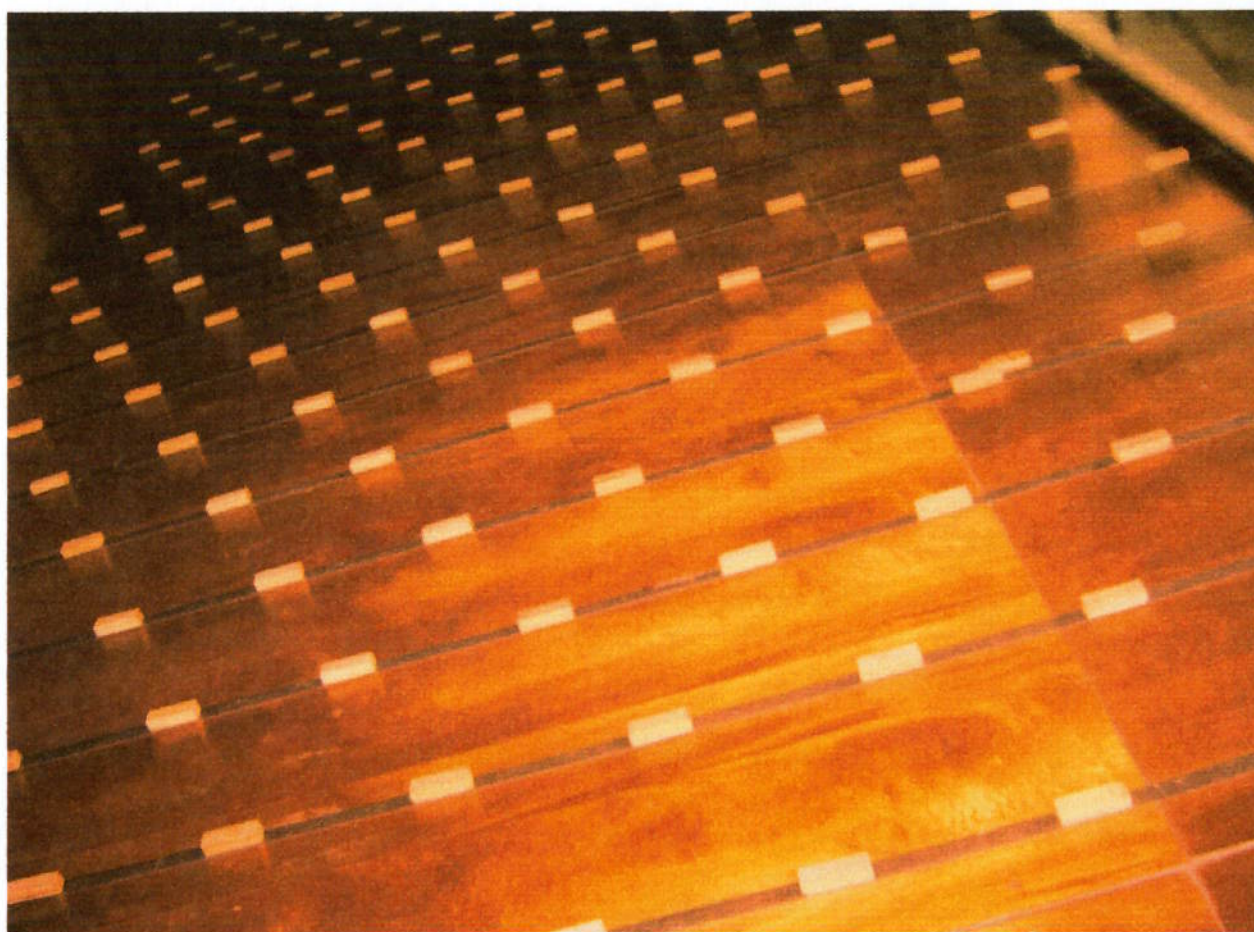


Figura (6.1.10.1): disposição dos elementos de rugosidade na rugosidade r10.

A Figura (6.1.10.2) apresenta, para a rugosidade r10, os perfis de velocidade e de intensidade de turbulência observados para as condições de 200 rpm, 300 rpm e 400 rpm, respectivamente. Nota-se claramente o perfil logarítmico do perfil de velocidades e a baixa intensidade de turbulência do escoamento não perturbado, da ordem de 0,01%.

Para essa rugosidade, o comprimento de rugosidade observado manteve-se constante, em todas as condições ensaiadas, em 1 m.

O comportamento da velocidade de cisalhamento, u_τ , manteve-se similar ao observado com as rugosidades r1, r2, r3, r4, r5, r6, r7 e r8 e r9. Variando entre 0,59 m/s para a condição de 200 rpm até 1,1 m/s para a condição de 400 rpm, passando por 0,86 m/s para a condição de 300 rpm.

Observa-se maior intensidade de turbulência na região próxima ao piso do túnel, efeito da perturbação no escoamento provocada pelo incremento na altura dos elementos de rugosidade próximos a sonda. ,

De forma similar ao o comportamento observado nas rugosidades r6, r8 e r9, os perfis de velocidade apresentam uma inflexão na curva na altura aproximada de 800 mm. Provavelmente esse comportamento seja decorrente da influência da camada-limite desenvolvida sobre o teto do túnel. Nesse ensaio a camada-limite desenvolvida sobre o piso rugoso é da ordem de 600 mm, observando-se acima desse valor as condições de escoamento livre e de camada-limite desenvolvida sobre o teto do túnel. A possibilidade de ser influência da estrutura do robô posicionador é pequena, visto que este comportamento não foi observado em rugosidades anteriores, ensaiadas através do mesmo procedimento. Uma possível variação de temperatura ao longo do ensaio também pode ser descartada, visto que após a condição de 300 rpm, foi ensaiada a condição de 400 rpm e não se observou nenhuma alteração qualitativa em relação à condição de 200 rpm.

A Figura (6.1.10.3) apresenta, para a rugosidade r_8 , os perfis de velocidade e de intensidade de turbulência adimensionalizados para uma altura de referência de 1.000 mm e toma, para velocidade de referência, a velocidade observada a 1.000 mm.

Na Figura (6.1.10.3), as curvas de velocidade e de intensidade de turbulência para cada rotação foram sobrepostas e apresentam boa concordância, sem descolamento entre os perfis para as diferentes condições de operação. No perfil de intensidade de turbulência adimensionalizado, nota-se claramente a influência da altura do elemento de rugosidade no crescimento da espessura de subcamada rugosa obtida, representada, *grosso modo*, pela inflexão na curva.

Todos os valores foram obtidos de medições ao longo de uma linha vertical no centro do túnel, em uma posição a 20,4 m a jusante da barreira.

