

**Universidade Federal do Rio Grande do Sul**

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC

**SIMULAÇÃO DO VENTO ATMOSFÉRICO E DOS  
PROCESSOS DE DISPERSÃO DE POLUENTES EM  
TÚNEL DE VENTO**

**Adrián Roberto Wittwer**

Porto Alegre  
Agosto de 2006

---

**Adrián Roberto Wittwer**

**SIMULAÇÃO DO VENTO ATMOSFÉRICO E DOS  
PROCESSOS DE DISPERSÃO DE POLUENTES EM  
TÚNEL DE VENTO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do  
Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de  
Doutor em Engenharia.

Porto Alegre  
Agosto de 2006

---

**Adrián Roberto Wittwer**

**SIMULAÇÃO DO VENTO ATMOSFÉRICO E DOS  
PROCESSOS DE DISPERSÃO DE POLUENTES EM  
TÚNEL DE VENTO**

Esta Tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia e aprovada em sua forma final pelos professores orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 07 de agosto de 2006.

---

**Prof. Acir Mércio Loredo-Souza**  
Ph.D. pela University of Western Ontario,  
Canadá  
Orientador

---

**Prof<sup>a</sup>. Edith Beatriz Camaño Schettini**  
Dr. pelo Institut National Polytechnique de  
Grenoble, França  
Orientador

---

Prof. Fernando Schnaid  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Gervásio Annes Degrazia (UFSM)**  
D. Sc., Universitat Karlsruhe, U.F.K., Alemanha

**Prof. Sergio Viçosa Möller (UFRGS)**  
Dr. Eng. Mec., Universitat Karlsruhe, U.F.K., Alemanha

**Prof. Mario José Paluch (UPF)**  
Dr. Eng., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

---

## AGRADECIMENTOS

A Andrea e Malena.

A Maringha, Mario De Bortoli e Mario Paluch.

Aos meus orientadores, os Professores Beatriz e Acir.

Aos Profesores Sergio Möller do PROMEC e Gervásio Degrazia da UFSM.

A Ignácio Iturrioz, ao Professor Jorge Riera e ao Professor Joaquim Blessmann.

A Gustavo, Paulo Bueno, Elvis, Fabrício, Karin e ao pessoal do LAC.

A José Iturri e Gisela do Laboratório de Aerodinâmica e as autoridades da Facultad de Ingeniería de la UNNE.

A Guilherme do Laboratório de Micrometeorologia da UFSM.

Ao pessoal da secretaria do PPGEC.

A Alberto de “Micromecánica Raush”.

A Michael Hughs e ao pessoal do Hotel Ritz.

A CAPES, pelo apoio financeiro.

A Bethânia, Nebbia e Zitarrosa.

---

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE TABELAS .....	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS .....	xiv
RESUMO .....	xix
ABSTRACT .....	xxi
1 Introdução .....	1
1.1 Motivação do problema .....	1
1.2 Revisão Bibliográfica .....	2
1.3 Objetivos.....	9
2 Conceitos fundamentais.....	11
2.1 A camada limite atmosférica .....	11
2.1.1 Estabilidade atmosférica.....	12
2.1.2 Camada superficial .....	14
2.1.3 Camada exterior.....	17
2.2 Conceitos gerais de turbulência.....	18
2.2.1 Intensidade de turbulência .....	19
2.2.2 Escalas da turbulência .....	21
2.2.3 Análise espectral da turbulência.....	23
2.2.4 Distribuições de probabilidade da turbulência .....	26
2.2.5 A teoria de Kolmogorov .....	27
2.3 Turbulência atmosférica .....	27
2.3.1 O espectro macrometeorológico.....	29
2.3.2 Espectro de potência das flutuações .....	30
2.4 Dispersão atmosférica de contaminantes.....	32
2.4.1 A contaminação do ar .....	33
2.4.2 Teorias de difusão.....	34
2.4.3 Modelos de dispersão .....	38
3 Simulação do vento atmosférico e estudos de dispersão em túnel de vento .....	45
3.1 Simulação da camada limite atmosférica em túneis de vento .....	45
3.1.1 Modelagem da camada limite atmosférica em estabilidade neutra .....	48
3.1.2 Modelagem de escoamentos estratificados.....	51
3.1.3 Considerações sobre a modelagem de regiões próximas e afastadas .....	53
3.2 Requerimentos de semelhança para modelar fontes de emissão .....	54
3.2.1 Dificuldades da modelagem a baixa velocidade.....	56
3.2.2 Simulações aproximadas do comportamento da pluma .....	57
3.2.3 Modelagem de problemas locais de dispersão .....	58
3.2.4 Modelagem de problemas de dispersão a nível de meso-escala.....	61
3.3 Análise das concentrações .....	62
3.3.1 Medição de concentrações.....	62
3.3.2 Normalização.....	63
3.3.3 Flutuações da concentração .....	64
4 Instalações experimentais e instrumentação.....	66
4.1 Instalações experimentais .....	66

4.2	Instrumental para a análise de escoamentos .....	68
4.2.1	Anemometria de fio quente .....	68
4.2.2	Calibração do anemômetro .....	69
4.2.3	Sistema de medição .....	71
4.3	Instrumental para a análise de processos de dispersão atmosférica .....	71
4.3.1	Mistura de gases .....	72
4.3.2	A sonda aspirante .....	74
5	Estudos experimentais de escoamentos de camada limite.....	78
5.1	Modelagem física do vento atmosférico a velocidade muito baixa.....	78
5.1.1	Descrição dos experimentos .....	79
5.1.2	Resultados obtidos na simulação de expoente $\alpha = 0,16$ .....	81
5.1.3	Resultados na simulação de expoente $\alpha = 0,25$ - túnel TV2 .....	86
5.1.4	Resultados na Simulação de expoente $\alpha = 0,23$ .....	88
5.1.5	Avaliação geral das simulações de camada limite atmosférica.....	91
5.2	Cálculo dos parâmetros do perfil do vento .....	91
5.2.1	Metodologia.....	92
5.2.2	Número de Reynolds da rugosidade.....	95
5.3	Análise do escoamento na camada atmosférica superficial.....	95
5.3.1	Espectros na camada limite atmosférica.....	96
5.3.2	Comparação dos espectros adimensionais.....	98
5.3.3	Estimação do parâmetro de Monin-Obukhov.....	98
5.4	Avaliação da constante de Kolmogorov a partir de dados experimentais....	100
5.4.1	Dados experimentais e determinação dos parâmetros turbulentos.....	102
5.4.2	Resultados obtidos.....	103
5.5	Considerações finais .....	105
6	Avaliação experimental de escoamentos complexos.....	108
6.1	Escoamento em torno de uma edificação simples .....	108
6.1.1	Considerações gerais sobre as características do escoamento.....	108
6.1.2	Descrição dos experimentos .....	109
6.1.3	Resultados.....	110
6.2	Escoamento turbulento em zona urbana não homogênea.....	115
6.2.1	Descrição do trabalho experimental .....	115
6.2.2	Resultados da avaliação do escoamento turbulento .....	116
6.3	Considerações finais .....	119
7	Estudo experimental do processo de dispersão .....	120
7.1	Características dos modelos de dispersão.....	120
7.2	Parâmetros característicos e condições nos ensaios .....	121
7.3	Configurações da vizinhança.....	122
7.4	Análise da concentração média e da intensidade das flutuações.....	125
7.5	Resultados das medições .....	125
7.6	Comparação valores experimentais com a expressão do perfil gaussiano ...	133
7.7	Dispersão vertical e elevação da pluma.....	134

---

7.8	Análise do fator de diluição.....	138
7.9	Discussão dos resultados .....	140
8	Análise da intermitência das concentrações .....	143
8.1	Amostragem das flutuações de concentração.....	144
8.2	Análise da intermitência .....	145
8.2.1	Resultados obtidos para a configuração I.....	147
8.2.2	Resultados obtidos para a configuração II.....	157
8.2.3	Resultados obtidos para a configuração III .....	161
8.2.4	Resultados obtidos para a configuração VI.....	164
8.3	Análise espectral das flutuações de concentração .....	167
8.4	Considerações finais .....	174
9	Conclusões.....	176
9.1	Perspectivas .....	178
	Referências bibliográficas .....	180

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Estrutura vertical da baixa atmosfera [Arya, 1982].	13
Figura 2.2. Estabilidade Atmosférica [Cook, 1985].	14
Figura 2.3. Perfil de velocidade média sobre terrenos de diferentes rugosidades [Parker, 1977].	16
Figura 2.4. Decomposição de Reynolds.	19
Figura 2.5. Curva de auto-correlação [Blessmann, 1995].	22
Figura 2.6. Regiões do espectro de turbulência.	25
Figura 2.7. Intensidade local da componente longitudinal da turbulência [Blessmann, 1995].	29
Figura 2.8. Espectro de van der Hoven obtido em Brookhaven [Cook, 1985].	30
Figura 2.9. Espectros das componentes $u$ e $w$ obtidos em condição de estabilidade quase-neutra [Jensen & Busch, 1982].	31
Figura 2.10. Comportamento do espectro da componente $w$ com a variação do parâmetro $z/L_{MO}$ [Jensen & Busch, 1982].	32
Figura 2.11. Esquema de uma pluma Gaussiana.	39
Figura 2.12. Difusão lateral $\sigma_y$ em função da distância a sotavento desde a fonte de emissão [Parker, 1977].	41
Figura 2.13. Difusão vertical $\sigma_z$ em função da distância a sotavento desde a fonte de emissão [Parker, 1977].	43
Figura 2.14. Efeito de uma edificação no processo de emissão [Hanna, 1982].	44
Figura 3.1. Parâmetros característicos de uma fonte de emissão.	55
Figura 3.2. Dispersão de plumas em torno de uma construção cúbica [Meroney, 1982].	60
Figura 4.1. Túnel de retorno fechado da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil [Blessmann, 1982].	67
Figura 4.2. Túnel de circuito aberto da Universidad Nacional del Nordeste, Resistência, Argentina [Wittwer & Möller, 2000].	67
Figura 4.3. Vistas dos túneis de vento; túnel de retorno fechado “Prof. Joaquim Blessmann” da UFRGS (esquerda), túnel de circuito aberto “Prof. Jacek P. Gorecki” da UNNE (direita) e túnel TV2 da UNNE (abaixo).	68
Figura 4.4. Diagrama elétrico do anemômetro a temperatura constante (Dantec CTA 56C).	70
Figura 4.5. Curva de calibração de uma sonda anemométrica.	70
Figura 4.6. Sistema de medição anemométrico.	72
Figura 4.7. Misturador de gases.	75
Figura 4.8. Sonda aspirante.	76
Figura 4.9. Curvas de calibração de uma sonda aspirante.	76
Figura 5.1. Elementos de rugosidade e simuladores de Standen utilizados na simulação parcial $\alpha = 0,16$ .	80
Figura 5.2. Elementos de rugosidade e simuladores utilizados na simulação parcial no TV2.	81
Figura 5.3. Elementos de rugosidade e simuladores de tipo agulhas perfuradas na simulação total de expoente $\alpha = 0,23$ .	82
Figura 5.4. Perfis de velocidade média e intensidade de turbulência.	83
Figura 5.5. Espectros de potência e funções de auto-correlação.	84

Figura 5.6. Comparação com o espectro atmosférico de Davenport.....	84
Figura 5.7. Comparação com o espectro atmosférico de ESDU.....	85
Figura 5.8. Espectro estendido.....	85
Figura 5.9. Perfis de velocidade média na simulação parcial da CLA no túnel de vento TV2.....	87
Figura 5.10. Perfis de intensidade local de turbulência na simulação parcial da CLA no túnel de vento TV2.....	87
Figura 5.11. Espectros das flutuações de velocidade na simulação parcial da CLA no túnel de vento TV2.....	88
Figura 5.12. Perfis de velocidade média na simulação total da CLA no túnel de vento “Joaquim Blessmann”.....	89
Figura 5.13. Intensidade local de turbulência na simulação total da CLA no túnel de vento “Joaquim Blessmann”.....	90
Figura 5.14. Espectros das flutuações de velocidade na simulação total da CLA no túnel de vento “Joaquim Blessmann”.....	90
Figura 5.15. Perfis de velocidade média e intensidade de turbulência.....	94
Figura 5.16. Comparação do perfil logarítmico com os dados experimentais.....	94
Figura 5.17. Espectros das componentes $u$ , $v$ e $w$ para a série 1.....	97
Figura 5.18. Espectros das componentes $u$ , $v$ e $w$ para a série 2.....	97
Figura 5.19. Comparação do espectro da componente longitudinal $S_u$ da série 1 com o espectro da simulação $\alpha = 0,16$ , pos. 1 em túnel de vento, e com o espectro de von Kármán.....	99
Figura 5.20. Comparação do espectro da componente longitudinal $S_u$ da série 1 com o espectro da simulação $\alpha = 0,16$ , pos. 1 em túnel de vento, e com o espectro de Kaimal.....	99
Figura 5.21. Comparação do espectro da componente vertical $S_w$ com o espectro de Kaimal (2).....	101
Figura 5.22. Funções de segunda e terceira ordem para TV2.....	105
Figura 5.23. Funções de segunda e terceira ordem para TVG.....	105
Figura 5.24. Funções de segunda e terceira ordem para CAS.....	106
Figura 6.1. Modelo utilizado e posições de medição.....	110
Figura 6.2. Perfis de velocidade média e intensidade de turbulência (direção normal).....	111
Figura 6.3. Perfis de velocidade média e intensidade de turbulência (direção oblíqua).....	112
Figura 6.4. Linhas de máxima velocidade média e intensidade de turbulência.....	112
Figura 6.5. Registros parciais de velocidade correspondente ao perfil da posição 2 (direção normal).....	114
Figura 6.6. Espectros das flutuações de velocidade.....	114
Figura 6.7. Modelo do centro urbano no túnel de vento.....	116
Figura 6.8. Velocidade média no escoamento em zona urbana no túnel de vento.....	117
Figura 6.9. Intensidade de turbulência no escoamento em zona urbana no túnel de vento.....	118
Figura 6.10. Espectros das flutuações de velocidade no escoamento em zona urbana no túnel de vento.....	118
Figura 7.1. Emissão isolada – Configuração I.....	123
Figura 7.2. Edificação simples a barlavento da emissão Configuração II.....	123
Figura 7.3. Edificação simples a sotavento da emissão Configuração III.....	123
Figura 7.4. Emissão em um entorno urbano – Configuração IV.....	124

Figura 7.5. Perfis de concentração K e $I_c$ , condição A, configuração I, para $x/H = 0,33, 0,66, 1,00$ .	128
Figura 7.6. Perfis de concentração K e $I_c$ , condição A, configuração I, para $x/H = 2,00, 3,00, 3,80$ .	128
Figura 7.7. Perfis de concentração K e $I_c$ , condição B, configuração I, para $x/H = 0,60, 1,20, 1,80$ .	129
Figura 7.8. Perfis laterais de concentração K e $I_c$ , Configuração I, condição A, ( $x/H = 0,33$ ) e condição B, ( $x/H = 0,60$ ).	129
Figura 7.9. Perfis de concentração K e $I_c$ , Configuração II, (a) Condição A, (b) Condição B.	130
Figura 7.10. Perfis de concentração K e $I_c$ , Configuração III, condições A ( $x/H = 0,540a, x/H = 0,540b, x/H = 1,080a$ ) e B ( $x/H = 0,540c, d$ ).	130
Figura 7.11. Perfis de concentração K e $I_c$ , Configuração IV e condição B.	131
Figura 7.12. Perfis de concentração K e $I_c$ , Configuração I, condições A (a), C (b), D (c), E (d) e F (e).	131
Figura 7.13. Perfis de concentração K e $I_c$ , Configuração I, condições A ( $x/H = 2,00a$ ), B e H ( $x/H = 1,80b$ e c).	132
Figura 7.14. Perfis de concentração K e $I_c$ , Configuração I, condições B, G, e H ( $x/H = 0,60$ ).	132
Figura 7.15. Perfis de concentração K e $I_c$ , configurações I, II, III e IV, condição B.	133
Figura 7.16. Perfil gaussiano e valores experimentais de concentração média, condição A, configuração I, para $x/H = 0,33, 0,66, 1,00$ .	134
Figura 7.17. Perfil gaussiano e valores experimentais de concentração média, condição A, configuração I, para $x/H = 2,00, 3,00, 3,80$ .	134
Figura 7.18. Perfil gaussiano e valores experimentais de concentração média, condição B, configuração I, para $x/H = 0,60, 1,20, 1,80$ .	135
Figura 7.19. Comparação dos valores experimentais da dispersão vertical da pluma na configuração I com as expressões de Briggs para estabilidade atmosférica D [Zanetti, 1990].	137
Figura 7.20. Comparação dos valores experimentais da dispersão vertical da pluma na configuração I com as expressões de Briggs para estabilidade atmosférica E [Zanetti, 1990].	137
Figura 7.21. Elevação vertical da pluma avaliada a partir dos valores experimentais, condições A e B, e configuração I.	138
Figura 7.22. Valores experimentais da diluição e curvas de diluição mínima.	139
Figura 8.1. Amostra das flutuações de concentração – posição $x/H = 0,33, z/H = 1,26$ (extremo superior da pluma), configuração I e condição A.	146
Figura 8.2. Amostra das flutuações de concentração – posição $x/H = 0,66, z/H = 1,26$ , configuração I e condição A.	146
Figura 8.3. Amostra das flutuações de concentração – posição $x/H = 0,33, z/H = 1,12$ (centro da pluma), configuração I e condição A.	147
Figura 8.4. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição $x/H = 0,33$ , configuração I e condição A.	151
Figura 8.5. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição $x/H = 0,66$ , configuração I e condição A.	151
Figura 8.6. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição $x/H = 2,00$ , configuração I e condição A.	152
Figura 8.7. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição $x/H = 3,80$ , configuração I e condição A.	152

Figura 8.8. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição $x/H = 0,33$ , configuração I e condição C.....	153
Figura 8.9. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição $x/H = 0,33$ , configuração I e condição D.....	153
Figura 8.10. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição $x/H = 0,33$ , $z/H = 1,12$ , configuração I e condição A.....	154
Figura 8.11. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição $x/H = 0,60$ , configuração I e condição B.....	154
Figura 8.12. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição $x/H = 1,20$ , configuração I e condição B.....	155
Figura 8.13. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição $x/H = 1,80$ , configuração I e condição B.....	155
Figura 8.14. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição $x/H = 0,60$ , configuração I e condição G.....	156
Figura 8.15. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição $x/H = 0,60$ , configuração I e condição H.....	156
Figura 8.16. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição $x/H = 1,80$ , configuração I e condição H.....	157
Figura 8.17. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição $x/H = 0,315$ , configuração II e condição A.....	158
Figura 8.18. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição $x/H = 0,630$ , configuração II e condição A.....	159
Figura 8.19. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição $x/H = 0,315$ , configuração II e condição B.....	159
Figura 8.20. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição $x/H = 0,630$ , configuração II e condição B.....	160
Figura 8.21. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição $x/H = 1,260$ , configuração II e condição B.....	160
Figura 8.22. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição $x/H = 0,540$ , configuração III e condição A.....	162
Figura 8.23. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição $x/H = 0,540$ , configuração III modificada e condição A.....	162
Figura 8.24. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição $x/H = 1,080$ , configuração III e condição A.....	163
Figura 8.25. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição $x/H = 0,540$ , configuração III e condição B.....	163
Figura 8.26. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição $x/H = 0,470$ , configuração IV e condição B.....	164
Figura 8.27. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição $x/H = 0,950$ , configuração IV e condição B.....	165
Figura 8.28. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição $x/H = 1,430$ , configuração IV e condição B.....	165
Figura 8.29. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição $x/H = 0,630$ , configuração II e condição B com registros diferentes (frequência aquisição e duração da amostra segundo Cheung & Melbourne, 2000).....	166
Figura 8.30. Funções de densidade espectral na posição $x/H = 0,66$ , configuração I e condição A.....	169
Figura 8.31. Funções de densidade espectral na posição $x/H = 3,80$ , configuração I e condição A.....	169

---

Figura 8.32. Funções de densidade espectral na posição $x/H = 1,80$ , configuração I e condição B.....	170
Figura 8.33. Funções de densidade espectral na posição $x/H = 0,60$ , configuração I e condição H.....	170
Figura 8.34. Funções de densidade espectral na posição $x/H = 0,630$ , configuração II e condição B.....	172
Figura 8.35. Funções de densidade espectral na posição $x/H = 0,540$ , configuração III e condição A.....	172
Figura 8.36. Funções de densidade espectral na posição $x/H = 1,430$ , configuração IV e condição B.....	173
Figura 8.37. Comparação das funções de densidade espectral obtidas com duas amostras diferentes na posição $x/H = 0,630$ , $z/H = 1,00$ , configuração II e condição B.....	173

---

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Regimes de estabilidade. ....	17
Tabela 2.2. Valores de $c_{as}$ , $z_g$ e $\alpha$ sugeridos por Davenport. ....	28
Tabela 2.3. Categorias de estabilidade. ....	40
Tabela 5.1. Características da digitalização das amostras para o espectro estendido. ...	85
Tabela 5.2. Características da amostragem e dos espectros. ....	86
Tabela 5.3. Características da amostragem e dos espectros na simulação total $\alpha = 0,23$ . .....	89
Tabela 5.4. Valores do número de Reynolds de rugosidade. ....	95
Tabela 5.5. Características das séries na camada limite atmosférica. ....	97
Tabela 5.6. Resultados dos experimentos.....	104
Tabela 6.1. Características da amostragem e dos espectros. ....	113
Tabela 6.2. Características da amostragem e dos espectros. ....	117
Tabela 7.1. Condições e características da pluma. ....	122
Tabela 8.1. Características que definem os espectros. ....	167

---

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras Romanas:

$A_e$	seção efetiva do orifício
$B_c$	constante de calibração
$B_e$	largura de banda de frequências
$C$	concentração
$c$	flutuação de concentração
$C_l$	constante do espectro de Kolmogorov
$C_{DM}$	coeficiente de difusão molecular
$C_k$	constante de Kolmogorov
$C_L$	constante da função estrutura Lagrangeana
$C_{xx}(\tau)$	função do coeficiente de auto-correlação
$C_{xy}(\tau)$	função do coeficiente de correlação cruzada
$D$	diâmetro
$D_n$	diluição
$D_{min}$	diluição mínima
$D_{II}$	função estrutura de 2ª ordem
$D_{III}$	função estrutura de 3ª ordem
$E$	tensão elétrica
$e$	flutuações de tensão
$E_0$	tensão a velocidade zero
$Fr$	número de Froude

---

$Fr_d$	número de Froude densimétrico
$f$	freqüência
$f_{aq}$	freqüência de aquisição
$f_{Nq}$	freqüência de corte
$g$	aceleração da gravidade
$H$	altura emissão
$H_e$	altura modelo (edificação)
$I_u$	intensidade local de turbulência da componente longitudinal
$I_i$	intensidade local de turbulência - $i$ indica as 3 componentes $u, v, w$
$I_g$	intensidade local de turbulência normalizada [ $\sigma_i / U_g$ ]
$I_{u^*}$	intensidade local de turbulência normalizada [ $\sigma_i / u^*$ ]
$K$	coeficiente de concentração
$k$	constante de Von Kármán
$k_l$	número de onda
$k_l^+$	número de onda adimensional
$k_T$	coeficiente de difusão turbulenta
$L_{MO}$	comprimento de Monin-Obukov
$L_u$	escala integral de comprimento
$M$	relação de quantidade de movimento
$P$	probabilidade acumulada
$p$	pressão
$P_{xy}$	parte real da função espectral cruzada $S_{xy}$
$Q$	probabilidade acumulada expressa como $Q = 1-P$

---

$Q_0$	vazão de emissão
$Q_m$	vazão mássica
$Q_o$	fluxo de calor na superfície
$Q_{xy}$	parte imaginária da função espectral cruzada $S_{xy}$
$R$	radio
$Re$	número de Reynolds
$Re_H$	número de Reynolds característico da edificação
$Ri$	número de Richardson
$Ro$	número de Rossby
$Re_z$	número de Reynolds da rugosidade
$R_\lambda$	número de Reynolds da microescala de Taylor
$R_{xx}(\tau)$	função de autocorrelação
$R_{xy}(\tau)$	função de correlação cruzada
$S_F$	fator de escala da simulação da camada limite
$S_{xx}$	espectro de potência
$S_{xy}$	espectro cruzado
$S_{xx}(k_l)$	espectro do número de onda
$t$	tempo
$T$	temperatura
$T_u$	escala integral de tempo
$u$	componente longitudinal das flutuações de velocidade
$u^*$	velocidade de cisalhamento
$u^+$	velocidade adimensional

---

$u_g^+$	velocidade adimensional [ $U/U(z_g)$ ]
$U$	velocidade media do escoamento
$v$	componente lateral das flutuações de velocidade
$w$	componente vertical das flutuações de velocidade
$w_0$	velocidade emissão
$x$	coordenada na direção do escoamento
$x(t)$	função temporal
$Y_u$	freqüência adimensional
$y$	coordenada na direção transversal ao escoamento
$y(t)$	função temporal
$z$	coordenada na direção vertical
$z_0$	altura de rugosidade
$z_d$	deslocamento do plano zero
$z_g$	altura gradiente
$z_g^+$	altura adimensional

**Letras Gregas:**

$\alpha$	expoente da lei potencial
$\beta_T$	constante
$\Delta z$	elevação da pluma
$\varepsilon$	dissipação
$\gamma$	constante do gás
$\gamma_{xy}(f)$	função de coerência
$\gamma_i$	fator de intermitência

---

$\eta$	microescala de Kolmogorov
$\lambda$	microescala de Taylor
$\lambda_L$	escala geométrica
$\lambda_T$	escala de tempo
$\lambda_v$	escala de velocidade
$\rho$	massa específica
$\sigma_c$	desvio padrão das flutuações de concentração
$\sigma_u$	desvio padrão das flutuações de velocidade
$\sigma_i$	desvio padrão das flutuações de velocidade - $i = u, v, w$
$\sigma_y$	dispersão na direção lateral
$\sigma_z$	dispersão na direção vertical
$\tau$	tempo de retardo
$\tau_0$	tensão de cisalhamento
$\nu$	viscosidade cinemática
$\psi$	gradiente térmico vertical real
$\psi_a$	gradiente térmico adiabático

---

## RESUMO

WITTWER, A. R. – **Simulação do vento atmosférico e dos processos de dispersão de poluentes em túnel de vento**. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2006.

O estudo experimental dos processos de dispersão atmosférica de poluentes permite a análise de problemas específicos e a avaliação dos modelos teórico-numéricos. Os custos da experimentação de campo conduzem à realização de estudos de laboratório em modelos reduzidos. Este trabalho tem por objetivo principal a reprodução dos ventos atmosféricos e dos processos de dispersão em escala reduzida em túnel de vento. Foram estabelecidos os requerimentos gerais de modelagem para os diversos problemas relacionados com o estudo experimental da dispersão de poluentes atmosféricos, incluindo a simulação da camada limite atmosférica e da fonte de emissão.

A partir desta análise, foram desenvolvidos e avaliados diversos modelos experimentais dos ventos turbulentos na camada limite atmosférica neutral utilizando velocidades médias muito baixas que permitam cumprir os requerimentos de semelhança do processo de dispersão. As simulações incluem ventos turbulentos sobre terrenos homogêneos a diferentes escalas. Na avaliação experimental foram utilizados dados da literatura e comparações diretas com resultados de campo para a condição de atmosfera em estabilidade neutra. Foram estudados escoamentos turbulentos mais complexos nas proximidades de um modelo simples de uma edificação e em um entorno urbano não homogêneo.

Para os estudos da difusão atmosférica, foi estabelecida a prioridade da modelagem de problemas locais de dispersão. Foi modelada uma fonte de emissão pontual de baixa altura representativa de uma chaminé que permita a modificação das condições de empuxo da pluma. A análise do processo de dispersão e das concentrações foi realizada considerando diversas configurações que incluem a fonte de emissão isolada num escoamento homogêneo, a consideração dos efeitos da esteira próxima ao modelo de uma edificação, e finalmente de um terreno urbano não homogêneo.

Foram determinadas as concentrações médias e as flutuações de concentração na pluma. Estes resultados permitiram obter os campos de concentração e, a partir das funções de densidade de probabilidade e funções de densidade espectral, analisar as zonas de intermitência no campo de concentração. Comparações com resultados da literatura e com modelos teóricos complementam o estudo realizado. É dada ênfase na análise das

flutuações de concentração e na intermitência dos processos de dispersão, dada a importância do seu conhecimento para o desenvolvimento de modelos bem como à escassa informação experimental na bibliografia.

Os resultados deste trabalho permitem estabelecer a viabilidade da simulação da camada atmosférica neutral e dos estudos de dispersão em túnel de vento, determinando vantagens e limitações dos modelos reduzidos. A influência das características do escoamento turbulento, das configurações próximas do terreno e das características da emissão no processo de dispersão foi estudada. Finalmente, são analisadas as condições de intermitência associadas aos escoamentos turbulentos e, em particular, aos campos de concentração próximos a uma fonte de emissão.

Palavras-chave: dispersão de poluentes; vento atmosférico; túnel de vento.

---

## ABSTRACT

WITTWER, A. R. – **Wind tunnel simulation of the atmospheric boundary layer and of the pollutant dispersion processes.** Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2006.

The experimental study of the pollutant dispersion processes allows the analysis of specific problems as well as the evaluation of theoretical models. The costs related to full scale measurements make the experimental studies over reduced scaled models a better research tool. This work has the aim of modeling some kinds of atmospheric winds and related dispersion processes in wind tunnels. The general modeling laws related to the experimental study of pollutants dispersion were followed, including the boundary layer simulation and the emission source.

Several experimental models of the turbulent winds in neutral boundary layers were developed and evaluated by using very low wind velocities, allowing the fulfillment of the similitude laws of the dispersion process. The simulations include turbulent winds over homogeneous terrains at different scales. Literature data were used in the experimental evaluation as well as direct comparisons with field results for the atmosphere under neutral stability conditions. Also, more complex turbulent flows were studied in the close proximities of a simple building model in a non homogeneous surrounding.

For the atmospheric diffusion studies, it was decided to model local dispersion situations. A single, punctual type of emission source was modeled, representing the conditions at a low height chimney and allowing the modification of the plume buoyancy conditions. The analysis of the dispersion process and concentrations was performed under several configurations including the isolated source emission in a homogeneous flow, the consideration of the wake effects close to a building model, and finally of a non homogeneous urban terrain.

The mean and fluctuating components of the plume concentration were obtained. These results allowed the characterization of the concentration fields. From the probability and spectral density functions it was possible to analyze the intermittence of the concentration field. Comparisons with literature results and with theoretical models complement the study. Special care is taken in the analysis of the fluctuations of the concentration and in the intermittence of the dispersion processes, due to its importance

to the development of theoretical models as well as the lack of experimental information in the open literature.

Key-words: pollutant dispersion; atmospheric boundary layer; wind tunnel.

## 1 Introdução

### 1.1 Motivação do problema

Os poluentes atmosféricos têm efeitos sobre os materiais, a vegetação e a saúde humana. No que diz respeito à saúde pública, é importante considerar a poluição do ar nos níveis de micro, meso e macro-escala. A contaminação de ambientes interiores depende dos materiais usados na construção e do projeto da ventilação. Os fenômenos que se produzem em nível de meso-escala, geralmente estão associados a zonas urbanas ou industriais nas quais o ambiente exterior é contaminado por emissões de indústrias e de automóveis. Finalmente, o transporte de gases e sólidos poluentes do ar a grandes distâncias e o impacto global (chuva ácida, poluição do ozônio, etc.) estão associados aos níveis de macro-escala.

Entre os principais poluentes do ar estão o monóxido de carbono, os poluentes tóxicos do ar (HAP's – Hazardous air pollutants), o chumbo atmosférico, o dióxido de nitrogênio, os oxidantes fotoquímicos, os óxidos de enxofre e as partículas. O monóxido de carbono é produzido pela oxidação incompleta do carbono e provém de fontes antropogênicas (motores de veículos, combustíveis queimados e processos industriais). As fontes que produzem poluentes perigosos são os processos de combustão, o processamento de metais, a produção e refinamento de petróleo e gás natural, a produção de agroquímicos, etc. A emissão de óxidos de enxofre como poluente primário provém de usinas de força, indústrias e vulcões. Os óxidos de nitrogênio provém principalmente de processos de combustão, e os oxidantes fotoquímicos, chamados poluentes secundários, são produto de reações atmosféricas.

O estudo da dispersão e dos níveis de concentração dos poluentes descarregados na atmosfera tornou-se fundamental a partir das exigências relacionadas com a poluição atmosférica e os controles estabelecidos por diversos organismos. O processo de difusão e transporte depende das condições meteorológicas da camada limite atmosférica e é controlado pelas flutuações de velocidade e direção do vento. A estabilidade atmosférica, a topografia da zona e a rugosidade superficial do terreno têm muita

---

influência sobre a extensão necessária para que as emissões sejam diluídas pelo vento. Todos estes fatores devem ser considerados ao realizar-se um estudo de dispersão.

Na atualidade estão sendo desenvolvidos numerosos trabalhos computacionais relacionados com os fenômenos de dispersão. Geralmente, esses estudos precisam ser validados com resultados experimentais. Neste contexto, o túnel de vento de camada limite se torna uma ferramenta importante, porém, torna-se necessária a avaliação da factibilidade da reprodução das características da camada limite atmosférica e dos processos de dispersão. Os estudos deste tipo, além de permitirem a validação dos modelos numéricos, servem para analisar problemas específicos de dispersão de poluentes atmosféricos.

Até hoje, não foram publicados estudos experimentais de dispersão atmosférica realizados na América do Sul utilizando modelos em escala reduzida, não obstante as grandes concentrações urbanas e os problemas de contaminação atmosférica que são registrados. Desenvolver uma ferramenta que permita a avaliação destes problemas seria uma grande contribuição para a realização de estudos visando o melhoramento das condições ambientais em toda a região.

## 1.2 Revisão Bibliográfica

Os primeiros estudos que tiveram a intenção de avaliar a emissão de gases mediante a utilização de um túnel de vento, foram realizados por Sherlok & Skalter em 1934 [Lord & Leutheusser, 1970]. Na década de '60, os experimentos de Pratte & Baines [1967] permitiram conhecer o comportamento de jatos orientados na direção normal a um escoamento de ar estacionário. Os resultados obtidos foram complementados pelos que obtiveram Kamotani & Greber [1972]. Simultaneamente, realizavam-se ensaios qualitativos em túneis de vento que, mediante técnicas de visualização, permitiram estabelecer alturas mínimas para chaminés situadas sobre o topo de edificações [Lord & Leutheusser, 1966]. Tempos depois, realizavam-se os primeiros estudos quantitativos que relatavam valores da distribuição das concentrações no nível do solo [Leutheusser & Motycka, 1978].

---

Com a construção e colocação em funcionamento dos túneis de camada limite, começaram a simularem-se fisicamente as características do vento atmosférico, e todos os estudos de problemas que se desenvolvem na atmosfera começaram a realizar-se a partir da simulação prévia dos ventos da camada limite atmosférica (CLA). Os requerimentos gerais de semelhança para reproduzir CLA's em túneis de vento são a semelhança geométrica, cinemática, dinâmica, térmica e das condições de contorno. Em termos de parâmetros adimensionais, além da semelhança geométrica e das condições de contorno, é necessário manter a igualdade dos números de Reynolds, Richardson, Rossby e Prandtl [Cermak, 1971].

Nos túneis de vento, o fluido utilizado para a simulação da CLA é o ar, pelo que o número de Prandtl é automaticamente o mesmo no modelo e protótipo. Por outro lado, em túneis comuns não é possível considerar a igualdade do número de Rossby, pelo que as aplicações estão restringidas às condições de escoamento nas quais os efeitos de rotação terrestre são desprezáveis. O mesmo ocorre com o número de Reynolds que normalmente é muito inferior no túnel de vento, pelo que a condição de igualdade é relaxada, e o que se procura simplesmente é atingir valores suficientemente altos para obter a semelhança aerodinâmica do fenômeno. O número de Richardson, que descreve a relação entre a turbulência de origem térmica e mecânica [Ruscheweyh & Fischer, 1979], estabelece a diferença entre as camadas limites estratificadas termicamente e as neutras. Alguns autores determinam a estabilidade de escoamentos estratificados utilizando o número de Froude densimétrico.

Counihan [1969] y Standen [1972], empregando os métodos de rugosidade, barreira e dispositivos de mescla desenvolveram técnicas de simulação particularmente apropriadas para reproduzir camadas limites em condições de estabilidade neutra. As técnicas permitem obter representações das camadas limites que se produzem sobre terrenos rurais e urbanos. Particularmente, a técnica de Standen permite a simulação de camadas limites atmosféricas de espessura total e parcial, o que permite mudar as escalas de modelo para os ensaios.

Estes modelos físicos de vento em condições de estabilidade neutra têm bom comportamento nas velocidades máximas normalmente usadas em túneis de vento para estudos de cargas aerodinâmicas. Os ensaios de dispersão atmosférica devem realizar-se a velocidades mais reduzidas, e é normal que se produzam flutuações exageradas na

---

região de baixas frequências do espectro de turbulência. Essas flutuações não reproduzem as características do vento atmosférico [Isymov & Tanaka, 1979]. Por este motivo é necessário fazer uma avaliação mais exaustiva do desempenho do túnel de vento antes de realizar estudos de difusão [Meroney & Neff, 1979].

A maioria dos estudos em túneis de vento se realiza utilizando simulações da camada limite atmosférica em condições de estabilidade neutra, não obstante isto, em alguns casos deve ser considerada a estratificação atmosférica. O inconveniente da modelagem da estratificação é o requerimento de um grande investimento de tempo e equipamento para seu desenvolvimento. Uma forma relativamente simples de considerar condições de escoamento não-neutras é proposta por Janssen [1979] modificando a disposição e os elementos de rugosidade de uma simulação de características neutras. Isto permite obter condições que produzem a “impressão” de condições mais estáveis e instáveis respectivamente.

Hunt & Snyder [1980] desenvolveram simulações de CLA em condição estável utilizando o canal de água da Environment Protection Agency (E.P.A.) com estratificação da densidade. Este tipo de estudo permite conhecer a estrutura do escoamento sobre algumas topografias para atmosfera estável. Hertig [1984], no túnel de vento do I.E.N.E.R. (Laussane, Suíça), prevê modelar escoamentos estratificados incluindo condições de inversão térmica, mediante a utilização adicional de um gerador de escoamento multi-camada.

Uma outra forma de reproduzir escoamentos de camada limite estratificada é a proposta por Cermak & Takeda [1985] utilizando o túnel de vento da Universidade de Colorado (E.E.U.U.). A temperatura do ar ambiente pode ser modificada desde 5° até 95°C, de forma que o número de Richardson na parte mais baixa (10 % da camada limite termicamente estratificada) pode ajustar-se no intervalo de +1 (estável) até -1 (instável), com velocidade de vento de 0,5 m/s.

Alguns estudos propõem a simulação da camada limite superficial que se desenvolve em os 100 m inferiores da CLA. Nos trabalhos de Cermak & Cochran [1992], Cermak [1995] e Cermak et al. [1995], são estabelecidas novas pautas para simular a camada superficial incluindo novos elementos de acondicionamento do

---

escoamento. Estes permitem reproduzir melhor os fenômenos que se desenvolvem na região inferior da CLA.

Entre os últimos projetos de túneis de vento destaca-se o túnel não-convencional da Universidade de Hamburgo [Schatzmann et al., 1995], baseado na idéia de Hertig, com aquecimento por camadas individuais, o que permite reproduzir escoamentos com estratificação neutra, estável e inversões elevadas. Outro tipo de túnel, com ventiladores múltiplos controlados por meio de um computador, foi construído em Japão [Nishi & Miyagi, 1995]. Para simular a estrutura de vento atmosférico, cada ventilador é controlado individualmente e, através das medições com anemômetro de fio quente e a comparação com os espectros atmosféricos, é possível obter as características do escoamento requeridas.

Para reproduzir fenômenos de difusão, além dos requerimentos de simulação da CLA, são estabelecidas condições de semelhança para a modelagem do comportamento da pluma de emissão. Estes requerimentos, de acordo com Isyumov & Tanaka [1980], podem ser resumidos da seguinte forma: semelhança geométrica da fonte, igualdade do número de Froude, igualdade da relação de densidade, igualdade da relação entre velocidades e igualdade do número de Reynolds da fonte.

As dificuldades práticas que surgem da simulação exata do processo de emissão têm conduzido à utilização de simulações aproximadas. Cermak & Takeda [1985] propõem, além da semelhança geométrica, a igualdade da relação entre a velocidade de emissão e a velocidade local de vento, e a igualdade do número de Froude densimétrico. Os critérios de semelhança podem ser modificados de acordo com a zona que se pretende modelar, seja esta a região mais próxima à fonte, na qual a própria estrutura da chaminé e a descarga provocam modificações no campo de escoamento, ou a zona mais afastada, onde estes efeitos praticamente não são percebidos.

Os gases utilizados como traçador dependem do tipo de pluma que se pretende simular e determinam que instrumento deva ser utilizado para medir a concentração. Para plumas flutuantes e neutras, é muito corrente o uso de hélio puro [Meroney, 1979] ou misturas de ar-hélio [Isyumov & Ferraro, 1982]. Para emissões de gases mais pesados que o ar, que geram plumas com empuxo negativo, Donat & Schatzmann [1999]

---

utilizaram uma mistura de SF<sub>6</sub>, CO<sub>2</sub> e C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>. É muito freqüente utilizar misturas de gases que incluem um hidrocarboneto como gás traçador, devido a seu baixo custo.

A medição da concentração se realiza com diversos instrumentos que dependem do gás emitido. As técnicas de análise química incluem o uso de detetores de ionização de chama (FID) e cromatógrafos de gás [Crooks & Isymov, 1990]. A utilização de sondas aspirantes e anemômetro de fio quente [Harion et al., 1995] permite medir flutuações de concentração para a análise de valores pico e intermitência das concentrações.

Os problemas de dispersão, para sua análise e modelagem em túnel de vento, normalmente são separados em problemas locais e problemas em nível de meso-escala. Os fenômenos locais incluem a poluição em zonas próximas a edificações, a difusão no campo próximo a uma chaminé, a contaminação do ar em canhões urbanos e a ventilação de edifícios. Os problemas de meso-escala estão referidos a terrenos complexos, efeito de ilha de calor sobre cidades e planejamento urbano. Uma classificação que inclui quatro regiões de aplicação de diferentes técnicas de modelagem para estudos de difusão é fornecida por Plate [1999]. Essas zonas do campo de difusão são; a região inicial, a região do campo próximo, a região do campo afastado, e uma quarta região influenciada pelos processos meteorológicos de meso-escala e as forças de Coriolis.

O campo de concentração produzido por uma emissão próxima ao nível do solo na vizinhança de edificações, geralmente difere do campo previsto pela formulação convencional de difusão [Meroney, 1982]. Neste sentido, os trabalhos de Li & Meroney [1983] analisam a dispersão de gás na zona próxima a um modelo cúbico. Fackrell [1984], Hunt & Castro [1984] e Isaacson & Sandri [1990], através de suas medições, determinaram parâmetros característicos da dispersão na esteira próxima a edificações. O comprimento da região de recirculação e o tempo de residência são parâmetros que dependem do escoamento na esteira e servem para estimar concentrações na esteira próxima. A aplicabilidade de técnicas de análise de imagens de vídeo para avaliar este tipo de problemas por meio da dispersão de fumaça, foi mostrada nos trabalhos de Huber [1988].

---

As características da região mais próxima a uma chaminé não estão determinadas unicamente pela sua própria configuração, mas também pela turbulência do vento atmosférico. A turbulência externa provoca um significativo aumento na extensão da esteira. Não obstante, quando se necessita reproduzir unicamente a difusão na zona mais próxima, é mais importante modelar corretamente as construções e as características da vizinhança à fonte de emissão.

O estudo da dispersão de gases de escape de automóveis em canhões urbanos é feito para avaliar como a geometria da rua afeta o processo de difusão. Normalmente, as emissões de gases de escape para modelagem em túnel de vento são simuladas por meio de fontes em linha [Meroney et al., 1996]. Modelos físicos 2-D permitiram determinar a influência das características do escoamento incidente e da arquitetura a barlavento do canhão urbano [Gerdes & Olivari, 1999, Kastner-Klein & Plate, 1999].

Os problemas ambientais que incluem terrenos complexos ou áreas urbanas requerem a modelagem de uma área razoavelmente grande na qual devem ser realizadas medições de pequena escala. Dificilmente, as construções elevadas, chaminés ou torres de resfriamento estão localizadas em terrenos que satisfazem as condições dos perfis ideais de velocidade média que podem ser utilizados diretamente para a modelagem. Frequentemente, é necessário realizar modelos em escala menor para ajustar as características do escoamento às condições locais, tanto no caso de terreno complexo quanto no caso de zonas modificadas por obstruções e edificações existentes.

Nas cidades, é freqüente o efeito de ilha de calor, ou seja, o escoamento de ar se produz sobre um terreno em que a temperatura varia localmente ou onde existem fontes de calor localizadas. Este efeito influi diretamente na estrutura térmica do escoamento. Utilizando modelos que são aquecidos, é possível avaliar a influência da transferência de calor ao ar ambiente pelo efeito da flutuação no campo de escoamento [Ruck, 1993].

Alem disto, é interessante considerar a contraposição entre a contaminação do ar e o conforto de pedestres. Os problemas de acumulação de contaminantes pela escassa dispersão são muito altos nas áreas protegidas do vento, nas quais existem boas condições de conforto no que diz respeito ao vento. Neste sentido, os trabalhos de Gerhardt & Kramer [1991, 1992], realizados com o modelo de uma zona urbana em

---

escala 1:350, permitiram analisar a dispersão e o conforto, definir parâmetros característicos, e estabelecer comparações.

Finalmente, é importante deixar estabelecida a relevância de analisar não somente as concentrações médias, mas também as flutuações de concentração. As técnicas experimentais de amostragem condicionada são usadas, há bastante tempo, para a análise da intermitência nos escoamentos turbulentos [Libby, 1975]. Quando se produz intermitência, existem grandes rajadas e muito mais valores próximos a zero que aqueles esperados nos processos Gaussianos [Jenssen & Busch, 1982]. A intermitência nos processos de dispersão turbulenta pode dar lugar a circunstâncias nas quais os valores extremos são mais críticos que os valores médios. As medições de flutuações de concentração realizadas por Li & Meroney [1983], na esteira de um modelo cúbico, permitiram determinar valores de pico e intensidades de turbulência de concentração, que foram comparados com as concentrações médias. Em estudos mais recentes realizados por Pavageau & Schatzmann [1999] e Cheng & Melbourne [2000], a partir da medição das flutuações de concentração, foram determinadas as correspondentes funções de densidade de probabilidade, funções de auto-correlação, intensidades de turbulência das flutuações de concentração, espectros de energia e outros parâmetros estatísticos.

Em um problema de dispersão atmosférica, as séries temporais do sinal representativo das concentrações que são obtidas no modelo reduzido, apresentam menor intermitência que as obtidas nas correspondentes medições de campo, ainda quando sejam simulados apropriadamente os parâmetros de semelhança. Por isto, as máximas concentrações médias temporais obtidas em ensaios de laboratório, habitualmente superestimam os valores reais [Schatzmann et al., 1997]. Por outro lado, as medições em túnel de vento têm a vantagem de possibilitar a escolha das condições mais apropriadas para analisar um problema específico. Além disto, para determinar a variabilidade inerente ao processo de dispersão, podem ser realizadas numerosas repetições de um mesmo caso.

### 1.3 Objetivos

O objetivo principal do trabalho é o desenvolvimento de modelos físicos das plumas de emissão e dos processos de dispersão atmosférica que reproduzam as situações reais. Serão utilizados modelos em escala reduzida em túnel de vento que permitam a avaliação experimental e a análise de problemas locais de dispersão a partir da medição das concentrações do gás emitido por meio de estudos experimentais em escala reduzida no túnel de vento. Para lograr as condições que permitirão os estudos de dispersão é fundamental a avaliação prévia dos escoamentos que reproduzem a camada limite atmosférica.

Os modelos simplificados e muitas avaliações experimentais indicam perfis gaussianos e simétricos para descrever o campo de concentrações. Entretanto não há disponibilidade de modelos que contemplem situações de edificações próximas à emissão ou escoamentos mais complexos. Além disto, na revisão bibliográfica foi observada escassa quantidade de informação referida às flutuações de concentração, ainda sendo conhecido que existe intermitência no processo de dispersão da pluma. Assim, se estabelecem os seguintes objetivos específicos:

O estudo de situações complexas, especificamente dos casos em que o processo de dispersão é perturbado por uma edificação isolada e por um entorno urbano não homogêneo, visando entender qual é o seu comportamento com relação aos modelos simples.

O desenvolvimento de um estudo mais profundo das flutuações de concentração destacando a análise da intermitência nos processos de dispersão.

Para atingir os objetivos deve ser modelada uma fonte de emissão pontual de baixa altura representativa de uma chaminé, permitindo a modificação das condições da pluma. A análise do processo de dispersão e das concentrações será realizada considerando a fonte de emissão isolada e os efeitos da esteira próxima ao modelo de uma edificação ou de um entorno urbano. As medições das concentrações médias e das flutuações de concentração permitirão determinar o campo de concentrações e caracterizar o processo de dispersão em casos específicos. Através das funções de

densidade de probabilidade será possível analisar as zonas de intermitência no campo de concentração.

Os estudos experimentais permitirão a análise e obtenção de alguns parâmetros característicos dos escoamentos da CLA e do processo de dispersão, importantes na caracterização dos processos e no desenvolvimento de modelos computacionais. As vantagens e limitações do uso de túneis de vento neste tipo de estudo serão analisadas. Finalmente, o conhecimento gerado neste trabalho tem o intuito de contribuir para o desenvolvimento de modelos atualizados para análise de dispersão, contemplando os efeitos da vizinhança e incluindo os efeitos da intermitência no campo de concentração.

## 2 Conceitos fundamentais

### 2.1 A camada limite atmosférica

Na atmosfera, os gases continuamente se expandem, se comprimem e trocam calor. Para referir-se a estes processos, Davis & Cornwell [1998] utilizam o conceito de motor atmosférico. A energia que conduz estes processos provém do sol. As diferenças de ingresso de calor entre o equador e os pólos geram a circulação geral atmosférica, enquanto a rotação terrestre, em combinação com as distintas conduções de calor dos oceanos e a terra, produzem o clima.

Nos mapas climáticos aparecem representadas áreas de alta e baixa pressão, e linhas de pressão constante (isóbaras). O vento circula desde as zonas de alta pressão rumo às de baixa pressão e a direção deveria ser normal às isóbaras. Contudo, a rotação terrestre modifica essa direção pela aparição das forças de Coriolis. O movimento resultante define os sistemas ciclônicos, em torno dos centros de baixa pressão, e os sistemas anticiclônicos, em torno dos centros de alta pressão. A direção de giro que adquire o vento nestes sistemas no hemisfério Norte é oposta à que adquire no hemisfério Sul, e enquanto que, em termos meteorológicos, os anticiclones estão associados ao bom tempo, os ciclones estão associados ao mau tempo.

A camada limite atmosférica é a parte da troposfera que recebe a influência direta da superfície terrestre e responde aos forçantes superficiais, térmicos e mecânicos, com escalas de tempo de uma hora ou menos. Estes forçantes incluem arrasto por fricção, evaporação, transferência de calor, emissão de contaminantes e modificações do escoamento induzidas pelo terreno [Stull, 1998]. Esta definição pode não ser exata no caso de estratificação térmica muito estável, onde o intercâmbio turbulento na camada limite é muito fraco. Nestas condições, a camada limite atmosférica define-se como camada de inversão superficial. Nos termos da Engenharia do vento, a camada limite está determinada pela espessura na qual existe um gradiente vertical de velocidade.

A espessura da camada limite é variável com o tempo e no espaço, mas em geral, é menor do que 1000 m. Sobre os oceanos varia relativamente pouco, já que os grandes processos de mistura reduzem as mudanças de temperatura da superfície do mar. Em geral, a camada limite é mais fina nas zonas de alta pressão. Em regiões de baixa pressão, os deslocamentos de ar desde a superfície para cima chegam a grandes altitudes, o que dificulta a determinação do ponto superior da camada limite. Nestes casos, muito freqüentemente, os estudos atmosféricos finalizam na base das nuvens, pelo que a região analisada pelos meteorologistas é mais fina nas zonas de baixa pressão.

Em condições de atmosfera instável e convectiva, normalmente a camada limite estende-se até a base da inversão mais baixa, que pode ser detectada facilmente através da medição de perfis de temperatura e umidade. A altura da base de inversão, a partir da qual a temperatura potencial aumenta e a umidade relativa diminui rapidamente com a altura, é aproximadamente 10 % da altura da troposfera, ou seja, 1 km (Figura 2.1). A parte inferior da CLA, caracterizada por uma grande variação da velocidade média até aproximadamente 10 % da altura total, denomina-se camada superficial.

A dispersão dos contaminantes descarregados na atmosfera depende das condições meteorológicas que prevalecem na camada limite atmosférica. Num sentido amplo, a dispersão está controlada pelas flutuações de velocidade e direção do vento. A distância de diluição das emissões depende, principalmente, da estabilidade da atmosfera, da configuração topográfica e da rugosidade superficial.

### 2.1.1 Estabilidade atmosférica

A estabilidade é a tendência da atmosfera de inibir ou realçar o movimento vertical, e depende da velocidade do vento e do gradiente térmico em altura. A pressão atmosférica diminui com a altura, e quando uma massa de ar sobe, expande-se desde a pressão  $p_0$  até  $p_1$  e resfria-se desde a temperatura (absoluta)  $T_0$  até  $T_1$ .

Se o movimento da massa de ar é suficientemente rápido, não se produz intercâmbio de calor com o entorno e o processo pode considerar-se adiabático e, portanto, sujeito à equação:

$$\frac{T_1}{T_0} = \left( \frac{p_1}{p_0} \right)^{0.288} \quad (2.1)$$

A pressão pode-se relacionar com a altura  $z$ , e a equação anterior pode ser linearizada ficando da seguinte forma:

$$T_1 = T_0 - \psi_a (z_1 - z_0) \quad (2.2)$$

O coeficiente  $\psi_a$ , chamado gradiente térmico adiabático, está definido pela variação de temperatura que experimenta uma massa de ar que expande-se ou comprime-se adiabaticamente, quando se desloca verticalmente na atmosfera. Seu valor é aproximadamente  $1^\circ\text{C} / 100 \text{ m}$ . Quando o gradiente térmico vertical real  $\psi$  é menor que  $\psi_a$ , a massa de ar que sobe adiabaticamente estará mais fria que seu entorno, será mais pesada e descerá novamente. Quando  $\psi$  é maior que  $\psi_a$ , estará mais quente, será mais leve e tenderá a seguir subindo, provocando convecção. O gradiente térmico vertical é, então, um indicador da condição de estabilidade atmosférica.

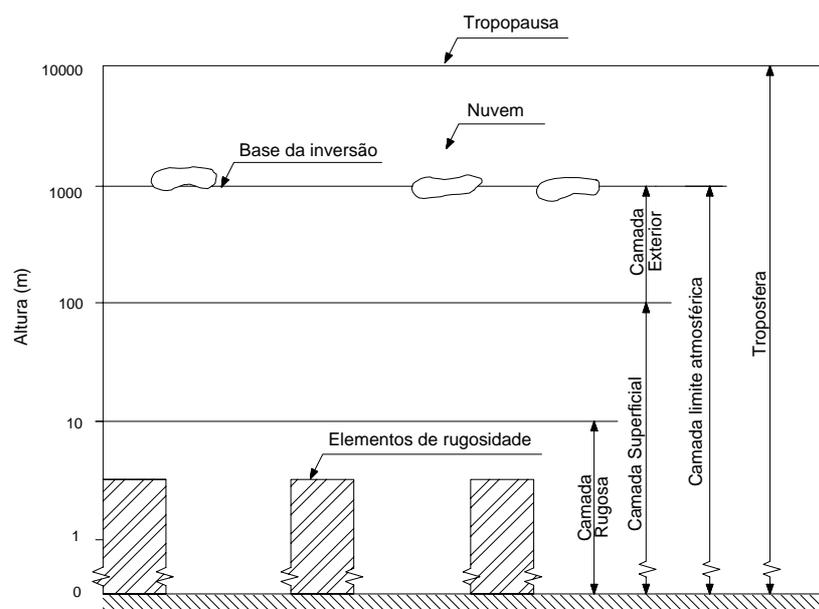


Figura 2.1. Estrutura vertical da baixa atmosfera [Arya, 1982].

A atmosfera é instável quando  $\psi$  é maior que  $\psi_a$  (neste caso  $\psi$  é chamado de gradiente ambiental super-adiabático) e a turbulência incrementa-se pela estrutura térmica da atmosfera. Quando  $\psi$  é menor que  $\psi_a$ , a atmosfera é estável, já que a turbulência é inibida pela estrutura térmica (neste caso  $\psi$  é chamado de gradiente ambiental sub-adiabático). Finalmente, a situação na que  $\psi$  é igual a  $\psi_a$ , determina uma atmosfera em estabilidade neutra. Estas três situações podem-se produzir simultaneamente na atmosfera a distintas alturas (Figura 2.2).

O gradiente ambiental sub-adiabático admite dois casos especiais: quando a temperatura não varia com a altura, o gradiente se diz isotérmico, e quando a temperatura aumenta com a altura, existe um gradiente de inversão. A inversão implica na forma estável mais severa associada a um perfil de temperatura. Geralmente, está relacionada com volumes de ar estancados que podem provocar desastres ou episódios vinculados com a poluição do ar.

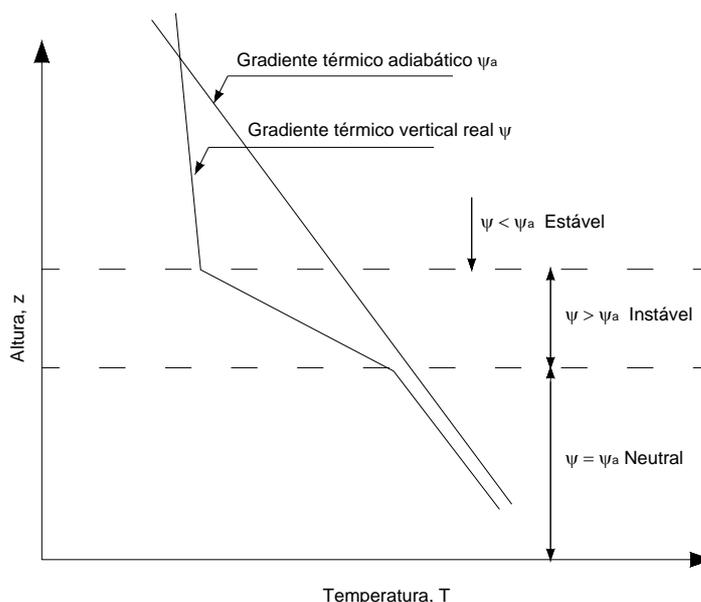


Figura 2.2. Estabilidade Atmosférica [Cook, 1985].

### 2.1.2 Camada superficial

A camada superficial caracteriza-se por uma intensa turbulência de pequena escala gerada pela rugosidade superficial e, no caso de superfícies quentes, também pela

convecção térmica. Esta turbulência de pequena escala produz o intercâmbio de quantidade de movimento, calor e massa com a superfície. A maioria dos estudos da camada superficial omite considerar a parte mais baixa, denominada camada de rugosidade, onde o escoamento médio está afetado pelos elementos individuais de rugosidade e, portanto, não é homogêneo.

A consideração da teoria de semelhança para um escoamento estacionário e horizontalmente homogêneo, no caso mais simples de camada limite em estabilidade neutra, permite obter um perfil de vento logarítmico nas proximidades da superfície, que se expressa como:

$$\frac{\bar{U}(z)}{u^*} = \frac{1}{k} \ln \frac{z}{z_0} \quad (2.3)$$

Esta expressão, cuja validade confirma-se por medições até uns centos de metros de altura [Blessmann, 1995] é conhecida como lei de Prandtl. A velocidade média  $\bar{U}$  à altura  $z$  adimensionaliza-se com a velocidade de fricção  $u^*$ , definida como:

$$u^* = \sqrt{\tau_w / \rho} \quad (2.4)$$

sendo  $\tau_w$  a tensão de cisalhamento na parede. O parâmetro  $z_0$  está diretamente ligado à altura média dos obstáculos que constituem a rugosidade da superfície terrestre e, normalmente determina-se ajustando o perfil de velocidades medido ao teórico.  $k$  é a constante de von Kármán.

Em terrenos muito rugosos, a origem do perfil logarítmico teórico, não coincide com o nível do terreno. Nestes casos, a lei logarítmica fica expressa por

$$\frac{\bar{U}(z)}{u^*} = \frac{1}{k} \ln \frac{z - z_d}{z_0} \quad (2.5)$$

onde o parâmetro  $z_d$ , denominado comprimento de deslocamento, produz um deslocamento do plano de referência.

Além da existência destas leis universais, uma simples lei de potencia tem boa concordância com os dados experimentais que determinam o perfil vertical da velocidade. Fixa-se uma altura de referência, que pode ser a altura gradiente (ou altura

da camada limite),  $z_g$ , ou a altura a 10 m, e as expressões matemáticas para a lei potencial, respectivamente são:

$$\bar{U}(z) / \bar{U}(z_g) = (z / z_g)^\alpha \quad (2.6)$$

$$\bar{U}(z) / \bar{U}(10) = (z / 10)^\alpha \quad (2.7)$$

sendo  $\bar{U}(z)$ ,  $\bar{U}(10)$  e  $\bar{U}(z_g)$ , as velocidades médias correspondentes às alturas  $z$ , 10 m e altura gradiente, respectivamente. O expoente  $\alpha$  varia entre 0.16 e 0.40, em função do tipo de terreno e da estabilidade da atmosfera (Figura 2.3).

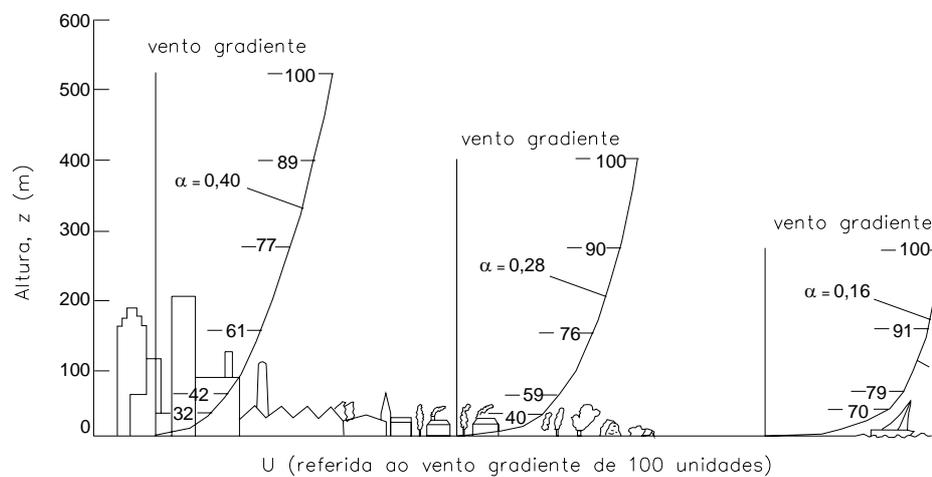


Figura 2.3. Perfil de velocidade média sobre terrenos de diferentes rugosidades [Parker, 1977].

Quando a superfície está quente com relação ao ar e o vento médio é muito suave ou praticamente não existe, os movimentos geram-se termicamente por empuxo vertical ou flutuação. Este tipo de escoamento denomina-se convecção livre e os efeitos de corte não são significativos. Muito poucas vezes se produz a condição de convecção livre na atmosfera.

A teoria mais amplamente usada para a camada superficial estratificada é baseada na hipótese de que o escoamento médio e as características da turbulência dependem somente da altura  $z$ , a velocidade de fricção  $u^*$ , o fluxo de calor na superfície  $Q_o$ , e a variável de empuxo  $g/T_o$ . O parâmetro  $z/L$ , formado como único

grupo adimensional independente, denomina-se parâmetro de estabilidade, sendo  $L_{MO}$  o comprimento de Monin-Obukhov, definido pela expressão:

$$L_{MO} = -\frac{(u^*)^3}{k(g/T_0)Q_\phi} \quad (2.8)$$

onde  $k$  é a constante de von Kármán.

