

**SIMULAÇÃO EM TÚNEL DE VENTO DA DISPERSÃO DE  
UMA PLUMA EMITIDA POR UMA CHAMINÉ ISOLADA**

Fabício De Paoli

Porto Alegre  
Dezembro de 2006

**FABRÍCIO DE PAOLI**

**SIMULAÇÃO EM TÚNEL DE VENTO DA DISPERSÃO DE  
UMA PLUMA EMITIDA POR UMA CHAMINÉ ISOLADA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia na modalidade Acadêmico

Porto Alegre,  
Dezembro de 2006

D419s De Paoli, Fabrício

Simulação em túnel de vento da dispersão de uma pluma emitida por uma chaminé isolada / Fabrício De Paoli. – 2006.

160p.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2006.

Orientador: Prof. Dr. Acir Mércio Loredo-Souza

Co-orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Edith Beatriz Camaño Schettini

1. Túnel de vento. 2. Camada limite atmosférica. 3. Dispersão de poluentes. 4. Engenharia ambiental. I. Loredo-Souza, Acir Mércio, orient. II. Camaño Schettini, Edith Beatriz, co-orient. III. Título.

CDU-624.042.4(043)

**FABRÍCIO DE PAOLI**

**SIMULAÇÃO EM TÚNEL DE VENTO DA DISPERSÃO DE  
UMA PLUMA EMITIDA POR UMA CHAMINÉ ISOLADA**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 01 de Dezembro de 2006

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

**Prof.a Edith Beatriz Camaño Schettini**  
Dr., *Institut Polytechnique de Grenoble,*  
França.  
Co-Orientadora

**Prof. Fernando Schnaid**  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Adrián Roberto Wittwer (UNNE)**  
Dr., Universidade Federal do Rio Grande do Sul

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

**Prof. Miguel Aloysio Sattler (UFRGS)**  
Dr., *University of Sheffield,* Inglaterra

Aos meus pais, **Orni e Alani**, e ao meu avô **Arcide**,  
meus verdadeiros heróis.

## **AGRADECIMENTOS**

Quero agradecer a todas as pessoas que contribuíram, seja direta ou indiretamente, para a realização desta dissertação. Quero agradecer aos Professores Acir Mércio Loredo Souza e Edith Beatriz Camaño Schettini pela atenção dada durante a orientação deste trabalho, pelos conselhos e pelo apoio durante o Mestrado.

Agradeço aos colegas e amigos que fiz no Laboratório de Aerodinâmica das Construções, especialmente Engenheiros Gustavo Javier Zani Nuñez e Elvis Carpeggiani por me ensinarem todos os procedimentos de utilização do túnel de vento. Ao técnico Paulo Francisco Bueno, por dar todo o suporte para a construção dos modelos e equipamentos para a realização dos ensaios.

Agradeço à CAPES pelo suporte financeiro e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS pela oportunidade da realização do Mestrado Acadêmico.

A minha namorada, Engenheira Karin Ceroni Malcum, pelo amor, dedicação, carinho e paciência durante todo o tempo da dissertação, dando-me o apoio emocional necessário para a conclusão deste trabalho.

E agradeço principalmente ao meu grande amigo Professor Adrián Wittwer, por ter passado o seu conhecimento sobre o processo de dispersão de poluentes, sendo o principal fator determinante para a realização deste trabalho.

**"Não tenha medo de crescer lentamente. Tenha medo apenas de ficar parado."**  
Provérbio chinês

## RESUMO

DE PAOLI, F. **Simulação em Túnel de Vento da Dispersão de uma Pluma Emitida por uma Chaminé Isolada**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A crescente demanda mundial por energia, o aumento da produção industrial mundial e o efeito estufa têm gerado um grande problema para a atmosfera no que diz respeito à poluição. As necessidades de conhecimento sobre a física da dispersão de poluentes levaram à criação de ferramentas capazes de reproduzir e responder sobre os possíveis efeitos ao meio ambiente. Túneis de vento de camada limite são ferramentas que possuem condições de simular, em escala reduzida, as emissões de fontes poluidoras tais como chaminés de indústrias e emissões de veículos automotores, bem como permitir a obtenção de soluções aos possíveis danos causados. Este trabalho realizou um estudo exploratório em túnel de vento do comportamento de uma pluma de contaminantes emitidos por uma chaminé isolada, utilizando o hélio como gás traçador. Foram realizados ensaios com diferentes tipos de escoamento, velocidades do vento e velocidades de emissão da pluma. As emissões utilizaram hélio puro e uma mistura binária de hélio e ar. Foram feitos levantamentos do perfil de concentrações no eixo da chaminé, a diferentes posições a sotavento. Avaliou-se também a eficiência de um sistema de anemometria acoplado a uma sonda aspirante como instrumento medidor de concentrações de hélio. A análise dos resultados demonstrou a capacidade do túnel de simular o fenômeno da dispersão de poluentes e a influência das características da rugosidade do terreno no processo de diluição da pluma. Concluiu-se que há a influência aerodinâmica da chaminé sobre a pluma, comprovando-se a existência de três regiões características da pluma, cada uma apresentando um determinado comportamento para as flutuações instantâneas da concentração de hélio. Por último, o sistema de anemometria em conjunto com uma sonda aspirante é somente adequado para estudos de efeitos locais de dispersão de poluentes.

**Palavras-chave:** dispersão de poluentes; pluma; simulação física; túnel de vento; camada limite atmosférica; engenharia ambiental.

## ABSTRACT

DE PAOLI, F. **Wind Tunnel Simulation of the Plume Dispersion Emmited from an Isolated Chimney**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The increasing global energy demand, the growth of the world industrial production and the greenhouse effect have created a great problem for the atmosphere regarding pollution. The need of knowledge about the physics of the pollutants dispersion led to the creation of tools able to simulate and to respond on the possible effects to the environment. Boundary layer wind tunnels are tools capable of simulate, in reduced scale, the emissions from pollutant sources such as chimneys from industries and vehicles, as well as to allow possible hazardous problems to be solved. In this work, an exploratory wind tunnel study is made of the plume behaviour originated from an isolated chimney, using helium as tracer gas. The tests were performed for different types of flows, wind velocities and plume emission velocities. The emissions were from pure helium and a binary mixture of helium and air. The concentrations were measured in several positions leeward of the source. It was also evaluated the efficiency of an anemometry system connected to an aspirating probe as measuring instrument of the helium concentration. The analysis of the results demonstrated the capacity of the wind tunnel to simulate the pollutant dispersion phenomenon and the influence of the terrain roughness in the plume dilution process. It is concluded that the chimney exerts an aerodynamic influence over the plume, proving the existence of three characteristic plume regions, each one presenting a specific behaviour for the instantaneous fluctuations of helium concentrations. Regarding the anemometry system connected to an aspirating probe, it is concluded that it is only adequate for the study of local effects in the dispersion of pollutants.

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b>	<b>V</b>
<b>RESUMO</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>XVII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
1.3 OBJETIVOS	10
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	11
<b>2 A METEOROLOGIA ATMOSFÉRICA</b>	<b>12</b>
2.1 CONCEITOS GERAIS	12
2.2 ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA	14
2.2.1 ATMOSFERA NEUTRA	16
2.2.2 ATMOSFERA INSTÁVEL	17
2.2.3 ATMOSFERA ESTÁVEL	17
2.3 CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA	18
2.3.1 RADIAÇÃO SOLAR E FLUXO DE CALOR DA SUPERFÍCIE	21
2.3.2 CAMADA LIMITE CONVECTIVA	22
2.3.3 CAMADA LIMITE NEUTRA	23
2.3.4 CAMADA LIMITE INSTÁVEL	24
2.3.5 CAMADA LIMITE ESTÁVEL	25
2.4 TURBULÊNCIA	25
2.4.1 A DECOMPOSIÇÃO DE REYNOLDS	27
2.4.2 INTENSIDADE DA TURBULÊNCIA	28
2.5 PERFIL DE VELOCIDADES DO VENTO	30
<b>3 DISPERSÃO ATMOSFÉRICA</b>	<b>33</b>
3.1 O PROCESSO DE DISPERSÃO DE EFLUENTES NA ATMOSFERA	33
3.2 EFEITOS AERODINÂMICOS DAS CONSTRUÇÕES E IRREGULARIDADES DA SUPERFÍCIE	35
3.3 CRESCIMENTO DA PLUMA	36
3.4 MODELOS DE DISPERSÃO DE POLUENTES	38
3.4.1 EQUAÇÃO DA DIFUSÃO	39
3.4.2 ABORDAGEM DE EULER	39
3.4.3 ABORDAGEM DE LAGRANGE	40
3.4.4 MODELO GAUSSIANO	40

<b>4</b>	<b><u>A MODELAGEM DA DISPERSÃO DE POLUENTES</u></b>	<b>45</b>
<b>4.1</b>	<b>REQUERIMENTOS E PROBLEMAS DA SIMULAÇÃO EXATA</b>	<b>47</b>
<b>4.2</b>	<b>REQUERIMENTOS DE SEMELHANÇA APROXIMADA</b>	<b>50</b>
4.2.1	SEMELHANÇA DO ESCOAMENTO EM TÚNEL DE VENTO DE CAMADA LIMITE	50
4.2.2	SIMULAÇÃO APROXIMADA DO COMPORTAMENTO DE PLUMAS DE CHAMINÉS	51
<b>5</b>	<b><u>PROGRAMA EXPERIMENTAL</u></b>	<b>55</b>
<b>5.1</b>	<b>EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTAÇÃO</b>	<b>55</b>
5.1.1	TÚNEL DE VENTO	55
5.1.2	SISTEMA DE EMISSÃO DE GASES	58
5.1.3	SISTEMA DE ANEMOMETRIA DE FIO – QUENTE	62
5.1.4	SONDA ASPIRANTE	65
<b>5.2</b>	<b>PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS</b>	<b>68</b>
<b>6</b>	<b><u>SIMULAÇÃO DA DISPERSÃO DE POLUENTES</u></b>	<b>75</b>
<b>6.1</b>	<b>CURVA DE CALIBRAÇÃO DA Sonda ASPIRANTE</b>	<b>75</b>
<b>6.2</b>	<b>ENSAIOS DE EMISSÃO DE UMA PLUMA POR UMA CHAMINÉ ISOLADA</b>	<b>79</b>
6.2.1	EVOLUÇÃO DA PLUMA	83
6.2.2	RESULTADOS COMPARATIVOS PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE EMISSÃO	91
6.2.2.1	Perfil da Lei Potencial de Velocidades Médias do Vento 0,11	91
6.2.2.2	Perfil da Lei Potencial de Velocidades Médias do Vento 0,23	101
6.2.3	RESULTADOS COMPARATIVOS PARA DIFERENTES RUGOSIDADES	104
<b>6.3</b>	<b>RESOLUÇÃO DA Sonda ASPIRANTE</b>	<b>114</b>
<b>7</b>	<b><u>ANÁLISE DOS RESULTADOS</u></b>	<b>116</b>
<b>7.1</b>	<b>EVOLUÇÃO DA PLUMA</b>	<b>116</b>
<b>7.2</b>	<b>COMPARAÇÕES ENTRE PERFIS DE CONCENTRAÇÕES</b>	<b>126</b>
7.2.1	PERFIL DE CONCENTRAÇÕES PARA $P = 0,11$	126
7.2.2	COMPARAÇÕES DE CONCENTRAÇÕES PARA OS PERFIS 0,11 E 0,23	127
<b>7.3</b>	<b>AVALIAÇÃO DA RESOLUÇÃO DA Sonda ASPIRANTE</b>	<b>128</b>
<b>8</b>	<b><u>CONCLUSÕES</u></b>	<b>130</b>
<b>8.1</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>131</b>
<b>9</b>	<b><u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u></b>	<b>132</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Emissão realizada por uma fábrica na cidade de Guaíba-RS. _____	3
Figura 2.1 - Ilustração das principais características da dinâmica atmosférica. _____	13
Figura 2.2 - Forças da atmosfera que agem sobre a direção do vento e das massas de ar. __	14
Figura 2.3 - Gradiente de temperatura para uma atmosfera neutra. _____	16
Figura 2.4 - Gradiente de temperatura para uma atmosfera instável. _____	17
Figura 2.5 - Gradiente de temperatura para uma atmosfera estável. _____	18
Figura 2.6 - Esquema mostrando as características das regiões de alta e baixa pressão na camada limite atmosférica. _____	19
Figura 2.7 - Ilustração mostrando as subcamadas existentes na camada limite atmosférica.	20
Figura 2.8 - Gradiente da temperatura potencial na camada limite convectiva. _____	22
Figura 2.9 - Esquema das trocas de energia de quantidade de movimento entre os pacotes de ar na camada limite. _____	30
Figura 3.1 - Configuração dos tipos de pluma de acordo com a estabilidade atmosférica. __	34
Figura 3.2 - Ilustração da pluma segundo modelo gaussiano: (a) uma fonte de elevação localizada a (0,0,H); (b) perfil de concentração tridimensional. _____	42
Figura 3.3 - Curvas do coeficiente de dispersão horizontal gaussiano, de acordo com a classificação da estabilidade atmosférica. _____	43
Figura 3.4 - Curvas do coeficiente de dispersão vertical gaussiano, de acordo com a classificação da estabilidade atmosférica. _____	44
Figura 5.1 - Planta baixa do túnel de vento Prof <sup>o</sup> Joaquim Blessmann. _____	57
Figura 5.2 - Visão externa do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann. _____	57
Figura 5.3 - Ilustração do sistema de emissão e mistura de gases. _____	58
Figura 5.4 - Desenho mostrando a contração do escoamento na passagem pela placa – orifício. _____	61
Figura 5.5 - Curva do coeficiente de contração em função das relações entre pressões a montante e a jusante da placa - orifício. _____	61
Figura 5.6 - Detalhe do sistema de mistura de gases. _____	62
Figura 5.7 - Desenho básico do sistema elétrico do anemômetro de fio-quente (Dantec Dynamics, 2006). _____	63
Figura 5.8 - Sistema de anemometria a fio-quente. _____	63
Figura 5.9 - Fotografia da instrumentação utilizada para os ensaios. _____	65
Figura 5.10 - Ilustração das grandezas envolvidas no funcionamento da sonda aspirante. __	66
Figura 5.11 - Detalhe da sonda aspirante. _____	67
Figura 5.12 - Esquema da sonda aspirante. _____	67
Figura 5.13 - Perfis de velocidade do vento característicos de cada terreno. _____	70

Figura 5.14 - Características do perfil de velocidade do vento e turbulento simulado com expoente $p = 0,11$ .	70
Figura 5.15 - Detalhe dos dispositivos utilizados para a simulação do escoamento para o perfil $p = 0,11$ .	71
Figura 5.16 - Características do perfil de velocidade do vento e turbulento simulado com expoente $p = 0,23$ .	71
Figura 5.17 - Detalhe dos dispositivos utilizados para a simulação do escoamento para o perfil $p = 0,23$ .	72
Figura 6.1 - Detalhe da calibração da sonda aspirante.	77
Figura 6.2 - Curva de calibração para concentrações volumétricas.	78
Figura 6.3 - Curva de calibração para concentrações mássicas.	79
Figura 6.4 - Detalhe da instrumentação utilizada e do modelo usado para os ensaios.	82
Figura 6.5 - Visão parcial da seção de trabalho . Ao fundo, os ventiladores utilizados para a geração do vento a baixas velocidades.	82
Figura 6.6 - Vista lateral do modelo e da instrumentação utilizada.	83
Figura 6.7 - Perfis verticais de concentrações de hélio para $W_s = 0,70$ m/s: (a) Caso a: $U = 0,67$ m/s. (b) Caso f: $U = 0,33$ m/s.	84
Figura 6.8 - Perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para $W_s = 0,70$ m/s: (a) Caso a: $U = 0,67$ m/s. (b) Caso f: $U = 0,33$ m/s.	84
Figura 6.9 - Intensidade das flutuações de concentrações de hélio para $W_s = 0,70$ m/s: (a) Caso a: $U = 0,67$ m/s. (b) Caso f: $U = 0,33$ m/s.	85
Figura 6.10 - Perfis verticais de concentrações de hélio para $W_s = 1,18$ m/s: (a) Caso b: $U = 0,67$ m/s. (b) Caso g: $U = 0,33$ m/s.	85
Figura 6.11 - Perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para $W_s = 1,18$ m/s: (a) Caso b: $U = 0,67$ m/s. (b) Caso g: $U = 0,33$ m/s.	86
Figura 6.12 - Intensidade das flutuações de concentrações de hélio para $W_s = 1,18$ m/s: (a) Caso b: $U = 0,67$ m/s. (b) Caso g: $U = 0,33$ m/s.	86
Figura 6.13 - Perfis verticais de concentrações de hélio para $W_s = 0,95$ m/s: (a) Caso c: $U = 0,67$ m/s. (b) Caso h: $U = 0,33$ m/s.	87
Figura 6.14 - Perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para $W_s = 0,95$ m/s: (a) Caso c: $U = 0,67$ m/s. (b) Caso h: $U = 0,33$ m/s.	87
Figura 6.15 - Intensidade das flutuações de concentrações de hélio para $W_s = 0,95$ m/s: (a) Caso c: $U = 0,67$ m/s. (b) Caso h: $U = 0,33$ m/s.	88
Figura 6.16 - Perfis verticais de concentrações de hélio para $W_s = 1,12$ m/s: (a) Caso c: $U = 0,67$ m/s. (b) Caso h: $U = 0,33$ m/s.	88
Figura 6.17 - Perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para $W_s = 1,12$ m/s: (a) Caso c: $U = 0,67$ m/s. (b) Caso h: $U = 0,33$ m/s.	89
Figura 6.18 - Intensidade das flutuações de concentrações de hélio para $W_s = 1,12$ m/s: (a) Caso c: $U = 0,67$ m/s. (b) Caso h: $U = 0,33$ m/s.	89
Figura 6.19 - Perfis verticais de concentrações de hélio para $W_s = 1,43$ m/s: (a) Caso c: $U = 0,67$ m/s. (b) Caso h: $U = 0,33$ m/s.	90

Figura 6.20 - Perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para $W_s = 1,12$ m/s: (a) Caso c: $U = 0,67$ m/s. (b) Caso h: $U = 0,33$ m/s. _____	90
Figura 6.21 - Intensidade das flutuações de concentrações de hélio para $W_s = 1,12$ m/s: (a) Caso c: $U = 0,67$ m/s. (b) Caso h: $U = 0,33$ m/s. _____	91
Figura 6.22 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,67$ m/s, $p = 0,11$ , $x/h = 0,32$ ). _____	92
Figura 6.23 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,67$ m/s, $p = 0,11$ , $x/h = 0,32$ ). _____	92
Figura 6.24 - Curvas comparativas entre as intensidades das flutuações de concentrações de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,67$ m/s, $p = 0,11$ , $x/h = 0,32$ ). _____	93
Figura 6.25 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,33$ m/s, $p = 0,11$ , $x/h = 0,32$ ). _____	93
Figura 6.26 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,33$ m/s, $p = 0,11$ , $x/h = 0,32$ ). _____	94
Figura 6.27 - Curvas comparativas entre as intensidades das flutuações de concentrações de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,33$ m/s, $p = 0,11$ , $x/h = 0,32$ ). _____	94
Figura 6.28 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,67$ m/s, $p = 0,11$ , $x/h = 0,66$ ). _____	95
Figura 6.29 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,67$ m/s, $p = 0,11$ , $x/h = 0,66$ ). _____	95
Figura 6.30 - Curvas comparativas entre as intensidades das flutuações de concentrações de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,67$ m/s, $p = 0,11$ , $x/h = 0,66$ ). _____	96
Figura 6.31 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,33$ m/s, $p = 0,11$ , $x/h = 0,66$ ). _____	96
Figura 6.32 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,33$ m/s, $p = 0,11$ , $x/h = 0,66$ ). _____	97
Figura 6.33 - Curvas comparativas entre as intensidades das flutuações de concentrações de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,33$ m/s, $p = 0,11$ , $x/h = 0,66$ ). _____	97
Figura 6.34 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,67$ m/s, $p = 0,11$ , $x/h = 1,00$ ). _____	98
Figura 6.35 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,67$ m/s, $p = 0,11$ , $x/h = 1,00$ ). _____	98
Figura 6.36 - Curvas comparativas entre as intensidades das flutuações de concentrações de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,67$ m/s, $p = 0,11$ , $x/h = 1,00$ ). _____	99
Figura 6.37 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,33$ m/s, $p = 0,11$ , $x/h = 1,00$ ). _____	99
Figura 6.38 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,33$ m/s, $p = 0,11$ , $x/h = 1,00$ ). _____	100
Figura 6.39 - Curvas comparativas entre as intensidades das flutuações de concentrações de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,33$ m/s, $p = 0,11$ , $x/h = 1,00$ ). _____	100
Figura 6.40 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,67$ m/s, $p = 0,23$ , $x/h = 0,32$ ). _____	101

Figura 6.41 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,67$ m/s, $p = 0,23$ , $x/h = 0,32$ ). _____	102
Figura 6.42 - Curvas comparativas entre as intensidades das flutuações de concentrações de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,67$ m/s, $p = 0,23$ , $x/h = 0,32$ ). _____	102
Figura 6.43 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,33$ m/s, $p = 0,23$ , $x/h = 0,32$ ). _____	103
Figura 6.44 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,33$ m/s, $p = 0,23$ , $x/h = 0,32$ ). _____	103
Figura 6.45 - Curvas comparativas entre as intensidades das flutuações de concentrações de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,33$ m/s, $p = 0,23$ , $x/h = 0,32$ ). _____	104
Figura 6.46 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações de hélio para diferentes rugosidades de terreno, $p = 0,11$ e $p = 0,23$ . ( $U = 0,67$ m/s, $W_s = 0,70$ m/s, $x/h = 0,32$ ) _____	105
Figura 6.47 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para diferentes rugosidades de terreno, $p = 0,11$ e $p = 0,23$ . ( $U = 0,67$ m/s, $W_s = 0,70$ m/s, $x/h = 0,32$ ) _____	105
Figura 6.48 - Curvas comparativas entre as intensidades das flutuações de concentrações de hélio para diferentes rugosidades de terreno, $p = 0,11$ e $p = 0,23$ . ( $U = 0,67$ m/s, $W_s = 0,70$ m/s, $x/h = 0,32$ ) _____	106
Figura 6.49 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações de hélio para diferentes rugosidades de terreno, $p = 0,11$ e $p = 0,23$ . ( $U = 0,67$ m/s, $W_s = 1,18$ m/s, $x/h = 0,32$ ) _____	106
Figura 6.50 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para diferentes rugosidades de terreno, $p = 0,11$ e $p = 0,23$ . ( $U = 0,67$ m/s, $W_s = 1,18$ m/s, $x/h = 0,32$ ) _____	107
Figura 6.51 - Curvas comparativas entre as intensidades das flutuações de concentrações de hélio para diferentes rugosidades de terreno, $p = 0,11$ e $p = 0,23$ . ( $U = 0,67$ m/s, $W_s = 1,18$ m/s, $x/h = 0,32$ ) _____	107
Figura 6.52 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações de hélio para diferentes rugosidades de terreno, $p = 0,11$ e $p = 0,23$ . ( $U = 0,67$ m/s, $W_s = 0,95$ m/s, $x/h = 0,32$ ) _____	108
Figura 6.53 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para diferentes rugosidades de terreno, $p = 0,11$ e $p = 0,23$ . ( $U = 0,67$ m/s, $W_s = 0,95$ m/s, $x/h = 0,32$ ) _____	108
Figura 6.54 - Curvas comparativas entre as intensidades das flutuações de concentrações de hélio para diferentes rugosidades de terreno, $p = 0,11$ e $p = 0,23$ . ( $U = 0,67$ m/s, $W_s = 0,95$ m/s, $x/h = 0,32$ ) _____	109
Figura 6.55 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações de hélio para diferentes rugosidades de terreno, $p = 0,11$ e $p = 0,23$ . ( $U = 0,33$ m/s, $W_s = 0,70$ m/s, $x/h = 0,32$ ) _____	109
Figura 6.56 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para diferentes rugosidades de terreno, $p = 0,11$ e $p = 0,23$ . ( $U = 0,33$ m/s, $W_s = 0,70$ m/s, $x/h = 0,32$ ) _____	110

Figura 6.57 - Curvas comparativas entre as intensidades das flutuações de concentrações de hélio para diferentes rugosidades de terreno, $p = 0,11$ e $p = 0,23$ . ( $U = 0,33$ m/s, $W_s = 0,70$ m/s, $x/h = 0,32$ ) _____	110
Figura 6.58 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações de hélio para diferentes rugosidades de terreno, $p = 0,11$ e $p = 0,23$ . ( $U = 0,33$ m/s, $W_s = 1,18$ m/s, $x/h = 0,32$ ) _____	111
Figura 6.59 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para diferentes rugosidades de terreno, $p = 0,11$ e $p = 0,23$ . ( $U = 0,33$ m/s, $W_s = 1,18$ m/s, $x/h = 0,32$ ) _____	111
Figura 6.60 - Curvas comparativas entre as intensidades das flutuações de concentrações de hélio para diferentes rugosidades de terreno, $p = 0,11$ e $p = 0,23$ . ( $U = 0,33$ m/s, $W_s = 1,18$ m/s, $x/h = 0,32$ ) _____	112
Figura 6.61 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações de hélio para diferentes rugosidades de terreno, $p = 0,11$ e $p = 0,23$ . ( $U = 0,33$ m/s, $W_s = 0,95$ m/s, $x/h = 0,32$ ) _____	112
Figura 6.62 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para diferentes rugosidades de terreno, $p = 0,11$ e $p = 0,23$ . ( $U = 0,33$ m/s, $W_s = 0,95$ m/s, $x/h = 0,32$ ) _____	113
Figura 6.63 - Curvas comparativas entre as intensidades das flutuações de concentrações de hélio para diferentes rugosidades de terreno, $p = 0,11$ e $p = 0,23$ . ( $U = 0,33$ m/s, $W_s = 0,95$ m/s, $x/h = 0,32$ ) _____	113
Figura 6.64 - Perfis verticais de concentrações de hélio, ( $U = 1,46$ m/s, $W_s = 0,90$ m/s, $p = 0,23$ ). _____	114
Figura 6.65 - Perfis de concentrações de hélio distorcidos causados pela falta de resolução da sonda ( $U = 1,46$ m/s, $W_s = 0,90$ m/s, $p = 0,23$ ). _____	115
Figura 7.1 - Série temporal de dados de concentração de hélio, para o caso a ( $W_s = 0,70$ m/s, $\bar{U} = 0,67$ m/s e $p = 0,11$ ), representando três regiões características da pluma. De cima para baixo: porção inferior da pluma (com influência aerodinâmica da chaminé), centro (maior concentração média) e porção superior da pluma (dominada pelas forças de empuxo). ____	121
Figura 7.2 - Série temporal de dados de concentração de hélio, para o caso f ( $W_s = 0,70$ m/s, $\bar{U} = 0,33$ m/s e $p = 0,11$ ), representando três regiões características da pluma. De cima para baixo: porção inferior da pluma (sem influência aerodinâmica da chaminé), centro (maior concentração média) e porção superior da pluma (dominada pelas forças de empuxo). ____	122
Figura 7.3 - Série temporal de dados de concentração de hélio, representando a porção inferior da pluma com a influência aerodinâmica da chaminé, para três casos distintos, com $\bar{U} = 0,67$ m/s: c ( $W_s = 0,90$ m/s, $p = 0,11$ ); k ( $W_s = 0,70$ m/s, $p = 0,23$ ) e m ( $W_s = 0,90$ m/s, $p = 0,23$ ). _____	123
Figura 7.4 - Série temporal de dados de concentração de hélio, representando a porção inferior da pluma sem a influência aerodinâmica da chaminé, para três casos distintos, com $\bar{U} = 0,33$ m/s: h ( $W_s = 0,90$ m/s, $p = 0,11$ ); n ( $W_s = 0,70$ m/s, $p = 0,23$ ) e p ( $W_s = 0,90$ m/s, $p = 0,23$ ). _____	124
Figura 7.5- Série temporal de dados de concentração de hélio, representando a porção superior da pluma com domínio das forças de empuxo, para três casos distintos, com $\bar{U} = 0,33$ m/s: h ( $W_s = 0,90$ m/s, $p = 0,11$ ); n ( $W_s = 0,70$ m/s, $p = 0,23$ ) e p ( $W_s = 0,90$ m/s, $p = 0,23$ ). ____	125