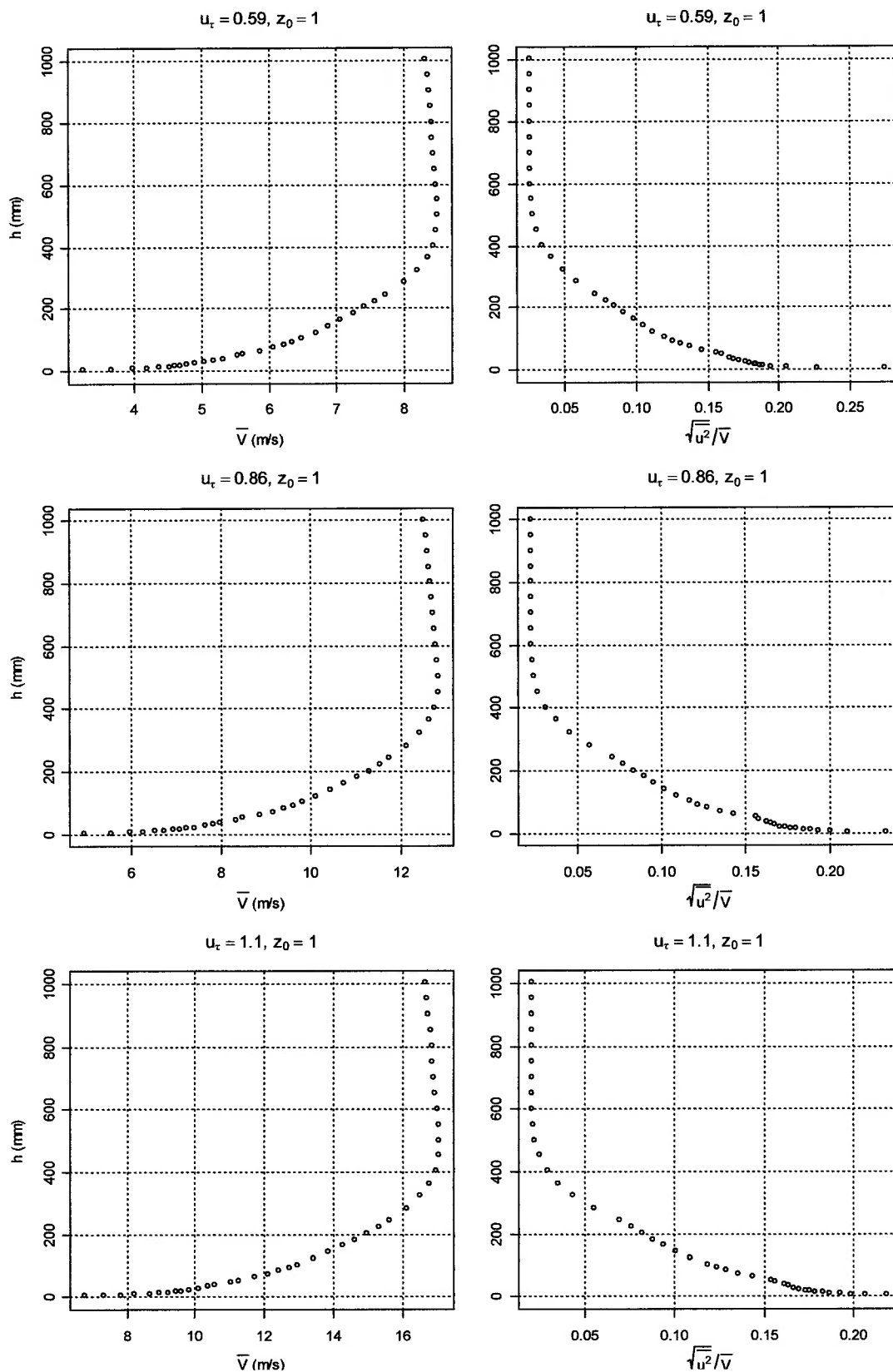


Figura (6.1.10.2): Perfis de velocidade e de intensidade de turbulência para 200, 300 e 400 rpm, respectivamente.

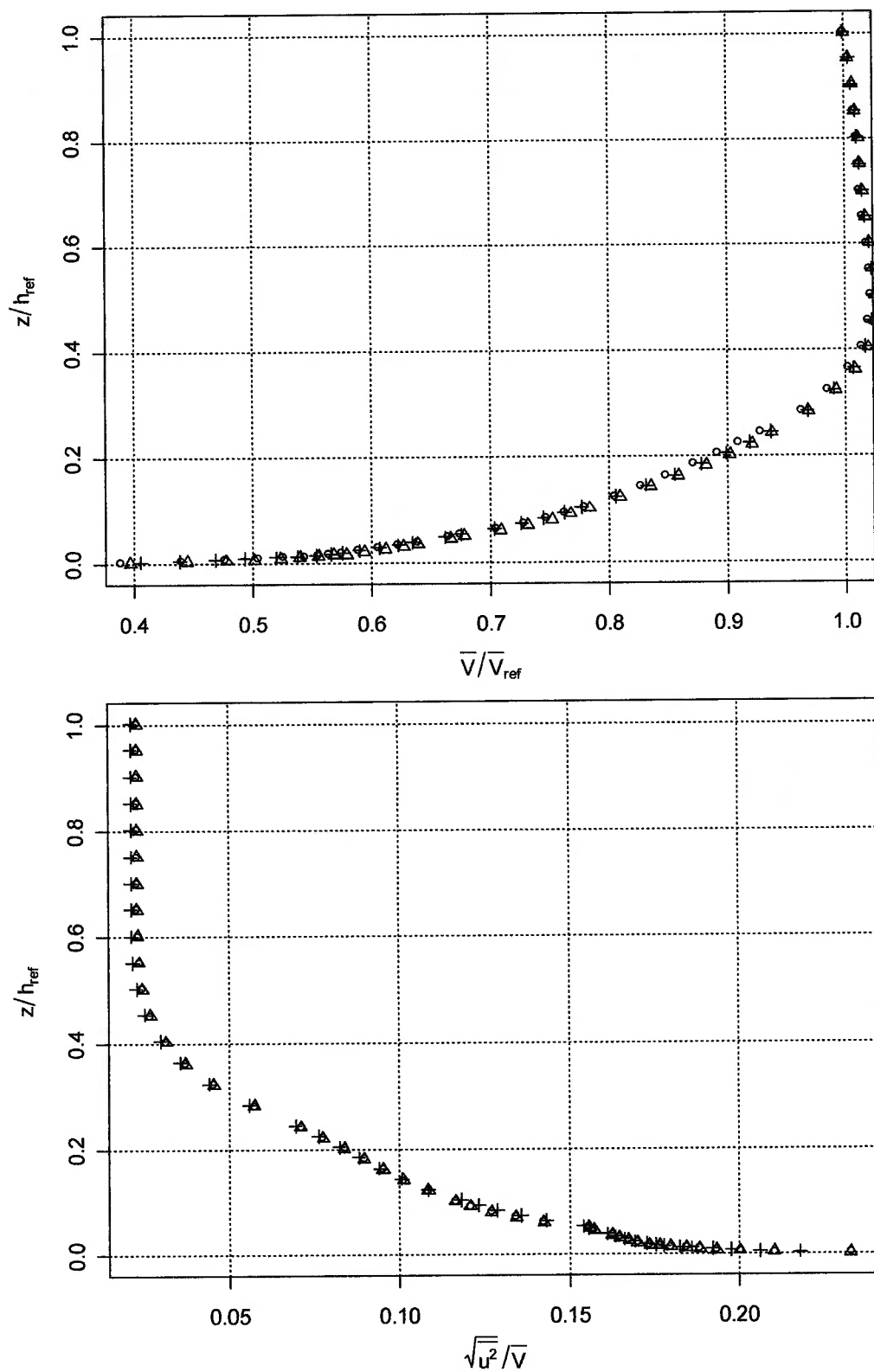


Figura (6.1.10.3): Perfis de velocidade e de distribuição de intensidade de turbulência, para r10, adimensionalizados com $h_{ref} = 1000$ mm, $\bar{V}_{ref} = \bar{V}_{1000}$, \circ 200 rpm, Δ 300 rpm e $+$ 400 rpm.

6.1.11 Comparação entre as rugosidades

A Figura (6.1.11.1) apresenta os perfis de velocidade e de intensidade de turbulência adimensionalizados de todas as rugosidades ensaiadas, na condição de 400 rpm, para uma altura de referência de 1.000 mm e toma, para velocidade de referência, a velocidade observada a 1.000 mm.

Nos perfis de intensidade de turbulência adimensionalizados, nota-se claramente a influência da altura do elemento de rugosidade no crescimento da espessura de subcamada rugosa obtida, representada, *grosso modo*, pela inflexão nas curvas.