A camada limite superficial, onde predomina a turbulência mecânica, restringe-se a alturas  $z \leq |L_{MO}|$ . Para avaliar a estabilidade atmosférica pode-se utilizar o número de Richardson, que é outro parâmetro adimensional que relaciona os efeitos térmicos e mecânicos [Arya, 1982].

### 2.1.3 Camada exterior

Acima da camada superficial, situa-se a camada exterior (Figura 2.1). Nesta região, a estrutura do escoamento para o caso de uma CLA estacionária e homogênea, depende não somente da altura local e dos fluxos superficiais de quantidade de movimento e calor. Também depende da altura da camada limite  $z_g$ , a magnitude e direção do corte geostrófico (vento térmico) próximo à superfície, e a taxa de “ingresso” na parte superior da CLA. Uma formulação geral de semelhança, que considere todos estes fatores, implica definir um grande número de parâmetros adimensionais. Nesta camada exterior, os regimes de estabilidade podem ser classificados de acordo com o valor do parâmetro de estabilidade  $z_g / L_{MO}$ , da tabela 2.1 [Arya, 1982]:

Tabela 2.1. Regimes de estabilidade.

<i>Regime</i>	<i>Valor de <math>z_g / L_{MO}</math></i>
Regime convectivo	$z_g / L_{MO} \leq -5$
Regime instável	$-5 < z_g / L_{MO} < -0,2$
Regime próximo à estabilidade neutra	$-0,2 \leq z_g / L_{MO} \leq 0,2$
Regime moderadamente estável	$0,2 < z_g / L_{MO} < 2$
Regime estável	$z_g / L_{MO} \geq 2$

---

## 2.2 Conceitos gerais de turbulência

Quando o número de Reynolds característico de um fluido em movimento excede certo valor crítico, o escoamento torna-se turbulento. Esta condição prevalece quase sempre na atmosfera, particularmente na CLA. Não existe uma definição precisa da turbulência, não obstante, há uma série de particularidades que permitem a sua caracterização [Tennekes & Lumley, 1994, Silveira Neto, 2002].

- ❑ **Impredicibilidade:** pode ser considerada como uma alta sensibilidade no comportamento dinâmico de um sistema, governado por equações determinísticas, às condições iniciais que lhe são impostas. Para aplicações de engenharia, informações estatísticas são suficientes na maioria das situações.
- ❑ **Difusividade:** Origina mistura rápida e incremento da transferência de quantidade de movimento, calor e massa.
- ❑ **Altos números de Reynolds:** Quando o número de Reynolds aumenta, os escoamentos laminares instabilizam-se e transicionam a turbulentos.
- ❑ **Tri-dimensionalidade da vorticidade:** A turbulência é rotacional e tri-dimensional. A vorticidade que caracteriza a turbulência não pode manter-se se as flutuações de velocidade forem bi-dimensionais.
- ❑ **Dissipação:** As tensões de corte incrementam a energia interna do fluido à expensa de uma perda de energia cinética da turbulência.
- ❑ **Fenômeno contínuo:** A turbulência é um fenômeno do meio contínuo. A menor escala da turbulência é bastante maior que a escala molecular.
- ❑ **É uma propriedade dos escoamentos:** A turbulência não é uma propriedade do fluido.

É preciso assinalar que dentro da comunidade científica existem dois pontos de vista diferentes a respeito ao estudo da turbulência. O primeiro é “estatístico” e utiliza quantidades médias para modelar o problema. O outro grupo considera a turbulência desde um ponto de vista puramente determinístico, estudando o comportamento de

sistemas dinâmicos ou a estabilidade de escoamentos em distintas situações [Lesieur, 1990].

Quando se estudam escoamentos turbulentos estacionários experimentalmente, primeiramente, aplica-se a decomposição de Reynolds (Figura 2.4), na qual os valores instantâneos de velocidade se expressam como a soma do valor médio e as flutuações respectivas [Möller, 2000], da forma:

$$U_i(t) = \overline{U}_i + u_i(t) \quad (2.9)$$

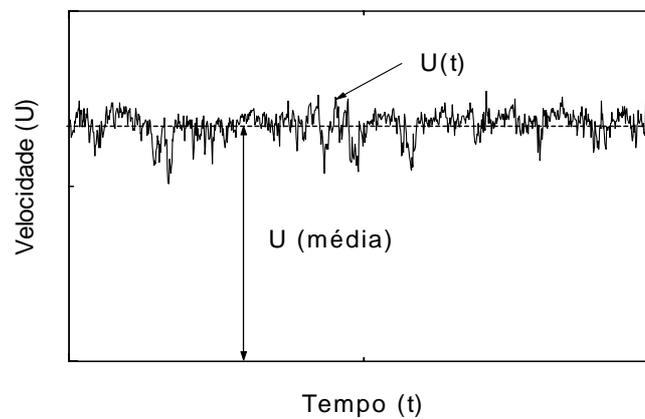


Figura 2.4. Decomposição de Reynolds.

Nesta expressão, o sub-índice  $i$  indica uma direção genérica. É necessário determinar os parâmetros estatísticos velocidade média, variância e desvio padrão das flutuações. Para descrever em forma exata as propriedades da turbulência utiliza-se a distribuição de probabilidade, a intensidade da turbulência, as correlações espaciais, o espectro de potência e os espectros cruzados das flutuações.

### 2.2.1 Intensidade de turbulência

O primeiro parâmetro a considerar para definir a intensidade de turbulência é o primeiro momento ou valor médio temporal da função velocidade, que determina a velocidade média e matematicamente está definido por:

$$\overline{U} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt \quad (2.10)$$

O seguinte parâmetro é a variância (valor quadrático médio) das flutuações de velocidade, pode-se definir matematicamente como:

$$\sigma_u^2 = \overline{u^2(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt \quad (2.11)$$

O desvio padrão, que no caso de flutuações em torno da média, coincide com o valor RMS (raiz média quadrática) é:

$$\sigma_u = \sqrt{\overline{u^2(t)}} \quad (2.12)$$

Devido à tri-dimensionalidade do fenômeno, existem três componentes para o desvio padrão  $\sigma_u$ ,  $\sigma_v$ ,  $\sigma_w$ , onde  $u$ ,  $v$ , e  $w$  indicam as componentes das flutuações nas três direções espaciais  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

A intensidade da turbulência é uma medida adimensional da energia das flutuações de velocidade, e está definida pelo cociente entre o desvio padrão ou valor RMS das flutuações e uma velocidade de referência. Em correspondência com o valor de referência que se utiliza, obtém-se a intensidade local ou a normalizada.

***Intensidade local de turbulência:*** Quando adimensionaliza-se com a velocidade média no ponto da medição.

$$I_i(z) = \sigma_i(z) / \overline{U}(z) \quad (2.13)$$

***Intensidade normalizada de turbulência:*** Quando adimensionaliza-se com a velocidade média à altura gradiente ou com a velocidade de cisalhamento.

$$I_{g_i}(z) = \sigma_i(z) / \overline{U}(z_g) \quad (2.14)$$

$$I_{u^*_i}(z) = \sigma_i(z) / u^* \quad (2.15)$$

Nas equações anteriores, o sub-índice  $i$  indica as três componentes mencionadas anteriormente.

### 2.2.2 Escalas da turbulência

A função de auto-correlação  $R_{xx}(\tau)$ , ou correlação temporal, descreve a relação entre o valor de uma função do tempo  $x(t)$ , num instante  $t$ , e o valor desta função em outro instante  $t+\tau$ . Matematicamente é o produto médio de  $x(t)$  e  $x(t+\tau)$  para um tempo de integração  $T$  apropriado [Bendat & Piersol, 1986].

$$R_{xx}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau)dt \quad (2.16)$$

Normalmente, utiliza-se a função do coeficiente de auto-correlação  $C_{xx}(\tau)$ , que varia entre os valores 1 e  $-1$ . Tem valor zero quando não existe correlação entre  $x(0)$  e  $x(\tau)$ , e tem valor um para  $\tau=0$ .

$$C_{xx}(\tau) = R_{xx}(\tau)/R_{xx}(0) \quad (2.17)$$

No caso de processos aleatórios, o maior valor da função  $C_{xx}(\tau)$  está na origem do retardo ( $\tau=0$ ), e é uma função par (simétrica). A função  $C_{xx}(\tau)$  tende ao valor zero quando  $\tau$  tende ao valor infinito (Figura 2.5).

Da mesma forma, duas funções temporais  $x(t)$  e  $y(t)$ , permitem definir a função de correlação cruzada e a função do coeficiente de correlação cruzada.

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau)dt \quad (2.18)$$

$$C_{xy}(\tau) = R_{xy}(\tau) / \sqrt{R_{xx}(0)R_{yy}(0)} \quad (2.19)$$

Nos escoamentos turbulentos, para caracterizar a estrutura da turbulência, utiliza-se a correlação entre dois pontos para uma mesma componente da flutuação, o que define o coeficiente de correlação espacial entre os pontos.

$$C_{u_0u_i}(0) = R_{u_0u_i}(0) / \sqrt{R_{u_0u_0}(0)R_{u_iu_i}(0)} \quad (2.20)$$

Variando a posição de um dos pontos, pode-se obter a função do coeficiente de correlação espacial da componente  $u$  na direção  $x$ ,  $C_{uu}(x)$ , e com base nesta função, obter a macro-escala ou escala integral de comprimento  $L_u$  [Hinze, 1959].

$$L_u = \int_0^{\infty} C_{uu}(x) dx \quad (2.21)$$

De igual forma, a partir da função do coeficiente de auto-correlação  $C_{uu}(\tau)$ , pode-se obter a escala integral de tempo  $T_u$  [Tennekes & Lumley, 1994].

$$T_u = \int_0^{\infty} C_{uu}(\tau) d\tau \quad (2.22)$$

Na prática, nas equações (2.21) e (2.22) empregam-se valores adequados de  $x$  e  $\tau$  para a integração, pois  $C_{uu}$  tende assintoticamente a zero quando  $x$  ou  $\tau$  crescem. A hipótese de Taylor, referida à aproximação da “turbulência congelada”, permite relacionar estas duas escalas integrais

$$T_u = \frac{L_u}{U} \quad (2.23)$$

e desta forma, conhecendo o valor da escala integral de tempo  $T_u$ , pode-se calcular a macro-escala  $L_u$ , sem determinar a função do coeficiente de correlação espacial  $C_{uu}(x)$ .

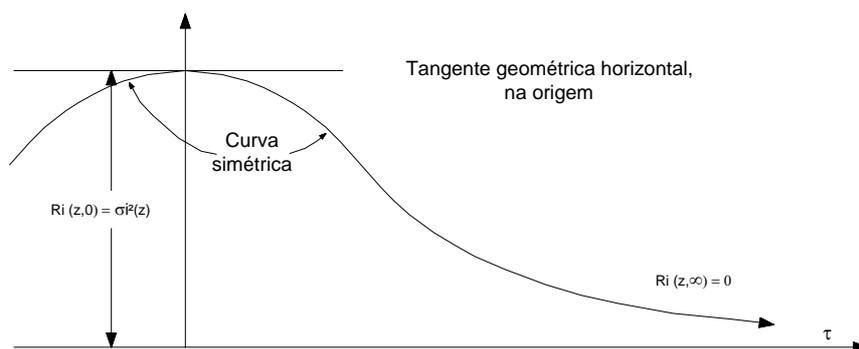


Figura 2.5. Curva de auto-correlação [Blessmann, 1995].

### 2.2.3 Análise espectral da turbulência

A função de densidade auto-espectral ou espectro de potência representa a variação em função da frequência, do valor quadrático médio de uma função do tempo  $x(t)$  fornecida por uma série numérica contínua adquirida com um intervalo de tempo  $t$  [Bendat & Piersol, 1986], e fica expressa por:

$$S_{xx}(f) = \frac{1}{B_e T} \int_0^T x^2(f, B_e, t) dt \quad (2.24)$$

onde  $B_e$  é a largura de banda (resolução do espectro), e  $T$  o tempo de integração adequado. A integral desta função permite obter a variância de  $x(t)$ . Quando analisa-se um escoamento turbulento, obtém-se o espectro de turbulência, e a função  $x(t)$  é a flutuação da velocidade  $u$ .

A função espectral cruzada de duas funções do tempo  $x(t)$  e  $y(t)$ , é fornecida por:

$$S_{xy}(f) = P_{xy}(f) + iQ_{xy}(f) \quad (2.25)$$

onde  $P_{xy}$  é a parte real, e  $Q_{xy}$  é a parte imaginária de  $S_{xy}$ .

$$P_{xy}(f) = \frac{1}{B_e T} \int_0^T x(f, B_e, t)y(f, B_e, t) dt \quad (2.26)$$

$$Q_{xy}(f) = \frac{1}{B_e T} \int_0^T x(f, B_e, t)y^*(f, B_e, t) dt \quad (2.27)$$

$y^*$  é a função  $y(t)$  defasada 90°.

A função de coerência  $\gamma_{xy}$  pode variar entre os valores 0 e 1, e está definida por:

$$\gamma_{xy}(f) = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)} \quad (2.28)$$

Em um escoamento turbulento,  $x(t)$  e  $y(t)$  podem ser duas componentes da flutuação de velocidade, por exemplo,  $u$  e  $v$ .

Considerando o espectro de turbulência, a partir da hipótese de Taylor (ou hipótese de “turbulência congelada”), pode-se definir o número de onda  $k_l$

$$k_1 = \frac{2\pi f}{U} \quad (2.29)$$

que tem dimensão  $[1/L]$ , e corresponde à inversa do diâmetro dos vórtices. A expressão que estabelece a relação entre o espectro de frequências e o espectro em função do número de onda é:

$$S_{xx}(k_1) = \frac{S_{xx}(f)\bar{U}}{2\pi} \quad (2.30)$$

No espectro de turbulência podem-se distinguir várias zonas (Figura 2.6). Nas frequências baixas (baixos números de onda), estão os grandes vórtices portadores de energia, gerados pelo escoamento principal, e a função espectral é proporcional a  $k_l^{-1}$ . Esta energia é transmitida aos vórtices menores, em um processo de cascata, até a redução da turbulência ao movimento molecular. Esta é a região de equilíbrio universal, e podem-se distinguir duas sub-regiões; a de Kolmogorov ou inercial, proporcional a  $k_l^{-5/3}$ , e a de dissipação de Heisenberg, proporcional a  $k_l^{-7}$  [Hinze, 1959].

À medida que os vórtices diminuem, se reduz sua contribuição à tensão de cisalhamento. O movimento tende a tornar-se isotrópico, e os vórtices, independentes das condições de geração, tendem a mover-se de forma cada vez mais aleatória [Möller, 1989]. A existência de uma sub-região inercial na zona de equilíbrio universal requer a existência de isotropia local. Nesta região, o espectro responde à expressão de Kolmogorov:

$$S_u = C_1 \varepsilon^{2/3} k_1^{-5/3} \quad (2.31)$$

onde  $C_1$  é a constante de proporcionalidade e  $\varepsilon$  é a dissipação devida à turbulência.

Existem distintas formas de determinar o espectro de potência. Uma delas consiste em utilizar filtros passa-faixa e determinar a variância da flutuação para faixas de frequência consecutivas.

Também se pode obter a função de densidade auto-espectral fazendo a transformada de Fourier da função de auto-correlação, isto é:

$$S_{xx}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad (2.32)$$

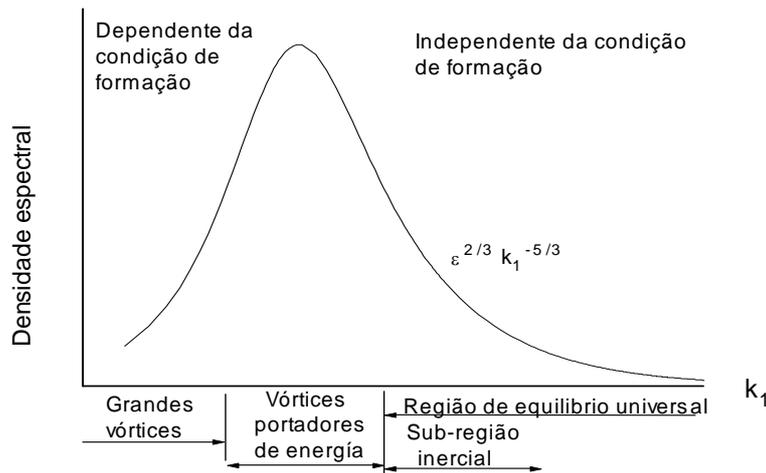


Figura 2.6. Regiões do espectro de turbulência.

Finalmente, a transformada rápida de Fourier permite determinar diretamente o espectro de uma série numérica representativa da função  $x(t)$  ou, no caso específico de um escoamento turbulento, representativa da flutuação de velocidade. As séries numéricas obtêm-se da digitalização do sinal analógico representativo das flutuações. Antes da digitalização do sinal, é importante realizar uma filtragem para evitar o fenômeno do dobramento (*aliasing*) em frequências [Newland, 1975]. Este fenômeno provoca uma perturbação da série numérica que depois se traslada ao espectro. Na prática, evita-se determinando a frequência máxima de interesse para o problema que se está analisando. Esta frequência define a frequência de corte ou de Nyquist. Mediante um filtro passa - baixa, filtram-se as componentes de frequências superiores. Para a digitalização utiliza-se uma frequência de aquisição cujo valor, como mínimo, deve ser o duplo da frequência de corte.

### 2.2.4 Distribuições de probabilidade da turbulência

A função de densidade de probabilidade para uma série de dados aleatórios descreve a probabilidade de que os dados atingirão um valor dentro de um intervalo definido, num instante qualquer. Considerando um registro temporal  $x(t)$ , a probabilidade de que  $x(t)$  atinja um valor dentro do intervalo  $[x, x+\Delta x]$  pode-se obter mediante a relação  $T_x/T$ , sendo  $T_x$  o tempo total em que  $x(t)$  mantém-se dentro de  $[x, x+\Delta x]$  durante o tempo de observação  $T$ . Para um  $\Delta x$  pequeno, a função de densidade de probabilidade pode-se definir como [Bendat & Piersol, 1966]:

$$p(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\text{prob}[x < x(t) \leq x + \Delta x]}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left( \frac{T_x}{\Delta x} \right) \quad (2.33)$$

A função  $p(x)$  é real e não-negativa. A probabilidade de que o valor instantâneo de  $x(t)$  seja menor ou igual a um valor  $x$ , está definida pela função de distribuição de probabilidade ou função de probabilidade acumulada  $P(x)$ :

$$P(x) = \text{prob}[x(t) \leq x] = \int_{-\infty}^x p(\xi) d\xi \quad (2.34)$$

A função de distribuição  $P(x)$  está limitada pelos valores zero e um. A probabilidade de que  $x(t)$  mantenha-se dentro do intervalo  $[x_1, x_2]$  é fornecida por:

$$P(x_2) - P(x_1) = \text{prob}[x_1 < x(t) \leq x_2] = \int_{x_1}^{x_2} p(x) dx \quad (2.35)$$

A turbulência, como fenômeno aleatório, pode ser analisada a partir das funções de probabilidade. Para escoamentos estacionários, normalmente se aceita a validade da função de densidade de probabilidade normal ou Gaussiana. Os escoamentos turbulentos intermitentes estudam-se experimentalmente usando técnicas de amostragem condicionada [Libby, 1975].

Nos processos turbulentos associados à dispersão de poluentes, a função de densidade de probabilidade das flutuações de concentração, além da distribuição Gaussiana, pode adquirir a forma exponencial ou log-normal, de acordo à zona do campo de concentrações.

### 2.2.5 A teoria de Kolmogorov

A teoria elaborada por Kolmogorov em 1941 para turbulência completamente desenvolvida, prevê a existência de um intervalo de equilíbrio, onde leis de caráter universal descrevem as quantidades associadas ao escoamento turbulento. Ainda que a universalidade destas leis tenha sido questionada posteriormente por Landau, atualmente são muito utilizadas.

Supondo homogeneidade e isotropia para o subintervalo inercial, a partir da equação de Navier-Stokes, Kolmogorov derivou uma função estrutura de terceira ordem expressa em termos das propriedades locais da turbulência completamente desenvolvida (TCD), cuja expressão é:

$$D_{III}(r) = \langle [u(x+r) - u(x)]^3 \rangle = -\frac{4}{5} \varepsilon r. \quad (2.36)$$

Para a função estrutura de segunda ordem, com argumentos de similaridade e homogeneidade, Kolmogorov derivou

$$D_{II}(r) = \langle [u(x+r) - u(x)]^2 \rangle = C_k (\varepsilon r)^{2/3}, \quad (2.37)$$

onde  $r$  é um incremento longitudinal na posição  $x$ ,  $\varepsilon$  é a taxa de dissipação e  $C_k$  é a constante de Kolmogorov. Esta lei, conhecida como a lei dos “2/3”, pode ser expressa em termos do número de onda. Assim o espectro de energia unidimensional pode-se expressar como a lei dos “5/3” de Kolmogorov-Obukhov (equação 2.31), válida para o sub-intervalo inercial (Figura 2.6).

## 2.3 Turbulência atmosférica

Para certas aplicações, a turbulência atmosférica pode-se considerar um processo aleatório estacionário. Na análise, normalmente considera-se uma componente da flutuação de velocidade num ponto do espaço. Diversos autores admitem que a função de densidade de probabilidade de um registro temporal representativo dessa componente de velocidade é normal ou Gaussiana [Blessmann, 1995].

A expressão da função de densidade de probabilidade normal da componente  $u$  é:

$$p(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_u} e^{-\frac{(u-\bar{u})^2}{2\sigma_u^2}} \quad (2.38)$$

A distribuição Gaussiana fica totalmente descrita pelo valor médio  $\bar{U}$  e a variância  $\sigma_u^2$ .

A seguir indicam-se dados atmosféricos correspondentes às intensidades e escalas de turbulência, assim como expressões representativas dos espectros de turbulência atmosférica. Os estudos de Davenport, a partir de medições realizadas no vento natural, permitiram chegar à seguinte expressão para a intensidade local da componente longitudinal da turbulência [Blessmann, 1995]:

$$I_u(z) = 2,58(c_{as})^{1/2}(10/z)^\alpha \quad (2.39)$$

Na tabela 2.1 indicam-se os valores do coeficiente de arrasto superficial  $c_{as}$ , a altura gradiente  $z_g$  e o expoente  $\alpha$  sugeridos por Davenport, considerando três categorias típicas de terreno. As curvas da intensidade local da componente longitudinal da turbulência obtidas a partir da expressão (2.36) para os três tipos de terreno, são indicadas na Figura 2.7.

Tabela 2.2. Valores de  $c_{as}$ ,  $z_g$  e  $\alpha$  sugeridos por Davenport.

<i>Categoria do terreno</i>	$\alpha$	$z_g$	$c_{as}$
A: Terreno aberto com muito poucos obstáculos	0,16	300	0,005
B: Terreno coberto com obstáculos de 10 a 15 m de altura	0,28	430	0,030
C: Terreno com obstáculos grandes e irregulares	0,40	560	0,050

Diversas medições na atmosfera e expressões do espectro de turbulência, que são indicadas a seguir, permitiram determinar leis de variação da escala longitudinal da turbulência  $L_u(z)$ . Vários autores apresentam seus resultados com a seguinte forma:

$$L_u(z) = K(z/z_{ref})^n \quad (2.40)$$

A continuação indica-se a expressão que sugere Harris e a adotada pela ESDU (Eng. Sciences Data Unit), de acordo a Blessmann [1995]:

$$L_u(z) = 151(z/10)^\alpha \quad (2.41)$$

$$L_u(z) = 25z^{0,35} z_0^{-0,063} \quad (2.42)$$

As diversas expressões originam uma grande dispersão dos valores atribuída, de acordo a Blessmann, à complexidade do fenômeno e à falta da informação necessária para obter resultados mais coerentes.

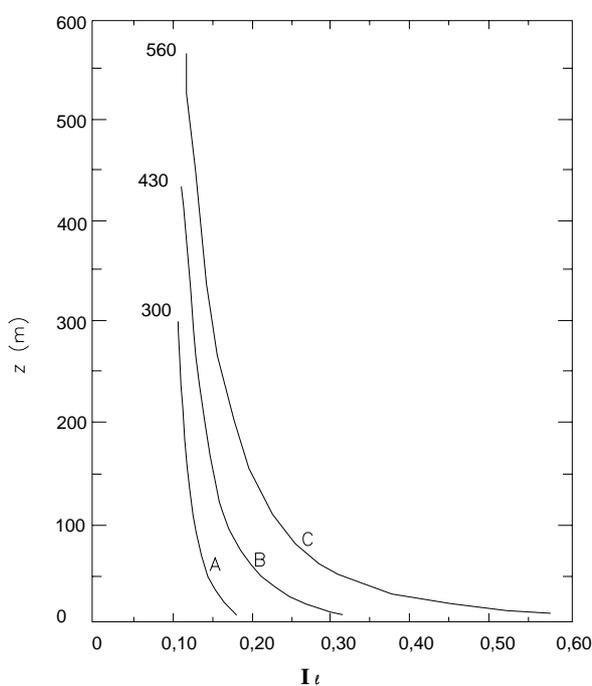


Figura 2.7. Intensidade local da componente longitudinal da turbulência [Blessmann, 1995].

### 2.3.1 O espectro macrometeorológico

Os dados de vento atmosférico provêm de anemômetros que normalmente são situados a 10 m de altura. Estes dados incluem as contribuições dos sistemas climáticos e da própria camada limite. Isto é, variações de velocidade do vento que têm escalas temporais de várias horas até frações de segundo. Para analisar estes registros

atmosféricos, frequentemente são determinados os espectros de potência correspondentes.

Na Figura 2.8 se reproduz o espectro da componente longitudinal de velocidade obtido por Van der Hoven, em Brookhaven, Long Island, NY, USA [Cook, 1985]. Neste espectro destaca-se um pico que corresponde ao período de quatro dias aproximadamente (ou a frequência de 0,01 ciclos/hora), conhecido como pico macrometeorológico. Outro pico, cujo período está entre os 10 minutos e os 3 segundos, associa-se à turbulência da camada limite e é conhecido como pico micrometeorológico. Entre estes dois picos, pode-se observar uma região em que as flutuações têm escassa energia (*spectral gap*). Esta zona está centrada no período aproximado a 30 minutos, e permite a separação entre a velocidade média e as flutuações ou rajadas. Isto confirma que a interação entre o clima e a turbulência da camada limite é desprezível, permitindo tratar de forma independente os dois aspectos.

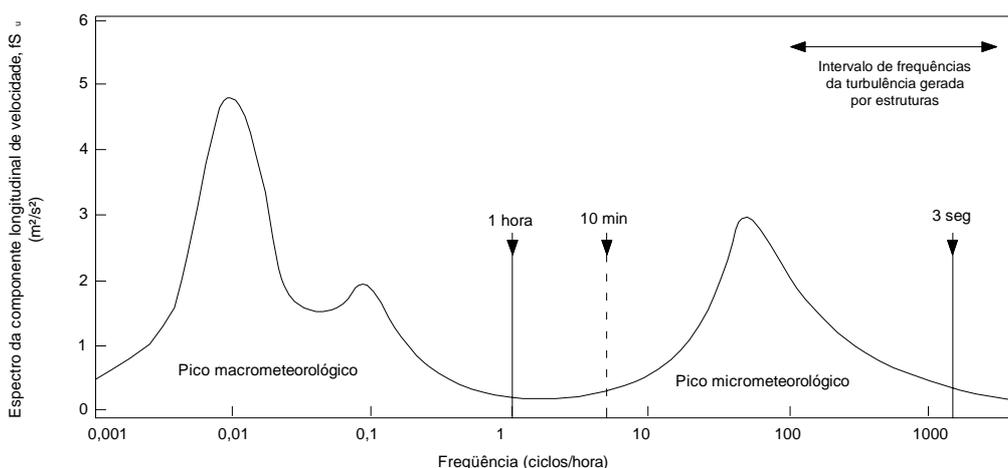


Figura 2.8. Espectro de van der Hoven obtido em Brookhaven [Cook, 1985].

### 2.3.2 Espectro de potência das flutuações

As flutuações que têm períodos inferiores de uma hora e definem a região de micrometeorologia, determinam o espectro da turbulência atmosférica, onde está concentrado o interesse dos problemas de cargas de vento e dispersão atmosférica. Na Figura 2.9, são apresentados os espectros das flutuações longitudinais  $u$  e verticais  $w$ ,

obtidos em condição próxima à estabilidade neutra ( $z/L_{MO} \cong -0,03$ ). Estes resultados provêm dos experimentos realizados em Kansas, descritos por Kaimal et al. [1982].

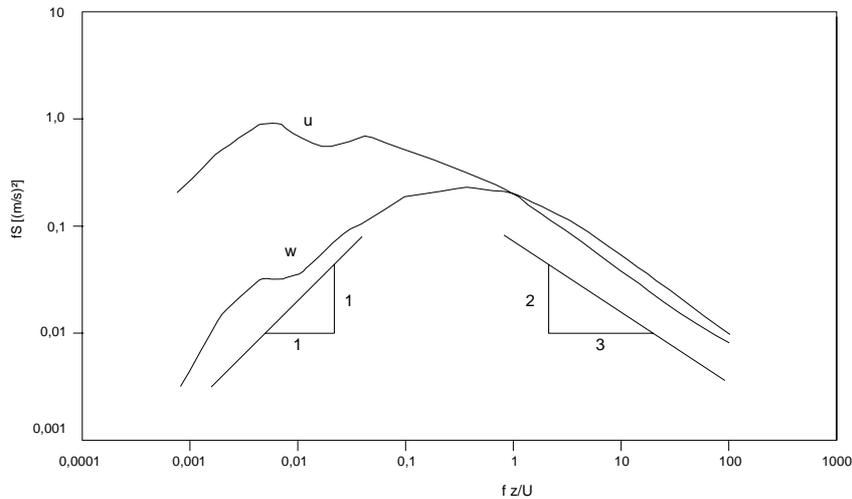


Figura 2.9. Espectros das componentes  $u$  e  $w$  obtidos em condição de estabilidade quase-neutra [Jensen & Busch, 1982].

Normalmente, os espectros atmosféricos são representados por curvas obtidas mediante o ajuste aos resultados experimentais. Davenport sugere a seguinte expressão para o espectro da componente longitudinal da turbulência, em ventos fortes:

$$\frac{fS_u}{\sigma_u^2} = \frac{2X_u^2}{[3(1 + X_u^2)^{4/3}]} \quad (2.43)$$

sendo  $X_u$  a frequência adimensional que se calcula mediante a expressão:

$$X_u = \frac{fL}{U_{(10)}} \quad \text{com } L = 1200 \text{ m.} \quad (2.44)$$

A expressão de von Kármán, que aparece no manual de ESDU é a seguinte:

$$\frac{fS_u}{\sigma_u^2} = \frac{4X_u(z)}{[1 + 70,78X_u(z)^2]^{5/6}} \quad (2.45)$$

onde a frequência adimensional  $X_u(z)$  é:

$$X_u(z) = \frac{f L_u(z)}{\overline{U}(z)} \quad (2.46)$$

O efeito da estabilidade atmosférica sobre o espectro da componente vertical das flutuações  $w$  pode-se analisar através das variações do parâmetro de estabilidade  $z/L_{MO}$ , sendo  $L_{MO}$  o comprimento de Monin-Obukhov. O comportamento do espectro de  $w$  para valores de  $z/L_{MO}$  que variam entre  $+2,0$  e  $-2,0$  mostra-se na Figura 2.10. A área sombreada indica a ausência de uma tendência bem definida dos espectros com respeito à  $z/L_{MO}$ .

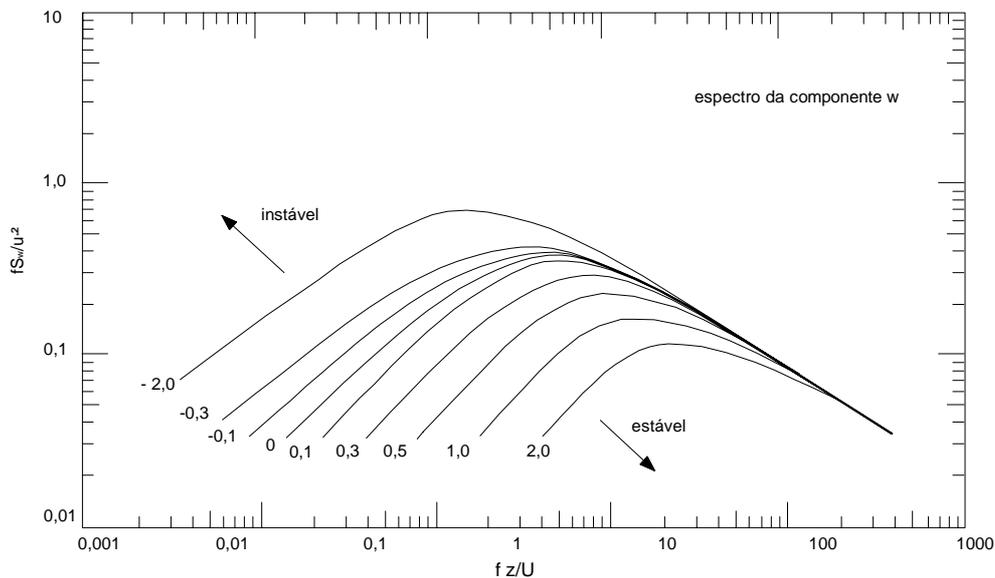


Figura 2.10. Comportamento do espectro da componente  $w$  com a variação do parâmetro  $z/L_{MO}$  [Jensen & Busch, 1982].

## 2.4 Dispersão atmosférica de contaminantes

O processo de difusão e transporte dos gases poluentes descarregados na camada limite atmosférica está afetado pelas características da fonte de emissão, a natureza dos contaminantes, as condições meteorológicas, os efeitos do terreno e as construções adjacentes.

No caso particular de chaminés de descarga de efluentes industriais, a elevação da pluma depende da quantidade de movimento da emissão e de seu empuxo. Geralmente, aumentando a velocidade de saída ou a temperatura do gás na saída, aumentará a elevação da pluma. A altura física da chaminé e a elevação da pluma determinam a altura efetiva da chaminé.

Na região próxima à chaminé é importante conseguir uma velocidade de emissão que permita tirar os gases fora da esteira da chaminé ou do edifício. Na região mais afastada interessa a altura efetiva da chaminé, suficiente para que os gases alcancem o solo com uma concentração adequada, a partir do processo de diluição e mistura. Os níveis máximos de concentração de efluentes podem ocorrer, algumas vezes, em condições de atmosfera muito estável, e outras vezes, com ventos de alta velocidade [Lawson, 1980].

Em zonas urbanas, as configurações dos edifícios, as árvores e outros obstáculos, determinam uma geometria complexa que influi fortemente nas características da dispersão. Também, deve-se somar o efeito de ilha de calor, que modifica a estabilidade atmosférica. Além disso, geralmente combinam-se emissões em linha, pelo trânsito nas ruas, áreas de emissão, produzidas por parques de automóveis abertos, e emissões pontuais [Cermak & Takeda, 1985].

A irregularidade da topografia também exerce influências importantes. No caso de fontes de emissão próximas a lagos ou praias, aparece a influência das brisas marítimas. Nas cidades localizadas em vales, as circulações do vento são complexas com escoamentos gravitacionais ascendentes ou descendentes, que originam problemas de poluição particulares.

#### 2.4.1 A contaminação do ar

Os principais contaminantes do ar são; o monóxido de carbono, os poluentes tóxicos do ar (HAP's), o chumbo atmosférico, dióxido de nitrogênio, oxidantes fotoquímicos, óxidos de enxofre e partículas.

Nos problemas de poluição do ar podem-se distinguir três escalas: micro, meso e macro-escala. Os problemas a nível de micro-escala são os que se produzem em casas

ou ambientes fechados, e são mais comuns em climas frios, onde as pessoas passam a maior parte do tempo em ambientes interiores. Fundamentalmente, depende dos materiais usados na construção e do projeto dos sistemas de ventilação.

Os problemas de macro-escala estendem-se atingindo estados inteiros, países, e inclusive, a todo o planeta. Fenômenos como a chuva ácida, a poluição do ozônio ou o efeito estufa ocorrem a nível da macro-escala.

A nível da meso-escala, o ambiente exterior é contaminado pelas emissões industriais e de automóveis. Estes problemas afetam extensões de alguns hectares, por exemplo, uma cidade ou uma parte dela. Os estudos de dispersão atmosférica realizam-se principalmente para os fenômenos de meso-escala. É necessário aclarar que, não obstante esta classificação, a meteorologia da poluição do ar é reconhecida como parte da micro-meteorologia.

## 2.4.2 Teorias de difusão

Antes de estudar alguns modelos de dispersão, apresenta-se uma breve revisão das teorias de difusão; a teoria estatística de Taylor, a teoria de semelhança Lagrangeana e a teoria do transporte gradiente ( $K$ ).

Sendo a difusão produzida pela turbulência, a teoria estatística desenvolvida por Taylor está baseada em integrais que consideram a variância das flutuações de velocidade na direção normal ao vento  $\sigma_v^2$  e o coeficiente de auto-correlação  $R_v(\tau)$ . Isto é, utilizam-se parâmetros que caracterizam a turbulência e que se podem obter realizando medições. Sendo  $y$  o deslocamento vertical de uma partícula devido à componente flutuante da velocidade normal ao vento  $v$ , obtém-se a seguinte equação de difusão:

$$\sigma_y^2(t) = 2\sigma_v^2 \int_0^t (t-\tau) R_v(\tau) d\tau \quad (2.47)$$

onde  $\sigma_y^2$  é a variância do deslocamento vertical de uma partícula e define a taxa de dispersão vertical em termos da função de auto-correlação. Para tempos pequenos,  $R_v(\tau) \rightarrow 1$ , e na medida que o tempo cresce, a correlação diminui até que  $R_v(\tau) \rightarrow 0$ . Sendo

que as correlações atmosféricas caracterizam-se por ter integrais finitas, pode-se calcular:

$$\int_0^{\infty} R_v(\tau) d\tau = T \quad (2.48)$$

sendo  $T$ , a escala de tempo integral Lagrangeana.

Para tempos pequenos,  $\tau \ll T \rightarrow R_v(\tau) = 1$ , de tal forma que:

$$\sigma_y^2(t) \cong 2\sigma_v^2 \int_0^t (t-\tau) d\tau = \sigma_v^2 t^2 \Rightarrow \sigma_y \propto t \quad (2.49)$$

Para analisar o que sucede quando  $t$  aumenta, é conveniente reescrever a equação (2.47) da forma:

$$\sigma_y^2(t) = 2\sigma_v^2 t \int_0^t (1-\tau/t) R_v(\tau) d\tau \quad (2.50)$$

mas, ao ser grande o valor de  $t$ , o termo  $\tau/t$  tende a zero, então

$$\sigma_y^2(t) \cong 2\sigma_v^2 t \int_0^t R_v(\tau) d\tau = 2\sigma_v^2 tT \Rightarrow \sigma_y \propto t^{1/2} \quad (2.51)$$

isto é, à medida que  $t$  aumenta, a taxa de dispersão diminui.

Sendo que o espectro da variância  $S_v(f)$  obtém-se por meio da transformada de Fourier da auto-correlação  $R_v(\tau)$ , pode-se mostrar que, inicialmente, o espectro de energia da turbulência na sua totalidade contribui com o processo de difusão. Mas quando o tempo cresce, é como se um filtro passa baixa, com frequência de corte ajustada ao valor  $1/t$ , se aplicara ao espectro. Só os grandes vórtices são difusores efetivos, já que os vórtices pequenos provocam um movimento de partículas, dentro da nuvem de poluentes, sem produzir uma difusão efetiva.

O parâmetro de dispersão  $\sigma_y^2$  está expresso em termos das magnitudes Lagrangeanas obtidas seguindo o movimento de um dos pontos do fluido. Geralmente, os valores de  $\sigma_v^2$  são Eulerianos, já que são obtidos de medições num ponto fixo. O parâmetro  $\beta$ , definido pela relação entre as escalas de tempo Lagrangeana e Euleriana,

tem valor médio igual a 4 [Hanna, 1982], e permite relacionar quantidades Lagrangeanas e Eulerianas.

A obtenção de relações adimensionais simples entre as variáveis importantes e os parâmetros governantes de um fenômeno, através da teoria de semelhança Lagrangeana, simplifica a análise de um problema. No caso da dispersão atmosférica, este tipo de aproximação utiliza-se quando o campo de turbulência não é homogêneo, como ocorre nos casos de difusão na camada superficial. Os bons resultados desta teoria dependem da escolha apropriada das variáveis importantes e dos parâmetros de normalização.

Finalmente, se apresenta a teoria do transporte gradiente que, na sua concepção, é análoga à teoria exata de difusão molecular. O desenvolvimento é semelhante ao que se utiliza para obter as equações de Reynolds para movimento turbulento, a partir da equação de Navier-Stokes. Assim como se representam as componentes de velocidade  $u$ ,  $v$ ,  $w$  mediante a soma de uma velocidade média e uma flutuação da forma:

$$u = \bar{u} + u'; v = \bar{v} + v'; w = \bar{w} + w' \quad (2.52)$$

a concentração da substância será:

$$C = \bar{C} + c' \quad (2.53)$$

Da equação de difusão já simplificada:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = C_{DM} \left[ \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right] + \frac{r}{\rho} \quad (2.54)$$

sendo  $C_{DM}$  o coeficiente de difusão molecular ou difusividade e  $r$  representa a massa de substância produzida por unidade de volume e de tempo. Com a equação (2.53), para escoamento incompressível, e utilizando a equação de continuidade:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (2.55)$$

obtém-se:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = \\ - \frac{\partial}{\partial x} \overline{u'c'} - \frac{\partial}{\partial y} \overline{v'c'} - \frac{\partial}{\partial z} \overline{w'c'} + C_{DM} \left[ \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right] + \frac{r}{\rho} \end{aligned} \quad (2.56)$$

A correlação  $\overline{u'c'}$  representa o fluxo de volume por unidade de área da substância devido à turbulência ( $\rho \overline{u'c'}$  é o fluxo de massa turbulenta por unidade de área).

Em analogia com a primeira lei de Fick [Daily, 1966], usada em difusão molecular, supõe-se que o fluxo turbulento é proporcional ao gradiente da concentração média:

$$\overline{u'c'} = -k_{Tx} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \quad \overline{v'c'} = -k_{Ty} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \quad \overline{w'c'} = -k_{Tz} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \quad (2.57)$$

sendo  $k_{Ti}$  o coeficiente de difusão turbulenta na direção  $i$ . A equação (2.56) fica expressa como:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = \\ - \frac{\partial}{\partial x} \left( k_{Tx} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{Ty} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( k_{Tz} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right) + C_{DM} \left[ \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right] + \frac{r}{\rho} \end{aligned} \quad (2.58)$$

Em escoamentos turbulentos é possível desprezar totalmente a difusão molecular, já que os coeficientes  $k_{Ti}$  são maiores (em várias ordens de grandeza) aos coeficientes  $C_{DM}$ .

Quando existem ventos de corte com turbulência não homogênea, a teoria de transporte gradiente é mais apropriada à teoria estatística. Porém, as soluções analíticas da equação de difusão tornam-se muito complicadas, ou ainda impossíveis, a menos que sejam usadas simples leis potenciais para expressar a variação de  $u$  e  $k_{Ti}$ . As teorias apresentadas geralmente são utilizadas de forma complementar nos modelos de análise.

### 2.4.3 Modelos de dispersão

A análise teórica dos fenômenos de dispersão a partir da formulação convencional de difusão é muito complicada. Porém, existem modelos semi-analíticos que estão sendo melhorados e que, em muitos casos, permitem boas estimativas dos níveis de concentração. Por outro lado, a modelagem física é fundamental para estudos em camadas limites não homogêneas, terrenos complexos e zonas urbanas, onde os modelos empíricos e teóricos não fornecem bons resultados. A seguir descrevem-se alguns dos modelos e critérios mais comuns utilizados para o estudo de processos de dispersão.

#### *Modelo de dispersão Gaussiana*

O modelo Gaussiano é, basicamente, um modelo empírico cujo ajuste aos valores observados é relativamente bom e constitui o mais comum dos modelos de poluição de ar (Figura 2.11). A fórmula da pluma Gaussiana fica expressa como [Zannetti, 1990]:

$$C = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_zU} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta_{cw}}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z_s + \Delta h - z_r}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (2.59)$$

onde  $C(s,r)$  é a concentração em  $r$  ( $x_r, y_r, z_r$ ), produto das emissões em  $s$  ( $x_s, y_s, z_s$ ),  $Q$  é a taxa de emissão,  $\sigma_y(x_r)$  e  $\sigma_z(x_r)$  são os desvios padrões (horizontal e vertical) da distribuição espacial da concentração da pluma,  $x_r$  é a distância a sotavento desde a fonte de emissão ao receptor, e  $\Delta_{cw}$  é a distância em direção transversal ao vento entre o receptor e a emissão. A elevação da pluma  $\Delta z$  pode-se calcular mediante a fórmula de Hamilton [Davis & Cornwell, 1998]:

$$\Delta z = \frac{w_0 D_0}{U} \left[ 1,5 + \left( 2,68 \times 10^{-2} (p) \left( \frac{T_e - T_a}{T_e} \right) D_0 \right) \right] \quad (2.60)$$

onde  $w_0$  é a velocidade de saída da emissão [m/s],  $D_0$  o diâmetro da chaminé [m],  $U$  a velocidade de vento [m/s],  $p$  a pressão [kPa],  $T_e$  a temperatura de emissão [K] e  $T_a$  a temperatura do ar [K].

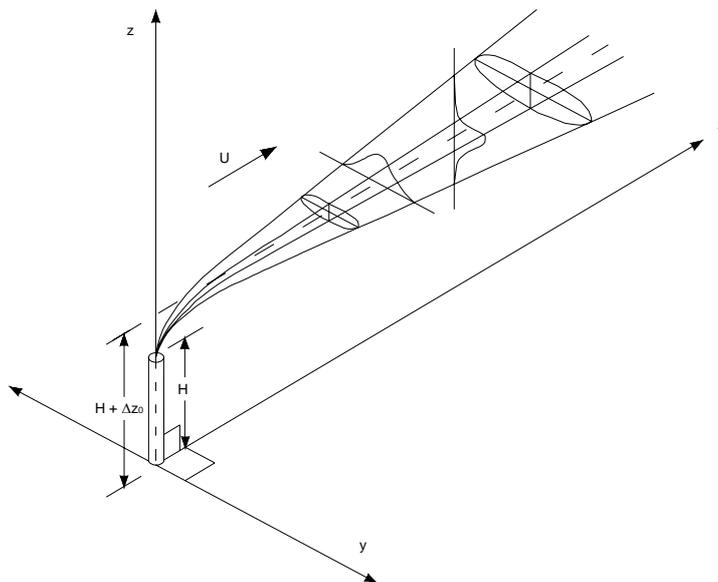


Figura 2.11. Esquema de uma pluma Gaussiana.

Os valores dos parâmetros da pluma  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  dependem da estabilidade atmosférica. As Figuras. 2.12 e 2.13, mostram os valores de  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  em função da distância a sotavento desde a emissão, que determinam as curvas conhecidas como PTG (“Pasquill-Gifford-Turner”). Estas curvas são aplicáveis, especificamente, às seguintes condições: terrenos planos com escassa vegetação; emissões próximas à superfície; tempos de amostragem de 3 a 10 minutos; ventos estacionários; distância a sotavento menor do que 1 km. As letras A, B, C, D, E, F indicam as distintas condições de estabilidade atmosférica na Tabela 2.2, sendo A: Condição de instabilidade extrema, B: Condição de instabilidade moderada, C: Condição de instabilidade suave, D: Condição de estabilidade neutra, E: Condição de estabilidade suave, EF: Condição de estabilidade moderada.

Existem equações que permitem expressar matematicamente as curvas das Figuras. 2.13 e 2.14, e utilizam-se para obter soluções computacionais deste modelo de dispersão.

Quando existe uma inversão, a pluma não se pode dispersar na direção vertical depois de alcançar a camada de inversão. Para considerar este fenômeno, a equação de difusão básica pode-se modificar. A uma distância determinada  $x_{ci}$ , desde a fonte de

emissão a sotavento, em que a pluma alcança a base da camada de inversão, começa a mistura para abaixo. Essa distância depende da estabilidade da camada inferior à inversão. A concentração, a partir da distancia  $2x_{ci}$  pode-se calcular com a equação de dispersão “curta” ou de inversão [Davis & Cornwell, 1998].

Tabela 2.3. Categorias de estabilidade.

Velocidade superficial de vento [m/s]	Dia			Noite	
	Radiação solar			Nublosidade	Nublosidade
	Forte	Moderada	Suave	$\geq 4/8$	$\leq 3/8$
<2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

### *Altas concentrações no nível do solo*

As regulamentações atuais, ao menos nos países desenvolvidos, tendem a prevenir também as altas concentrações de curta duração produzidas ao nível do solo, devidas às ondulações aleatórias da pluma (*looping*) ou a episódios de fumigação. O problema das ondas ou oscilações da pluma pode-se avaliar mediante a relação de concentração pico/média, usando um modelo de pluma flutuante. As medições de concentração realizadas em proximidades de chaminés de 50 a 100 m de altura, indicam valores da relação pico/média muito elevados.

A condição de fumigação clássica se produz pela manhã, quando uma pluma confinada em uma atmosfera estável, repentinamente, começa a se misturar para baixo. Produzem-se altas concentrações que duram aproximadamente uma hora. No caso que a difusão para cima esteja restringida por uma inversão, a mistura para baixo é grande e também se produz fumigação.

Quando se produzem ventos fortes com a atmosfera em estabilidade neutra, a elevação da pluma é pequena e ocorre a fumigação por ventos de alta velocidade. Estes

ventos tendem a persistir durante várias horas, o que torna mais severa a situação. Além disso, já foi mostrado que em muitos casos, as concentrações no nível do solo são mais altas por ventos de alta velocidade por mistura restringida por uma inversão.

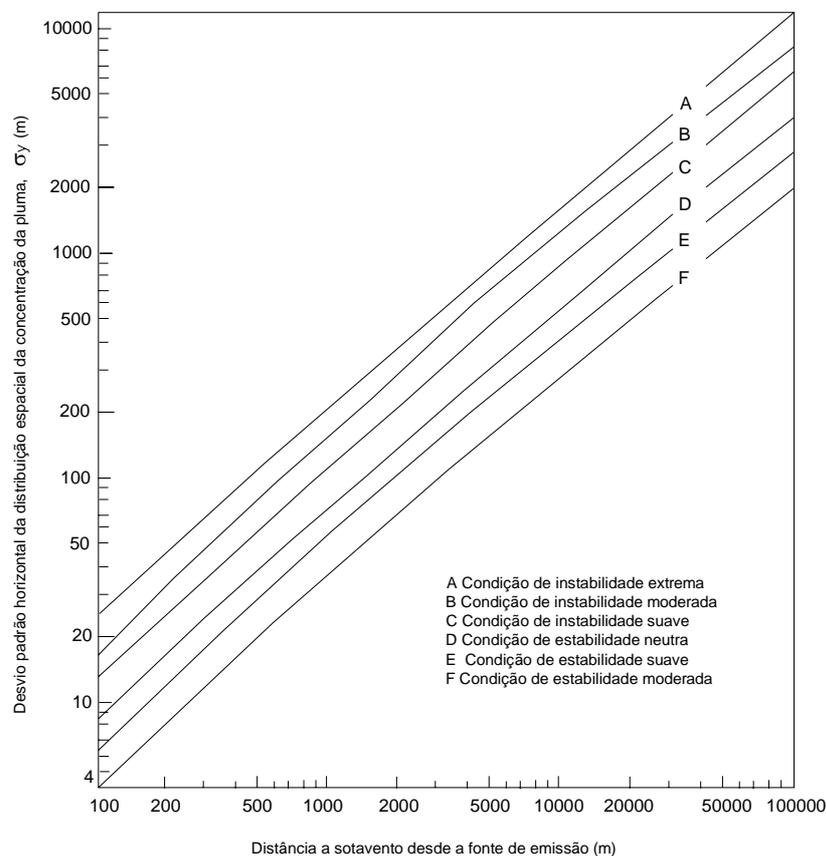


Figura 2.12. Difusão lateral  $\sigma_y$  em função da distância a sotavento desde a fonte de emissão [Parker, 1977].

### *Efeitos das edificações*

Ante a presença de estruturas industriais, a pluma deve-se elevar sobre as zonas de cavidade de sucção e esteira que se produzem atrás da estrutura (Figura 2.14), para evitar as altas concentrações. Estas regiões de alta turbulência têm a capacidade de misturar rapidamente a pluma para baixo, provocando o aumento das concentrações. Existem alguns critérios para determinar quando uma pluma de uma chaminé de altura  $H$ , adjacente a uma construção de altura  $H_e$  e largura  $l_e$  não ingressará na cavidade.

Na maioria das fontes de emissão, quando a relação entre a velocidade do efluente  $w_0$  e a velocidade do vento  $U$  é  $w_0 / U < 1.5$ , a pluma descerá uma distância  $H_d$  desde a ponta da chaminé dada por:

$$H_d = 4R_0(1,5 - w_0 / U) \quad (2.61)$$

sendo  $R_0$  o raio da chaminé. Isto permite determinar a altura modificada da chaminé  $H_{ef} = H - H_d$ . A partir de alguns dados obtidos em túneis de vento, é possível estabelecer a seguinte regra:

$$H_{ef} > H_e + 1,5l_e \quad \text{Não existe influência da estrutura.}$$

$$H_e + 1,5l_e > H_{ef} > H_e + 0,5l_e \quad \text{Pluma na esteira.}$$

$$H_{ef} < H_e + 0,5l_e \quad \text{Pluma na cavidade.}$$

Estes critérios modificam-se quando as fontes de emissão são muito grandes e o efeito de empuxo pela diferença de temperatura entre os gases e a atmosfera é importante, como ocorre no caso de torres de resfriamento.

### ***Difusão de plumas em terrenos especiais***

Todos aqueles terrenos que não são planos e não apresentam as características homogêneas das zonas rurais, são denominados terrenos especiais. Em geral, os problemas práticos de difusão, se produzem neste tipo de terrenos, mas a maioria dos estudos experimentais foi realizada em terrenos rurais planos. Neste sentido, os túneis de vento transformam-se em uma ferramenta fundamental de experimentação nestes tipos de fenômenos.

Existem vários modelos para analisar a difusão em terrenos com rugosidade e presença de ondulações. O modelo de pluma Gaussiana pode ser usado considerando uma nova trajetória da linha central da pluma que depende das características do obstáculo. Os valores de  $\sigma$  dados pelas curvas PGT devem ser afetados, de acordo com previsões que têm base experimental, por um fator de 5 a 10 quando o terreno é muito rugoso, e por um fator de 2 a 3 quando a rugosidade é moderada.

O caso de superfícies aquáticas muito suaves constitui, dentro dos terrenos especiais, uma situação oposta aos terrenos muito rugosos. Sobre a água, a difusão depende principalmente das diferenças de temperatura entre a água e o ar. A difusão é muito baixa para condições estáveis e os valores instantâneos de difusão lateral  $\sigma_y$  observados são 2 a 5 vezes inferiores aos da curva PGT de estabilidade F.

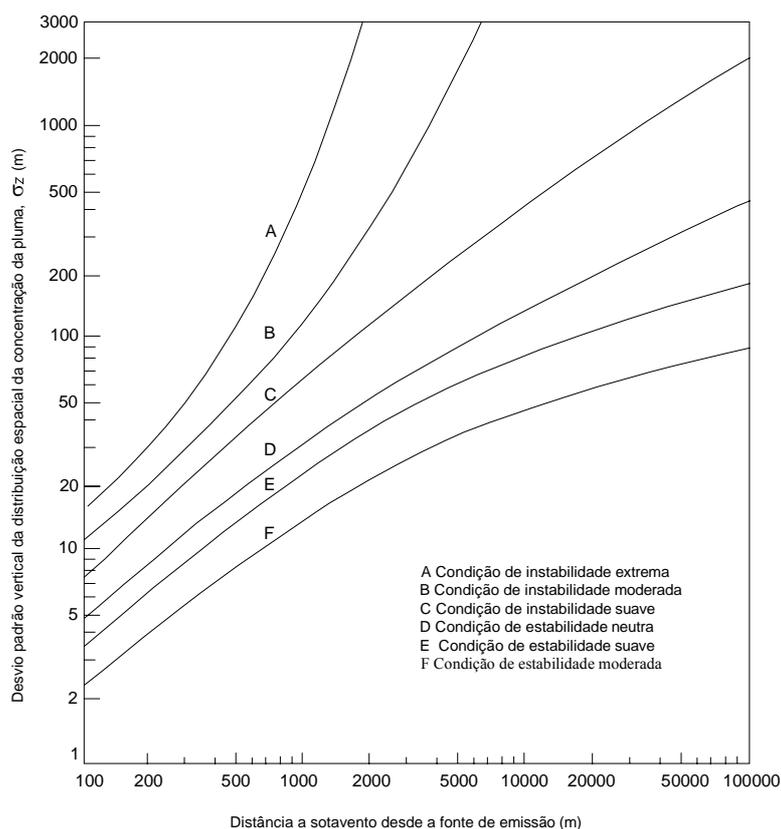


Figura 2.13. Difusão vertical  $\sigma_z$  em função da distância a sotavento desde a fonte de emissão [Parker, 1977].

### ***Fontes pontuais, áreas e volumes de emissão***

As fontes em linha e de superfície podem ser analisadas estendendo o modelo de pluma Gaussiana. Estradas e ruas determinam linhas de emissão que têm um tratamento diferente em cada caso. A análise depende da direção do vento no caso de estradas, e da circulação do ar, de acordo com a situação particular, no caso de ruas nas cidades. Nas regiões urbanas existem múltiplas fontes pontuais, de superfície e de linha. Normalmente, as linhas de emissão podem-se combinar com as fontes de superfície,

enquanto que as estruturas da concentração resultante de fontes pontuais superpõem-se, para determinar a concentração total.

Para simular os efeitos das fontes em linha, de superfície, e de volume, pode-se integrar a equação (2.57) espacialmente. Frequentemente, a integração analítica é impossível ou requer simplificações. Existem métodos para o tratamento deste tipo de fontes que aplicam a integração numérica para estas integrais espaciais [Zannetti, 1990].

Em muitos casos, o método da fonte pontual virtual proporciona um tratamento simples e satisfatório evitando a integração. Quando se utiliza este método, a fonte real é simulada mediante uma fonte pontual apropriada localizada, virtualmente, a barlavento da real.

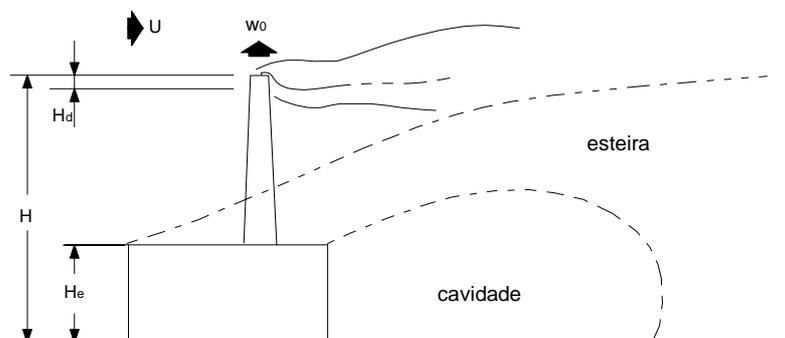


Figura 2.14. Efeito de uma edificação no processo de emissão [Hanna, 1982].

### ***Modelos físicos de dispersão***

A experimentação em escala natural em fenômenos relacionados com a camada limite atmosférica é muito custosa. Por isto, a partir da década de '70, começaram a realizar-se estudos de dispersão com modelos reduzidos em túneis de vento e tanques de água. A vantagem destes estudos, além da redução de custos, é o controle de determinados parâmetros que influem no fenômeno. No capítulo seguinte, trata-se especificamente da modelagem de problemas de dispersão atmosférica utilizando túneis de camada limite. A utilização de tanques de água, em geral, orienta-se a estudos na camada limite estratificada estável ou convectiva.

### **3 Simulação do vento atmosférico e estudos de dispersão em túnel de vento**

No marco dos problemas ambientais, os túneis de vento são usados principalmente para analisar problemas de difusão de gases emitidos desde uma ou várias fontes e descarregados na camada limite atmosférica. O requisito prévio a um estudo deste tipo é a simulação física do escoamento atmosférico. Por isto, o túnel de vento deve ter um comprimento de câmara de ensaios apropriada para a simulação.

Os túneis de vento podem ser de alta ou baixa velocidade, e de circuito aberto ou fechado. Nos de baixa velocidade, a velocidade média é da ordem dos 100 m/s (ou menor) e os efeitos de compressibilidade são desprezíveis. Dentro dos túneis de baixa velocidade existem os de camada limite e os do tipo aeronáutico. A diferença entre ambos é, fundamentalmente, o comprimento da câmara de ensaios. Entanto que nos túneis aeronáuticos a câmara de testes é curta, nos túneis de camada limite, o comprimento da câmara de ensaios permite incluir no seu interior o equipamento de simulação necessário para reproduzir, em uma escala apropriada, as características do escoamento atmosférico na seção de ensaios. Para lograr uma simulação adequada, requer-se um comprimento da câmara de ensaios superior a quatro vezes a altura da camada limite que se pretende obter.

A aplicação do túnel de vento a problemas ambientais não está restringida aos estudos de difusão. Atualmente, no planejamento de uma cidade, realizam-se estudos de conforto de pedestres que, mediante ensaios em túnel de vento, permitem analisar modificações no campo de ventos e a possibilidade de rajadas.

#### **3.1 Simulação da camada limite atmosférica em túneis de vento**

O estudo dos fenômenos aerodinâmicos que se produzem na camada limite atmosférica, é usualmente realizado em forma experimental utilizando túneis de vento com modelos em escala reduzida. Para realizar estes estudos, é necessário simular o vento atmosférico no túnel de vento. O processo de simulação consiste em desenvolver

---

um modelo físico do escoamento atmosférico tal que os parâmetros característicos sejam reproduzidos da melhor forma possível dentro do túnel.

A camada limite atmosférica está descrita matematicamente pelas equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia. Os requerimentos de semelhança para um estudo do escoamento atmosférico em Laboratório podem ser obtidos mediante a análise dimensional. Este método permite adimensionalizar às equações mediante parâmetros de referência que conduzem ao seguinte conjunto de grupos ou números adimensionais:

$$\text{Número de Reynolds:} \quad Re = UL/\nu$$

$$\text{Número de Prandtl:} \quad Pr = \nu\rho C_p / k_\theta$$

$$\text{Número de Rossby:} \quad Ro = U / (L \Omega)$$

$$\text{Número de Richardson:} \quad Ri = \Delta T L g / (T U^2)$$

sendo  $U$  a velocidade,  $L$  comprimento,  $\nu$  viscosidade cinemática,  $\rho$  densidade,  $C_p$  calor específico a pressão constante,  $k_\theta$  condutividade térmica,  $\Omega$  velocidade angular,  $T$  temperatura,  $\Delta T$  variação da temperatura e  $g$  aceleração da gravidade. Cada uma das quantidades são características ou de referencia.

Para obter a semelhança exata, estes parâmetros adimensionais devem ser iguais em modelo e protótipo, deve existir semelhança geométrica e semelhança das condições de contorno, que incluem ao escoamento incidente, a temperatura da superfície, o escoamento de calor e o gradiente de pressão longitudinal [Cermak & Takeda, 1985].

As escalas geométricas entre a camada limite simulada no laboratório e a camada limite atmosférica são, em geral, maiores do que 1 : 200, as velocidades em modelo e protótipo são da mesma ordem, e a viscosidade coincidente. Surge assim, a impossibilidade de reproduzir o número de Reynolds em túneis de baixa velocidade. Contudo, podem-se obter escoamentos semelhantes relaxando esta condição, a partir de que as características do escoamento tornam-se independentes do número de Reynolds em certos intervalos de variação. A igualdade do número de Prandtl é obtida simplesmente usando o mesmo fluido em modelo e protótipo (como ocorre neste caso).

Finalmente, o requerimento de igualdade do número de Rossby pode-se relaxar já que, em geral, a influência dos gradientes de pressão local e forças de corte é grande com relação às forças causadas pela aceleração de Coriolis. Em função disto, pode-se conseguir a semelhança considerando somente três critérios; semelhança geométrica, igualdade do número de Richardson e semelhança das condições de contorno.