Figura 7.6 - Série temporal obtida com a sonda aspirante no centro da pluma, a uma distância  $x/h = 3$ . \_\_\_\_\_ 128

Figura 7.7 - Série temporal obtida com a sonda aspirante no centro da pluma, a uma distância  $x/h = 3,8$ . \_\_\_\_\_ 129

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Classificação da estabilidade atmosférica segundo modelo gaussiano. _____	43
Tabela 5.1 - Características dos gases utilizados nos ensaios. _____	59
Tabela 5.2 - Valores do diâmetro do sumidouro de aspiração, de acordo com a velocidade do escoamento, necessários para não interferir nos valores de concentração captados. _____	66
Tabela 5.3 - Resumo dos casos simulados em túnel de vento, para o perfil $p = 0,11$ . _____	73
Tabela 5.4 - Resumo dos casos simulados em túnel de vento, para o perfil $p = 0,23$ . _____	74
Tabela 6.1 - Concentrações mássicas e volumétricas de hélio com ar, no sistema de mistura de gases. Os valores de concentração variam de 0 (0 % de hélio) a 1 (100 % de hélio) na mistura, de acordo com o diâmetro de orifício utilizado. _____	76
Tabela 6.2 - Concentrações mássicas e volumétricas de hélio com ar, no sistema de mistura de gases. Os valores de concentração variam de 0 (0 % de hélio) a 1 (100 % de hélio) na mistura, de acordo com o diâmetro de orifício utilizado. _____	77
Tabela 6.3 - Erro calculado para concentrações volumétricas entre a concentração de hélio aspirada pela sonda e o valor fornecido pelo polinômio de 4ª ordem. _____	80
Tabela 6.4 - Erro calculado para concentrações mássicas entre a concentração de hélio aspirada pela sonda e o valor fornecido pelo polinômio de 4ª ordem. _____	81
Tabela 7.1 – Parâmetros de semelhança calculados, de acordo com os casos ensaiados. _____	117
Tabela 7.2 - Alturas adimensionais ( $x/h$ ) para os valores de máxima concentração, para as velocidades médias do escoamento ensaiadas para o perfil $p = 0,11$ . _____	117
Tabela 7.3 - Alturas adimensionais ( $x/h$ ) para os valores de máxima concentração, para as velocidades médias do escoamento ensaiadas para o perfil $p = 0,23$ . _____	118
Tabela 7.4 - Percentagens de elevação do ponto de maior concentração da pluma, em função do decréscimo da velocidade do escoamento para o perfil $p = 0,11$ . _____	118
Tabela 7.5 - Percentagens de elevação do ponto de maior concentração da pluma, em função do decréscimo da velocidade do escoamento para o perfil $p = 0,23$ . _____	118
Tabela 7.6 - Concentração de hélio emitida pela chaminé para cada caso ensaiado. _____	126

## SÍMBOLOS

### Letras Romanas:

®	Marca registrada
<i>A</i>	Constante da equação de cálculo da altura da camada limite neutra
<i>a</i>	Distância entre o sumidouro e o ponto de estagnação
<i>A<sub>c</sub></i>	Área do orifício
<i>A<sub>e</sub></i>	Área efetiva do orifício
<i>B</i>	Constante da equação de cálculo da espessura da camada limite estável
<i>c</i>	Concentração do poluente
$\bar{c}$	Concentração média do poluente
<i>c'</i>	Concentração flutuante do poluente
<i>C<sub>contr</sub></i>	Coefficiente de contração do fluido
<i>C<sub>d</sub></i>	Coefficiente de contração do escoamento a jusante do orifício
<i>c<sub>p</sub></i>	Calor específico do ar a pressão constante
<i>c<sub>v</sub></i>	Calor específico do ar a volume constante
<i>d</i>	Diâmetro da chaminé
<i>D</i>	Diâmetro interno da chaminé
<i>d<sub>c</sub></i>	Diâmetro da seção de contração do tubo de aspiração
<i>D<sub>i</sub></i>	Difusividade molecular da espécie e do fluido portador
<i>D<sub>m</sub></i>	Comprimento característico do modelo
<i>D<sub>p</sub></i>	Comprimento característico do protótipo ou da escala real
<i>d<sub>t</sub></i>	Diâmetro do tubo de aspiração
<i>F</i>	Fluxo de flotação

$\overline{F}$	Fluxo de massa através da superfície de controle
$F_c$	Força de Coriolis
$F_p$	Força de pressão
$Fr$	Número de Froude
$(Fr)_d$	Número de Froude densimétrico
$g$	Aceleração da gravidade
$H$	Altura total da chaminé (altura da chaminé e de elevação da pluma)
$h(t)$	Variação temporal da altura da camada limite instável
$h_c$	Altura da chaminé
$h_{eq}$	Espessura da camada limite estável
$I_L$	Intensidade local da turbulência
$I_N$	Intensidade normalizada da turbulência
$k$	Constante de von Kàrmàn
$K_H$	Coefficiente de difusão aleatória horizontal
$K_m$	Viscosidade turbulenta
$K_Z$	Coefficiente de difusão aleatória vertical
$\ell$	Comprimento de mistura
$L$	Distância da fonte ao receptor
$l$	Largura de aspiração do sumidouro
$m$	Massa
$M$	Massa molecular
$n$	Número de moles
$p$	Expoente da lei potencial de velocidades do vento.

$P$	Pressão atmosférica
$P_{jus}$	Pressão a jusante
$P_{mont}$	Pressão a montante
$p_0$	Pressão padrão de referência
$q$	Vazão de emissão do poluente
$Q$	Taxa de emissão de poluente
$Q_{asp}$	Vazão mássica de aspiração
$q_c$	Fluxo de calor da superfície
$Q_e$	Taxa de emissão de calor
$Q_I$	Vazão volumétrica de emissão da fonte
$Q_m$	Vazão mássica do fluido
$\bar{R}$	Constante universal dos gases
$R$	Constante do gás
$r$	Remoção de poluentes
$Re$	Número de Reynolds
$R_i$	Velocidade de geração da espécie $i$ por reação química
$R_s$	Raio interior da chaminé
$s_i$	Velocidade de adição de espécies $i$ numa localização $x$ no tempo $t$
$T$	Temperatura
$T_a$	Temperatura ambiente do ar
$T_{mont}$	Temperatura do gás a montante do colar ou placa-orifício
$T_s$	Temperatura média dos gases na saída da chaminé
$U$	Velocidade do vento

$u$	Componente da velocidade do vento na direção x
$\bar{u}$	Componente de velocidade média do vento horizontal
$u'$	Componente flutuante da velocidade do vento na direção x
$u_{ref}$	Velocidade de referência na direção x
$u_*$	Velocidade de fricção
$V$	Volume de gás
$v$	Componente da velocidade do vento na direção y
$\bar{v}$	Componente velocidade média do vento na direção y
$v'$	Componente flutuante da velocidade do vento na direção y
$V_0$	Velocidade na entrada do tubo
$v_s$	Velocidade média de saída dos gases da chaminé
$w$	Componente da velocidade do vento na direção z
$\bar{w}$	Componente da velocidade média do vento na direção z
$w'$	Componente flutuante da velocidade na direção z
$W_s$	Velocidade de emissão da chaminé
$x^*$	Distância desde a origem até o ponto no eixo dos x, quando a curva da pluma não se eleva mais.
$z_0$	Altura da rugosidade
$z_d$	Deslocamento do plano zero
$z_g$	Altura gradiente
$z_i$	Altura da camada limite neutra
$z_{ref}$	Altura de referência
$\alpha$	Constante para a chaminé

### Letras Gregas:

$\chi$	Concentração de poluentes, em massa por volume
$\sigma_u$	Desvio-padrão da componente $u$ do vento
$\gamma$	Constante adiabática
$\gamma_d$	Taxa de declínio adiabático do ar seco
$\gamma_a$	Taxa de declínio atmosférico
$\Delta T_0$	Temperatura de aumento da superfície
$\bar{\theta}$	Temperatura potencial média
$\sigma_u^2$	Variância da componente $u$ do vento
$\phi$	Latitude
$\Omega$	Velocidade de rotação da Terra
$\beta$	Constante da equação de vazão mássica da placa-orifício e da sonda aspirante.
$\Delta h$	Crescimento ou elevação da pluma
$\theta$	Temperatura potencial
$\theta'$	Temperatura potencial flutuante
$\lambda_L$	Escala geométrica
$\lambda_u$	Escala de velocidade na direção $x$
$\lambda_w$	Escala de velocidade na direção $z$
$\rho_s$	Massa específica do gás
$\sigma_y$	Desvio-padrão na direção $y$
$\sigma_z$	Desvio-padrão na direção $z$
$\tau$	Tensão de Reynolds
$\nu_s$	Viscosidade cinemática do gás

$\varphi$	Posição da partícula
$\Gamma_d$	Gradiente térmico adiabático para o ar seco
$\Gamma_e$	Gradiente térmico do ambiente
$\Gamma_m$	Gradiente térmico adiabático para o ar úmido
$\rho$	Massa específica da substância
$\rho_0$	Massa específica do ar na camada inferior (número de Richardson)
$\rho_1$	Massa específica do ar na camada superior (número de Richardson)
$\rho_{ar}$	Massa específica do ar
$\tau_0$	Tensão superficial ou de cisalhamento

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações Gerais

O tema Meio Ambiente é um dos assuntos mais discutidos mundialmente na atualidade. O avanço desenfreado da população e da economia mundial levou à séria degradação do nosso meio. A emissão de efluentes domésticos e industriais em rios, lixões a céu aberto e toneladas de gases poluentes emitidos diariamente por veículos automotores e indústrias, são alguns exemplos causadores das sérias modificações da composição química da atmosfera, da água e das alterações climáticas da Terra, com aumento gradativo da temperatura média global.

A poluição atmosférica constitui um dos principais problemas mundiais. Devido à característica dinâmica da atmosfera no processo de dispersão, os gases poluentes podem ser espalhados por vários quilômetros, contaminando e prejudicando a saúde da população, a flora, a fauna e até provocando alterações sobre certos materiais.

Há algumas definições para o conceito de poluição de ar. Segundo Branco (1997) *apud* SMAM (2000), poluição do ar é quando há alterações nas propriedades atmosféricas, causadas pela ação direta ou indireta do homem que geram emissões de poluentes em concentrações nocivas à saúde e ao meio ambiente. Lora (2002), também define que poluição é a degradação do ambiente, provocado por alterações físico-químicas ou biológicas do ar que afetam de forma negativa a saúde, a sobrevivência ou as atividades humanas e de outros organismos vivos.

Segundo a Resolução nº 003 do CONAMA de 28 de junho de 1990, a definição de poluição atmosférica é “qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar:

- impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde;
- inconveniente ao bem-estar público;
- danoso aos materiais, à fauna e flora;

- prejudicial à segurança. ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.”

De acordo com Lora (2002), as principais causas da crise ambiental da atualidade são:

- o aumento exponencial da população mundial, criando uma maior pressão sobre o meio ambiente, devido ao aumento do consumo dos recursos naturais;
- o aumento exponencial no consumo de energia, principalmente de combustíveis fósseis como o petróleo, o gás natural e o carvão mineral, acentuando o volume de emissões;
- a intensificação do processo de industrialização, sendo esta a principal fonte poluidora, aumentando o consumo de recursos minerais para atender a demanda da população;
- o processo de urbanização, causando grande impacto ambiental, devido ao grande número de veículos, à geração de resíduos (lodo do tratamento de água e esgoto, e do lixo), e a concentração de grande quantidade de indústrias.

As fontes podem ser naturais (emissão por vulcões, por exemplo) ou antropogênicas (provocadas pelo homem). Com relação às fontes antropogênicas, nós temos as fontes móveis e as fontes fixas. Um exemplo de fonte móvel são os veículos automotores e de fonte fixa são as chaminés industriais.

As chaminés industriais, de usinas de geração de energia (como as termelétricas), indústrias cimentíceas, indústrias de papel e celulose (figura 1.1) e veículos automotores constituem nas principais fontes de emissão de poluentes. As concentrações e os tipos de poluentes lançados no ar dependem: da matéria-prima empregada, do tipo de combustível utilizado; dos subprodutos gerados pelo processo; e do próprio produto formado. Suas emissões geralmente contêm uma variada gama de poluentes como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), aldeídos, monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), hidrocarbonetos, entre outros. Além disso, há produtos de reações fotoquímicas que ocorrem entre os poluentes primários, que acabam gerando outros poluentes com potencial de risco à saúde ainda maior como, por exemplo, o ozônio.

As fortes evidências das mudanças climáticas e dos efeitos que os poluentes atmosféricos estavam causando na saúde humana fizeram com que se despertasse a consciência de inibir os efeitos negativos da poluição no planeta. As primeiras políticas de combate à poluição começaram a surgir nos países desenvolvidos. Nos Estados Unidos criou-se a *EPA – Environment Protection Agency* (Agência de Proteção Ambiental), com um dos objetivos de controlar a emissão de poluentes na atmosfera pelas fontes emissoras e padronizar a qualidade do ar. Mesmo com a criação desta agência, os Estados Unidos continuam sendo o principal emissor mundial de poluentes, representando mais de 40 % do volume total de poluentes emitidos atualmente.



**Figura 1.1 - Emissão realizada por uma fábrica na cidade de Guaíba-RS.**

A legislação brasileira é fortemente influenciada pela legislação norte-americana. Com o decreto nº 8.468 de 1976, no Estado de São Paulo, criou-se a primeira padronização da qualidade do ar. Baseado neste decreto, estabeleceu-se o primeiro padrão nacional de qualidade do ar, com a Resolução CONAMA nº 003 de 1990.

Por conta da legislação, há uma maior rigidez no controle das emissões. Atualmente, para uma indústria ou termelétrica poder se instalar em uma determinada região, é necessário um estudo sobre os possíveis riscos que esta pode trazer ou acrescentar ao meio ambiente. Para o caso da poluição do ar, os estudos por teorias convencionais de difusão como a teoria estatística de Gauss são falhas, pois muitas delas não levam em consideração várias

características da dinâmica atmosférica. Além disso, o custo para a realização de estudos em campo é muito elevado.

A modelagem da dispersão de poluentes, tanto experimental quanto numérica, é uma ferramenta capaz de avaliar os riscos de futuras instalações, como também avaliar as já existentes.

A modelagem da dispersão de poluentes é uma ferramenta usada para (Seinfeld, 1975 *apud* Zannetti, 1990):

- Estabelecer uma legislação de controle de emissões para determinar a máxima taxa de emissão permitida, fixando padrões de qualidade do ar.
- Avaliar técnicas de controle e estratégias de reduções de emissões, avaliando os impactos deste controle no futuro.
- Verificar futuras fontes de emissão de poluentes, com o objetivo de minimizar seus impactos ambientais.
- Planejar o controle de episódios de poluição do ar, definir estratégias de intervenção imediata e prevenir severos episódios de poluição do ar em certas regiões.
- Avaliar a responsabilidade pela existência dos níveis de concentrações de poluentes na atmosfera e avaliações das relações entre fonte - receptor.

A modelagem experimental em túnel de vento constitui uma das ferramentas mais utilizadas para a modelagem da dispersão de poluentes. Por meio da utilização de modelos reduzidos em escala, pode-se fazer uma representação do campo de escoamento de uma determinada região e do comportamento de uma pluma de contaminantes.

Desse modo, os túneis de vento que simulam a camada limite atmosférica são de extrema importância como uma ferramenta capaz de ajudar no estudo dos processos de dispersão atmosférica, principalmente em zonas urbanas, devido à maior concentração populacional, e de melhoramento da qualidade de vida da população.

### *1.2 Revisão Bibliográfica*

Os primeiros estudos da simulação da dispersão de poluentes atmosféricos iniciaram na década de 1970. Snyder (1972) estudou os critérios para a correta modelagem da difusão com a utilização de parâmetros adimensionais e condições de contorno entre o modelo e o protótipo. A negligência de certos parâmetros pode levar a sérios erros na modelagem da difusão em um protótipo. O número de Froude aparece como o parâmetro mais importante para a correta modelagem do processo de dispersão.

Jandali, Isyumov e Davenport (1974), realizaram um estudo da dispersão de gás de chaminés da usina de energia de Powerton, próximo a Pekin Illinois. O objetivo deste trabalho foi quantificar a concentração na superfície de SO<sub>2</sub> em áreas de interesse. Testaram-se uma faixa de velocidades e direções do vento, e temperaturas e velocidades de saída do gás para uma simulação de uma camada limite atmosférica neutra. Estudos semelhantes foram realizados por Isyumov e Maheu (1980).

O estudo da dispersão de poluentes não se restringe somente à emissão de gases por chaminés industriais ou por veículos automotores. A propagação de odores também é investigada através de modelagem em túnel de vento. Foi o que fez Janssen (1979), com o estudo da dispersão de odores na vizinhança próxima a suinocultores. Este estudo avaliou os efeitos da propagação do odor para diferentes posições dos criadores e direções do vento.

Em 1979, Ruscheweyh e Fischer pesquisaram em túnel de vento os efeitos aerodinâmicos de torres de resfriamento de centrais termelétricas próximas a chaminés (fontes de emissão). No modelo, foram realizadas medições dos níveis de concentração de poluentes no local, verificando a forte perturbação causada por estas torres sobre a difusão de contaminantes. Já Meroney (1979) estudou o comportamento de elevação de uma pluma ao nível do solo em uma camada turbulenta superficial com uma velocidade de escoamento suficiente para retardar a subida da pluma. Ele correlacionou algumas configurações de fontes emissoras (pontual, em linha e área) com o comprimento percorrido pela pluma até a sua elevação.

Porém, todos os estudos realizados em túnel de vento sobre a dispersão de poluentes não atendia a todos os requerimentos de semelhança. O uso de todos os parâmetros de semelhança (semelhança exata) impossibilitava a realização dos estudos de dispersão atmosférica, como por exemplo, a utilização de baixas velocidades do escoamento no túnel de vento que dificultavam a operação da maior parte das instalações de túneis de vento da época.

Desse modo, Isyumov e Tanaka (1979), realizaram uma análise sobre os métodos utilizados para a simulação do comportamento de uma pluma em túnel de vento utilizando modelagens aproximadas, com o relaxamento de alguns parâmetros de semelhança, tornando assim possível a construção de modelos de chaminés para simulação de emissões de pluma de contaminantes e a operação de vários túneis de vento, com o aumento da velocidade do escoamento sem distorção dos resultados.

Devido à necessidade de altos números de Reynolds no modelo para tornar possível a utilização de várias instalações de túneis de vento, Poreh e Kacherginsky (1981) estudaram o problema da simulação da elevação da pluma em modelos de pequena escala, propondo um novo critério de similaridade, com o uso de parâmetros adimensionais do empuxo e quantidade de movimento da pluma que necessitam ser iguais no modelo e no protótipo.

A medição da concentração de um determinado poluente tem por objetivo a verificação da possibilidade de risco à saúde da população ou do ambiente. A concentração média, algumas vezes, não reflete o seu verdadeiro grau de risco à vizinhança. Desse modo, tem se testado equipamentos capazes de fornecer as flutuações da concentração em um pequeno intervalo de tempo. Na Universidade de Alberta, em Edmonton, Canadá, Wilson e Netterville (1981) testaram um detector de concentração de poluentes aspirado baseado em um anemômetro de filme quente, capaz de realizar medições em uma escala de tempo da ordem de milisegundos, com largura de banda entre 0 – 500 Hz. Mais tarde, Halstead e Wood (1982), usando um detector semelhante ao acima, verificaram a baixa resolução da sonda quando comparada a instrumentos convencionais de amostragem de gás.

Com o entendimento do comportamento da pluma sob diferentes condições de estabilidade atmosférica e o domínio dos mecanismos para simulação da camada limite em túnel de vento, os pesquisadores iniciaram os estudos de situações reais e de prevenção a futuros acidentes envolvendo gases tóxicos e/ou explosivos. Em 1978, um experimento em campo simulou a difusão de seis metros cúbicos de gás natural líquido (*LNG- Liquid Natural Gas*) na *China Lake Naval Weapons Center*, na China. A partir das medições em campo, Meroney e Neff (1982) configuraram um conjunto de modelos que simularam o espalhamento do LNG utilizando instalações de um túnel de vento meteorológico. Esta simulação, além de estender os valores medidos que foram realizados em campo, serviu como ferramenta de prevenção contra gases tóxicos.

No ano de 1982, Isyumov e Ferraro simularam em túnel de vento a descarga no ar de contaminantes de quatro chaminés da estação de geração de energia *Ontario Hydro*

---

*Darlington Nuclear Generating Station*. O modelo estudado tinha uma escala geométrica de 1:600 e usou um escoamento da camada limite turbulenta representando vento natural em condições de estabilidade atmosférica neutra. Além de medir o nível de concentrações de contaminantes, avaliaram-se as condições de empuxo negativo da pluma na cavidade na vizinhança da estação.

Isyumov, Helliwell e Davenport (1986) realizaram um estudo da qualidade do ar em *Precinct A* da *Railway Lands* em Toronto (Ontário, Canadá), com ênfase no projeto do *Dome Stadium* proposto e suas imediações. Este estudo fez parte da investigação do microclima dentro do *Stadium Precinct* realizado no *Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory* (*University of Western Ontario* - Canadá). A modelagem desta região em túnel de vento foi usada para avaliar a concentração de contaminantes devido às emissões veiculares e antecipar os efeitos sobre o local. Um gás traçador foi utilizado para determinar as concentrações relativas que resultaram em diferentes partes do local.

Na Universidade do Estado do Colorado, Neff, Tan e Meroney (1988) analisaram em túnel de vento o impacto causado pela construção da ventilação de seções da *Central Artery* e da *Third Harbor Tunnel*. Das sete ventilações projetadas, duas estavam localizadas em áreas densamente povoadas e confinadas de Boston. O estudo do modelo desta região tinha como objetivos a visualização da dispersão da pluma, a obtenção de dados de concentração sobre o impacto de várias configurações de chaminés de ventilação, a especificação de altura destas chaminés bem como discutir as vantagens e desvantagens das diferentes chaminés modeladas.

Em 1990, Crooks e Isyumov examinaram o possível impacto da exaustão da pluma de contaminantes de quatro chaminés propostas em *The University of Western Ontario Chemistry Building* sobre as construções vizinhas e na própria edificação. Determinou-se a altura necessária para cada uma das quatro chaminés de modo que a pluma não afetasse as construções vizinhas e a própria edificação em que seriam construídas.

Na década de 1990, a simulação da dispersão de poluentes por meio da modelagem numérica e analítica passou a ganhar força devida, principalmente, à evolução na capacidade dos computadores para processamento de dados. Como exemplos temos trabalhos de Ichikawa e Sada (1993), com uso de modelos Lagrangianos de dispersão de partículas e Moriguchi e Uehara (1993) com a simulação numérica e experimental da exaustão de gases veiculares em complexos urbanos.

Também nesta mesma década, os estudos do comportamento da dispersão de poluentes em *cânions* urbanos se intensificaram, com a utilização de novos parâmetros que consideram, por exemplo, a estratificação térmica para a simulação das chamadas ilhas de calor que ocasionam episódios de poluição nos grandes centros urbanos. O crescimento das grandes cidades e o aumento da poluição atmosférica provocada principalmente por veículos automotores, levaram os pesquisadores a estudar o fenômeno da dispersão para estimar o grau de risco sobre determinada região e a prever o impacto sobre o ambiente no futuro. Os estudos abrangeram a influência de construções no fenômeno de decaimento da pluma (*downwash* aerodinâmico), interações entre plumas (Cheung e Melbourne, 1995), efeitos térmicos sobre o escoamento e dispersão sobre áreas urbanas (Cermak, 1995), estudos do campo de concentrações em cânions urbanos (Kastner-Klein e Plate, 1999).

No século 21, até o presente momento, com a construção de túneis de vento capazes de simular um escoamento em uma camada limite estratificada ou em tanques de água, o estudo da dispersão de poluentes por meio da simulação física abrange uma ampla faixa de casos. Casos mais simples como fontes pontuais de emissão até casos mais complexos como a modelagem física de complexos urbanos, com efeitos de ilha de calor e fontes móveis.

Nestes últimos anos, a modelagem computacional se tornou uma ferramenta muito utilizada para a simulação de dispersão de poluentes. Houve grandes avanços nesta área, com a introdução de parâmetros como a turbulência atmosférica, os efeitos da rugosidade do terreno e a estratificação atmosférica. Além disso, com o avanço tecnológico dos computadores, tornou possível o uso de cálculos mais complexos, devido ao aumento na capacidade de processamento matemático dos computadores. Porém, ainda não é capaz de apresentar resultados confiáveis frente às simulações físicas para situações de modelagens mais complexas.

Quanto à instrumentação laboratorial utilizada para as medições em túnel de vento das concentrações de gases, os mais comumente utilizados são os cromatógrafos gasosos e o espectrômetro a infravermelho. Há outros equipamentos utilizados, como sensores semelhantes à sonda Lambda utilizada em automóveis, sondas aspirantes em conjunto com sistemas de anemometria a fio-quente de temperatura constante e análise de concentrações por processamento de imagens da pluma.