Nota-se que as rugosidades r10, r9 e r8 obtidas com a remoção dos geradores de vórtices e da barreira, resultam em camadas limites de espessura menor do que as observadas com o uso dos geradores de vórtices, responsáveis pela geração da turbulência de maior escala. Os resultados concordam bastante bem com a curva logarítmica. Observa-se que, em algumas das camadas, há uma variação na intensidade de turbulência, na região de altura próxima àquela dos elementos de rugosidade.

Observa-se, que os elementos de rugosidade disponíveis no túnel, não permitem no momento, com os arranjos já testados, modelar alguns perfis de velocidade, exigindo estudos adicionais para analisar as alternativas.

Para reproduzir condições de camada-limite mais espessas, pode-se deslocar o modelo para uma região mais próxima da barreira, ou utilizar geradores de vórtices maiores ou elementos de rugosidade com altura mais elevada.

Para simular a condição de camada-limite menos espessa pode-se trabalhar com o túnel liso sem elementos de rugosidade ou remover os geradores de vórtice.

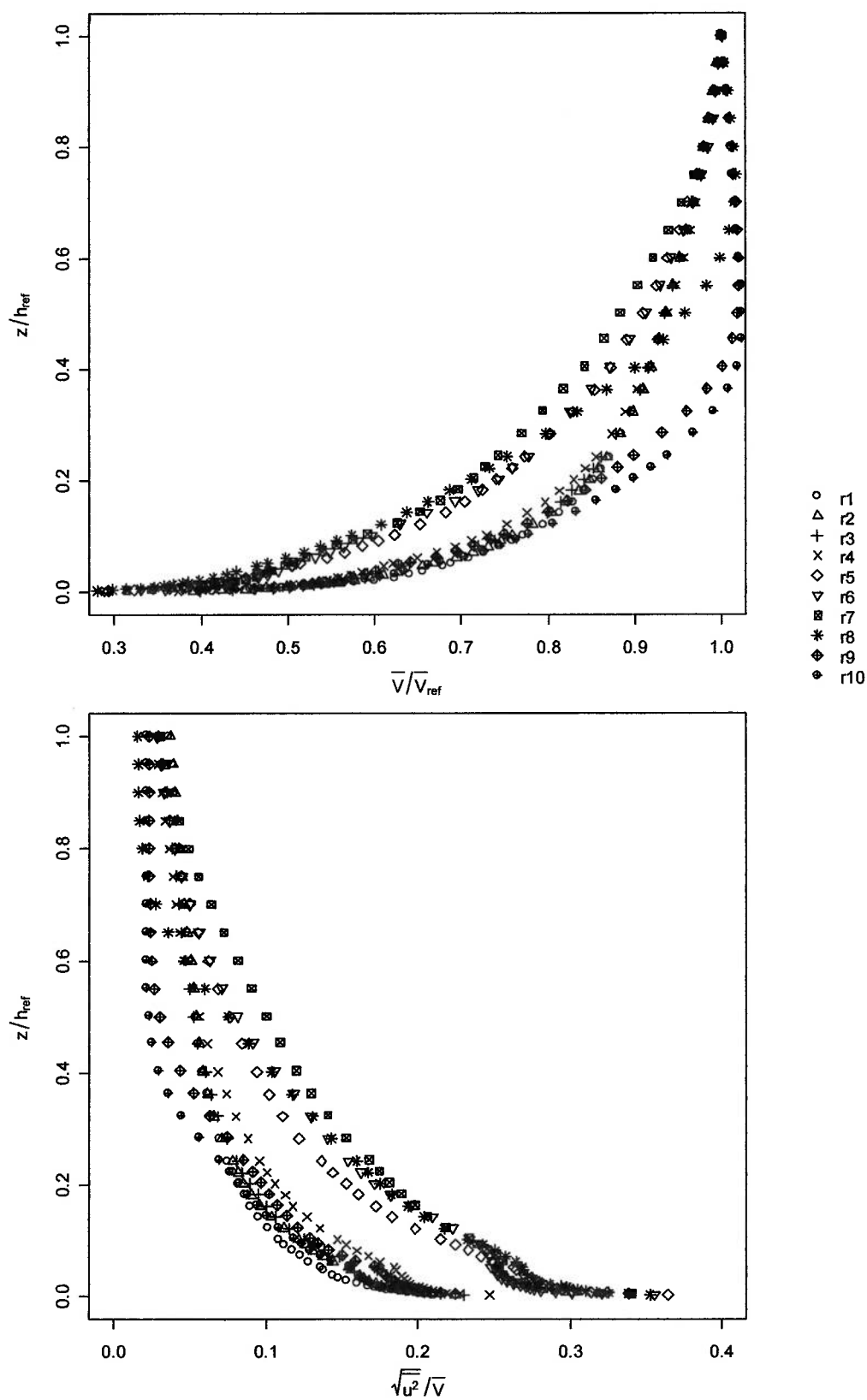


Figura (6.1.11.1): Perfil de velocidade e de distribuição de intensidade de turbulência, adimensionalizados com $h_{ref} = 1000$ mm, $\bar{V}_{ref} = \bar{V}_{1000}$, Rotação fixa em 400 rpm.

A Tabela 6.1.11.1 apresenta os valores da velocidade de cisalhamento observado em cada rugosidade. Como esperado, a velocidade de atrito aumenta com a maior perturbação provocada no escoamento pelo incremento na rugosidade. Para uma mesma rugosidade, observa-se que a velocidade de atrito, cresce com a elevação da condição de operação do túnel. Esse comportamento é observado para todas as rugosidades.

Tabela 6.1.11.1: Valores da velocidade de cisalhamento em função da rugosidade e da condição de operação.

Rugosidade	u* (m/s)		
	200 rpm	300 rpm	400 rpm
r1	0.338	0.521	0.711
r2	0.385	0.662	0.797
r3	0.383	0.64	0.82
r4	0.438	0.687	0.893
r5	0.559	0.819	1.136
r6	0.696	1.061	1.261
r7	0.654	0.972	1.308
r8	0.859	1.319	1.729
r9	0.667	0.866	1.123
r10	0.592	0.863	1.14

A Tabela 6.1.11.2 apresenta os valores do comprimento de rugosidade observado em cada rugosidade e para cada condição de operação do túnel. Não se observa padrão no comportamento do comprimento de rugosidade com a variação da condição de operação do túnel. Para as rugosidades r1, r2, r3, r4, r5, r7 e r10 o comprimento de rugosidade apresentou pequena variação com a rotação. Porém quando o ensaio foi feito sob as condições de rugosidade r6, r8 e r9 foi observada variação sensivelmente maior. Com o incremento na perturbação provocada pelos elementos de rugosidade, foi observado crescimento nos valores do comprimento de rugosidade.

Tabela 6.1.11.2 Valores do comprimento de rugosidade em função da rugosidade e da condição de operação.

Rugosidade	Z0 (mm)		
	200 rpm	300 rpm	400 rpm
r1	0.08820	0.09469	0.11029
r2	0.16596	0.34766	0.19831
r3	0.20244	0.36598	0.29807
r4	0.53729	0.63686	0.58439
r5	2.94354	2.52228	3.01933
r6	6.92604	7.19291	4.52527
r7	4.77190	4.53399	4.58664
r8	12.93486	13.15884	12.01528
r9	2.92098	1.44032	1.28026
r10	1.34198	1.06618	1.06241

A Tabela 6.1.11.3 apresenta os valores do expoente α , da lei de potências (equação 4.3.1) observado em cada rugosidade e para cada condição de operação do túnel. Não se observa padrão no comportamento do expoente α com a variação da condição de operação do túnel. Para as rugosidades r1, r2, r3, r7, r8, r9 e r10 o comprimento de rugosidade apresentou pequena variação com a rotação. Porém quando o ensaio foi feito sob as condições de rugosidade r4, r5 e r6 foi observada variação sensivelmente maior. Com o incremento na perturbação provocada pelos elementos de rugosidade, foi observado crescimento nos valores do comprimento de rugosidade.