### ***Número de Reynolds***

O número de Reynolds pode ser obtido considerando distintos parâmetros de referência. Para a simulação de uma camada limite, o requerimento refere-se ao número de Reynolds de rugosidade  $Re_z$ , estabelecendo:

$$Re_z = u_* z_0 / \nu > 1 \quad (3.1)$$

onde  $u_*$  é a velocidade de fricção e  $z_0$  a altura de rugosidade. Esta condição está baseada em medições realizadas em tubos com paredes rugosas. Quando o valor de  $Re_z$  é inferior, os perfis de velocidade afastam-se da curva universal correspondente à camada limite turbulenta que se desenvolve sobre uma parede rugosa.

### ***Número de Richardson***

A maior parte dos trabalhos realiza-se utilizando camadas limites em estabilidade neutra, mas existem casos em que a estratificação térmica ou seus efeitos devem ser considerados. Se a estratificação provoca instabilidade da camada limite, pode-se esperar que a diluição da pluma seja acelerada, enquanto que, se a estratificação produz um escoamento estável, as altas concentrações persistem.

O número de Richardson  $Ri$  é representativo da importância relativa da turbulência convectiva e mecânica, respectivamente. Valores negativos de  $Ri$  indicam convecção forte e turbulência mecânica suave. Quando  $Ri = 0$ , a turbulência é de origem puramente mecânica. Se é positivo e menor que um valor crítico  $Ri_{crit} \sim 0,25$ , a turbulência mecânica é atenuada pelas forças de empuxo. Para valores de  $Ri$  mais elevados, a turbulência desaparece quase completamente por causa da estratificação.

No capítulo 2, foi mencionado o parâmetro de estabilidade relacionado ao comprimento de Monin-Obukov (equação 2.8) para analisar a estabilidade da CLA.

---

Ainda que exista uma relação direta com o  $Ri$ , na atmosfera é utilizado o comprimento de Monin-Obukov, enquanto que no laboratório se utiliza o  $Ri$ .

### 3.1.1 Modelagem da camada limite atmosférica em estabilidade neutra

Na maioria dos Laboratórios é mais comum simular da camada limite neutralmente estratificada. Isto implica a modelagem da distribuição de velocidades médias, das escalas de turbulência e do espectro atmosférico [Surry, 1982].

A camada limite atmosférica é semelhante à camada limite que se desenvolve sobre uma superfície plana com determinada rugosidade, sob a condição de gradiente de pressão nulo. A rugosidade tem a mesma função que os obstáculos do terreno na atmosfera, ou seja, estabelece o perfil de velocidades médias e as características da turbulência do escoamento. Mas, a simulação da camada limite atmosférica em um túnel de vento utilizando somente rugosidade superficial requer câmaras de ensaio extremamente longas. O crescimento da espessura da camada limite é muito lento. Para evitar este problema, são colocados outros dispositivos no início da câmara de ensaios, denominados simuladores, que provocam um crescimento mais rápido. Estas técnicas são conhecidas como métodos de rugosidade, barreira e dispositivos de mistura.

A partir de uma série de trabalhos, Counihan [1969, 1970, 1971, 1972 e 1973] desenvolveu um método de simulação utilizando geradores de vorticidade em combinação com uma barreira e elementos de rugosidade. Nestes trabalhos, são avaliadas distintas representações da camada limite desenvolvida sobre terrenos rural e urbano para determinar, experimentalmente, a geometria mais conveniente para os simuladores. No seu conjunto, os trabalhos conformam um extenso programa que culmina com a obtenção de uma configuração particular e a adoção de geradores de forma elíptica e uma barreira dentada.

Standen [1972], empregando um método similar, também obteve bons resultados. Os simuladores, neste caso, são agulhas triangulares ou truncadas e elementos de rugosidade superficial. Particularmente, a técnica de Standen permite a simulação da espessura total da camada limite atmosférica, e também de espessuras parciais. Assim, é possível mudar as escalas de ensaio.

---

Na apresentação do túnel de vento da UFRGS, Blessmann [1982] descreve dois sistemas de simulação da camada limite atmosférica. O primeiro basicamente utiliza uma grelha de barras retangulares combinada com rugosidade superficial. O outro sistema utiliza uma combinação de agulhas truncadas, jatos transversais de ar e rugosidade.

O método mais usado é o que emprega geradores de vorticidade elípticos e uma barreira, no entanto o método da grelha é mais simples no seu projeto e construção. Ambos requerem grandes distâncias cobertas de rugosidade para estabelecer o equilíbrio dos parâmetros da turbulência. O método mais complicado, no referente a seu projeto, é o dos jatos transversais, mas permite maior flexibilidade no controle da geração do perfil de velocidade.

#### ***Avaliação das características de uma simulação de camada limite com estabilidade neutra***

Para avaliar as características de uma camada limite simulada no túnel de vento, realizam-se medições da distribuição de velocidades médias e flutuantes que permitem obter os parâmetros característicos da simulação.

O expoente  $\alpha$ , característico do perfil de vento, é obtido ajustando as velocidades medidas à lei potencial, e permite caracterizar o tipo de terreno da simulação. Os valores da intensidade de turbulência na camada limite simulada variam também de acordo às características do terreno.

Os espectros medidos são comparados com os espectros atmosféricos, determinados com as diferentes expressões que aparecem na literatura. A comparação dos espectros indica se a distribuição espectral da turbulência obtida na camada limite simulada é adequada e reproduz, a escala reduzida, os valores atmosféricos.

A macro-escala ou escala integral obtém-se ajustando o espectro medido à expressão do espectro representativo dos valores atmosféricos [Cook, 1978]. Este parâmetro é uma escala de comprimento característica dos maiores turbilhões do escoamento.

### ***O fator de escala em uma simulação da camada limite***

Para obter o fator de escala do modelo em simulações da camada limite em um túnel de vento existem distintos métodos. O procedimento proposto por Cook [1978] sugere utilizar o comprimento de rugosidade  $z_0$  e a escala integral  $L_u$ , como parâmetros chave. O comprimento de rugosidade é um valor único para uma determinada camada limite e está diretamente ligado à altura média dos obstáculos que conformam a rugosidade da superfície terrestre. A escala integral é função da altura sobre o terreno.

O parâmetro  $z_0$  determina-se ajustando os valores do perfil de velocidades médias à lei logarítmica da parede. Na verdade, no ajuste determinam-se três parâmetros: a velocidade de cisalhamento  $u^*$ , o comprimento de deslocamento  $z_d$  e o comprimento de rugosidade  $z_0$ . A escala integral pode-se determinar ajustando o espectro da componente longitudinal obtido no túnel ao espectro de projeto.

A escala integral mantém uma dependência funcional com a altura efetiva  $z-z_d$  e com o comprimento de rugosidade  $z_0$  que, segundo dados da ESDU (Engineering Sciences Data Unit) fornecidos por Cook [1977], é estabelecida pela expressão empírica:

$$L_u = 25(z - z_d)^{0,35} z_0^{-0,063} \quad (3.2)$$

Uma vez obtidos estes parâmetros, o fator de escala do modelo  $S_F$ , determina-se mediante a equação (3.2). Substituindo cada parâmetro a escala real pelo produto do fator de escala  $S_F$  pelo valor do parâmetro respectivo na escala de modelo (subíndice  $M$ ), obtém-se:

$$S_F L_{uM} = 25[S_F(z - z_d)_M]^{0,35} [S_F z_{0M}]^{-0,063} \quad (3.3)$$

e pode ser obtida uma solução para  $S_F$  em termos dos valores do modelo.

$$S_F = \frac{91,3(z - z_d)_M^{0,491}}{L_{uM}^{1,403} z_{0M}^{0,088}} \quad (3.4)$$

### 3.1.2 Modelagem de escoamentos estratificados

Ainda que a maioria dos estudos em túneis de vento realiza-se com simulações da camada limite atmosférica em condição de estabilidade neutra, em alguns casos deve-se considerar a estratificação atmosférica. O problema da modelagem da estratificação é o requerimento de um grande investimento de tempo e equipamento para seu desenvolvimento. A potência necessária para os equipamentos de calefação e resfriamento é aproximadamente 10 vezes a potência de acionamento do ventilador do túnel de vento.

No túnel de vento de circuito fechado da Colorado State University, em Fort Collins, USA [Cermak, 1971], a temperatura do ar ambiente pode variar desde 5 °C até 95 °C. O número de Richardson na parte mais baixa da camada limite termicamente estratificada, com velocidades de vento da ordem de 1/2 m/s, pode-se ajustar dentro do intervalo + 1 (estável) a - 1 (instável) [Cermak & Takeda, 1985].

Outro tipo de túnel, baseado na idéia de Hertig [1984], é utilizado para a simulação de escoamentos estratificados. Este tipo de túnel, chamado de “multi-camada”, está constituído por vários condutos nos quais a geração do escoamento e o aquecimento pode ser feito individualmente mediante ventiladores e aquecedores múltiplos. O túnel de vento multi-camada construído na Universidade de Hamburgo, além de simular escoamentos com estratificação estável, permite reproduzir escoamentos com inversão elevada. Ainda que o projeto atual não permita a simulação de camadas limites convectivas, é factível gerar este tipo de escoamento [Schatzmann et al., 1995].

Para simular escoamentos na camada limite superficial com estratificação contínua, utilizam-se os perfis de temperatura e velocidade, que devem ser os mesmos no túnel de vento e no escoamento protótipo [Plate, 1982]. A dependência dos parâmetros característicos dos perfis de velocidade ( $z_0$ ,  $\alpha$ ) e temperatura ( $z_{0T}$ ,  $\alpha_T$ ) com relação à estabilidade térmica do escoamento ainda não pode ser confirmada.

O caso de inversão térmica, ou seja, quando a temperatura cresce com a altura, provoca uma camada limite estratificada em condição estável. Quando o gradiente

térmico é grande, a turbulência é totalmente suprimida. Nestes casos, muito freqüentemente o escoamento é modelado mediante experimentos em tanques de água [Hunt & Snyder, 1980], ou são utilizados dispositivos específicos como é o caso dos túneis multi-camada.

Para o caso de estratificação instável, é reconhecido que o caso crítico para aplicações práticas é o caso da camada de mistura. Foram realizadas várias tentativas de simular a camada de mistura mediante uma camada limite de pequena espessura em túnel de vento. A turbulência da camada de mistura simula-se mediante uma rugosidade adequada, ou seja, para modelar a camada de mistura utiliza-se um escoamento isotérmico [Plate, 1982].

É interessante o que foi proposto por Janssen [1979] para ter uma impressão do que ocorre com o processo de dispersão sob condições de estabilidade não-neutra. Isto é, simular condições nas quais a turbulência é mais alta e mais baixa que em uma simulação de um escoamento com estabilidade neutra, utilizando sempre escoamento isotérmico. Para a análise da dispersão, considera que estas condições aproximam-se a escoamentos atmosféricos mais estáveis e instáveis, respectivamente.

### ***Modelagem da camada superficial***

Existem muitos trabalhos vinculados à modelagem física da CLA completa devido a sua importância no estudo de cargas de vento em estruturas altas. A espessura da camada limite na atmosfera varia de 350 a 500 m [Cermak & Cochran, 1992]. A dispersão de poluentes emitidos desde fontes de baixa altura ou as cargas produzidas sobre estruturas baixas está afetada pelo vento nos 100 m inferiores da CLA, ou seja, na camada superficial.

Quando estes problemas são estudados em um túnel de vento, a utilização de modelos da camada superficial minimiza os efeitos do número de Reynolds e permite obter mais segurança nas medições. Os fatores de escala para uma simulação total da CLA, normalmente, mantêm-se entre 1:300 e 1:700, enquanto que para uma simulação da camada superficial é da ordem de 1:100 [Cermak, 1995]. No caso de escoamentos em condição de estabilidade neutra ou de instabilidade, a camada superficial se caracteriza pela variação mínima das tensões de Reynolds.

---

Em alguns casos são empregados dispositivos especiais que permitem acondicionar o escoamento para a modelagem da camada superficial em túnel de vento. A sotavento das agulhas que provocam o gradiente de velocidade  $\partial U / \partial z$ , são colocados elementos (vãos) horizontais para gerar uma forte correlação  $\overline{uw}$ . Também são utilizadas asas verticais oscilantes de seção aerodinâmica que incrementam a turbulência lateral de baixa frequência. Normalmente, esta componente está restringida pelas paredes do túnel e é inferior à atmosférica [Cermak et al., 1995].

No Japão, existe um túnel vento para estudos em duas e três dimensões que tem ventiladores múltiplos controlados computacionalmente. A estrutura do vento é simulada controlando independentemente cada ventilador para gerar os perfis de vento médio e a turbulência requerida [Nishi & Miyagi, 1995].

### 3.1.3 Considerações sobre a modelagem de regiões próximas e afastadas

Os escoamentos de CLA que foram idealizados anteriormente são alterados pelas perturbações que sejam introduzidas no terreno. O tipo de perturbação define o grau de interação que se produz. Os efeitos da perturbação são separados em efeitos no campo próximo e efeitos no campo afastado.

Nas regiões mais afastadas, as características do escoamento estão determinadas quase exclusivamente pelo escoamento de camada limite, pelo que a simulação da camada limite deve ser muito bem realizada. A difusão desde uma fonte de emissão no nível do solo é um problema deste tipo. A configuração e os detalhes da fonte emissora têm escassa influência no escoamento.

As perturbações locais produzem efeitos no campo próximo. As regiões de escoamentos localizados produzidas por corpos rombudos (“bluff bodies”), ou as modificações provocadas pelas descargas de chaminés impõem sua própria dinâmica de escalas nessa região. A modelagem do campo próximo depende das características da perturbação, do escoamento médio e, em menor medida, de outros parâmetros da camada limite.

Para a modelagem, é importante distinguir as diferentes escalas que afetam os fenômenos que se produzem em regiões próximas ou afastadas, e a modelagem de cada problema tem suas próprias escalas significativas [Plate, 1982]. Contudo, na maioria dos casos, a contribuição da turbulência gerada por uma perturbação não se pode separar da turbulência do escoamento incidente.

### 3.2 Requerimentos de semelhança para modelar fontes de emissão

Uma vez estabelecida a simulação da CLA no túnel de vento, os requerimentos de semelhança para a modelagem exata do comportamento da pluma de emissão podem-se resumir da seguinte forma [Isyumov & Tanaka, 1980]:

- Semelhança geométrica da fonte  $\lambda_L = \frac{D_{0m}}{D_{0p}}$
- Igualdade do número de Froude  $Fr = gD_0 / U_0^2$
- Igualdade da relação de densidade  $\rho_0 / \rho_a$
- Igualdade da relação entre as velocidades  $w_0 / U_0$
- Igualdade do número de Reynolds da fonte  $Re_0 = w_0 D_0 / \nu_0$

A Figura 3.1 mostra uma fonte de emissão que representa uma chaminé onde são indicados os valores que definem os parâmetros adimensionais;  $H$  é a altura da chaminé,  $U$  é a velocidade do escoamento atmosférico,  $w_0$  é a velocidade de saída da emissão,  $D_0$  é o diâmetro da chaminé,  $\rho_a$  e  $\rho_0$  as densidades do ar e a emissão respectivamente. Na figura indica-se a região próxima à fonte em que a própria estrutura da chaminé e a descarga provocam modificações no campo de escoamento. Na zona mais afastada, estes efeitos são percebidos unicamente através da altura efetiva da fonte  $H + \Delta z$ , e a origem virtual do campo de difusão determinado por  $x_0$  [Plate, 1982].

Para a modelagem do campo próximo, a geometria local afeta consideravelmente o escoamento. É necessário que a chaminé tenha a mesma configuração e valores semelhantes do coeficiente de arrasto em modelo e protótipo.

Em fontes cilíndricas, pode ser necessário considerar o efeito do número de Reynolds e agregar rugosidade à superfície curva. O perfil de velocidade de saída na emissão deve ser o mesmo em modelo e protótipo. No caso de torres de resfriamento, em que a abertura é ampla e a velocidade de saída muito baixa, pode-se requerer a colocação de rugosidade no interior da torre.

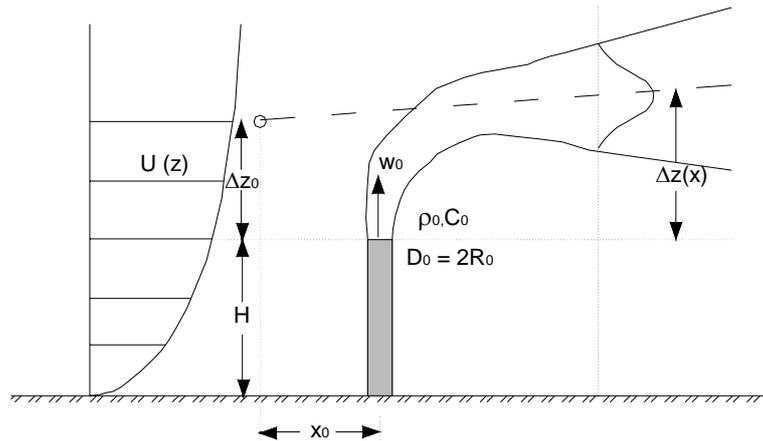


Figura 3.1. Parâmetros característicos de uma fonte de emissão.

Na zona afastada predomina o efeito da turbulência atmosférica. Para realizar a modelagem, o empuxo e a quantidade de movimento inicial são importantes unicamente para conseguir as condições iniciais. Isto permite realizar experimentos que contemplem a região afastada sobre um modelo a uma escala diferente à do modelo na região próxima. Para implementar este tipo de experimentos, se analisa o campo afastado utilizando um modelo menor, e a fonte de emissão substitui-se por uma fonte pontual equivalente com a descarga localizada no ponto determinado por  $x = x_0$  e  $z = H + \Delta z$  (Figura 3.1). O modelo maior, para a análise da região próxima, permite determinar  $x_0$  e  $\Delta z$ .

Os turbilhões da turbulência provocam intermitência e sinuosidade da linha de movimento da pluma que são diferentes em modelo e protótipo, e afetam os dados obtidos na região afastada. A concentração deve-se associar à escala de tempo com que ela é medida. No modelo, geralmente, é difícil utilizar o tempo de integração para a média que se obtém a partir da escala de tempo do experimento. É comum utilizar tempos maiores que deixam fora parte da variabilidade dos dados. Contudo, nos ensaios

---

em túnel de vento são empregados valores de concentração de pico que, para ser convertidos em concentrações médias, deveriam ser afetados por um fator que estabeleça a relação pico / média, incluindo os efeitos de intermitência e sinuosidade.

### 3.2.1 Dificuldades da modelagem a baixa velocidade

Para efeitos de vento que são influenciados pela ação da gravidade, a escala da velocidade é fixada pelo requerimento da igualdade do número de Froude [ASCE, 1987]. Um exemplo típico deste tipo de problema é o estudo do comportamento de linhas de transmissão sob a ação de ventos fortes utilizando modelos em túnel de vento [Loredo-Souza, 1996]. A modelagem exata do comportamento de plumas e processos de dispersão atmosférica também tem esse requerimento [Isyumov & Tanaka, 1980].

A escala geométrica  $\lambda_L$  deve ter um valor similar ao fator de escala  $S_F$  da simulação da CLA que se vá utilizar. Para satisfazer a semelhança do número de Froude, a modelagem exata requer que a escala de velocidades seja:

$$\lambda_u = \lambda_w = \sqrt{\lambda_L} \quad (3.5)$$

As escalas geométricas, determinadas a partir de valores típicos do fator de escala da simulação, variam dentro do intervalo  $\lambda_L \approx 1 : 100$  a  $1 : 500$ . As correspondentes escalas de velocidade são  $\lambda_u = 1 : 10$  a  $1 : 23$ . Para estudos de dispersão, o intervalo de interesse das velocidades de vento natural é de 5 a 20 m/s, pelo que a modelagem exata requer velocidades no túnel da ordem de 1 m/s.

Na maioria dos túneis de vento existem dificuldades para controlar as velocidades nos limites inferiores. O escoamento é sensível a qualquer perturbação e se produzem instabilidades que exageram o espectro nas baixas frequências [Meroney & Neff, 1980]. A comparação do espectro obtido na simulação do vento na camada limite com o espectro atmosférico permite determinar se existe distorção nas baixas frequências. Além disso, à baixa velocidade obtêm-se valores menores do número de Reynolds  $Re$ .

No caso de modelos de dispersão na esteira, o número  $Re_H$  característico da edificação que provoca a esteira está definido por:

$$Re_H = U_H H_e / \nu \quad (3.6)$$

sendo  $H_e$  a altura da obstrução e  $U_H$  a velocidade a essa altura. O valor crítico de  $Re_H$  deve ser determinado experimentalmente. Valores de  $Re_H$  maiores do que 3000 geralmente são satisfatórios [White & Stein, 1990] e a independência das características do escoamento pode ser conferida mudando a velocidade  $U$  no túnel de vento.

Para assegurar que o escoamento simulado sobre uma superfície rugosa é totalmente turbulento, deve-se verificar que o número de Reynolds de rugosidade  $Re_z$  (equação 3.1) seja maior do que 1. Esta condição, em geral cumpre-se para velocidades máximas da corrente livre no túnel de vento maiores do que 1 m/s.

### 3.2.2 Simulações aproximadas do comportamento da pluma

A maioria dos pesquisadores considera que o efeito da relação de densidade  $\rho_0 / \rho_a$  na configuração da pluma é desprezível [Poreh & Kacherginsky, 1981]. Se essa relação combina-se com o número de Froude, obtém-se o número de Froude densimétrico, que expressa a relação entre as forças inerciais e as forças de empuxo:

$$Fr_d = \rho_a U_0^2 / [(\rho_a - \rho_0) g D_0] \quad (3.7)$$

A utilização de  $Fr_d$  como parâmetro de semelhança em lugar de  $Fr_r$ , permite utilizar velocidades de vento no modelo aproximadamente 50 % mais elevadas.

Não é possível alcançar a igualdade do número de Reynolds da fonte  $Re_0$  estabelecida pela modelagem exata, mas o requerimento é satisfeito conseguindo condições similares de escoamento na saída da emissão. Em resumo, Cermak & Takeda (1985) propõem, além da semelhança geométrica, a igualdade da relação  $w_0 / U_0$  e do número de Froude densimétrico  $Fr_d$ . Estes mesmos autores citam outros dois parâmetros adimensionais utilizados, que permitem maior flexibilidade da modelagem:

- Parâmetro de quantidade de movimento do efluente  $\rho_0 w_0^2 / \rho_a U_0^2$

---

$$\square \text{ Parâmetro de empuxo } \rho_a U_0^3 / [(\rho_a - \rho_0) g w_0 D_0]$$

sendo o parâmetro de empuxo o produto do  $Fr_d$  por  $w_0/U_0$ . Com estes adimensionais é possível aumentar o tamanho da fonte de emissão e a velocidade do escoamento sem alterar a semelhança das características da pluma.

### 3.2.3 Modelagem de problemas locais de dispersão

Os problemas ambientais que se produzem em zonas próximas a edificações ou em áreas localizadas, em geral, têm uma melhor resolução a partir dos estudos em túnel de vento. Podem ser citados os problemas relacionados ao conforto de pedestres, a contaminação nas proximidades de edifícios, a difusão no campo próximo a uma chaminé, a ventilação de edifícios e a contaminação em canhões urbanos. Neste trabalho serão abordados os problemas relacionados à dispersão em regiões próximas a edificações e a difusão no campo próximo a uma fonte de emissão.

#### *Dispersão em zonas próximas a edifícios*

Existe uma grande quantidade de fontes de emissão para a dispersão de efluentes pequenos, cujas alturas são inferiores à espessura da camada superficial. A descarga dos gases poluentes pode-se produzir perto ou dentro da esteira de edificações próximas. Nestes casos é necessário conhecer a aerodinâmica da região de cavidade/esteira para analisar o processo de dispersão.

No caso do escoamento de ar em torno de um edifício isolado, a estrutura do escoamento apresenta uma série de características particulares. Produz-se uma zona de pressões positivas na fachada a barlavento e uma zona de pressões negativas (sucções) na cobertura, se esta for pouco inclinada, como também acontece nas fachadas laterais e na de sotavento. Isto provoca uma curvatura das linhas de corrente, movimentos secundários do escoamento, separação e aumento da turbulência. O contorno das regiões de deslocamento e da cavidade muda devido à turbulência.

A estrutura do escoamento de corte em torno de uma estrutura cúbica com vento incidindo perpendicularmente à fachada de barlavento e bem diferente do que com vento incidindo a 45°. São geradas a região de separação sobre a cobertura e a cavidade,

---

a zona de esteira a sotavento, e a zona de deslocamento para cima. No caso de vento perpendicular à fachada de barlavento, a altura da cavidade pode ser até 1,5 vezes a altura da edificação  $H_e$ , e seu comprimento 2,5 a  $3H_e$ . Com vento incidindo a  $45^\circ$ , os vórtices rotativos que se produzem na esquina de barlavento da cobertura tendem a reduzir a altura da cavidade e incrementam as velocidades no centro da esteira. Após a região de cavidade, na região da esteira, os efeitos de separação e movimentos secundários gerados pela estrutura provocam déficit de velocidade e turbulência que podem persistir em distâncias de 5 a  $30H_e$  a sotavento.

Na Figura 3.2 pode-se ver o que acontece quando as emissões se produzem sobre a zona de deslocamento aerodinâmico, que para uma edificação cúbica estende-se até  $2,5H_e$ . Se os poluentes são emitidos dentro dessa zona, mas fora da cavidade, pode-se reduzir a altura efetiva de emissão a sotavento. Quando a altura da fonte não supera a linha de corrente de separação da cavidade, mas é maior que a altura da região de separação da cobertura, se produz bastante concentração na fachada de sotavento. As emissões que são produzidas ao nível da cobertura da edificação se misturam na zona de recirculação e provocam concentrações máximas no nível do solo.

Além do caso mais severo, onde os gases emitidos podem alcançar altas concentrações nos campos de pressão negativos (sucções) e nas zonas de recirculação, a figura mostra que se o projeto da chaminé não é adequado, podem acontecer níveis consideráveis de concentração a sotavento de edificação ao nível do solo.

Existem vários trabalhos realizados em túneis de vento para a análise deste tipo de problemas. Os estudos de visualização de Lord & Leutheusser [1966] e Koga & Way [1980], referidos à análise das alturas mínimas de fontes de emissão próximas a edifícios, foram pioneiros. Posteriormente, desenvolveram-se trabalhos que incluem a análise quantitativa das concentrações na esteira e em zonas próximas a construções de diversas formas [Li & Meroney, 1983, Delaunay et al., 1997, Meroney et al., 1999].

Fackrell [1983] fez uma série de medições em túnel de vento para obter parâmetros característicos da esteira próxima utilizando diferentes formas de edificações. Os parâmetros medidos foram o comprimento da região de recirculação  $L_r$  e o tempo de residência  $t_d$ . O comprimento  $L_r$  é a distância desde a fachada posterior da edificação até o ponto de recolamento das camadas de corte separadas. O tempo  $t_d$  é o

tempo de residência de um traçador de partícula dentro da esteira de recirculação turbulenta [Hunt & Castro, 1983]. Estes parâmetros são característicos do escoamento da esteira na sua totalidade e são funções dos processos complexos que nela se produzem. Para escoamentos não tão complexos, podem ser utilizados para estimar a concentração média na esteira próxima.

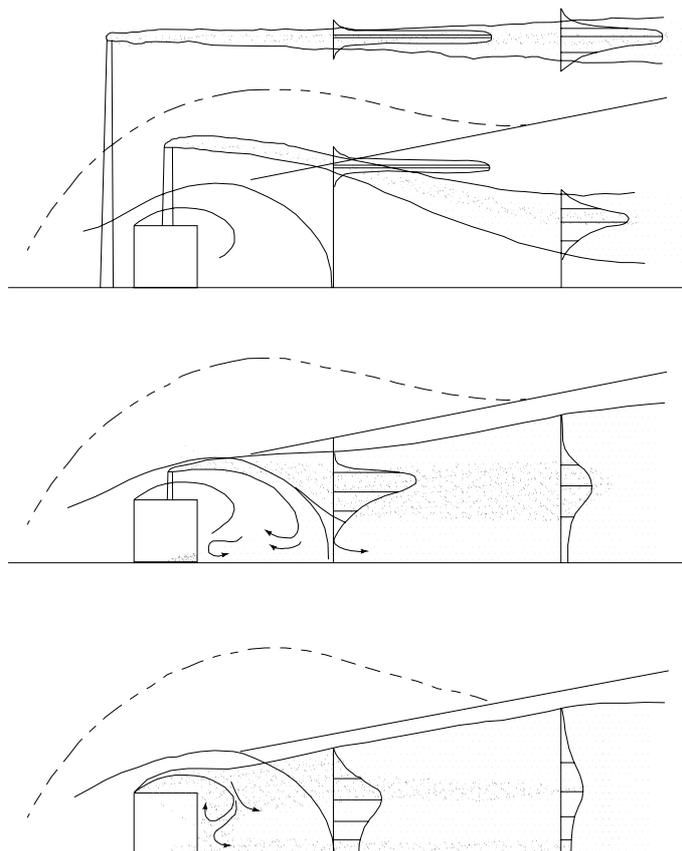


Figura 3.2. Dispersão de plumas em torno de uma construção cúbica [Meroney, 1982].

### ***Dispersão no campo perto a uma fonte de emissão***

A região próxima a uma fonte está determinada pela configuração da fonte e o campo do escoamento atmosférico. A turbulência do vento incidente produz um aumento na extensão da esteira no caso de uma chaminé cilíndrica. Contudo, na maioria dos casos, a turbulência atmosférica produz efeitos suaves com relação à turbulência gerada por construções próximas. Por isto, é muito importante modelar corretamente as construções e as características topográficas da vizinhança à fonte.

---

Existem estudos dirigidos à análise das concentrações através de uma pluma que não se realizam com base em um problema real [Poreh & Cermak, 1992]. Estes estudos, de caráter geral, permitem determinar comportamentos que são comuns em muitos problemas de dispersão, e analisar que variáveis produzem maior influência no fenômeno.

A dispersão das emissões de automóveis em canhões urbanos está influenciada por uma série de parâmetros, que agem simultaneamente. Estes parâmetros são; a geometria das construções, as dimensões da rua, a estratificação térmica, o empuxo da pluma, a vegetação e a rugosidade superficial. Os estudos de campo não permitem determinar quais agem significativamente e quais são secundários. Neste sentido, existem vários estudos em túnel de vento, com modelos em duas dimensões, relacionados com a dispersão em canhões urbanos [Meroney et al., 1996, Gerdes & Olivari, 1999]. Em geral, as emissões de automóveis são modeladas usando fontes contínuas em linha.

### 3.2.4 Modelagem de problemas de dispersão a nível de meso-escala

Nesta escala estão incluídos os fenômenos que se desenvolvem em terrenos complexos e os que estão referidos à análise de áreas urbanas. A análise dos problemas deste tipo, com modelos reduzidos, requer reproduzir as características do terreno e da geometria da área urbana. A diferença fundamental com relação ao estudo de problemas locais é que se devem modelar espaços maiores e, então, utilizar escalas menores. Isto implica considerar o efeito de escala e a escala de tempo com a qual se mede a concentração. Em muitos casos, os estudos sobre modelos topográficos permitem determinar o local adequado para a montagem de geradores eólicos e mastros meteorológicos.

Os modelos de terrenos complexos se constroem reproduzindo os relevos topográficos e os obstáculos circundantes à região de interesse. O escoamento incidente é ajustado à lei potencial do terreno periférico que tem rugosidade equivalente. O perfil de velocidade próximo à estrutura ou à zona da análise estará perturbado pelos efeitos do terreno e, uma vez determinado, poderá ser usado como escoamento incidente para um estudo com um modelo maior [Plate, 1982].

Em zonas urbanas, a variação local de temperatura ou o ingresso de calor provoca o efeito de ilha de calor. Para o caso de plantas de potência ou industriais construídas nas ribeiras, podem-se produzir problemas de contaminação como resultado do processo de fumigação [Davis & Cornwell, 1998]. Além dos parâmetros de semelhança citados anteriormente, é conveniente considerar a relação de aquecimento [Cermak & Takeda, 1985] que vincula as posições vertical e horizontal relativas com as diferenças de temperatura nessas posições.

### 3.3 Análise das concentrações

#### 3.3.1 Medição de concentrações

Para estudar dispersão em túneis de vento, complementarmente são realizados ensaios de visualização e ensaios quantitativos nos quais se mede a concentração nas zonas de interesse. Para as visualizações, geralmente se utilizam fumaças de óleos minerais. A iluminação e a captura de imagens fotográficas e de vídeo constituem uma parte importante dos ensaios. Os primeiros estudos de visualização de fenômenos de dispersão em túnel de vento foram realizados em 1970 com o objetivo de determinar alturas mínimas de chaminés, e assim, prevenir que as emissões cheguem ao nível do solo. Trabalhos mais recentes [Chatzipanagiotidis & Olivari, 1996; Gerdes & Olivari, 1999] mostram que, com a utilização de técnicas que incluem laser, vídeo-câmaras e sistemas de processamento digital de imagens, pode-se obter informação quantitativa a partir de ensaios de visualização com traçadores de fumaça.

A medição de concentração em experimentos de dispersão turbulenta depende do gás traçador que se utiliza para simular a emissão e pode ser realizada com diversos dispositivos chamados detectores. Estes são geralmente divididos em dois grupos; os de contato direto e os aspirados. Quando o gás que simula a emissão é um hidrocarboneto, é muito comum utilizar um detector de ionização de chama. Este sistema foi aplicado em vários estudos [Meroney et al., 1996; Delaunay et al., 1997; Donat & Schatzmann, 1999].

O anemômetro de fio quente, por meio da incorporação de uma sonda aspirante, permite medir as flutuações de densidade ou de concentração. Para calibrar a sonda pode-se utilizar o misturador de gases que permite prover misturas binárias conhecidas [Camano Schettini, 1996]. As flutuações de concentração podem-se analisar até frequências de 3 kHz, mesmo que as escalas características no túnel de vento não requerem a análise de frequências maiores do que 1 kHz.

Em geral, os instrumentos para a análise de concentração em túneis de vento devem ter uma resolução superior a 100 ppm (parte por milhão). Para lograr o efeito de empuxo de uma pluma são utilizadas misturas de dois ou três gases, um dos quais é gás traçador cuja concentração é detectada pelo instrumento de medição.

### 3.3.2 Normalização

Normalmente, as concentrações são apresentadas em forma adimensional. O coeficiente de concentração  $K$  está definido por:

$$K = \frac{CU_{ref}L_{ref}^2}{Q_0} \quad (3.8)$$

onde  $C$  é a concentração medida,  $U_{ref}$ , a velocidade de referência,  $L_{ref}$ , um comprimento de referência e  $Q_0$ , a vazão de emissão. Existem outras formas de adimensionalizar as concentrações, mas, em geral, para converter os valores medidos no túnel em valores a escala real, se utiliza a seguinte relação [Petersen, 1990]:

$$\left( \frac{CU_{ref}}{Q_0} \right)_{real} = \left( \frac{CU_{ref}S_F^2}{Q_0} \right)_{modelo} \quad (3.9)$$

sendo  $S_F$ , o fator de escala do modelo.

Também se utiliza o fator de diluição  $D_n$ , definido pela relação:

$$D_n = \frac{C_0}{C} \quad (3.10)$$

---

sendo  $C_0$ , a concentração de contaminantes à saída da emissão e  $C$ , a concentração no ponto de medição. No caso de emissões pequenas e localizadas na cobertura de edificações a utilização do fator de diluição. O trabalho experimental realizado por Chui & Wilson [1988], além dos valores da diluição, é indicada a curva de previsão da diluição mínima  $D_{min}$ , considerando um fator adimensional da quantidade de movimento da emissão.

Quando se estuda experimentalmente a dispersão em terrenos complexos, são determinados fatores de amplificação mediante a relação entre a concentração medida na superfície complexa e a obtida em uma superfície plana [Thompson & Snyder, 1985].

### 3.3.3 Flutuações da concentração

Os estudos mais recentes que analisam as flutuações de concentração em uma pluma mostram que o processo de dispersão é altamente intermitente nas proximidades à emissão, com picos ocasionais em períodos com baixos níveis de concentração. Os picos de concentração são de interesse para estimar a probabilidade de exceder certos limites de concentração ainda quando a concentração média é muito baixa. Também é importante quantificar o comportamento da pluma analisando a probabilidade de ocorrência desses picos de concentração.

Para a análise das flutuações de concentração, são utilizados a variância, os valores de pico, as funções de densidade de probabilidade, as funções de auto-correlação e os espectros das flutuações. A função de densidade de probabilidade pode tomar forma exponencial, Gaussiana ou log-normal, de acordo com a localização do ponto de medição e do tipo de fonte. As funções de auto-correlação e os espectros exibem comportamentos característicos da região do escoamento que se analisa [Pavageau & Schatzmann, 1999].

Nestes estudos é utilizada a intensidade de turbulência das flutuações de concentração  $I_c$ :

$$I_c = \frac{(\overline{K'^2})^{1/2}}{\overline{K}} \quad (3.11)$$

sendo  $\bar{K}$ , o coeficiente de concentração média e  $\overline{K'^2}$ , o coeficiente da flutuação de concentração quadrático médio, que são obtidos substituindo a concentração média e a flutuação quadrática média na equação (3.8). Neste tipo de análise, também é utilizada a relação de concentração pico-média  $K_p / \bar{K}$  para uma determinada probabilidade de excedência [Li & Meroney, 1983].

As funções de densidade de probabilidade acumulada, no caso de distribuições Gaussianas e exponenciais, podem-se expressar em formato Weibull. Esta representação permite determinar zonas altamente intermitentes e zonas de baixa intermitência de forma mais detalhada [Cheung & Melbourne, 2000].

---

## 4 Instalações experimentais e instrumentação

O trabalho experimental foi desenvolvido utilizando três túneis de vento. Para a análise de escoamentos de ar, foram realizadas medições das velocidades com tubos de Pitot-Prandtl e com anemômetro de fio quente. No estudo de processos de dispersão foi necessária a medição das concentrações de um gás para o qual foram utilizados uma sonda aspirante e o anemômetro de fio quente.

### 4.1 Instalações experimentais

Uma parte do trabalho foi realizada no túnel de vento *Prof. Joaquim Blessmann* da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Brasil, e outra parte foi desenvolvida no Laboratório de Aerodinâmica da Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), Argentina, utilizando o túnel de vento *Prof. Jacek P. Gorecki* e o túnel TV2, de menores dimensões.

O túnel de vento da UFRGS é um túnel de camada limite de retorno fechado, projetado especificamente para ensaios estáticos e dinâmicos de modelos de construções civis. Este túnel permite a simulação das principais características de ventos naturais [Blessmann, 1982]. Tem relação “comprimento / altura” da câmara de ensaios superior a 10. A velocidade máxima do escoamento de ar nesta câmara, com vento uniforme e sem modelos, é de 40 m/s (Figuras 4.1 e 4.3).

O túnel de vento de camada limite *Prof. Jacek P. Gorecki* da UNNE [Wittwer & Möller, 2000] é de circuito aberto e tem uma câmara de ensaios de 2,40 m de largura  $\times$  1,80 m de altura  $\times$  22,80 m de comprimento (Figura 4.2). A velocidade máxima com o túnel vazio é de 25 m/s e utiliza um ventilador axial de 2,25 m de diâmetro acionado por um motor trifásico de 92 kW e 720 rpm. A regulagem da velocidade é feita por meio de um regulador de vazão mecânico.

Finalmente, o túnel de vento TV2 do Laboratório de Aerodinâmica da UNNE é um pequeno túnel de circuito aberto cujo comprimento total é de 7,50 m, a câmara de testes é um conduto de secção quadrada de 0,48 m  $\times$  0,48 m, e 4,45 m de comprimento

(Figura 4.3). A configuração geral do túnel é muito semelhante a do túnel *Prof. Jacek P. Gorecki*, representado na Figura 4.2, só que as dimensões são aproximadamente quatro vezes menores. A máxima velocidade do escoamento é aproximadamente 18 m/s, e utiliza um ventilador centrífugo com um motor trifásico 1450 rpm e 10 CV [Alvarez y Alvarez, 2003].

Para simular as características do escoamento na camada limite atmosférica, foram utilizados métodos de rugosidade, barreira e dispositivos de mistura [Counihan, 1969, Standen, 1972]. Em casos específicos, foram usadas simples grelhas geradoras de turbulência.

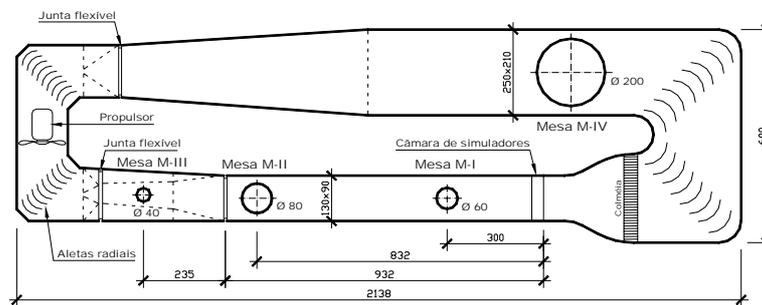


Figura 4.1. Túnel de retorno fechado da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil [Blessmann, 1982].

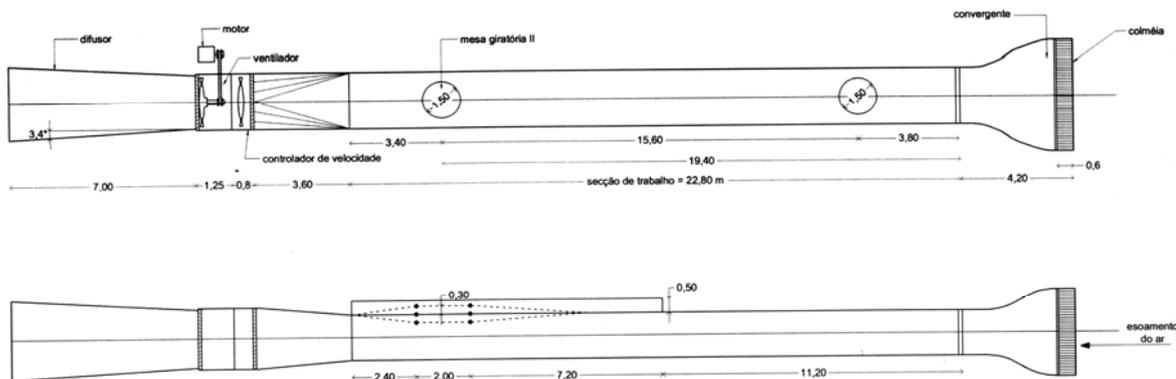


Figura 4.2. Túnel de circuito aberto da Universidad Nacional del Nordeste, Resistência, Argentina [Wittwer & Möller, 2000].



Figura 4.3. Vistas dos túneis de vento; túnel de retorno fechado “Prof. Joaquim Blessmann” da UFRGS (esquerda), túnel de circuito aberto “Prof. Jacek P. Gorecki” da UNNE (direita) e túnel TV2 da UNNE (abaixo).

## 4.2 Instrumental para a análise de escoamentos

Para estudar experimentalmente os escoamentos turbulentos, é necessário utilizar instrumentos de alta velocidade de resposta que permitam fazer um seguimento das variações de velocidade em forma praticamente instantânea. Neste trabalho, foi utilizado o anemômetro de fio quente. Quando é necessário medir somente velocidade média, pela sua simplicidade de manejo, são utilizados tubos de Pitot-Prandtl.

### 4.2.1 Anemometria de fio quente

O anemômetro de fio quente é um instrumento de medição amplamente usado na investigação e análise de escoamentos de líquidos e gases. A técnica de anemometria a temperatura constante utiliza uma sonda de filamento de diâmetro muito pequeno com grande velocidade de resposta, alta sensibilidade e escassa interferência no escoamento.

---

Sob certas condições, a perda de calor instantânea do sensor provocada pelo escoamento é uma medida da velocidade instantânea do escoamento.

O circuito elétrico (Figura 4.4) é composto basicamente por uma ponte de Wheastone, cujo braço ativo é a sonda, uma fonte de tensão e um servo - amplificador que mantém constante a temperatura no sensor ante as variações de velocidade do fluido. As sondas são resistências de tungstênio com uma cobertura de platina cujo diâmetro é 5  $\mu\text{m}$ .

No desenvolvimento do trabalho foram utilizados dois anemômetros diferentes; o anemômetro modelo 56C da Dantec com sondas muito pequenas (miniature), nas medições realizadas na UNNE, e o anemômetro modelo 1054A da TSI com sondas comuns no LAC.

#### 4.2.2 Calibração do anemômetro

O anemômetro de fio quente requer a calibração do sensor a utilizar na medição, que consiste em determinar a relação entre a tensão de saída da ponte e a velocidade do escoamento. Esta relação pode ser descrita mediante o ajuste de uma função conveniente ou mediante a expressão de Collis e Williams [Möller, 2000] dada por:

$$\bar{U} = [(E^2 - E_0^2) / B_c]^{1/n} \quad (4.1)$$

onde  $\bar{U}$  é a velocidade média do escoamento,  $E$  é a tensão de saída correspondente,  $E_0$  é a tensão correspondente a velocidade nula, enquanto  $B_c$  e  $n$  são as constantes de calibração. Esta expressão foi utilizada com o anemômetro 56C, em tanto que com o anemômetro 1054A simplesmente foi utilizado um polinômio de 3ª ordem.

O processo de calibração requer um dispositivo de calibração e um programa de ajuste que calcule as constantes de cada sonda. O aparelho de calibração dispõe de um bocal de descarga calibrado, que permite obter escoamentos estáveis a distintas velocidades. A sonda anemométrica é montada sobre esse bocal. Na Figura 4.5, é mostrado um exemplo da curva de calibração obtida para uma sonda miniatura do anemômetro 56C. Uma vez realizada a calibração, é possível analisar o desvio entre os

valores medidos e os calculados mediante as constantes de ajuste. Os erros calculados permitem conhecer o nível de exatidão que terão as posteriores medições.

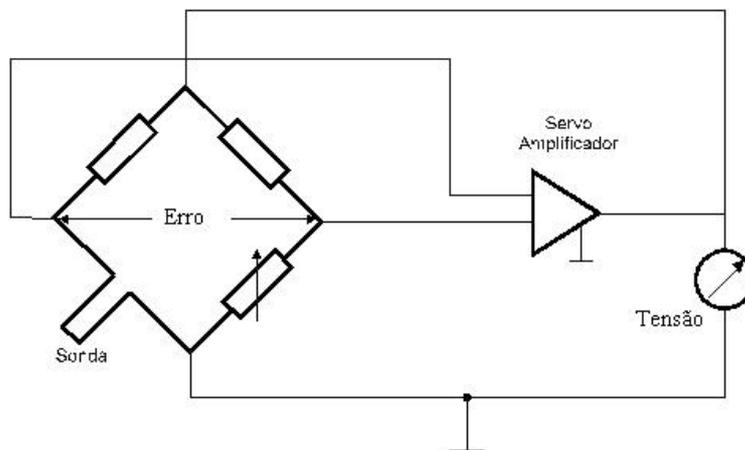


Figura 4.4. Diagrama elétrico do anemômetro a temperatura constante (Dantec CTA 56C).

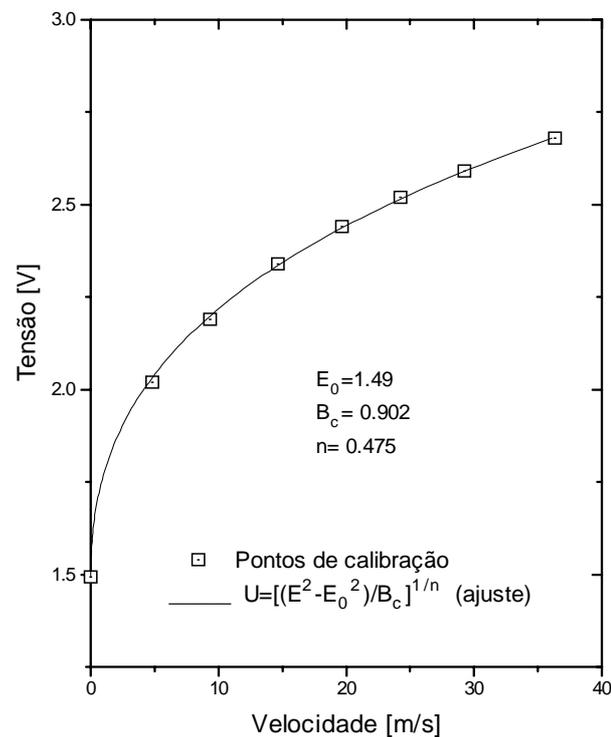


Figura 4.5. Curva de calibração de uma sonda anemométrica.

O sistema pode ser otimizado para a medição de flutuações de alta frequência. Para este fim, aplica-se uma tensão de onda quadrada à ponte de medição e ajusta-se o

---

ganho do instrumento. Este processo permite obter respostas para frequências de até 30 kHz com velocidades de 30 m/s.

### 4.2.3 Sistema de medição

Na Figura 4.6 é mostrada a cadeia de medição constituída pelo anemômetro de fio quente, um osciloscópio digital, um amplificador com filtros analógicos passa-baixa e passa-alta, uma placa conversora analógico-digital DAS-1600 e um multímetro digital. O voltímetro RMS mede diretamente o desvio padrão (ou valor RMS) das flutuações de tensão. O sistema permite a determinação de velocidades médias, intensidades de turbulência, funções de auto-correlação e espectros de potência.

Para a análise espectral e de auto-correlação, são obtidas as séries numéricas a partir da digitalização do sinal de saída do anemômetro, e depois, são processadas mediante programas computacionais. A filtragem do sinal evita o efeito de dobramento, que se manifesta provocando uma distorção do espectro, e permite melhorar a definição espectral nas faixas de frequência de maior interesse. Além disto, é possível amplificar várias vezes o sinal das flutuações antes da digitalização, com o conseqüente aumento da resolução.

É necessário assinalar que em vários dos ensaios, a aquisição dos dados será realizada sem utilizar esta cadeia de medição completa. Nestes casos, para o processamento dos dados e a análise dos resultados, deverão realizar-se considerações distintas às realizadas ao usar o sistema completo de medição.

## 4.3 Instrumental para a análise de processos de dispersão atmosférica

O estudo de processos de dispersão, a partir da modelagem em túnel de vento, requer medir a concentração de um gás determinado. O sistema de medição depende do tipo de gás que seja utilizado como traçador. Neste trabalho, foi usado o anemômetro de fio quente em combinação com uma sonda aspirante.

A partir do processo de calibração, a sonda aspirante permite determinar, de forma direta, valores de concentração em p.p.m (parte por milhão). No caso de uma

mistura binária, a concentração instantânea medida com a sonda aspirante mantém uma relação direta com a massa específica instantânea.

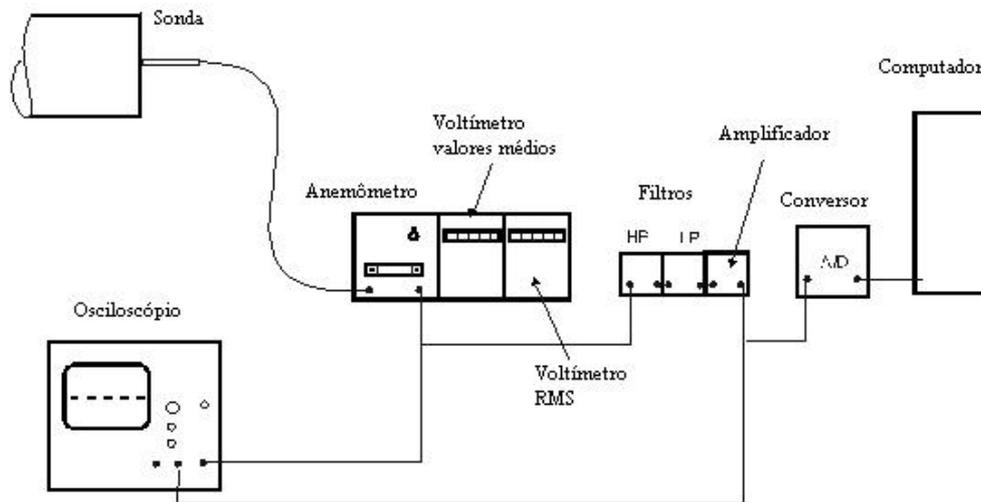


Figura 4.6. Sistema de medição anemométrico.

### 4.3.1 Mistura de gases

Vazões de gases conhecidos e misturas binárias de proporções determinadas são necessários não somente para poder simular corretamente os problemas e fenômenos de dispersão no túnel de vento, mas também para poder calibrar o instrumental de medição das concentrações.

Para obter misturas binárias de gases de velocidade e vazão fixos, foi utilizando o dispositivo da Figura 4.7. Este aparelho foi construído no Laboratório de Aerodinâmica das Construções da UFRGS, baseado no dispositivo utilizado em Grenoble nos trabalhos de Riva [1988] e Camaño Schettini [1996]. A mistura obtém-se mediante duas séries de orifícios de distintos diâmetros que funcionam como tubos sônicos. Cada uma das séries permite obter uma vazão exata de hélio e ar respectivamente, e com a interconexão no final do circuito é obtida a mistura exata. Foram construídos múltiplos tubos com orifícios calibrados de 0,50, 0,65, 0,75, 0,90, 1,00, 1,25 e 1,50 mm de diâmetro. Sendo que o dispositivo permite intercambiar os tubos, é possível obter uma gama de misturas muito ampla.

A relação entre as pressões nas regiões anterior e posterior à seção sônica,  $p_a / p_p$ , necessária para que se produza o bloqueio sônico, para número de Mach  $M = 1$ , pode ser calculada mediante a seguinte expressão:

$$\frac{p_a}{p_p} = \left( \frac{\gamma + 1}{\gamma} \right)^{\left( \frac{\gamma}{\gamma - 1} \right)} \quad (4.2)$$

Na Tabela 4.1 são mostradas as propriedades associadas ao escoamento sônico de ar e hélio, e obtidos os correspondentes valores da relação das pressões.

Tabela 4.1. Propriedades associadas a escoamentos sônicos.

Gás	$\gamma$ ( $C_p / C_v$ )	Velocidade do som (m/s)	$p_a / p_p$
Hélio	1,67	1005	2,05
Ar	1,40	340	1,89

Uma relação de pressões superior à calculada permite assegurar o bloqueio sônico. A vazão de massa pode ser obtida com a expressão [Camaño Schettini, 1996]:

$$Q_m = \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}} p_a \sum_i A_{e_i} \sqrt{\frac{\gamma}{RT_a}} \quad (4.3)$$

onde  $i$  é o índice que distingue os tubos,  $A_e$  é a seção efetiva de passagem e  $R$  é a constante do gás. O grau de exatidão do dispositivo de mistura depende do número de tubos sônicos e a precisão com que os orifícios são calibrados. Os erros relativos são maiores nos orifícios de menor diâmetro, neste caso 0,50 mm. A concentração mássica  $C$  correspondente a uma mistura de vazões conhecidos de hélio e ar,  $Q_m(He)$  e  $Q_m(Ar)$ , é calculada com a expressão:

$$C = \frac{Q_m(He)}{Q_m(He) + Q_m(Ar)} \quad (4.4)$$

### 4.3.2 A sonda aspirante

Para utilizar o anemômetro de fio quente na medição de concentrações de gás é necessário construir uma sonda na qual o fio quente seja sensível às variações de densidade do gás e insensível às variações de velocidade do escoamento exterior. Foi utilizada uma sonda aspirante constituída pelo fio quente do anemômetro e um tubo cerâmico (0,3 mm de diâmetro interno) ou de vidro de 0,8 mm de diâmetro interno (Figura 4.8) que, conectado a uma bomba de vácuo, permite medir as flutuações instantâneas de densidade ou concentração. O tubo capilar, conjuntamente com a aspiração, provoca o bloqueio sônico. O fio quente torna-se assim, um sensor que percebe as variações das propriedades térmicas do fluido no processo de transferência de calor, ou seja, que mede as variações de concentração do gás. Sendo que a pressão de sucção garante o bloqueio sônico, o dispositivo de aspiração (bomba de vácuo) não interfere na medição.

O fio quente mantém-se a temperatura constante, assim as variações de temperatura do gás constituem ruído no processo de medição. Quando são previstas variações da temperatura durante uma medição, é necessário considerar os efeitos que provocam nos resultados. Uma forma de levar em conta as variações de temperatura consiste em realizar calibrações da sonda aspirante a distintas temperaturas.

Considerando uma aproximação do escoamento de aspiração, foram obtidas as velocidades de entrada no tubo com bloqueio sônico para hélio e ar, sendo 454 e 159 m/s, respectivamente. Esses valores aproximados permitem estimar vazões volumétricas de  $3,21 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ , para o hélio, e  $1,12 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ , para o ar. Uma constante de tempo da ordem de 0,001 s foi estimada de forma teórica a partir do volume de aspiração e as velocidades do escoamento incidente que serão utilizadas nos ensaios.

Para calibrar a sonda foi utilizado o misturador de gases que permite prover misturas binárias conhecidas. Usando hélio e ar, podem-se realizar calibrações que permitirão a medição das concentrações e a análise dos processos de dispersão. A Figura 4.9 mostra um exemplo de calibração de uma sonda aspirante.

As concentrações mássicas  $C$  são obtidas com a equação 4.4 a partir da mistura de vazões conhecidos de hélio e ar. Considerando o intervalo completo, com a concentração variando de 0 até 1, a expressão polinomial de melhor ajuste:

$$C = 0,127E^4 - 2,461E^3 + 17,995E^2 - 58,499E + 71,166 \quad (4.5)$$

Entanto que quando só é considerado o intervalo parcial de 0 até 0,1, para a mesma sonda aspirante e condições de calibração semelhantes, é observada uma variação quadrática do tipo:

$$C = 0,159E^2 - 1,347E + 2,850 \quad (4.6)$$

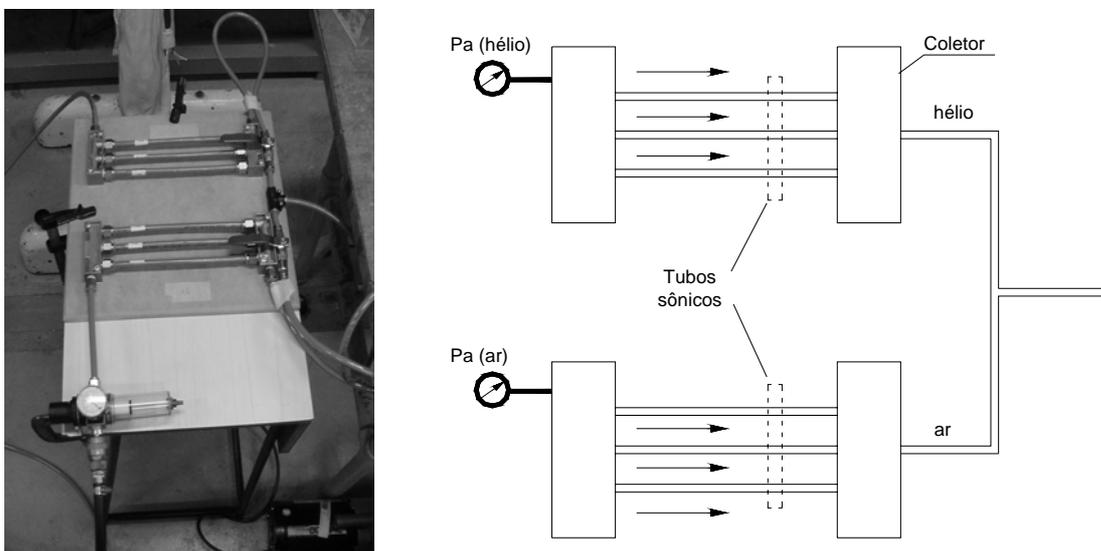


Figura 4.7. Misturador de gases.

Finalmente, quando a calibração é feita considerando valores da concentração ainda menores, o comportamento tende a ser linear. Este comportamento foi observado por outros autores na avaliação de uma sonda aspirante.

Realizar estudos confiáveis implica avaliar a resposta estática e dinâmica da sonda. A resposta estática avalia-se medindo a tensão de saída do anemômetro enquanto mantém-se constante a densidade do gás e modifica-se a velocidade do escoamento. A segurança na resposta estática é garantida quando tensão permanece constante.

A resposta dinâmica pode-se analisar construindo espectros de densidade ou concentração. Os resultados obtidos por Camaño Schettini [1996] para um jato coaxial

hélio - ar, utilizando diferentes freqüências de aquisição (5, 10 e 20 kHz) garantem a resposta dinâmica deste tipo de sonda até freqüências superiores a 1 kHz. As escalas características nos túneis de vento normalmente não requerem a análise das freqüências maiores do que 1 kHz, sendo inclusive no caso das flutuações de concentração feita a análise até freqüências de 500 Hz.

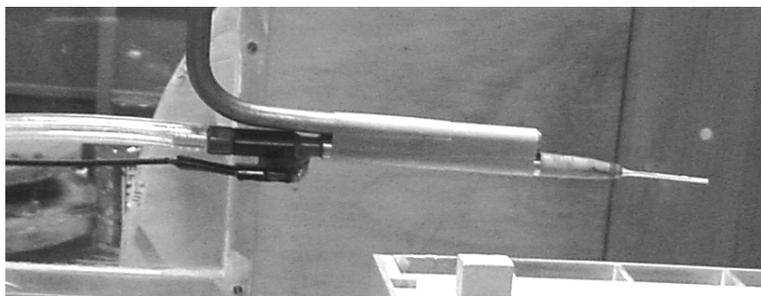
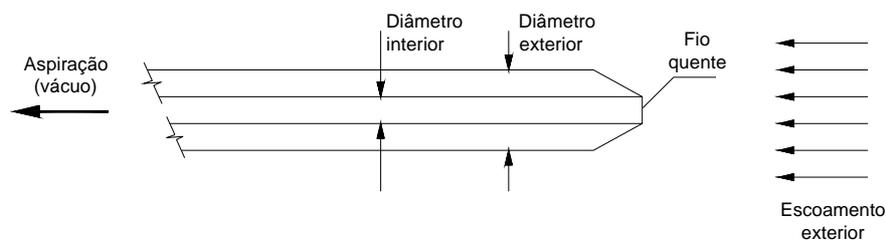


Figura 4.8. Sonda aspirante.

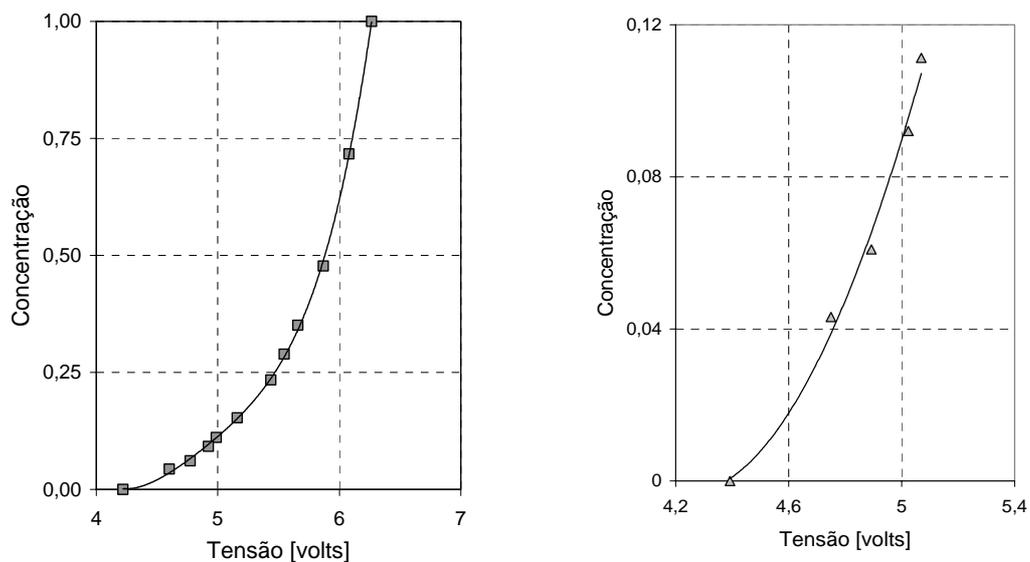


Figura 4.9. Curvas de calibração de uma sonda aspirante.

Durante os testes, em cada ponto de medição foi medida também a temperatura. No caso das medições com anemômetro de fio quente, foram estabelecidas as correções correspondentes. Diversas avaliações foram realizadas nos primeiros testes da sonda aspirante, incluindo verificações dos níveis de flutuações do sinal quando submetida a escoamentos de ar ou hélio puro.