Os cromatógrafos gasosos são os mais usados, por serem capazes de detectar baixíssimas concentrações de determinados gases. Seu princípio de funcionamento consiste num processo de separação física dos gases que compõem a amostra. A cromatografia separa

os componentes da amostra através de sua distribuição por duas fases: uma fase móvel e uma fase estacionária. As fases móvel e estacionária são substâncias que podem ser sólidas, líquidas e gasosas nas quais os gases da amostra interagem. Primeiramente, os gases da amostra são separados devido às diferenças do grau de solubilidade de suas componentes na fase estacionária (componentes de adsorção como superfícies sólidas, sílica gel ou alumina). Uma coluna retém alguns componentes mais tempo do que os outros. Os componentes separados passam através da coluna a velocidades variáveis. O grau de separação (resolução) é uma função das diferentes solubilidades e da eficiência de retenção da coluna. O gás separado é comparado a um gás usado como parâmetro de comparação (podendo ser hélio, nitrogênio ou hidrogênio). Um detector responde às diferenças de propriedades entre o gás da amostra e o gás usado como parâmetro. O tempo que o gás da amostra leva para emergir da coluna (tempo de retenção) em comparação ao gás de parâmetro e a magnitude do sinal do detector, indicam o tipo de gás e a concentração, geralmente em ppm, na amostra. Os cromatógrafos se dividem em grupos conforme o seu modo de funcionamento que depende do detector utilizado: por condutividade térmica; ionização de chama; fotometria de chama; orifício – capilaridade; fotoionização; captura de elétrons; ionização de hélio; e balanço da massa específica do gás. Os dois primeiros citados são os mais populares, devido à facilidade de ser utilizado em inúmeras aplicações. Os outros são utilizados em circunstâncias especiais ou raramente usados. Apesar da vantagem de detectar concentrações mínimas de gases, tem como desvantagem a baixa frequência de resposta de detecção da concentração. Porém, há no mercado atualmente um equipamento especialmente desenvolvido para túneis de vento, pela empresa Cambustion® (Inglaterra), que utiliza a detecção por ionização de chama a altas frequências de aquisição.

Os espectrômetros a infravermelho também são equipamentos muito utilizados para medições de concentrações gasosas. Seu princípio de funcionamento consiste na emissão de um feixe de raios infravermelhos sobre as moléculas do gás poluente. A vibração molecular do gás dá informações ao equipamento sobre o tipo de gás e a concentração deste num determinado ponto. Como os cromatógrafos de gás, os espectrômetros a infravermelho possuem um tempo de resposta alto (próximo a dois segundos) quando se necessita de resultados de concentrações instantâneas (altas frequências de aquisição).

A sonda aspirante, em conjunto com um sistema de anemometria a fio-quente (temperatura constante) é um equipamento capaz de dar respostas de concentrações de gases a

altas frequências de aquisição (concentrações instantâneas). Este equipamento foi utilizado neste trabalho e seu funcionamento será explicado nos capítulos seguintes.

### ***1.3 Objetivos***

A utilização do túnel de vento de camada limite atmosférica Prof. Joaquim Blessmann, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, para a simulação dos processos de dispersão de gases é uma das principais metas deste trabalho. A verificação deste túnel quanto à viabilidade de seu uso para estes estudos faz-se necessário devido à importância no controle dos níveis de concentrações de poluentes exigidos pela legislação vigente, principalmente sobre setores de produção.

Desse modo, além de verificar a viabilidade de utilização das instalações do túnel de vento para estudos deste tipo de fenômeno, os estudos do processo de dispersão de poluentes tiveram como principais objetivos:

- A simulação do processo de emissão de um gás, neste caso o gás hélio, por meio de uma chaminé isolada em túnel de vento, utilizando diferentes velocidades do escoamento e da emissão, para dois tipos de escoamento.
- Levantamento do perfil vertical de concentrações de um gás (hélio), a três posições a sotavento da chaminé, verificando o processo de dispersão da pluma para diferentes velocidades de escoamento e de emissão.
- Verificar a influência do empuxo e da quantidade de movimento na altura de elevação da pluma.
- A capacidade da sonda aspirante, em conjunto com o anemômetro de fio- quente à temperatura constante, como instrumento de medição de concentrações de poluentes.

### *1.4 Estrutura da Dissertação*

No Capítulo 2 deste trabalho é feito uma revisão conceitual sobre a meteorologia atmosférica e as principais características da camada limite atmosférica. O Capítulo 3 apresenta o processo de dispersão de poluentes e os principais modelos analíticos utilizados para a simulação do processo de dispersão de uma pluma de contaminantes. O Capítulo 4 faz uma abordagem sobre as técnicas utilizadas para a simulação da dispersão de poluentes, sobre os problemas de uma simulação exata e o motivo da utilização de simulações aproximadas. O Capítulo 5 mostra o programa experimental desenvolvido, com a apresentação da instrumentação utilizada para os ensaios, como o sistema de mistura de gases e a sonda aspirante, acoplada a um sistema de anemometria de fio-quente a temperatura constante, para a medição de concentrações de poluente emitidos no interior do túnel de vento. Os resultados dos ensaios são apresentados no Capítulo 6. O Capítulo 7 apresenta a análise dos resultados dos ensaios e o Capítulo 8 as considerações finais deste trabalho.

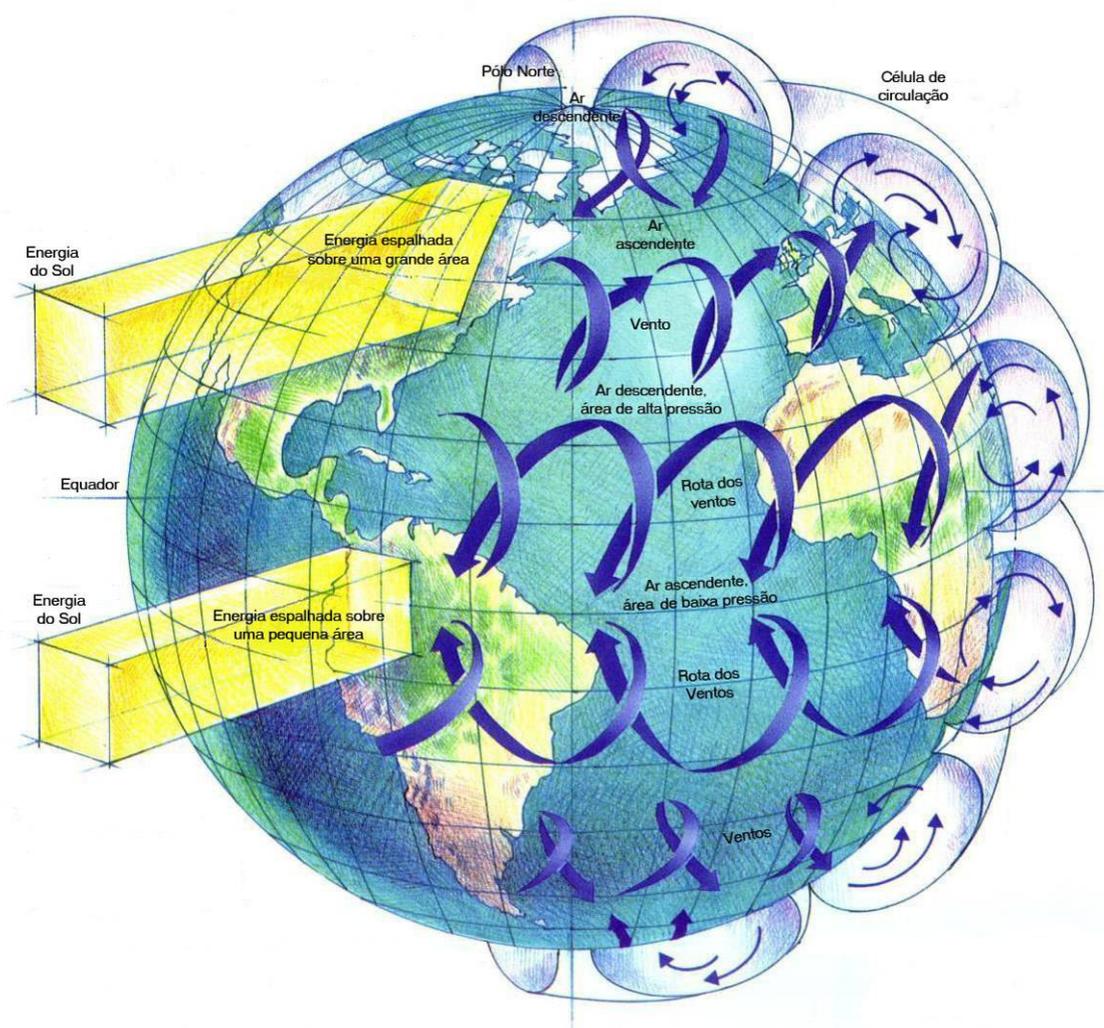
## 2 A METEOROLOGIA ATMOSFÉRICA

### 2.1 *Conceitos Gerais*

O processo de dispersão de poluentes é fortemente influenciado pelas condições meteorológicas da atmosfera. Mas para entendermos como funciona este processo, precisamos conhecer a física atmosférica. Muitos cientistas comparam a nossa atmosfera como um motor à combustão. A este mecanismo chamamos de *motor atmosférico*: há uma contínua expansão e compressão dos gases e trocas de calor. O Sol, o combustível de todo esse mecanismo, aquece de maneira desigual o globo terrestre, entre o equador e os pólos, provocando o mecanismo inicial da circulação da atmosfera da Terra. A rotação da Terra, em conjunto com as diferenças de condutividade térmica entre os continentes e os oceanos, gera o fenômeno que chamamos de clima (Davis e Cornwell, 2000).

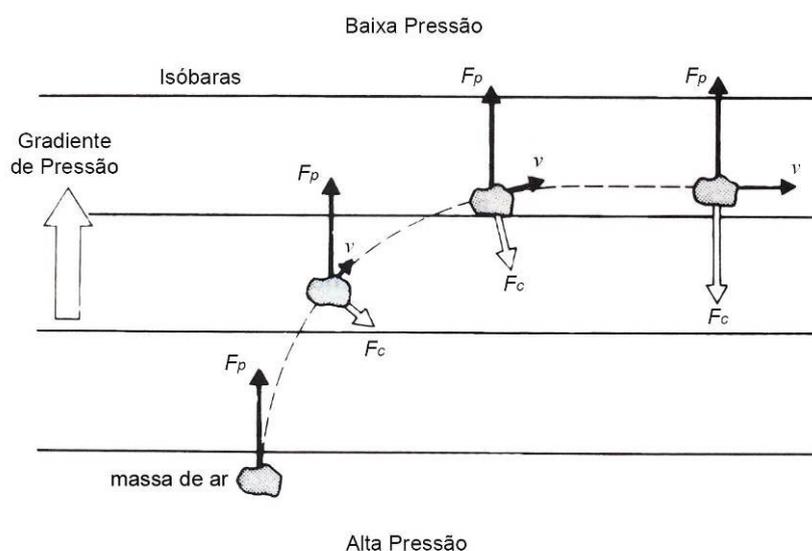
Todos estes processos acontecem no que é denominado *Camada Limite Atmosférica*, uma camada superficial que possui, geralmente, uma altura de 100 a 3000 m na Troposfera. Esta camada é dominada pelos processos de transporte e caracteriza o clima em cada região do globo terrestre.

Segundo Spurr (1978), o sistema geral de escoamento de ar na atmosfera é produzido pelos sistemas de temperatura e, principalmente, de pressão. As velocidades e as direções dos ventos são determinadas pela posição, intensidade e movimento destes sistemas. O princípio de movimentação destes sistemas parte de um conceito básico em Mecânica dos Fluidos, onde um fluido somente se movimenta se há um gradiente de pressão, ou seja, de uma zona de alta pressão para a uma zona de baixa pressão, ou um diferencial de temperatura. Se desenharmos o mapa climático da Terra, veremos zonas de alta pressão e zonas de baixa pressão, bem como diferenciais de temperatura devido à diferença de incidência do Sol sobre a Terra. Este sistema governa a movimentação das grandes massas de ar da atmosfera (figura 2.1).



**Figura 2.1 - Ilustração das principais características da dinâmica atmosférica (Ramsay, 1992).**

Se neste mapa climático desenharmos linhas de igual pressão (*isóbaras*), o vento atmosférico se movimentaria na direção perpendicular a estas linhas. Porém, devido à rotação terrestre, há uma força que provoca um desvio da direção do vento com relação às isóbaras, que aumenta à medida que nos dirigimos aos pólos (figura 2.2). Esta força é chamada de Força de Coriolis. Desse modo, o vento circula de zonas de alta pressão a zonas de baixa pressão, e devido a esta força provocada pela rotação terrestre, geram-se sistemas ciclônicos (ligadas ao mau tempo, zonas de baixa pressão) e anticiclônicos (ligadas ao bom tempo, zonas de alta pressão). Os sistemas ciclônicos e anticiclônicos possuem sentidos de giros diferentes entre o hemisfério norte e sul.



**Figura 2.2 - Forças da atmosfera que agem sobre a direção do vento e das massas de ar (Zannetti, 1990).**

A velocidade do vento é determinada pelas isóbaras. Quando as linhas de pressões iguais estão muito juntas, o gradiente de pressão é excessivo e a velocidade do vento é elevada. Se as isóbaras estão afastadas, a velocidade do vento é baixa ou praticamente inexistente.

## 2.2 Estabilidade Atmosférica

Para entendermos o mecanismo de funcionamento da estabilidade atmosférica, devemos entender o conceito de pacote de ar (Seinfeld, 1986 *apud* Lora, 2002):

- a) Pacote de ar se caracteriza por uma massa de ar que pode se deformar durante a sua movimentação vertical na atmosfera.
- b) O pacote possui uma dimensão suficientemente grande que permite considerar que a troca de moléculas por sua fronteira é pequena em comparação ao total de moléculas do pacote.
- c) Com a elevação da massa de ar, esta se expande por causa da diminuição da pressão com a altitude e a temperatura do pacote cai.
- d) O pacote de ar não pode trocar propriedades e massa com o ar que está fora do pacote.

Dessa maneira, o processo de mistura vertical na atmosfera deve ser imaginado como uma grande quantidade de pacotes descendo e subindo. A relação da temperatura deste pacote com relação à temperatura ambiente determinará se a massa de ar subirá, descerá ou ficará retida. O gradiente de temperatura da atmosfera é o fator determinante no processo de dispersão de poluentes.

Segundo Davis e Cornwell (1998), a estabilidade atmosférica é a tendência da atmosfera de impedir ou acelerar o movimento vertical de um pacote de ar. A estabilidade atmosférica é que determinará o processo de elevação vertical da pluma de contaminantes. Para isto, é necessário o uso de alguns conceitos que caracterizam os processos físicos da atmosfera:

- **Gradiente térmico adiabático para o ar seco ( $\Gamma_d$ ):** é a taxa de resfriamento do pacote de ar com a sua elevação. Este resfriamento se deve à diminuição da pressão e expansão do pacote de ar com a altitude. O valor médio da taxa de resfriamento é de aproximadamente 10 °C/km.
- **Gradiente térmico adiabático para o ar úmido ( $\Gamma_m$ ):** é a taxa de resfriamento do pacote de ar úmido à medida que se eleva na atmosfera. A liberação de calor latente do pacote de ar úmido, causando o seu resfriamento e a perda de vapor de água (condensação), acontece de forma mais lenta do que um pacote de ar seco. O valor do gradiente térmico adiabático para o ar úmido depende da pressão atmosférica, da temperatura do ar e da pressão de saturação do vapor de água, ficando próximo de 6 °C/km.
- **Gradiente térmico do ambiente ( $\Gamma_e$ ):** é a taxa de decréscimo da temperatura da atmosfera com a altura. Este gradiente é responsável pela elevação ou não do pacote de ar.
- **Temperatura potencial ( $\theta$ ):** é a temperatura que um pacote de ar teria se partisse adiabaticamente de uma pressão padrão de referência,  $p_0$ , normalmente de 1 bar. A equação da temperatura potencial é usualmente dada por:

$$\theta = T \left( \frac{p_0}{p} \right)^{\frac{R}{c_p}}, \quad (2.1)$$

onde  $T$  é a temperatura do pacote, em [°C];  $c_p$  é o calor específico do ar a pressão constante, em [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>]; e  $R$  é a constante dos gases para o ar seco, em [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>].

Os gradientes térmicos indicam de que maneira está a estabilidade atmosférica. Dependendo da maneira como se apresentam as curvas dos gradientes térmicos na atmosfera, podemos dividir a estabilidade atmosférica em *neutra*, *instável* e *estável*.

### 2.2.1 Atmosfera Neutra

A atmosfera neutra (figura 2.3) acontece quando a taxa de decréscimo da temperatura de pacote de ar que se expande adiabaticamente (sem adição ou perda de calor), quando se eleva na atmosfera, é igual a taxa de decréscimo da temperatura da atmosfera. A taxa de diminuição da temperatura  $dT$  do pacote com a altitude  $dz$  é definida por:

$$\Gamma_d = \frac{dT}{dz}, \quad (2.2)$$

sendo  $\Gamma_d$  denominado de *gradiente térmico adiabático* para o ar seco, explicado anteriormente. Este valor é de aproximadamente  $-1$  °C/100 m. Desse modo, se a taxa de decréscimo de temperatura do ambiente com a altitude  $\Gamma_e$  é igual à taxa de perda adiabática  $\Gamma_d$ , a atmosfera está em condições de estabilidade neutra.

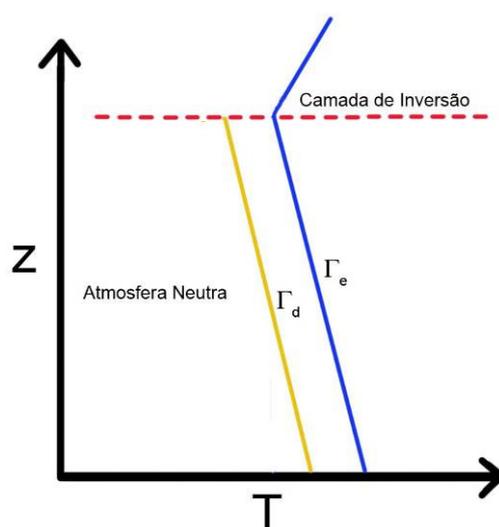


Figura 2.3 - Gradiente de temperatura para uma atmosfera neutra (Ramsay, 1992).

### 2.2.2 Atmosfera Instável

Quando a taxa de decaimento da temperatura atmosférica é maior do que a taxa de perda adiabática  $\Gamma_d$ , a taxa de perda é dita como *superadiabática* e a atmosfera é dita como instável (figura 2.4). Desse modo, se a temperatura do pacote de ar for maior do que a temperatura ambiente, continuará se elevando sem qualquer esforço mecânico. Se o pacote de ar tiver uma temperatura menor do que a temperatura ambiente, pois a taxa de decaimento da temperatura atmosférica é menor do que  $\Gamma_d$ ; este tenderá a descer em direção ao solo.

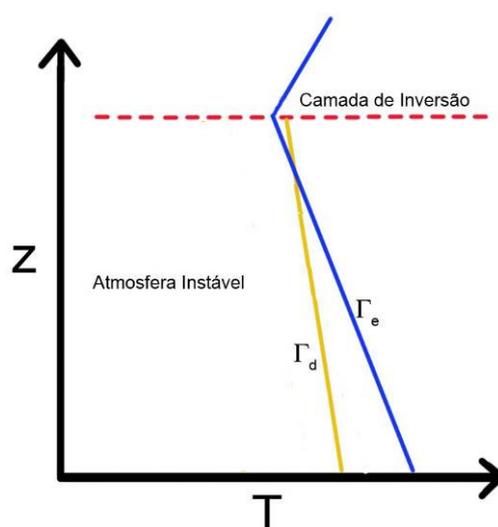


Figura 2.4 - Gradiente de temperatura para uma atmosfera instável (Ramsay, 1992).

### 2.2.3 Atmosfera Estável

Ao contrário da atmosfera instável, o gradiente de decaimento da temperatura da atmosfera é menor do que  $\Gamma_d$ . Esta situação é chamada de *subadiabático* e a atmosfera é dita estável (figura 2.5). Desse modo, há pouca ou não há elevação de uma pluma de contaminantes na atmosfera, pois a taxa de decréscimo de temperatura da pluma é maior que a da atmosfera.

Segundo Davis e Cornwell (1998), há dois casos especiais de taxa de decaimento subadiabático. Quando não há mudança da temperatura com a elevação, chamamos essa taxa de *isotérmico*. Quando a temperatura aumenta com a elevação, chamamos esse caso de *inversão*. A inversão é a pior situação do perfil de temperatura estável, pois frequentemente esta situação está relacionada com os episódios de poluição atmosférica.

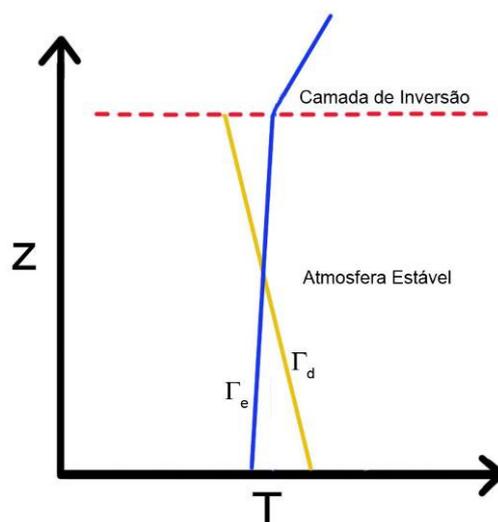


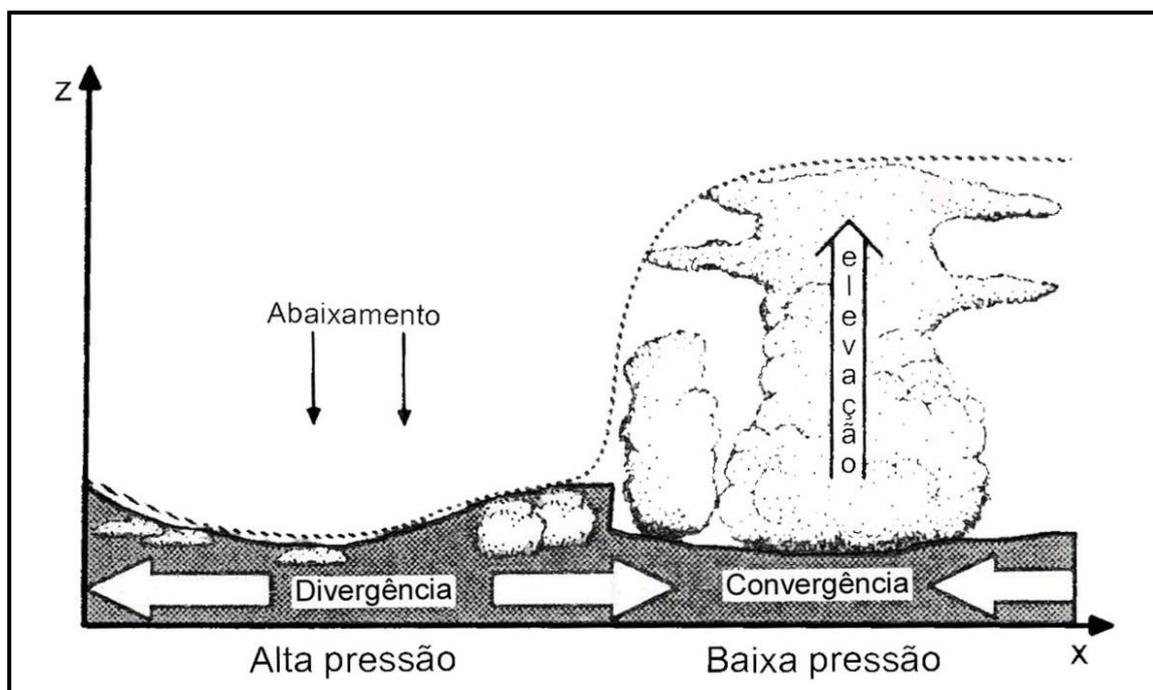
Figura 2.5 - Gradiente de temperatura para uma atmosfera estável (Ramsay, 1992).

### 2.3 Camada Limite Atmosférica

A camada atmosférica onde vivemos, a troposfera, se estende desde o nível da superfície da Terra até a uma altitude de 11 km. Porém, uma pequena parcela desta camada, de poucos quilômetros, é influenciada pela superfície do planeta. Desse modo, a Camada Limite Atmosférica pode ser definida como uma parte da troposfera, que é diretamente influenciada pela superfície da Terra, e responde a estes forçantes superficiais com escalas de tempo de uma hora ou menos (Stull, 1988). Estes forçantes são arrasto por fricção, evaporação e transpiração, transferência de calor, emissão de poluentes e a rugosidade do terreno. A espessura da camada limite é denominada de *altura gradiente* ( $z_g$ ).

Em função da variabilidade destas forças superficiais, a estrutura da camada limite é variável no tempo e espaço, podendo ter uma espessura de poucas centenas de metros até quilômetros. Sobre os continentes, a espessura da camada limite é mais suscetível à variabilidade dos forçantes superficiais. Nos oceanos, a grande capacidade térmica da água de absorver calor, provocando uma baixíssima variação da temperatura superficial, ocasiona leves variações da espessura da camada limite. As mudanças na espessura, em torno de 10% da altura total, são causadas por processos de movimentação vertical e advecção (processo de transferência de energia por movimentação horizontal) pela passagem de diferentes massas de ar sobre os oceanos.

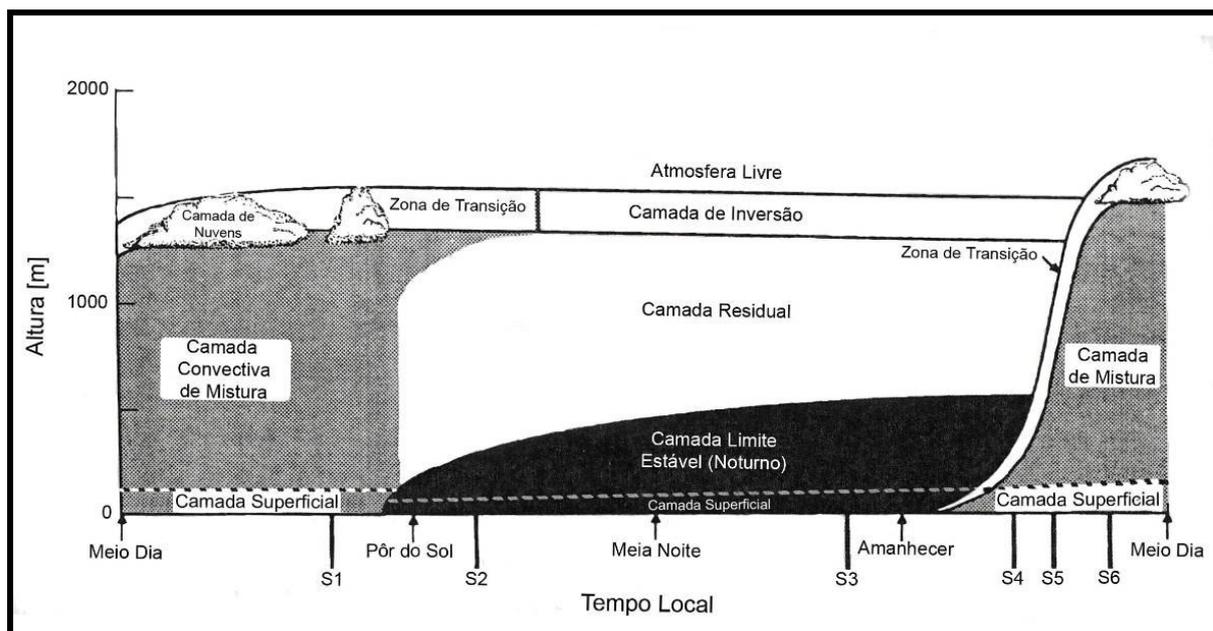
Nas regiões de alta pressão, há um abaixamento da camada limite provocado pelas altas pressões atmosféricas sobre ar, provocando uma movimentação do ar para baixo, surgindo fluxo divergente das zonas de alta pressão para as de baixa pressão. Já nas regiões de baixa pressão, há uma movimentação do ar até a grandes altitudes da troposfera, dificultando a definição da espessura da camada limite (figura 2.6). Nestes casos, os estudos feitos pelos meteorologistas param na base das nuvens.