Tabela 6.1.11.3: Valores do expoente α em função da rugosidade e da condição de operação.

Rugosidade	α		
	200 rpm	300 rpm	400 rpm
r1	0.12371	0.10178	0.10459
r2	0.09088	0.09112	0.0974
r3	0.10409	0.09619	0.10049
r4	0.1077	0.131	0.09717
r5	0.19012	0.157	0.14493
r6	0.1553	0.27801	0.21641
r7	0.22621	0.23634	0.2377
r8	0.32539	0.32736	0.31704
r9	0.22717	0.21586	0.22002
r10	0.20537	0.20516	0.21356

6.2 Análise do escoamento próximo ao solo pelo método de saltação de areia

A camada limite foi simulada pelo método de Counihan (1971) modificado, de tal forma a gerar uma camada limite de aproximadamente 600 mm. A rugosidade utilizada propiciou características do vento incidente similares às aquelas encontradas em ambientes rurais com poucas edificações. Para esse ensaio foi utilizada a rugosidade r10, descrita no capítulo 6.1.10.

A Figura (6.2.1) apresenta as características do escoamento incidente sob a condição de 400 rpm, as condições foram levantadas durante os ensaios de caracterização do túnel, na seção central do túnel, em uma região não perturbada pela presença do modelo.

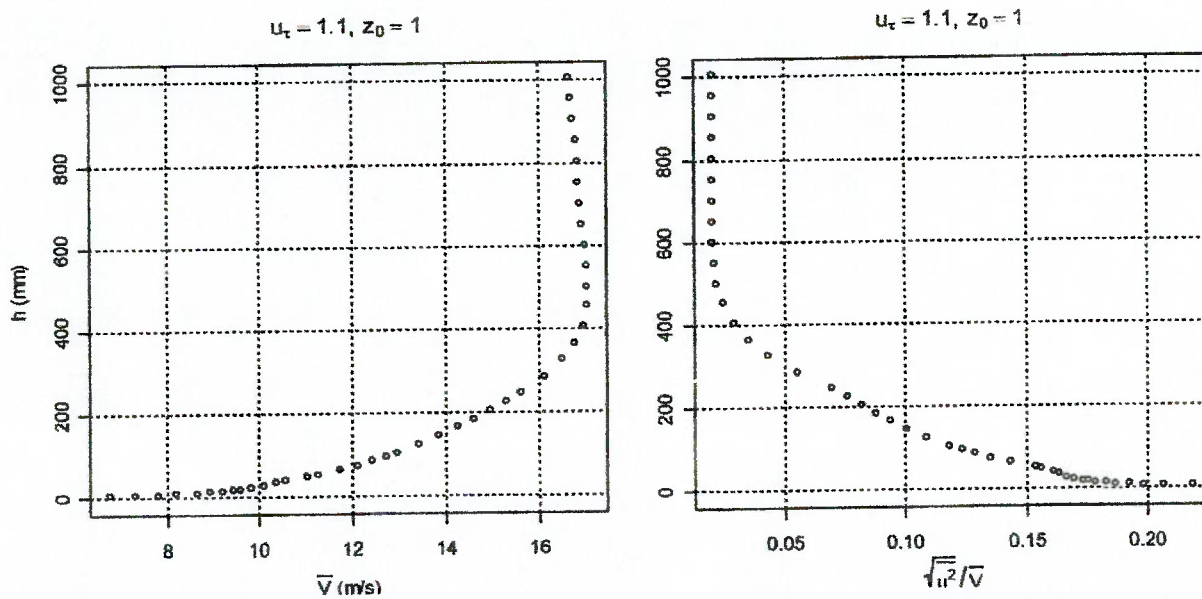
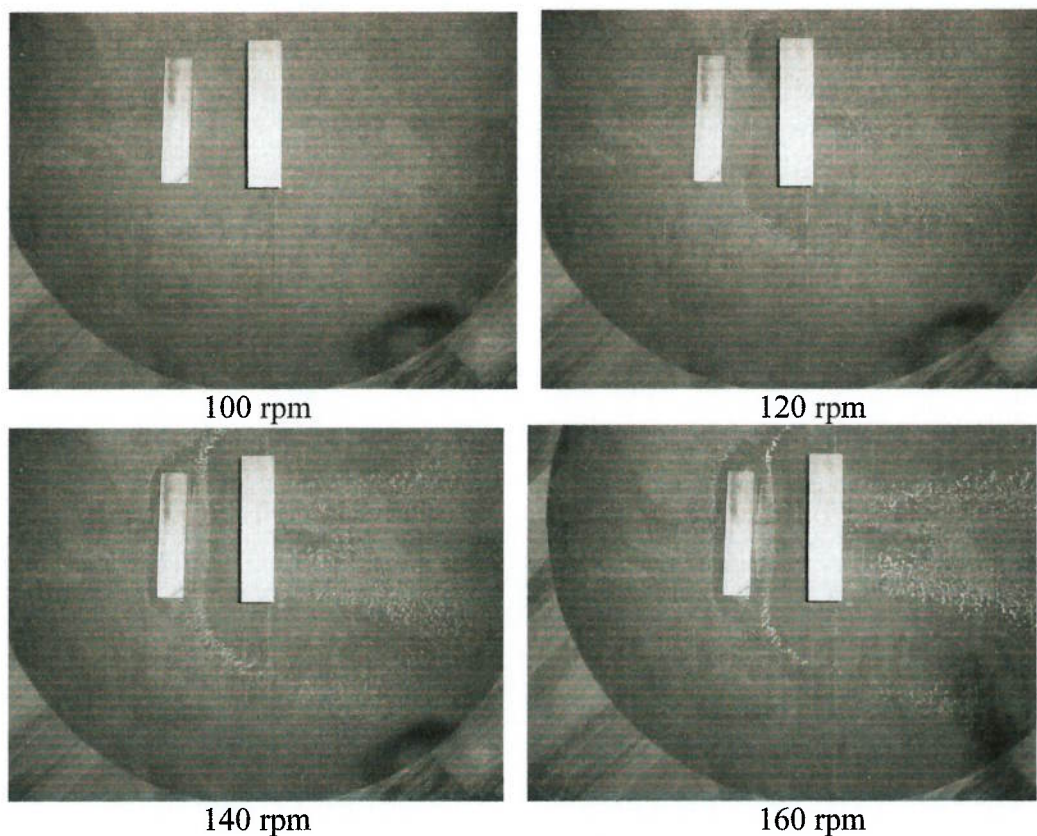


Figura (6.2.1): Características do escoamento incidente. $z_0 = 1.34$ mm, $\alpha = 0,20$

A Figura (6.2.2) é uma seqüência fotográfica dos padrões de limpeza obtidos com diferentes velocidades de vento. As características do vento incidente foram determinadas em uma região não perturbada pela presença do modelo, a 2000 mm à montante do modelo.