## 5 Estudos experimentais de escoamentos de camada limite

Neste capítulo são apresentados resultados obtidos da análise experimental de escoamentos turbulentos de camada limite. Na primeira parte são mostrados os resultados obtidos da modelagem da camada limite atmosférica em túnel de vento a baixa velocidade para três situações diferentes. Logo depois, para uma das situações são determinados os parâmetros do perfil de velocidades, incluindo o parâmetro de rugosidade e a velocidade de cisalhamento, que permitem estabelecer o limite na utilização de uma simulação da CLA para estudos de dispersão. Uma análise espectral do escoamento na camada atmosférica superficial a partir de dados coletados em dezembro de 2003 no estado de Rio Grande do Sul, Brasil, é realizado para comparar os resultados com as simulações de escoamento no túnel de vento e com expressões da literatura. Finalmente, é determinado o valor da constante de Kolmogorov a partir de dados experimentais de túnel de vento e da atmosfera, com o objetivo de verificar seu comportamento com relação à variação do número de Reynolds.

### 5.1 Modelagem física do vento atmosférico a velocidade muito baixa

No capítulo 3 foi descrito o processo de simulação da camada limite atmosférica em túneis de vento. Foi analisada, também, a forma de avaliar as características do escoamento simulado. Nos estudos de cargas aerodinâmicas, geralmente, são empregadas velocidades altas, mas nos estudos de dispersão atmosférica é necessário utilizar velocidades mais baixas para cumprir com os requerimentos de semelhança. Às vezes, nestes escoamentos a velocidades muito baixas, manifestam-se flutuações de baixa frequência que perturbam as características da simulação da camada limite. Por isto, é necessário realizar algumas avaliações adicionais e comparações com dados atmosféricos que permitam determinar a qualidade da simulação. Neste caso, avaliam-se as características de escoamentos turbulentos de camada limite que reproduz a camada atmosférica superficial em condição de estabilidade neutra. As velocidades médias são inferiores a 4 m/s. São analisadas simulações da CLA realizadas em três túneis diferentes e, por tanto, com escalas de simulação diferentes. Os resultados são

---

comparados com dados atmosféricos e com os resultados das próprias simulações a velocidades altas.

### 5.1.1 Descrição dos experimentos

#### ***Simulação da CLA de expoente $\alpha = 0,16$***

Estes experimentos foram realizados no túnel de vento de camada limite “Jacek P. Gorecki” da Universidad Nacional del Nordeste, Argentina, descrito no capítulo anterior. Para simular a camada limite atmosférica, foram empregados elementos de rugosidade e dispositivos de mistura apropriados para reproduzir uma camada limite neutralmente estável [Standen, 1972]. Na Figura 5.1, podem-se ver os elementos de rugosidade e as agulhas truncadas que permitiram simular a camada limite superficial correspondente a um terreno rural, com uma escala de aproximadamente 1:150. As agulhas do tipo Irwin têm uma altura de 1,30 m e uma descrição detalhada pode encontrar-se no trabalho de Wittwer & Möller [2000]. O escoamento turbulento simulado no túnel de vento é avaliado medindo a distribuição de velocidades médias e os parâmetros turbulentos. Para descrever a turbulência, são utilizados espectros de potência, funções de correlação e distribuições de probabilidade. Em geral, na avaliação experimental dos escoamentos, são determinadas outras características relacionadas com as anteriores, como a intensidade de turbulência, a função de auto-correlação e a escala integral da turbulência. A descrição destes parâmetros e funções foi realizada no capítulo 2.

Para a medição de velocidades médias e flutuantes, foi utilizado o sistema anemométrico da Figura 4.6 (capítulo 4). Este sistema permite a determinação de velocidades médias, intensidades de turbulência, funções de auto-correlação e espectros de potência. Para a análise espectral e de auto-correlação, são obtidas as séries numéricas a partir da digitalização do sinal de saída do anemômetro, que finalmente são processadas mediante programas computacionais.

#### ***Simulação da CLA de expoente $\alpha = 0,25$ - túnel TV2***

Os testes correspondentes a esta simulação foram realizados no túnel de vento (TV2) recentemente construído na Universidad Nacional del Nordeste, Argentina. É um

túnel de circuito aberto de 7,50 m de comprimento, a câmara de testes tem uma seção quadrada de 0,48 m de lado.



Figura 5.1. Elementos de rugosidade e simuladores de Standen utilizados na simulação parcial  $\alpha = 0,16$ .

O tipo de vento a reproduzir corresponde a um terreno da categoria IV, conforme a definição da norma NBR- 6123/1988: terreno coberto por numerosos obstáculos pouco espaçados em zona de floresta, industrial o urbanizada. A altura média dos obstáculos é 10 m. Para a categoria analisada os valores característicos são; expoente  $\alpha = 0,25$ , altura de rugosidade  $z_0 = 0,7 - 1$  m e altura gradiente  $z_g = 420$  m.

A espessura da camada limite 0,36 m, a uma distância  $6 \times h$  a sotavento das agulhas, sendo  $h$  a altura da seção transversal da câmara do túnel, foi estabelecida a partir dos resultados obtidos do relevamento em vazio, de forma que não exista a influência da camada limite natural desenvolvida no teto do túnel. As agulhas empregadas na simulação são truncadas a uma altura determinada e as dimensões foram obtidas mediante as expressões citadas por Irwin [1969].

### ***Simulação total da CLA de expoente $\alpha = 0,23$***

Os experimentos foram realizados no túnel de vento de camada limite “Joaquim Blessmann” da UFRGS, descrito no capítulo anterior. Foram empregados elementos de rugosidade e dispositivos de mistura apropriados para reproduzir um escoamento de

camada limite neutralmente estável. Os elementos de rugosidade e as agulhas perfuradas [Blessmann, 1982] utilizadas para simular a camada limite superficial que se desenvolve em um terreno suburbano são mostrados na Figura 5.3. A escala de simulação é aproximadamente 1: 350.

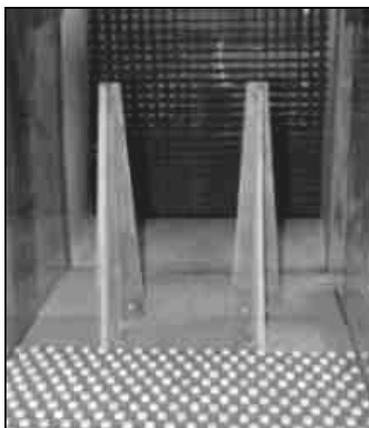


Figura 5.2. Elementos de rugosidade e simuladores utilizados na simulação parcial no TV2.

Neste caso, a diferencia dos casos anteriores, tenta-se simular a camada limite completa que se desenvolve em um terreno suburbano em condição de estabilidade neutra da atmosfera. Os dispositivos de simulação são diferentes, gerando menor turbulência na parte superior e permitindo obter um fator de escala de simulação maior do que se obtém na simulação parcial.

A avaliação do escoamento turbulento simulado no túnel de vento se realiza medindo as velocidades médias e os parâmetros turbulentos. São determinadas perfis de velocidade e intensidade de turbulência, espectros de potencia, funções de auto-correlação e a escalas da turbulência. As medições de velocidades médias e flutuantes foram realizadas com um sistema anemométrico TSI similar ao da Figura 4.6 (capítulo 4), só que não foram utilizados filtros para o sinal.

### 5.1.2 Resultados obtidos na simulação de expoente $\alpha = 0,16$

A seguir, são apresentadas as distribuições de velocidade média, intensidade de turbulência, espectros e funções de auto-correlação, obtidos no escoamento turbulento da simulação parcial de uma camada limite atmosférica, correspondente a um terreno

rural. Os testes foram realizados com velocidades médias menores do que 2,5 m/s. Com fins comparativos são mostrados os resultados obtidos utilizando velocidades médias mais elevadas.

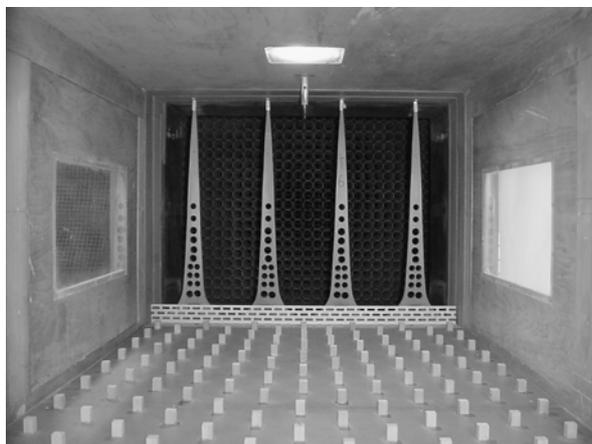


Figura 5.3. Elementos de rugosidade e simuladores de tipo agulhas perfuradas na simulação total de expoente  $\alpha = 0,23$ .

Na Figura 5.4, mostra-se o perfil adimensional de velocidades médias correspondente e, conjuntamente, um perfil medido a alta velocidade. A altura de referência  $z_{ref}$  está determinada pelo ponto de medição de maior altura desde o piso do túnel, 779 mm, e as correspondentes velocidades  $U_{ref}$  são 2,3 m/s e 24,5 m/s, respectivamente. Indica-se também, a curva representativa da lei potencial de velocidades para o expoente  $\alpha = 0,16$ . Na mesma figura, à direita, são apresentados os perfis de intensidade de turbulência correspondentes às mesmas medições, só que, a alta velocidade, foram determinados os valores em 4 pontos unicamente.

A Figura 5.5 mostra os espectros de potência (funções de densidade espectral) e as funções de auto-correlação, obtidas em três posições (1, 2 e 3), situadas a 83, 207 e 500 mm desde o piso do túnel, respectivamente. Também se mostra, com fins comparativos, um espectro obtido a alta velocidade. É apreciável a diferença de energia entre ambos os espectros, e a redução do intervalo de frequências em que as flutuações são perceptíveis pelo sistema de medição a baixa velocidade. Contudo, a região inercial, de declividade de  $-5/3$  nesta representação bi-logaritmica, está claramente definida em ambos os casos. As funções de auto-correlação  $C_{uu}$ , a partir da velocidade média, permitem calcular a escala integral  $L_u$ .

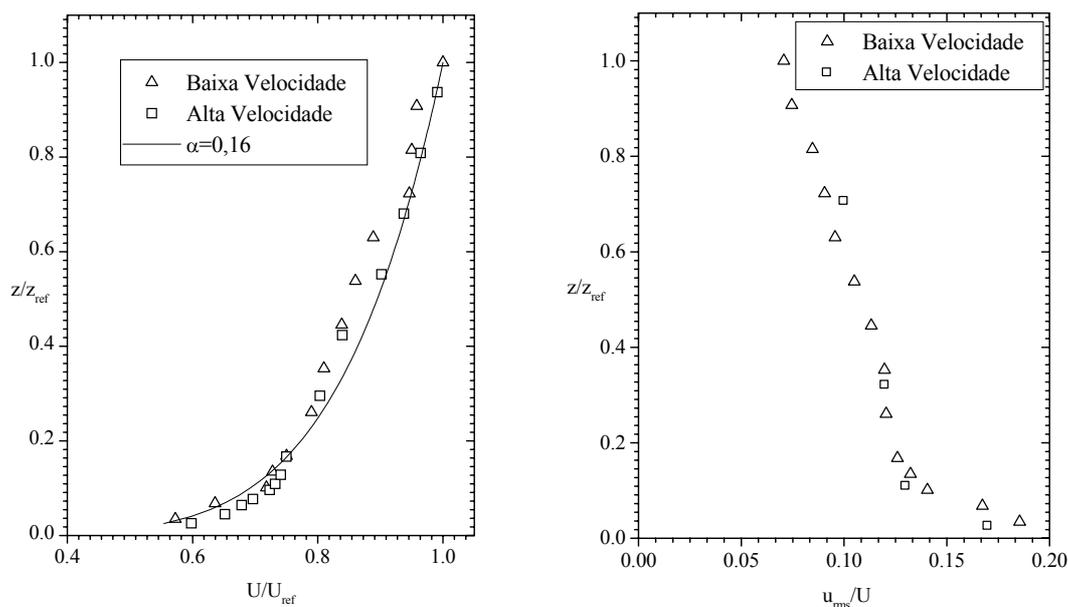


Figura 5.4. Perfis de velocidade média e intensidade de turbulência.

Nas Figuras 5.6 e 5.7 compara-se um dos espectros medidos no túnel de vento, expresso adimensionalmente, com os espectros atmosféricos de Davenport e ESDU (Eng. Sciences Data Unit), de acordo a Blessmann [1995]. A comparação com o espectro de Davenport, permite conhecer a relação do número de onda modelo - protótipo na região de interesse do espectro e, conhecendo a relação de velocidades, é possível determinar a escala de tempo ou de frequência que permite a translação dos resultados de modelo a protótipo. A comparação com o espectro da ESDU, permite ver o grau de ajuste dos valores medidos com os valores atmosféricos. Embora as figuras apresentem os resultados na posição 1, a mesma análise foi realizada nas duas posições restantes com resultados semelhantes.

O espectro da Figura 5.8 corresponde à posição 3 e está construído mediante a técnica de justaposição de espectros parciais [Möller, 1988]. Com o objetivo de ter uma melhor resolução em todo o intervalo de frequências, e poder determinar se não existem ondas de frequência definida que perturbem a reprodução da camada limite, foram utilizadas 5 amostras (A, B, C, D e E). É possível apreciar que, ainda nas frequências mais baixas, não existem picos indicando flutuações excessivas. Na Tabela 5.1, são resumidas as características de cada uma das amostras digitalizadas para obter o espectro completo.

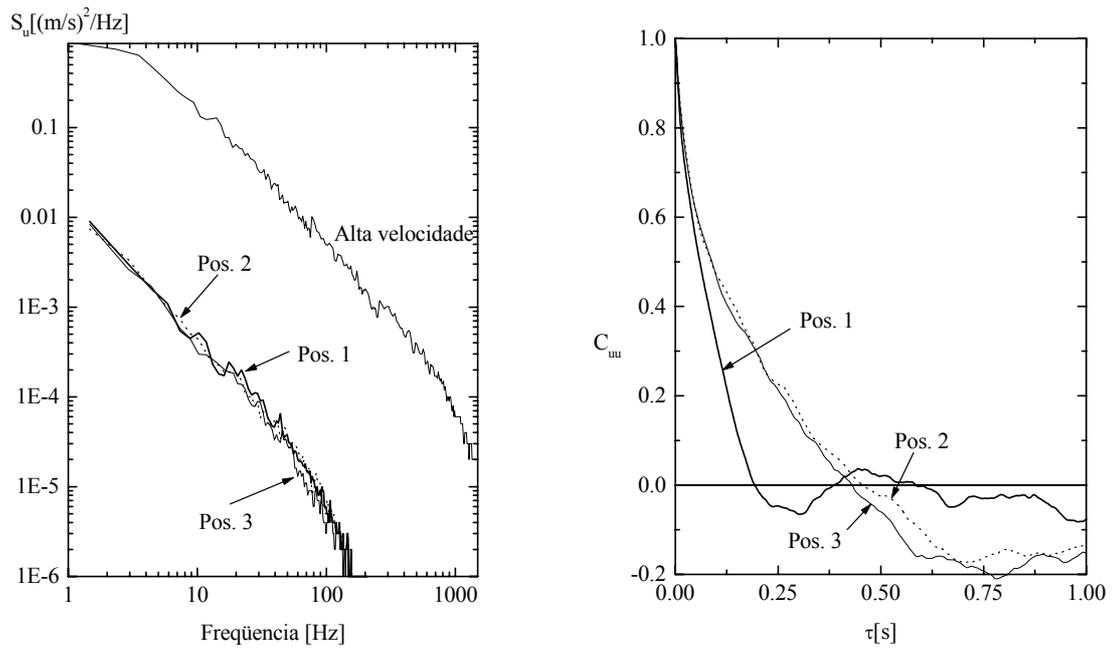


Figura 5.5. Espectros de potência e funções de auto-correlação.

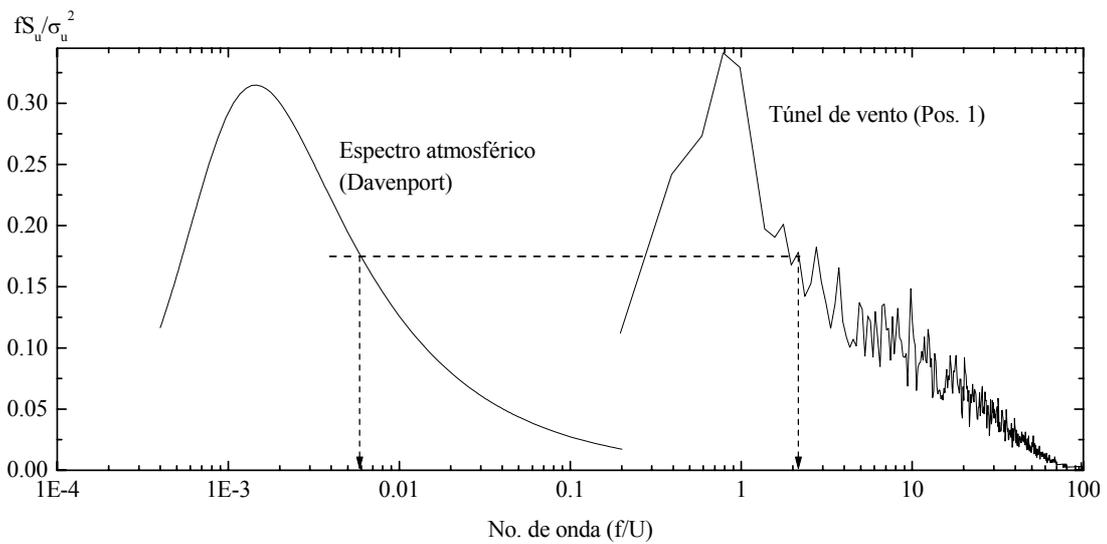


Figura 5.6. Comparação com o espectro atmosférico de Davenport.

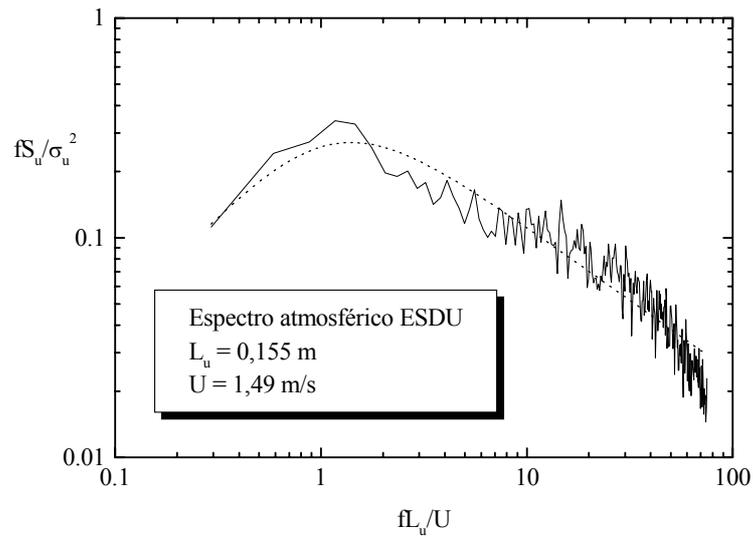


Figura 5.7. Comparação com o espectro atmosférico de ESDU.

Tabela 5.1. Características da digitalização das amostras para o espectro estendido.

Espectros parciais	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
<i>Filtro LP [Hz]</i>	1	3	10	30	100
<i>Freq. aquisição [Hz]</i>	3	9	30	90	300
<i>No. de pontos</i>	900	1800	6000	18000	30000
<i>Tempo de registro [s]</i>	300	200	200	200	100

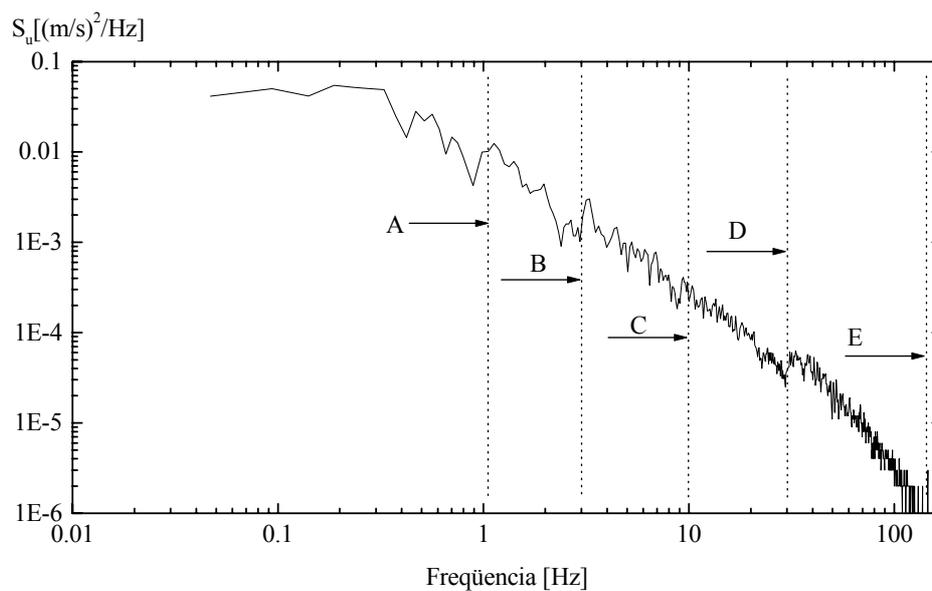


Figura 5.8. Espectro estendido.

### 5.1.3 Resultados na simulação de expoente $\alpha = 0,25$ - túnel TV2

A apresentação dos resultados é mais geral que na simulação anterior sem uma análise espectral detalhado. Na Figura 5.9 são mostrados os perfis adimensionais obtidos com escoamentos a alta e baixa velocidade na simulação descrita no parágrafo 5.2. Com alta velocidade, na posição de referencia  $z = 280$  mm, a velocidade média é  $U_{ref} = 18,40$  m/s, enquanto que a velocidade baixa é  $U_{ref} = 1,27$  m/s. Simultaneamente é indicado o perfil obtido a partir da lei potencial de velocidade com expoente  $\alpha = 0,25$ . A configuração dos perfis é semelhante, só que os valores experimentais a baixa velocidade, na forma adimensional, são um pouco menores.

Na Figura 5.10 são apresentados os correspondentes perfis de intensidade de turbulência. Igual que no caso das velocidades médias, a configuração dos perfis é semelhante só que neste caso os valores da intensidade de turbulência são maiores a baixa velocidade. Sendo que são apresentados os valores da intensidade local de turbulência, a variação principalmente é produto da diminuição relativa da velocidade média. Com estas distribuições dos valores experimentais, pode-se obter uma lei de variação logarítmica das intensidades de turbulência da forma

$$I_u = A_a \ln(z) + B_a, \quad (5.1)$$

sendo  $A_a$  e  $B_a$  as constantes de ajuste.

Os espectros das flutuações de velocidade obtidos em duas posições diferentes,  $z = 40$  mm e  $z = 155$  mm respectivamente, são mostrados na Figura 5.11. As características principais da amostragem e das funções de densidade espectral são resumidas na tabela 5.2. A baixa velocidade, o intervalo de definição em frequências da sub-região inercial é menor do que a alta velocidade, onde alcança as duas décadas. Assim mesmo, os conteúdos de energia do espectro são menores a baixa velocidade.

Tabela 5.2. Características da amostragem e dos espectros.

Espectros	No. total de valores	No. de blocos	Valores por bloco	Freq. aquisição [Hz]	Intervalo de freq. [Hz]
<i>Alta veloc.</i>	90000	42	2048	3000	1,465
<i>Baixa veloc.</i>	90000	42	2048	900	0,439

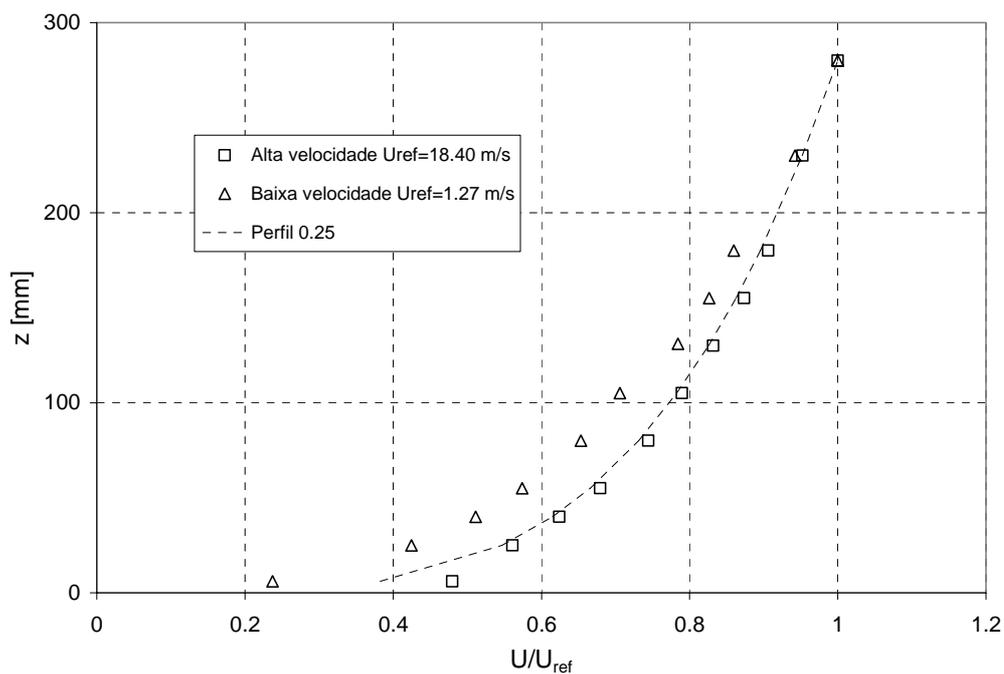


Figura 5.9. Perfis de velocidade média na simulação parcial da CLA no túnel de vento TV2.

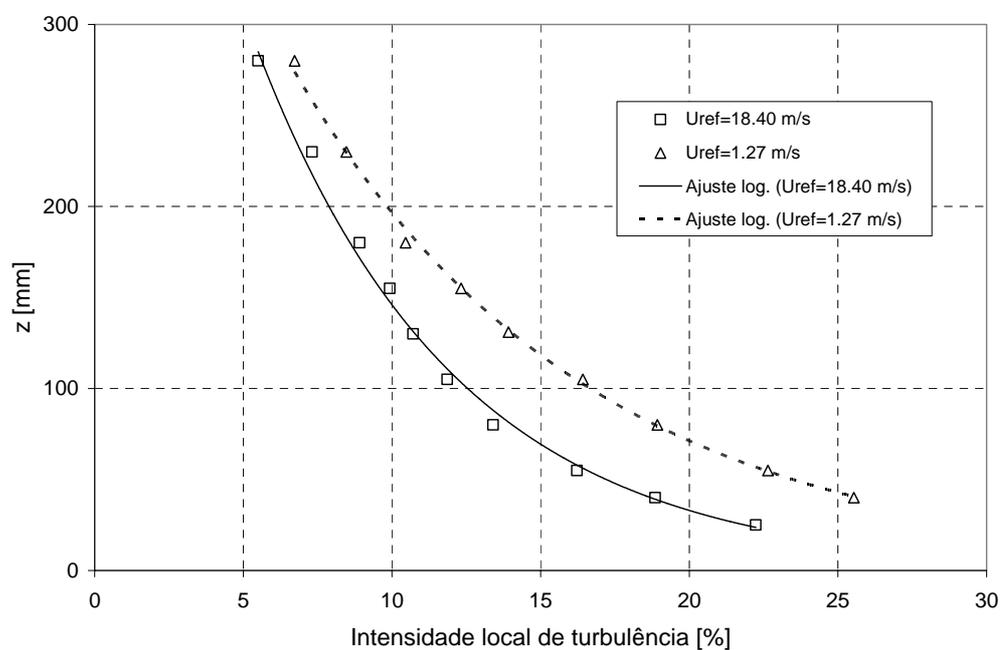


Figura 5.10. Perfis de intensidade local de turbulência na simulação parcial da CLA no túnel de vento TV2.

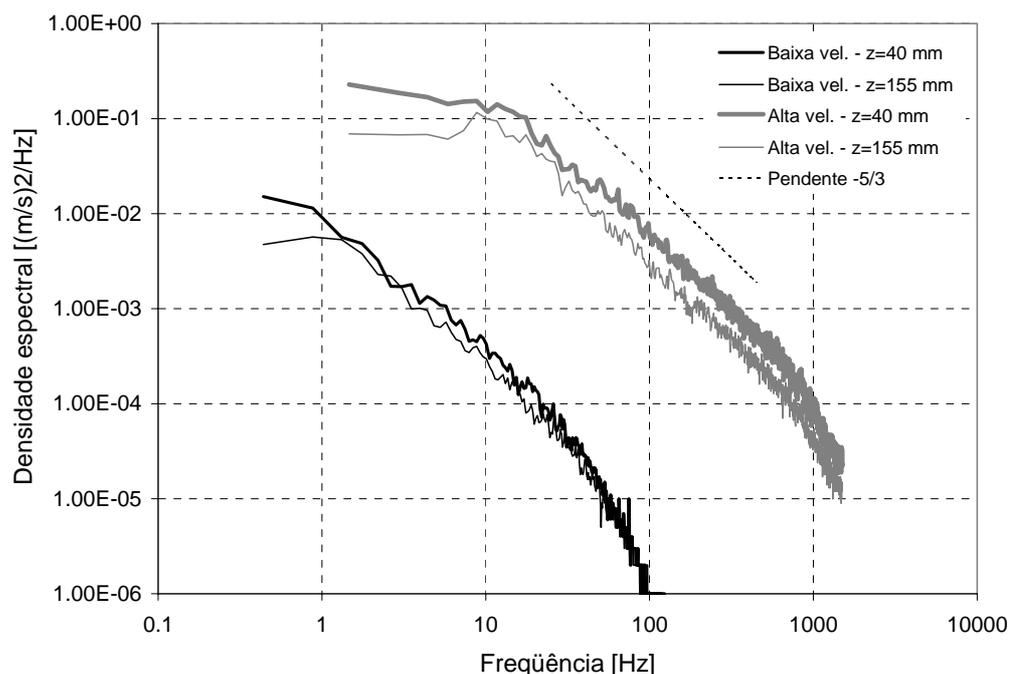


Figura 5.11. Espectros das flutuações de velocidade na simulação parcial da CLA no túnel de vento TV2.

#### 5.1.4 Resultados na Simulação de expoente $\alpha = 0,23$

Igual que no caso da simulação anterior no túnel de vento TV2, os resultados são apresentados de forma bastante geral sem uma análise espectral detalhado. A Figura 5.12 mostra os perfis adimensionais obtidos com escoamento a alta velocidade e dois casos com escoamento a velocidade baixa. A alta velocidade, na posição de referencia  $z = 450$  mm, a velocidade média é aproximadamente 40 m/s, enquanto que a velocidade baixa os valores são  $U_{ref} = 0,96$  e 3,44 m/s, respectivamente. Simultaneamente é indicado o perfil obtido a partir da lei potencial de velocidade com expoente 0,23. Os valores experimentais a baixa velocidade são semelhantes aos de alta velocidade com algum desvio no caso de menor velocidade ( $U_{ref} = 0,96$  m/s).

Os correspondentes valores da intensidade de turbulência são apresentados na Figura 5.13. Igual que no caso das velocidades médias, a configuração dos perfis é semelhante só que neste caso os valores da intensidade de turbulência são maiores no caso de  $U_{ref} = 3,44$  m/s, e apresentando desvios no caso de  $U_{ref} = 0,96$  m/s. Sendo que são apresentados os valores da intensidade local de turbulência, a variação

principalmente é produto da diminuição relativa da velocidade média. Com os valores experimentais, neste caso a partir do ajuste pode-se obter uma lei de variação exponencial das intensidades de turbulência da forma

$$I_u = C_a e^{D_a z}, \quad (5.2)$$

sendo  $C_a$  e  $D_a$  as constantes de ajuste.

Os espectros de potencia foram obtidos em duas posições diferentes,  $z = 150$  mm e  $z = 350$  mm respectivamente, e são mostrados na Figura 5.14 só para as velocidades baixas ( $U_{ref} = 0,96$  e  $3,44$  m/s). Na tabela 5.3 são indicadas as características principais utilizadas para esta análise. O escoamento a velocidade mais baixa ( $U_{ref} = 0,96$  m/s) apresenta uma pobre definição da sub-região inercial, em tanto que a energia das flutuações é menor que no escoamento caracterizado pela velocidade  $U_{ref} = 3,44$  m/s.

Tabela 5.3. Características da amostragem e dos espectros na simulação total  $\alpha = 0,23$ .

Espectros	No. total de valores	No. de blocos	Valores por bloco	Freq. aquisição [Hz]	Intervalo de freq. [Hz]
$U_{ref} = 0,96$ m/s	61440	60	1024	1024	1
$U_{ref} = 3,44$ m/s	30720	30	1024	1024	1

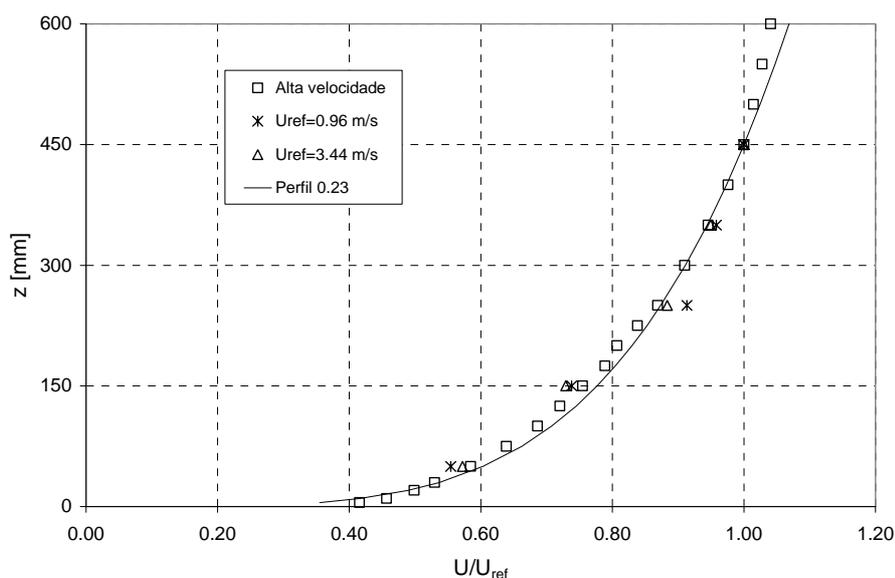


Figura 5.12. Perfis de velocidade média na simulação total da CLA no túnel de vento “Joaquim Blessmann”.

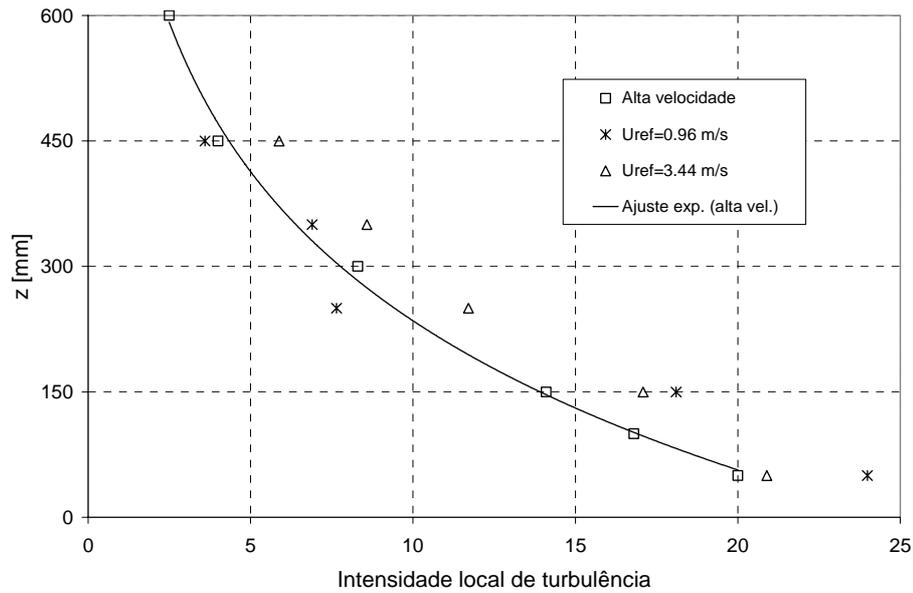


Figura 5.13. Intensidade local de turbulência na simulação total da CLA no túnel de vento “Joaquim Blessmann”.

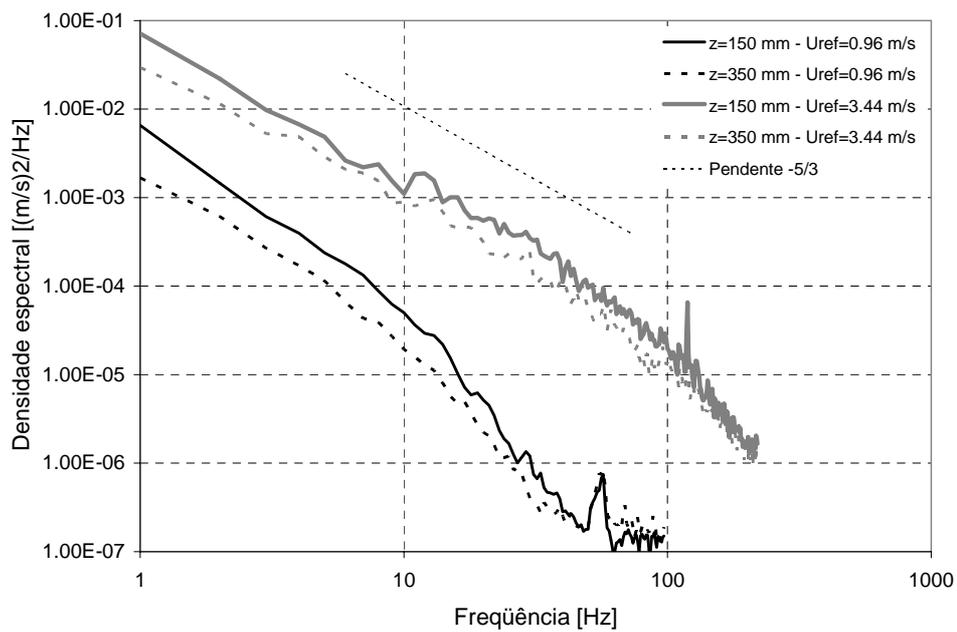


Figura 5.14. Espectros das flutuações de velocidade na simulação total da CLA no túnel de vento “Joaquim Blessmann”.

### 5.1.5 Avaliação geral das simulações de camada limite atmosférica

Foram avaliadas as características de diferentes escoamentos de camada limite atmosférica simulados em túneis de vento e feitas comparações dos resultados obtidos a velocidade relativamente alta e muito baixa. A análise tem como objetivo a avaliação da reprodução do vento atmosférico em condição de estabilidade neutra para estudos de dispersão que requerem baixa velocidade.

No primeiro caso da simulação rural de perfil  $\alpha = 0,16$ , desenvolvida no túnel de vento “J. P. Gorecki”, os perfis e parâmetros adimensionais que caracterizam a camada limite turbulenta, não sofrem modificações significativas a baixas velocidades. As comparações indicam que os espectros medidos são adequados aos valores atmosféricos. Uma análise espectral mais detalhada permite dizer que não existem flutuações excessivas no intervalo das frequências mais baixas.

Na simulação parcial da CLA correspondente a um perfil  $\alpha = 0,25$  no túnel de vento TV2, os valores relativos das velocidades médias são menores a baixa velocidade, afetando também as intensidades de turbulência, ainda que a configuração dos perfis seja adequada. Na análise da simulação da espessura total da CLA com perfil  $\alpha = 0,23$ , realizada no túnel de vento “Joaquim Blessmann”, devem considerar-se os dois casos separadamente; a velocidade mais baixa ( $U_{ref} = 0,96$  m/s) o comportamento geral do escoamento se afasta dos valores que acontecem a velocidade alta, enquanto que no caso de  $U_{ref} = 3,44$  m/s o comportamento pode ser considerado bom.

## 5.2 Cálculo dos parâmetros do perfil do vento

Considerando que na camada superficial da atmosfera em condição de estabilidade neutra o perfil de velocidade segue a lei de Prandtl, a velocidade média é dada por

$$\frac{\bar{U}(z)}{u^*} = \frac{1}{k} \ln \frac{z - z_d}{z_0}. \quad (5.3)$$

Esta lei universal é utilizada em túneis de vento e na atmosfera, e é aplicada para estimar o parâmetro de rugosidade  $z_0$  e a velocidade de cisalhamento  $u^*$  mediante o ajuste da equação aos valores experimentais. A escala integral pode ser determinada a partir da função de autocorrelação ou do ajuste do espectro medido ao espectro atmosférico. Estes parâmetros permitem obter o fator de escala da simulação e o número de Reynolds de rugosidade a partir dos quais se estabelecem limites para a modelagem dos processos de dispersão utilizando estas simulações da CLA.

### 5.2.1 Metodologia

Existem diferentes formas de obter os parâmetros  $z_0$  e  $u^*$ . No caso de escoamentos de camada limite em túnel de vento, conhecendo o fator de escala da simulação e o expoente do perfil de velocidades, a partir dos valores correspondentes de  $z_0$  na atmosfera obtidos da literatura, é possível estimar o  $z_0$  do perfil. Finalmente, mediante o ajuste a lei logarítmica se calcula  $u^*$ .

Um método alternativo consiste em medir as tensões de Reynolds para obter  $u^*$  e então determinar  $z_0$ . Na medição das tensões de Reynolds é necessário utilizar um anemômetro de dois canais com uma sonda tipo “X”. O método de regressão simples pode ser utilizado, mas a estimação simultânea de ambos os parâmetros e o deslocamento do plano zero  $z_d$  geralmente provoca grandes erros.

Neste caso se utiliza um novo método baseado na medição o perfil de intensidade de turbulência para calcular o parâmetro  $z_0$  [Liu et al., 2003]. O cálculo é realizado usando a expressão empírica dada pela ESDU (Engineering Science Data Unit) para a variação da intensidade de turbulência até 100 m de altura na atmosfera:

$$\frac{\sigma_u}{U} = \frac{(0,867 + 0,556 \log_{10} z - 0,246 \log_{10}^2 z)}{\ln(z/z_0)} B, \quad (5.4)$$

onde  $B = 1,0$  para  $z_0 \leq 0,02$  m,

$B = 0,76 z_0^{-0,07}$  para  $0,02$  m  $\leq z_0 \leq 1,0$  m,

$B = 0,76$  para  $z_0 \geq 1,0$  m.

O método foi implementado com os dados correspondentes à simulação da CLA de expoente  $\alpha = 0,25$  no túnel de vento TV2 (Figuras 5.9 e 5.10). O fator de escala da simulação, de acordo com o procedimento de Cook [1978], é variável com a altura, mas foi estabelecido o valor 1 : 800. Na atmosfera, a camada inferior onde as tensões de corte permanecem constantes na qual é aplicável a lei de Prandtl estende-se até cerca de 100 m. Os valores experimentais correspondentes no túnel de vento são os obtidos nas posições inferiores a 120 mm.

A Figura 5.15, à direita, mostra a variação da velocidade média com a altura no experimento a baixa velocidade ( $U_{ref} = 1,27$  m/s). Extrapolando o perfil logarítmico, onde a velocidade  $U$  se torna zero, a altura é  $z_d + z_0$  acima do piso. O resultado é  $z_d + z_0 \approx 3$  mm.

À esquerda, nesta figura, se indica o método para calcular o comprimento de rugosidade superficial  $z_0$ . Mediante o fator de escala da simulação, os dados medidos no túnel de vento são levados à escala atmosférica. Usando a equação (5.4) são representados três perfis correspondentes a  $\sigma_u/U$ ,  $1,15\sigma_u/U$  e  $0,85\sigma_u/U$  para diferentes valores de  $z_0$ , obtendo por comparação o valor de  $z_0$  mais apropriado para os dados experimentais. As três curvas indicadas na figura correspondem a  $z_0 = 1,6$  m, então o  $z_0$  para os dados do túnel de vento é aproximadamente 2 mm. Utilizando este valor de  $z_0$  e o valor do deslocamento do plano zero calculado como  $z_d = 3$  mm –  $z_0 = 1$  mm.

Os valores de  $z_0$  e  $z_d$  calculados permitem estimar, a partir do melhor ajuste da equação (5.3) aos dados de velocidade média, a velocidade de cisalhamento  $u^* = 0,09$  m/s. A Figura 5.16 mostra a concordância dos valores experimentais com o perfil correspondente à lei de Prandtl expressa como:

$$kU/u^* = \ln \left[ \frac{(z - z_d)}{z_0} \right]. \quad (5.5)$$

Os resultados obtidos indicam que este novo método de obtenção dos parâmetros característicos do perfil logarítmico é apropriado, e as estimações de  $z_0$  e  $u^*$  são mais consistentes e estáveis comparadas com as obtidas usando o método de regressão simples. Deve ser lembrado que o método utiliza valores experimentais de intensidade

de turbulência longitudinal que podem ser obtidos com uma sonda simples no anemômetro de fio quente.

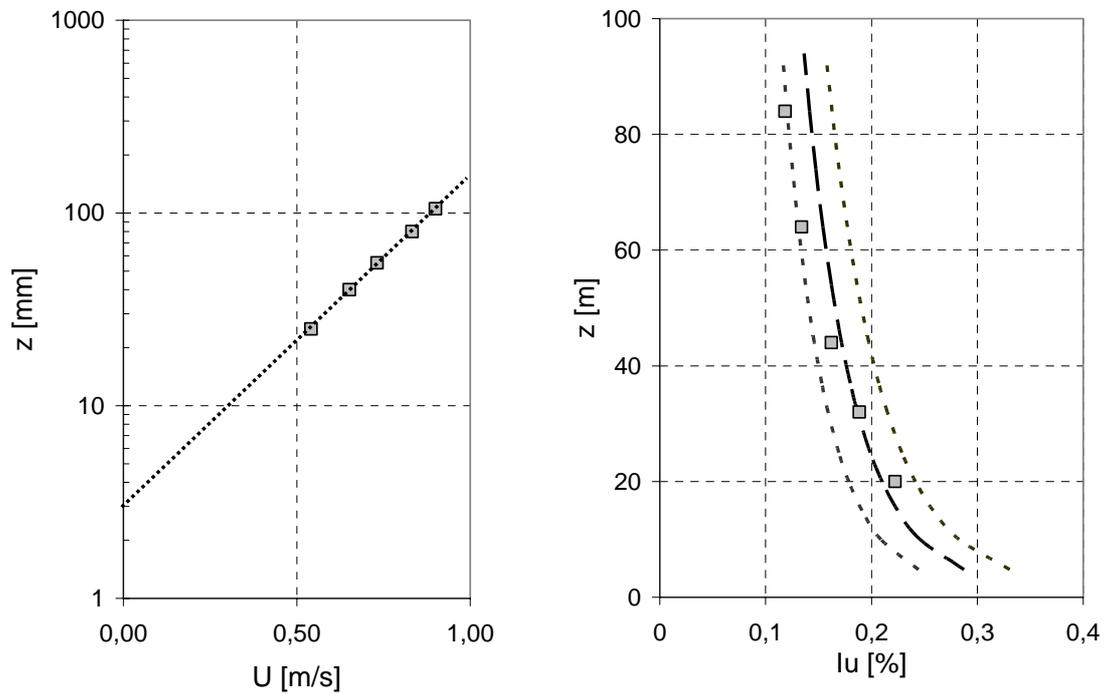


Figura 5.15. Perfis de velocidade média e intensidade de turbulência.

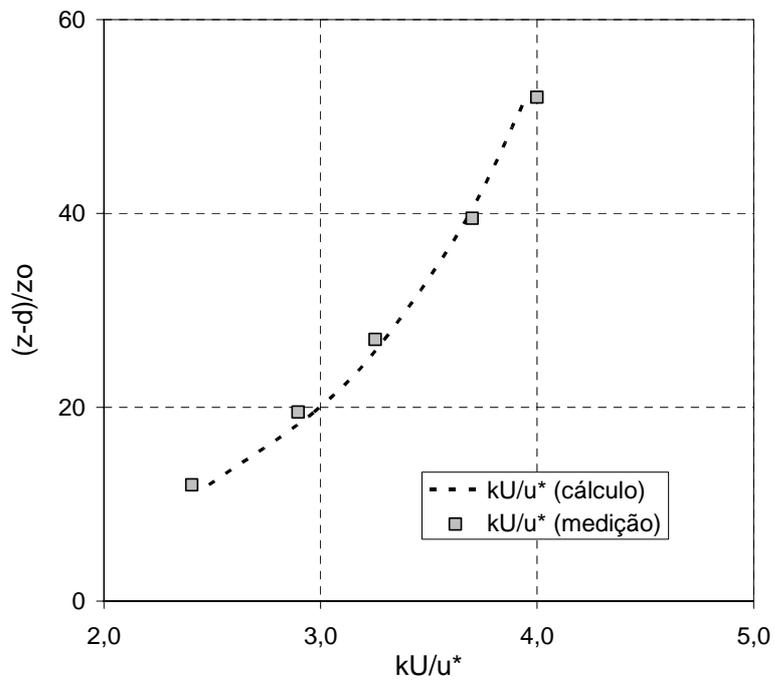


Figura 5.16. Comparação do perfil logarítmico com os dados experimentais.

### 5.2.2 Número de Reynolds da rugosidade

A determinação do comprimento de rugosidade  $z_0$  e da velocidade de cisalhamento  $u^*$  é utilizada para calcular o número de Reynolds de rugosidade

$$Re_z = u_* z_0 / \nu. \quad (5.6)$$

Este parâmetro adimensional se usa para estabelecer a validade na simulação do escoamento de camada limite, sendo o limite  $Re_z > 1$  [Robins et al., 2001]. A simulação da CLA de expoente  $\alpha = 0,25$  no túnel de vento TV2 a baixa velocidade resulta bastante crítica. Os valores do comprimento de rugosidade  $z_0$  e da velocidade de cisalhamento  $u^*$  são pequenos devido à pequena escala e a baixa velocidade. Contudo, o número de Reynolds obtido é maior do que o limite inferior estabelecido. Na tabela 5.4 são indicados os valores  $Re_z$  estimados para as três simulações de CLA na situação mais crítica ou com menor velocidade, observando-se a independência do número de Reynolds.

Tabela 5.4. Valores do número de Reynolds de rugosidade.

<i>Simulação da CLA</i>	$U_{ref}$ (m/s)	$Re_z$
$\alpha = 0,16$	2,30	2,2
$\alpha = 0,25$	1,27	2,2
$\alpha = 0,23$	0,96	3,9

### 5.3 Análise do escoamento na camada atmosférica superficial

Normalmente, as simulações da camada limite são avaliadas a partir de comparações com expressões empíricas obtidas de dados atmosféricos válidas na condição de estabilidade neutra. Neste trabalho também são apresentados resultados obtidos diretamente da atmosfera para observar qual é o seu comportamento com relação às expressões teóricas e aos resultados no túnel de vento.

Os dados de camada limite atmosférica que são analisados correspondem ao estado de Rio Grande do Sul, Brasil. Foram coletados em uma torre meteorológica situada no município de Paraíso do Sul, usando um anemômetro sônico tridimensional,

---

o que permite analisar as três componentes das flutuações de velocidade. A altura de medição é 10 m e foi utilizada uma taxa de amostragem de 16 Hz. O terreno na zona de medição pode ser considerado plano e aproximadamente homogêneo.

Os dados foram obtidos em dezembro de 2003. As séries temporais de uma hora ( $2^{16}$  pontos) representam ventos fortes estacionários em uma mesma direção e com baixa intensidade de turbulência, conhecidos no Rio Grande do Sul como “vento norte”. A condição da atmosfera nas séries parciais analisadas pode ser considerada próxima à neutral. Na etapa de pré-processamento, os dados de vento foram alinhados para a direção média do escoamento e foram removidas as tendências lineares pelo método dos mínimos quadrados.

### 5.3.1 Espectros na camada limite atmosférica

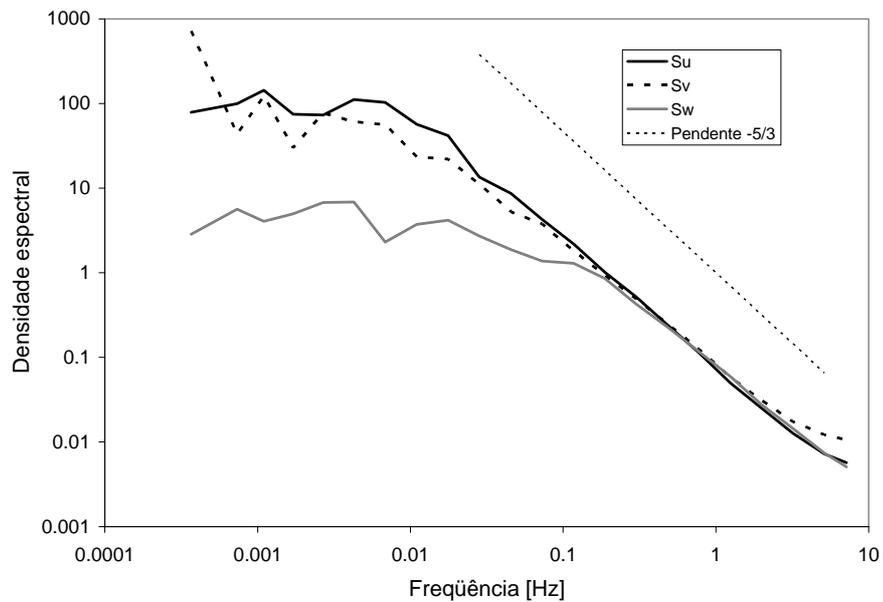
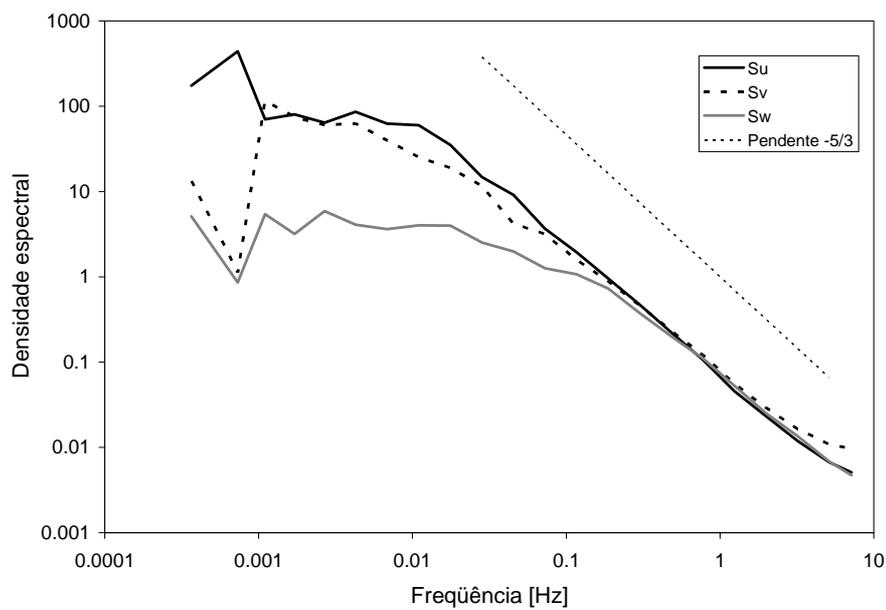
São apresentados os resultados obtidos para duas séries de uma hora que foram selecionadas da amostragem da velocidade instantânea. Na tabela 5.4 se indicam os parâmetros característicos de cada série. Além de velocidade média  $U$  e a variância da componente longitudinal das flutuações  $\sigma_u^2$ , são indicados a intensidade local da turbulência  $I_u$ , a taxa de aquisição  $f_{aq}$ , a macro-escala  $L_u$  e o número de Reynolds da macro-escala  $Re_L$ .

A Figura 5.17 mostra os espectros suavizados correspondentes a cada componente  $S_u$ ,  $S_v$  e  $S_w$  para a série 1. É possível perceber a região inercial de declividade  $-5/3$  e os menores conteúdos energéticos associados à componente vertical  $w$ . Da observação dos espectros, não é possível afirmar que a condição da atmosfera é neutral, mas sim que as flutuações de origem térmica ou convectiva não são relevantes. Estes resultados se condizem com os que foram obtidos nos experimentos de Kansas [Jensen & Busch, 1982] para atmosfera quase-neutral.

Na Figura 5.18 são indicados os espectros para a série 2. Os resultados são semelhantes aos da série 1. As pequenas diferenças nas frequências mais baixas possivelmente são produto da resolução dos espectros obtidos.

Tabela 5.5. Características das séries na camada limite atmosférica.

Séries	$U$ [m/s]	$\sigma_u^2$ [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	$I_u$	$f_{aq}$ [Hz]	$L_u$ [m]	$Re_L$
1	7,22	2,77	0,23	16	36,3	$1,75 \times 10^7$
2	6,76	2,68	0,24	16	37,0	$1,67 \times 10^7$

Figura 5.17. Espectros das componentes  $u$ ,  $v$  e  $w$  para a série 1.Figura 5.18. Espectros das componentes  $u$ ,  $v$  e  $w$  para a série 2.

### 5.3.2 Comparação dos espectros adimensionais

Na Figura 5.19, o espectro adimensional da componente longitudinal  $u$  da série 1 é comparado com o espectro obtido na posição 1 da simulação de expoente  $\alpha = 0,16$  no túnel de vento “J. P. Gorecki”, e com o espectro de von Kármán, cuja expressão é a equação 2.43 do capítulo 2, e aparece no manual ESDU [Cook, 1985]. A Figura 5.20 mostra a comparação do espectro  $S_u$  da série 1 adimensionalizado com o mesmo espectro em túnel de vento e com o espectro de Kaimal dado pela expressão

$$\frac{fS_u}{\sigma_u^2} = 33,3 \frac{Y_u(z)}{[1 + 50Y_u(z)]^{5/3}}. \quad (5.7)$$

A diferença do espectro de Davenport (equação 2.41) ambas as expressões consideram a influência da cota  $z$ . No espectro de Kaimal a frequência adimensional se calcula usando como escala de comprimento diretamente o valor de  $z$ , sendo  $Y_u(z) = fz/U(z)$ .

Uma melhor concordância é observada na comparação do espectro atmosférico com o espectro de Kaimal, sobre tudo nas frequências menores. Teunissen adverte que os dados da expressão de von Kármán não são confiáveis para  $fL_u/U < 0,1$  [Blessmann, 1995]. O espectro na posição 1 em túnel de vento apresenta uma melhor aproximação ao espectro de von Kármán. Isto indica que o grau de ajuste em cada caso depende da escala de comprimento utilizada na adimensionalização. Como consequência, é possível que não exista uma reprodução correta da variação do parâmetro  $L_u$  com a altura  $z$ .

### 5.3.3 Estimação do parâmetro de Monin-Obukhov

Uma consideração adicional com relação à estabilidade da atmosfera é realizada a partir do espectro da componente vertical das flutuações de velocidade  $S_w$  da série 1. Kaimal et al. [1972] vinculam o espectro  $S_w$  com a condição de estabilidade atmosférica utilizando o parâmetro de Monin-Obukhov.

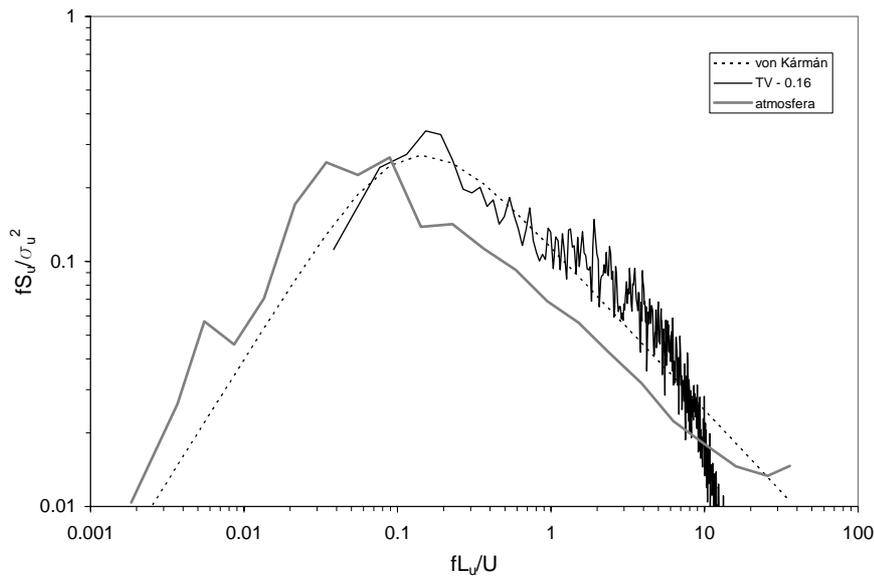


Figura 5.19. Comparação do espectro da componente longitudinal  $S_u$  da série 1 com o espectro da simulação  $\alpha = 0,16$ , pos. 1 em túnel de vento, e com o espectro de von Kármán.

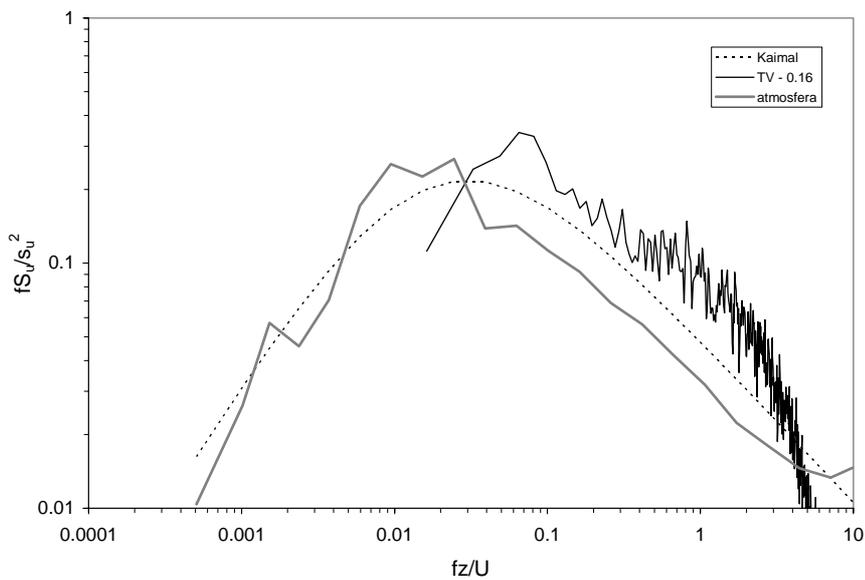


Figura 5.20. Comparação do espectro da componente longitudinal  $S_u$  da série 1 com o espectro da simulação  $\alpha = 0,16$ , pos. 1 em túnel de vento, e com o espectro de Kaimal.

Na Figura 5.21, o espectro  $S_w$  é comparado com a expressão de Kaimal (2) para a componente vertical em condição neutra cuja expressão é

$$\frac{fS_w}{u_*^2} = \frac{2Y_u(z)}{1 + 5,3Y_u(z)^{5/3}}. \quad (5.8)$$

O espectro é adimensionalizado utilizando  $u_*^2$ . A velocidade de cisalhamento foi estimada a partir de considerar um terreno aberto com a expressão  $C_{as} = (u_*/U)^2$ . O valor adotado foi  $10^3 C_{as} = 4,7$ , de acordo aos dados proporcionados por Blessmann [1995], e assim  $u_* = 0,495$  m/s. Para a condição neutra, o pico do espectro  $S_w$  deveria coincidir com o pico do espectro de Kaimal. No capítulo 2, a Figura 2.11 mostra o comportamento do espectro da componente vertical com relação ao parâmetro de estabilidade  $z/L_{MO}$ , sendo  $L_{MO}$  o comprimento de Monin-Obukhov. Neste caso existe um afastamento do pico espectral que indica que durante a medição a condição de estabilidade da camada limite não é neutra. A comparação nas ordenadas está condicionada pelo erro na determinação de  $u_*$ .

Além da Figura 2.11, a partir dos experimentos de Kansas, Kaimal et al. [1972] e Kaimal [1994] estabelecem curvas relacionando a frequência adimensional do pico espectral  $Y_m = f_m z / U$  com o parâmetro  $z/L_{MO}$ . Para o caso analisado, o pico espectral corresponde a  $Y_m = 0,26$  e permite estimar um valor de  $z/L_{MO} \approx -0,35$ . O comprimento de Monin-Obukhov também pode ser calculado pela expressão 2.8. A partir desta expressão, utilizando os valores de temperatura correspondentes à série 1, e calculando a velocidade de fricção e o fluxo de calor na superfície, Welter [2006] obteve  $z/L_{MO} = -0,010$ , que indica uma situação mais próxima à estabilidade neutra que a obtida pela estimativa espectral.