**Figura 2.6 - Esquema mostrando as características das regiões de alta e baixa pressão na camada limite atmosférica (Stull, 1988).**

Podemos dividir a camada limite atmosférica em regiões bem definidas, de acordo com suas características: camada superficial, camada de mistura, camada residual e camada limite estável (figura 2.7).

A camada de mistura é caracterizada pelo domínio do mecanismo convectivo. No topo desta camada, há ventos cisalhantes que contribuem para a geração da turbulência. Esta, por sua vez, tende a misturar uniformemente o calor, a umidade e o momentum na vertical. Para emissões de poluentes de uma chaminé, a pluma tende a ter um comportamento em forma de *looping*, à medida que a emissão sobe verticalmente. No topo desta camada, há uma inversão térmica que funciona como uma tampa, impedindo a continuação da subida das correntes de ar, vapor e poluentes.



**Figura 2.7 - Ilustração mostrando as subcamadas existentes na camada limite atmosférica (Stull, 1988).**

A camada residual se forma antes do pôr-do-sol, e é caracterizada pela pausa da transferência de calor a camada de mistura, ausência da advecção e decaimento da turbulência. As emissões na camada residual tendem a se dispersar de modo igual na direção vertical e lateral, onde a pluma tende ao formato de um cone.

A camada limite estável é a porção mais baixa da camada residual. Formada durante a noite, quando a camada de mistura entra em contato com o solo, esta camada tem como característica a estabilidade do ar com turbulência esporádica e muito fraca. Na presença do fenômeno de *jatos noturnos*, os ventos podem acelerar aumentando as tensões de cisalhamento e gerando turbulência. A dispersão de poluentes nesta camada é muito pequena na vertical, dispersando mais rapidamente na horizontal. Este fenômeno é chamado de confinamento (*fanning*), e isto ocorre devido à taxa de aumento da temperatura ambiente com a altitude, impedindo a elevação da pluma.

Outra característica importante da camada limite atmosférica é a transferência da quantidade de movimento, dada pelas tensões aparentes de Reynolds ou tensões turbulentas:  $-\rho_{ar} \overline{u w}$ . Dessa forma, podemos dividir a camada limite em duas regiões em função destas tensões: a camada superficial e a camada de Ekman.

A camada superficial é a região próxima da superfície da camada limite atmosférica, correspondente a 1/10 da altura total da camada limite atmosférica. Nesta camada, os fluxos

turbulentos e as tensões de cisalhamento variam menos do que 10%. Dentro desta, há uma fina camada denominada microcamada ou camada interfacial onde o transporte molecular domina frente ao turbulento. A espessura desta fina camada é chamada de *deslocamento do plano zero* e notada por  $z_d$ . Em regiões urbanas com áreas densamente edificadas, o deslocamento do plano zero será a altura média dos edifícios, pois se criam entre eles zonas de estagnação e, neste caso, a difusão molecular domina. Em campo aberto,  $z_d$  não é significativo.

A camada de Ekman apresenta um decréscimo das tensões turbulentas com a altitude, e chega ao valor zero na altura gradiente  $z_g$ . As forças de Coriolis e as forças de pressão estão presentes nesta camada.

Na altura de deslocamento do plano zero as tensões de Reynolds são máximas, ou seja,  $-\rho_{ar} \overline{u w_{max}}$ . A tensão de cisalhamento,

$$\tau_o = \rho_{ar} u_*^2 = \rho_{ar} \overline{u w_{max}}, \quad (2.3)$$

é transmitida através da microcamada. As tensões de Reynolds ou tensões turbulentas são responsáveis pela formação do perfil de velocidades presente na camada limite atmosférica.

### 2.3.1 Radiação Solar e Fluxo de Calor da Superfície

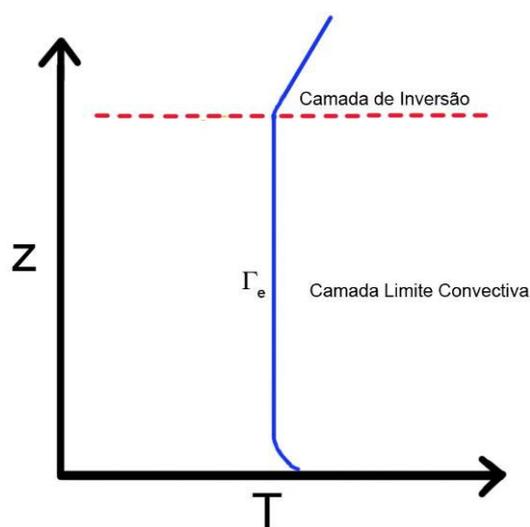
De toda radiação solar que entra na atmosfera, uma parcela é refletida de volta ao espaço pelas nuvens e pela superfície da Terra. Outra parte, é absorvida pela atmosfera. O restante da radiação, não absorvida ou refletida, chega à superfície terrestre e esta a absorve, liberando-a novamente para a atmosfera na forma de radiação infravermelha, fluxo de calor sensível e latente.

Esta energia absorvida na superfície terrestre necessita de um mecanismo que torne possível o seu transporte para a atmosfera. Este mecanismo é a mistura turbulenta. Desse modo, quando o ar escoia sobre uma superfície que é mais quente, em dias quentes no verão, o fluxo de calor é positivo ( $\langle \theta' w' \rangle > 0$ ), onde o calor é movido para a atmosfera através empuxos que produzem turbulência. Em dias frios, quando há perda de energia da superfície, o escoamento do ar transfere calor para a superfície ( $\langle \theta' w' \rangle < 0$ ). Estes mecanismos de transferência de calor caracterizam todo o perfil vertical de temperaturas da camada limite atmosférica, além da produção ou supressão da turbulência.

### 2.3.2 Camada Limite Convectiva

A camada limite convectiva ocorre nas situações onde há uma carga de energia solar significativa sobre a superfície terrestre. Caracteriza-se por uma camada limite de mistura que pode chegar a um quilômetro de altura gradiente. O perfil de temperatura desta camada possui várias características. Uma delas é o gradiente superadiabático próximo à superfície (figura 2.8). Esta camada é instável e marcada pelas tensões de cisalhamento e empuxo que geram a turbulência, mecanismo que move o calor sensível liberado pela superfície. No topo da camada convectiva, há uma inversão térmica conhecida como “tampão”, que impede a subida de qualquer pacote de ar. Esta região é caracterizada pelo aumento do perfil de temperatura potencial e pelo fim da turbulência.

Entre o perfil superadiabático, próximo à superfície, e a inversão térmica, no topo da camada, o perfil de temperatura potencial permanece constante. Esta característica é devido à forte turbulência que torna a temperatura da camada limite constante. O forte transporte turbulento desta região auxilia no transporte e diluição das concentrações de poluentes.



**Figura 2.8 - Gradiente da temperatura potencial na camada limite convectiva.  
(Ramsay, 1992)**

### 2.3.3 Camada Limite Neutra

A camada limite neutra é caracterizada pelo perfil constante de temperatura potencial que se estende até a inversão térmica, no topo da camada. Muito da turbulência existente situa-se na camada de mistura, porém, diferente da camada limite convectiva, a turbulência é gerada somente por tensões de cisalhamento. Esta camada forma-se em dias de sol fraco, ou geralmente, na transição de períodos de forte aquecimento para resfriamento da temperatura, ou ao amanhecer e ao entardecer.

A altura da camada limite, em metros, pode ser estimada por:

$$z_i \cong h = A \frac{u_*}{f}, \quad (2.4)$$

sendo  $A$  uma constante que varia entre 0,15 e 0,25. A velocidade de fricção ou de cisalhamento  $u_*$  [m/s] e o parâmetro de Coriolis  $f$  [ $s^{-1}$ ] podem ser definidos por:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}, \quad (2.5)$$

$$f = 2\Omega \sin \phi, \quad (2.6)$$

sendo  $\tau_0$  a tensão superficial, em N;  $\rho$  é a massa específica do ar, em  $kg/m^3$ ;  $\Omega$  é a velocidade de rotação da Terra ( $7,29 \times 10^{-5} s^{-1}$ ); e  $\phi$  é a latitude. Segundo Blessmann (1995), a velocidade de fricção depende da rugosidade superficial e da velocidade média do vento. A tensão na superfície  $\tau_0$  é o valor ao nível do solo do módulo do tensor de tensões de Reynolds horizontal  $\tau$ , definido por:

$$\tau(z) = K_m \rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}, \quad (2.7)$$

onde  $K_m$  é a viscosidade turbulenta [ $kg/(m.s)$ ] e  $\bar{u}$  é a média do vetor velocidade do vento horizontal.

### 2.3.4 Camada Limite Instável

Para a dispersão de poluentes, a camada limite instável é a melhor situação. É caracterizada principalmente pela forte turbulência e queda da temperatura potencial com a altitude (gradiente térmico ambiente negativo). Geralmente, esta camada forma-se em dias de baixa pressão atmosférica (mau tempo) e a camada limite atinge uma altura gradiente de alguns quilômetros. Devido à dificuldade em calcular a altura gradiente, os meteorologistas usam a base das nuvens como limite desta camada.

Como a altura da camada limite (também chamada de altura de inversão elevada mais baixa) em condições instáveis não é conhecida, uma equação para a variação da altura com o tempo,  $h(t)$ , é dada por:

$$\gamma_d - \gamma_a = \frac{\Delta T_0}{h(t)}, \quad (2.8)$$

onde  $\gamma_d$  é a taxa de declínio adiabático do ar seco ( $\gamma_d = 9,86 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C/m}$ ),  $\gamma_a$  é a taxa de declínio atmosférico ao nascer do Sol, em  $^\circ\text{C/m}$ , ou seja:

$$\gamma_a = -\frac{\partial T}{\partial z}, \quad (2.9)$$

e  $\Delta T_0$  é temperatura, em  $^\circ\text{C}$ , de aumento da superfície entre o tempo  $t_0$  (nascer do Sol) e  $t$  [s].

A equação da conservação de energia de calor é dada por:

$$\int_{t_0}^t q_c dt = \frac{c_p h(t) \Delta T_0}{2}, \quad (2.10)$$

onde  $q_c$  é o fluxo de calor da superfície, em  $\text{W/m}^2$ ,  $c_p$  é calor específico à pressão constante, em  $\text{J}/(\text{kg K})$ . Combinando as equações acima, obtém-se:

$$h(t) = \left( \frac{2 \int_{t_0}^t H dt}{c_p \rho (\gamma_d - \gamma)} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.11)$$

### 2.3.5 Camada Limite Estável

A camada limite estável é a situação mais problemática quando nos referimos a dispersão atmosférica. Devido à pequena espessura da camada de mistura, não há uma dispersão efetiva das concentrações de contaminantes e ajudado pela fraca turbulência atmosférica ocasiona o que chamamos de episódios de poluição (altas concentrações de poluentes). A camada limite estável é formada pelo escoamento de calor negativo na superfície por um longo período de tempo, tais como a baixa radiação de energia solar na atmosfera.

Uma equação para medir a espessura da camada limite estável é dada por Zilitinkevich (Zannetti, 1990):

$$h_{eq} = B \sqrt{\frac{u_*}{f}} L, \quad (2.12)$$

onde  $B \cong 0,4$ .

## 2.4 Turbulência

A turbulência atmosférica é um dos principais mecanismos responsável pelo transporte e dispersão de misturas, transferência de calor e de quantidade de movimento através da camada limite.

A turbulência é formada por dois mecanismos: cisalhamento e empuxo. O movimento turbulento é gerado pela movimentação do escoamento onde as tensões de cisalhamento, que surgem no escoamento, geram estruturas de ondas coerentes que se tornam instáveis dinamicamente em movimentos turbulentos aleatórios (Ramsay, 1992).

Devido à complexidade do fenômeno, há muitos conceitos para definir o que é turbulência. Para Moraes e Acevedo (2005), turbulência é um processo físico que é formado a partir de perturbações das partículas do fluido, que são amplificadas exponencialmente devido a instabilidades dinâmicas do escoamento. Lesieur (1995) define que um escoamento turbulento é um escoamento que é desordenado no tempo e no espaço e, devido a sua dinâmica, ele pode ser tridimensional ou algumas vezes quase-bidimensional, podendo exibir estruturas bem organizadas ou o contrário. Os turbilhões gerados da instabilidade dinâmica do

escoamento possuem faixas de comprimento que vão de poucos milímetros até a espessura da camada limite.

A turbulência atmosférica pode ser convectiva ou mecânica. A turbulência convectiva é provocada pelas variações da incidência de calor solar sobre a superfície terrestre e depende da estabilidade térmica atmosférica. Para este caso, a turbulência será máxima em um dia ensolarado à tarde e será mínima à noite ou ao amanhecer. A turbulência mecânica é formada pelo movimento do ar em contato com a superfície terrestre, e quanto maior a rugosidade do terreno, maior será a turbulência gerada.

De acordo com Möller e Silvestrini (2004), ainda não há uma definição precisa para turbulência, assim há um consenso de defini-la a partir de suas características. Tennekes e Lumley (1972), lista algumas das características do fluxo turbulento:

- **Irregularidade:** caracteriza a falta de um padrão determinado, necessitando uma aproximação por métodos estatísticos aos problemas impossíveis de turbulência.
- **Difusividade:** é a capacidade que a turbulência tem de causar rápidas misturas e o aumento da taxa de transferência de momentum, calor e massa.
- **Altos números de Reynolds:** um fluxo turbulento sempre ocorre a altos números de Reynolds. A turbulência surge de uma instabilidade do fluxo laminar, causadas pela viscosidade e inércia do fluido.
- **Flutuações de vorticidade tridimensionais:** a turbulência é rotacional e tridimensional, caracterizada por altos níveis de flutuação da vorticidade. Desse modo, as flutuações de vorticidade não podem ser determinadas se considerar a flutuação da velocidade em um campo bidimensional.
- **Dissipação:** um fluxo turbulento é sempre dissipativo. As tensões de cisalhamento viscosas são responsáveis por dissipar a energia cinética da turbulência.
- **Contínuo:** a turbulência é um fenômeno contínuo e é governada pelas equações da Mecânica dos Fluidos. A menor escala da turbulência é muito maior que a escala molecular.
- **Escoamentos turbulentos são escoamentos:** a turbulência não é uma propriedade do fluido, mas sim uma característica do escoamento.

Das características listadas acima, uma das mais importantes é a propriedade do escoamento turbulento de misturar e dispersar gases e partículas na atmosfera mais rapidamente do que a difusão molecular (Lesieur, 1995). Esta propriedade é muito importante em várias aplicações da engenharia, como a simulação do transporte de gases poluentes, transferência de calor e quantidade de movimento.

### 2.4.1 A Decomposição de Reynolds

Uma das ferramentas utilizadas para o estudo da turbulência é o que se denomina *decomposição de Reynolds*. Este procedimento consiste em decompor uma variável escalar ou vetorial em uma parte média e uma parte flutuante, sempre que a média temporal seja constante (Ramsay, 1992). O objetivo deste método é desenvolver equações para trabalhar com os valores médios das variáveis e não com os valores exatos (Moraes e Acevedo, 2005). Para velocidade do vento na direção x, definimos a parte média e a parte flutuante por:

$$u = \bar{u} + u', \quad (2.13)$$

onde  $\bar{u}$  é a parte média e  $u'$  é a parte flutuante. Considerando que u, v e w são as componentes da velocidade do vento nas direções x, y e z,  $\theta$  a temperatura potencial e c seja algum escalar de concentração, com a decomposição de Reynolds tem-se:

$$v = \bar{v} + v', \quad (2.14)$$

$$w = \bar{w} + w', \quad (2.15)$$

$$\theta = \bar{\theta} + \theta', \quad (2.16)$$

$$c = \bar{c} + c'. \quad (2.17)$$

A decomposição de Reynolds tem como função observar uma série temporal de uma variável e desenvolver equações de evolução em função do termo médio relacionadas ao transporte de momentum, energia e massa através da camada limite atmosférica (Möller e Silvestrini, 2004).

### 2.4.2 Intensidade da Turbulência

A intensidade da turbulência é uma medida adimensional da energia cinética existente em cada componente das flutuações de velocidade (Blessmann, 1995). Para o estudo deste fenômeno, é necessário o uso de alguns parâmetros listados abaixo.

A velocidade média do vento pode ser dada pela equação abaixo:

$$\bar{u}(z) = \frac{1}{T} \int_0^T u(z;t) dt . \quad (2.18)$$

O valor quadrado médio é a média do quadrado do valor da velocidade:

$$\overline{u^2}(z) = \frac{1}{T} \int_0^T u^2(z;t) dt , \quad (2.19)$$

Já a variância é a média do quadrado das flutuações da velocidade do vento:

$$\sigma_u^2(z) = \frac{1}{T} \int_0^T u'^2(z;t) dt , \quad (2.20)$$

De acordo com Blessmann (1995), o valor médio quadrático e a variância coincidem quando são consideradas somente as flutuações em torno da velocidade média.

A raiz quadrada positiva da variância, o desvio-padrão, pode ser obtido por:

$$\sigma_u(z) = \sqrt{\langle u'^2(z;t) \rangle} . \quad (2.21)$$

O valor **rms** (*root mean square*) ou media quadrática é a raiz quadrada positiva do valor médio quadrático. O desvio-padrão é igual ao valor rms quando são apenas estudadas as flutuações em torno do valor médio da velocidade.

A intensidade da turbulência é obtida dividindo-se o desvio-padrão das flutuações, neste caso o valor rms, pela velocidade média de referência. A intensidade da turbulência pode ser dividida em intensidade local da turbulência e intensidade normalizada da turbulência. A intensidade local é obtida usando-se a velocidade média do ponto onde foi obtido o desvio-padrão:

$$I_L = \frac{\sigma_i(r)}{u(r)}. \quad (2.22)$$

A intensidade normalizada da turbulência é obtida pelo quociente entre o desvio-padrão das flutuações e uma velocidade média de referência:

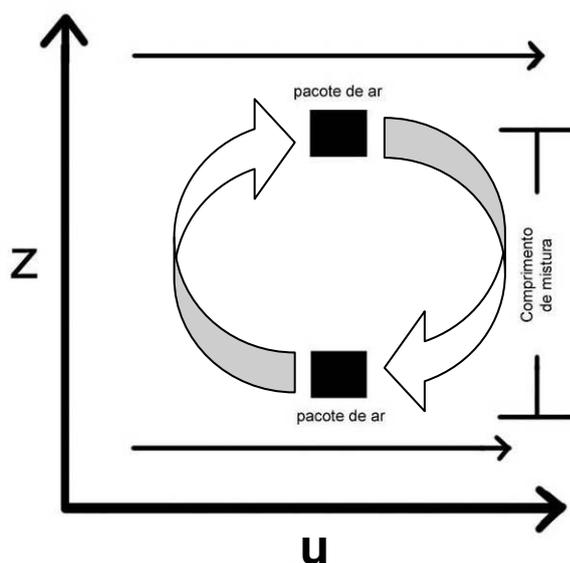
$$I_N = \frac{\sigma_i(r)}{u_{ref}}. \quad (2.23)$$

Para a simulação correta em túnel de vento, é necessário conhecer as propriedades da turbulência. A intensidade da turbulência, umas destas propriedades, é de especial interesse, pois caracteriza o tipo de terreno utilizado para simular o perfil de velocidades do vento na camada limite. A teoria estatística da turbulência é o método mais usado para o estudo dessas propriedades, utilizando-se os seguintes critérios (Blessmann, 1995):

- a distribuição de probabilidade de cada uma das três componentes das flutuações de velocidade, ou seja,  $u'$ ,  $v'$  e  $w'$  nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  respectivamente;
- a intensidade da turbulência de cada componente;
- as correlações espaciais das flutuações que determinam a macroescala da turbulência;
- o espectro de potência, que descreve a distribuição, em frequência, da energia cinética nas flutuações;
- o espectro cruzado.

## 2.5 Perfil de Velocidades do Vento

Com algumas características fundamentais da turbulência na camada limite atmosférica, podemos entender o formato do perfil médio de velocidades do vento. Para este entendimento devemos assumir que os turbilhões ou redemoinhos da turbulência transportarão verticalmente, a uma distância  $\ell$  (comprimento de mistura), pacotes de ar que possuem excesso de momentum para a parte inferior da camada limite e os pacotes que possuem déficit de momentum para a parte superior, como ilustrado na figura 2.9 (Ramsay, 1992).



**Figura 2.9 - Esquema das trocas de energia e de quantidade de movimento entre os pacotes de ar na camada limite (Ramsay, 1992).**

Próximo à superfície, a distância sobre a qual os pacotes de ar podem se misturar dependerá do comprimento de mistura da camada limite. Para o comprimento de mistura,  $\ell$ , assumimos que:

$$\ell \approx k \cdot Z, \quad (2.24)$$

$k$  neste caso é a constante de von Kàrmàn e  $Z$  é a altura da camada limite, em m.

Assumindo que as flutuações de velocidade nas direções  $x$  e  $z$ ,  $u'$  e  $w'$ , são proporcionais ao comprimento de mistura e ao gradiente vertical,

$$u', w' \sim \ell \frac{\partial u}{\partial z} \quad (2.25)$$

e que a quantidade de movimento ou momentum é representado pela correlação dos termos  $u'$  e  $w'$ , temos então,

$$\langle u'w' \rangle = k^2 z^2 \left\{ \frac{\partial u}{\partial z} \right\}^2, \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\langle u'w' \rangle^{\frac{1}{2}}}{k z}. \quad (2.27)$$

Integrando a equação (2.26) obtemos:

$$u(z) = \frac{\langle u'w' \rangle^{\frac{1}{2}}}{k} \{ \ln(z) - \ln(z_0) \}, \quad (2.28)$$

onde  $z_0$  é referido como a altura da rugosidade ou rugosidade aerodinâmica. Desse modo, temos abaixo a equação para o perfil médio de velocidades do vento próximo à superfície:

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right), \quad (2.29)$$

ou

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln \left( \frac{z + z_0}{z_0} \right). \quad (2.30)$$

A equação (2.30) é mais comumente utilizada, pois para valores menores do que  $z_0$  a equação (2.29) possui valores de velocidade do vento negativos. Na equação acima,  $k$  é a constante de von Kàrmàn ( $k = 0,4$ ) e o termo  $u_*$ , trocado com o termo  $\langle u'w' \rangle^{1/2}$ , denomina-se *velocidade de fricção*. Este parâmetro depende da rugosidade superficial e da velocidade média do vento.

A equação (2.30) é chamada de *lei logarítmica* para o perfil de velocidades médias do vento. Esta equação aplica-se muito bem no perfil de velocidades na camada superficial da camada limite atmosférica, porém na camada de Ekman, e para camadas superiores, seu ajuste é pobre (Loredo-Souza *et al.*, 2004). Além da lei logarítmica, há outra forma de representar o perfil de velocidades que é a chamada *lei potencial*,

$$\frac{\bar{u}(z)}{\bar{u}(z_{ref})} = \left( \frac{z}{z_{ref}} \right)^p, \quad (2.31)$$

relacionando as velocidades médias entre uma altura qualquer e uma de referência, que costuma ser a altura gradiente,  $z_g$ , ou uma altura de 10 m (Blessmann, 1995). A lei de potências representa muito bem a camada limite atmosférica com exceção de regiões muito próximas à superfície. O expoente  $p$  representa o tipo de terreno em que está sendo feita a simulação, variando de 0,11, para superfícies lisas como mar e lagos, a 0,34, para zonas urbanas densas com grande quantidade de prédios altos. Apesar de ser amplamente utilizada, esta lei possui alguns problemas como o não reconhecimento do topo da camada limite, onde a velocidade aumenta continuamente; o modelo não tem uma justificativa teórica para seu uso; e não apresenta um bom ajuste para o perfil de vento formado na camada superficial, representando bem somente a camada de Ekman.

Na Engenharia do Vento, os dois perfis de velocidade média do vento – lei de potências e a lei logarítmica – são comumente usados para a simulação das tensões turbulentas, provocados pelos efeitos de rugosidade do terreno, em túnel de vento de camada limite (Loredo-Souza *et al.*, 2004).

### 3 DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Nas plantas industriais, onde há a queima de compostos que sejam combustíveis ou nos processos de fabricação de certos produtos, os gases gerados são imediatamente emitidos para a atmosfera. O dispositivo emissor geralmente se dá por meio de uma ou várias chaminés. O dimensionamento desses dispositivos requer conhecimento da física atmosférica da região e das características do terreno no entorno. O entendimento destes requisitos influenciará diretamente no comportamento da pluma e no grau de contaminação do ambiente. Há vários modelos analíticos de dispersão de poluentes que simulam o processo de dispersão e que dimensionam a geometria da chaminé. Desse modo, é de grande importância ter o conhecimento de todos os processos que comandam o processo de dispersão na atmosfera.

Uma chaminé de uma indústria qualquer emite na atmosfera gases e material particulado. Quanto mais a sotavento da fonte for levada esta pluma de contaminantes, maior será sua diluição no ar, dependendo, é claro, das condições atmosféricas. O processo de dispersão pode ser sintetizado com a descrição de três fases do comportamento de uma pluma:

1. Muito próximo do ponto onde foi emitida, a pluma pode ser afetada por efeitos aerodinâmicos criados pela chaminé, pelas construções vizinhas e pela irregularidade do terreno.
2. Devido ao empuxo e ao momentum vertical inicial, o crescimento da pluma é relativo à velocidade média do vento.
3. A diluição final dos poluentes emitidos dependerá do grau de turbulência atmosférica.

#### ***3.1 O Processo de Dispersão de Efluentes na Atmosfera***

A dispersão de gases na atmosfera é causada, resumidamente, por três tipos de fonte:

- Fontes pontuais, como plumas emitidas por chaminés.
- Fontes em linha, como em rodovias que possuem tráfego contínuo.

- Fontes em área: quando há uma distribuição uniforme de fonte, como em cidades ou áreas urbanas.

Por evidenciar somente o comportamento da pluma emitida por uma chaminé isolada, o processo de dispersão atmosférica deste trabalho aborda somente o caso de fontes pontuais.