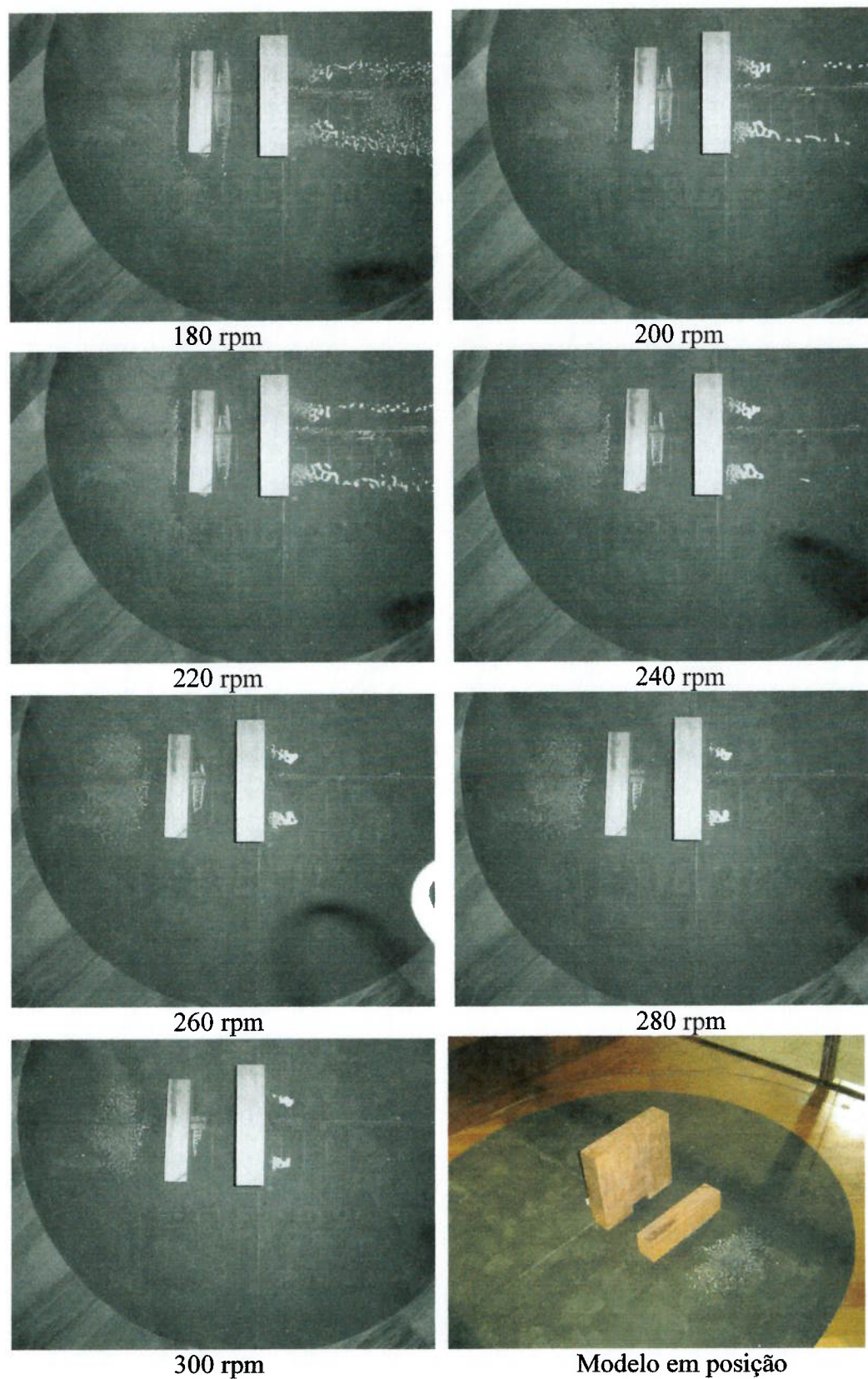


Figura. (6.2.2):Seqüência fotográfica dos padrões erodidos na areia.

O fenômeno de saltação com a conseqüente remoção da areia começa próximo das arestas dianteiras do prédio de maior altura, aonde a velocidade de cisalhamento local, u_* , é cerca de uma vez e meia maior que a velocidade de cisalhamento à montante, u_*^0 . A erosão se desenvolve amplamente ao redor da construção mais alta antes de começar a ocorrer nas proximidades da construção de menor altura. Na frente dessa construção há uma região de tranqüilidade bastante significativa que persiste sem modificações expressivas até uma rotação próxima de 230 rpm.

O resultado apresentado na Figura (6.2.3) é baseado na seqüência fotográfica de 17 imagens, incluindo aquelas apresentadas na Figura (6.2.2) e apresenta as velocidades de atrito ao redor do modelo, relacionado com uma condição de referência de 200 rpm para a qual os resultados foram adimensionalizados, através da expressão:

$$\mu_* = \mu_*^0 \cdot \frac{U_{200}}{U_{foto}} \quad (6.4).$$

Nessa equação, μ_* é a velocidade de cisalhamento que provocará a saltação da areia do ponto em estudo, U_{200} é a velocidade de referência, medida sob a condição de rotação do motor de 200 rpm e U_{foto} é a velocidade de referência do túnel para cada fotografia em uma posição de referência no túnel.

O valor de $u_* = 0,4$ m/s observado, difere sensivelmente do valor previsto pela expressão (6.3), da ordem de 0.25 m/s. Em seu trabalho, Jabardo *et al.* (2005), sugerem que essa diferença seja resultado das características da areia utilizada.

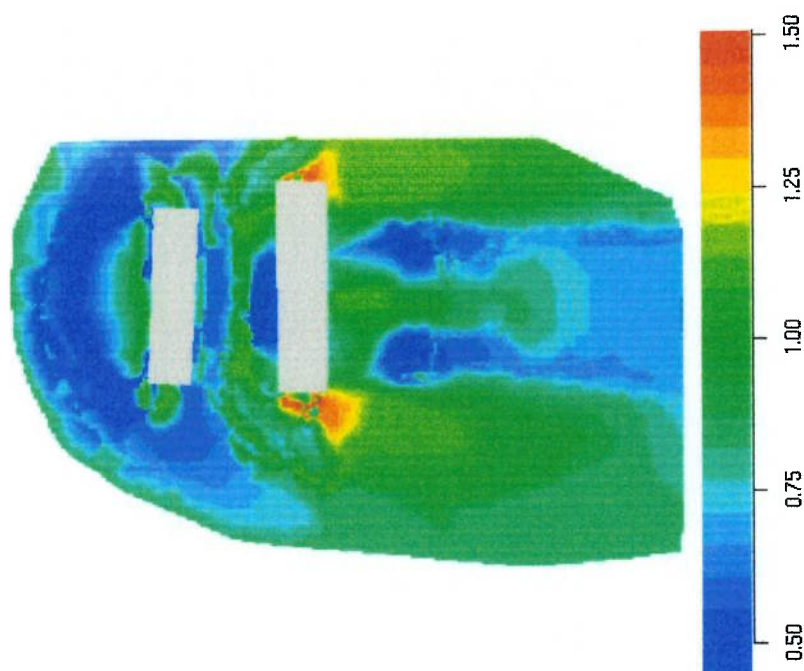


Figura (6.2.3): Distribuição da velocidade de cisalhamento $\frac{\mu_*}{U^0}$ observada ao redor

das estruturas relacionada com os valores das mesmas a montante.

O escoamento alcança sua velocidade de cisalhamento máxima próximo das arestas dos modelos. Nessa região, a velocidade próxima ao solo varia sensivelmente em função da proximidade da aresta do modelo e podem ocorrer valores superiores aos previstos. A determinação mais precisa dessas curvas de velocidades constante, exige que a variação de rotação do motor seja mais discreta, para permitir que a tomada das fotos ocorra com menores alterações. Nesse ponto, há uma solução de compromisso entre a melhor representação do fenômeno e as maiores dificuldades envolvidas na obtenção dos dados e também no seu posterior tratamento.

Observou-se a influência da geometria da construção sobre o escoamento em uma construção característica. Os resultados, qualitativos e quantitativos concordam com os dados de Jabardo *et al.* (2005), Plate (1999) e Khanduri *et al.* (1998).

A Figura (6.2.4) foi obtida da mesma forma utilizando uma utilizar escala de tons de cinza para propiciar melhores condições de interpretação em cópias preto e branco.