#### 5.4 Avaliação da constante de Kolmogorov a partir de dados experimentais

Além dos modelos físicos, a dispersão atmosférica de contaminantes é simulada com êxito utilizando modelos estocásticos Lagrangeanos. Estes modelos estão baseados na equação geral de Langevin. Supõe-se que a velocidade  $u_i$  ( $i = u, v, w$ ) de um elemento de fluido, para uma escala de tempo varias vezes maior que a micro-escala de

Kolmogorov, é um processo de Markov. Anfossi et al. [2000] indicam que a constante de Kolmogorov é fundamental para a eficiência destes modelos de dispersão. De acordo com a teoria de Kolmogorov, a constante da função estrutura Lagrangeana  $C_L$  é de caráter universal, mas seu valor ainda não está bem estabelecido e uma grande variabilidade nos resultados encontrados. Neste sentido, Landau & Lifshitz sugerem que é uma função do tipo de escoamento.

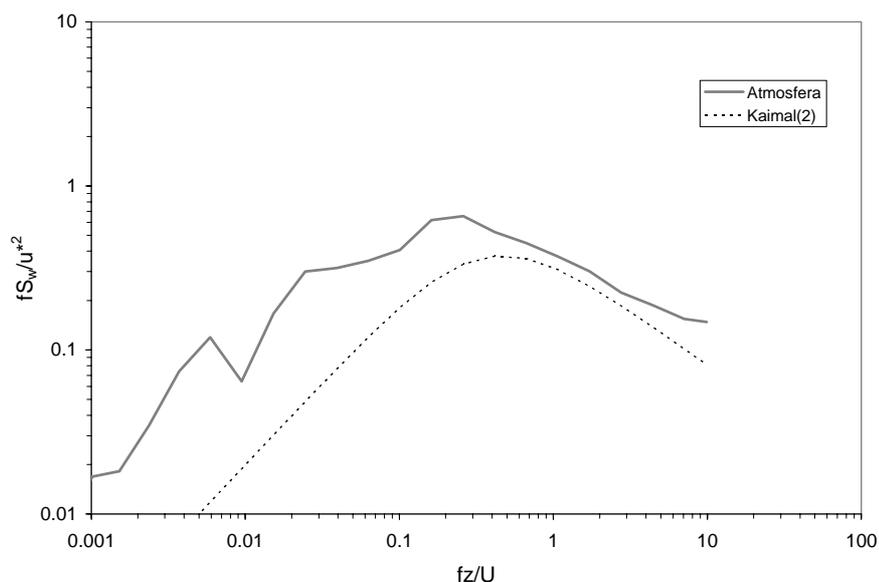


Figura 5.21. Comparação do espectro da componente vertical  $S_w$  com o espectro de Kaimal (2).

A constante  $C_L$  geralmente é determinada a partir da constante  $C_k$  associada à função estrutura Euleriana de segunda ordem e do coeficiente  $\gamma$  que relaciona a constante espectral Euleriana com a Lagrangeana. A obtenção de  $C_k$  pode-se realizar a partir de dados de velocidade medidos na atmosfera com instrumentos de alta resolução em frequência ou a partir de medições com anemômetros de fio quente realizadas em túnel de vento. Os valores atmosféricos, sendo mais representativos para a análise posterior dos processos de dispersão na atmosfera, apresentam dificuldades de utilização por ser geralmente não estacionários. O túnel de vento tem a vantagem de reproduzir escoamentos estacionários, mas é preciso levar em conta que o número de Reynolds é bastante menor que na atmosfera, e então verificar a existência de homogeneidade e isotropia.

---

Neste caso a estimativa de  $C_k$  será realizada utilizando um conjunto de dados selecionados a partir de medições em dois túneis de vento e na própria camada limite atmosférica. Será analisada a existência de uma relação entre este parâmetro fundamental e o número de Reynolds, e se tentará verificar o grande desvio nos valores de  $C_k$  encontrado na literatura.

A partir da equação de Navier-Stokes, supondo homogeneidade e isotropia para o sub-intervalo inercial, Kolmogorov derivou a função estrutura de terceira ordem expressa pela equação 2.36, em termos das propriedades locais da turbulência completamente desenvolvida (TCD). Com argumentos de similaridade e homogeneidade, Kolmogorov derivou para a função estrutura de segunda ordem a equação 2.37. Dessas duas equações pode-se obter uma relação para estimar a constante  $C_k$  a partir de dados observacionais [Tatarskii, 2005].

#### 5.4.1 Dados experimentais e determinação dos parâmetros turbulentos

Foram utilizados dados unidimensionais obtidos a uma taxa de 3000 Hz em dois túneis de vento da UNNE, Argentina; o “J. P. Gorecki” (TVG), com dimensões  $2,4\text{m} \times 1,8\text{m}$  de seção e  $22,8\text{m}$  de comprimento, e o túnel TV2, com  $0,48\text{m} \times 0,48\text{m} \times 4,45\text{m}$ , descritos no capítulo 4. Também foram utilizadas séries temporais de dados tridimensionais de uma camada atmosférica superficial (CAS) obtidos por anemômetro sônico com taxa de aquisição de 16Hz.

Os dados no túnel TVG correspondem a uma simulação da camada atmosférica superficial utilizando o método proposto por Standen. No túnel TV2, foram analisados dois escoamentos de camada limite diferentes, gerados mediante elementos de rugosidade e promotores de turbulência. As medições foram realizadas com um anemômetro de fio quente conectado a um sistema de aquisição de dados. Os registros, segundo o caso, foram de 32000 e 90000 valores, e se utilizou um filtro analógico passa-baixos ajustado a 1000 Hz.

As series de dados tridimensionais na CAS, obtidas com anemômetro sônico, tem características semelhantes às usadas na análise do escoamento na camada

atmosférica superficial, descrita no ponto 5.3 deste capítulo, e provem dos mesmos experimentos.

Na conversão dos valores temporais em espaciais se utiliza a hipótese de Taylor enquanto que para usar as médias temporais foi considerada a hipótese ergódica. Na determinação da micro-escala de Taylor  $\lambda$  e da micro-escala de Kolmogorov  $\eta$  supõe-se isotropia local.

A micro-escala de Taylor é definida por

$$\lambda = \left[ \frac{\sigma_u^2}{\langle (\partial u_1 / \partial x_1)^2 \rangle} \right]^{1/2}, \quad (5.9)$$

e foi obtida substituindo

$$\langle (\partial u_1 / \partial x_1)^2 \rangle = \frac{\langle \varepsilon \rangle}{15\nu} \quad (5.10)$$

na expressão anterior.

A micro-escala de Kolmogorov foi determinada por

$$\eta = \left( \nu^3 / \langle \varepsilon \rangle \right)^{1/4}. \quad (5.11)$$

A taxa de dissipação média  $\langle \varepsilon \rangle$  foi obtida pelo ajuste da função estrutura de segunda ordem utilizando a derivação de Kolmogorov e também pode ser obtida do ajuste espectral à lei dos “-5/3”. O número de Reynolds da micro-escala de Taylor foi calculado mediante a expressão

$$R_\lambda = \frac{\sigma_u \lambda}{\nu}. \quad (5.12)$$

## 5.4.2 Resultados obtidos

Na tabela 5.6 são indicados alguns dos parâmetros característicos dos experimentos analisados, como a velocidade média  $U$ , a escala integral de

comprimento  $L_u$ , a taxa de dissipação  $\varepsilon$ , a micro-escala de Taylor  $\lambda$ , a micro-escala de Kolmogorov  $\eta$ , o número de Reynolds da micro-escala de Taylor  $R_\lambda$  e a constante de Kolmogorov  $C_k$ .

Tabela 5.6. Resultados dos experimentos.

	$U$ [m/s]	$L_u$ [m]	$\varepsilon$ [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [cm]	$\eta$ [mm]	$R_\lambda$	$C_k$
TV2	13,73	0,09	54	1,0	0,01	99,7	2,02
TV2	11,97	0,11	48,2	0,9	0,09	254,4	2,08
TVG	14,86	0,37	29,3	0,7	0,1	1396	2,18
TVG	12,09	0,31	33,2	0,7	0,1	1311	2,12
CLS	7,35	66,7	0,03	15	0,5	18636	2,21
CLS	6,2	88,7	0,03	14	0,5	16641	2,08

É possível observar que, a pesar da variação, os valores da constante  $C_k$  não mostram dependência com o número de Reynolds  $R_\lambda$ . Na análise, foi utilizado um número relativamente pequeno de registros ou séries temporais, obtendo-se  $C_k = 2,115 \pm 0,06$ , que está de acordo com o  $C_k = 2,13 \pm 0,22$  encontrado por Sreenivasan [1995]. A grande variância que aparece nos cálculos da constante  $C_k$  na literatura pode ter sua origem na incorreta suposição de isotropia local para o cálculo da taxa de dissipação. Assim, a subestimação da taxa de dissipação tem como resultado uma superestimação da constante  $C_k$ .

Nas Figuras 5.22, 5.23 e 5.24, para ilustrar a análise realizada, são indicadas às funções de segunda e terceira ordem para o túnel de vento TV2, TVG e camada atmosférica superficial respectivamente, considerando só uma série em cada caso.

Geralmente, na engenharia de ventos não é realizado este tipo de análise dos escoamentos de camada limite. Simplesmente, são realizadas comparações de perfis de velocidade, intensidade de turbulência e espectros. Uma análise destas características permite uma melhor avaliação do comportamento destes escoamentos na modelagem dos processos de dispersão atmosférica.

## 5.5 Considerações finais

Foram analisados experimentalmente diversos escoamentos turbulentos de camada limite, incluindo simulações físicas em túnel de vento e ventos na atmosfera para a condição de estabilidade neutra.

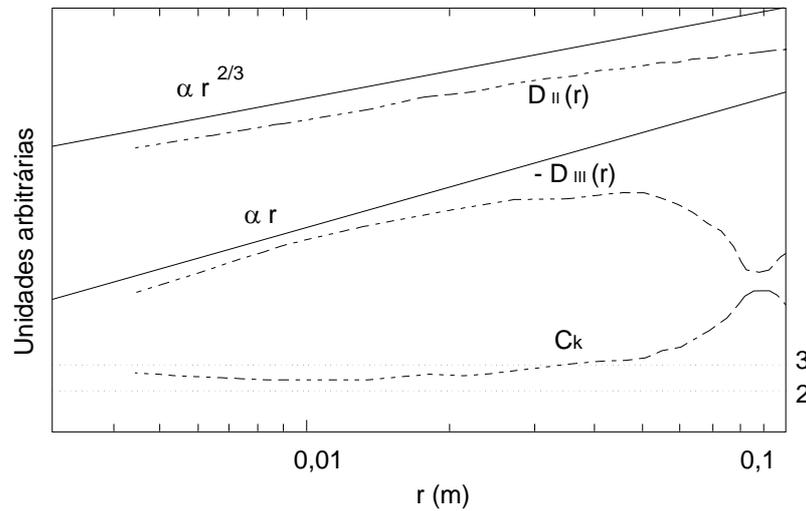


Figura 5.22. Funções de segunda e terceira ordem para TV2.

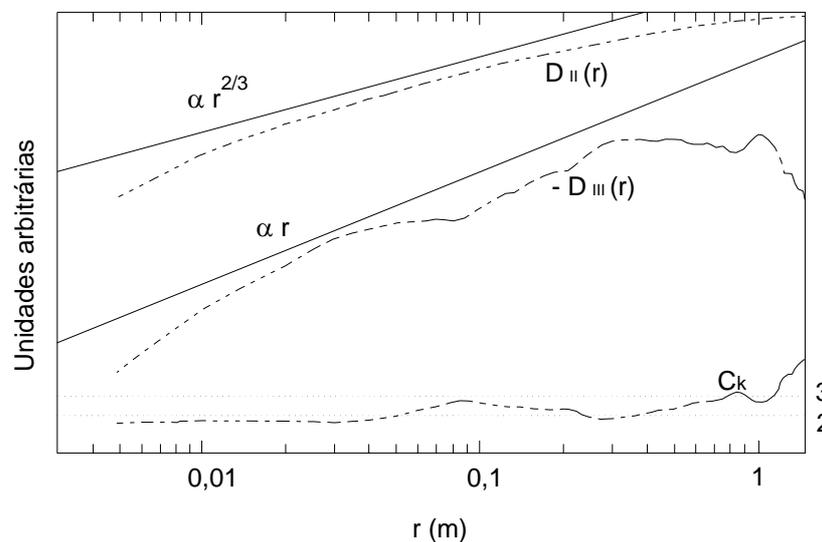


Figura 5.23. Funções de segunda e terceira ordem para TVG.

Com relação aos estudos em túnel de vento, em geral os resultados indicam a adequação das simulações para estudos de dispersão de poluentes ou para efetuar

visualizações de escoamento no túnel de vento. Algumas limitações foram detectadas, principalmente na simulação da espessura total com perfil  $\alpha=0,23$  a velocidade  $U_{ref}=0,96$  m/s, onde se produzem desvios nos valores experimentais da intensidade de turbulência e os espectros mostram uma pobre definição da sub-região inercial. A determinação dos parâmetros dos perfis de velocidade e a estimação do número de Reynolds de rugosidade nas situações mais críticas permitem supor a validade das simulações com relação à independência do número de Reynolds.

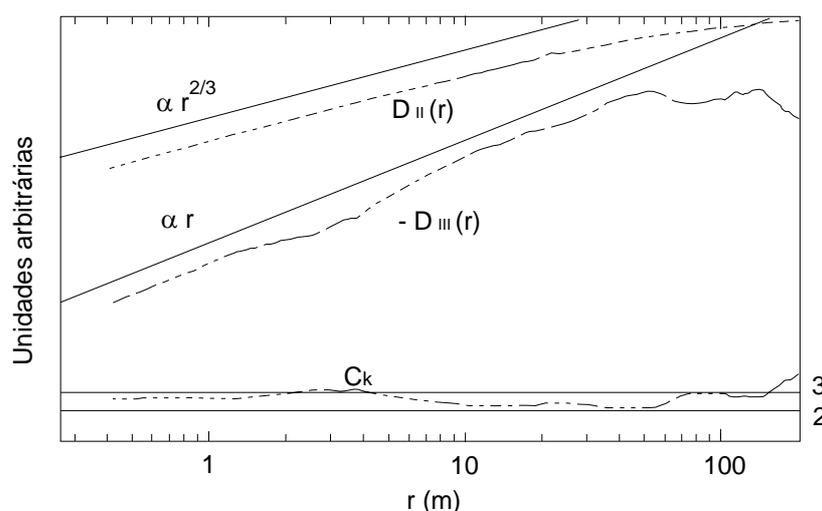


Figura 5.24. Funções de segunda e terceira ordem para CAS.

A análise espectral das medições realizadas no escoamento na CLA, em uma condição próxima à estabilidade neutra, permite fazer comparações diretas com os resultados obtidos nas simulações em túnel de vento. O estudo se completa com a avaliação do parâmetro de Monin-Obukhov, característico da estabilidade atmosférica, a partir da análise do espectro da componente vertical e a comparação com o resultado de outro estudo desenvolvido recentemente.

Finalmente, uma análise de um conjunto de dados experimentais considerando a teoria de Kolmogorov, permite obter uma série de parâmetros importante para o desenvolvimento de modelos teórico-numéricos. Estes parâmetros são: a escala integral de comprimento  $L_u$ , a taxa de dissipação  $\varepsilon$ , a micro-escala de Taylor  $\lambda$ , a micro-escala de Kolmogorov  $\eta$ , o número de Reynolds da micro-escala de Taylor  $R_\lambda$  e a constante de Kolmogorov  $C_k$ . Os resultados mostram que a constante  $C_k$ , utilizada para a

---

obtenção da constante da função estrutura Lagrangeana  $C_0$  nos modelos estocásticos, não depende da variação do número de Reynolds.

## 6 Avaliação experimental de escoamentos complexos

Neste capítulo são analisadas as características que adquirem os escoamentos turbulentos quando são modificados pela presença de obstáculos de certa magnitude ou que apresentam uma distribuição não homogênea no terreno. São estudados dois casos particulares que posteriormente serão utilizados na análise de processos de dispersão. O primeiro caso se refere ao escoamento desenvolvido em torno do modelo de uma edificação simples, e o segundo, ao escoamento turbulento em um terreno urbano não homogêneo.

### 6.1 Escoamento em torno de uma edificação simples

As características que adquire o escoamento de ar em torno de um obstáculo modificam totalmente o processo de dispersão com relação ao escoamento original. As zonas de recirculação e a esteira podem provocar altos níveis de concentração localizados e no nível do solo, dificilmente previsíveis. Este problema é analisado para determinar alturas mínimas de fontes de emissão e, posteriormente, para estudar os problemas locais de dispersão de gases. Como não existe um critério único para estabelecer as regiões características do escoamento nas zonas próximas a edifícios, se deve realizar uma série de medições com anemômetro de fio quente prévias ao projeto dos experimentos de dispersão. A análise realizada limita-se à determinação da camada de vórtices, zonas de recirculação e esteira sobre o modelo. Posteriormente, serão analisadas as características da esteira a sotavento do modelo e a extensão de seus efeitos.

#### 6.1.1 Considerações gerais sobre as características do escoamento

Uma descrição qualitativa do escoamento de ar, em um plano vertical sobre uma forma de edificação rombuda e com arestas vivas, é fornecida no parágrafo 2.4.3 e ilustrada na Figura 2.14 do capítulo 2. O escoamento na região superior pode ser caracterizado por padrões de turbulência bem definidos, representados por três regiões:

---

uma primeira região afastada do prédio (chamada de escoamento principal) com turbulência de intensidade relativamente mais baixa; uma segunda região com intensidades de turbulência mais altas do que no escoamento principal, onde se desenvolvem vórtices contra-rotativos de eixo paralelo ao prédio (esteira turbulenta), localizada imediatamente sobre o edifício e correspondente ao descolamento do escoamento quando este encontra a aresta viva; e uma terceira região turbulenta, que é uma fina camada de vórtices de grande intensidade localizada entre as duas anteriores.

Esta camada de vórtices é caracterizada por um escoamento altamente turbulento contendo considerável energia em uma frequência dominante associada ao desprendimento de vórtices, e um gradiente de velocidades bem acentuado entre o escoamento principal e a velocidade relativamente mais baixa da esteira. Uma reversão na direção do escoamento é normalmente encontrada nas regiões mais baixas da esteira. A espessura da camada de vórtices aumenta com a distância a sotavento do ponto de separação da edificação e a difusão da camada de vórtices a sotavento é acompanhada por uma redução comparável no gradiente de velocidades médias.

A representação gráfica do escoamento tridimensional e direções de vento oblíquas é bem mais complexa devido à formação de vórtices cônicos e desprendimento de vórtices de grande escala oriundos das arestas laterais dos prédios. Os vórtices têm uma forma cônico-helicoidal, formando-se a partir da quina da edificação situada a barlavento.

### 6.1.2 Descrição dos experimentos

Os ensaios foram realizados no túnel de vento *Prof. Joaquim Blessmann* da Universidade Federal do Rio Grande do Sul [Blessmann, 1982]. Neste caso, as características do vento natural foram simuladas através de uma grelha colocada no início da câmara de ensaios.

Para o estudo das características do escoamento foi utilizado o modelo representado na Figura 6.3. As dimensões do modelo são 160 mm × 165 mm, e 270 mm de altura, e a escala geométrica 1: 200. O modelo em torno do qual o escoamento será

avaliado é o mesmo que será utilizado nas configurações II e III do estudo de dispersão no próximo capítulo.

As velocidades em pontos selecionados sobre o modelo foram medidas através do sistema de anemometria TSI com sensor de fio-aquecido. O sensor foi montado em um sistema de posicionamento com controle externo para obter medidas da velocidade do vento em diferentes pontos na região de interesse. Medições da velocidade média do vento e das flutuações destas velocidades, ambas normalizadas pela velocidade média no topo do modelo, foram realizadas em diversas posições. Na Figura 6.3, na vista superior, são indicadas as distintas posições nas quais foram obtidos os perfis verticais de velocidade média e intensidade de turbulência para as direções de vento normal às arestas, e oblíqua (a 45°).

Para a análise das flutuações de velocidade, em cada ponto de medição foram tomadas amostras de 30 segundos de duração com uma frequência de aquisição de 1024 Hz. Devido ao fato de não ter sido realizada uma filtragem analógica do sinal do anemômetro, nos espectros resultantes deve ser considerado o erro introduzido pelo efeito de dobramento no sinal nas frequências próximas aos 500 Hz.

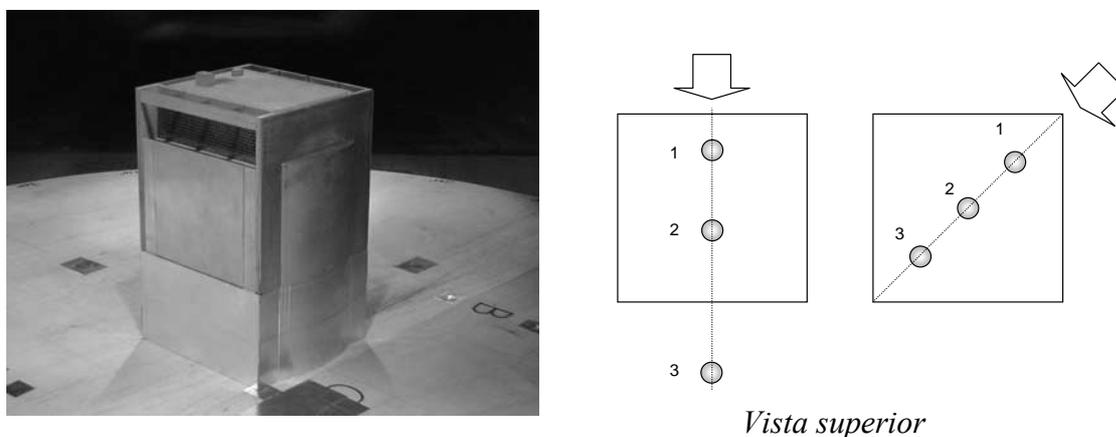


Figura 6.1. Modelo utilizado e posições de medição.

### 6.1.3 Resultados

Na Figura 6.2, são apresentados os perfis de velocidade média adimensional  $U/U_{ref}$  e de intensidade de turbulência normalizada  $I_{ur} = \sigma_u / U_{ref}$  correspondentes à direção de vento normal a uma das arestas superiores do modelo. Da mesma forma, na

Figura 6.3 são apresentados os perfis correspondentes a direção de vento oblíqua ( $45^\circ$ ). À distância  $z$  é medida desde a parte superior do modelo,  $l$  é a distância longitudinal desde a aresta a barlavento do modelo a partir da qual são situadas as posições correspondentes à direção normal, e  $d$  é a distância sobre a diagonal para as posições correspondentes a direção oblíqua. As distâncias  $z$ ,  $l$  e  $d$  são adimensionalizadas com a dimensão da aresta ( $B_l = 160$  mm).

A análise dos perfis obtidos permite determinar as linhas de máxima velocidade média e intensidade de turbulência para as duas direções de vento representadas na Figura 6.4. O escoamento tridimensional produzido na direção de vento oblíqua não pode ser analisado a partir dos três perfis obtidos sobre a diagonal. Nesta direção de vento incidente no existe uma camada de vórtices associada à linha de máxima intensidade de turbulência. Não obstante, a complexidade do escoamento é evidenciada pela diminuição da altura dos pontos de máxima intensidade de turbulência na medida em que aumenta a distância a sotavento.

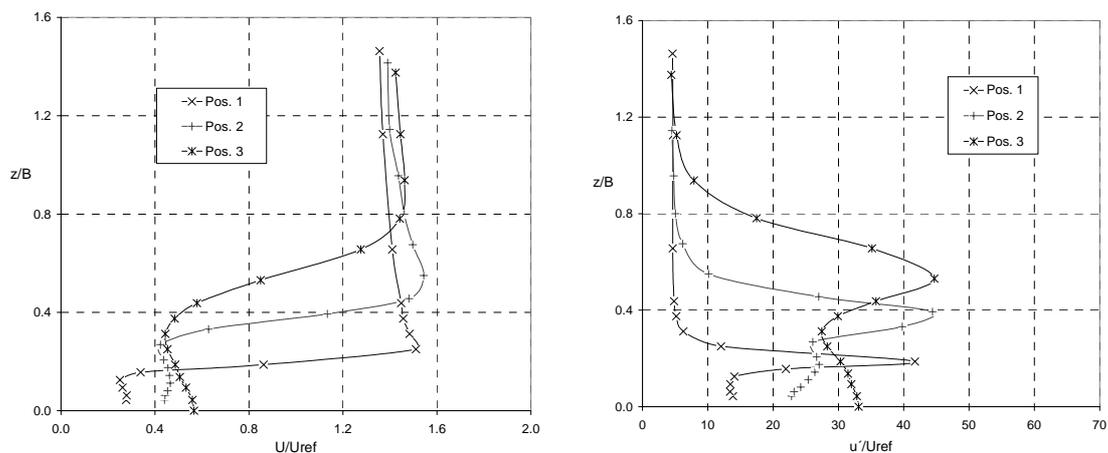


Figura 6.2. Perfis de velocidade média e intensidade de turbulência (direção normal).

As amostras de velocidade instantânea utilizadas para obter os valores de velocidade média e intensidade de turbulência têm uma duração de 30 segundos. Na tabela 6.1 são indicadas características da amostragem e dos espectros. A velocidade de referência  $U_{ref}$  corresponde à região superior do escoamento ( $z/B_l \geq 1,14$ ). Na Figura 6.5 são mostrados somente 3 segundos de cada registro correspondente ao perfil da posição 2 com direção normal do vento incidente. Não são reproduzidos os registros de todos os

pontos de medição que constituem o perfil, mas os correspondentes a  $z/B_I = 0,27, 0,33, 0,39, 0,55$  e  $1,14$ , ordenados da esquerda para a direita na figura.

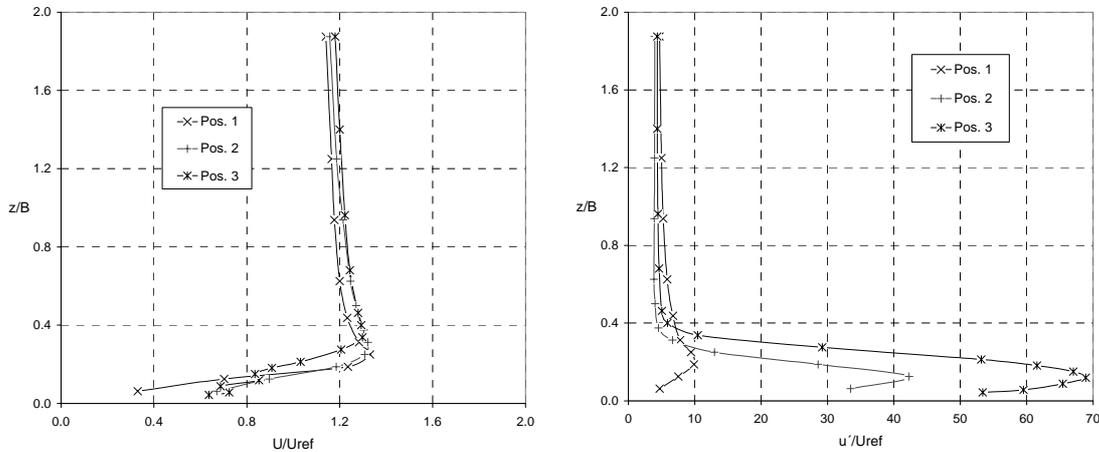


Figura 6.3. Perfis de velocidade média e intensidade de turbulência (direção oblíqua).

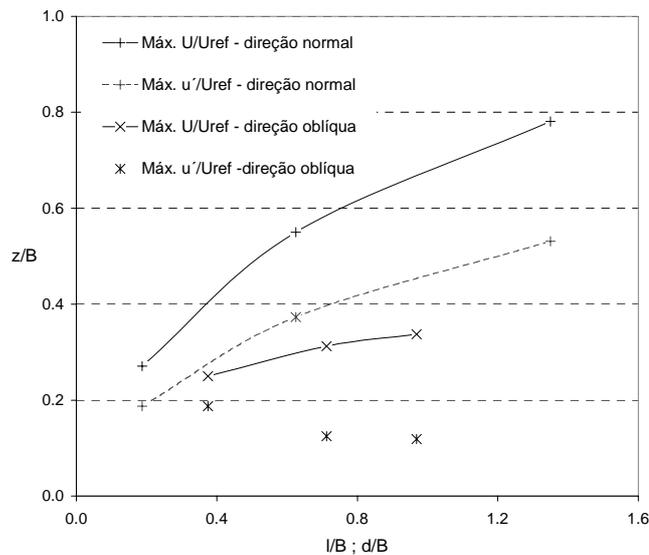


Figura 6.4. Linhas de máxima velocidade média e intensidade de turbulência.

No ponto de máxima intensidade de turbulência ( $z/B_I = 0,39$ ) é apreciável a amplitude das flutuações de velocidade. Nos pontos inferiores ( $z/B_I = 0,27$  e  $0,33$ ), as flutuações também são muito importantes e é possível apreciar uma “saturação” no sinal quando os valores de velocidade se aproximam a zero. Isto é devido a que o anemômetro de fio quente, por seu princípio de funcionamento, não registra valores

muito próximos a zero e não detecta mudanças na direção da velocidade instantânea. Desta forma, o recorte (saturação) no sinal indicaria reversões instantâneas de velocidade e, muito possivelmente, recirculação do escoamento médio nos pontos inferiores.

No ponto de máxima velocidade média ( $z/B_I = 0,55$ ), as flutuações são menores, mas ainda muito importantes. Já no ponto superior ( $z/B_I = 1,14$ ), as flutuações são pequenas e mostram as características do escoamento incidente.

Na Figura 6.6 são apresentados os espectros correspondentes às flutuações de velocidade nos pontos  $z/B_I = 0,39$ ,  $0,55$  e  $1,14$ , devido a que nos pontos inferiores, o recorte do sinal obtido gera distorções no espectro resultante. No ponto de máxima intensidade de turbulência ( $z/B_I = 0,39$ ) distingue-se um pequeno pico entre 30 e 40 Hz, provavelmente associado com a frequência predominante da camada de vórtices. Para  $z/B_I = 0,55$  (ponto de máxima velocidade) não aparece um pico associado a um intervalo de frequências, mas a forma do espectro sugere um deslocamento da energia para os vórtices menores (frequências superiores a 40 Hz).

É importante destacar que não foi realizada a filtragem analógica das frequências mais altas do sinal anemométrico, pelo que os espectros resultantes incluem a distorção pelo efeito de dobramento na zona próxima aos 500 Hz do espectro.

Tabela 6.1. Características da amostragem e dos espectros.

Espectros	<i>No. total de valores</i>	<i>No. de blocos</i>	<i>Valores por bloco</i>	<i>Freq. aquisição [Hz]</i>	<i>Intervalo de freq. [Hz]</i>
$U_{ref} = 34,5 \text{ m/s}$	30720	30	1024	1024	1

A análise das flutuações de velocidade, em primeiro lugar, permite estabelecer que o anemômetro de fio quente possa ser usado para determinar zonas de recirculação. Por outro lado, a análise espectral permite conhecer alguns detalhes do comportamento do escoamento em zonas de bastante complexidade. Uma análise complementar permitirá estabelecer parâmetros vinculados às frequências predominantes na camada de vórtices.

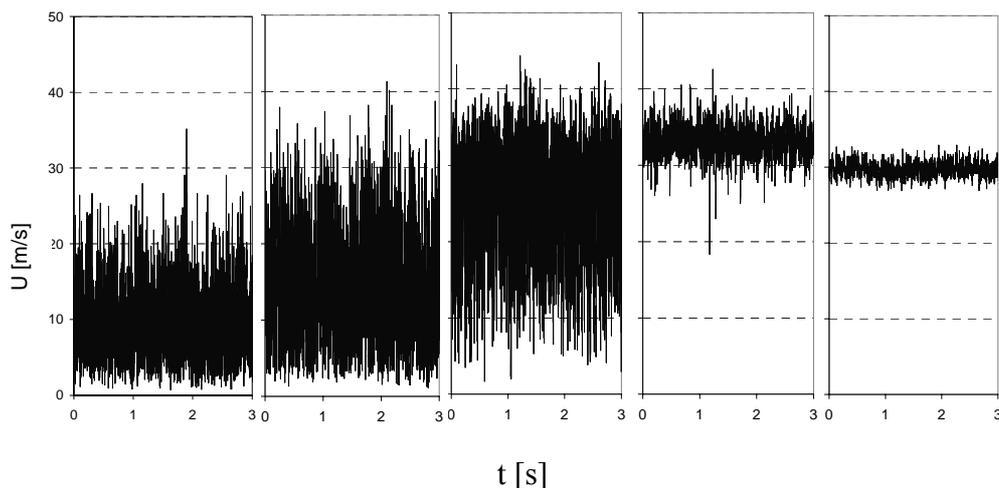


Figura 6.5. Registros parciais de velocidade correspondente ao perfil da posição 2 (direção normal).

A linha de máxima velocidade delimita a zona de esteira e neste caso na região a sotavento do modelo ( $l/B_l = 1,5$ ) se eleva até  $z/B_l = 0,8$ . Na análise de processos de dispersão, conhecendo a posição e a altura da fonte, e estimando a elevação da emissão  $\Delta z$ , é possível prever se a pluma será afetada pela esteira. Em outros casos, a fonte poderá ser projetada para evitar que a pluma ingresse na região de cavidade e os gases poluentes alcancem níveis de concentração importantes a sotavento da edificação.

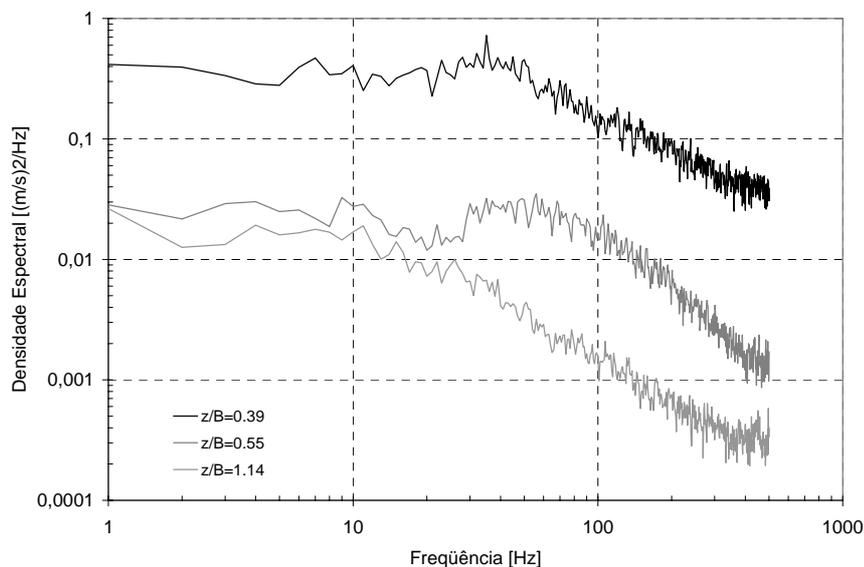


Figura 6.6. Espectros das flutuações de velocidade.

---

Finalmente, esta avaliação realizada com o anemômetro de fio quente serve para conhecer vantagens e limitações de sua utilização para este tipo de análise. É muito importante ter o equipamento que permita detectar zonas de recirculação que geralmente afetam a diluição de gases provocando o estancamento e acumulação em certas regiões. Não obstante, é necessário completar o estudo na região situada a sotavento do modelo e examinar algumas modificações geométricas.

## 6.2 escoamento turbulento em zona urbana não homogênea

Nos centros urbanos, além da simulação do escoamento CLA, para estudos de problemas locais devem ser modelados os obstáculos que produzem importantes modificações no vento incidente. Nestas zonas de escoamentos complexos, às vezes a influência dos obstáculos e sua correta modelagem é mais relevante que a qualidade do próprio modelo do vento atmosférico. Em geral, o escoamento turbulento resultante apresenta uma distribuição não homogênea de suas características.

### 6.2.1 Descrição do trabalho experimental

Os experimentos foram realizados no túnel de vento *Prof. Joaquim Blessmann* da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O vento incidente é produto da simulação da CLA para um terreno com expoente  $\alpha = 0,23$  descrita no capítulo anterior.

O modelo do centro urbano representa uma série de edificações de 40 m de altura média distribuídas de forma não homogênea (Figura 6.7). Considerando a altura média e a variação da do fator de escala de simulação com a altura, foi adotada uma escala do modelo de 1 : 300. Este modelo é o mesmo que será utilizado na configuração IV do estudo de dispersão no próximo capítulo.

Na posição localizada aproximadamente 50 m a sotavento das edificações mostradas na Figura 6.7 foi avaliado o escoamento turbulento resultante. Foram medidas as velocidades médias e os parâmetros turbulentos, e assim, determinados os perfis de velocidade e intensidade de turbulência, espectros de potencia. As medições de

---

velocidades médias e flutuantes foram realizadas com um sistema anemométrico TSI descrito no capítulo 4, sem utilizar filtragem no sinal.

### 6.2.2 Resultados da avaliação do escoamento turbulento

A análise realizada é muito geral e apenas são mostrados os valores experimentais obtidos em quatro pontos na vertical localizada aproximadamente 50 m a sotavento das edificações, onde será posicionada a fonte de emissão nos experimentos de dispersão. Os resultados são apresentados de forma similar à avaliação das simulações da CLA (capítulo 5). O escoamento incidente representa a CLA para terreno com expoente  $\alpha = 0,23$ , sendo modificado pelas edificações. Os valores medidos nos quatro pontos em altura são comparados com os valores experimentais da simulação da CLA. A Figura 6.8 mostra os valores da velocidade média e a modificação do perfil produto das edificações. São indicados os perfis para  $\alpha = 0,23$  e  $\alpha = 0,45$ . Ainda que não coincida com os valores medidos, este último valor de  $\alpha$  representa o limite para centro urbano de acordo aos valores apresentados nas normas de ação do vento.

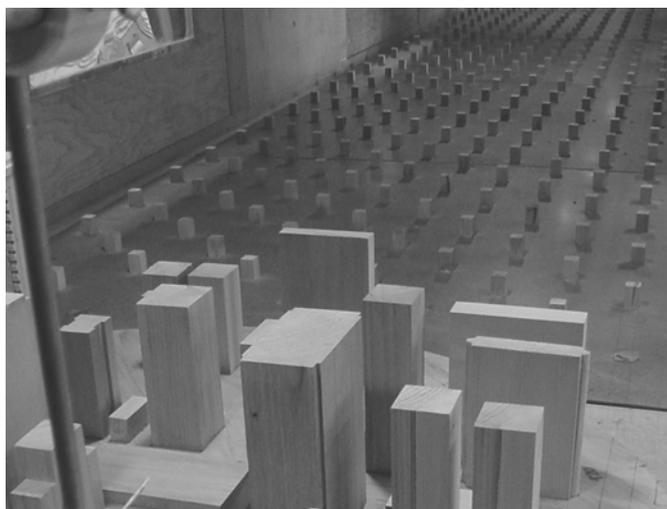


Figura 6.7. Modelo do centro urbano no túnel de vento.

Da mesma forma, na Figura 6.9 são mostrados os valores da intensidade de turbulência. Também são indicados os valores experimentais da simulação  $\alpha = 0,23$  a baixa velocidade e a curva de ajuste aos valores correspondentes a velocidade alta. A

elevada intensidade de turbulência no ponto inferior é produto da baixa velocidade, já que o nível das flutuações é semelhante ao obtido na simulação  $\alpha = 0,23$ .

Foram obtidos os espectros das flutuações de velocidade nas quatro posições, mas apenas são apresentados em  $z = 150$  mm e  $z = 350$  mm respectivamente (Figura 6.10). Na tabela 6.2 são indicados os valores característicos principais utilizados para a análise espectral. As funções de densidade espectral são similares nas duas posições e semelhantes às obtidas na simulação  $\alpha = 0,23$  com  $U_{ref} = 3,44$  m/s. Estes resultados confirmam que a modificação da intensidade de turbulência é devida à diminuição da velocidade média.

Tabela 6.2. Características da amostragem e dos espectros.

Espectros	No. total de valores	No. de blocos	Valores por bloco	Freq. aquisição [Hz]	Intervalo de freq. [Hz]
$U_{ref} = 3,44$ m/s	30720	30	1024	1024	1

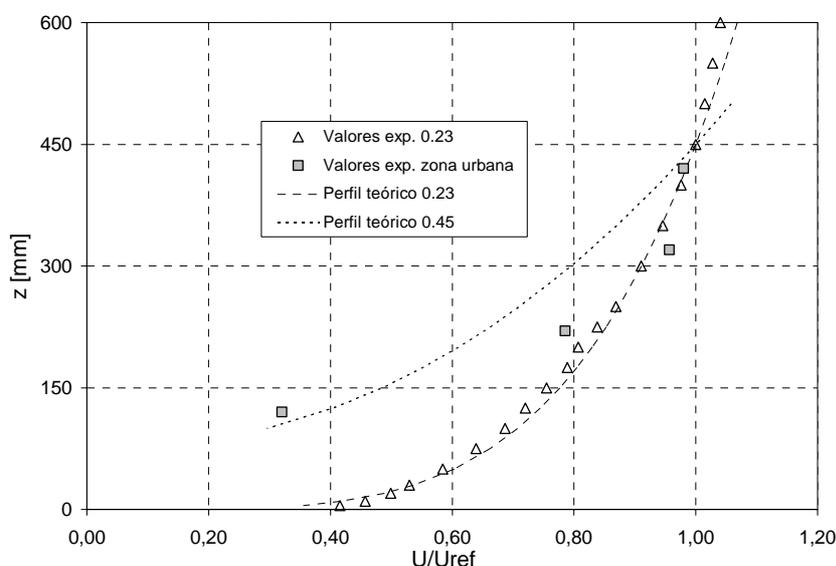


Figura 6.8. Velocidade média no escoamento em zona urbana no túnel de vento.

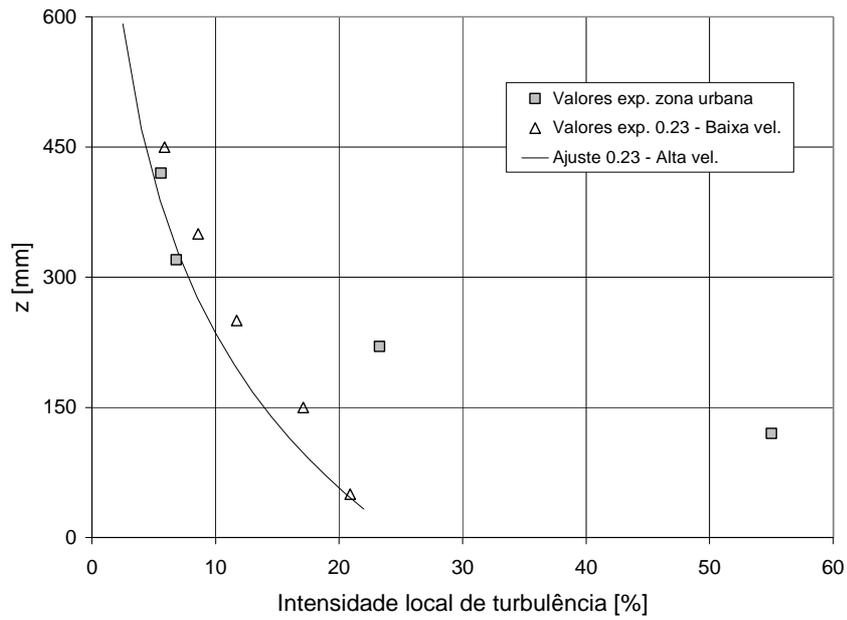


Figura 6.9. Intensidade de turbulência no escoamento em zona urbana no túnel de vento.

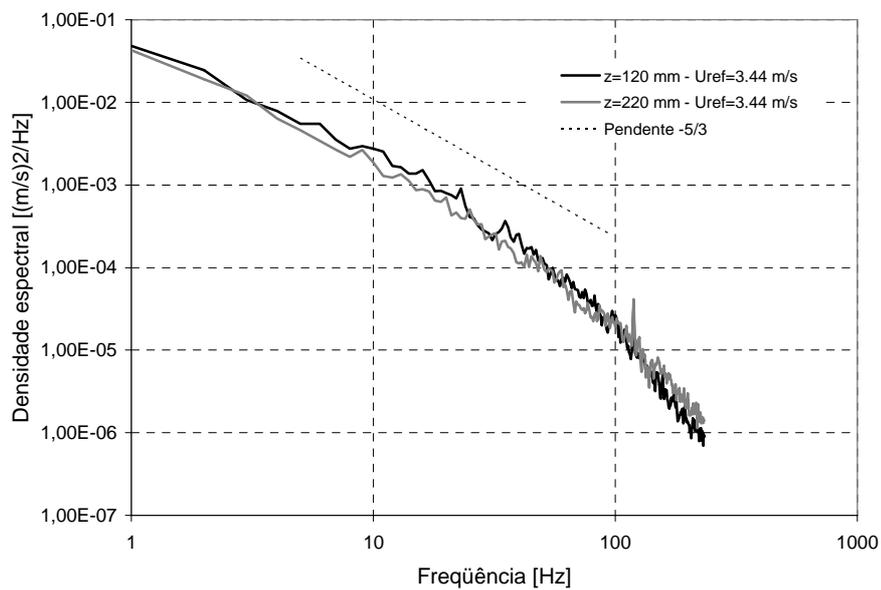


Figura 6.10. Espectros das flutuações de velocidade no escoamento em zona urbana no túnel de vento.

### 6.3 Considerações finais

Com relação ao escoamento em torno de uma edificação simples, a análise destes resultados permite ter informação concreta sobre o comportamento do escoamento de ar na parte superior para determinadas proporções geométricas. Devido à importância das características do escoamento turbulento no processo de dispersão, os resultados podem aplicar-se ao projeto de chaminés para determinar sua altura e localização, e desta forma, evitar o ingresso da pluma de dispersão na região do escoamento afetada diretamente pela construção. Neste caso particularmente, permite ademais projetar os experimentos destinados a avaliar quantitativamente o processo de dispersão nas distintas situações da pluma com respeito à zona afetada.

A análise realizada no escoamento complexo da zona urbana é bastante parcial, mas permite detectar algumas características gerais do comportamento. A principal modificação com relação ao escoamento incidente se produz no perfil de velocidade média. A configuração do perfil se afasta da lei potencial mesmo considerando o expoente  $\alpha = 0,45$ . Os poucos valores não permitem tentar o ajuste à lei logarítmica, mas ainda considerando um valor importante para a altura de deslocamento  $z_d$  parece difícil obter um ajuste apropriado.

Apesar deste comportamento observado nas velocidades médias, os valores do desvio padrão das flutuações e os espectros correspondentes não se afastam muito dos obtidos para o vento incidente. A homogeneidade lateral foi avaliada parcialmente realizando medições em duas posições afastadas 15 m à esquerda e direita da posição central. As variações na velocidade média foram da ordem de 30 %.

As duas configurações analisadas, ainda que sejam produto da interferência de uma ou varias edificações no vento incidente, apresentam comportamentos bem diferentes devido à zona de interesse na análise e a importância do obstáculo (ou obstáculos) com relação ao local analisado. Assim, as zonas de recirculação devem ser levadas em conta na configuração da edificação simples, mas não são importantes, ainda que existam de forma localizada, no caso do escoamento em zona urbana. Isto, novamente indica a importância das escalas nos estudos de fenômenos relacionados à turbulência.

## 7 Estudo experimental do processo de dispersão

Neste capítulo são analisados experimentalmente os campos de concentração produto do processo de dispersão nas proximidades de uma fonte de emissão gasosa pontual, considerando diferentes condições do vento incidente e da emissão. A análise inclui a determinação do campo médio das concentrações e das intensidades das flutuações. No próximo capítulo, a partir de um estudo probabilístico das flutuações de concentração, é analisada a intermitência do processo de dispersão.

### 7.1 Características dos modelos de dispersão

A seguir, são descritas as principais características do modelo da fonte de emissão, as condições de escoamento incidente e as configurações que definem o processo de dispersão dos testes realizados. O modelo da fonte representa uma emissão de gás pontual leve que se dispersa em uma camada limite turbulenta em estabilidade neutra. São consideradas diferentes condições determinadas pelo grau de empuxo da pluma, a velocidade de saída da emissão e a velocidade do escoamento incidente, como também distintas configurações para o entorno da emissão.

O modelo foi construído com um tubo circular de 20 mm de diâmetro e altura variável, que de acordo a escala do modelo adotada pode representar uma chaminé de 4 m ou 8 m de diâmetro de saída e altura variando de 36 a 100 m. As escalas do modelo são 1:200 e 1:300, em concordância com a escala adotada para o escoamento ou com o fator de escala da simulação da camada limite atmosférica, de acordo ao caso. As emissões são representadas com hélio puro e misturas hélio-ar, permitindo a variação do empuxo da pluma.

O escoamento incidente representa a camada limite atmosférica neutral com um expoente do perfil de velocidades médias  $\alpha = 0,23$ . As características principais desta simulação do vento atmosférico estão apresentadas no capítulo 5. A velocidade do vento, a escala do túnel de vento, foi variada entre 0,96 e 3,44 m/s modificando os parâmetros característicos da pluma. Foram considerados três casos; a chaminé isolada

---

considerando um terreno homogêneo, a chaminé com um entorno simples constituído por uma edificação prismática, e finalmente, a chaminé em um entorno urbano não homogêneo.

Para analisar o processo de dispersão, o circuito fechado do túnel de vento foi aberto na seção de retorno evitando a realimentação de gases poluentes. A seção de retorno foi bloqueada totalmente e, antes e depois do fechamento, foram realizadas duas aberturas, uma para a saída do ar contaminado e outra para o ingresso do ar limpo. Isto só é possível com escoamentos de baixa velocidade.

## 7.2 Parâmetros característicos e condições nos ensaios

As condições características da pluma são determinadas pelos parâmetros adimensionais analisados no capítulo 3. Na tabela 7.1 são apresentados os valores dos parâmetros considerados na caracterização da pluma. As relações e parâmetros adimensionais utilizados são;

- A razão de velocidades emissão/escoamento:  $w_0 / U_0$
- A quantidade de movimento da emissão:  $\rho_0 w_0^2 / \rho_a U_0^2$
- O empuxo da pluma:  $[(\rho_0 - \rho_a) g w_0 D_0] / \rho_a U_0^3$

Este último parâmetro também é conhecido como número de Froude densimétrico modificado. Os valores das velocidades  $w_0$  e  $U_0$  correspondem ao modelo reduzido. Os parâmetros adimensionais admitem outras expressões como  $M = \rho_0^{1/2} w_0 / \rho_a^{1/2} U_0$  para a relação de quantidade de movimento e  $\rho_a U_0^3 / [(\rho_a - \rho_0) g w_0 D_0]$  para o empuxo. Os valores indicados na tabela 7.1 foram escolhidos visando obter situações que possam ser relacionadas com casos reais, sempre em função das possibilidades operacionais do túnel de vento e do sistema de análise dos gases emitidos.

Tabela 7.1. Condições e características da pluma.

Condição	Emissão	Vel. emissão $w_0$ [m/s]	Vel. escoamento $U_0$ [m/s]	Parâmetros adimensionais		
				$\frac{w_0}{U_0}$	$\frac{\rho_0 w_0^2}{\rho_a U_0^2}$	$\frac{[(\rho_0 - \rho_a) g w_0 D_0]}{\rho_a U_0^3}$
A	He	0,56	0,85	0,66	0,060	-0,154
B	He	1,26	1,91	0,66	0,060	-0,031
C	He	0,95	0,85	1,11	0,171	-0,260
D	He - Ar	0,75	0,85	0,88	0,278	-0,154
E	He	0,56	3,04	0,18	0,005	-0,003
F	He	0,95	3,04	0,31	0,013	-0,006
G	He	0,56	1,91	0,29	0,012	-0,014
H	He - Ar	1,45	1,91	0,76	0,145	-0,031

### 7.3 Configurações da vizinhança

Com relação ao vento incidente e ao entorno da chaminé, nos testes foram consideradas quatro configurações diferentes. A configuração I corresponde à chaminé isolada (Figura 7.1), as configurações II (Figura 7.2) e III (Figura 7.3) estão referidas aos casos de uma edificação a barlavento e sotavento da emissão respectivamente, e a configuração IV corresponde à chaminé em um terreno urbano não homogêneo (Figura 7.4). Nos esquemas  $D$  é o diâmetro da chaminé e  $x$  indica a distância ao ponto de medição.

Na configuração I, a altura da chaminé é  $H = 250$  mm. O vento incidente é representado pela simulação de CLA com  $\alpha = 0,23$ , descrita no capítulo 5. A escala geométrica adotada é 1:300, considerando o fator de escala da simulação.

Para as configurações II e III, a altura da edificação  $B$  é 270 mm, enquanto  $H$  varia de 250 a 270 mm de acordo ao teste. A separação entre a chaminé e o modelo da edificação em ambos os casos é 80 mm. A escala geométrica adotada para esta configuração é 1:200.

Finalmente, na configuração IV, a altura da chaminé é  $H = 180$  mm e a altura média dos edifícios a barlavento da emissão é 125 mm. A separação entre a chaminé e os obstáculos importantes mais próximos localizados a barlavento é 180 mm. Nesta configuração, a escala geométrica é 1:300.

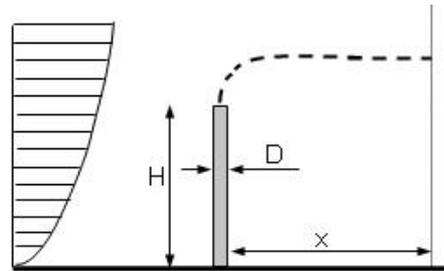


Figura 7.1. Emissão isolada – Configuração I.

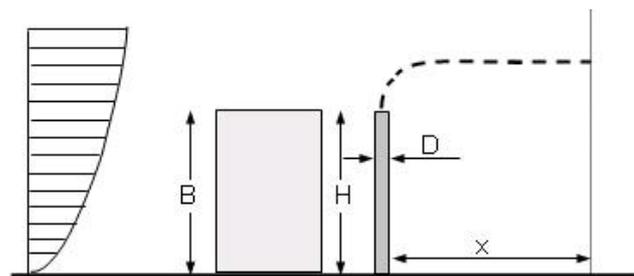
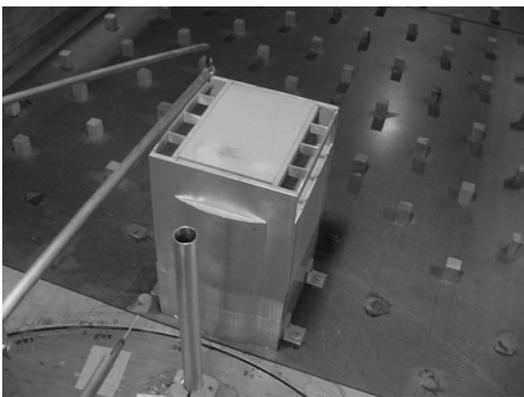


Figura 7.2. Edificação simples a barlavento da emissão  
Configuração II.

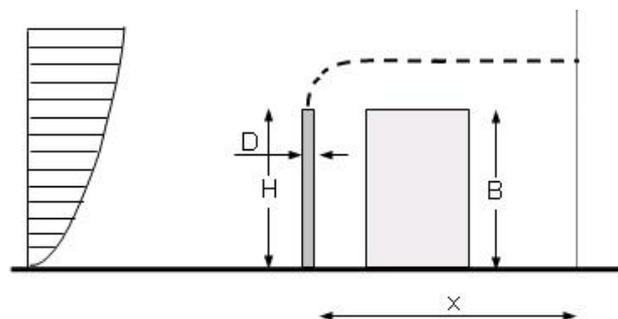


Figura 7.3. Edificação simples a sotavento da emissão  
Configuração III.

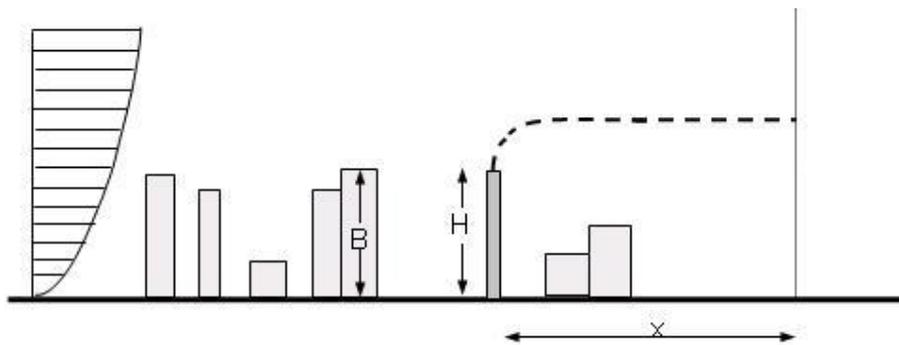
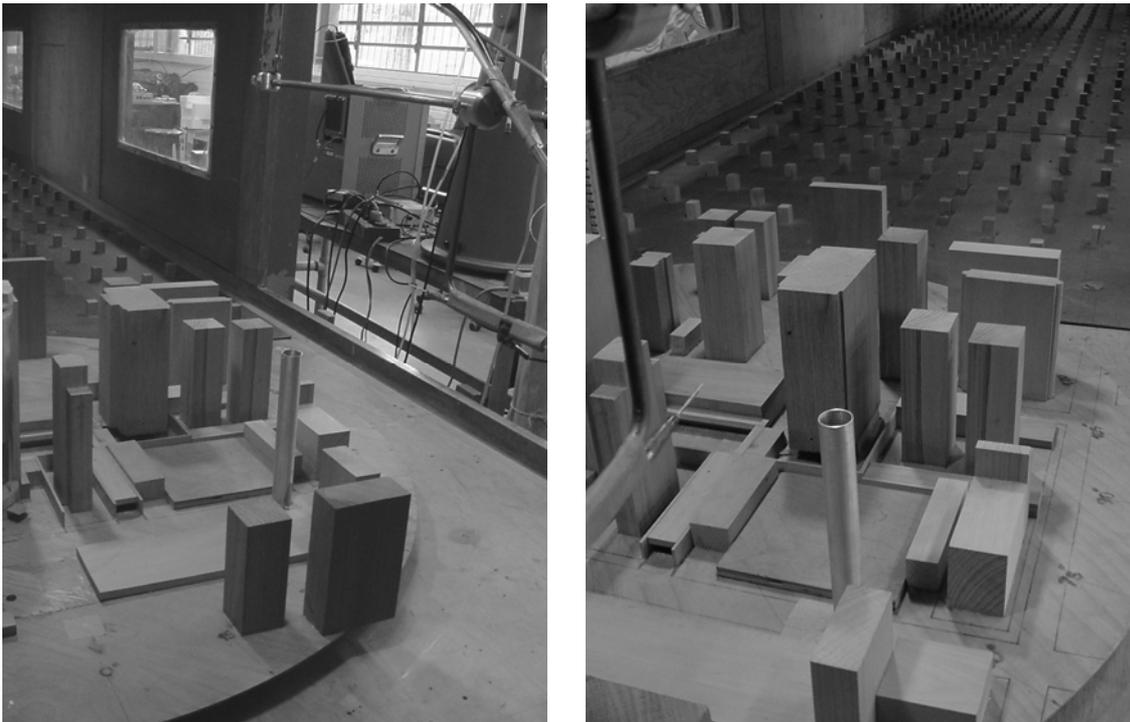


Figura 7.4. Emissão em um entorno urbano – Configuração IV.

Dado que o número de Reynolds na atmosfera não pode ser reproduzido nos ensaios em túnel de vento, os requerimentos indicados a seguir são levados em conta. No caso das configurações II, III e IV, o número  $Re_H$  característico está definido por:

$$Re_H = U_H H / \nu \quad (7.1)$$

sendo  $H$  a altura característica da obstrução e  $U_H$  a velocidade a essa altura. No caso das menores velocidades do escoamento (condições A, C e D), o valor de  $Re_H$  obtido é aproximadamente 14000, sendo considerado satisfatório  $Re_H > 3000$  [White & Stein, 1990]. Com relação à simulação da camada limite, o requerimento referido ao número

de Reynolds de rugosidade é  $Re_z > 1$ , sendo ainda maiores a um os valores obtidos na simulação de expoente  $\alpha = 0,23$  no intervalo de velocidade dos testes.

#### 7.4 Análise da concentração média e da intensidade das flutuações

Para o estudo do processo de dispersão da pluma, foi avaliado o campo de concentrações a sotavento da fonte de emissão. As medições foram realizadas com o anemômetro de fio quente utilizando uma sonda aspirante descrita no capítulo 4. Em cada ponto foi tomada uma mostra de um minuto de duração com uma frequência de amostragem de 1024 Hz.

O tempo de amostragem é um ponto bastante crítico neste tipo de experimentos. Uma análise muito simplificada que considere a reprodução exata do número de Froude a escala do túnel de vento conduz a uma escala de tempo para as simulações de vento atmosférico utilizadas  $\lambda_T = 1 : 15 \sim 1 : 20$ . A duração da medição na atmosfera seria então entre 15 e 20 minutos, muito próxima ao limite inferior considerado válido para obter concentrações médias estacionárias. Além disso, tempos de um minuto geralmente asseguram valores médios estáveis em túnel de vento.

A seguir são apresentados os resultados obtidos nos testes como perfis do coeficiente de concentração  $K$  e da intensidade das flutuações de concentração  $I_c$ , sendo

$$K = \frac{CU_H H^2}{Q_0} \quad (7.2)$$

$$I_c = \frac{\sigma_c}{C} \quad (7.3)$$

onde  $C$  e  $\sigma_c$  são a concentração média e o desvio padrão das flutuações, respectivamente,  $Q_0$  o vazão da emissão, e  $z$  a distancia vertical a partir do piso do túnel.

#### 7.5 Resultados das medições

Nas Figuras 7.5 e 7.6 são apresentados os perfis verticais correspondentes a 6 posições a sotavento da emissão, considerando a condição A e a configuração I, sendo

---

$x/H$  a distância adimensional desde a fonte de emissão. Na Figura 7.7 se indicam os perfis correspondentes à condição B e a mesma configuração anterior, para três posições a sotavento. Os perfis laterais indicados na figura 8 correspondem à condição A,  $x/H = 0,33$  e  $z/H = 1,12$ , e condição B,  $x/H = 0,60$  e  $z/H = 1,10$ , ambos com a configuração I, confirmando a simetria lateral.

Na Figura 7.9 são indicados os perfis verticais correspondentes à configuração II em duas posições  $x/H$  para condição A (a), e em três posições  $x/H$  para a condição B (b). Os menores valores absolutos de  $K$  com relação à configuração I indicam um maior efeito de diluição nas concentrações provocado pelas condições de escoamento impostas pela presença da edificação. O efeito também se manifesta no aumento do spread vertical  $\sigma_z$  da pluma. Na posição localizada mais a sotavento, o nível das flutuações de concentrações é bastante menor.

Os perfis correspondentes à configuração III se indicam na Figura 7.10. Nos casos  $x/H = 0,540$  (a) e  $1,080$  (a), a altura da chaminé coincide com a altura da edificação e os perfis são gaussianos. No caso  $x/H = 0,540$  (b), a razão de alturas chaminé/edificação é  $0,96$  e na parte inferior (próximo ao teto do modelo) se produz uma distorção com relação ao comportamento gaussiano. Estes três casos correspondem à condição A onde os efeitos inerciais são menores, a altura efetiva da pluma ( $H + \Delta z$ ) aumenta permitindo o “escape” da pluma da região de esteira quase totalmente. Nos casos  $x/H = 0,540$  (c) e (d), a razão de alturas chaminé/edificação é  $1,00$  e  $0,93$  respectivamente. Os efeitos inerciais são maiores (condição B) diminuindo a altura efetiva da pluma o que provoca certos níveis de concentração na parte inferior (próximo ao teto). As intensidades das flutuações de concentração têm uma grande diminuição nessa região do perfil.

Na Figura 7.11 são apresentados os perfis obtidos em três posições a sotavento da emissão com a configuração IV (entorno urbano) e condição B. O comportamento pode considerar se gaussiano com  $\sigma_z$  da pluma ligeiramente maior que nas configurações I e III. Na posição  $x/H = 1,430$  se observa uma declividade da Pluma.