O caminho percorrido por uma pluma de uma chaminé na atmosfera exibe determinadas formas, que depende das condições de estabilidade atmosférica e das características do terreno. A figura 3.1 abaixo mostra alguns casos típicos do comportamento da pluma, de acordo com o perfil de temperatura ambiente.

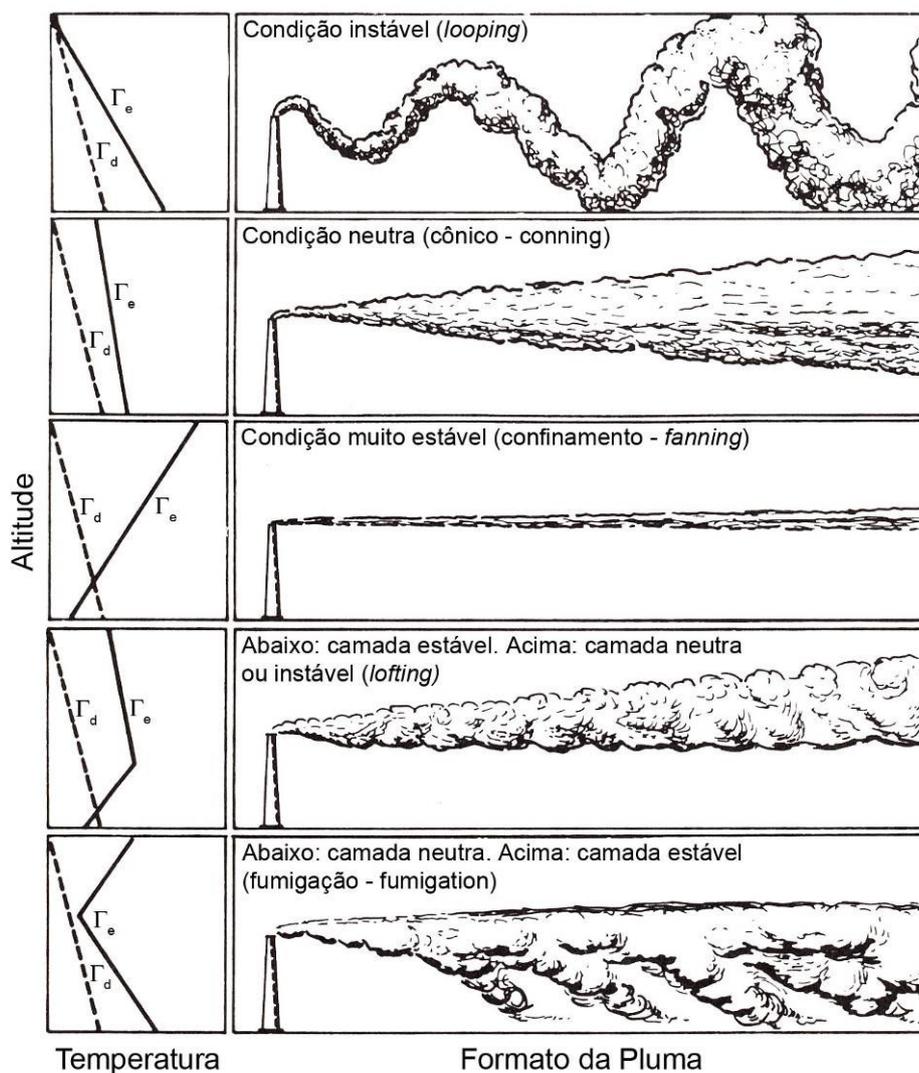


Figura 3.1 - Configuração dos tipos de pluma de acordo com a estabilidade atmosférica (Zannetti, 1990).

Para estimar a estabilidade atmosférica, utiliza-se a equação do gradiente de temperatura potencial:

$$\frac{d\theta}{dz} = \frac{dT}{dz} + 0,01. \quad (3.1)$$

Desse modo, quando  $d\theta/dz < 0$  dizemos que a atmosfera está em estabilidade instável, para  $d\theta/dz > 0$  está estável e  $d\theta/dz = 0$  neutra.

Os poluentes gasosos podem ser expressos em termos de concentrações volumétricas ou mássicas como ppm (partes por milhão) ou em massa por volume ( $\chi$ ), geralmente  $\text{g/m}^3$ . A equação que determina o volume ou massa de gás emitido por uma chaminé é dada abaixo:

$$P V = m \frac{\bar{R}}{M} T = n R T, \quad (3.2)$$

onde  $\bar{R}$  é a constante universal dos gases,  $R$  é a constante do gás poluente,  $m$  é a massa do gás,  $M$  é a massa molecular do poluente e  $n$  o número de moles do gás.

### ***3.2 Efeitos Aerodinâmicos das Construções e Irregularidades da Superfície***

Os efeitos de vizinhança e as características do terreno influenciam diretamente no processo de diluição das concentrações da pluma. Efeitos aerodinâmicos afetam localmente a dispersão da pluma. Por outro lado, a rugosidade do terreno influencia na diluição da pluma em termos de meso e macro escala.

Quando a velocidade de emissão de gases da chaminé é muito menor que a velocidade horizontal do vento, a pluma é dragada para baixo numa região de baixa pressão da esteira<sup>1</sup> da chaminé. Este fenômeno é conhecido como *downwash* aerodinâmico. Este fenômeno cessa quando a velocidade de emissão for duas vezes maior que a velocidade do vento

Na presença de grandes edificações próximas a uma chaminé, a pluma sofre uma distorção causada pela perturbação ao escoamento do ar devido à forma da edificação. A

pluma de contaminantes é carregada pela *esteira*<sup>1</sup> causada pelas edificações e os níveis de concentração de poluentes tornam-se elevados próximo ao solo. Desse modo, em 1932, foi recomendado que para qualquer projeto de chaminé, esta deveria pelos menos ter 2,5 vezes a altura das construções vizinhas (Parker, 1978).

Quando há irregularidades da superfície, uma indústria sofre maiores efeitos de *downwash* (queda da pluma) em vales profundos e a solução é estender a chaminé acima do topo do vale. No topo de colinas, a pluma é afetada por fortes ventos, sendo necessário que o projeto da chaminé assegure isso. Outro motivo é a passagem de um escoamento do ar quente por sobre uma colina, formando posteriormente uma camada com inversão térmica, se a temperatura do ar no vale for inferior.

### 3.3 Crescimento da Pluma

O crescimento da pluma é afetado pela inércia de descarga do gás e pelo seu empuxo (*buoyancy*). A inércia vertical está relacionada pela velocidade de saída do gás e sua massa. O empuxo está relacionado entre a massa do gás emitido e a massa do ar ambiente. Assim, aumentando a velocidade de saída do ou a temperatura do gás geralmente aumentará a elevação da pluma. A elevação da pluma relacionada à altura física da chaminé é chamada de *altura efetiva da chaminé*.

O cálculo de elevação da pluma dependerá da temperatura do gás emitido, do momentum inicial, da velocidade do vento na altura da pluma, da distância a sotavento da chaminé, da altura da fonte emissora e do gradiente de temperatura da atmosfera (estabilidade atmosférica). Erbrink (1994) *apud* Lora (2002), equaciona o crescimento da pluma para uma atmosfera instável como:

$$\Delta h = 15 \left( \frac{F}{u} \right)^{\frac{3}{5}}, \quad (3.3)$$

onde  $u$  é a velocidade do vento na altura da chaminé, em m/s, e  $F$  é o parâmetro do fluxo de flotação que é em função da temperatura e velocidade de saída do gás da chaminé.

---

<sup>1</sup> *Esteira*: ponto de separação da camada limite em regiões com um gradiente de pressão adverso e a probabilidade de sua ocorrência aumenta em casos de excessivas curvas de pressão, isto é, em corpos com extremidades ou arestas vivas (Schlichting, 1960).

Para uma atmosfera com estabilidade neutra e instável, Briggs (1992) *apud* Lora (2002), desenvolveu equações que são utilizadas nos modelos da EPA (*Environmental Protection Agency*), conhecidas como lei dos 2/3:

$$\Delta h = \frac{1,6 F^{\frac{1}{3}}}{u} L^{\frac{2}{3}}, \text{ para } L \leq 3,5x. \quad (3.4)$$

$$\Delta h = \frac{1,6 F^{\frac{1}{3}}}{u} (3,5 x^*)^{\frac{2}{3}}, \text{ para } L > 3,5x^*. \quad (3.5)$$

$$x^* = 14 F^{\frac{5}{8}}, \text{ se } F \leq 55. \quad (3.6)$$

$$x^* = 34 F^{\frac{2}{5}}, \text{ se } F > 55. \quad (3.7)$$

$$x^* = 34 F^{\frac{2}{5}}, \text{ se } F > 55. \quad (3.8)$$

$$F = g v_s R_s^2 \left[ \frac{T_s - T_a}{T_s} \right], \text{ m}^4/\text{s}^3. \quad (3.9)$$

Onde:

$L$  = distância da fonte ao receptor, m. Quando a curva da pluma não se eleva mais, o valor  $3,5x^*$  corresponde à distância desde a origem das coordenadas até o ponto no eixo dos x.

$v_s$  = velocidade média de saída dos gases da chaminé, m/s.

$R_s$  = raio interior da chaminé, m.

$T_s$  = temperatura média dos gases na saída da chaminé, K.

$T_a$  = temperatura ambiente, K.

$u$  = velocidade média do vento na altura da chaminé.

Para Parker (1978), a altura de crescimento da pluma, em condições de estabilidade neutra, é dada pela seguinte equação:

$$\Delta h = \frac{\alpha Q_e^{\frac{1}{4}}}{u}, \quad (3.10)$$

onde  $Q_e$  é a taxa de emissão de calor,  $u$  é a velocidade média do vento e  $\alpha$  é uma constante para a chaminé e a região. Como a intensidade da turbulência decresce com a altitude, para grandes alturas de chaminés a pluma possui uma elevação média maior.

Para este caso, a expressão empírica a seguir depende da altura da chaminé:

$$\Delta h = \left( \frac{408 + 0,67 h_c}{u} \right) Q_e^{\frac{1}{4}}, \quad (3.11)$$

sendo que  $\Delta h$  e  $h_c$  são medidos em m,  $u$  em m/s e  $Q_e$  em m.W.

Para uma atmosfera estável, temos a seguinte equação:

$$\Delta h = 2,6 \left[ \frac{F T_a}{u g \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)} \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (3.12)$$

onde  $\partial \theta / \partial z$  é o gradiente de temperatura potencial, que é a diferença entre o gradiente de temperatura ambiente  $\partial T / \partial z$  e o gradiente vertical adiabático  $\Gamma_e$ .

### 3.4 Modelos de Dispersão de Poluentes

Os modelos de dispersão são modelos matemáticos que descrevem o transporte meteorológico e o processo de dispersão que é quantificado em termos da fonte emissora e parâmetros meteorológicos durante um tempo determinado. Os resultados apresentados pelos cálculos numéricos estimam o campo de concentrações de um poluente em particular para regiões e tempos específicos.

### 3.4.1 Equação da difusão

Todos os modelos determinísticos para o cálculo de concentração de poluentes no ar estão baseados na *equação da difusão*. Esta equação descreve como a variação da concentração de determinado poluente atmosférico  $c$  num volume  $dv$  é função da intensidade da fonte emissora, do transporte convectivo e da difusão molecular e turbulenta:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V c \, dv = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_V q \, dv + \iint_{\Sigma} c \bar{u} \, d\Sigma + \iint_{\Sigma} \bar{F} \, d\Sigma, \quad (3.13)$$

onde  $c$  é a concentração do poluente,  $\bar{u}$  ( $u, v, w$ ) é o vetor vento,  $q$  é a vazão de emissão do poluente,  $v$  é o volume limitado pela superfície e  $\bar{F}$  é o fluxo de massa através da superfície de controle.

Uma forma mais completa da equação da difusão leva em conta a remoção de poluentes  $R$  (deposição seca e úmida, reações secundárias, etc.), o fluxo turbulento de poluentes através dos coeficientes de difusividade aleatória  $K_H$  (termo horizontal) e  $K_Z$  (termo vertical).

$$\frac{\partial c}{\partial t} = u_i \frac{\partial c}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x} k_H \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} k_H \frac{\partial c}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} k_Z \frac{\partial c}{\partial z} + q + r. \quad (3.14)$$

### 3.4.2 Abordagem de Euler

Na abordagem de Euler, o comportamento das espécies é referido a um sistema de coordenadas fixo. A concentração de cada espécie deve satisfazer a equação da continuidade:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} u_j c_i + D_i \frac{\partial^2 c_i}{\partial x_j \partial x_j} + R_i(c_1, \dots, c_N, T) + s_i(x, t), \quad (3.15)$$

onde:

$j$  = componentes da velocidade,

$i$  = 1, 2, 3, ...N – espécie química,

$u_j$  = componente  $j$  da velocidade do fluido,

$D_i$  = difusividade molecular da espécie e do fluido portador,

$R_i$  = velocidade de geração da espécie  $i$  por reação química,

$s_i$  = velocidade de adição de espécies  $i$  numa localização  $x = (x_1, x_2, x_3)$  no tempo  $t$ .

As velocidades do fluido e a temperatura  $T$  devem satisfazer as equações do movimento (equações de Navier - Stokes) e da energia.

### 3.4.3 Abordagem de Lagrange

A abordagem de Lagrange descreve as variações de concentração com relação ao fluxo. Em outras palavras, esta equação considera como uma partícula de fluido representativa um volume grande, com dimensões muito maiores que as moleculares, mas suficientemente pequeno para comportar-se como um ponto.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(x, t) dx = 1, \quad (3.16)$$

onde:

$\varphi(x, t) dx$  = probabilidade de que a partícula num momento  $t$  esteja no elemento de volume  $x_1$  a  $x_1 + dx_1$ ,  $x_2$  a  $x_2 + dx_2$ ,  $x_3$  a  $x_3 + dx_3$ .

A concentração global média de partículas num ponto, considerando que estas estão inicialmente presentes e a posição da partícula está dada por  $\varphi_i(x, t) dx$ , será:

$$\langle c(x, t) \rangle = \sum_{i=1}^m \varphi_i(x, t). \quad (3.17)$$

### 3.4.4 Modelo Gaussiano

A equação do modelo Gaussiano é uma solução analítica simplificada da equação da difusão. Esse modelo, ilustrado pela figura 3.2, assume as seguintes considerações:

1. A difusão turbulenta é um processo aleatório e, assim, a diluição do gás contaminado é igual nas direções horizontais e verticais.
2. O gás poluente é liberado na atmosfera em uma altura correspondente a altura física da chaminé mais a elevação da pluma.

3. O grau de diluição do gás contaminante é inversamente proporcional à velocidade do vento.

4. O material poluente que alcança o nível do solo é refletido totalmente de volta à atmosfera como um feixe de luz que atinge um espelho a certo ângulo.

A equação abaixo, dá o nível de concentração  $c$  de um poluente a um ponto a sotavento da chaminé com uma altura efetiva  $H$ :

$$c(x, y, 0, H) = \left[ \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \right] \left[ \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \right] \left[ \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right], \quad (3.18)$$

onde:

$c(x, y, 0, H)$  = concentração a sotavento ao nível do solo, g/m<sup>3</sup>;

$Q$  = taxa de emissão de poluente, g/s;

$\sigma_y, \sigma_z$  = desvio - padrão da pluma na direção  $y$  e  $z$ , m;

$u$  = velocidade média do vento, m/s;

$H$  = altura total da chaminé, m;

O valor efetivo da chaminé é a soma da altura física da chaminé mais a elevação da pluma  $\Delta H$ :

$$H = h_c + \Delta H, \quad (3.19)$$

sendo que  $\Delta H$  é dado pela fórmula de Holland's:

$$\Delta H = \frac{v_s d}{u} \left[ 1,5 + \left( 2,68 \times 10^{-2} (P) \left( \frac{T_s - T_a}{T_s} \right) d \right) \right], \quad (3.20)$$

onde:

$v_s$  = velocidade de emissão da chaminé, m/s;

$d$  = diâmetro da chaminé; m;

$u$  = velocidade média do vento, m/s;

$P$  = pressão atmosférica; kPa;

$T_s$  = temperatura do gás emitido pela chaminé, K;

$T_a$  = temperatura do ar, K.

Os valores de  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  dependem da estrutura da turbulência e da estabilidade atmosférica. Estes valores podem ser retirados dos gráficos abaixo, apresentados pelas figuras 3.3 e 3.4. Na tabela 3.1 pode-se determinar a classe da estabilidade atmosférica, numa faixa de A (atmosfera muito instável) à F (atmosfera muito estável).

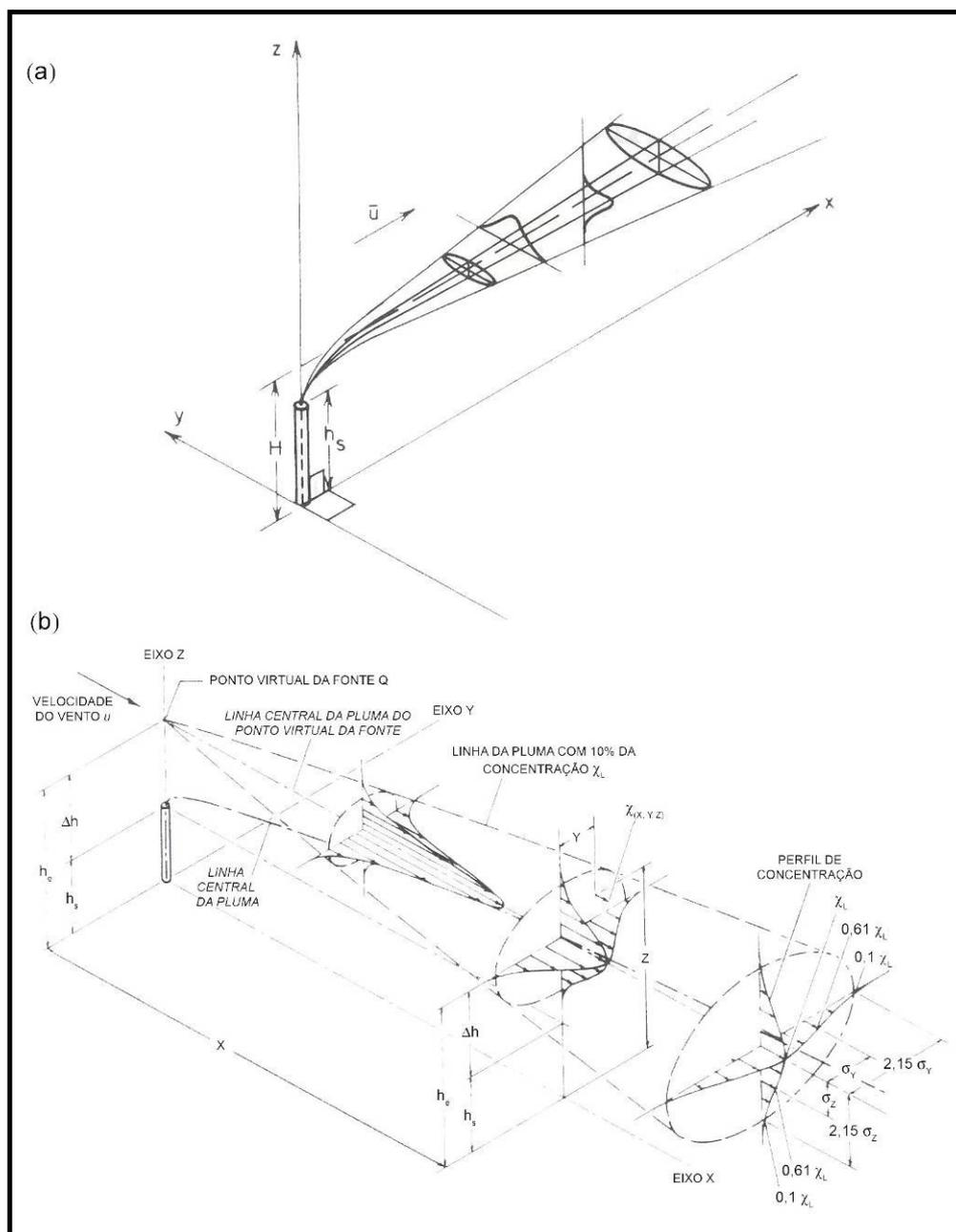


Figura 3.2 - Ilustração da pluma segundo modelo gaussiano: (a) uma fonte de elevação localizada a  $(0,0,H)$ ; (b) perfil de concentração tridimensional (Zannetti, 1990).

Tabela 3.1 - Classificação da estabilidade atmosférica segundo modelo gaussiano (Lora, 2002).

Velocidade do vento na superfície [m/s]	Dia			Noite	
	Radiação solar			Nublado ou $\geq$ 4/8 de nuvens baixas	$\leq$ 3/8 de nuvens
	Forte	Moderada	Fraca		
< 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

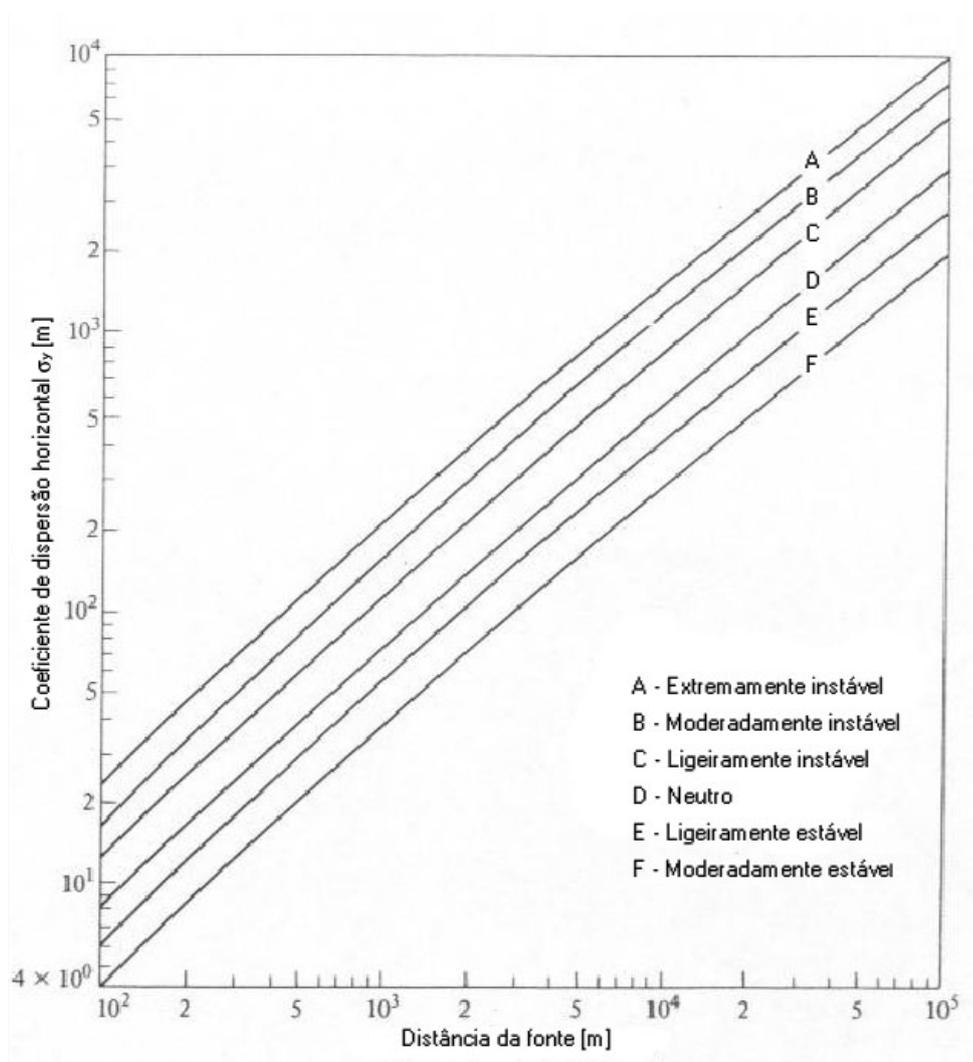


Figura 3.3 - Curvas do coeficiente de dispersão horizontal gaussiano, de acordo com a classificação da estabilidade atmosférica (Parker, 1977).

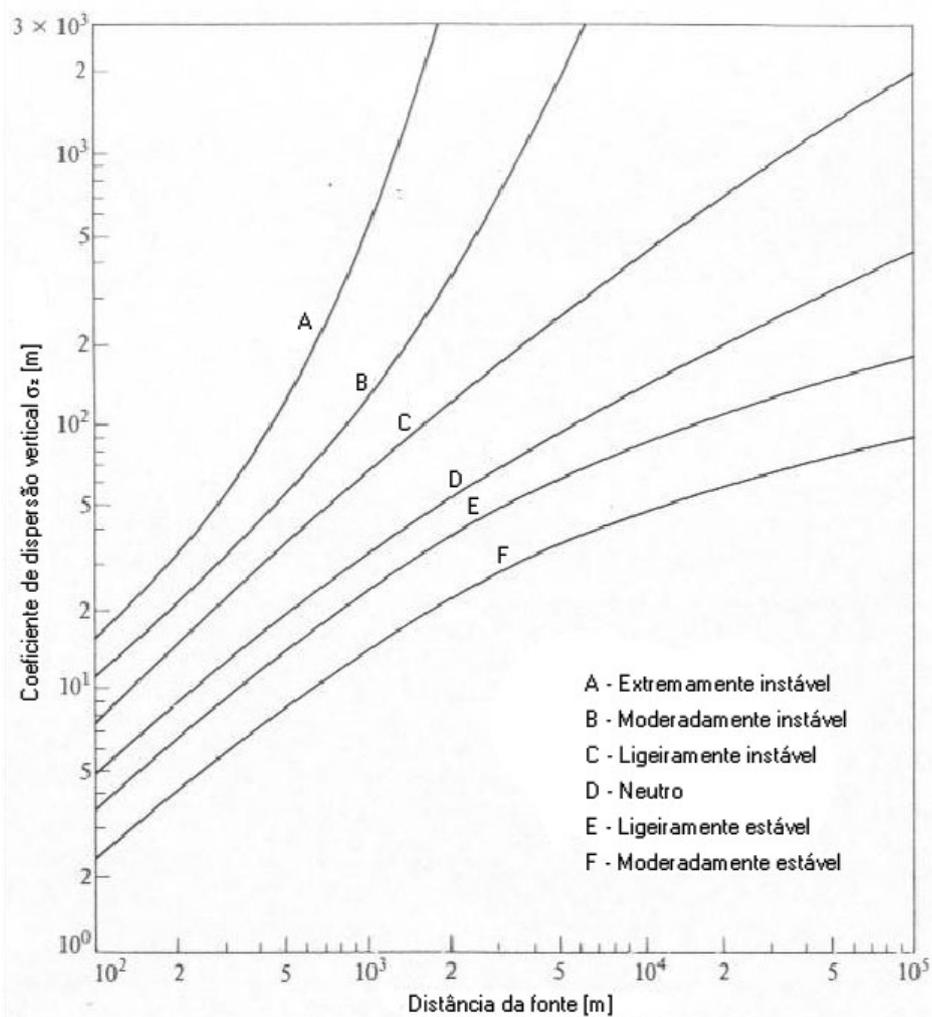


Figura 3.4 - Curvas do coeficiente de dispersão vertical gaussiano, de acordo com a classificação da estabilidade atmosférica (Parker, 1977).