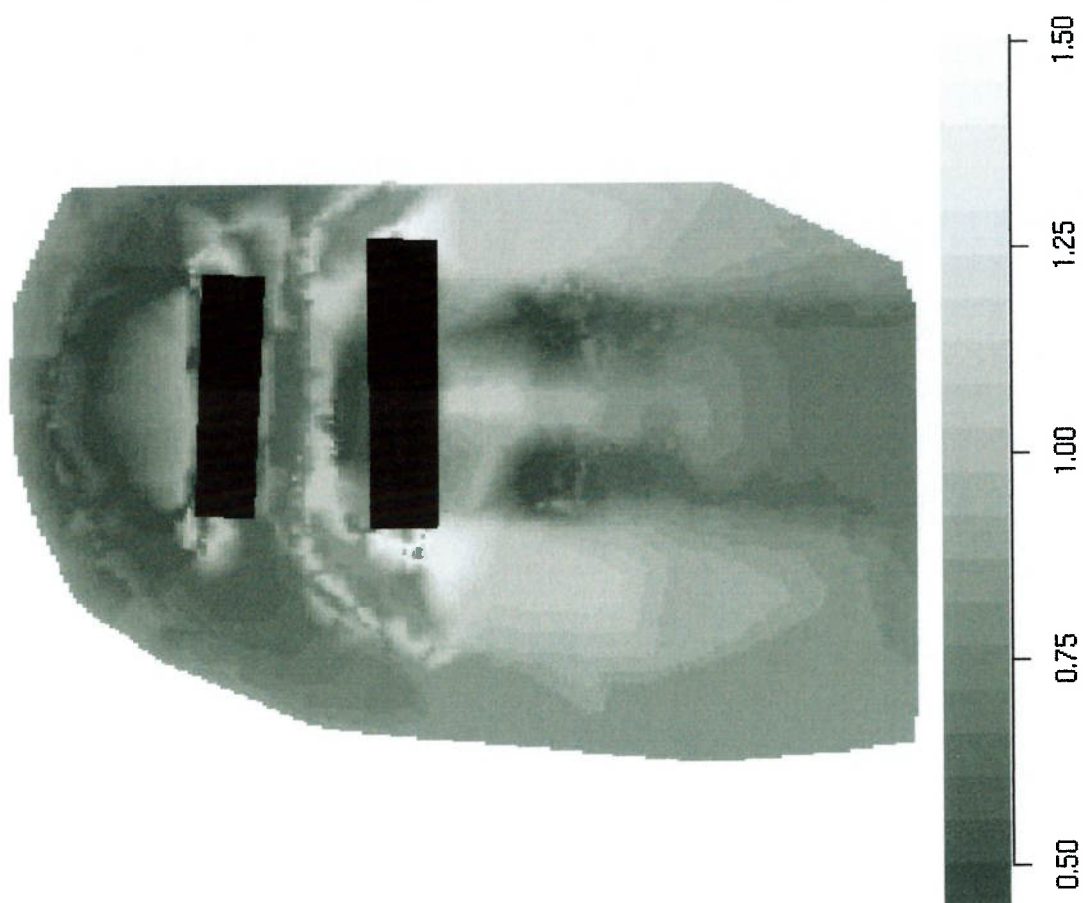


Figura (6.2.4): Distribuição da velocidade de cisalhamento, $\frac{\mu_*}{U^0}$, para o modelo ensaiado.

Na Figura 6.2.2 observam-se os vários padrões erosivos formados pelo vento ao nível do solo. A influência do modelo no campo de velocidades da área circunvizinha decresce com a distância. Foi observado que próximo as arestas frontais, ocorre uma intensificação dos efeitos do vento Dessa forma, quando o vento incidente alcançar 14,2 m/s 100 m a montante da estrutura, a uma altura de 10 m, o vento na área vermelha da Figura

(6.2.3.), medido a 1,60 m do solo, alcançará aproximadamente 29 m/s, excedendo os valores tidos como “seguros” apresentados no capítulo 4.8 e caracterizando uma condição indesejável.

Para minorar o efeito do vento sobre as pessoas, pode-se alterar a geometria da estrutura. Do estudo das figuras levantadas com o ensaio de saltação de areia, são levantadas alternativas para a redução das condições inseguras e, partindo das observações feitas sobre o modelo em escala sua eficácia, as alternativas são analisadas antes da implementação na estrutura em estudo. .

CAPITULO 7 – CONCLUSÕES

Neste trabalho estudou-se o túnel de vento de camada limite atmosférica do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e a sua aplicação para a modelagem física dos fenômenos que ocorrem dentro da camada limite atmosférica. Para isso foram ensaiadas 10 configurações de rugosidade, complementadas com um ensaio de saltação de areia com um modelo básico.

7.1 Caracterização do escoamento

Observou-se que com os elementos de rugosidade disponíveis atualmente no Laboratório de Medições Ambientais, há uma faixa de perfis de velocidade e de distribuição de intensidade de turbulência que não foi possível simular. Para contornar essa adversidade, experimentou-se a remoção do gerador de vórtices e da barreira, mesmo assim houve faixas de perfis de velocidades que não foram alcançadas.

Os perfis levantados concordam com o comportamento previsto por Schlichting (1979) para camadas limites desenvolvidas naturalmente sobre placas planas. A intensidade de turbulência observada decresce com o distanciamento da sonda do piso, como esperado ao se distanciar da superfície sobre a qual se desenvolve a camada limite. A intensidade de turbulência da corrente livre é da ordem de 0,05%.

Foi observado que na região próxima ao piso a ocorrência de descontinuidade nos perfis de intensidade de turbulência refletindo a presença dos elementos de rugosidade.

Comparando o comportamento do escoamento desenvolvido sobre a rugosidade r_{10} com o observado sobre a rugosidade r_2 , observou-se que a remoção da barreira e do gerador de vórtices é um procedimento adequado para a simulação de algumas camadas específicas.

Nos perfis de velocidade de intensidade de turbulência observados nos escoamentos desenvolvidos sobre as rugosidades 8, 9 e 10 observa-se na região superior (acima de 600 mm) a presença da camada limite desenvolvida sob o teto produzindo a inclinação do trecho final dos perfis.

A observação dos perfis adimensionais de velocidades e de distribuição de intensidade de turbulência, feita para as diferentes rugosidades, permite concluir que não há variação expressiva nas condições qualitativas do escoamento com a variação da velocidade média do escoamento. Essa característica das condições de escoamento propiciadas pelo túnel de vento de camada limite atmosférica utilizado permite, através da modelagem adequada, extrapolar observações feitas em velocidades inferiores para condições de velocidades maiores e vice-versa.

De forma geral, a observação dos perfis obtidos com o uso das diferentes configurações de elementos de rugosidade, barreiras e geradores de vórtices, permite assegurar a modelagem física da camada limite atmosférica na região de baixa altitude, atendendo aos estudos de cargas eólicas sobre estruturas e condições de circulação de ar em baixas altitudes.

Com a elevação da sonda, observa-se, no comportamento da intensidade de turbulência, o elevado grau de perturbação do escoamento próximo ao piso, quando comparado com as condições observadas nas regiões superiores do perfil de velocidades.

7.2 Saltação de areia

Na seqüência fotográfica dos padrões erodidos no ensaio de saltação de areia, observam-se os efeitos das arestas e da abertura intensificando a remoção de areia nas áreas

afetadas, como observado nos estudos de Jabardo *et al.* (2005), Plate (1999) e Khanduri *et al.*, (1998).

Os resultados permitiram observar o comportamento do vento próximo ao solo, de forma a identificar regiões nas quais os efeitos do vento são intensificados pela geometria das construções sobre o quais ele sopra, assim como regiões nas quais ocorrem condições de estagnação.