A Figura 7.12 mostra os perfis mais próximos à fonte de emissão para a configuração I. As condições A, C, D correspondem a vento mais leve (menor efeito inercial) e diferentes emissões. Para vento mais forte, a condição E (menor  $w_0$ ) provoca

---

um declividade inicial da pluma, em tanto que na condição F o centro da pluma coincide com a altura da chaminé. Em todos os casos se percebe a assimetria na configuração da pluma ( $\sigma_z$  na região superior menor do que na região inferior).

Na Figura 7.13 são analisados três perfis na região mais a sotavento para a configuração I. No caso  $x/H = 2,00$  (a), a condição A implica menor efeito inercial e o perfil é mais irregular. Os casos  $x/H = 1,80$  (b) e (c) correspondem às condições B e H respectivamente, o efeito inercial é maior e a conformação da pluma é bem gaussiana. Entre os casos (b) e (c) existem diferenças de empuxo que se manifestam nos valores de  $\Delta z$  e  $\sigma_z$ .

Na Figura 7.14 são comparados perfis na posição  $x/H = 0,60$  para as condições B, G e H, e para a configuração I. A elevação da pluma  $\Delta z$  é uma função do empuxo e se percebe também uma pequena variação do parâmetro  $\sigma_z$ . Nestes casos a variação do empuxo é produto unicamente da variação da emissão, sendo que o escoamento incidente praticamente não varia.

Os efeitos das diferentes configurações são mostrados na Figura 7.15. Apresentam-se os perfis na região próxima à emissão ( $x/H = 0,54$  a  $0,94$ ) para a condição B e as configurações I, II, III e IV. Com relação à emissão isolada (configuração I), é possível apreciar uma importante elevação da pluma no caso da configuração III (edificação a sotavento da emissão) e um grande aumento da dispersão vertical  $\sigma_z$  para as configurações II e IV.

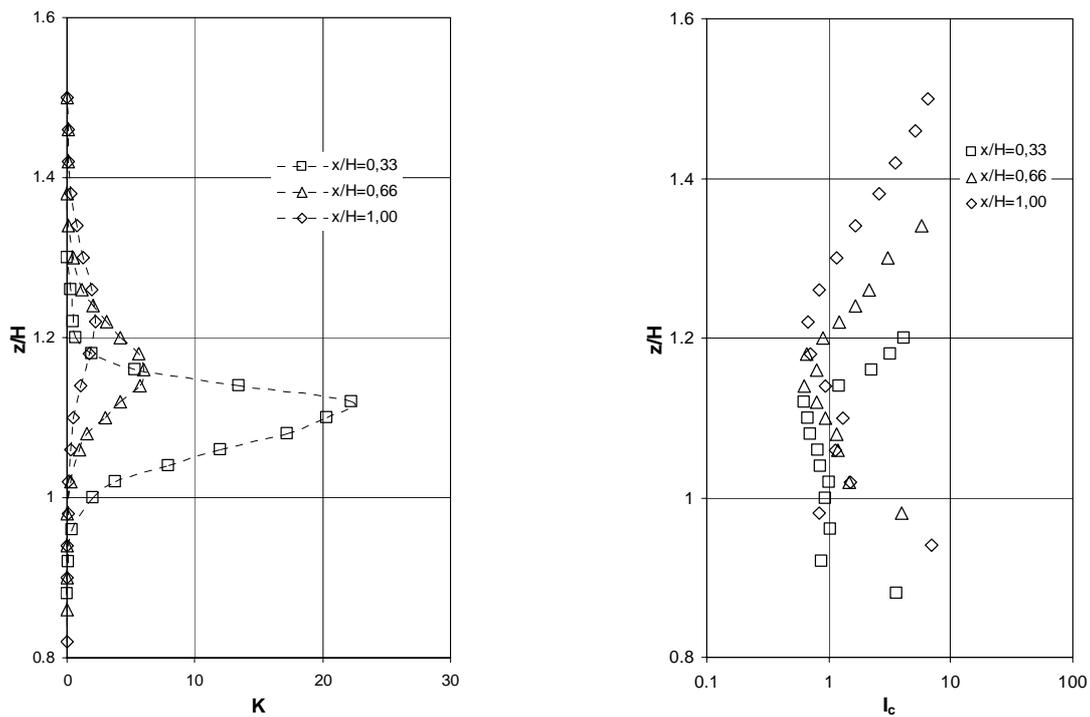


Figura 7.5. Perfis de concentração  $K$  e  $I_c$ , condição A, configuração I, para  $x/H = 0,33, 0,66, 1,00$ .

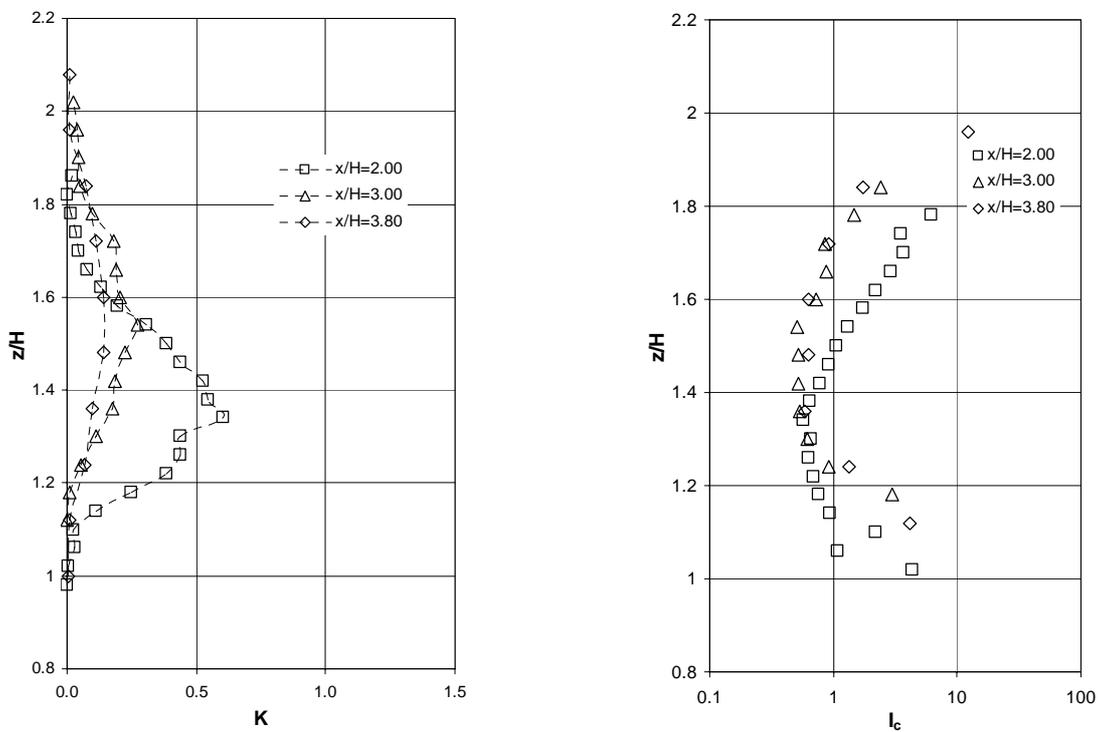


Figura 7.6. Perfis de concentração  $K$  e  $I_c$ , condição A, configuração I, para  $x/H = 2,00, 3,00, 3,80$ .

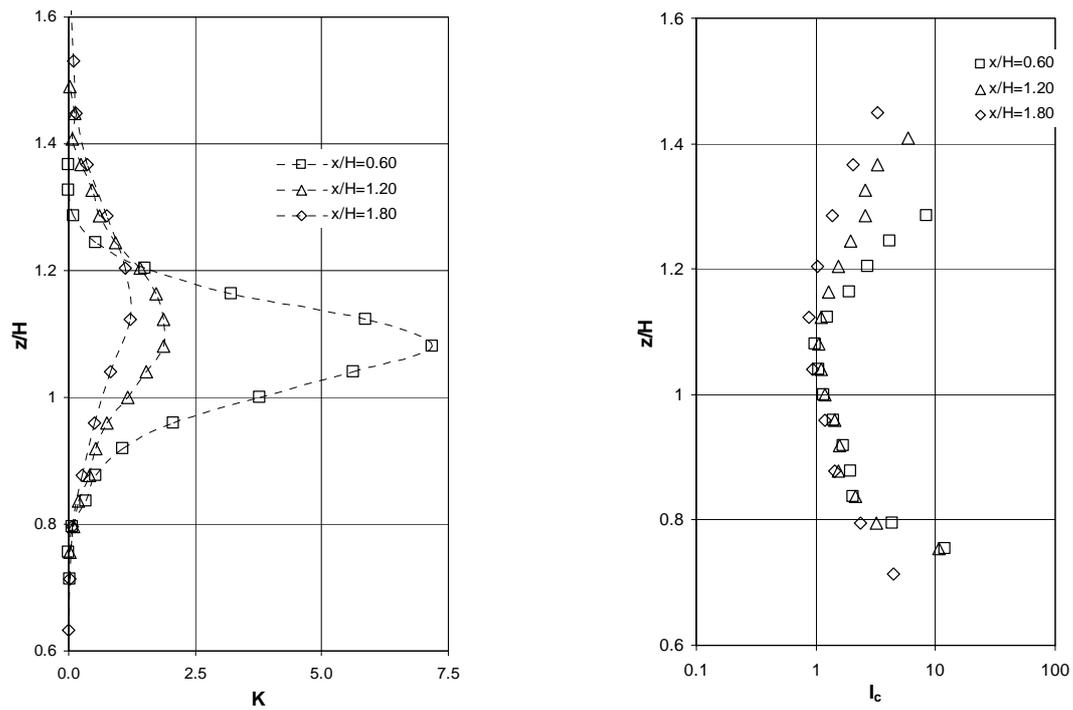


Figura 7.7. Perfis de concentração  $K$  e  $I_c$ , condição B, configuração I, para  $x/H = 0,60, 1,20, 1,80$ .

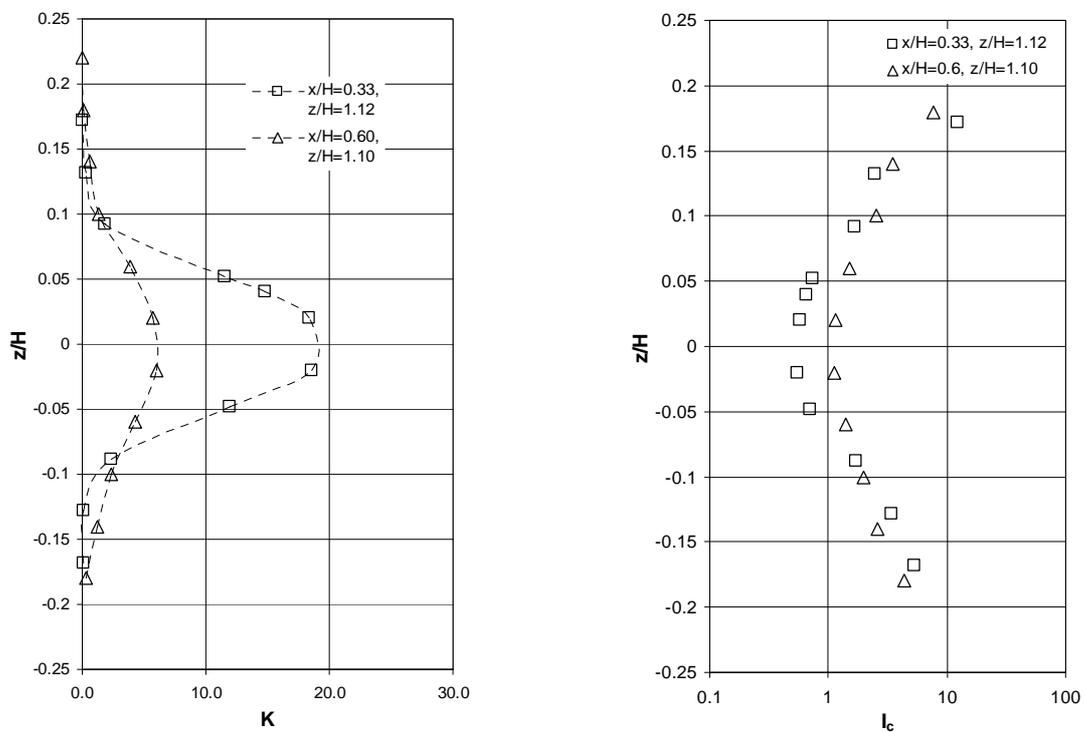


Figura 7.8. Perfis laterais de concentração  $K$  e  $I_c$ , Configuração I, condição A, ( $x/H = 0,33$ ) e condição B, ( $x/H = 0,60$ ).

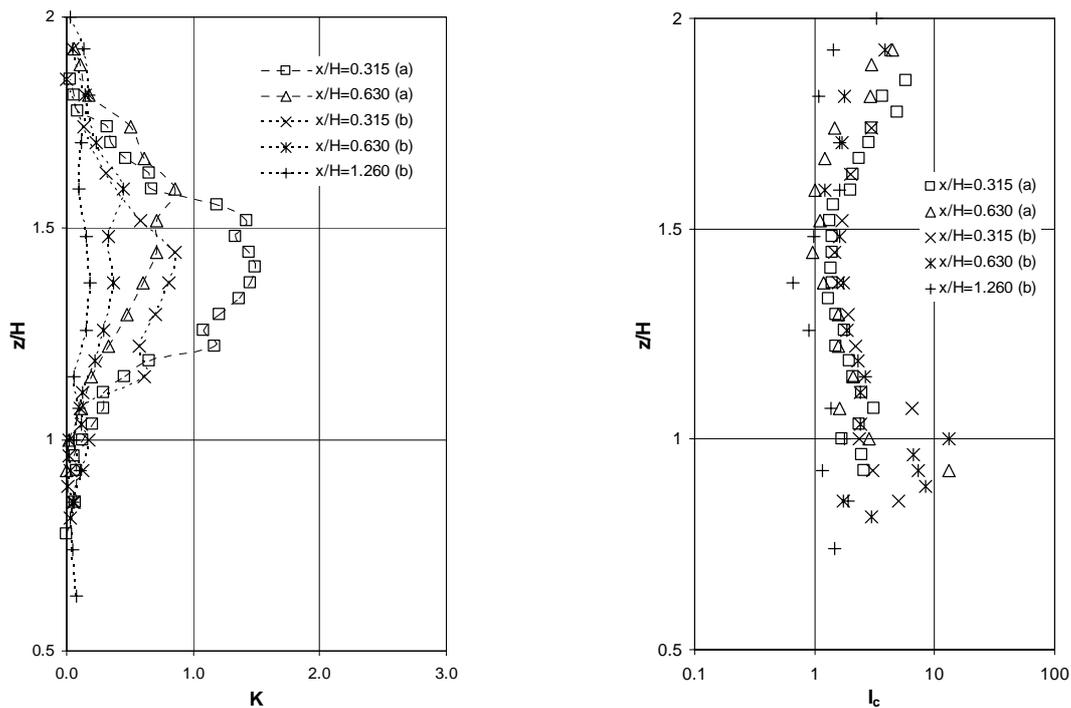


Figura 7.9. Perfis de concentração  $K$  e  $I_c$ , Configuração II, (a) Condição A, (b) Condição B.

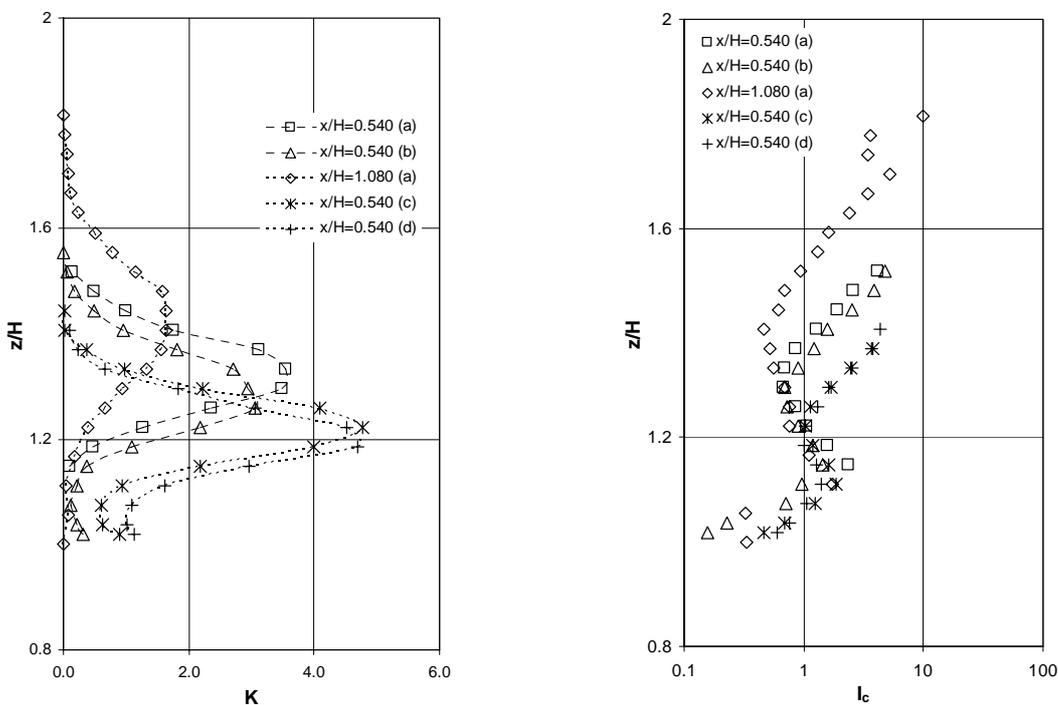


Figura 7.10. Perfis de concentração  $K$  e  $I_c$ , Configuração III, condições A ( $x/H = 0,540a$ ,  $x/H = 0,540b$ ,  $x/H = 1,080a$ ) e B ( $x/H = 0,540c$ ,  $d$ )

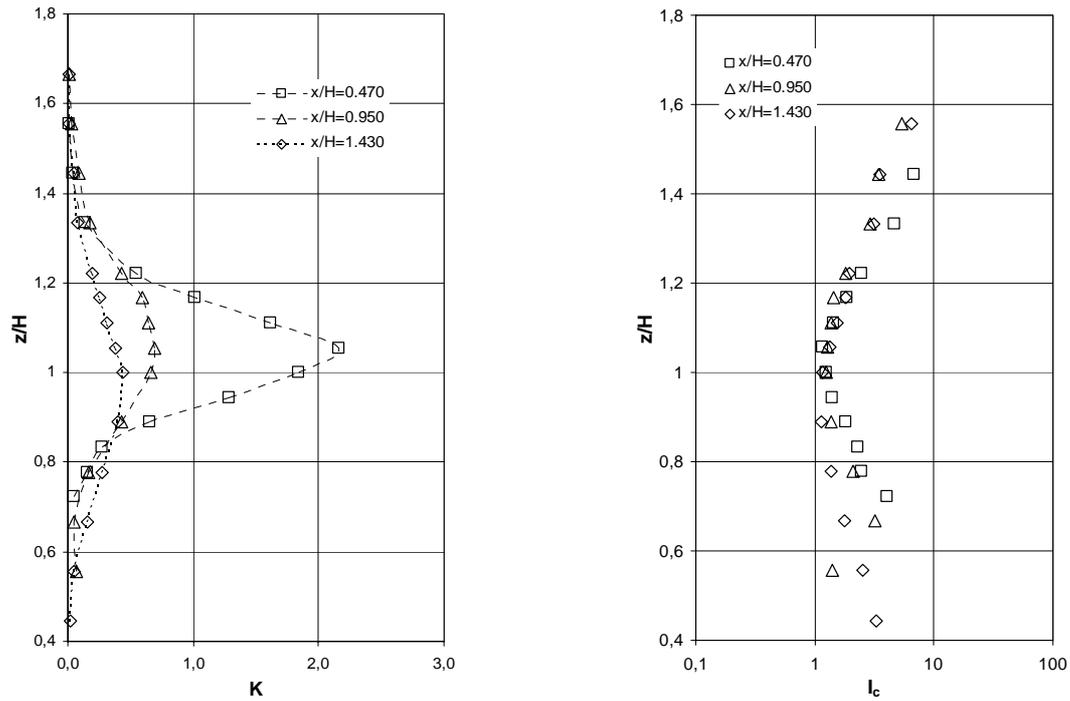


Figura 7.11. Perfis de concentração  $K$  e  $I_c$ , Configuração IV e condição B.

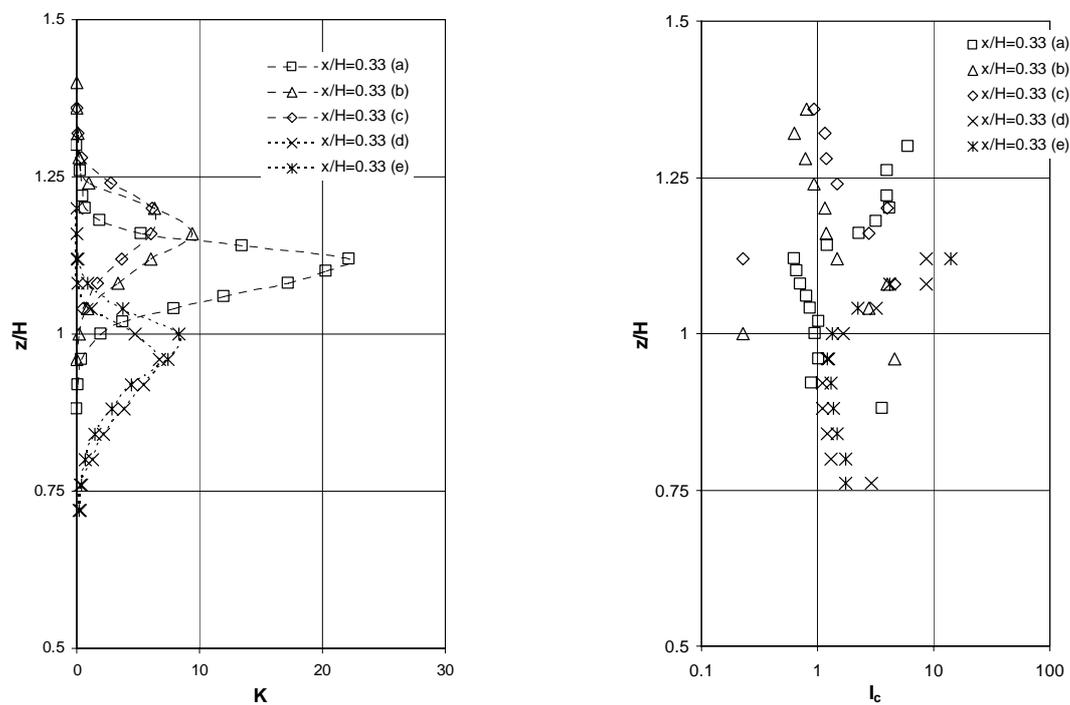


Figura 7.12. Perfis de concentração  $K$  e  $I_c$ , Configuração I, condições A (a), C (b), D (c), E (d) e F (e).

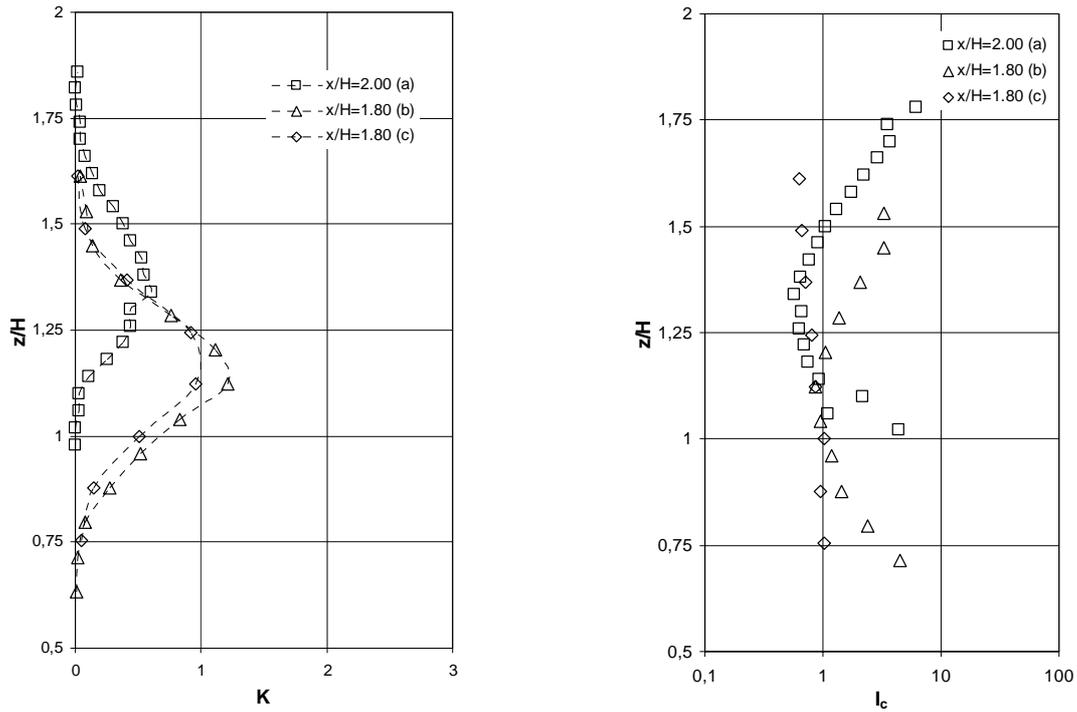


Figura 7.13. Perfis de concentração  $K$  e  $I_c$ , Configuração I, condições A ( $x/H = 2,00$ a), B e H ( $x/H = 1,80$ b e c).

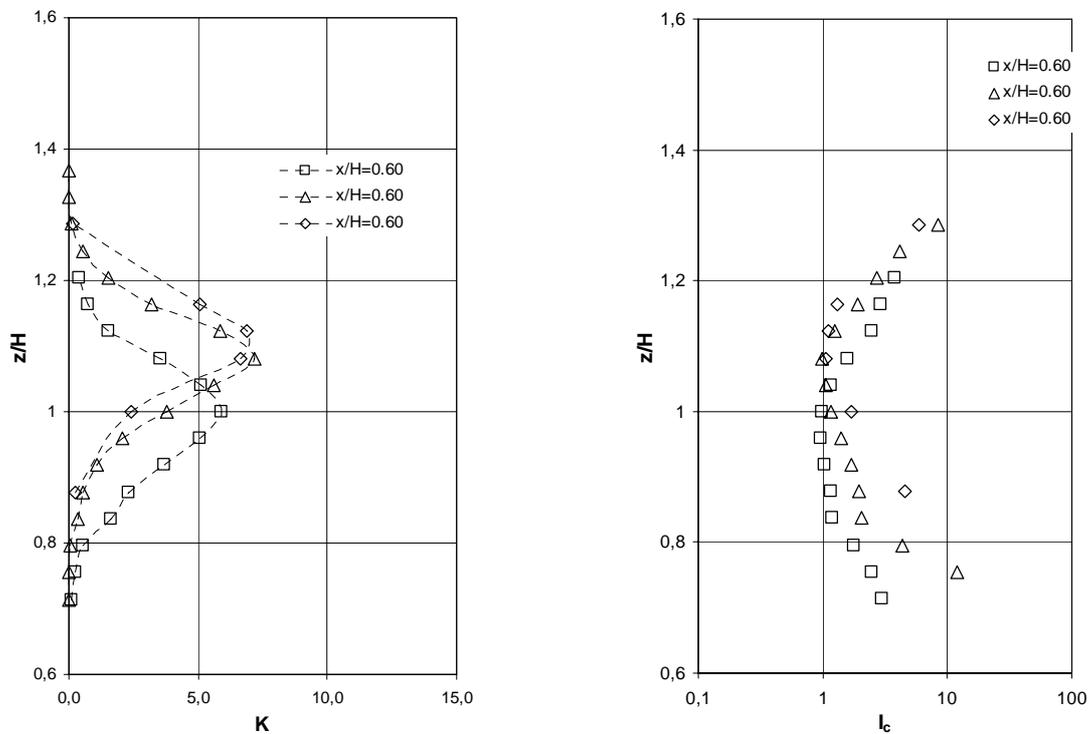


Figura 7.14. Perfis de concentração  $K$  e  $I_c$ , Configuração I, condições B, G, e H ( $x/H = 0,60$ )

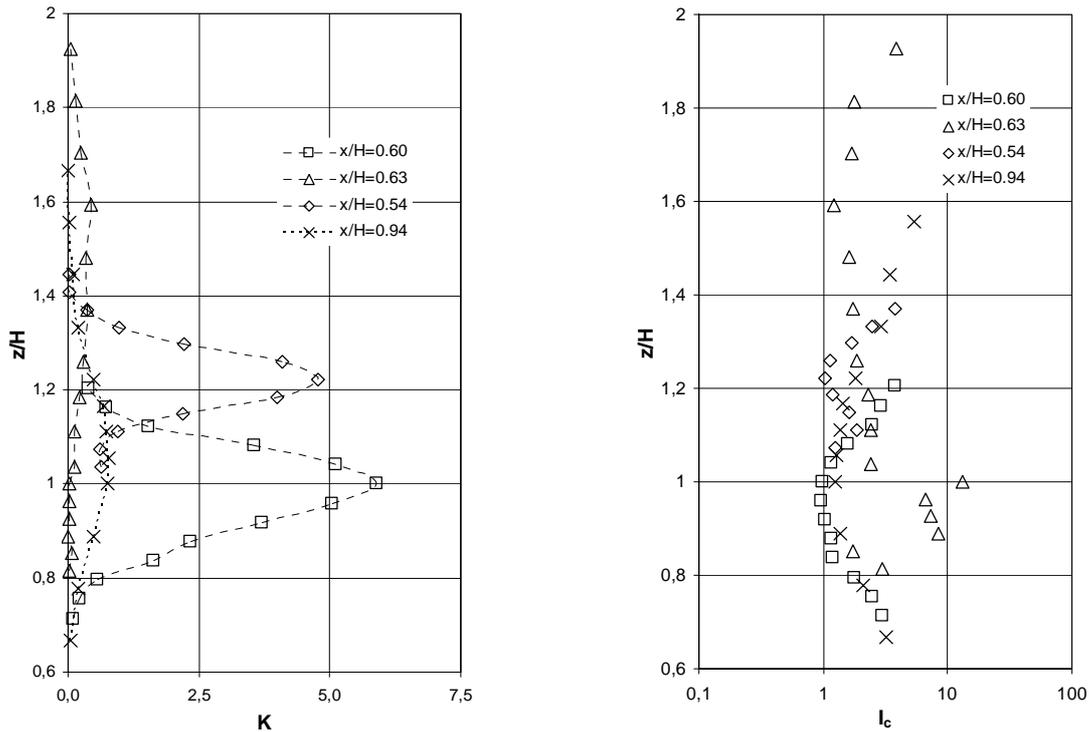


Figura 7.15. Perfis de concentração  $K$  e  $I_c$ , configurações I, II, III e IV, condição B.

## 7.6 Comparação valores experimentais com a expressão do perfil gaussiano

Nos modelos de dispersão é muito difundida a utilização da expressão gaussiana. No caso das distribuições verticais de concentração, o perfil gaussiano tem a forma

$$C(z)/C_0 = \exp[-(z - z_0)^2 / 2\sigma_z^2] \quad (7.4)$$

onde  $C_0$  é o valor máximo da concentração (posição central da pluma). A partir do ajuste dos valores experimentais a esta expressão, é possível obter a dispersão vertical  $\sigma_z$ . As Figuras 7.16 e 7.17 mostram os perfis adimensionais de concentração vertical correspondentes a seis posições a sotavento da emissão, considerando a condição A e a configuração I. Na Figura 7.18 são indicados os perfis correspondentes à condição B e configuração I, para três posições a sotavento da emissão. Devido à assimetria dos perfis, a representação é feita considerando um valor de  $\sigma_z$  para a região superior e outro

para a região inferior. O ajuste dos valores ao perfil gaussiano é bom, mas a qualidade diminui nas posições mais a sotavento da fonte de emissão.

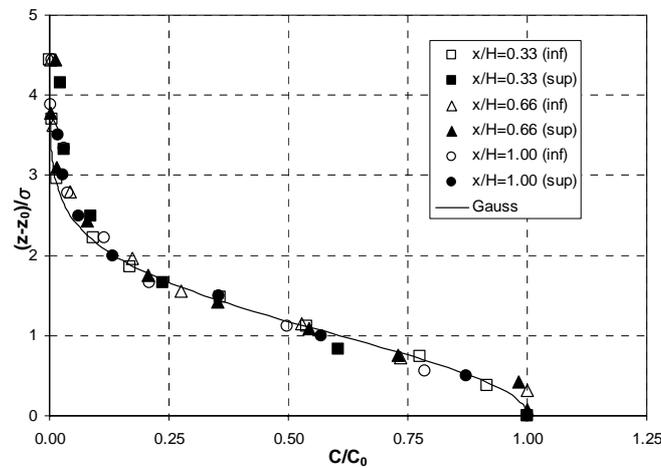


Figura 7.16. Perfil gaussiano e valores experimentais de concentração média, condição A, configuração I, para  $x/H = 0,33, 0,66, 1,00$ .

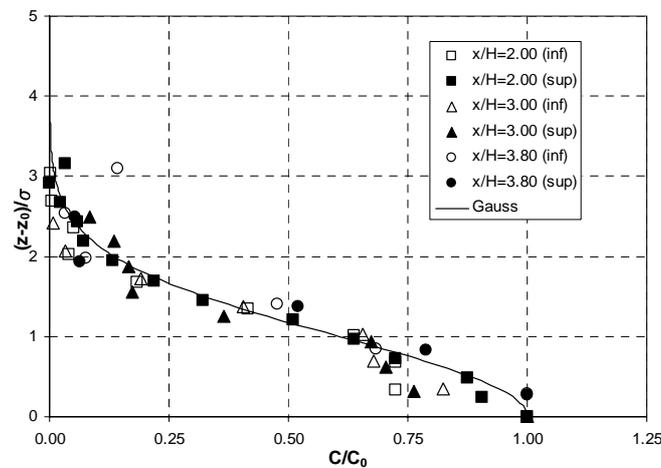


Figura 7.17. Perfil gaussiano e valores experimentais de concentração média, condição A, configuração I, para  $x/H = 2,00, 3,00, 3,80$ .

## 7.7 Dispersão vertical e elevação da pluma

O modelo de dispersão Gaussiano (equação 2.57) possivelmente é o mais comum dos modelos para o estudo das concentrações na pluma de emissão. O ponto

crítico deste tipo de análise é o cálculo correto da dispersão ( $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ ). A partir das medições de concentração e do ajuste dos valores experimentais ao perfil gaussiano e possível obter estes parâmetros de forma quase direta. O método sugerido por Pasquill [Zanetti, 1990], baseado na teoria estatística de difusão de Taylor, requer da medição ou da estimação do desvio padrão das componentes lateral e vertical das flutuações de velocidade do vento ( $\sigma_v$  e  $\sigma_w$ ) e das funções universais do tempo de difusão e da escala de tempo Lagrangeana.

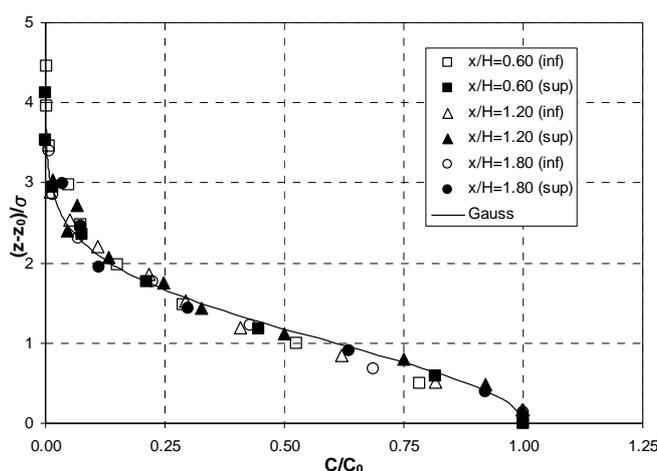


Figura 7.18. Perfil gaussiano e valores experimentais de concentração média, condição B, configuração I, para  $x/H = 0,60, 1,20, 1,80$ .

Na Figuras 7.19 e 7.20 são apresentados os valores da dispersão vertical  $\sigma_z$  em função da distância  $x$  na forma adimensional para as condições A e B, e a configuração I. Os valores levados à escala atmosférica são comparáveis aos que proporcionam as curvas PTG na parte inicial, apresentadas no capítulo 2, considerando estabilidade atmosférica entre neutra e suavemente instável. A comparação dos valores experimentais com as expressões de Briggs fornecidas por Zanetti [1990] e Baechlin [1992], para a condição de estabilidade atmosférica neutra (D) em terrenos urbano e rural, é indicada na Figura 7.19. Os mesmos valores são comparados com as expressões correspondentes à condição atmosférica E -suavemente instável- na Figura 7.20. Uma melhor concordância é observada entre os valores experimentais é a curva para a condição de estabilidade neutra. As expressões de Pasquill-Gifford, muito utilizadas nos modelos dos organismos reguladores, também foram consideradas nesta comparação, mas não são apresentadas nas figuras pela similitude com as curvas de Briggs.

A extrapolação dos valores experimentais aos resultados obtidos por Robins [2001] em túnel de vento tem boa concordância considerando o caso do menor número de Richardson ( $Ri^* = 0,12$ ) que constitui a condição mais próxima a estes testes.

Uma alternativa de análise é a distribuição das concentrações proposta a partir do estudo de Ai-Chen et al. [1983], cujo modelo matemático pode ser avaliado com os resultados destes experimentos.

A Figura 7.21 mostra a elevação da pluma  $\Delta z$  como função da distância a sotavento em forma adimensional para as condições A e B, e a configuração I. A simulação correta deste parâmetro deve considerar os requerimentos de quantidade de movimento e empuxo da pluma de emissão [Poreh & Kacherginsky, 1981]. Considerando escoamentos neutralmente estratificados, a trajetória para uma pluma isotérmica na etapa de elevação, pode ser estimada a partir da lei de “1/3”

$$\frac{z}{l_m} = \left( \frac{3}{\beta_T^2} \right)^{1/3} \left( \frac{x}{l_m} \right)^{1/3}, \quad (7.5)$$

onde o parâmetro de comprimento da quantidade de movimento é

$$l_m = R_0 \frac{w_0}{U_0} \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_a}}. \quad (7.6)$$

Para uma pluma flutuante, a expressão correspondente é a lei dos “2/3”

$$\frac{z}{l_b} = \left( \frac{3}{2\beta_T^2} \right)^{1/3} \left( \frac{x}{l_b} \right)^{2/3}, \quad (7.7)$$

sendo o comprimento do empuxo

$$l_b = \frac{R_0^2 w_0 g}{U_0^3} \frac{\Delta\rho}{\rho_a}. \quad (7.8)$$

Utilizando estas expressões e considerando  $\beta_T = 0,611$  [Davidson, 1994] são obtidas as curvas da lei de “1/3” e “2/3” para as condições A e B de empuxo, respectivamente, representadas na Figura 7.21, indicando uma boa correlação dos valores experimentais com a expressão para pluma flutuante.

Também foi utilizada uma expressão mais simples que considera só a relação de velocidades emissão / escoamento [Savory et al., 1996], e para as condições A e B tem o mesmo valor,  $w_0/U_0 = 0,66$ . A curva não é apresentada na figura devido às diferenças com os resultados experimentais, mostrando a importância da consideração do empuxo nas plumas flutuantes.

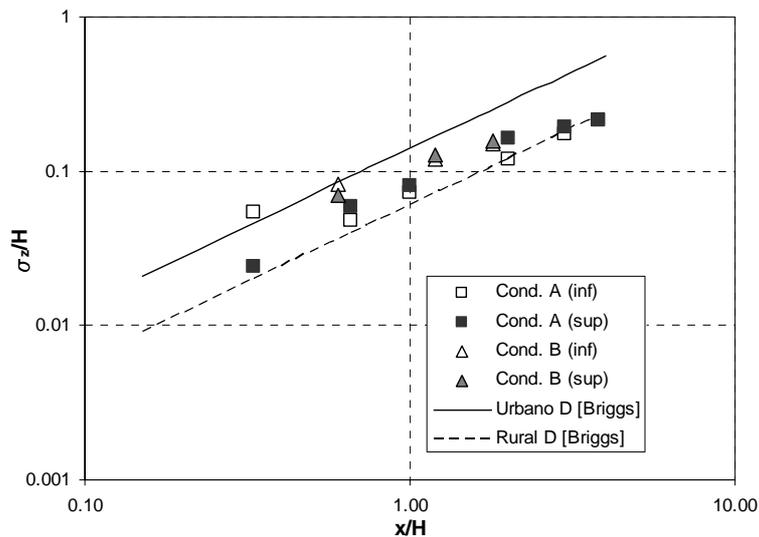


Figura 7.19. Comparação dos valores experimentais da dispersão vertical da pluma na configuração I com as expressões de Briggs para estabilidade atmosférica D [Zanetti, 1990].

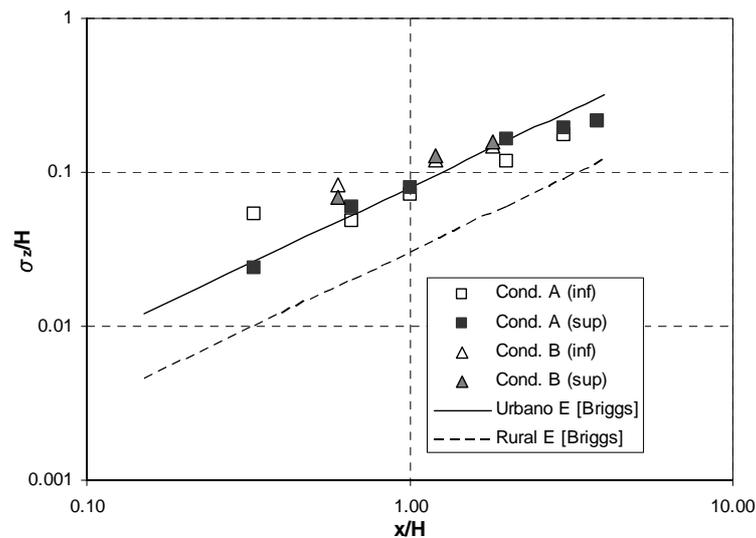


Figura 7.20. Comparação dos valores experimentais da dispersão vertical da pluma na configuração I com as expressões de Briggs para estabilidade atmosférica E [Zanetti, 1990].

Finalmente, aplicando a expressão de Hamilton, citada no capítulo 2, obtém-se  $\Delta z/H = 0,07$ . O valor calculado é muito próximo ao valor obtido no início da pluma extrapolando o ajuste linear dos valores experimentais.

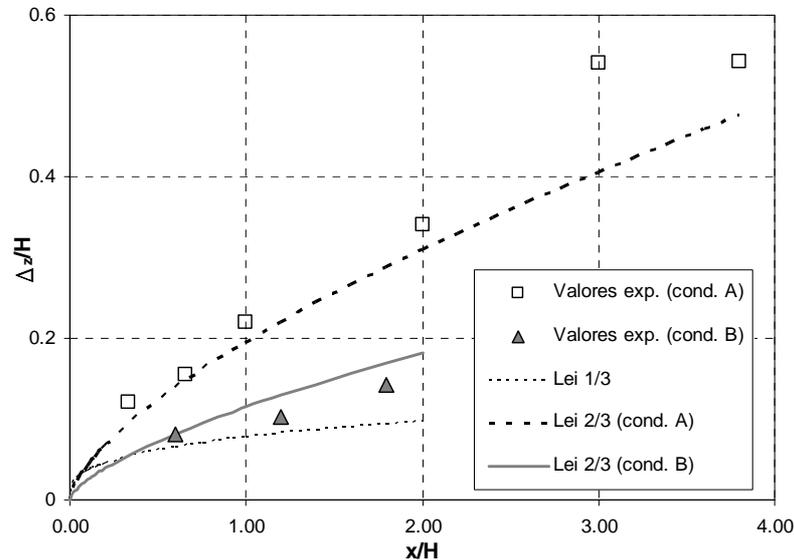


Figura 7.21. Elevação vertical da pluma avaliada a partir dos valores experimentais, condições A e B, e configuração I.

## 7.8 Análise do fator de diluição

Nas proximidades de uma fonte de emissão gasosa o processo de dispersão pode ser analisado a partir do fator de diluição  $D_n$  definido pela expressão 3.10. Os valores obtidos nestes experimentos são comparados com um modelo de previsão da diluição mínima baseado nos trabalhos de Chen & Wilson [1988]. Este modelo considera a difusão num escoamento com turbulência de grande escala onde a dispersão da pluma é proporcional à distância desde a emissão. A diluição mínima, considerando lineal a dispersão da pluma, varia com o quadrado da distância e pode ser obtida com a seguinte expressão

$$D_{\min} = \left[ D_0^{0,5} + \alpha(\pi/2)^{0,5} \left( \frac{Ux^2}{Q_e} \right) \right]^2 \quad (7.9)$$

onde  $D_0 = 1 + B_1 M^2$  depende da relação de quantidade de movimento  $M$  e das constantes  $B_1 = 7,0$  e  $\alpha = 0,20$ . Este tipo de expressão se utiliza para controle e previsão de emissões gasosas, e aparece publicada, por exemplo, nos manuais da ASHRAE, American Society of Heating, Refrig. and Air-Cond. Eng., [Saathoff et al., 1998].

Na Figura 7.22 são indicados os valores experimentais e as curvas de diluição mínima para a relação de quantidade de movimento  $M = 0,245$  (condições A e B) e  $M = 0,414$  (condição C). Os valores experimentais sempre superam a diluição mínima. A configuração I, que apresenta os valores mais próximos a  $D_{min}$ , exibe uma tendência definida da qual se afastam alguns valores indicados na figura. No início da pluma, para as condições E e F, a diluição aumenta produto da menor relação de quantidade de movimento (Tabela 7.1). No campo meio ( $x/H = 1,80$ ), para a condição H, a diluição diminui como consequência da maior relação da quantidade de movimento. Este comportamento é consistente com a influência provocada pela relação  $M$  nas curvas de diluição mínima.

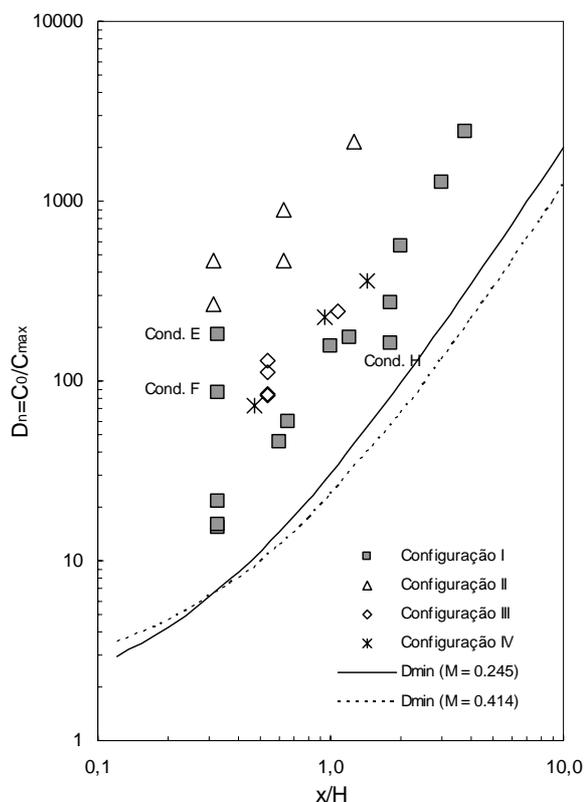


Figura 7.22. Valores experimentais da diluição e curvas de diluição mínima.

---

## 7.9 Discussão dos resultados

Além das da análise e as comparações anteriores, realizadas principalmente a partir de modelos semi-empíricos, foram revisados diversos trabalhos experimentais relacionados com este tipo de fenômeno.

O estudo de Costa & Borrego [1997], analisando a dispersão sobre modelos 2-D de serras, permite comparar os perfis de concentrações obtidos neste trabalho, levando em conta que as mesmas são volumétricas. Também são semelhantes os resultados obtidos por Li & Meroney [1983] considerando os campos de concentração nas proximidades a uma edificação. A análise experimental de Pendergrass & Arya [1984], além dos perfis de concentração, permite comparar os parâmetros de dispersão na camada limite neutral.

Hoydysh & Dabberdt [1992] estudaram a estrutura da esteira e o processo de dispersão utilizando imagens de vídeo e medição de concentrações, obtendo resultados que tem boa concordância com os resultados deste trabalho.

Outros estudos foram analisados para estabelecer comparações mais gerais e projetar novos estudos tais como: a dispersão em canhões urbanos [Liedtke et al., 1998, Kastner-Klein & Plate, 1999], e sobre serranias e morros urbanos [Arya et al., 1981, Thompson & Snyder, 1985].

O trabalho de Liedtke et al. [1998] inclui resultados de estudos de campo, como também os estudos de Oikawa & Meng [1997], nas proximidades de uma edificação, e Yassim et al. [2005], em uma zona urbana. Em geral, se verifica que nos experimentos em túnel de vento obtém-se concentrações maiores do que nos estudos de campo. Oikawa & Meng medem concentrações instantâneas a barlavento da emissão produto das reversões instantâneas do escoamento nas proximidades do teto da edificação.

O efeito de escala neste tipo de estudos foi analisado por Staathoff et al. [1995]. Experimentalmente mostram que aumentando até quatro vezes a escala do modelo, as discrepâncias das concentrações normalizadas são menores que dois, comparadas com as concentrações obtidas quando a escala do modelo é coincidente com a escala da simulação da camada limite. Levando em conta as vantagens de usar modelos maiores e

---

as grandes incertezas das medições de campo, estas discrepâncias podem considerar-se aceitáveis em certos casos.

A análise da diluição realizada, além da comparação com as curvas de diluição mínima, apresenta bom acordo com os valores experimentais obtidos por Chen & Wilson [1988] e Saathoff et al. [1998] para pequenas emissões gasosas ao nível do teto das edificações.

Com relação às flutuações de concentração a partir da análise dos perfis de intensidade de concentração, o comportamento geral é semelhante ao obtido por outros autores [Li & Meroney, 1983, Fackrell & Robins, 1982], observando-se tendências similares ainda que os valores obtidos por Li & Meroney são menores nos extremos da pluma. Contudo, devem contemplar se as considerações feitas anteriormente para as configurações II e III.

Por outro lado, é importante assinalar que existe uma assimetria importante entre a região superior e inferior produto do empuxo gerado pela emissão de um gás leve como o hélio. Tanto nos modelos teóricos para análise do desvio padrão das flutuações como nos estudos experimentais, não é considerada essa assimetria.

Como exemplo, dentro dos modelos teóricos é possível mencionar o modelo de Hanna [1984], que obtém uma solução para a equação de conservação do desvio padrão das flutuações de concentração  $\sigma_c$ , baseada nos coeficientes de difusividade. A distribuição de  $\sigma_c$  obtida a partir deste modelo resulta Gaussiana, mas com um decréscimo a partir do máximo no centro da pluma menor que no caso da concentração média. Assim a intensidade das flutuações de concentração  $\sigma_c/C$  é maior nos extremos da pluma, mas a distribuição mantém a simetria com relação ao centro da pluma. Nos estudos de laboratório, tanto nos já mencionados, como no trabalho de Deardorff & Willis [1984], não é considerada a assimetria na distribuição das flutuações, sendo que em este último caso é considerada uma fonte flutuante com empuxo elevado.

Finalmente, com relação às flutuações de concentração é possível dizer que os valores medidos neste trabalho, em geral estão de acordo com os resultados dos modelos teóricos e dos valores obtidos em experimentos anteriores, só que na literatura não é analisada a possível assimetria da distribuição das flutuações. Este interessante

comportamento requer uma análise probabilística mais específica que é realizada no próximo capítulo, incluindo considerações referidas à intermitência do processo.

## 8 Análise da intermitência das concentrações

A intermitência de um processo pode ser analisada com a distribuição de probabilidade. Para um processo de dispersão, a função de densidade de probabilidade (f.d.p.) pode adquirir a forma exponencial, Gaussiana, ou log-normal, dependendo da região da pluma que está sendo analisada. Estas distribuições podem ser representadas no formato Weibull que provem de um tipo de distribuição utilizada para analisar velocidades do vento e cuja expressão é:

$$P(U) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{U}{U_{ref}} \right)^k \right] \quad (8.1)$$

onde  $P(U)$  é a probabilidade acumulada da velocidade do vento média,  $U_{ref}$  a velocidade de referência e  $k_W$  o fator de forma da distribuição [Deaves & Lines, 1997]. Operando é possível obter:

$$\ln U = \ln U_{ref} + \frac{1}{k_W} \ln [ - \ln (1 - P(U)) ] \quad (8.2)$$

Com base nesta expressão é definido o formato Weibull, dado pela representação gráfica bi-logarítmica do logaritmo negativo da probabilidade acumulada em função do número de desvios padrões de ultrapassagem. Este formato permite identificar os efeitos da intermitência que acontecem nos extremos da pluma e nas regiões da esteira. A inclinação da f.d.p. acumulada, apresentada desta forma, representa a intermitência do processo.

A intermitência de um processo é definida pelos picos ocasionais que acontecem durante períodos de valores zero do processo. Um dos primeiros trabalhos de análise das flutuações de concentrações [Fackrell & Robins, 1982] apresenta resultados em túnel de vento para a variância, valores de pico e o fator de intermitência definido como a proporção do tempo onde a concentração é maior que zero. Neste trabalho é utilizado um método de análise da intermitência mais atual baseado na representação da f.d.p. [Cheung & Melbourne, 2000].

No caso de plumas de dispersão, a intermitência das concentrações é evidente, mas também existe intermitência nas flutuações de velocidade nos escoamentos turbulentos. No vento atmosférico, a intermitência manifesta-se a diferentes escalas coexistindo processos intermitentes de grande escala e de pequena escala [Muschinski et al., 2004]. Nos escoamentos turbulentos estacionários em túneis de vento, existe intermitência das flutuações de velocidade associadas às escalas muito pequenas que na maioria dos casos não são levadas em conta. No entanto, na modelagem a escala de processos de dispersão a intermitência das concentrações da pluma tem que ser considerada.

A análise das flutuações de concentração e, em particular, da intermitência dos processos de dispersão tem muita importância no conhecimento destes fenômenos e no desenvolvimento de modelos teóricos para a análise do problema, mesmo como na estimação de certos níveis limites de concentração ainda quando a concentração média é baixa. Este trabalho realizado no laboratório pode ser utilizado como base para a análise da dispersão no campo próximo que acontece na camada limite atmosférica neutralmente estável. Os resultados das flutuações de concentração podem ser estendidos, por exemplo, a alguma aplicação em combustão.

É importante aclarar que nos experimentos a escala reduzida, sejam estes desenvolvidos em túnel de vento ou canal de água, as séries temporais apresentam menor intermitência que a escala real [Schatzmann et al., 1997], sendo que as variações direcionais de baixa frequência características do vento atmosférico não existem nos escoamentos simulados. Isto coincide com o que foi expresso no capítulo anterior com relação a que as concentrações médias máximas determinadas em experimentos de laboratório são maiores às obtidas em experimentos de campo. O grau de superestimação depende das dimensões da fonte, da distância entre a emissão e o receptor e da estrutura da turbulência do escoamento.

## 8.1 Amostragem das flutuações de concentração

As amostras das flutuações de concentração utilizadas neste análise têm uma duração de um minuto e foram adquiridas com uma frequência de amostragem de 1024 Hz. O instrumental de medição utilizado está constituído por um anemômetro de fio

---

quente e uma sonda aspirante conectadas a um micro processador a través de uma placa de aquisição de dados. Complementarmente, foi realizada uma análise da influência da amostragem para ver o comportamento e a comparabilidade dos resultados com um trabalho anterior.

Nas seguintes figuras são apresentados exemplos das amostras utilizadas neste trabalho com registros parciais (15 segundos de duração) das concentrações em ppm. A Figura 8.1 apresenta o registro temporal das concentrações obtidas no extremo superior da pluma ( $z/H = 1,26$ ) para a configuração I e a condição A, na posição a sotavento mais próxima da fonte de emissão ( $x/H = 0,33$ ). O processo evidencia a alta intermitência caracterizada pelos eventuais picos de concentração sobre longos períodos com níveis de valor nulo. Os picos de concentração alcançam níveis de  $1 \times 10^5$ . A Figura 8.2 corresponde á mesma configuração e condição, só que a amostra foi obtida num ponto intermédio entre o extremo e o centro da pluma ( $z/H = 1,26$ ) numa posição mais a sotavento ( $x/H = 0,66$ ). O processo ainda é intermitente, mas o grau de intermitência é menor que no caso anterior. Os valores de concentração máxima são também menores, da ordem de  $4 \times 10^4$ . Finalmente, na Figura 8.3 se apresenta a amostra correspondente ao centro da pluma ( $z/H = 1,12$ ) na posição a sotavento  $x/H = 0,33$ . Praticamente não existe intermitência das concentrações e os picos alcançam valores de  $2 \times 10^5$  ppm.

A configuração geral das amostras é similar às obtidas por Poreh & Cermak [1990, 1992] no estudo das flutuações de concentração integradas ao longo da linha de visualização em túnel de vento. A diferença deste tipo da análise com relação às medições das flutuações de concentração em um ponto é que a integração produz uma grande atenuação das flutuações dentro da pluma. Considerando que as flutuações de concentração são principalmente provocadas pela contribuição das próprias flutuações na pluma e a contribuição pelo meandro da pluma, pode-se complementar para observar que tipo de contribuição prevalece nas diferentes regiões da pluma.

## 8.2 Análise da intermitência

A análise da intermitência é feita com base nas medições das concentrações na pluma. Normalmente é utilizado o fator de intermitência  $\gamma_i$  definido pela relação entre o tempo em que a concentração é zero e o tempo total de amostragem. Assim, para os

exemplos das Figuras 8.2, 8.2 e 8.3, os valores aproximados de  $\gamma_i$  são 0,83, 0,45 e 0, respectivamente.

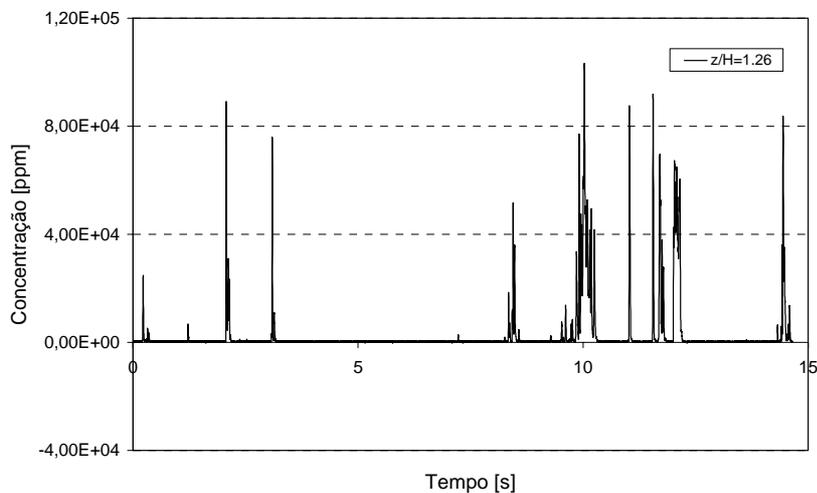


Figura 8.1. Amostra das flutuações de concentração – posição  $x/H = 0,33$ ,  $z/H = 1,26$  (extremo superior da pluma), configuração I e condição A.

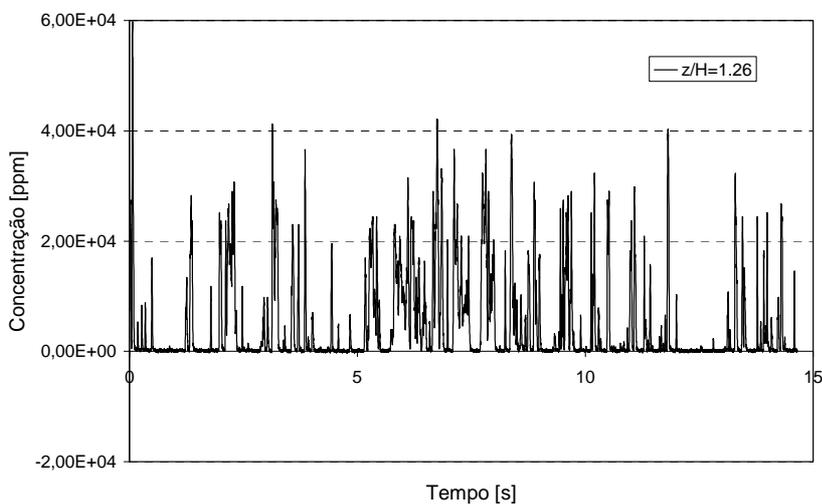


Figura 8.2. Amostra das flutuações de concentração – posição  $x/H = 0,66$ ,  $z/H = 1,26$ , configuração I e condição A.

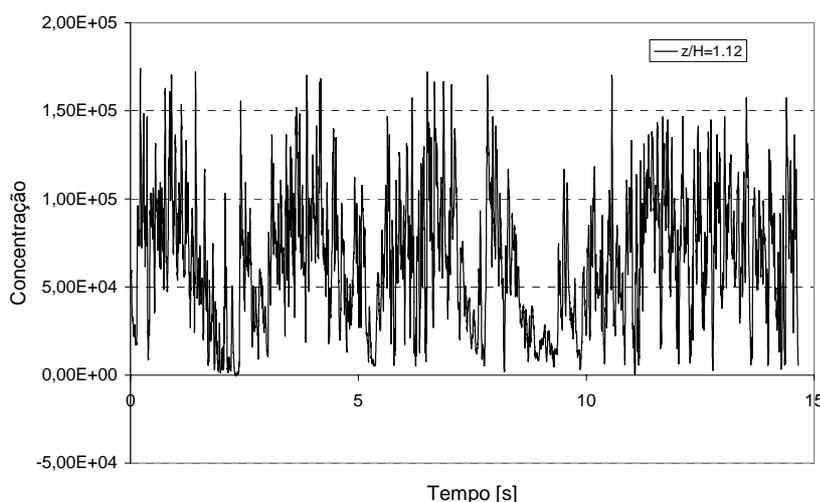


Figura 8.3. Amostra das flutuações de concentração – posição  $x/H = 0,33$ ,  $z/H = 1,12$  (centro da pluma), configuração I e condição A.

Neste trabalho, a intermitência do processo é analisada a partir das f.d.p. das flutuações. Este método permite uma melhor caracterização que a simples determinação do fator  $\gamma$ . Em diferentes pontos da pluma foram obtidas amostras da concentração flutuante com uma frequência de aquisição de 1024 Hz e um minuto de duração. A f.d.p. foi calculada para cada registro. Representada graficamente no formato Weibull, a declividade da probabilidade acumulada indica os efeitos de intermitência das concentrações.

A representação gráfica é do tipo bi - logarítmica do logaritmo negativo da probabilidade acumulada  $Q$  em função de  $c/sdv$ , sendo  $Q = 1 - P$ ,  $P$  a probabilidade acumulada das flutuações de concentração e  $c/sdv$  o número de desvios padrões de ultrapassagem dado pela relação de cada valor da flutuação com o desvio padrão das flutuações de uma série.

### 8.2.1 Resultados obtidos para a configuração I

Esta configuração, descrita no capítulo 7, representa o caso da chaminé isolada com vento incidente representando o escoamento turbulento desenvolvido na camada limite atmosférica neutral com terreno correspondente a um expoente  $\alpha = 0,23$ . As

---

condições A, B, C, E, F, G e H surgem da variação da velocidade média do vento incidente e das características da emissão (tabela 7.1).

A Figura 8.4 representa a f.d.p. acumulada para três alturas diferentes na vertical correspondente à posição  $x/H = 0,33$  a sotavento da emissão para a condição A. Na parte central da pluma ( $z/H = 1,12$ ) a inclinação da f.d.p. é maior, diminuindo no extremo inferior ( $z/H = 0,96$ ), e tendo uma declividade ainda menor no extremo superior ( $z/H = 1,26$ ). Isto indica que o processo é mais intermitente na região superior da pluma. Sendo que as posições verticais referidas ao centro da pluma e a amplitude,  $\frac{z - z_0}{\sigma}$ , são 5,81 e 2,96 para a posição superior e inferior respectivamente, novamente se manifesta a distorção do comportamento gaussiano nesta posição muito próxima à fonte de emissão. É possível supor então que as diferenças entre a posição superior e inferior tem sua origem na configuração da pluma nesta região mais próxima e nos diferentes efeitos do empuxo na região inferior (embaixo do centro da pluma) e na região superior (acima da parte central).