## 4 A MODELAGEM DA DISPERSÃO DE POLUENTES

A análise, *in situ*, das concentrações de poluentes na região afetada pela fonte emissora torna-se muito cara. A instalação de estações de monitoramento da qualidade do ar necessita valores consideráveis para investimento, tornando inviável o uso destas quando há a necessidade de um estudo exploratório do campo de concentrações, uma vez que estes equipamentos fazem, apenas, uma análise pontual.

Dessa forma, a simulação com a utilização de um modelo em escala reduzida torna esta tarefa mais prática, com custo reduzido, comparado à escala real, dando a oportunidade, também, de realizar a simulação de diversas situações como forma de planejar e combater futuros casos de episódios de poluição.

Atualmente são utilizados dois métodos para a simulação da dispersão de poluentes: simulação numérica, com o uso do *CFD* (*Computacional Fluid Dynamics*); e a simulação física, com a utilização de túneis de vento de camada limite. Sem dúvida, o CFD é a ferramenta mais utilizada para a modelagem do transporte de contaminantes. Isto de fato se deve ao grande avanço computacional, com o surgimento de processadores cada vez mais poderosos que tornam possíveis a utilização de parâmetros de simulação cada vez mais precisos, mas também ao baixo custo do uso da linguagem computacional em relação ao túnel de vento, uma vez que este necessita gastos consideráveis para sua construção, espaço necessário para sua locação e custos de operação.

Mas uma das desvantagens dos modelos computacionais está frente à limitação da região da qual ela foi desenvolvida. Epstein (1977) mostrou que o uso de modelos empíricos usados na modelagem computacional da dispersão da pluma é válido somente no local onde eles foram desenvolvidos. Geralmente, a utilização de modelos em outros locais pode levar a erros na magnitude da concentração medida. Isto muitas vezes se atribuiu à falta de uma descrição sistemática do escoamento turbulento.

Além disso, a simulação de modelos mais complexos que envolvem uma quantidade maior de variáveis, como por exemplo a modelagem da dispersão em uma determinada zona urbana onde há grandes variações na altura das edificações, complexidade do terreno e estratificações do fluxo, a modelagem em CFD se torna complicada. Neste caso entra a simulação em túnel de vento de camada limite. O túnel de vento é a uma ferramenta capaz de

simular o transporte de contaminantes e também validar os resultados obtidos na modelagem numérica.

Segundo Hangan (2002) *apud* Robins (2003), as duas ferramentas de modelagem precisam trabalhar juntas, ou seja, uma *realimentação* entre a simulação por CFD e a experimental em túnel de vento. Em outras palavras, a modelagem física da dispersão de contaminantes seria usada como uma “calibração” da simulação em CFD e também no desenvolvimento de adequados códigos numéricos mais confiáveis e próximos da realidade. Pode-se observar que sem a ferramenta túnel de vento, os resultados obtidos numa simulação numérica por CFD não têm como serem validados. Assim, o túnel de vento pode ser usado de maneira independente, já que os parâmetros de semelhança da Mecânica dos Fluidos tentam retratar no modelo reduzido as características do escoamento em torno da edificação real.

O túnel de vento de camada limite é um instrumento muito importante para o entendimento do mecanismo de dispersão de contaminantes na atmosfera. A lista a seguir, mostra os principais usos desta ferramenta (Robins, 2003):

1. Testes e melhorias nas teorias de processos básicos de dispersão;
2. Elevação de plumas: hipóteses de entrada da pluma na esteira, efeitos de fluxo estratificado;
3. Processos de fluxo e dispersão em torno de edificações;
4. Processos de dispersão em áreas urbanas, como em ruas, intersecções, bairros;
5. Dispersão de gases densos, com a modelagem do efeito da esteira na pluma;
6. Flutuações das concentrações: efeitos da localização e dimensões da fonte emissora;
7. Simulação em terrenos complexos;
8. Simulação da camada limite convectiva, com análise da estrutura da turbulência e processos de dispersão.

A modelagem da dispersão de poluentes em túnel de vento de camada limite necessita respeitar determinados parâmetros de semelhança entre o modelo e a escala real, a fim de validar os resultados obtidos durante a simulação. Estas condições incluem semelhança geométrica, cinemática e dinâmica.

A semelhança geométrica necessita que o modelo e o protótipo tenham as mesmas formas e que todas as dimensões lineares do modelo sejam relacionadas às correspondentes dimensões da edificação real por um fator de escala constante (Fox e McDonald, 1998).

Por outro lado, a semelhança cinemática (velocidade do vento, velocidade de emissão da chaminé) requer que os regimes de escoamento sejam os mesmos entre a escala real e o modelo. A semelhança dinâmica (forças viscosas, forças de pressão, etc.) exige que as distribuições de forças importantes sejam relacionadas pelo mesmo fator de escala entre os escoamentos do modelo e da edificação real. Estas condições de semelhança dependerão dos efeitos que se quer simular e, principalmente, da escala do modelo e das condições de instalação e características do túnel de vento onde será realizada a simulação. Veremos a seguir, os requerimentos necessários para uma simulação exata, as dificuldades para tal simulação e os motivos para uma simulação aproximada com a relaxação de alguns parâmetros de semelhança.

#### ***4.1 Requerimentos e Problemas da Simulação Exata***

De acordo com Isyumov e Tanaka (1980), tendo estabelecido a simulação do vento natural para uma escala geométrica dado por

$$\lambda_L = \frac{D_m}{D_p}, \quad (4.1)$$

onde  $D$  representa um comprimento característico, e  $m$  e  $p$  significam respectivamente modelo e protótipo, os requerimentos necessários para uma simulação exata do comportamento da pluma pode ser resumido pelas seguintes equações:

**Semelhança geométrica da chaminé:**

$$\frac{D_m}{D_p} = \lambda_L, \quad (4.2)$$

**Igualdade do número de Froude:**

$$\left( \frac{Dg}{U^2} \right)_m = \left( \frac{Dg}{U^2} \right)_p, \quad (4.3)$$

**Igualdade na razão entre massas específicas de fluido:**

$$\left( \frac{\rho_s}{\rho_a} \right)_m = \left( \frac{\rho_s}{\rho_a} \right)_p, \quad (4.4)$$

**Escala consistente das velocidades:**

$$\left( \frac{W_s}{U} \right)_m = \left( \frac{W_s}{U} \right)_p, \quad (4.5)$$

**Números de Reynolds da chaminé:**

$$\left( \frac{DW_s}{\nu_s} \right)_m = \left( \frac{DW_s}{\nu_s} \right)_p, \quad (4.6)$$

sendo  $D$  o diâmetro interno da chaminé,  $g$  a aceleração gravitacional,  $U$  a velocidade média do vento na altura da chaminé,  $\rho_s$  e  $\rho_a$  a massa específica da pluma e do ar, respectivamente,  $W_s$  a velocidade de exaustão da pluma da chaminé e  $\nu_s$  o coeficiente de viscosidade cinemática da pluma.

Poreh e Kacherginsky (1981), ainda incluem os números de Rossby e Prandtl para o escoamento em túnel de vento e os números de Schmidt e Prandtl para a simulação da pluma. Mas estes parâmetros em muitos casos podem ser ignorados.

Para a exata simulação, todas as escalas da velocidade devem obedecer à semelhança do número de Froude. Desse modo, a escala de velocidades pode ser obtida por:

$$\lambda_u = \lambda_w = \sqrt{\lambda_L}. \quad (4.7)$$

A escala geométrica do modelo necessária para a modelagem do vento natural, está numa faixa de  $\lambda_L \approx 1:400$  a  $1:900$ . Conseqüentemente, as escalas de velocidade no modelo são de  $\lambda_u = 1:20$  a  $1:30$ . Para a simulação da dispersão de poluentes, a velocidade ideal de interesse de estudo fica na ordem de 5 a 20 m/s, que representam as piores situações de poluição atmosférica devido à baixa velocidade do vento e pouca turbulência, representando pouca diluição da concentração de poluentes. Para atender as condições de escala para a modelagem exata, a velocidade necessária em túnel de vento deve ser de 0,15 a 1 m/s. Essa

faixa de velocidades é difícil de estabelecer em muitas instalações de túnel de vento. O fluxo a tal velocidade é suscetível a pequenas perturbações que resultam em um significativo exagero do espectro de velocidade a baixas frequências, fora os problemas mecânicos do motor e ventilador.

Além disso, as baixas velocidades para a modelagem complicam a simulação do regime de escoamento. O critério usado para o desenvolvimento pleno de um escoamento turbulento em túnel de vento é que o número de Reynolds da rugosidade seja

$$\text{Re}_z = \frac{u_* z_o}{\nu} > 2,5, \quad (4.8)$$

condição difícil de satisfazer em modelos de pequenas escalas geométricas com terrenos planos.

Para Poreh e Kacherginsky (1981), a correta simulação do fenômeno de dispersão necessita que os números de parâmetros adimensionais entre o modelo e protótipo sejam iguais. Contudo, a igualdade de todos esses parâmetros é impossível.

Um dos grandes problemas na simulação da velocidade de emissão de contaminantes é a semelhança do número de Reynolds entre a chaminé do modelo e da escala real. Para a simulação da elevação da pluma e sua dispersão, o número de Reynolds no início do jato emitido deve ser suficientemente grande, normalmente

$$\text{Re}_s = \frac{W d}{\nu_s} \geq \text{Re}_{\text{minimum}}. \quad (4.9)$$

Desse modo, o requerimento para que o escoamento no interior da chaminé do modelo seja turbulento, o valor do número de Reynolds *minimum* deve ser pelo menos de 2000. Para Snyder (1981) *apud* White e Stein (1990), o valor para o número de Reynolds *minimum* da chaminé deve ser maior do que 2300.

Porém, devido à escala do modelo, o escoamento na chaminé é laminar, ao contrário da chaminé em escala real, onde o escoamento é turbulento. Aumentando a velocidade de emissão do modelo, aumentaria o momentum inicial da pluma, distorcendo os resultados. Modificações nas paredes internas da chaminé do modelo, com elementos que aumentem a rugosidade ou anteparos e orifícios na saída da chaminé para gerar turbulência, permite a

redução do número de Reynolds requerido para um valor de 300, que é o  $Re$  crítico para escoamentos de jatos. Porém, devido às pequenas escalas dos modelos, o  $Re$  para a chaminé tem um valor muito menor que o valor crítico, não sendo possível satisfazer esta semelhança.

Desse modo, para a realização da simulação da dispersão de uma pluma, em túnel de vento de camada limite, a utilização de todos os requerimentos para a exata simulação impossibilita a realização de ensaios de dispersão de poluentes. A relaxamento de alguns parâmetros torna-se necessária, como visto a seguir.

### **4.2 *Requerimentos de Semelhança Aproximada***

#### **4.2.1 Semelhança do escoamento em túnel de vento de camada limite**

Segundo Isyumov e Tanaka (1980), para uma correta simulação em túnel de vento da dispersão atmosférica de uma pluma de contaminantes é necessário a modelagem representativa das características da camada limite atmosférica. Para Cermak e Takeda (1985), a modelagem física da dispersão atmosférica necessita de dois conjuntos de critérios de semelhança. O primeiro conjunto de critérios necessita que o escoamento realizado dentro do túnel de vento de camada limite seja semelhante ao vento natural na camada limite atmosférica. O segundo conjunto de critérios requer que as características da fonte entre o modelo e protótipo, sejam semelhantes. A modelagem da camada limite atmosférica em túnel de vento requer:

- a) semelhança geométrica (sem distorções da escala);
- b) a simulação das condições de contorno somando-se a isso a rugosidade do terreno, a semelhança da topografia entre o modelo e a edificação real e a temperatura da superfície;
- c) a semelhança do campo de fluxos, com as velocidades média e turbulenta do vento e a estratificação da temperatura;
- d) igualdade do número de Reynolds:

$$Re = \frac{U_0 L_0}{\nu_0}; \quad (4.10)$$

e) igualdade do número de Prandtl:

$$\text{Pr} = \frac{\nu_0 \rho_0 C_{p0}}{k_0}; \quad (4.11)$$

f) Igualdade do número de Rossby:

$$\text{Ro} = \frac{U_0}{L_0 \Omega_0}; \quad (4.12)$$

g) Igualdade do número de Richardson médio:

$$\text{Ri} = g L_0 \frac{1}{U_0} \frac{(\rho_1 - \rho_0)}{\rho_0}. \quad (4.13)$$

A semelhança de Prandtl é satisfeita usando o ar na modelagem do escoamento. Como grandes túneis de vento não podem ser rotacionados para simular a força de Coriolis, a semelhança do número de Rossby precisa ser descartada. A semelhança do número de Reynolds é satisfeita com o desenvolvimento das condições de escoamento turbulento na simulação da camada limite. A semelhança do número de Richardson está ligada a modelagem da estabilidade atmosférica (camada limite neutra, instável e estável), descrevendo relações da turbulência térmica à turbulência mecânica. Para a simulação de uma atmosfera neutra, realizado na maioria dos túneis de vento e neste trabalho, o número de Richardson, baseado na temperatura, é ignorado (Ruscheweyh e Fischer, 1979).

Para a simulação da camada limite atmosférica em estabilidade neutra, em túnel de vento, é necessário a representação da rugosidade do terreno, a turbulência e o perfil vertical da velocidade do vento. Em túneis mais modernos é possível a estratificação da temperatura, formando o gradiente térmico da atmosfera.

#### 4.2.2 Simulação aproximada do comportamento de plumas de chaminés

As dificuldades da realização de simulações exatas do comportamento da pluma, resultado da exata escala do número de Froude, levam às relaxações de alguns parâmetros, principalmente a modelagem das razões de massa específica do gás da chaminé.

Isyumov e Tanaka (1980) apresentam as seguintes considerações sobre a modelagem do comportamento de plumas:

- a) Em todas as simulações aproximadas, a razão das massas específicas é distorcida, para obter maior velocidade do ar no túnel de vento e para permitir a operação destes.
- b) A escala da velocidade do ar é determinada com o objetivo de obter a similaridade dos efeitos de empuxo. O parâmetro de empuxo mais utilizado é o número de Froude densimétrico dado por:

$$(Fr)_d = \sqrt{\frac{(\rho_a - \rho_s) D g}{\rho_a U^2}}, \quad (4.18)$$

sendo  $\rho_s$  a massa específica do gás emitido pela chaminé e  $\rho_a$  a massa específica do ar,  $D$  o diâmetro interno da chaminé,  $g$  a aceleração da gravidade e  $U$  a velocidade média do ar na altura da chaminé.

- c) A escala da velocidade de saída da pluma pode ser realizada de duas maneiras: com base na velocidade do ar, que relaxa o parâmetro de quantidade de movimento da pluma, ou com a manutenção do parâmetro de quantidade de movimento da pluma, porém exagerando na velocidade de saída do gás na chaminé. A escala do momentum da pluma é baseada nesta equação:

$$\frac{\rho_s D^2 W_s^2}{\rho_a L^2 U^2} = C, \quad (4.19)$$

sendo  $W_s$  a velocidade de saída do gás da chaminé,  $L$  um comprimento característico, e  $C$  uma constante. Esta escala também foi usada por White e Stein (1990) em seus estudos da variabilidade da altura de chaminés para edificações de baixo perfil.

Meroney (1979) destaca que a cinética de uma pluma é governada pelas forças de empuxo e pelas forças de inércia. Em seus experimentos sobre o comportamento da força de empuxo de plumas que se elevam a partir do nível do solo, a escala do comprimento da elevação de um gás depende de alguns parâmetros de empuxo. Um destes parâmetros, o número de Froude modificado, baseia-se na força da fonte emissora por unidade de largura:

$$Fr = \sqrt{\frac{\rho_a \bar{u}^{-3} W_0}{g \Delta\rho Q_l}}, \quad (4.20)$$

onde  $\Delta\rho/\rho_a$  é a massa específica relativa da fonte de gás comprada com o ar,  $\bar{u}$  é a velocidade de referência,  $Q_l$  é a vazão volumétrica de emissão da fonte e  $L_0$  é a largura característica da fonte.

A escolha do gás para a modelagem da pluma é muito importante. O gás hélio (He) ou uma mistura ar-hélio é a mais utilizada para a simulação em túnel de vento. Outros utilizam o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que possui massa específica próxima com a do ar, ou SF<sub>6</sub> (cinco vezes mais pesado que o ar) para estudos de gases densos. A escolha do gás interferirá na escolha dos parâmetros para a modelagem. O gás hélio, por exemplo, é um gás muito leve que o ar (aproximadamente 7,2 vezes mais leve), e é utilizado para o estudo do efeito de empuxo durante a elevação de um contaminante. Isto dá a possibilidade de se trabalhar com velocidades mais altas no túnel de vento, mas impede que a velocidade de emissão da chaminé seja alta, devido ao empuxo do gás. Por outro lado, o uso de CO<sub>2</sub> ou SF<sub>6</sub>, permite que se modelem os parâmetros de quantidade de movimento da pluma. Ruscheweyh e Fischer (1979) usaram o CO<sub>2</sub> como gás traçador, usando desta maneira a razão de velocidade entre o escoamento U e a velocidade de emissão W<sub>s</sub> da chaminé, ou seja,

$$\left(\frac{W_s}{U}\right)_M = \left(\frac{W_s}{U}\right)_P, \quad (4.21)$$

Um estudo realizado por Poreh e Kacherginsky (1981) propõe as condições necessárias para a obtenção da similaridade em escalas de modelos baseados em experimentos com jatos e elevações de plumas. A principal conclusão a que chegaram foi que a condição necessária para a simulação aproximada do comportamento de jatos e plumas é a utilização de dois parâmetros de escalas independentes: os parâmetros adimensionais de escoamento por empuxo e escoamento por momentum. Dependendo do tipo de problema, os números de Reynolds para o escoamento e para a chaminé podem também ser requeridos.

Na modelagem física de zonas urbanas em túnel de vento, os critérios para similaridade das características das fontes, Cermak e Takeda (1985) usaram os seguintes parâmetros usados para igualar o modelo e a escala real:

- relações entre a velocidade de emissão e a velocidade local do vento  $W_s/U$ ;
- relação entre as forças de inércia e empuxo,  $\rho_a U^2 / [(\rho_a - \rho_s)gD]$ .

Para permitir um aumento do tamanho da fonte e da velocidade de escoamento, mantendo a semelhança das características da pluma, usaram o parâmetro de momentum de emissão, dado por:

$$\frac{\rho_s W_s^2}{\rho_a U^2}, \quad (4.22)$$

e o parâmetro de empuxo:

$$\frac{\rho_s U^3}{(\rho_a - \rho_s)g W_s D}. \quad (4.23)$$

Devido à falta de um ponto comum entre os diversos autores, na adoção de parâmetros para modelagem da dispersão de poluentes em túnel de vento, este trabalho realizou um estudo exploratório da emissão de um gás por uma chaminé em túnel de vento, utilizando diferentes velocidades de emissão e do escoamento. Dessa forma, avaliou-se a influência dos parâmetros de empuxo e de quantidade de movimento da pluma (momentum da pluma), adotado por Cermak e Takeda (1985) e a razão entre as velocidades, sobre o comportamento e dispersão da pluma. Estes parâmetros foram adotados por apresentarem uma melhor caracterização do comportamento da pluma e por serem usados pelos pesquisadores no processo de parametrização e semelhança para a simulação física da dispersão de poluentes.

## 5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Os estudos realizados para a simulação da dispersão de uma pluma de contaminantes na atmosfera são de caráter experimental. Este estudo, de caráter exploratório, engloba a simulação de uma pluma de contaminantes emitida por uma chaminé isolada. O escoamento simulado abrangeu dois tipos de terreno: um terreno representando uma zona urbana, industrial ou florestal urbanizado, com obstáculos numerosos; o outro representando uma zona rural ou campo aberto e plano, com poucos obstáculos. Durante os testes foram realizadas duas velocidades para o escoamento em túnel de vento e cinco velocidades de emissão: duas utilizando hélio puro e três usando uma mistura ar-hélio. Foi feito um mapeamento do perfil vertical de concentrações em um único plano, no eixo da chaminé, para diferentes posições a sotavento.

As simulações foram realizadas no túnel de vento de camada limite de circuito fechado Professor Joaquim Blessmann, do Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O regime de escoamento dentro do túnel será a baixas velocidades, ideal para a simulação da dispersão atmosférica, simulando uma camada limite atmosférica neutra. A medição das velocidades instantâneas do vento será realizada por meio do sistema de anemometria a fio – quente onde, por meio desta, também se obterá o perfil médio de velocidades dentro do túnel.

O processo de medição de gases utilizou um sistema composto por sonda aspirante e anemômetro de fio – quente, para medir concentrações instantâneas e médias de gases. Este trabalho verificou a viabilidade de utilização da sonda aspirante como instrumento de medição de concentrações de poluentes.

### *5.1 Equipamentos e instrumentação*

#### **5.1.1 Túnel de vento**

O túnel de vento é uma das ferramentas utilizadas para simulação da camada limite atmosférica com a finalidade de realizar estudos dos efeitos do vento em edificações, da ação do vento em pontes e torres de transmissão de energia elétrica, conforto de pedestres, estudos

do escoamento em helipontos, dispersão de poluentes (gases ou material particulado), entre outros.

Os túneis de vento podem se dividir em determinadas categorias em função de suas velocidades e geometrias. Em função da velocidade, os túneis de vento podem ser de alta ou baixa velocidade. Os túneis de alta velocidade são geralmente usados para testes de protótipos aeronáuticos como, por exemplo, aviões-caça e foguetes, com o objetivo de verificar o desempenho aerodinâmico. Já os túneis de baixas velocidades focam na simulação da camada limite atmosférica para certos estudos como mencionado anteriormente.

Em termos de sua geometria, os túneis de vento podem ser de circuito aberto ou fechado. Os de circuito aberto, o ar é absorvido em uma das extremidades para geração do escoamento e liberado no extremo oposto. Possui como vantagens o custo de sua construção e a temperatura do escoamento é constante (depende da variação da temperatura ambiente), porém a pressão na seção de ensaios geralmente está acima ou abaixo da atmosférica, necessitando uma vedação eficiente das portas e das mesas de trabalho (local onde se encontra o modelo). Os túneis de vento de circuito fechado, o ar utilizado no escoamento recircula, tendo como grande vantagem o uso de menos energia para gerar seu movimento e a pressão na câmara de ensaios é próxima à atmosférica. Contudo, devido à recirculação (não há renovação do ar), o atrito do ar com as paredes do túnel causa um aumento gradativo da temperatura do escoamento, além dos custos de sua construção, que são mais elevados que o de circuito aberto (Loredo-Souza *et al.*, 2004).

As simulações foram realizadas no túnel de vento de circuito fechado Prof<sup>o</sup> Joaquim Blessmann, na Universidade do Rio Grande do Sul. Este túnel possui duas seções de trabalho: uma de altas velocidades de 1,30 m de largura  $\times$  0,90 m de altura  $\times$  9,32 m de comprimento e tem uma relação comprimento / altura superior a 10; uma de baixas velocidades de 2,50 m  $\times$  2,10 m  $\times$  15,10 m. A velocidade do túnel de vento vazio é de 42 m/s, feito por um motor de 100 Hp de potência.

Vários elementos geram a simulação das tensões de cisalhamento do escoamento atmosférico, o perfil de ventos e a turbulência da camada limite atmosférica, colocados a barlavento da seção de trabalho como, por exemplo, elementos de rugosidade no piso do túnel, dispositivo de mistura e barreiras perfuradas (Blessmann, 1982). As figuras abaixo apresentam um desenho esquemático do túnel de vento (figura 5.1) e uma visualização da seção de trabalho (figura 5.2).

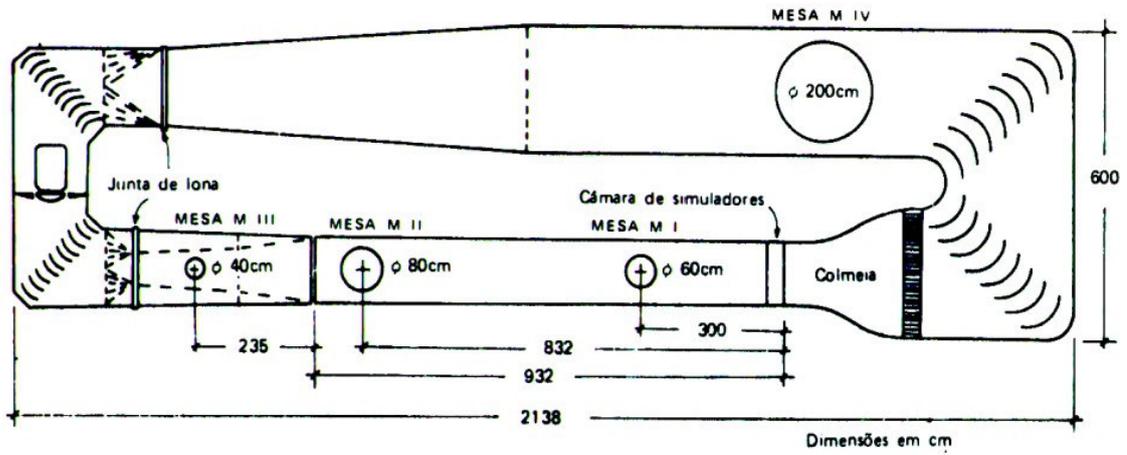


Figura 5.1 - Planta baixa do túnel de vento Prof<sup>o</sup> Joaquim Blessmann.



Figura 5.2 - Visão externa do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann.

### 5.1.2 Sistema de emissão de gases

O sistema utilizado para a simulação de emissões de gás em túnel de vento constitui de cilindros de gás hélio, regulador de pressão de simples e duplo estágio, compressor de ar e sistema de mistura de gases (figura 5.3). Este mesmo sistema foi utilizado por Wittwer (2006) em sua tese.

O gás hélio utilizado para os ensaios é um gás especial para laboratórios, em cilindros de alta pressão, com grau de pureza 4.5 (pureza mínima de 99,995%). Com relação às impurezas presentes, possui em sua composição menos do que 1 ppm (partes por milhão) de *THC* (conteúdo total de hidrocarbonetos), 3 ppm de oxigênio ( $O_2$ ), 5 ppm de água ( $H_2O$ ) e 40 ppm de  $N_2$ . A vazão dos cilindros de gás hélio é controlada por um regulador de pressão de duplo estágio, que mantém constante a pressão de saída do gás, independente da variação da pressão interna do cilindro. A injeção de ar no sistema é realizada pela utilização de um compressor de ar de 0,5 cv e a vazão de ar é controlada por um regulador de pressão simples.