Observou-se a aplicabilidade do método de saltação de areia para a determinação das condições de conforto ou de segurança próximas ao solo.

7.3 Conclusões gerais e recomendações

Dessa maneira, caracterizou-se o túnel de vento, possibilitando significativo avanço para que estudos futuros de investigação dos fenômenos do efeito do vento em estruturas e na dispersão de poluentes sejam realizados. Este trabalho servirá de base para estudos mais detalhados sobre o desenvolvimento da camada limite em um túnel de vento.

Esses ensaios foram necessários para caracterizar o túnel de vento e se demonstraram úteis para trabalhos futuros, tornando o processo iterativo de preparação dos ensaios menos exaustivo, de forma a propiciar melhores condições para os estudos subseqüentes.

Pesquisas posteriores da ação estática e dinâmica do vento sobre estruturas, assim como estudos sobre a dispersão de poluentes, serão facilitadas pelas informações levantadas, permitindo melhor compreensão sobre o comportamento do vento natural e de sua simulação em túnel de vento.

Recomenda-se o estudo do efeito do tamanho de grão de areia para o método de saltação de areia de forma a confirmar as observações feitas com a areia escolhida.

Recomenda-se proceder ao levantamento dos perfis horizontais de velocidade e de intensidade de turbulência, na seção de ensaios.

Recomendam-se estudos adicionais para determinar alternativas para possibilitar modelagens de perfis que não foram obtidos. Esses perfis podem ser obtidos, possivelmente através de um conjunto de geradores de vórtices de menor altura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Apperley, L. W. and Vickery, B. J., "The Prediction and Evaluation of the Ground Level Wind Environment," in *Proceedings of the Fifth Australian Conference on Hydraulics and Fluid Mechanics*. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 1974
- Arens, E. and Ballanti, D., "Outdoor Comfort of Pedestrians in Cities," in *Proceedings of the Conference on the Urban Physical Environment*, 1975, U.S. Forest Service, American Meteorological Society, and Syracuse University, Syracuse, NY 1975.
- Arya, S.p.S., 1981. Parameterizing the height of the stable atmospheric boundary layer, *Journal of Applied Meteorology*, vol.20, n° 10, 1192- 1202
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6123, Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- Beltaos, S. and Rajaratnam, N., Circular Turbulent Jets, *J. Hyd. Div., Proc. ASCE*, 100, HY10, 1313 (1974).
- Beranek, W. J., "Wind Environment around Single buildings of Rectangular Shape, e Wind Environment around Building Configurations", *Heron*, 29 (1984), 1 – 70.
- Blessman, J., The Boundary Layer TV2 wind tunnel of UFRGS, *J. Eng. Ind. Aerodyn.* 10 (1982) 231-238.
- Blessmann, J., "Intervalo de tempo para cálculo da velocidade básica do vento" 2. ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1979, pg 27.
- Borges, A.R. Janeiro & Saraiva, J.A. Gil, "An Erosian Technique for Assessing Ground Level Winds", *Proceedings of the Fifth International Conference on Wind Engineering*, Fort Collins, Colorado, 1979

- Bortoli M., Natalini, M., Paluch, M., Relevamiento em vacio del túnel de vento de la UNNE, XV, J. Argentinas Ingenieria Estructural 2 (1996) 360-368
- Bradshaw, P. & Pankhurst, R.C., 1964. The design of low-speed wind tunnels, National Physical Laboratory Aero Report 1039.
- Bradshaw, P. and Love, E.M., The Normal Impingement of a Circular Air Jet on a Flat Surface, A.R.C., R&M No. 3205, U.K., 1959.
- Cataldo, J. 1992. Simulación física de flujos tipo Capa Limite Atmosferica, tesis de Maestria en Mecanica de los Fluidos Aplicada presentada en la Facultad de Ingenieria, Universidad de la Republica, 1992
- Cataldo, J., 1998. "Estudio de Flujos Vorticosos alrededor de obstáculos y en difusores" tesis de Doctorado em Mecanica de los Fluidos Aplicada, presentada en la Facultad de Ingenieria, Universidad de la Republica, 1998.
- Cermak, J.E., 1975 Applications of fluid mechanics to wind engineering – a Freeman scholar lecture, Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, 9-38
- Cermak, J.E., ASCE, F., 1987. Advances in physical Modeling for Wind Engineering, Journal of Engineering Mechanics, 113, pp. 737-756
- Chang, F. K., "Human Response to Motions in Tail Buildings," J. Struct. Div., ASCE, 98, No. ST6 (June 1973), 1259 – 1272. Chen, P.W. and Robertson, L. E., "Human Perception Thresholds of Horizontal Motion," J. Struct. Div., ASCE, 97, No. ST8, (Aug. 1972), 1681 – 1695.
- Cook, N.J., 1978 Determination of the model scale factor in wind –tunnel simulations of the adiabatic atmospheric boundary layer, Journal of Industrial Aerodynamics, 2, 331-321.
- Cook, N.J., A boundary layer wind tunnel for building aerodynamics, J. Ind. Aerodyn. 1 (1975) 3-12

- Cook, N.J. 1973. On simulating the lower third of the urban adiabatic boundary layer in a wind tunnel, *Atm. Env.*, 7, 691-705
- Counihan, J., An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel, *Atmos. Environ.* 3 (1969) 197-214.
- Counihan, J., Adiabatic atmospheric boundary layers: A review and analysis of data from the period 1880-1972. *Atmos. Environ.*, 9 (1975) 871 – 905.
- Davenport, A.G., 1960. Rationale for determining design wind velocities, *Journal of Struct. Div., Proc. Of the ASCE*, ST 5 39-68
- Durañona, V. 2004. Evaluación de túneles de viento, tesis de Maestría en Mecánica de los Fluidos Aplicada presentada en la Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, 2003.
- ESDU, 1985. Characteristics of atmospheric turbulence near the ground. Part II: single point data for strong winds (neutral atmosphere), Item Number 85020.
- Farell, C. & Iyengar, A.K.S., 1994. Time series analysis with application to velocity fluctuation data measured in a wind tunnel atmospheric boundary layer, Project Report 363, October 1994.
- Feld, L., "Superstructure for 1350ft. World Trade Center," *Civ. Eng.*, ASCE, 41, 6 (June 1971), 66-70.
- Gandemer, J., "Wind Environment Around Buildings: Aerodynamic Concepts," in *Proceedings of the Fourth International Conference on Wind Effects*
- Gartshore, I.S., 1973. A relationship between roughness geometry and velocity profile shape for boundary-layers, Report LTR-LA-140, Lab. Order NAE-1305, file 4011-2, National Aeronautical Establishment, Canada, October, 1973.