Uma descrição mais detalhada é apresentada na Figura 8.5 para a posição  $x/H = 0,66$ , ainda na região próxima a fonte de emissão e para a condição A. Perto do centro da pluma, a declividade da distribuição de probabilidade é mais pronunciada que nos extremos. A inclinação decresce desde 1,09 na posição central ( $z/H = 1,16$ ) até 0,061 no extremo superior da pluma ( $z/H = 1,42$ ). Com relação ao extremo inferior ( $z/H = 0,90$ ), também a partir da posição central existe uma diminuição da declividade, mas só até 0,51. Ou seja, se repete o comportamento da posição anterior. Na figura são indicadas as retas de ajuste e a correspondente expressão para estes três pontos, como também a baixa intermitência acontecendo no centro da pluma e a alta intermitência basicamente na região superior.

Na Figura 8.6 são apresentadas as funções correspondentes a 5 pontos de medição na vertical  $x/H = 2,00$  a sotavento da emissão para a condição A. O ponto  $z/H = 1,34$  está localizado no centro da pluma, os pontos  $z/H = 1,02$  e  $1,18$  na região inferior e os pontos  $z/H = 1,62$  e  $1,86$  na região superior da pluma. As condições gerais de intermitência mantêm-se só que existe uma diminuição na região superior (de máxima intermitência). Esta localização com relação à fonte de emissão pode-se considerar como campo próximo a meio. Além da diminuição da intermitência, no

---

gráfico é possível perceber que se produz uma repetição de valores de igual probabilidade. Isto tem sua origem nas características de aquisição da amostra, mas pode ser modificado mudando o intervalo de classes para o cálculo da f.d.p. para observar mais claramente as tendências nas curvas. Neste trabalho não foi realizado uma análise deste tipo, considerando que é possível descrever a intermitência do processo com os gráficos tais como são apresentados.

A Figura 8.7 mostra os resultados em três pontos de medição na posição  $x/H = 3,80$ , que pode ser considerada campo meio a longe, para a condição A. A tendência que começava a manifestar-se na localização anterior, nesta posição é evidente. Uma grande diminuição da intermitência tal que as declividades das funções no formato Weibull são semelhantes no centro e nos extremos da pluma. Na parte central a declividade é 1,10, na parte superior 1,02, e finalmente na parte inferior 1,22, quer dizer que a intermitência é ainda menor no extremo inferior da pluma que no centro.

Nas Figuras 8.8 e 8.9 são apresentados os gráficos da probabilidade acumulada correspondentes à localização mais perto da emissão nas condições C e D. O comportamento geral é muito similar em ambos os casos. A similitude pode ser trasladada ao caso da condição A analisado na Figura 4. Não entanto, é possível perceber uma maior intermitência na parte superior e menor na inferior para a condição D.

O mesmo acontece no caso apresentado na Figura 8.10 onde é analisado o comportamento no centro e nos extremos laterais na localização correspondente a  $x/H = 0,33$  e  $z/H = 1,12$  para a condição A. Verifica-se igual comportamento que no caso da Figura 8.4 para o centro da pluma  $y/H = 0,00$ , em tanto que nos extremos laterais, a intermitência tem um valor intermédio com relação ao que tem nas posições superior e inferior. A pequena diferencia que se percebe entre as duas posições laterais tem sua origem na diferencia de posicionamento com relação ao centro.

As Figuras 8.11, 8.12 e 8.13 apresentam os resultados correspondentes à condição B que implica a mudança do vento incidente, ou seja, maiores efeitos inerciais com relação aos casos anteriores. Foram analisadas as localizações  $x/H = 0,60$ , 1,20 e 1,80 respectivamente, e em cada caso são apresentados os resultados em três posições;

---

no extremo superior, no centro e no extremo inferior. Com fora mencionado no capítulo anterior, a localização da posição central evidencia os maiores efeitos inerciais com relação à condição A. Os gráficos podem ser comparados entre si para ver a tendência do comportamento com relação ao posicionamento, e com os gráficos das Figuras 8.5 e 8.6 para ver a influência da condição A. Particularmente, na posição  $x/H = 0,60$  (Figura 8.11) o comportamento é bastante semelhante ao da Figura 8.5, só que no extremo superior é menos intermitente e no inferior mais intermitente. Já nas Figuras 8.12 e 8.13, ainda que se insinue uma diminuição da intermitência, a tendência não é tão marcada como na condição A (Figura 6).

Na Figura 8.14 são mostradas as funções de probabilidade acumulada para a posição  $x/H = 0,60$  da condição G. Os gráficos podem ser comparados com os correspondentes as Figuras 8.5 (condição A) e 8.11 (condição B), sendo o comportamento bastante semelhante. Na figura estão indicadas as retas de ajuste no centro e nos extremos da pluma. Para esta condição, a intermitência é apenas maior no centro e no extremo inferior, e apenas menor na parte superior.

A Figura 8.15 mostra o que acontece na posição  $x/H = 0,60$ , no caso que a emissão é uma mistura He-Ar (condição H). As funções podem ser comparadas com as obtidas nesta posição nas condições A, B e H. Não é possível dizer que a intermitência é menor na parte superior da pluma, devido a que a posição relativa no extremo superior é diferente que nos outros casos. Para esta mesma condição, se apresentam as funções obtidas na posição  $x/H = 1,80$  (Figura 8.16), sendo o comportamento semelhante ao correspondente às condições A (Figura 8.6) e B (Figura 8.13).

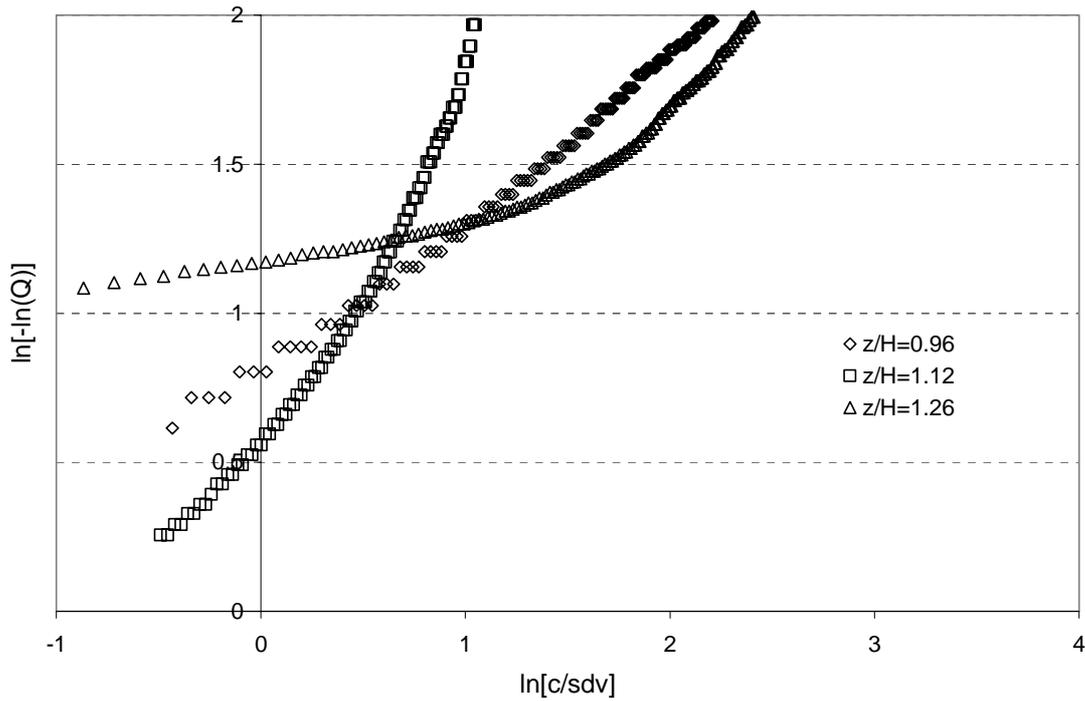


Figura 8.4. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição  $x/H = 0,33$ , configuração I e condição A.

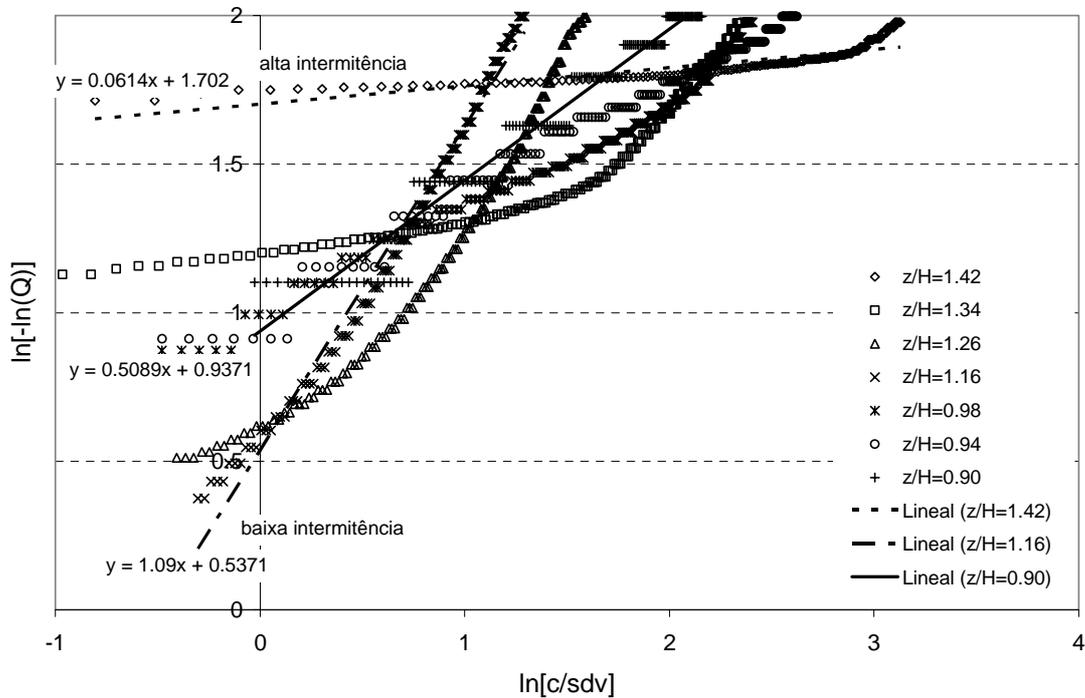


Figura 8.5. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição  $x/H = 0,66$ , configuração I e condição A.

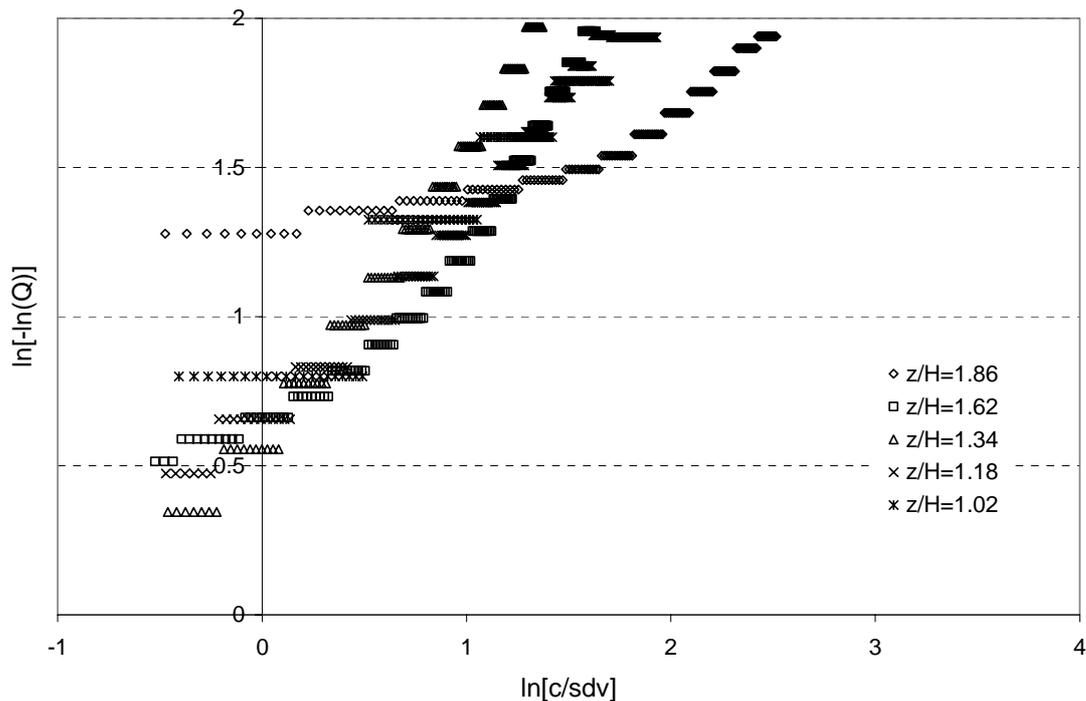


Figura 8.6. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição  $x/H = 2,00$ , configuração I e condição A.

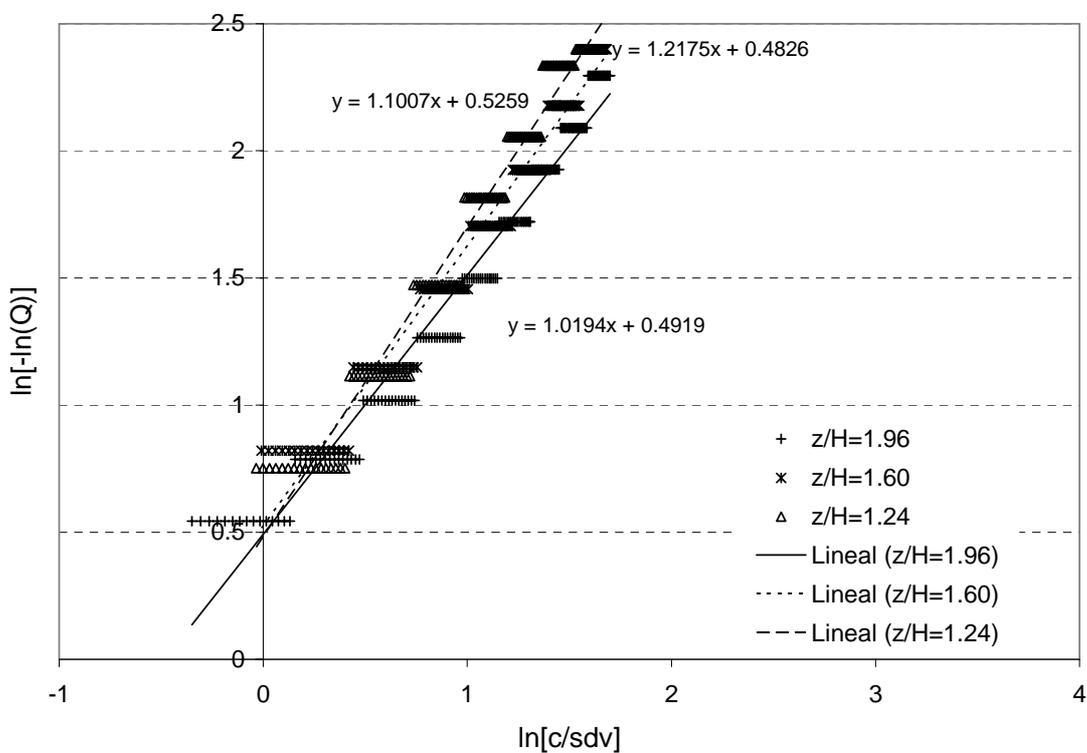


Figura 8.7. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição  $x/H = 3,80$ , configuração I e condição A.

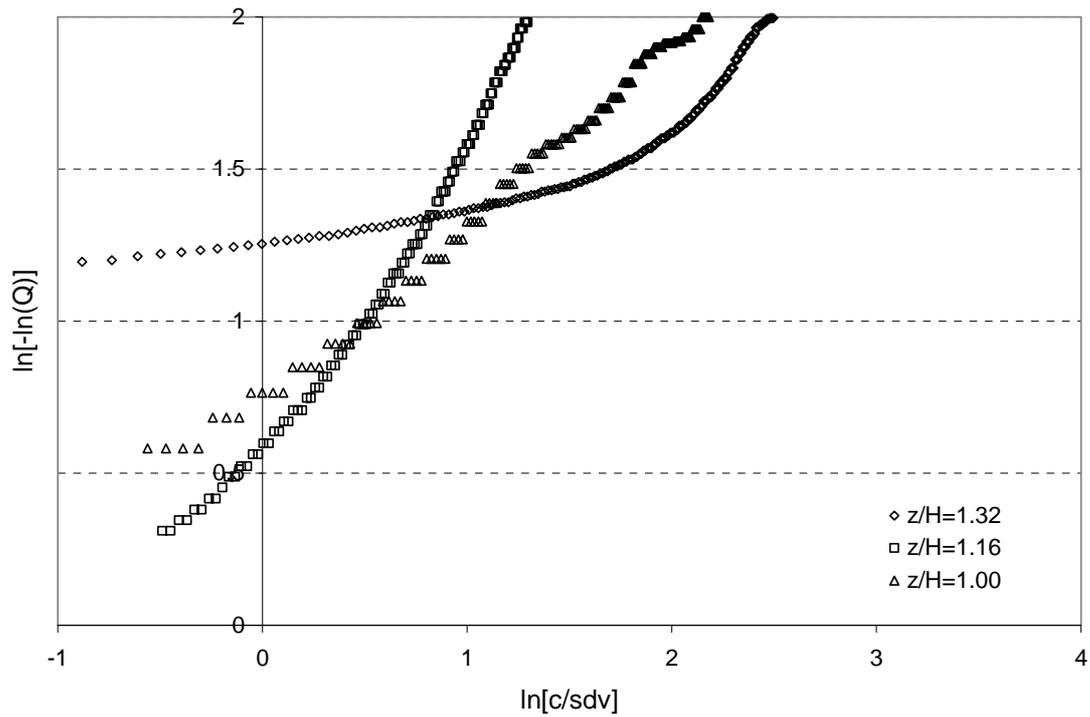


Figura 8.8. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição  $x/H = 0,33$ , configuração I e condição C.

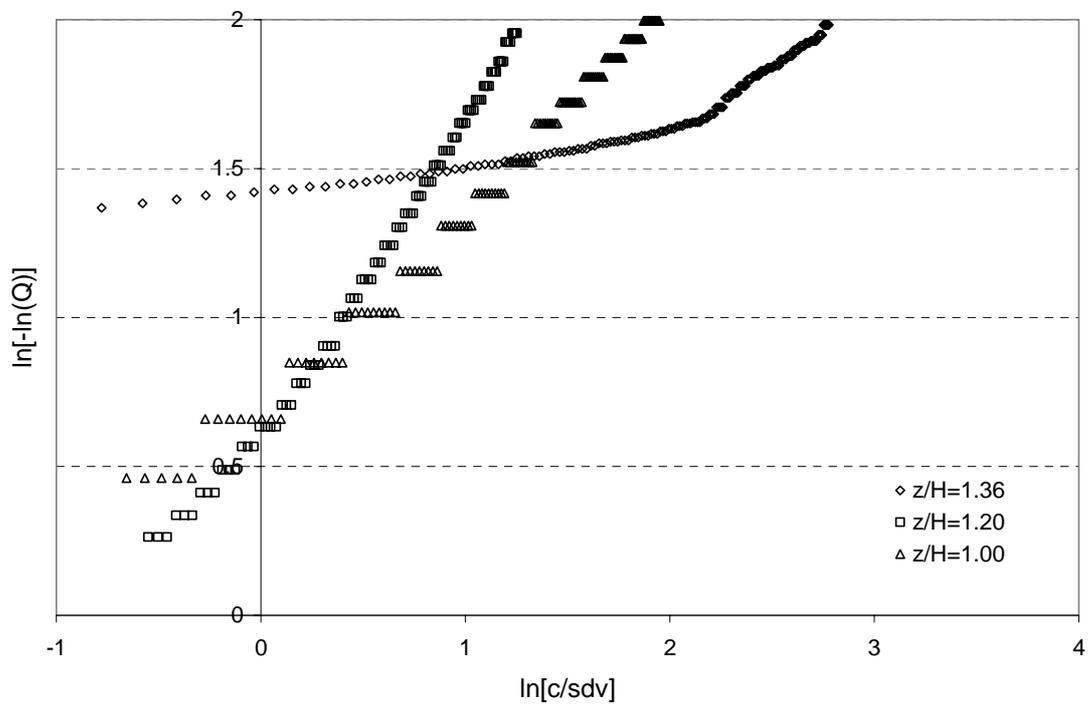


Figura 8.9. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição  $x/H = 0,33$ , configuração I e condição D.

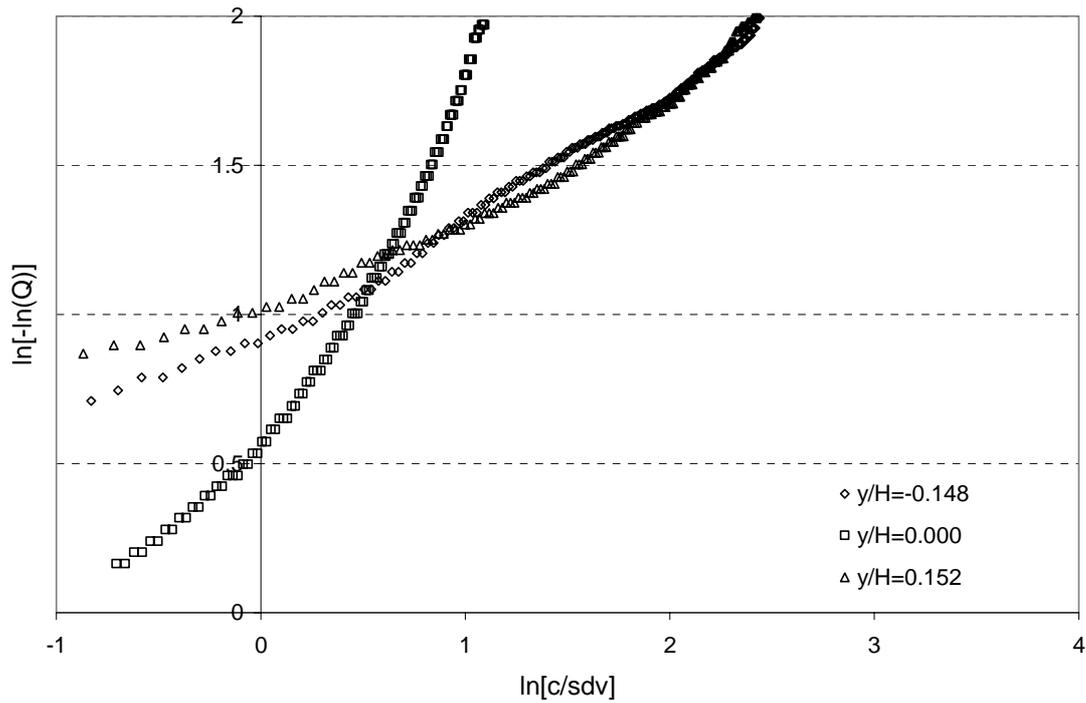


Figura 8.10. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição  $x/H = 0,33$ ,  $z/H = 1,12$ , configuração I e condição A.

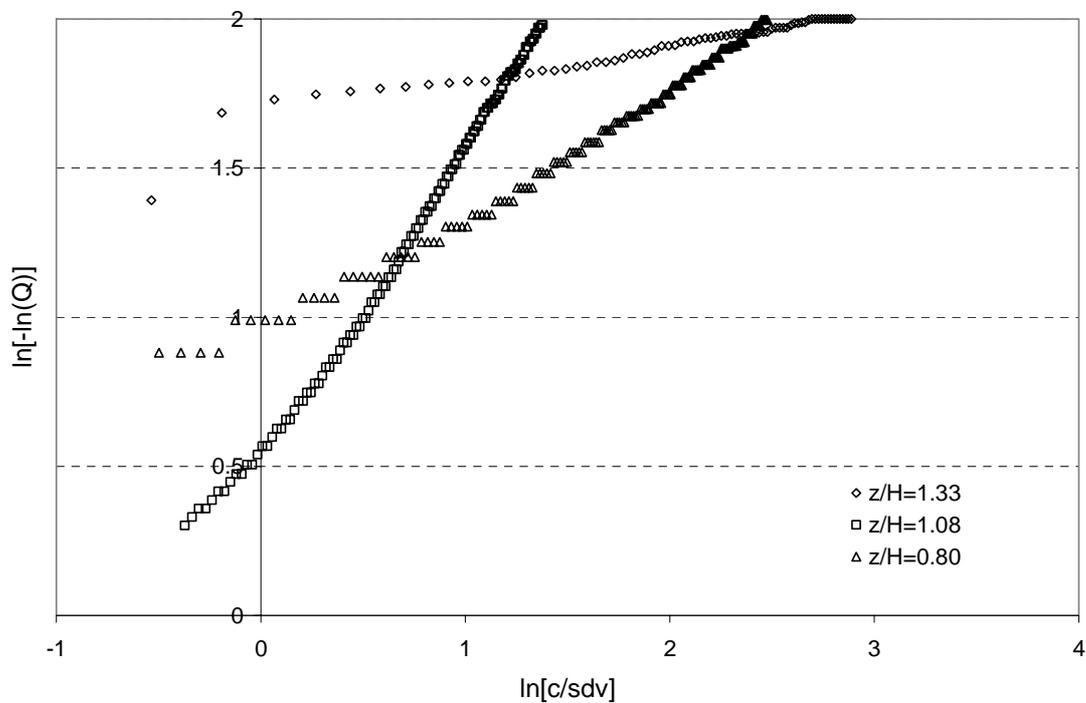


Figura 8.11. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição  $x/H = 0,60$ , configuração I e condição B.

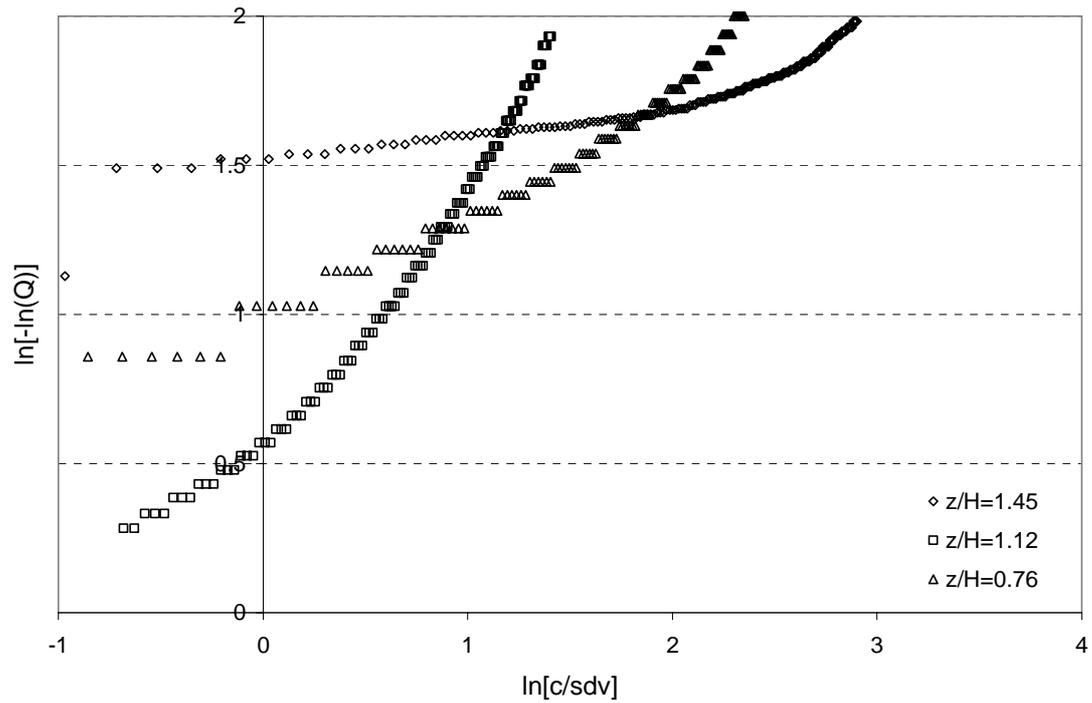


Figura 8.12. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição  $x/H = 1,20$ , configuração I e condição B.

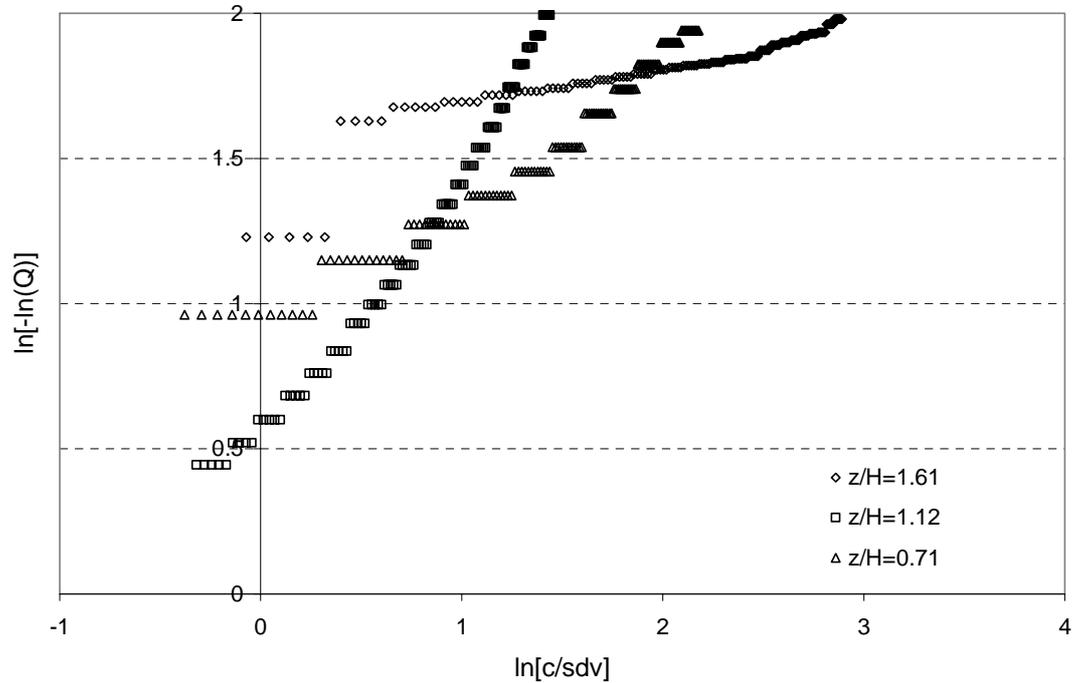


Figura 8.13. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição  $x/H = 1,80$ , configuração I e condição B.

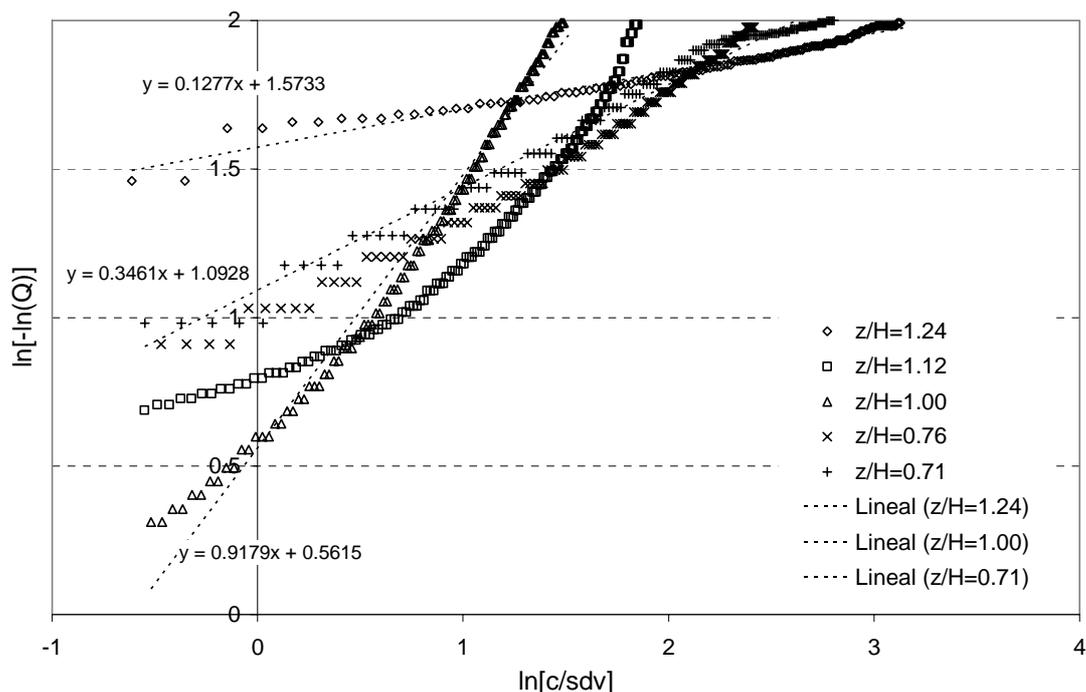


Figura 8.14. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição  $x/H = 0,60$ , configuração I e condição G.

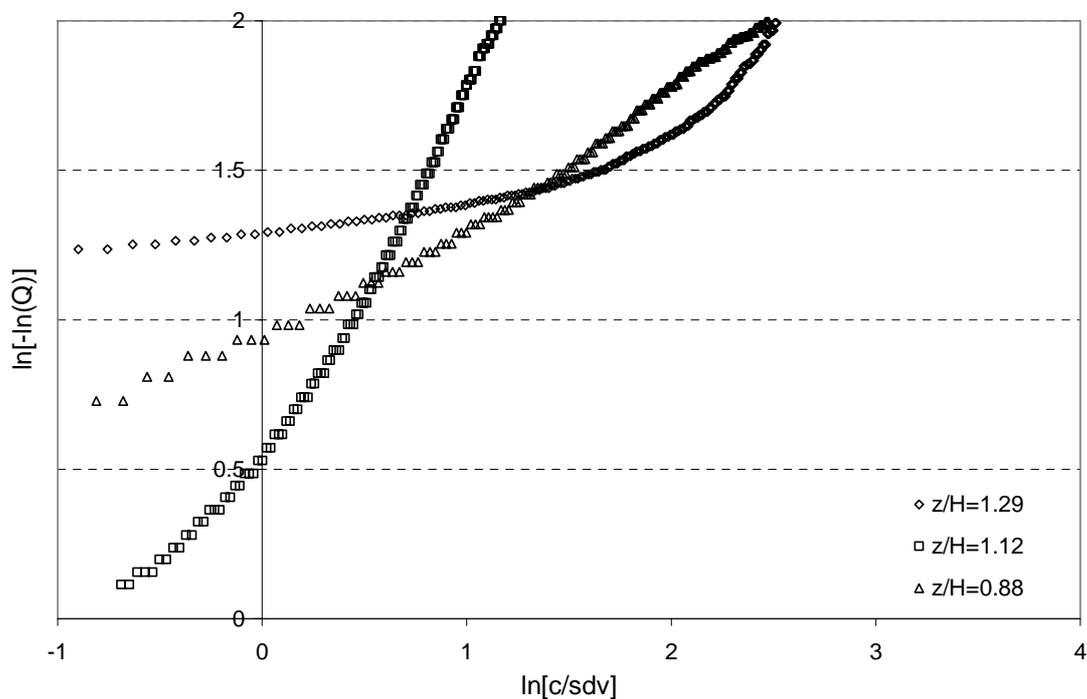


Figura 8.15. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição  $x/H = 0,60$ , configuração I e condição H.

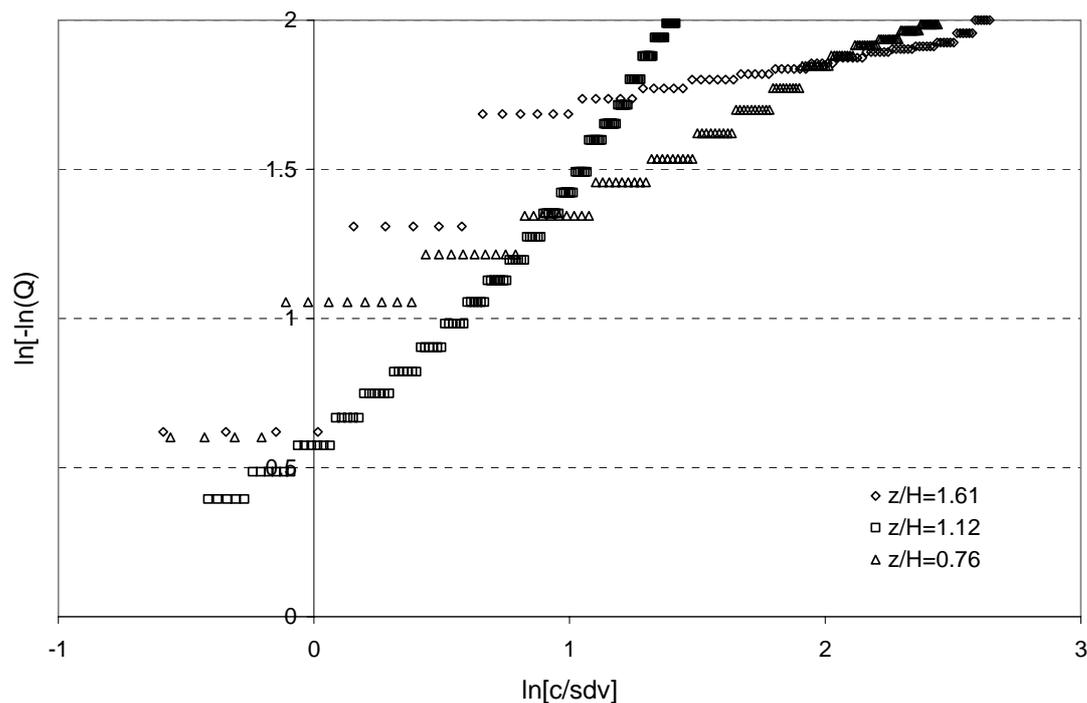


Figura 8.16. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição  $x/H = 1,80$ , configuração I e condição H.

## 8.2.2 Resultados obtidos para a configuração II

A configuração II representa o caso de uma edificação a barlavento da chaminé, sendo as características do vento incidente as mesmas da configuração I (camada limite neutra com terreno  $\alpha = 0,23$ ). As Figuras 8.17 e 8.18 mostram as funções de probabilidade nas localizações  $x/H = 0,315$  e  $0,630$  para a condição A. São apresentados os resultados na parte central,  $z/H = 1,41$  e  $1,59$  respectivamente, e em dois pontos na parte inferior para cada posição. Fazendo uma comparação com os gráficos obtidos com a configuração I (Figuras 8.4 e 8.5), em geral se observa maior intermitência para esta segunda configuração e uma clara tendência à diminuição da intermitência na posição mais a sotavento.

Para a condição B, na que aumentam os efeitos inerciais, foram obtidos os gráficos que se apresentam nas Figuras 8.19, 8.20 e 8.21 para as posições a sotavento  $x/H = 0,315$ ,  $0,630$  e  $1,26$ , respectivamente. É possível comparar os gráficos da Figura 8.19 com os da Figura 8.17, mas levando em conta que agora existe uma medição na parte superior da pluma ( $z/H = 1,85$ ) onde a intermitência é relativamente menor que

para a configuração I, entanto que com relação à condição A, a intermitência é maior na região central ( $z/H = 1,44$ ) e semelhante na região inferior. As Figuras 8.20 e 8.21 indicam a tendência à diminuição da intermitência nos extremos nas localizações mais a sotavento. Na posição  $x/H = 1,26$  (Figura 8.21), a declividade da função de probabilidade no formato Weibull tende a valores próximos a 0,5 nas diferentes posições verticais  $z$ . Em geral para esta configuração II, os resultados obtidos na condição B mostram uma clara diminuição da intermitência com relação à configuração I.

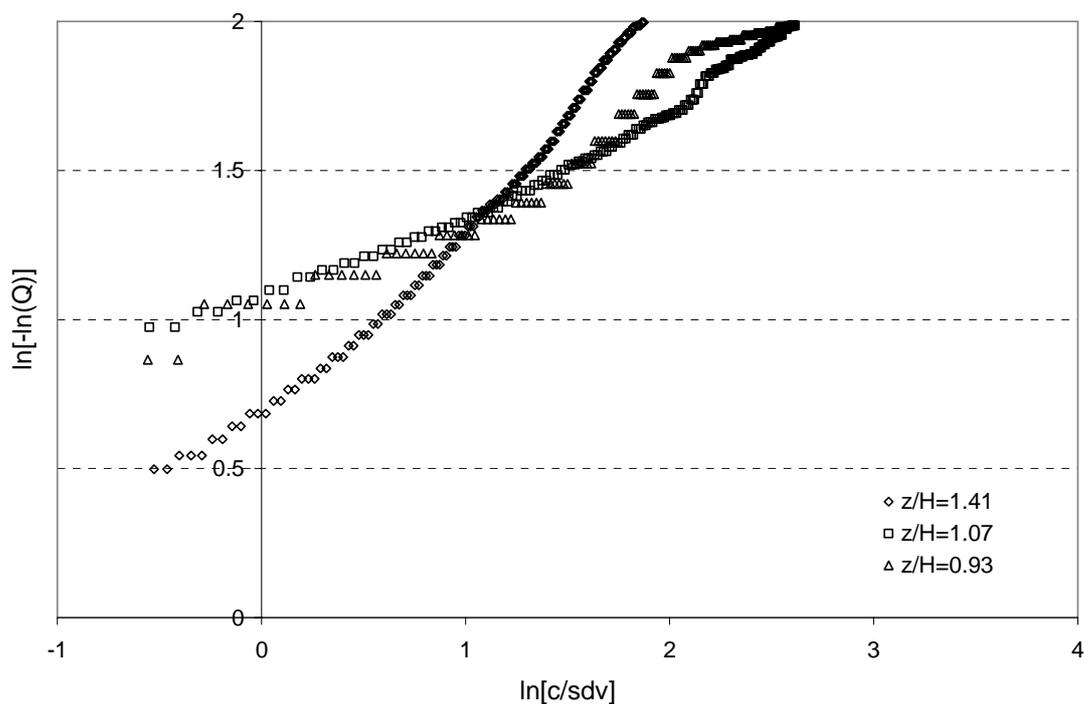


Figura 8.17. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição  $x/H = 0,315$ , configuração II e condição A.

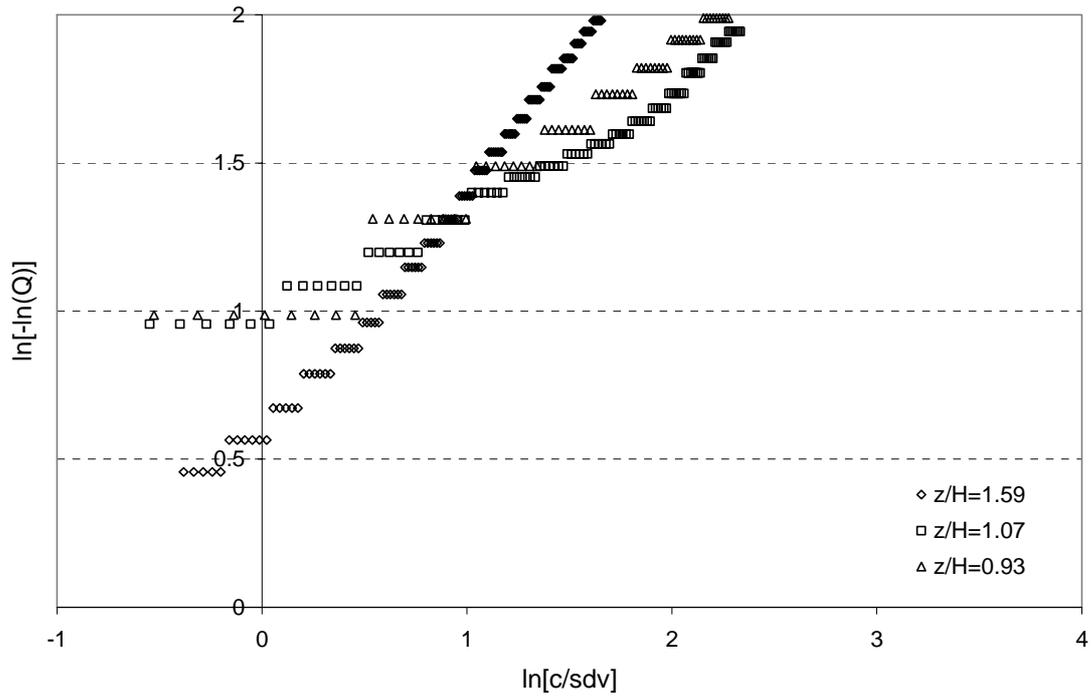


Figura 8.18. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição  $x/H = 0,630$ , configuração II e condição A.

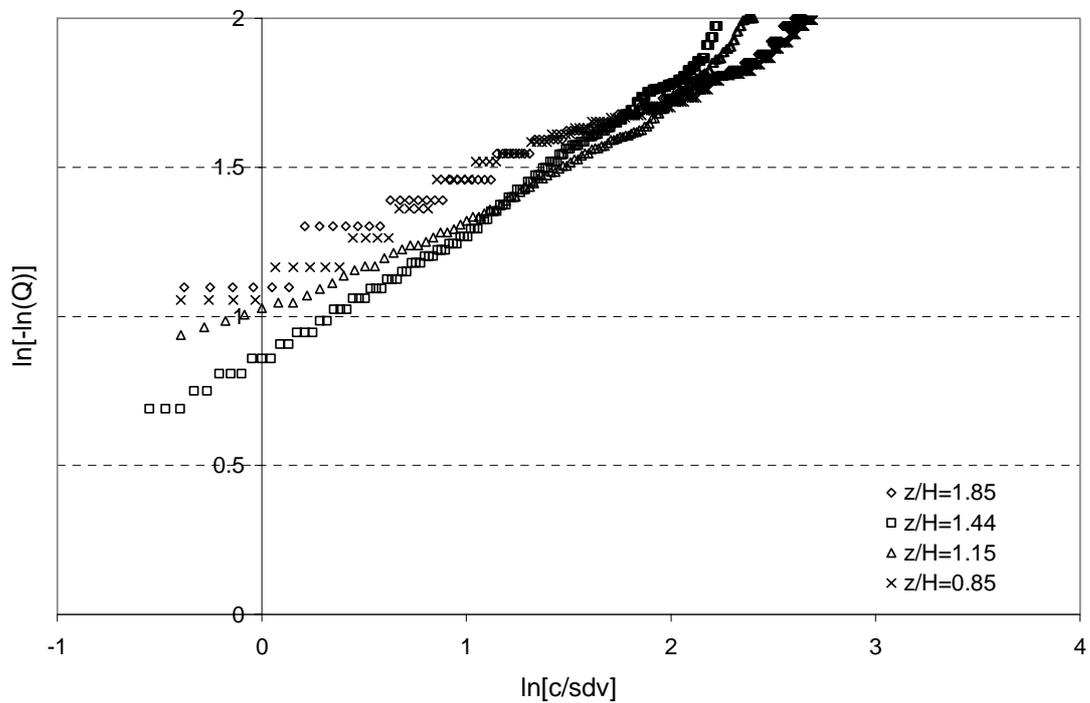


Figura 8.19. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição  $x/H = 0,315$ , configuração II e condição B.

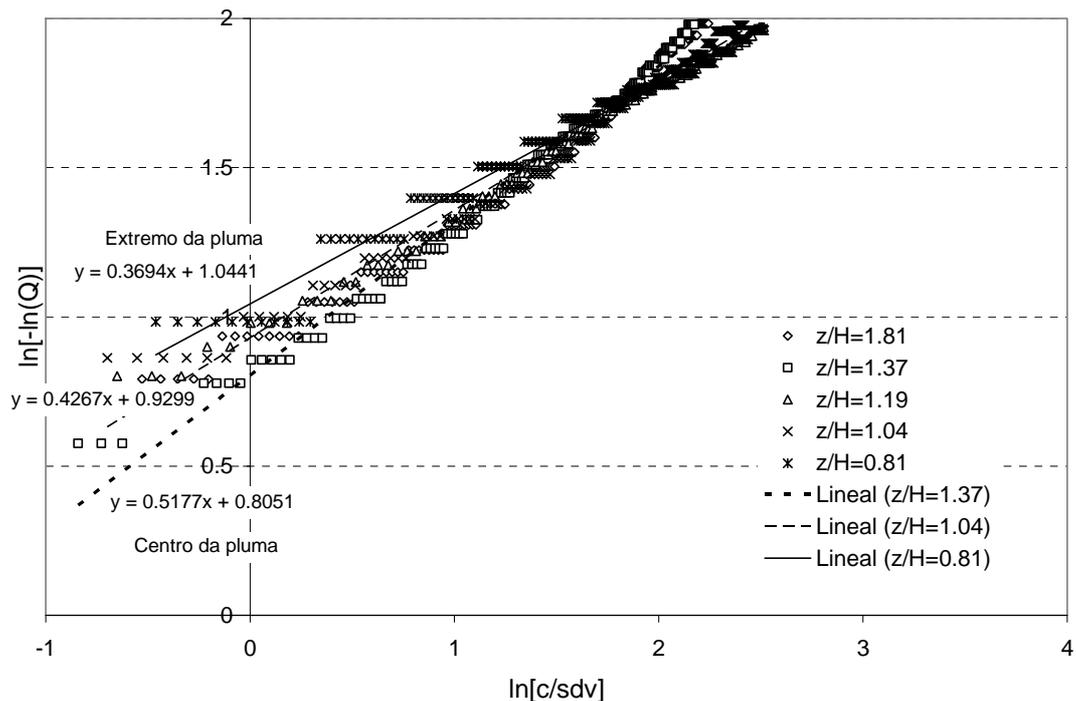


Figura 8.20. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição  $x/H = 0,630$ , configuração II e condição B.

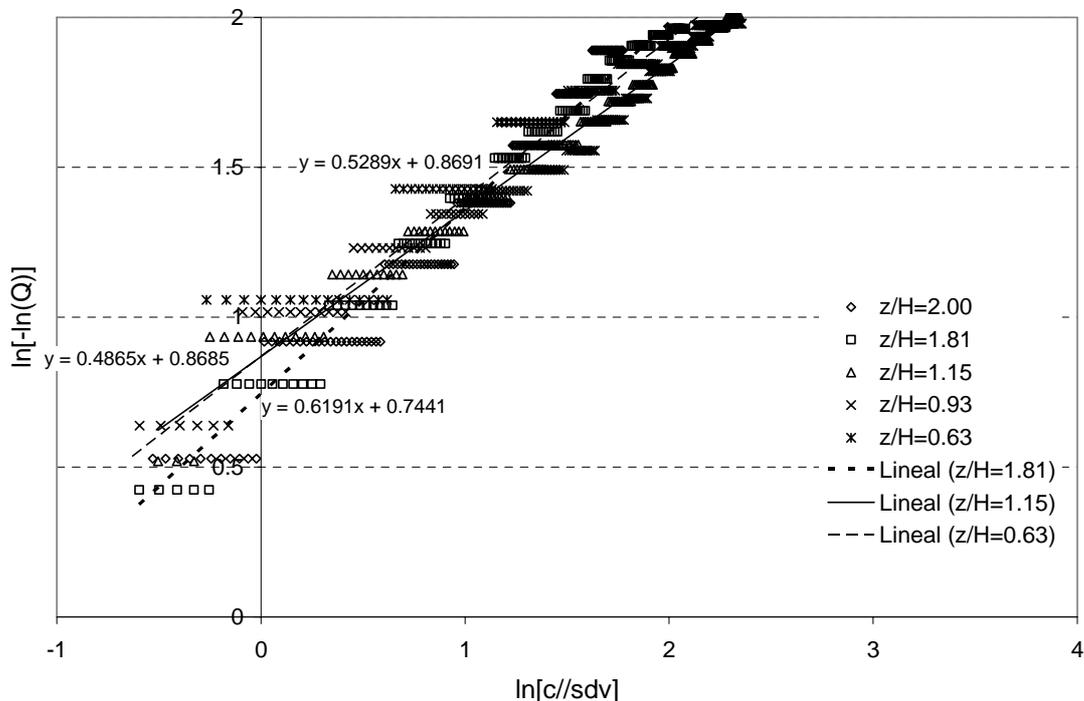


Figura 8.21. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição  $x/H = 1,260$ , configuração II e condição B.

### 8.2.3 Resultados obtidos para a configuração III

Nesta configuração, a mesma edificação é localizada a sotavento da chaminé, sendo as características do vento incidente as representativas da camada limite atmosférica neutral com terreno  $\alpha = 0,23$ . Nas Figuras 8.22 e 8.23 são apresentadas as funções de probabilidade na localização  $x/H = 0,540$  (acima da edificação), entanto que a Figura 8.24 corresponde à posição  $x/H = 1,080$  (a sotavento da edificação), para a condição A. A Figura 8.22 corresponde ao caso em que a altura da chaminé coincide com a altura da edificação. O comportamento na região central é semelhante ao obtido na situação similar correspondente à configuração I (Figura 8.5), sendo menor a intermitência na região superior. Na região mais próxima à edificação ( $z/H = 1,07$ ), a função de probabilidade mostra uma conformação não observada até agora.

Para aprofundar mais o estudo, foi modificada a configuração diminuindo a altura da chaminé. Produto desta modificação são as funções de probabilidade da Figura 8.23 correspondentes às posições mais próximas à edificação ( $z/H = 1,15, 1,07$  e  $1,02$ ). Neste caso, o comportamento é mais definido com a intermitência diminuindo nos pontos mais próximos à edificação.

Na localização a sotavento da edificação mostrada na Figura 8.24, em geral existe uma diminuição da intermitência. São apresentadas as funções de probabilidade correspondentes à região central da pluma ( $z/H = 1,44$ ) e em dois pontos inferiores, ou seja, a análise é restrita à metade inferior da pluma mais afetada pela edificação. A intermitência é baixa nos dois pontos inferiores, com valores semelhantes aos obtidos na posição central.

A Figura 8.25 mostra os resultados obtidos para a condição B na localização  $x/H = 0,540$ , a traves de uma análise similar ao apresentado nas Figuras 8.22 e 8.23 (condição A), mas com maiores efeitos inerciais. Os pontos indicados com (a) correspondem à situação em que a altura da chaminé coincide com a altura da edificação. Os resultados no centro e parte superior da pluma são similares aos correspondentes à condição A (Figura 8.22), entanto que na parte inferior verifica-se menor intermitência. O ponto  $z/H = 1,02$  (b) corresponde à configuração modificada com a diminuição da chaminé, e o comportamento da função de probabilidade é praticamente igual ao correspondente na situação (a). Neste caso, a modificação na

configuração não produz a variação observada na condição A, possivelmente devido à supremacia dos efeitos inerciais.

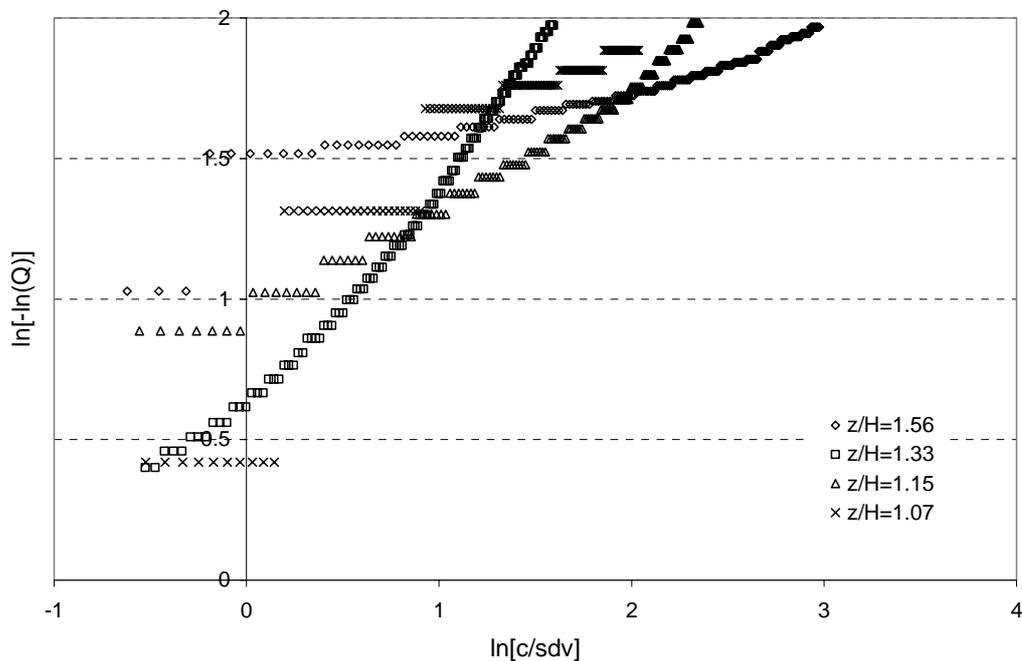


Figura 8.22. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição  $x/H = 0,540$ , configuração III e condição A.

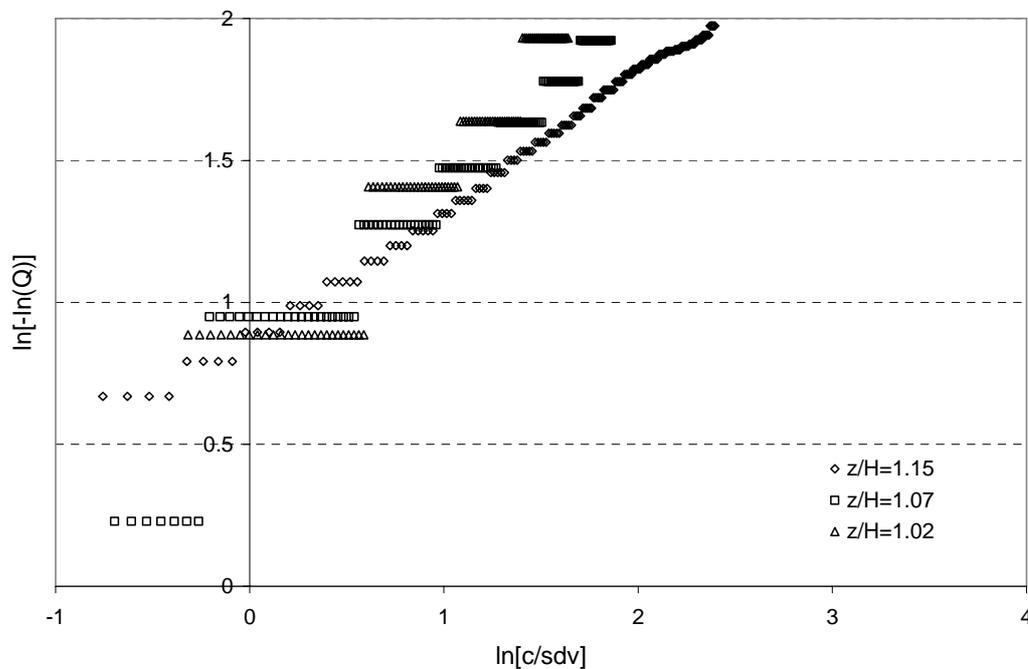


Figura 8.23. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição  $x/H = 0,540$ , configuração III modificada e condição A.

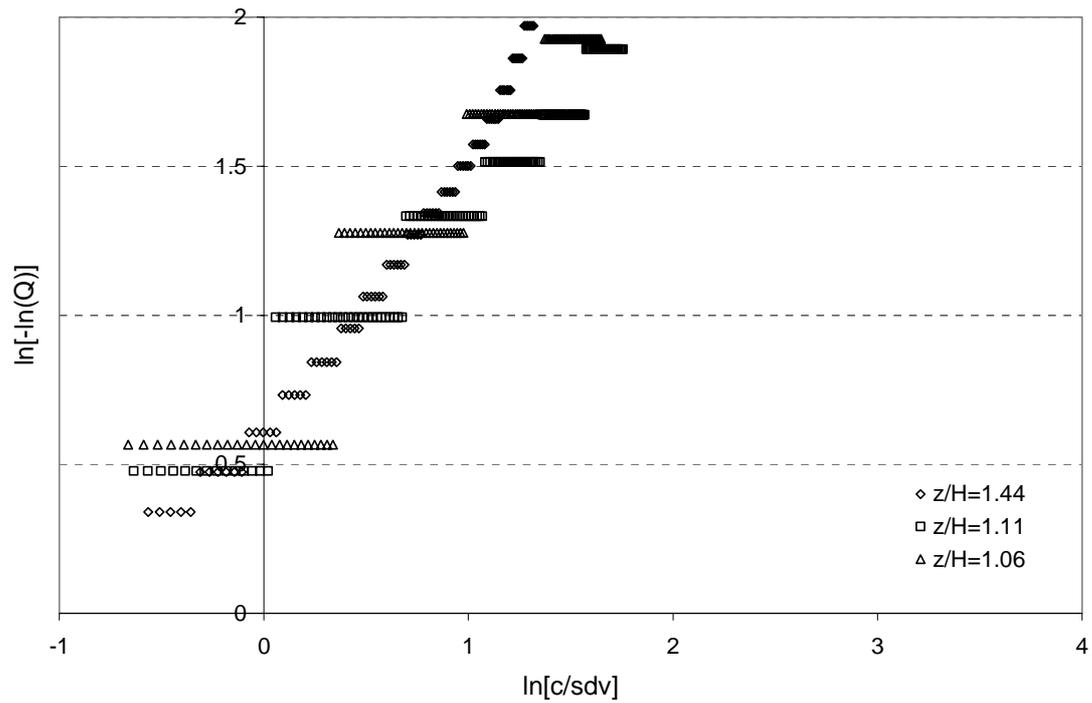


Figura 8.24. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição  $x/H = 1,080$ , configuração III e condição A.

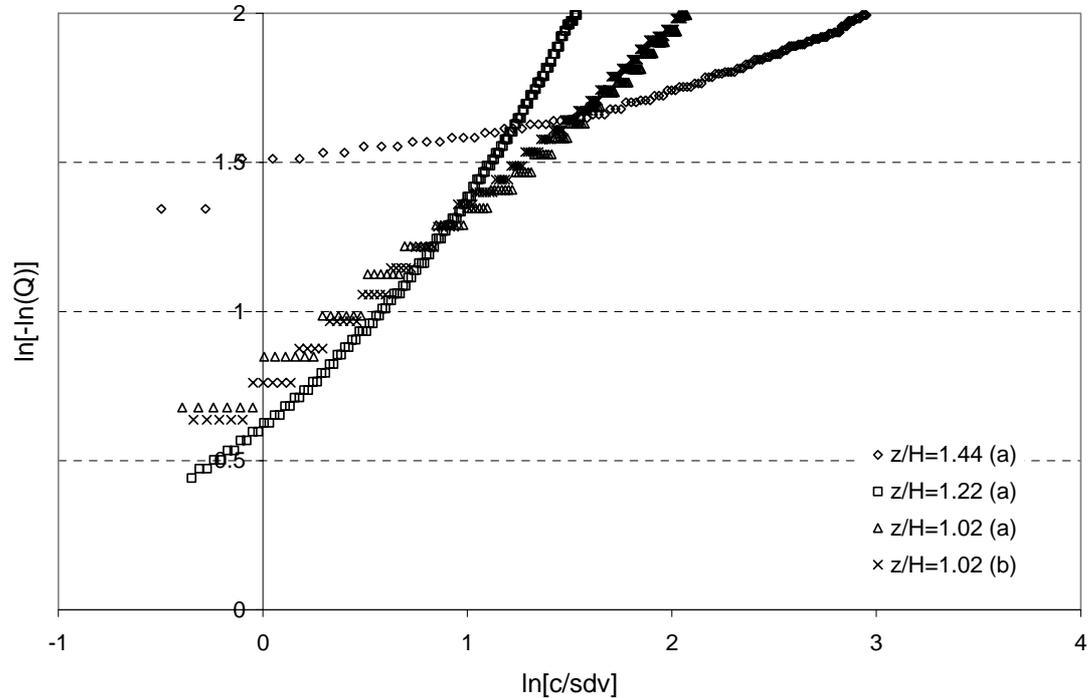


Figura 8.25. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição  $x/H = 0,540$ , configuração III e condição B.

## 8.2.4 Resultados obtidos para a configuração VI

Na configuração IV, além do escoamento incidente representando o vento atmosférico neutral com terreno  $\alpha = 0,23$ , a chaminé apresenta um entorno urbano não homogêneo com altura média das edificações semelhantes à altura da emissão. Somente é analisado o comportamento na condição B. Nas Figuras 8.26, 8.27 e 8.28 são apresentadas as funções de probabilidade nas localizações  $x/H = 0,470$ ,  $0,950$  e  $1,430$  respectivamente. A comparação com os resultados obtidos na configuração I (Figuras 8.11, 8.12 e 8.13) indica um comportamento geral semelhante com intermitência apenas maior nos extremos da pluma na posição mais a barlavento. Na posição mais a sotavento pode-se visualizar a tendência a uma diminuição da intermitência que já fora observada nas outras configurações analisadas.