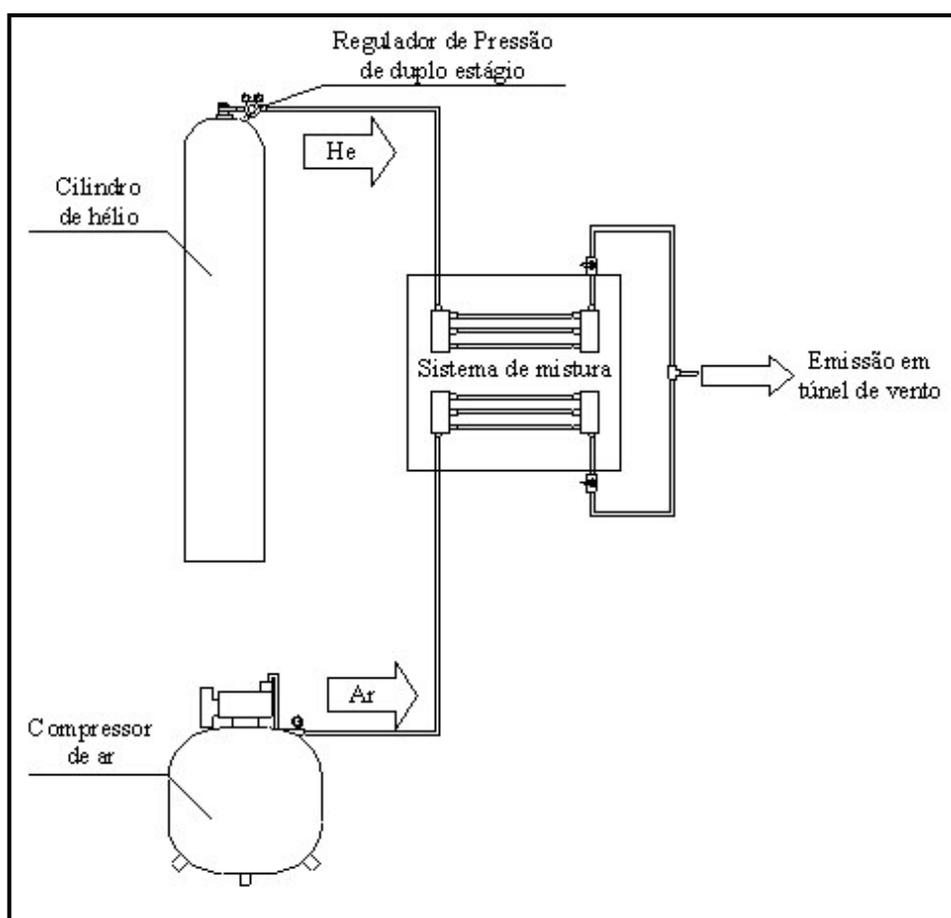


Figura 5.3 - Ilustração do sistema de emissão e mistura de gases.

O princípio de funcionamento do sistema de mistura de gases (ver figura 5.4), elaborado por Wittwer (2006), consiste numa série de tubos de polietileno padronizados com um colar ou placa orifício, presente internamente. Cada tubo possui uma placa com um determinado diâmetro: 0,50; 0,65; 0,75; 0,90; 1,00; 1,25; e 1,50 mm. Este sistema é chamado de *Método Placa – Orifício*.

A placa – orifício, ou colar, funciona como um colar sônico a fim de obstruir o escoamento e, sabendo-se as pressões do sistema, a montante e jusante do orifício, calcula-se a vazão de gás pelo tubo (figura 5.4). Um cálculo para um escoamento isotrópico isotérmico dado por Shapiro (1953), permite estimar a razão das pressões, a montante e a jusante da placa – orifício, necessário para que o bloqueio sônico seja atendido. Desse modo, a razão das pressões a montante e a jusante do colar, para um número de Mach igual a um, é dado por (Camaño Schettini, 1996):

$$\frac{P_{mont}}{P_{jus}} = \left( \frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\left( \frac{\gamma}{\gamma + 1} \right)}, \quad (5.1)$$

sendo  $\gamma$  a constante adiabática, ou seja,

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}, \quad (5.2)$$

onde  $c_p$  e  $c_v$  é o calor específico à pressão e a volume constante respectivamente,  $P_{mont}$  é a pressão à montante e  $P_{jus}$  é a pressão à jusante da placa-orifício. A tabela 5.1 mostra as características dos gases utilizados.

**Tabela 5.1 - Características dos gases utilizados nos ensaios (Camaño Schettini, 1996).**

Fluido	$\gamma (c_p/c_v)$	Velocidade do som [m/s]	$P_{mont}/P_{jus}$
Hélio	1,67	1005	2,05
Ar	1,4	340	1,89

A existência de bloqueio sônico somente será possível se a razão entre as pressões à montante e à jusante do colar supere o valor apresentado pela tabela 5.1, para o ar e para o gás hélio. O cálculo da vazão mássica de cada fluido é dado pela seguinte equação:

$$Q_m = \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} P_{mont} \sum_i A e_i \sqrt{\frac{\gamma}{R T_{mont}}}, \quad (5.3)$$

ou de maneira simplificada,

$$Q_m = \beta P_{mont} \sum_i A e_i \sqrt{\frac{\gamma}{R T_{mont}}}, \quad (5.4)$$

sendo que

$$\beta = \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}, \quad (5.5)$$

e  $i$  representando o índice de correspondente ao colar calculado;  $R$ , a constante do gás em questão;  $T_{mont}$ , a temperatura do gás a montante do colar; e  $A e_i$ , é a seção efetiva de passagem nos orifícios (colar). Por sua vez, a área efetiva é dada pela seguinte equação:

$$A e = C_d A_c. \quad (5.6)$$

Na equação acima,  $A_c$  é a área do orifício e  $C_d$  é o coeficiente de contração do escoamento a jusante do orifício, obtido a partir da curva apresentada na figura 5.5. De acordo com Shapiro (1953), a contração é devido aos efeitos tridimensionais do escoamento. Efeitos de compressibilidade sobre o gás aumentam o coeficiente de contração. A figura 5.6 mostra o sistema de mistura de gases construído para os ensaios.

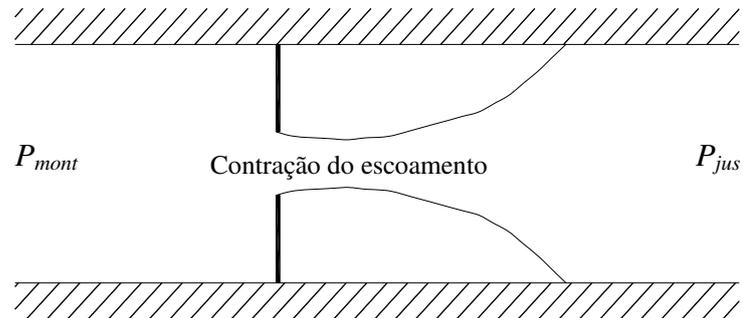


Figura 5.4 - Desenho mostrando a contração do escoamento na passagem pela placa – orifício (Shapiro, 1953).

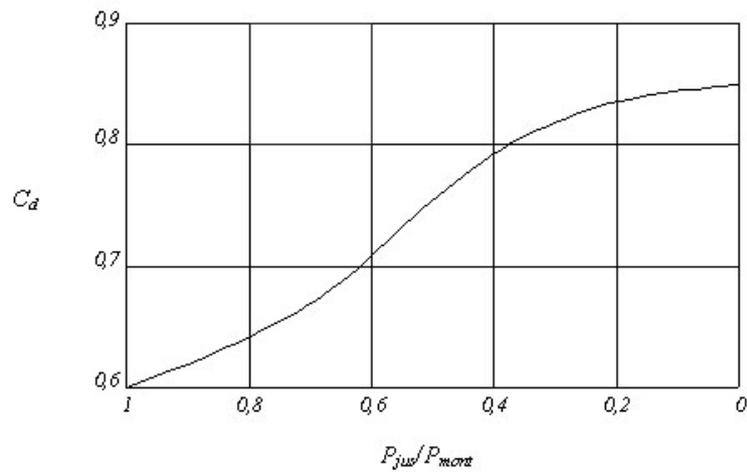


Figura 5.5 - Curva do coeficiente de contração em função das relações entre pressões a montante e a jusante da placa - orifício (Shapiro, 1953).

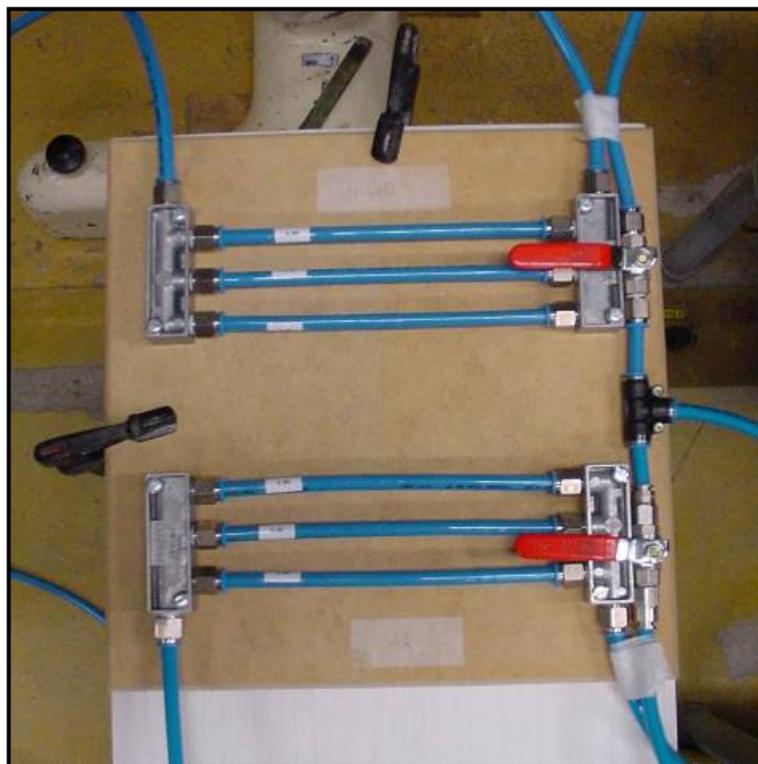


Figura 5.6 - Detalhe do sistema de mistura de gases.

Riva (1991), a seção de passagem efetiva depende das relações entre as pressões a montante e a jusante da placa – orifício. Seus experimentos mostraram que, para um dado orifício, o coeficiente de contração  $C_d$  se mantém constante quando há uma grande relação entre as pressões.

### 5.1.3 Sistema de anemometria de fio – quente

O anemômetro de fio – quente a temperatura constante é um instrumento que permite a medição instantânea do vetor velocidade em um ponto do escoamento de um fluido, seja ele gás ou líquido. Seu princípio de funcionamento consiste na manutenção de uma determinada temperatura no fio-quente, variando entre 250 °C a 300 °C, que, quando colocado em um ponto qualquer do escoamento, este exerce uma influência sobre as propriedades termodinâmicas do filamento. Esta influência depende diretamente da velocidade do escoamento sobre o fio-quente. O sistema, para manter a temperatura do filamento constante, aplica uma nova tensão sobre o fio-quente. A nova tensão medida no equipamento determina, a partir de uma curva de calibração, a velocidade do escoamento.

Este sensor, um filamento de diâmetro da ordem de  $\mu\text{m}$ , possui grande velocidade de resposta às variações das propriedades do fluido, alta sensibilidade e interferência quase inexistente no fluido.

O circuito elétrico é formado por uma ponte de Wheatstone, responsável pela manutenção da resistência do fio-quente, onde o braço ativo desta ponte é a sonda de fio-quente. Uma fonte de tensão e um servo-amplificador mantêm constante a temperatura no sensor ante as variações de velocidade do fluido. Um esquema de funcionamento é mostrado na figura 5.7 e os equipamentos de uso do sistema anemométrico é apresentado na figura 5.8.

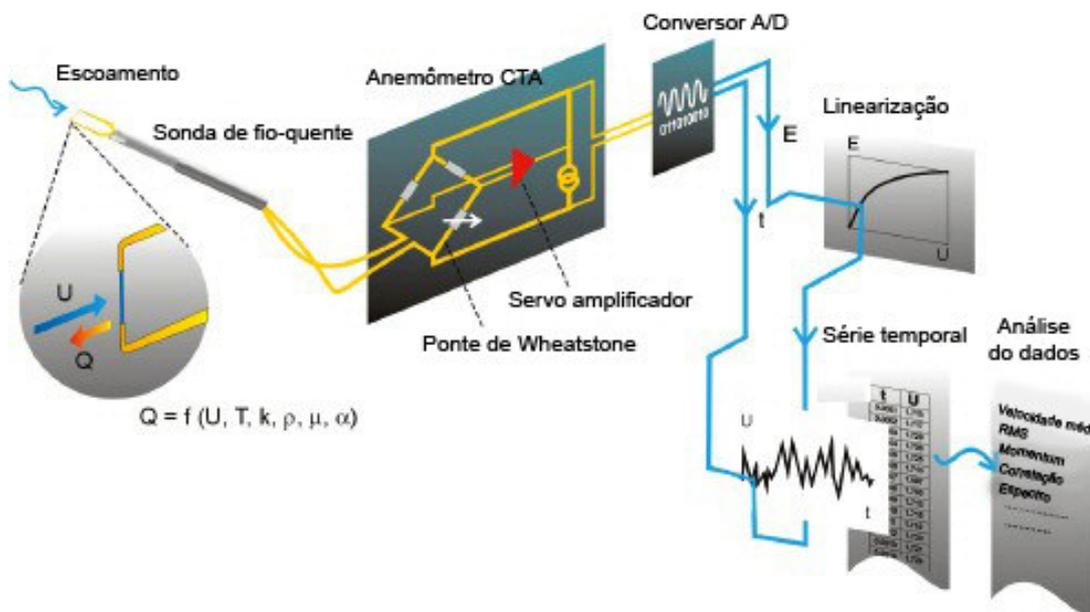


Figura 5.7 - Desenho básico do sistema elétrico do anemômetro de fio-quente (Dantec Dynamics, 2006).

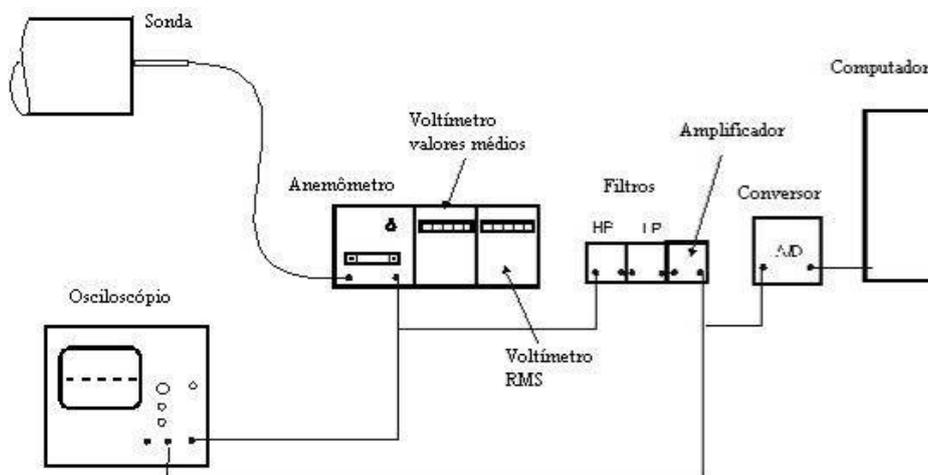


Figura 5.8 - Sistema de anemometria a fio-quente.

Segundo Miquel (1972), o anemômetro de fio-quente permite medir:

- a velocidade e a temperatura instantânea em um ponto;
- as tensões de Reynolds;
- as intensidades de turbulência;
- todos os tipos de correlações;
- as escalas de turbulência;
- os espectros de energia.

Neste trabalho, foram utilizados dois sistemas de anemometria a fio-quente (figura 5.9). O primeiro foi utilizado para as medições de velocidade do perfil do vento no túnel de vento e controle das velocidades do escoamento na altura da chaminé. O segundo, em associação com o sistema de aspiração para medição instantânea de concentrações de gás.

Para as medições de velocidade do escoamento utilizou-se o sistema de anemometria *StreamLine* da *Dantec Dynamics* (Dinamarca). A sonda usada consiste em um fio-quente modelo 55P11 (fio reto), com um filamento de tungstênio coberto por platina, de 5  $\mu\text{m}$  de diâmetro e 1,25 mm de comprimento, com resistência de 3,31 Ohms (a 20 °C). O software usado para as aquisições foi o *StreamWare* da *Dantec Dynamics*.

Para o sistema de medição de concentrações consiste de uma sonda aspirante, na qual foi colocada na extremidade do tubo capilar um filamento de tungstênio de 5  $\mu\text{m}$ . O sistema de anemometria utilizada é da *Thermo System Incorporation (TSI)* e o software de aquisições é o *HP Vee*, presente em um computador portátil.



Figura 5.9 - Fotografia da instrumentação utilizada para os ensaios.

#### 5.1.4 Sonda Aspirante

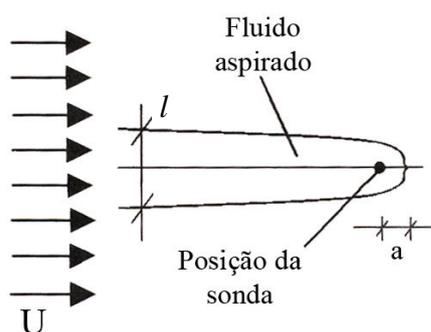
Esta ferramenta é utilizada para as medições instantâneas de concentração, através da medida da densidade de escoamentos heterogêneos e com a utilização de anemometria de fio – quente.

A sonda aspirante mede a massa específica de dois fluidos misturados, ou seja, de uma mistura binária. O princípio de funcionamento desta sonda consiste na capacidade de medições de flutuações de massa específica. A insensibilidade de resposta do fio-quente a velocidade do escoamento exterior está garantida, quando este está colocado em um escoamento sônico.

Assim, o fio-quente é colocado na extremidade do tubo ligado a uma bomba a vácuo. Este aspira o ar pelo interior deste tubo, de modo que a pressão de aspiração seja tal que garanta o escoamento sônico. Isto é denominado *bloqueio sônico*. O fio responde às variações das propriedades do gás e, por estas razões, este tipo de sonda é apropriado para medir a massa específica média e instantânea do escoamento (Camaño Schettini, 1996).

Os testes de funcionamento da sonda aspirante que estabelecem a independência de resposta frente à velocidade do escoamento e a frequência de análise, à posição relativa da

sonda no escoamento e os cálculos que estimam o tempo de resposta estático e dinâmico da sonda aspirante podem ser encontrados no estudo realizado na tese “*Etude expérimentale des jets coaxiaux avec différences de densité*”, de Camaño Schettini (1996). Neste estudo são estabelecidos os valores de  $l$  (largura de aspiração do sumidouro) e  $a$  (distância entre o sumidouro e o ponto de estagnação). Isto é necessário, pois se verifica a área de distorção nas linhas de corrente do escoamento provocada pela sonda aspirante, condiciona a frequência de aquisição para a sonda aspirante e o volume de integração (figura 5.10).



**Figura 5.10 - Ilustração das grandezas envolvidas no funcionamento da sonda aspirante (Camaño Schettini, 2000).**

A tabela 5.2 mostra os valores de  $l$  para três tipos de gases, de acordo com a velocidade do escoamento.

**Tabela 5.2 - Valores do diâmetro do sumidouro de aspiração, de acordo com a velocidade do escoamento, necessários para não interferir nos valores de concentração captados (Camaño Schettini, 2000).**

U [m/s]	Ar	Hélio	SF4
1,00	1,20	2,00	0,64
2,00	0,88	1,12	0,45
8,50	0,44	0,72	0,22
20,00	0,28	0,48	0,14

Esta distorção pode influenciar no resultado final das concentrações, uma vez que se pode aspirar um volume de gás maior, superestimando o valor pontual. Verificou-se que a sonda aspirante é adequada para medições de massa específica, tomando-se cuidado nas regiões de baixa velocidade, devido ao tempo de transporte da partícula do gás que pode ser elevado, e onde há grandes variações de massa específica, podendo ter grandes volumes de aspiração com relação à resolução espacial da massa específica do gás (Camaño Schettini, 2000).

A sonda aspirante utilizada nos ensaios constitui de um tubo cerâmico capilar de 1 mm de diâmetro interno. Na sua extremidade, colocou-se um filamento de tungstênio revestido com platina de 5 µm de diâmetro (figura 5.11). A figura 5.12 mostra um desenho esquemático da sonda aspirante utilizada nos ensaios (Camaño Schettini, 1996).

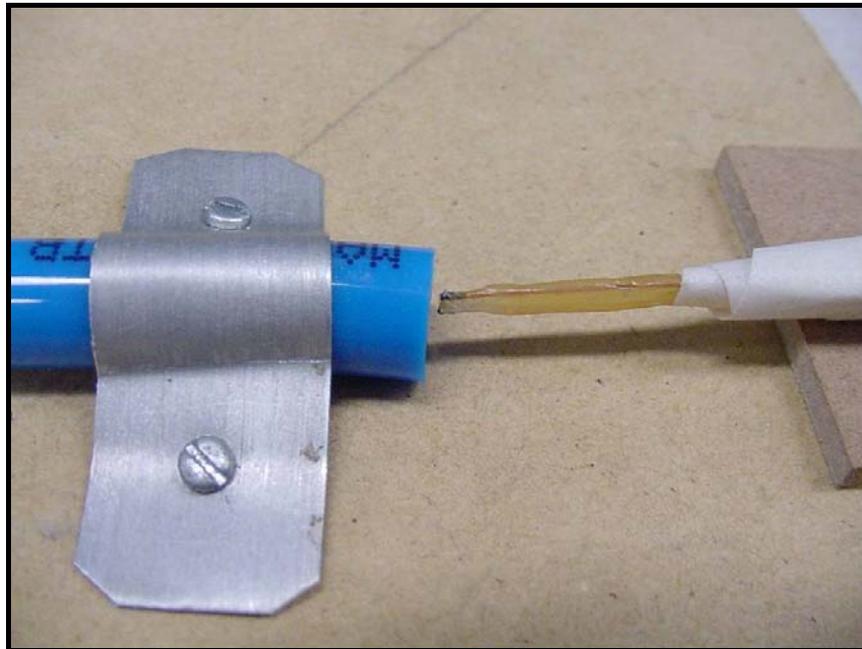


Figura 5.11 - Detalhe da sonda aspirante.

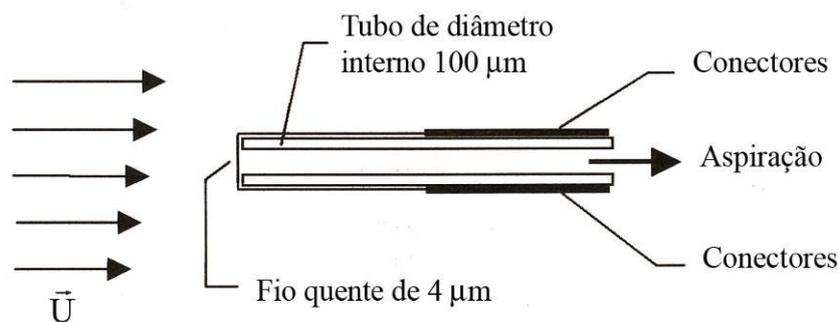


Figura 5.12 - Esquema da sonda aspirante (Camaño Schettini, 2000).

A vazão mássica aspirado pela sonda  $Q_{asp}$  segue o mesmo cálculo da seção de contração das condições sônicas quando a pressão a jusante é suficientemente baixa (Camaño Schettini, 1996):

$$Q_{asp} = \rho_i V_0 \frac{\pi d_i^2}{4} = \beta \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{\gamma}{RT_i}} P_i d_c^2, \quad (5.7)$$

sendo que,

$$\beta = \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}. \quad (5.8)$$

Na equação acima,  $V_0$  é a velocidade na entrada do tubo,  $d_t$  é o diâmetro do tubo e  $d_c$  é o diâmetro da seção de contração. A expressão para a velocidade é:

$$V_0 = \sqrt{\gamma RT_i} \beta C_{contr}, \quad (5.9)$$

e

$$C_{contr} = \left( \frac{d_c}{d_t} \right)^2, \quad (5.10)$$

que é o coeficiente de contração do fluido, estimado em 0,85 (usado para estimar o volume de aspiração nos ensaios).

A utilização da sonda aspirante como instrumento de medição de concentrações de poluentes pode ser encontrado em Wittwer (2006). Neste estudo, foram feitas análises de concentrações utilizando várias configurações de modelo: chaminé isolada, influência aerodinâmica de um cubo na dispersão da pluma e o uso de um modelo de uma região urbana para verificar os efeitos sobre a pluma.

## 5.2 Planejamento dos Ensaios

Os ensaios realizados consistiram na simulação em túnel de vento da dispersão de poluentes na atmosfera por meio de uma chaminé isolada. Os estudos tiveram como objetivo a avaliação do comportamento da pluma para diferentes tipos de terreno, velocidades de escoamento e emissão.

O modelo de chaminé terá uma altura de 25 cm, com um diâmetro interno de 2 cm, com uma escala de modelo de 1:300, sem distorções geométricas. Em escala real, a chaminé simulado equivale a um dispositivo de 75 m de altura, com um diâmetro interno de 6 m.

Quanto aos escoamentos simulados em túnel de vento de camada limite, estes estão de acordo com a NBR 6123 (1988). Os perfis de velocidades médias do vento seguem o perfil da lei potencial de expoente  $p = 0,11$  (categorias I e II) e  $p = 0,23$  (categorias III e IV). As características da rugosidade do terreno simuladas, exemplificadas na figura 5.13, são as seguintes:

- **Categoria I:** superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente. Exemplos: mar calmo; lagos e rios; pântanos sem vegetação.
- **Categoria II:** terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas. Exemplos: zonas costeiras planas; pântanos com vegetação rala; campos de aviação; pradarias e charnecas; fazendas sem sebes ou muros.
- **Categoria III** – terreno plano ou ondulado com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 3 m. Exemplos: granjas e casas de campo, com exceção das partes com matos; fazendas com sebes e/ou muros; subúrbios a considerável distância do centro, com casas baixas e esparsas.
- **Categoria IV** – terreno coberto por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada. A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 10 m. Esta categoria inclui também zonas com obstáculos maiores e que ainda não possam ser consideradas na Categoria V. Exemplos: zonas de parques e bosques com muitas árvores; cidades pequenas e seus arredores; subúrbios densamente construídos de grandes cidades; áreas industriais plena ou parcialmente desenvolvidas.