- Gorecki, J.P., 1998 Wind tunnel design and applications, Proceedings of Jubileum conference on Wind Effects on Buildings and Structures, Porto Alegre, Brasil, 25-29 mayo 1998.
- Goto, T., "Studies of Wind-Induced Motion of Tall Buildings Based on Occupants Reaction," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 13 (1983), 241-252.
- Greenway, M. and Wood C., The Oxford University 4m x 2m industrial aerodynamics wind tunnel, *J. Ind. Aerodyn.* 4 (1979) 43-70.
- Hama, F.R., 1954. Boundary-layer characteristics for smooth and rough surfaces, Annual Meeting of the society of Naval Architects and Marine Engineers, Nov. 10-13, New York
- Hansen, R. J., Reed J. W., and Van Marcke, E. H., "Human Response to Wind-Induced Motion," *J. Struct. Div.*, ASCE, 98, No. S1'7 (July 1973), 1589 - 1605
- Hansen, S., and. Sorensen, M., A new boundary layer wind tunnel at the Danish Maritime Institute, *J Wind Eng. Ind. Aerodyn* 18 (1985) 213-224.
- Harris, I., 1969. Measurements of wind structure at heights up to 598ft. above ground level, symposium on wind Effects on Buildings and Structures Organized by Loughbrough University of Technology, National Physical Laboratory, Royal Aeronautical Society
- Hinze, J.O., 1975, Turbulence. McGraw-Hill series in mechanical engineering, 2nd ed., New York.
- Holmes, J.D., 2001 Wind loading of structures, Spoon Press, USA and Canada, 139-146
- Holton, J.R., 1992. An introduction to dynamical meteorology, 3rd ed., Academic Press, New York

- Hunt, A., 1982 Wind-Tunnel measurements of surface pressures on cubic building models at several scales, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 10, 137-163
- Hunt, J. C. R., Poulton, E. C., and Mumford, J. C., "The Effects of Wind on People: New Criteria Based on Wind Tunnel Experiments" *Build. Environ.*, 11, (1976), 1-28.
- Irwin, H.P.A.H., "The design of spires for wind simulation", vol. 7, pp. 361-366, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1981
- Isyumov, N. and Davenport, A. G., "The Ground Level Wind Environment in Built-up Areas," in *Proceedings of the Fourth International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures*, London, 1975, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1976, pp. 403-422.
- Iyengar, A.K.S. & Farell, C., 2001. Experimental issues in atmospheric boundary layer simulations : roughness length and integral scale determination, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89, 1059-1080
- Jabardo, P. J. S., Prata, A., Brunelli, G., Marciotti, E. R., Nalder, G., Pereira, M.T, "Influence of Integral Length Scales in Sand Erosion Techniques", a ser publicado.
- Jensen, M., 1958. The model law for phenomena in the natural wind, *Ingenieria*, vol. 2 121-128, Denmark
- Khan, F. R. and Parmelee, R. A., "Service Criteria for Tall Buildings for Wind Loading, in *Proceedings of the Third International Conference Wind Effects on Buildings and Structures*, Tokyo, 1971, Saikon, Tokyo, 1972, pp. 401 - 407

- Lawson, T. V. and Penwarden, A. D., "The Effects of Wind on People in the Vicinity of Buildings," in *Proceedings of the Fourth International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures*, London, 1975, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1976, pp. 605-622
- Lumley, J.L & Panofsky, H.A., 1964. The structure of atmospheric turbulence. Intescience Publishers, John Wiley & Sons, New York
- Marshall, R.D., 1985. Performance requirements and preliminary design of boundary layer wind tunnel facility, NBSIR 85 – 3168, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards
- Melbourne, W. H. and Joubert, P. N., "Problems of Wind Flow at the Base of Tall Buildings," in *Proceedings of the 7th International Conference on Wind Effects on Building and Structures*. Tokyo, 1971, Saikon, Tokyo, 1972, pp. 105-114.
- Murakami, S. and Deguchi, K., "New Criteria for Wind Effects on Pedestrians," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 7 (1981),289-309
- O'Hare, M., "Designing with Wind Tunnels," *Arch. Forum* (April 1968), 60 – 64
- on Buildings and Structures*, London, 1975, Cambridge Univ. Press, Cambridge, pp. 423-432
- Owen, P.R., Saltation of Uniform Grains in Air, *J. Fluid Mechanics*, 20, 255 (1964)
- Pedlosky, J., 1986. *Dynamic meteorology*, D. Reidel Publishing Co., Netherlands
- Penwarden, A. D. and Wise, A. F. E., *Wind Environment around Buildings*, Building Research Establishment Report, Department of the Environment, Building Research Establishment, Her Majesty's Stationery Office, London, 1975.
- Penwarden, A. D., "Acceptable Wind Speeds in Towns," *Build. Sci.*, 8, 3 (Sept. 1973), 259-267

- Penwarden, A. D., Grigg, P. F., and Rayment, R., "Measurements of Wind Drag on People Standing in a Wind tunnel," *Build. Environ.*, 13 (1978), 75 – 84.
- Pitta, J. A. A., "Ações Devidas ao Vento em Edificações", Universidade Federal de São Carlos, 1990.
- Plate, E.J., 1982. Wind tunnel modeling of wind effects in engineering, *Engineering Meteorology*, Elsevier, Amsterdam, Plate, E.J. (Ed.).
- Plate, E.J., 1999 Methods of investigating urban wind fields – physical models, *Atmospherical Environment*, 33 3981-3989
- Poreh, M., Tsuei, Y.G. and Cermak, J.E., Investigation of a Turbulent Radial Wall Jet, *J. of Applied Mechanics*, 34, 457 (1967).
- Poulton, E. C., Hunt, J. C. R., Mumford, J. C., and Poulton, J., "The Mechanical Disturbance Produced by Steady and Gusty Winds of Moderate Strength: Skilled Performance and Semantic Assessments," *Ergonomics*, 18,6 (1975),651-673
- Prata, A. R. "Dimensionamento do Impacto da Altura de Edifícios nas condições de Ventilação Natural do Meio Urbano" Memorial de Qualificação apresentado a Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAU), 2004.
- Rae, W. & Pope, A, 1984. *Low-speed wind tunnel testing*, ed. John Wiley & Sons
- Rajaratnam, N. and Pani, B.S., Three Dimensional Turbulent Wall Jets, *J. Hyd. Div.*, *Proc. ASCE*, 100, HY1, 69 (1974)
- Raupach, M.R., Antonia, R.A. and Rajagopalan, S., 1991. ASME Book No. AMR084, *Appl. Mech. Rev.*, 44, nº1, 1-25
- Reed, J. W., *Wind-Induced Motion and Human Discomfort in Tall Buildings*, Research Report No. R71-42, Department of Civil Engineering, MIT, Cambridge,1971

- Reinhold, T.A., Tieleman, H.W. and Maher, F.J., "Simulation of the urban neutral boundary layer for the model study loads on tall buildings", report VPI-E-77-12, Department of Engineering Science and Mechanics, College of Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, March 1978
- Robins, A.G. ,"The development and structure of simulated neutrally stable atmospheric boundary layers", vol. 4, pp. 71-100, Journal of Industrial Aerodynamics, Elsevier /scientific Publishing Co., Amsterdam, 1979.
- Schlichting, H., 1979. Boundary layer theory. McGraw-Hill series in mechanical engineering, 7th ed., New York
- Simiu, E. and Scanlan, R.H., 1996. Wind Effects on Structures: An introduction to wind engineering, John Wiley & Sons, 2nd ed, NY.
- Standen, N.M., "A spire for generating thick turbulent shear layers for natural wind simulation in wind tunnel", Report LTR-L1A-94, Lab. Order NAE-1637, file 49-7-47, National Aeronautical Establishment, Canada, May 1972
- Sykes, D.M, A new wind tunnel for industrial aerodynamics, J. Ind. Aerodyn. 2 (1977) 65-78
- Streeter, Victor Lyle, 1909 Mecânica dos Fluidos, tradução de Celso da Silva Muniz, Franco Brunetti et all. Mc Graw Hill
- T. Goto, "Human Perception and Tolerance of Motion," *Monograph of Council on Tall Buildings and Urban Habitat*, Vol. PC (1981), 817 – 849
- Tennekes, H. and Lumley, J.L.,1972.A first course in turbulence, MIT Press, Cambridge
- Wieringa, J., 1993. Representative roughness parameters for homogeneous terrains, Boundary Layer Meteorology, 63, 323-363
- Wise, A.F.E., Wind Effects due to Groups of Buildings, CP 23/70, Building Research Station, Watford, U.K. , Jul. 1970

Yamada M. and Gogo, T., *Criteria for Motions in Tail buildings*, College of
Engineering, Hosei University, Koganei, Tokio, Japan, 1975