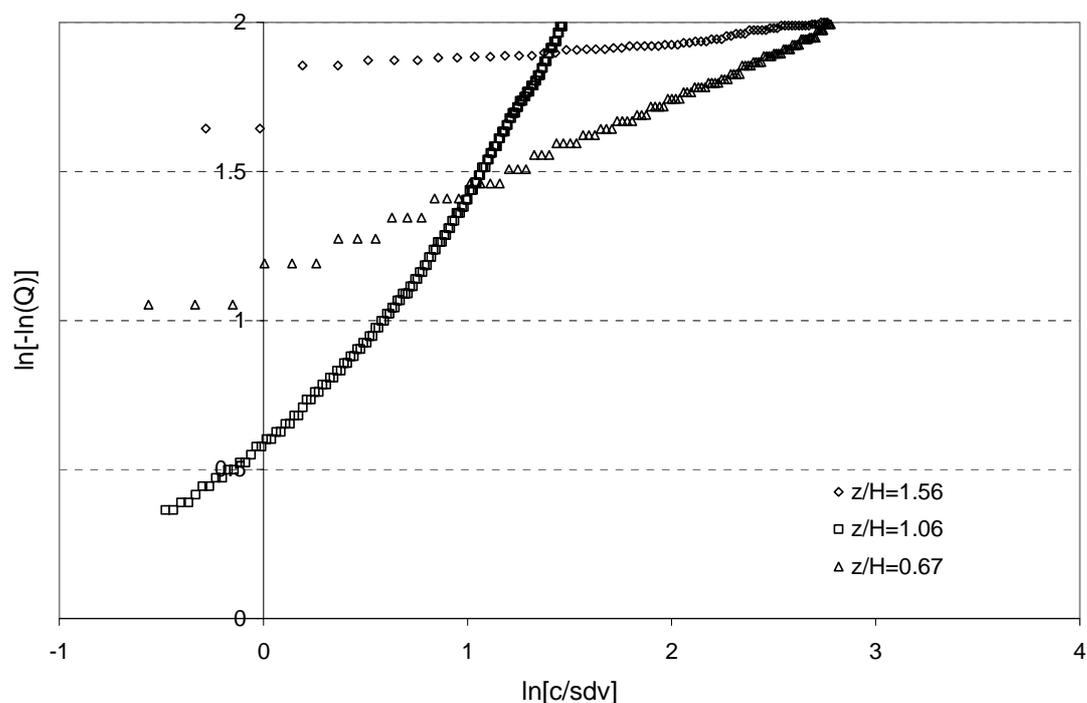


Figura 8.26. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição  $x/H = 0,470$ , configuração IV e condição B.

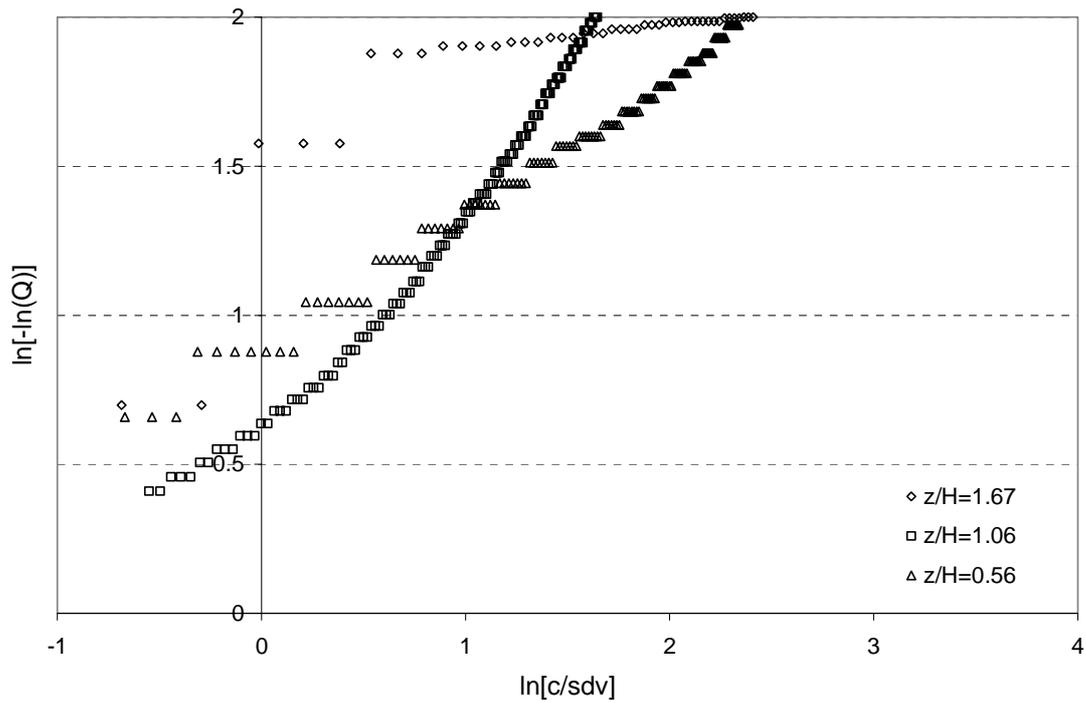


Figura 8.27. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição  $x/H = 0,950$ , configuração IV e condição B.

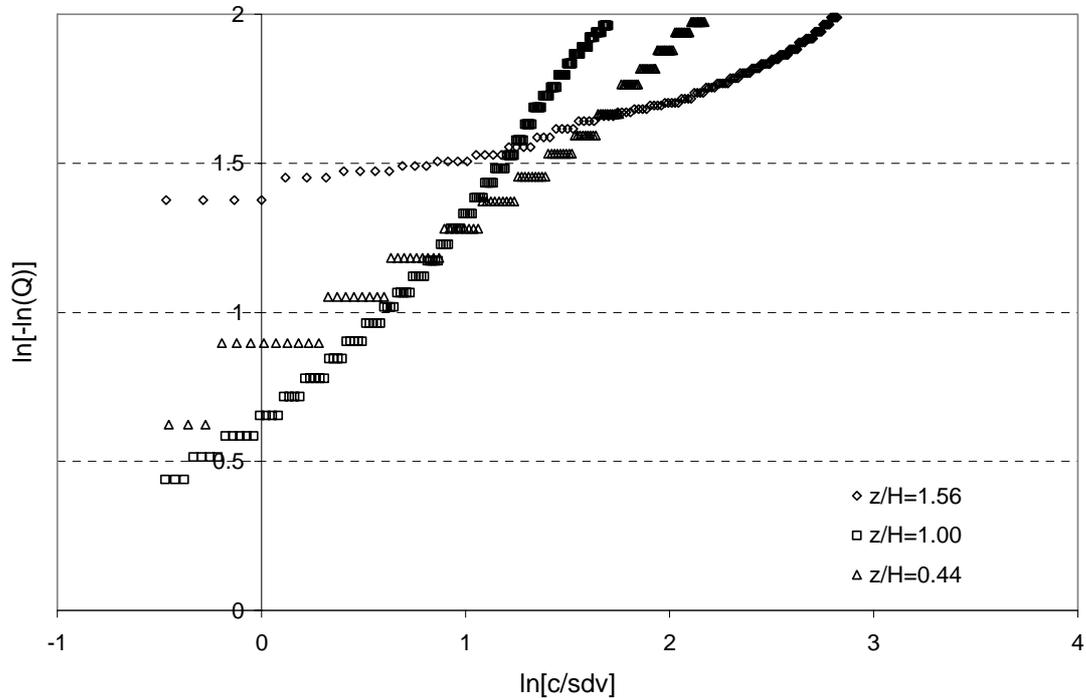


Figura 8.28. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição  $x/H = 1,430$ , configuração IV e condição B.

### *Influência da amostragem*

Todas as f.d.p. apresentadas anteriormente foram obtidas a partir de amostras de um minuto de duração com uma frequência de aquisição de 1024 Hz. Para analisar a influência das características da amostra foi realizado um teste adicional repetindo as condições apresentadas na posição  $x/H = 0,630$  da configuração II e condição B (Figura 8.20). Nesta amostragem foi utilizada uma frequência de aquisição de 128 Hz com uma duração de dois minutos. Os resultados são mostrados na Figura 8.29.

Apesar de que aparecem diferenças qualitativas com relação à amostragem anterior, como por exemplo, a repetição de valores de igual probabilidade já mencionada, desde o ponto de vista da análise da intermitência, os resultados se reproduzem quase em forma exata. Isto permite, por um lado desestimar a influência da amostragem na análise da intermitência nas condições aqui estabelecidas, e por outro, fazer comparações com o estudo realizado por Cheung & Melbourne [2000].

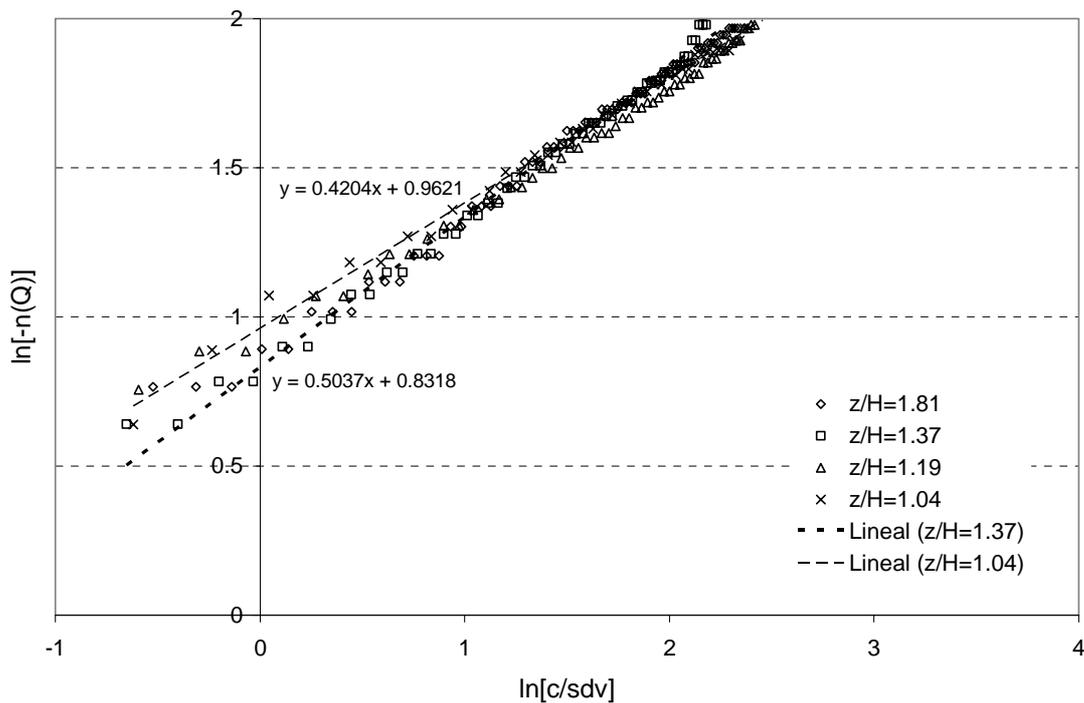


Figura 8.29. Funções de probabilidade acumulada em formato Weibull na posição  $x/H = 0,630$ , configuração II e condição B com registros diferentes (frequência aquisição e duração da amostra segundo Cheung & Melbourne, 2000)

### 8.3 Análise espectral das flutuações de concentração

Os espectros de potencia das flutuações de concentração podem ser obtidos a partir das amostras em todos os pontos analisados, mas só foram determinados em algumas localizações e situações características. O intervalo de frequências da análise espectral é limitado pela frequência de amostragem e a duração da amostra utilizada. Não foi realizada filtragem do sinal, de tal forma que perto da frequência de corte o de Nyquist,  $f_{Nq} = f_{aq} / 2$ , tem que ser considerado o erro de “aliasing”. Na tabela são indicadas as principais características que definem os espectros obtidos.

Tabela 8.1. Características que definem os espectros.

Espectros	No. total de valores	No. de blocos	Valores por bloco	Freq. aquisição [Hz]	Intervalo de freq. [Hz]
<i>A</i>	61440	120	512	1024	2
<i>B</i>	15360	120	128	128	1

Com relação à resposta em frequências do sistema de medição, e sobre tudo, da sonda aspirante, é amplamente superior ao requerido neste estudo para um intervalo de análise que tem seu limite superior nos 300 Hz.

Na análise, não foi tentado remover os efeitos da intermitência nos espectros. Nos sinais de concentração intermitente, os intervalos com sinal zero não contribuem ao espectro, ainda que os pulsos de concentração possam constituir a contribuição dominante ao espectro em alguns casos [Fackrell & Robins, 1982].

A região inercial, caracterizada nesta representação bi-logaritmica pela declividade  $-5/3$ , é muito mais estreita que nos correspondentes de velocidade. As funções de densidade espectral são apresentadas na unidade  $[\text{ppm}^2/\text{Hz}]$ , sem adimensionalização.

Na Figura 8.30 se apresentam os espectros obtidos na posição  $x/H = 0,66$  em cinco pontos na vertical para a configuração I e a condição A. Em termos absolutos, os maiores níveis de energia correspondem ao centro da pluma ( $z/H = 1,16$ ), e os menores a posição inferior. A sub-região inercial aparece definida apenas em um pequeno tramo do espectro nos pontos  $z/H = 1,34$  (metade superior da pluma) e  $z/H = 0,90$  (extremo

inferior). No extremo superior ( $z/H = 1,16$ ), que é o ponto de maior intermitência, o espectro apresenta uma configuração particular, possivelmente produto do sinal tipo “on / off” associada ao arribo dos pulsos de concentração.

A Figura 8.31 mostra os espectros correspondentes ao campo meio a longe ( $x/H = 3,80$ ) em três pontos na vertical; centro da pluma ( $x/H = 1,60$ ), extremo superior ( $z/H = 1,96$ ) e extremo inferior ( $z/H = 1,24$ ). Como foi observado na análise das f.d.p., a intermitência é baixa e semelhante nos três pontos. Os maiores conteúdos de energia são obtidos no ponto superior, e os menores no ponto inferior onde a intermitência é também menor, mas em geral os níveis de energia das flutuações de concentração são baixas. Apenas em um estreito intervalo de frequências, no ponto correspondente ao centro da pluma aparece definida a sub-região inercial.

Os espectros da Figura 8.32 correspondem a posição  $x/H = 1,80$  (campo meio) para a configuração I e condição B. O espectro mais energético é obtido na posição central da pluma ( $z/H = 1,12$ ). Nos extremos superior e inferior ( $z/H = 1,61$  e  $0,71$ ), os espectros são semelhantes, sendo que as condições de intermitência são diferentes. A sub-região inercial é bem mais ampla nestas duas posições que nos casos anteriores. As características gerais dos espectros, nesta posição onde os efeitos inerciais são maiores, são semelhantes aos que foram obtidos por Pavageau & Schatzmann [1999] em um estudo de dispersão em canhões urbanos.

Na Figura 8.33 são apresentados os espectros obtidos na localização  $x/H = 0,60$ , para a configuração I e a condição H. Na posição central da pluma ( $z/H = 1,12$ ), os níveis de energia são semelhantes aos obtidos para a condição A (Figura 8.30), mas agora aparece definida a sub-região inercial entre os 10 e 100 Hz. Isto possivelmente é produto da maior mistura sendo que já a emissão e uma mistura hélio-ar. Igual que no caso anterior, nos extremos superior e inferior ( $z/H = 1,29$  e  $0,88$ ) os espectros são bastante similares, ainda que a intermitência é maior no extremo superior.

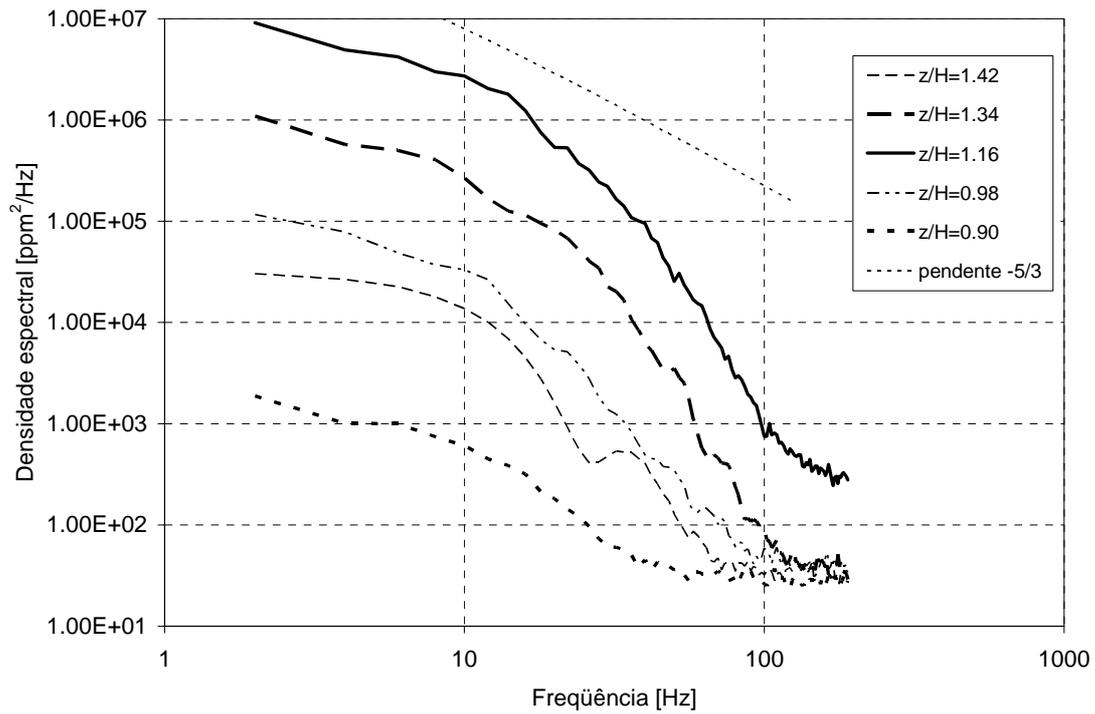


Figura 8.30. Funções de densidade espectral na posição  $x/H = 0,66$ , configuração I e condição A.

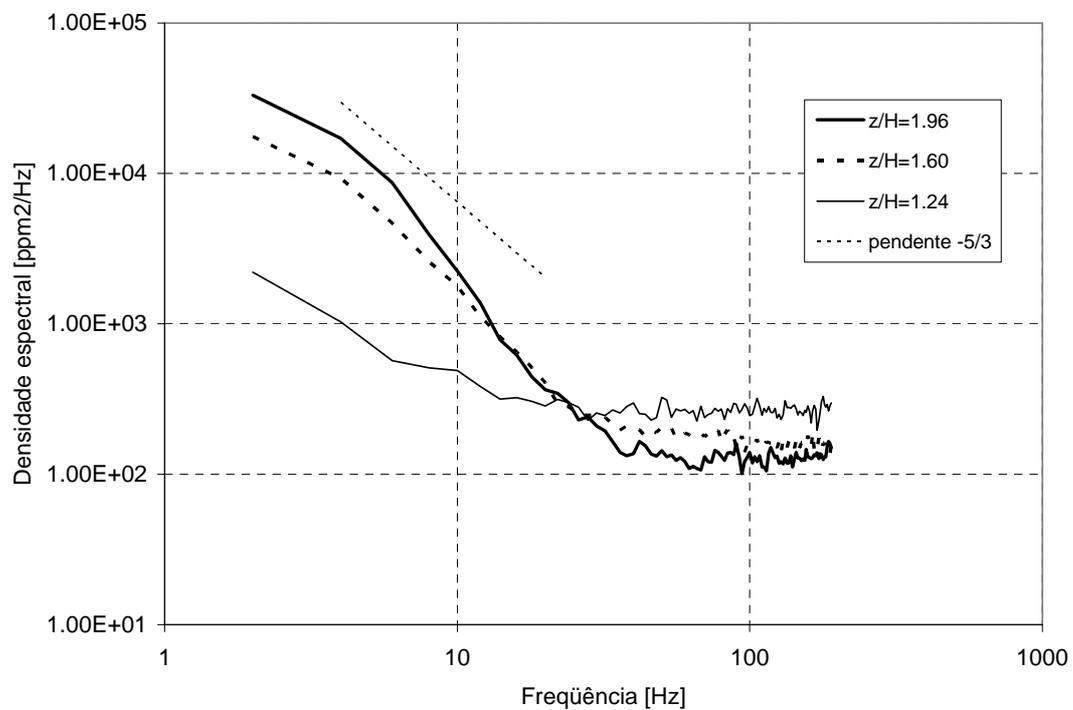


Figura 8.31. Funções de densidade espectral na posição  $x/H = 3,80$ , configuração I e condição A.

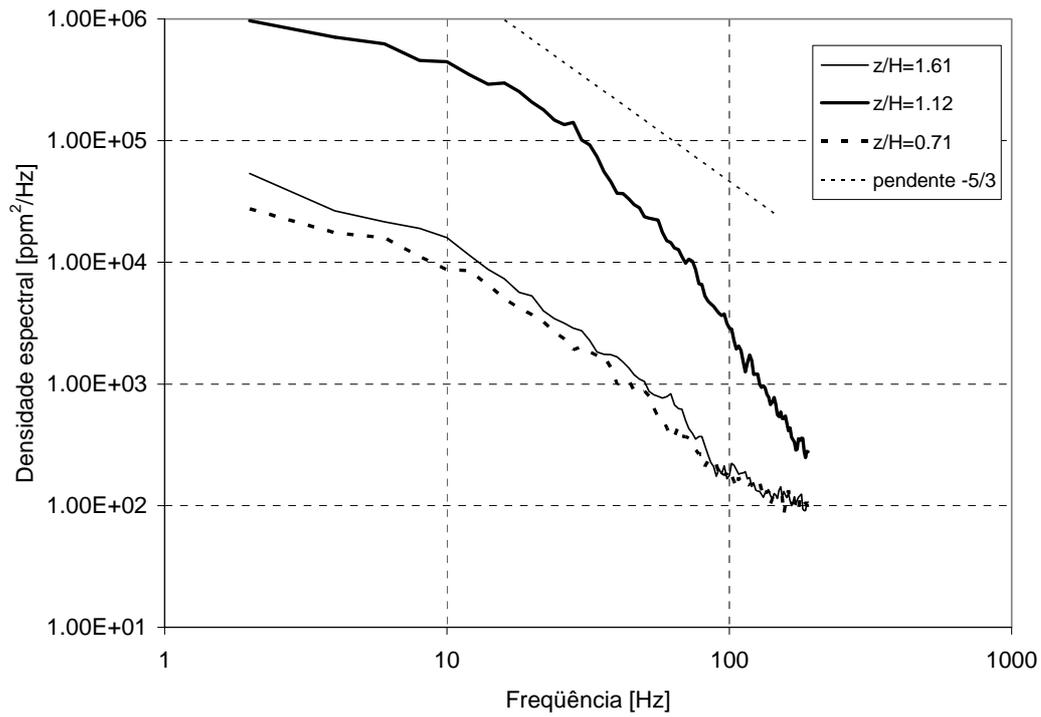


Figura 8.32. Funções de densidade espectral na posição  $x/H = 1,80$ , configuração I e condição B.

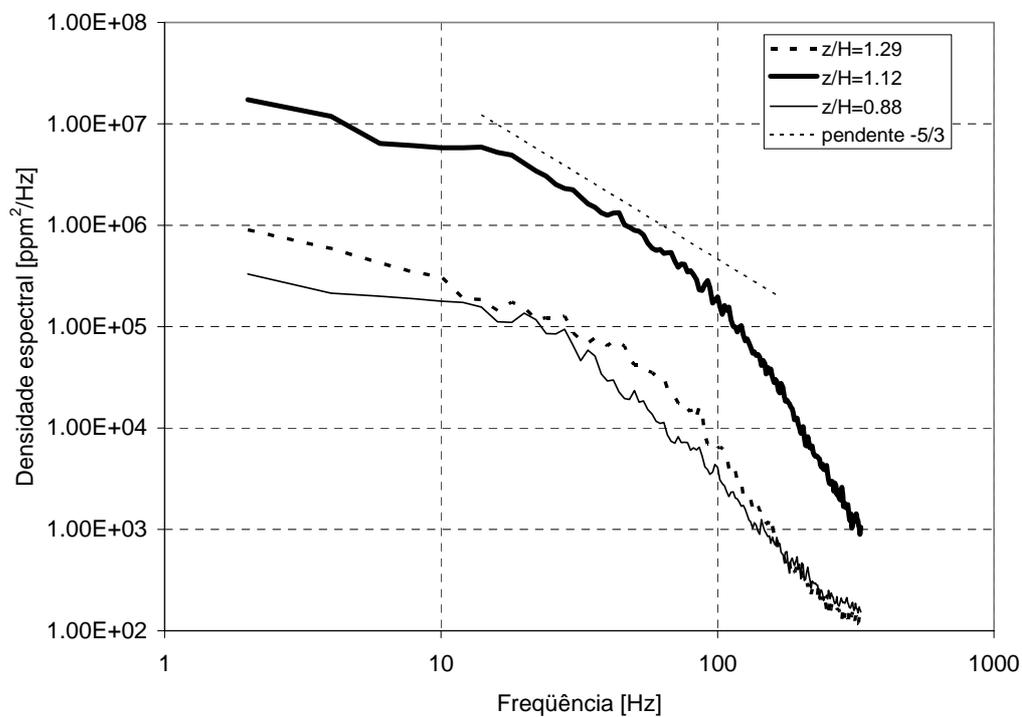


Figura 8.33. Funções de densidade espectral na posição  $x/H = 0,60$ , configuração I e condição H.

---

Os espectros da Figura 8.34 correspondem à posição  $x/H = 0,63$  para a configuração II e condição B. Foram determinados os espectros na parte central e nos extremos superior e inferior da pluma tendo comportamentos semelhantes a pesar dos maiores conteúdos de energia no centro. Nesta configuração II, na qual a emissão está localizada a sotavento da edificação, possivelmente se produzem zonas de confinamento semelhantes às que acontecem em canhões urbanos onde o espectro caracteriza-se por uma sub-região inercial mais ampla [Pavageau & Schatzmann, 1999].

Na Figura 8.35 são apresentados os espectros correspondentes à configuração III e condição A, em quatro pontos na vertical localizada em  $x/H = 0,54$ . No extremo superior e no centro, os espectros são semelhantes aos obtidos respectivamente nestas posições para a configuração I. Nas duas posições inferiores ( $z/H = 1,15$  e  $1,07$ ) se percebe uma maior sub-região inercial que no caso da configuração I, possivelmente devido ao confinamento produzido pela cavidade que se desenvolve nessa zona.

Um dos casos correspondentes à configuração IV é apresentado na Figura 8.36. Os espectros mostrados foram obtidos na localização  $x/H = 1,43$ , na condição B, em três pontos. No extremo superior ( $z/H = 1,56$ ), o espectro é semelhante aos correspondentes às configurações I e III nesta posição com alta intermitência. Nas posições central e inferior ( $z/H = 1,00$  e  $0,44$ ), localizadas na esteira das obstruções urbanas, existe uma sub-região inercial bem definida.

Assim como analisada a influência da amostragem na obtenção das funções de densidade de probabilidade, na Figura 8.37 são mostrados dois espectros das flutuações de concentração obtidos no mesmo ponto a partir de series de valores diferentes para analisar os efeitos da amostragem nas funções espectrais. As características de amostragem A e B das series numéricas correspondem às indicadas na tabela 1. Nos intervalos de análise, os espectros são bem similares, com um valor menor da frequência limite no caso B produto da amostragem com 128 Hz, e com o desvio dos valores neste extremo do espectro produto do erro de dobramento.

Apesar destes resultados que indicam uma escassa influencia da amostragem nos espectros, é necessário salientar que a variação da amostragem permite uma melhor

avaliação dos diferentes intervalos da função de densidade espectral, como assim também, melhores resoluções em frequência.

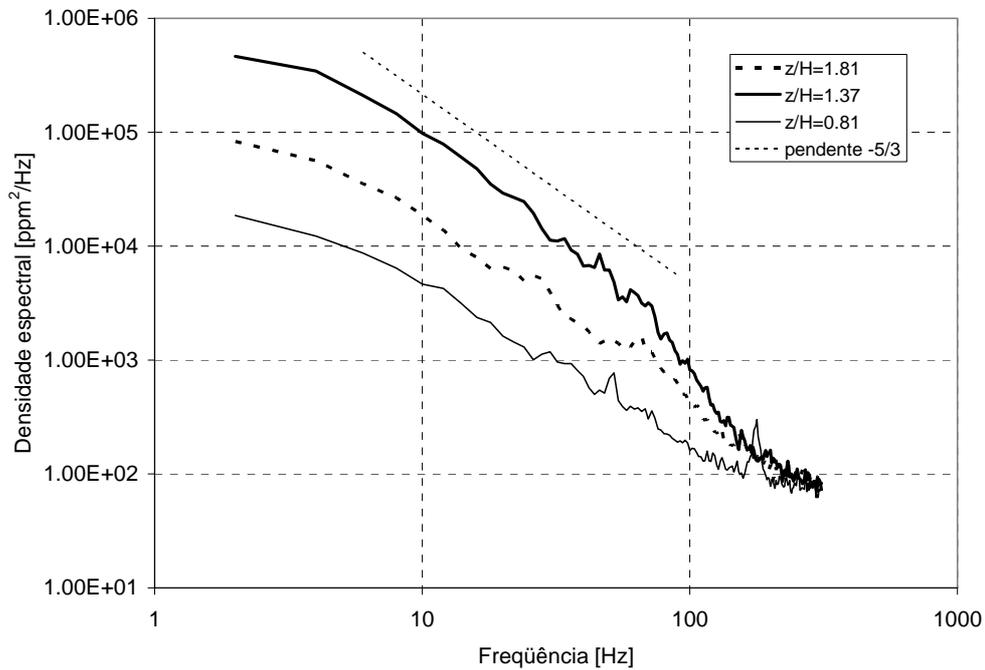


Figura 8.34. Funções de densidade espectral na posição  $x/H = 0,630$ , configuração II e condição B.

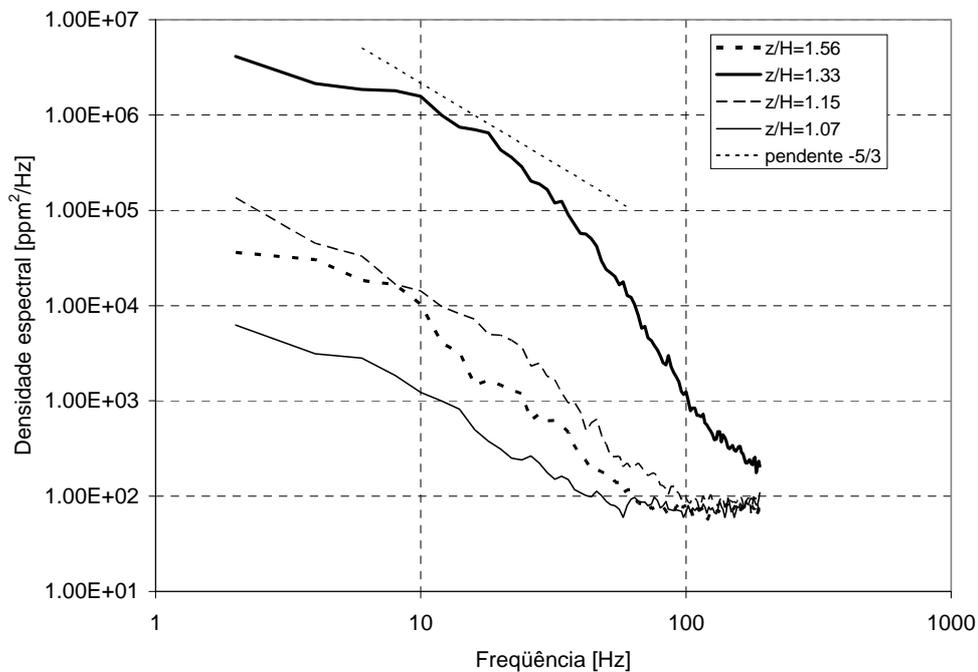


Figura 8.35. Funções de densidade espectral na posição  $x/H = 0,540$ , configuração III e condição A.

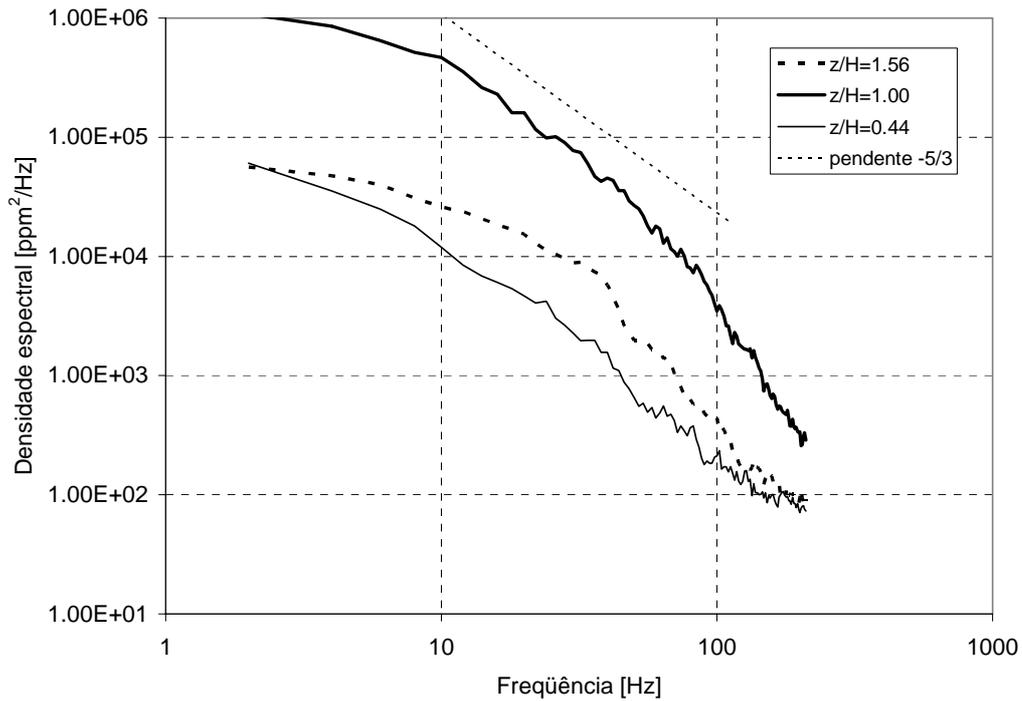


Figura 8.36. Funções de densidade espectral na posição  $x/H = 1,430$ , configuração IV e condição B.

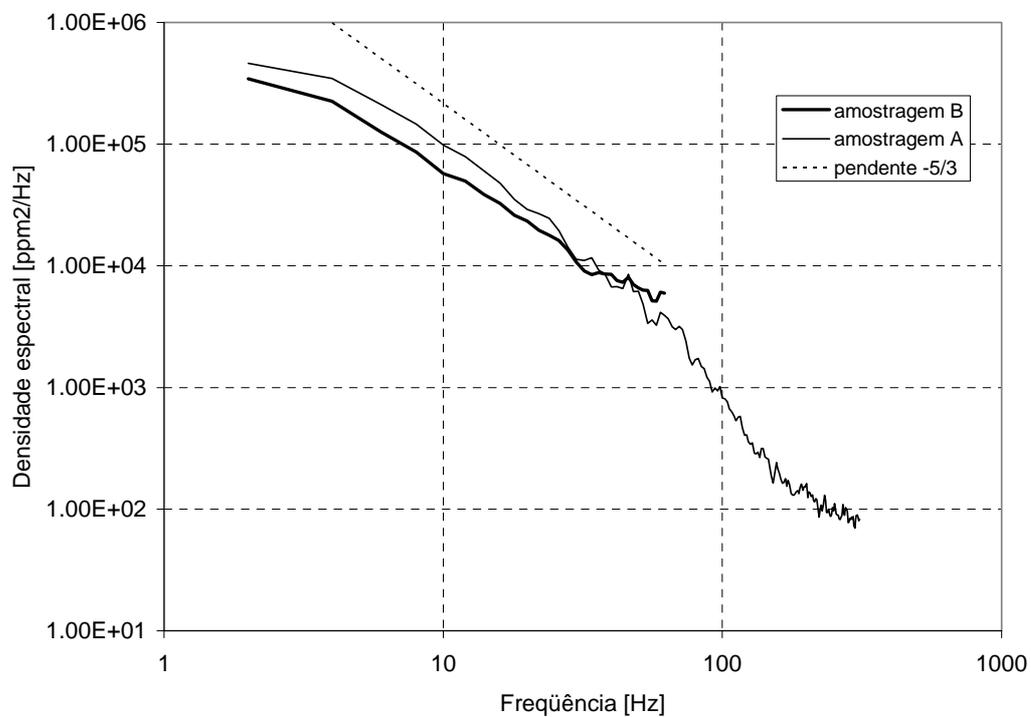


Figura 8.37. Comparação das funções de densidade espectral obtidas com duas amostras diferentes na posição  $x/H = 0,630$ ,  $z/H = 1,00$ , configuração II e condição B.

---

## 8.4 Considerações finais

Com relação à análise das funções de probabilidade acumulada das flutuações de concentração na pluma, alguns comportamentos característicos foram detectados. Para a configuração I, o campo próximo mostra alta intermitência no extremo superior e muito baixa no centro. No extremo inferior da pluma, a intermitência é bastante menor do que no superior.

No campo meio a longe, os níveis de intermitência tendem a ser iguais nas diferentes posições da pluma, diminuindo bastante no extremo superior e aumentando um pouco na parte central. De forma geral, é possível dizer que não existem grandes modificações na intermitência do processo produto das variações no empuxo da pluma. As diferenças na parte superior e inferior da pluma que já foram observadas na análise de valores médios provocando um afastamento da configuração gaussiana da pluma, se acentuam com relação à intermitência do processo.

Para a configuração II, em geral a intermitência apresenta maior similaridade nas zonas superior, central e inferior da pluma, com relação à configuração I. É possível observar também que se torna mais crítica a influência do empuxo e, particularmente, das relações de velocidades e quantidade de movimento. É importante então, cuidar especialmente a semelhança desses parâmetros quando se modelam casos deste tipo.

Na configuração III, as condições de intermitência no campo próximo são modificadas na parte inferior da pluma produto da edificação. A tendência à similitude na intermitência do processo nas posições superior, central e inferior da pluma se produz mais rapidamente a sotavento da emissão, acontecendo já no campo meio. Na modelagem torna-se crítica a semelhança do empuxo e se observa que a altura da emissão com relação à edificação tem influência no processo de dispersão.

As características da pluma para a configuração IV têm escassas diferenças com relação ao que acontece para a configuração I. Em geral, isto concorda com a similitude das flutuações de velocidade nos resultados obtidos na análise do escoamento no centro urbano com relação ao escoamento na simulação da camada limite. Esta consideração é feita a partir de que as características do processo de dispersão dependem da turbulência do escoamento.

Pela primeira consideração feita ao início da análise espectral de que os intervalos de intermitência não deveriam contribuir ao espectro, é que esta análise não pode ser utilizada para determinar as características intermitentes do processo. Apesar disto, algumas regiões do campo de concentrações podem ser identificadas a partir do espectro.

Finalmente, é importante mencionar a relação entre os conceitos de intermitência e estacionariedade. Muitas vezes um processo, pelo fato de ser intermitente, é considerado não-estacionário. Em geral, um processo vinculado à turbulência quando é analisado experimentalmente pode ser estacionário ou não de acordo ao tempo de amostragem. Da mesma forma, um fenômeno intermitente pode ser estacionário se a amostra tem a duração necessária para verificar a estacionariedade. Neste sentido, é muito importante levar em conta as escalas que se pretendem analisar. Alguns processos assumidos estacionários, como o escoamento turbulento a velocidade média constante, apresentam intermitência em nível da micro-escala.

---

## 9 Conclusões

O trabalho teve por objetivo geral reproduzir escoamentos de camada limite e processos de dispersão atmosférica no túnel de vento. Foram desenvolvidos diversos modelos experimentais dos ventos turbulentos na camada limite atmosférica neutral. As simulações incluem ventos turbulentos sobre terrenos homogêneos a diferentes escalas realizadas em três túneis diferentes.

Foram avaliadas as características que descrevem o comportamento médio e a turbulência dos escoamentos e feitas comparações dos resultados obtidos a velocidade relativamente alta e muito baixa. Os casos analisados são: uma simulação parcial da camada limite sobre terreno rural de perfil  $\alpha = 0,16$ , desenvolvida no túnel de vento “J. P. Gorecki” da UNNE, uma simulação parcial da CLA correspondente a um perfil  $\alpha = 0,25$  no túnel de vento TV2 da UNNE, e finalmente a simulação da espessura total da CLA com perfil  $\alpha = 0,23$ , realizada no túnel de vento “Joaquim Blessmann”, da UFRGS. A análise foi realizada com velocidades médias do escoamento menores do que 3,5 m/s, e os resultados comparados com os obtidos a altas velocidades. Foram obtidos a velocidade de cisalhamento, o comprimento de rugosidade e a escala integral, parâmetros que permitem determinar o fator de escala da simulação e o número de Reynolds de rugosidade a partir dos quais se estabelecem limites para a modelagem dos processos de dispersão utilizando estas simulações da CLA.

Com relação à avaliação das simulações da camada limite atmosférica, em geral, é possível afirmar que adequam-se à realização de estudos de dispersão de gases poluentes no túnel de vento. Existem algumas limitações na simulação da espessura total com perfil  $\alpha = 0,23$ , com a velocidade de 0,96 m/s, onde os valores experimentais da intensidade de turbulência se afastam dos previstos e a definição da sub-região inercial nos espectros é limitada.

Na comparação dos espectros obtidos na atmosfera em condição quase-neutral com os espectros medidos no túnel de vento para a simulação rural é observado um pequeno afastamento nas frequências. O desvio varia de acordo com parâmetro adotado para adimensionalizar a frequência.

---

Na análise de dados experimentais, além da obtenção dos parâmetros característicos, foi avaliada a constante de Kolmogorov considerando a variação do número de Reynolds.

Complementarmente, foram estudados escoamentos turbulentos mais complexos, produto da interferência de obstáculos no escoamento de camada limite. Em particular foram analisados os escoamentos nas proximidades de um modelo simples de uma edificação e em um entorno urbano não homogêneo.

No escoamento em torno de uma edificação simples, se obtiveram as características e se delimitaram as diferentes regiões dos escoamentos. Os resultados, além da informação sobre o comportamento do escoamento de ar na parte superior de construções simples poderão aplicar-se ao projeto de chaminés para determinar sua altura e localização, otimizando o processo de dispersão na região e evitando o “ingresso” da pluma nas regiões de sucção provocadas pela construção.

O estudo do escoamento complexo da zona urbana permite detectar algumas características gerais do comportamento. Apesar do afastamento do perfil velocidades médias com relação ao escoamento incidente, as flutuações de velocidade e os espectros mantém grande similitude com os correspondentes para o vento incidente. A avaliação parcial da homogeneidade lateral indica que a variação na velocidade média é da ordem de 30 %.

Nos estudos da difusão atmosférica, em particular dos problemas locais de dispersão, foi modelada uma fonte de emissão pontual de baixa altura representativa de uma chaminé. Na análise do processo de dispersão foram consideradas diversas configurações que incluem a fonte de emissão isolada num escoamento homogêneo, a consideração dos efeitos da esteira próxima ao modelo de uma edificação, e finalmente de um terreno urbano não homogêneo. Foram determinados os campos de concentrações médias e flutuantes na pluma de dispersão. As funções de densidade de probabilidade e as funções de densidade espectral permitiram caracterizar a intermitência do processo. A influência das configurações do entorno da emissão e das condições características da pluma foi analisada. O estudo foi completado mediante comparações com resultados da literatura e com modelos teóricos.

Os resultados deste trabalho permitem estabelecer a viabilidade da simulação da camada atmosférica neutral e dos estudos de dispersão em túnel de vento, determinando vantagens e limitações dos modelos reduzidos. As características das configurações próximas do terreno provocam modificações no caso da edificação simples, mas praticamente não têm influência no processo no caso do entorno urbano. As condições de emissão e de empuxo da pluma em geral influem no processo, mas são relevantes nas configurações correspondentes a edificação simples próxima à fonte de emissão.

As distribuições das concentrações médias e das intensidades de concentração em geral apresentam configurações próxima à Gaussiana, mas uma conclusão importante das medições é a assimetria dos perfis acima e abaixo do centro da pluma.

A análise das flutuações de concentração e da intermitência dos processos de dispersão da pluma, devido à escassa informação experimental e os poucos estudos teóricos existentes na bibliografia, tem grande importância para o conhecimento do fenômeno e para o desenvolvimento de novos modelos. As diferentes zonas da pluma, com relação à intermitência do processo, ficaram estabelecidas a partir desta análise.

Além da importância dos trabalhos experimentais na avaliação de modelos computacionais, no desenvolvimento deste estudo foi observada a complementariedade da experimentação em túnel de vento com os estudos de análise numérica para a análise de problemas de dispersão atmosférica. Apesar do túnel de vento ser uma ferramenta insubstituível nos estudos mais localizados, onde a turbulência mecânica prevalece nos processos de dispersão, nos estudos em maior escala apenas podem ser realizadas avaliações muito gerais. Nestes casos os estudos podem ser complementados com avaliações numéricas que ainda permitem modelar com maior facilidade os efeitos convectivos da atmosfera.

## 9.1 Perspectivas

Além do desenvolvimento realizado, as comparações feitas e as conclusões estabelecidas, este trabalho abre um grande espaço para futuros estudos ambientais contando agora com o dispositivo experimental e o instrumental de análise desenvolvido no LAC.

Um trabalho a ser realizado é, a partir da informação obtida na análise experimental das simulações de camada limite, simular numericamente os processos de dispersão que foram realizados, e comparar os resultados com os resultados das medições.

Com relação aos estudos de dispersão de poluentes atmosféricos, os mesmos dispositivos permitirão continuar com estudos em canhões urbanos, emissões superficiais, plumas de empuxo negativo, e estudos gerais de problemas locais de difusão turbulenta.

Complementarmente, os dispositivos desenvolvidos poderão ser usados para estudos de ventilação com modelos a escala reduzida, avaliação de odores industriais e análise específica da turbulência em misturas binárias.

Finalmente, para aprofundar a análise dos escoamentos turbulentos e, principalmente, das flutuações de concentração, em uma próxima etapa as medições realizadas serão avaliadas mediante ondeletas (*wavelets*). Esta ferramenta permitirá melhorar a análise da estacionariedade e da intermitência dos processos.

---

## Referências bibliográficas

- Ai-Chen, Z., Wen-Hu, Y., Jie, X. [1983], "Measuring the distribution of plume concentration and an experimental study of its mathematical model", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 15 pp. 103-113.
- Anffossi, D., Degrazia, G., Ferrero, E., Gryning, M., Morselli, M., Castelli, S., [2000], "Estimation of the Lagrangian Structure function constant  $C_0$  from surface-layer wind data", *Boundary-Layer Meteorology* 95: 249-270.
- ASCE [1987], "Wind tunnel model studies of building and structures", ASCE Manual and reports on Engineering practice No. 67, Published by the American Society of Civil Engineers.
- Arya, S. P. [1982], "Atmospheric boundary layers over homogeneous terrain", *Engineering Meteorology*, Ed. by E. J. Plate, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- Bendat, J. S., Piersol, A. G. [1966], "Measurement and Analysis of Random Data", John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Bendat, J. S., Piersol, A. G. [1986], "Random Data - Analysis and Measurements Procedures", John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Blessmann, J. [1982], "The Boundary Layer Wind Tunnel of UFRGS", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 10. pp. 231-248.
- Blessmann, J. [1995], "O Vento na Engenharia Estrutural", Editora da Universidade, UFRGS, Porto Alegre, Brasil.
- Camano Schettini, Edith B. [1996], "Etude Expérimentale des Jets Coaxiaux avec Différences de Densité", Thèse pour obtenir le diplôme de Docteur de l'Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Carruthers, D., Holdroyd, R., Hunt, J., Weng, W., Robins, A., Apsley, D., Thompson, D., Smith, F., [1994], "UK-ADMS: A new approach to modeling dispersion in the earth's atmospheric boundary layer", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 52 pp. 139-153.
- Cermak, J. E. [1971], "Laboratory simulation of the atmospheric boundary layer", *AIAA Journal*, Vol. 9, No. 9.
- Cermak, J. E., Takeda, K. [1985], "Physical modeling of urban air-pollutant transport", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 21, 51-67.
- Cermak, J. E., Cochran, L. S. [1992], "Physical modeling of the atmospheric surface layer", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 41/44, 935-946.
- Cermak, J. E. [1995], "Progress in physical modeling for Wind Engineering", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 54/55, 439-455.

- 
- Cermak, J. E., Cochram, L. S., Leffer, R. D. [1995], "Wind-tunnel modelling of the atmospheric surface layer", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 54/55, 505-513.
- Chatzipanagiotidis, A., Olivari, D. [1996], "Pollutant dispersal downstream of a hill in different wind conditions", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 64, 233-248.
- Cheung, J. C. K., Melbourne, W. H. [1995], "Building downwash of plumes and plume interactions", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 54/55, 543-548.
- Cheung, J. C. K., Melbourne, W. H. [2000], "Probability distribution of dispersion from a model plume in turbulent wind", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 87, 271-285.
- Chui, E., Wilson, D. [1988], "Effect of varying wind direction on exhaust gas dilution", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 31, 87-104.
- Cook, N. J. [1978], Determination of the Model Scale Factor in Wind-Tunnel Simulations of the Adiabatic Atmospheric Boundary Layer, *Journal of Industrial Aerodynamics*, vol. 2, pp. 311-321.
- Cook, N. J. [1990], "The designer's guide to wind loading of building structures", BRE, Building Research Establishment, London, UK.
- Counihan, J. [1969], "An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel", *Atmospheric Environment*, 3, 197-214.
- Costa, M., Borrego, C., [1997], "Wind tunnel study of flow and dispersion over 2-D hills", 2EACWE, Genova, Italy.
- Crooks, G., Isymov, N. [1990], "A study of the acceptability of proposed stacks on University of Western Ontario Chemistry Building", BLWT-SS38-1990, University of Western Ontario, London, Ontario, Canada.
- Daily, J., Harleman, D. [1966], "Fluid Dynamics", Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Mass., U.S.A.
- Davidson, G. [1994], "Dimensionless correlations for buoyant plume behavior in crossflow and scaling criteria for physical modeling of dispersion processes", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 51, pp. 135-155.
- Davis, M., Cornwell, D. [1998], "Introduction to Environmental Engineering", Third Edition, Mc Graw-Hill.
- Deardorff, J., Willis, G. [1984], "Groundlevel concentration fluctuations from buoyant and non-buoyant source within a laboratory convectively mixed layer", *Atmospheric Environment*, vol. 18, No. 7, pp. 1297-1309.

- 
- Deaves, D. M., Lines, I. G. [1997], "On the fitting of low mean windspeed data to the Weibull distribution", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 66, pp. 169-178.
- Delaunay, D., Lakehal, D., Barré, C., Sacré, C. [1997], "Numerical and wind tunnel simulation of gas dispersion around a rectangular building", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 67&68, pp. 721-732.
- Donat, J., Schatzmann, M. [1999], "Wind tunnel experiments of single-phase heavy gas jet released under various angles into turbulent cross flows", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 83, pp. 361-370.
- Fackrell, J. E, Robins, A. G. [1982], "Concentration fluctuations and fluxes in plumes from point sources in a turbulent boundary layer", *J. Fluid Mech.*, vol. 17, pp. 1-26.
- Fackrell, J. E. [1984], "Parameters characterising dispersion in the near wake of buildings", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 16, 97-118.
- Gerdes, F., Olivari, D. [1999], "Analysis of pollutant dispersion in an urban street canyon", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 82, 105-124.
- Gerhardt, H., Kramer, C. [1991], "Wind climate in city centers: Pedestrian comfort versus accumulation of pollutants", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 38, 131-139.
- Gerhardt, H., Kramer, C. [1992], "Wind comfort and pollutant transport in a satellite city", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 41/44, 2343-2351.
- Hanna, S. R. [1982], "Turbulent diffusion: Chimneys and cooling towers", *Engineering Meteorology*, Ed. by E. J. Plate, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- Hanna, S. R. [1984], "Concentration fluctuations in a smoke plume", *Atmospheric Environment*, vol. 18, No. 6, pp. 1091-1106.
- Harion, J., Camano, E., Favre-Marinet, M. [1995], "Mesures de vitesse et de concentration par thermo-anémométrie dans des mélanges air/hélium", *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 320, Série Iib, p. 77-84.
- Hertig, J. A. [1984], "A Stratified Boundary Layer Wind Tunnel Designed for Wind Engineering and Diffusion Studies", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 16, 265-278.
- Hoydysh, W., Dabbertt, W. [1992], "Wake structure and dispersion", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 41-42, 2785-2795.
- Hunt, J. C. R., Snyder, W. H. [1980], "Experiments on stably and neutrally stratified flow over a model three-dimensional hill", *J. Fluid Mech.*, vol.96, part 4, pp. 671-704.
- Hunt, A., Castro, I. P. [1984], "Scalar dispersion in model wilding wakes", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 17, 89-115.

- 
- Huber, A. H. [1988], "Video images of smoke dispersion in the near wake of a model building. Part I: Temporal and spatial scales of vortex shedding", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 31, 189-223.
- Hinze, J. O. [1959], "Turbulence", McGraw-Hill, New York.
- Isaacson, M. S., Sandri, G. [1990], "Laboratory study of pollutant detention times in wake cavities downwind of low-rise buildings", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 36, 653-663.
- Isymov, N., Tanaka, H. [1980], "Wind tunnel modelling of stack gas dispersion – Difficulties and approximations", *Wind Engineering, Proceedings of the fifth International Conference, Fort Collins, Colorado, USA*, Ed. by J. E. Cermak, Pergamon Press Ltd.
- Isymov, N., Ferraro [1982], "A study of stack gas dispersion and the extent of the aerodynamic cavity for the Ontario Hydro Darlington Nuclear Generating Station", BLWT-SS13-1982, University of Western Ontario, London, Ontario, Canada.
- Janssen, L. A. M. [1979]. "Wind Tunnel Modelling of Dispersion of Odours in the Neighborhood of Pig houses", *Journal of Industrial Aerodynamics*, vol. 4, pp. 391-398.
- Jensen, N. O., Busch, N. E. [1982], "Atmospheric turbulence", *Engineering Meteorology*, Ed. by E. J. Plate, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- Kaimal, J. C. [1994], "Atmospheric boundary layer flows: their structure and measurement", Oxford University Press, Inc., New York.
- Kaimal, J. C., Wyngaard, J. C., Izumi, Y., Cote, O. R. [1972], "Spectral characteristics of surface-layer turbulence", *Quart. J. R. Met. Soc.*, 98, pp. 563-589.
- Kastner-Klein, P., Plate, E. J. [1999], "Wind tunnel study of concentration fields in street canyons", *Atmospheric Environment*, 33, 3973-3979.
- Kamotani, Y., Greber, I. [1972], "Experiment on a turbulent jet in a cross flow", *AIAA Journal*, Vol. 10, No. 11.
- Koga, D. J., Way, J. L. [1980], "Effects of stack height and position on pollutant dispersion in building wakes", *Wind Engineering, Proceedings of the fifth International Conference, Fort Collins, Colorado, USA*, Ed. by J. E. Cermak, Pergamon Press Ltd.
- Lawson, T. V. [1980], "Wind effects on building, vol.1", Applied Science Publishers LTD, London.
- Lesieur, M. [1990], "Turbulence in fluids. Stochastic and numerical modelling", Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Leutheusser, H. J., Motycka, J. [1978], "Wind tunnel testing of the gas dispersion", *Atmospheric Environment*, vol. 12, No. 6/7, 1313-1318.

- 
- Li, W., Meroney, R. N. [1983], "Gas dispersion near a cubical model Building. Part I: Mean concentration measurements", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 12, 15-33.
- Li, W., Meroney, R. N. [1983], "Gas dispersion near a cubical model Building. Part II: Concentration fluctuation measurements", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 12, 35-47.
- Libby, P. [1975], "On the prediction of intermittent turbulent flows", *J. Fluid Mech.*, vol.68, p. 2, 273-295.
- Liedtke, J., Leitl, B., Schatzmann, M. [1998], "Car exhaust dispersion in a street canyon-wind tunnel data for validating numerical dispersion models", 2<sup>nd</sup> EECWE, Prague, pp. 291-297.
- Liu, G., Xuan, J., Park, S. [2003], "A new method to calculate wind profile parameters of the wind tunnel boundary layer", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91, 1155-1162.
- Lord, G. R., Leutheusser, H. J. [1966], "Minimum stack heights for apartment buildings", Technical Publication Series, UT Mech E, TP 6602, University of Toronto.
- Lord, G. R., Leutheusser, H. J. [1970], "Wind tunnel modelling of stack discharge", *Man and his environment*, vol. 1, M. A. Ward, Editor, Pergamon Press Inc.
- Loredo Souza, A. M. [1996], "The behaviour of transmission lines under high winds", Thesis – Doctor of Philosophy, The University of Western Ontario, London, Ontario.
- Loredo Souza, A. M., Camaño Schettini, E. B. [2002], "Estudo aerodinâmico das características do vento na região dos helipontos do projeto SP Wellness – Alphaville", Relatório Técnico, Laboratório de Aerodinâmicas das Construções – LAC – UFRGS.
- Mavroidis, I., Griffiths, R., Hall, D. [2003], "Field and wind tunnel investigations of plume dispersion around single surface obstacles", *Atmospheric environment* 37, pp. 2903-2918.
- Meroney, R. [1979], "Lift off buoyant gas initially on the ground", *Journal of Industrial Aerodynamics*, 5, 1-11.
- Meroney, R., Pavageau, M., Rafailidis, S., Schatzmann, M. [1996], "Study of line source characteristics for 2-D physical modelling of pollutant dispersion in street canyons", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 62, 37-56.
- Meroney, R. N. [1982], "Turbulent diffusion near buildings", *Engineering Meteorology*, Ed. by E. J. Plate, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- Meroney, R., Neff, D. [1980], "Laboratory simulation of liquid natural gas vapour dispersion over land or water", *Wind Engineering, Proceedings of the fifth*

- 
- International Conference, Fort Collins, Colorado, USA, 2, pp. 1139-1149, Ed. by J. Cermak, Pergamon Press Ltd.
- Meroney, R., Leitl, B., Rafailidis, S., Schatzmann, M. [1999], "Wind-tunnel and numerical modeling of and dispersion about several building shapes", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 81, 333-345.
- Möller, S.V. [1988], "Experimentelle Untersuchung der Vorgänge in engen Spalten zwischen den Unterkanälen von Stabbündeln bei turbulenter Strömung", Dissertation Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, RFA.
- Möller, S. V. [1989], "Limitações no Uso de Anemômetros de Fio Quente Duplos para Medições de Turbulência", X Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro.
- Möller, S. V. [2000], "Experimentação em Turbulência", II Escola de Primavera em Transição & Turbulência, Uberlândia, 11-15 Dezembro de 2000.
- Muschinsky, A., Frehlich, R., Balsley, B. [2004], "Small-scale and large-scale intermittency in the nocturnal boundary layer", *J. Fluid Mech.*, vol 515, pp. 319-351.
- Newland, D. E. [1975], "An Introduction to Random Vibrations and Spectral Analysis", Longman, London.
- Nishi, A., Miyagi, H. [1995], "Computer-controlled wind tunnel for wind engineering applications", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 54/55, 493-504.
- Oikawa, S., Meng, I. [1997], "A field study of dispersion around a model cube in a suburban area", *Boundary-layer Meteorology* 84: 399-410.
- Parker, A. [1977], "Industrial air pollution handbook", Mc Graw-Hill Book Company (UK) Limited, London.
- Pavageau, M., Schatzmann, M. [1999], "Wind tunnel measurements of concentration fluctuations in an urban street canyon", *Atmospheric Environment*, 33, 3961-3971.
- Petersen, R. L. [1990], "Effect of homogeneous and heterogeneous surface roughness on heavier-than-air gas dispersion", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 36, 643-652.
- Plate, E. J. [1999], "Methods of investigating urban wind fields – physical models", *Atmospheric Environment*, 33, 3981-3989.
- Plate, E. J. [1982], "Wind tunnel modelling of wind effects in engineering", *Engineering Meteorology*, Ed. by E. J. Plate, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- Poreh, M., Cermak, J. E. [1992], "Fluctuations of line integrated concentrations across a CO<sub>2</sub> plume", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 41-44, 2745-2755.

- 
- Poreh, M., Kacherginsky, A. [1981], "Simulation of plume rise using small wind-tunnel models", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 7, 1-14.
- Pratte, B. D., Baines, W. D. [1967], "Profiles of the round turbulent jet in a cross flow", *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 93, No. HY6, Proc. Paper 5556, pp. 53-64.
- Robins, A., Castro, I., Hayden, P., Steggel, N., Contini, D., Heist, D. [2001], "A wind tunnel study of dense gas dispersion in a neutral boundary layer over a rough surface", *Atmospheric environment* 35, 2243-2252.
- Robins, A., Castro, I., Hayden, P., Steggel, N., Contini, D., Heist, D., Taylor, T. J. [2001], "A wind tunnel study of dense gas dispersion in a stable boundary layer over a rough surface", *Atmospheric environment* 35, 2253-2263.
- Ruck, B. [1993], "Wind-tunnel measurements of flow field characteristics around a heated model building", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 50, 139-152.
- Ruscheweyh, H., Fisher, K. [1979], "Aerodynamic effects of large natural-draught cooling towers on the atmospheric dispersion from a stack", *Journal of Industrial Aerodynamics*, 4, 399-413.
- Saathoff, P., Stathopoulos, T., Wu, H., [1998], "The influence of the turbulence on near field dilution of exhaust from building vents", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 77&78, 741-752.
- Savory, E., Toy, N., Ahmed, S., [1996], "Experimental study of a plume in a crossflow", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 60, pp. 195-209.
- Schatzmann, M., Donat, J., Hendel, S., Krishan, G. [1995], "Design of a low-cost stratified boundary-layer wind tunnel", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 54/55, 483-491.
- Schatzmann, M., Rafailidis, F., Pavageau, M. [1997], "Some remarks on the validation of small-scale dispersion models with field and laboratory data", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 67/68, 885-893.
- Silveira Neto, A. [2002], "Fundamentos de turbulência nos fluidos", III Escola de Primavera em Transição & Turbulência (Mini-cursos), UFSC, Florianópolis/SC, Edit. C. Deschamps e J. Barbosa, UFSC, pp. 1-52.
- Sreenivasan, K., [1995], "On the universality of the Kolmogorov constant", *Physics of Fluids*, vol. 7, pp. 2778-2784.
- Standen, N. M. [1972], "A Spire Array for Generating Thick Turbulent Shear Layers for Natural Wind Simulation in Wind Tunnels", National Research Council of Canada, NAE, Report LTR-LA-94.
- Stull, R. B. [1998], "An introduction to boundary layer meteorology", Kluwer Academic Publishers.

- 
- Surry, D. [1982], "Consequences of distortions in the flow including mismatching scales and intensities of turbulence", Proceedings of the International Workshop on Wind Tunnel Modeling Criteria and Techniques in Civil Engineering Applications, pp. 137-185, Gaithersburg, Maryland, U.S.A.
- Tennekes, H., Lumley, J. L. [1994], "A First Course in Turbulence", The M.I.T. Press, Cambridge.
- Thompson, R., Snyder, W. [1985], "Air pollution and terrain aerodynamics: a review of fluid studies at the EPA fluid modeling facility", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 21, pp. 1-19.
- Welter, G. S. [2006], "A hipótese da turbulência localmente isotrópica e a universalidade da constante de Kolmogorov", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil.
- White, B., Stein, W. [1990], "Wind-tunnel studies of variable stack heights for a low-profile building", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 36, 675-687.
- Wittwer, A. R., Möller, S. V. [2000], "Characteristics of the low speed wind tunnel of the UNNE", Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 84, pp. 307-320.
- Yassim, M., Kato, S., Ooka, R., Takahashi, T., Kouno, R. [2005], "Field and wind-tunnel study of pollutant dispersion in a built-up area under various meteorological conditions", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 93, pp. 361-382.
- Zannetti, P. [1990], "Air pollution modeling: Theories, computational methods and available software", Comp. Mech. Publications, Van Nostrand Reinhold, New York.