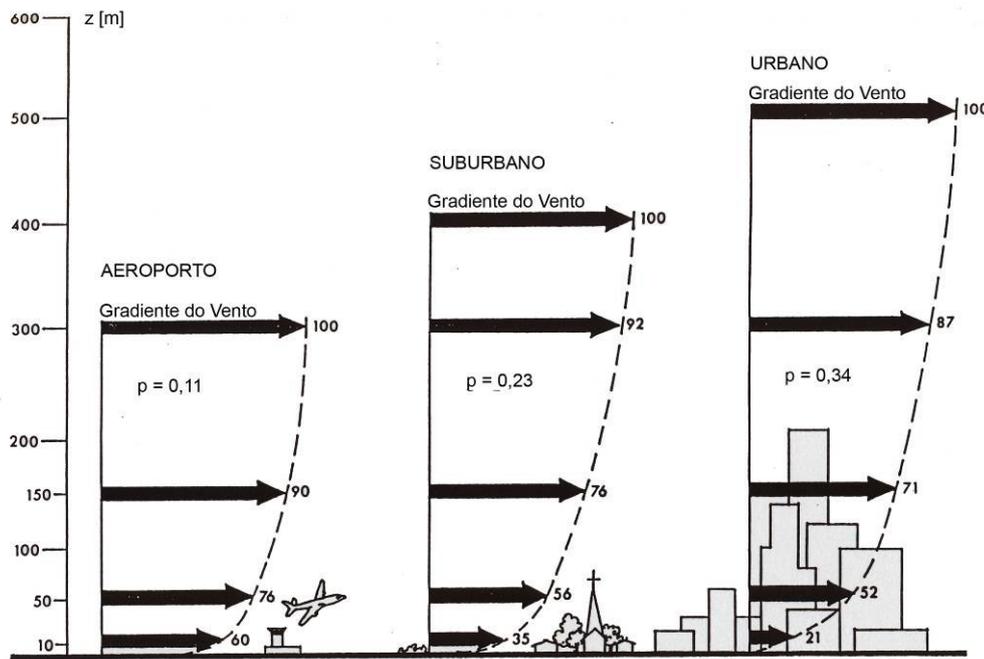
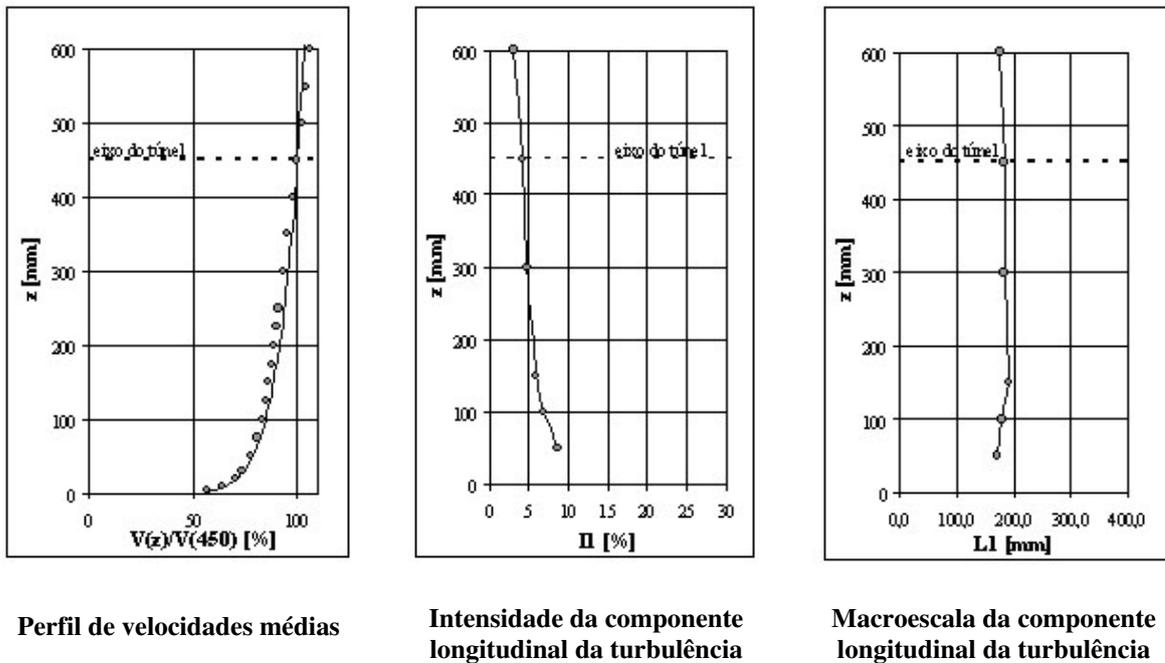


Figura 5.13 - Perfis de velocidade do vento característicos de cada terreno (Ramsay, 1992).

Os perfis de velocidade do vento, de intensidade da turbulência e da macroescala da turbulência, que representa a escala geométrica dos turbilhões, estão representadas nas figuras 5.14 e 5.16, além dos dispositivos necessários para a simulação em túnel (figuras 5.15 e 5.17).



Perfil de velocidades médias

Intensidade da componente longitudinal da turbulência

Macroescala da componente longitudinal da turbulência

Figura 5.14 - Características do perfil de velocidade do vento e turbulento simulado com expoente  $p = 0,11$ .

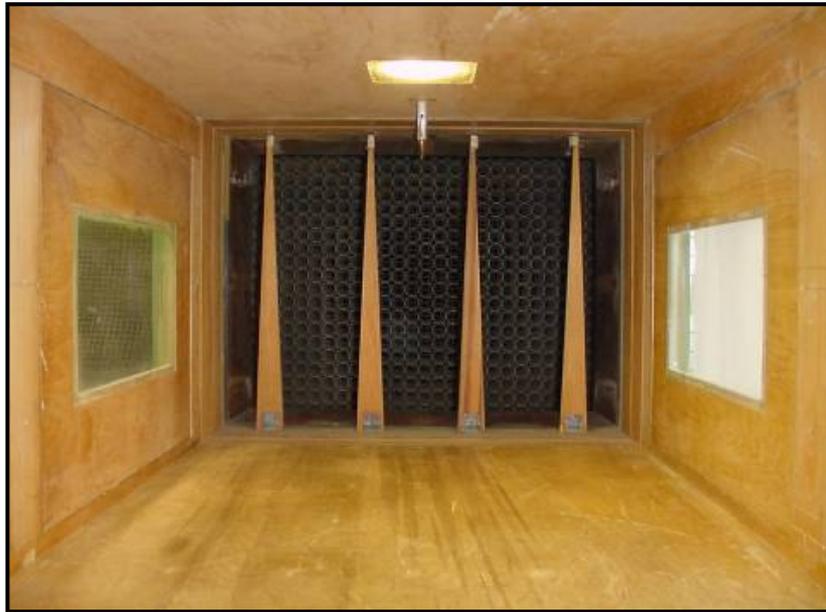
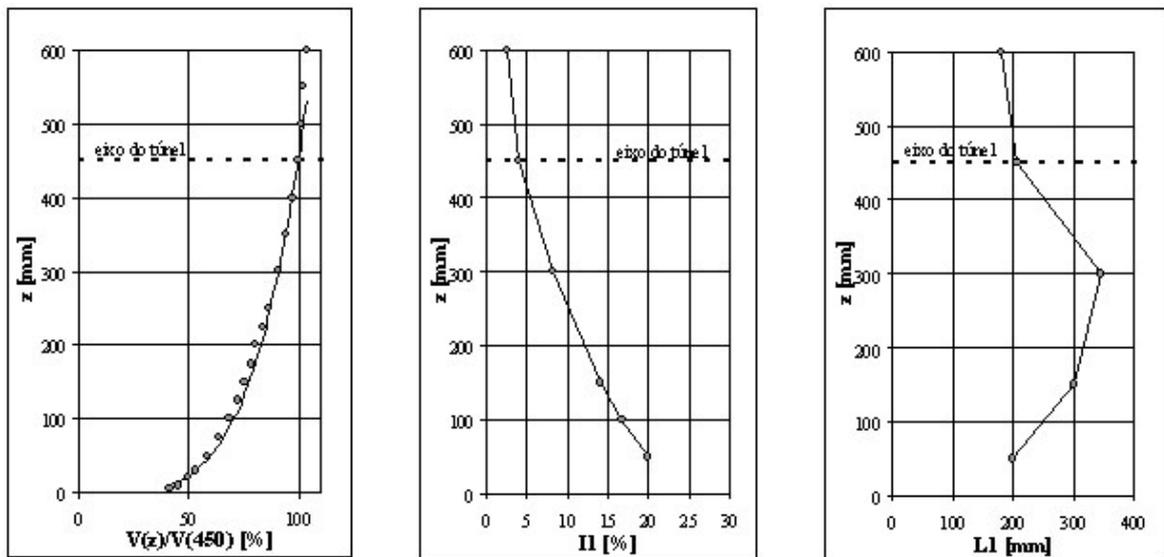


Figura 5.15 - Detalhe dos dispositivos utilizados para a simulação do escoamento para o perfil  $p = 0,11$ .



Perfil de velocidades médias

Intensidade da componente longitudinal da turbulência

Macroescala da componente longitudinal da turbulência

Figura 5.16 - Características do perfil de velocidade do vento e turbulento simulado com expoente  $p = 0,23$ .

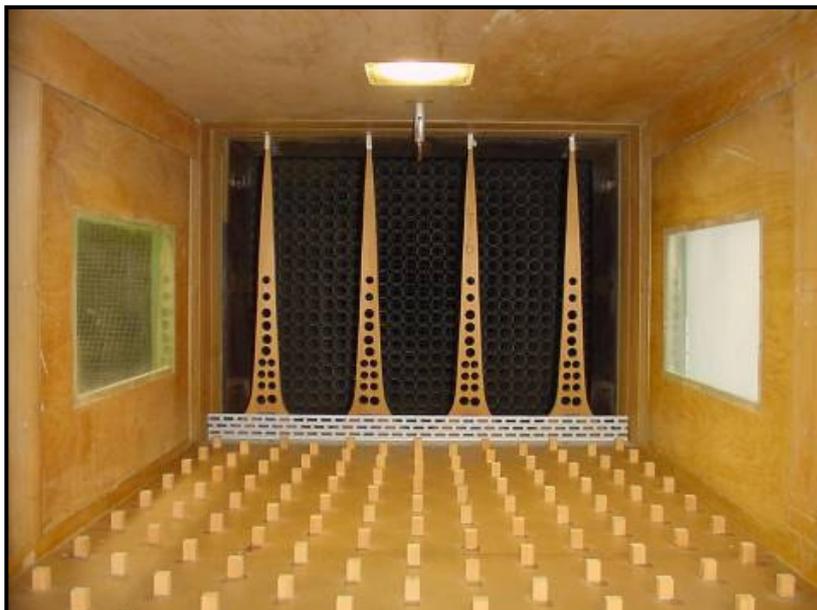


Figura 5.17 - Detalhe dos dispositivos utilizados para a simulação do escoamento para o perfil  $p = 0,23$ .

O regime de escoamento no túnel de vento será a baixas velocidades médias, para atender os requisitos necessários para a simulação da dispersão de poluentes. Foram duas velocidades do vento simuladas: a mais alta, numa faixa que fica entre 0,65 m/s e 0,70 m/s; e uma velocidade mais baixa, entre 0,30 m/s e 0,35 m/s. Estas velocidades foram medidas com o anemômetro de fio-quente *StreamLine* da *Dantec Dynamics*.

Foram simulados cinco velocidades de emissão. Duas utilizando hélio puro e três usando uma mistura binária hélio-ar. As propriedades do gás hélio mostraram-se adequadas para a simulação da dispersão de poluentes e tornou viável a utilização da sonda aspirante.

A pressão utilizada nos reguladores de pressão, para o gás hélio e para o ar, foi de 20 psi, aproximadamente 137,895 kPa. Esta pressão foi adotada para atender aos requisitos necessários para o bloqueio sônico (cálculo das relações entre a pressão a montante e a jusante) da placa-orifício, na seção 5.1.2.1 sobre o sistema de mistura de gases. A pressão a montante da placa (pressão de saída do cilindro de gás hélio) é a soma da pressão medida pelo regulador de pressão mais a pressão atmosférica (pressão absoluta). Desse modo o valor total da pressão a montante é de 237,87 kPa. A pressão a jusante é a pressão atmosférica, uma vez que o gás é emitido diretamente à atmosfera. Assumindo uma pressão atmosférica média durante os ensaios de 102,125 kPa, a relação entre as pressões fica:

$$\frac{P_{mont}}{P_{jus}} = \frac{237,870}{102,125} \cong 2,33. \quad (5.11)$$

Este valor fica acima do valor mínimo estabelecido na tabela 5.1, para o gás hélio e o ar. Desse modo, atende-se os requisitos para o bloqueio sônico da placa – orifício e permitir o uso das equações da seção 5.1.2.1 para o cálculo da vazão e velocidade de emissão.

Nas tabelas 5.3 e 5.4 abaixo, estão esquematizados os casos ensaios em túnel de vento simulando a dispersão de uma pluma de contaminantes realizada por uma chaminé isolada. A primeira tabela simula os efeitos de um perfil da lei potencial de velocidades médias do vento  $p = 0,11$  (categoria I e II), para diferentes emissões da pluma. Na tabela seguinte, compara-se o efeito da rugosidade do terreno categoria III e IV, para um perfil da lei potencial de velocidades médias do vento  $p = 0,23$ , com relação ao perfil  $p = 0,11$ .

**Tabela 5.3 - Resumo dos casos simulados em túnel de vento, para o perfil  $p = 0,11$ .**

Casos	U [m/s]	W <sub>s</sub> [m/s]	ρ <sub>emissão 20°C</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	C <sub>hélio</sub> [%]
a	0,67	0,70	0,168	100,0
b		1,18	0,168	100,0
c		0,94	0,439	74,1
d		1,11	0,556	62,8
e		1,42	0,347	82,8
f	0,33	0,70	0,168	100,0
g		1,18	0,168	100,0
h		0,94	0,439	74,1
i		1,11	0,556	62,8
j		1,42	0,347	82,8

Tabela 5.4 - Resumo dos casos simulados em túnel de vento, para o perfil  $p = 0,23$ .

Casos	U [m/s]	$W_s$ [m/s]	$\rho_{\text{emissão } 20^\circ\text{C}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_{\text{hélio}}$ [%]
k	0,67	0,70	0,168	100,0
l		1,18	0,168	100,0
m		0,94	0,439	74,1
n	0,33	0,70	0,168	100,0
o		1,18	0,168	100,0
p		0,94	0,439	74,1

Para evitar a contaminação do escoamento durante as medições, abriu-se o circuito do túnel, permitindo que o ar contaminado com gás hélio saísse do túnel de vento e que houvesse a renovação do ar que entrava no túnel. A abertura foi benéfica, não só por permitir a renovação do ar, mas também por diminuir a velocidade do escoamento no túnel de vento, ideal para a simulação da dispersão de poluentes.

## 6 SIMULAÇÃO DA DISPERSÃO DE POLUENTES

Os resultados apresentados a seguir se referem aos ensaios realizados em túnel de vento, com a simulação da dispersão de uma pluma de contaminantes por meio de uma chaminé isolada. Antes, é apresentada a curva de calibração da sonda, necessário para a transformação de dados de tensão elétrica em valores de concentração de hélio.

### 6.1 *Curva de Calibração da Sonda Aspirante*

Antes da realização de qualquer simulação, em túnel de vento, da dispersão de poluentes, é necessária a realização da calibração da sonda. A calibração consiste na utilização de uma série de combinações de diâmetros de placas-orifícios no sistema de mistura de gases, com um jato de gás sobre a sonda aspirante. O jato incidente sobre a sonda aspirante constitui uma mistura binária de ar e hélio. Conhecendo o valor da tensão marcado pelo anemômetro para a faixa que varia de 0% de concentração de hélio (jato de ar) até 100% de concentração de hélio (jato de hélio puro), e as frações de hélio na mistura binária ar-hélio, traça-se uma curva em função da concentração e do valor da tensão marcada pelo anemômetro.

A curva de calibração foi montada com relação à variação da tensão medida, ou seja, diferença entre a tensão medida e a tensão-zero do equipamento (tensão para 0 % de hélio) pela concentração de hélio. Isto foi necessário devido às variações do valor da tensão-zero do equipamento, que era diferente do valor da tensão-zero da calibração e variava a cada e durante novos ensaios.

As tabelas 6.1 e 6.2 mostram a concentração de hélio, de acordo com a combinação das placas-orifício no sistema de mistura binária de ar e gás hélio. As concentrações apresentadas estão em termos de concentrações mássicas e volumétricas. As concentrações variam do valor zero (0 % de concentração de hélio) a um (100 % de concentração de hélio). As concentrações foram calculadas utilizando as equações apresentadas no Capítulo 4 e os valores de pressão foram obtidos dos reguladores de pressão, utilizados para o gás hélio e o ar. O esquema da calibração é apresentado na figura 6.1.

Tabela 6.1 - Concentrações mássicas e volumétricas de hélio com ar, no sistema de mistura de gases. Os valores de concentração variam de zero (0 % de hélio) a um (100 % de hélio) na mistura, de acordo com o diâmetro de orifício utilizado.

Diâmetro [mm]		Ar													
		0,50		0,65		0,75		0,90		1,00		1,25		1,50	
		conc mássica	conc vol.												
Hélio	0,50	0,283	0,741	0,189	0,628	0,149	0,559	0,109	0,468	0,090	0,416	0,059	0,314	0,042	0,241
	0,65	0,400	0,828	0,283	0,741	0,229	0,682	0,171	0,598	0,400	0,547	0,096	0,436	0,069	0,349
	0,75	0,470	0,865	0,344	0,792	0,283	0,741	0,215	0,665	0,182	0,616	0,124	0,507	0,090	0,416
	0,90	0,561	0,902	0,431	0,846	0,362	0,804	0,283	0,741	0,242	0,698	0,170	0,597	0,124	0,507
	1,00	0,612	0,919	0,483	0,871	0,412	0,835	0,328	0,779	0,283	0,741	0,202	0,646	0,149	0,559
	1,25	0,711	0,947	0,593	0,913	0,523	0,888	0,432	0,846	0,381	0,817	0,283	0,741	0,215	0,665
	1,50	0,780	0,963	0,678	0,938	0,612	0,919	0,523	0,888	0,470	0,865	0,362	0,804	0,283	0,741

Tabela 6.2 - Concentrações mássicas e volumétricas de hélio com ar, no sistema de mistura de gases. Os valores de concentração variam de zero (0 % de hélio) a um (100 % de hélio) na mistura, de acordo com o diâmetro de orifício utilizado.

Diâmetro [mm]		Ar					
		1,50+1,50+1,00		1,50+1,50		1,50+1,00	
		conc mássica	conc vol	conc mássica	conc vol	conc mássica	conc vol
<b>Hélio</b>	<b>0,50</b>	0,018	0,115	0,021	0,137	0,029	0,180
	<b>0,65</b>	0,029	0,180	0,036	0,211	0,049	0,271
	<b>0,75</b>	0,039	0,226	0,047	0,263	0,064	0,331
	<b>0,90</b>	0,055	0,296	0,066	0,339	0,090	0,416
	<b>1,00</b>	0,067	0,342	0,081	0,388	0,108	0,468
	<b>1,25</b>	0,101	0,448	0,120	0,498	0,159	0,579
	<b>1,50</b>	0,139	0,539	0,165	0,588	0,215	0,664

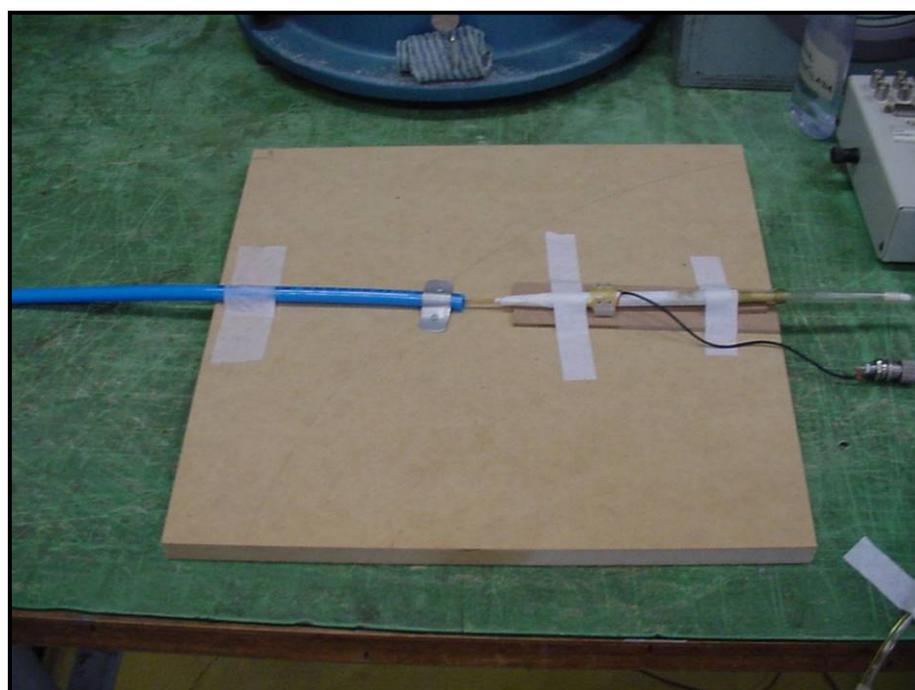


Figura 6.1 - Detalhe da calibração da sonda aspirante.

A seguir são apresentadas as curvas de calibração (figuras 6.2 e 6.3) obtidas com as tensões medidas com a sonda aspirante, em termos de concentrações mássicas e volumétricas. A curva ajustada para os pontos foi um polinômio de 4ª ordem, por apresentar um valor de correlação maior do que qualquer outro tipo de equação (polinômio de 2ª ordem, linear, exponencial ou logarítmica).

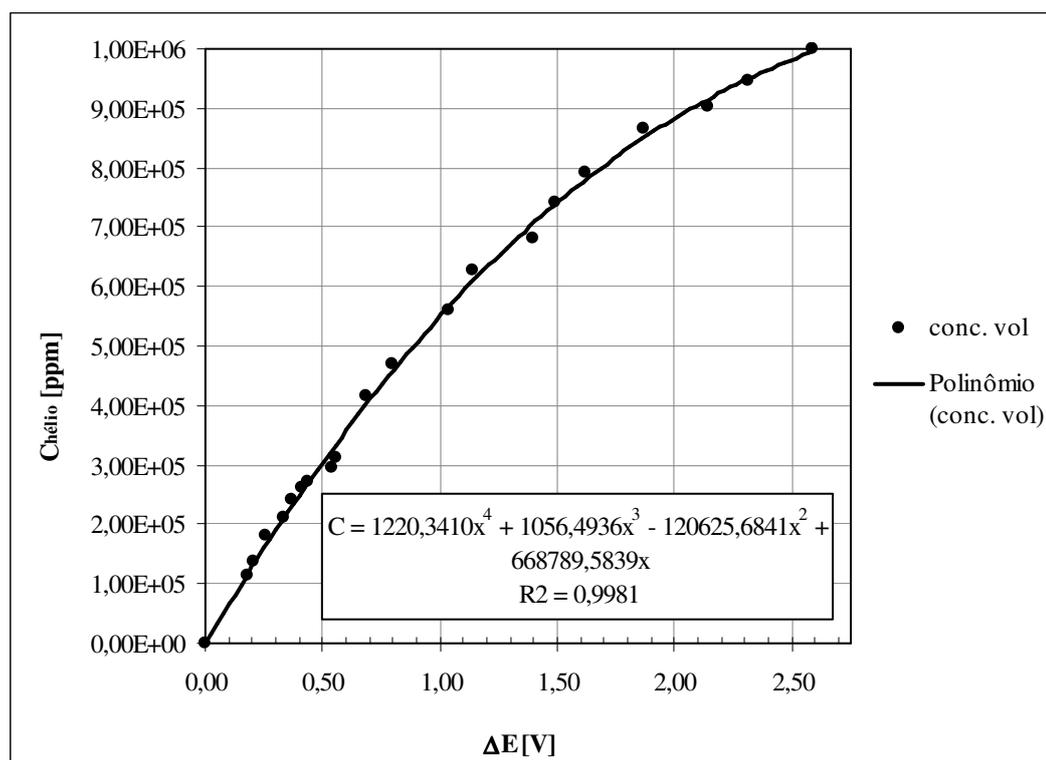


Figura 6.2 - Curva de calibração para concentrações volumétricas.

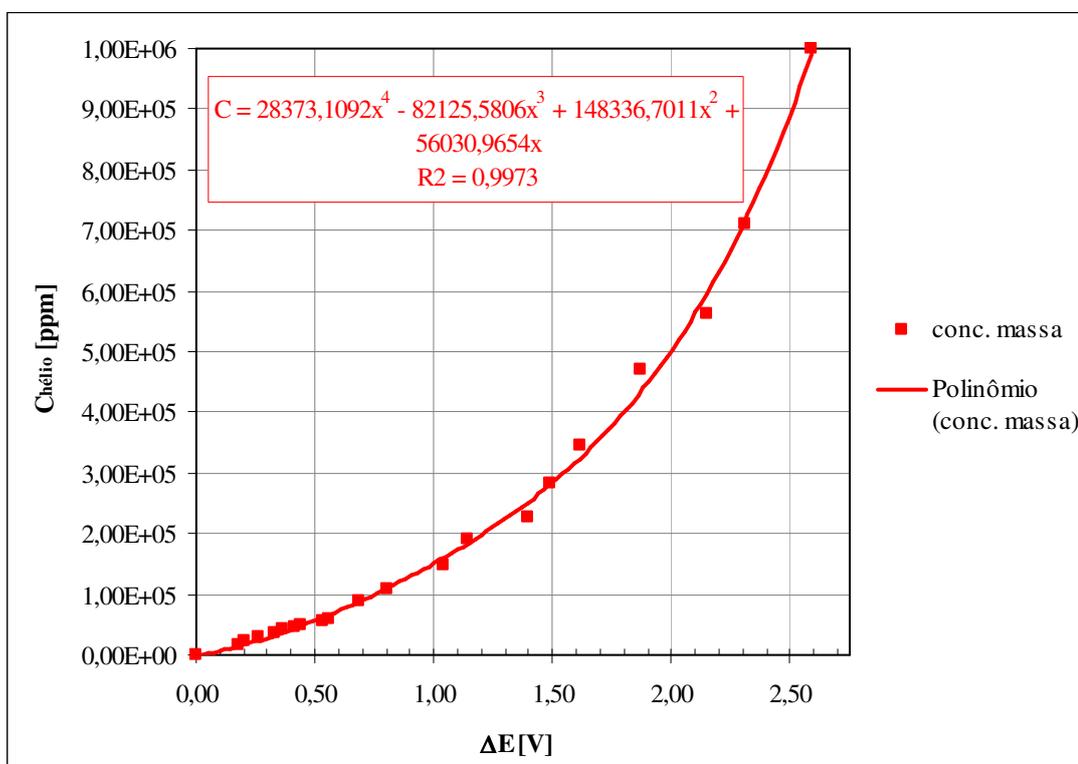


Figura 6.3 - Curva de calibração para concentrações mássicas.

## 6.2 Ensaios de Emissão de uma Pluma por uma Chaminé Isolada

A seguir são apresentados os resultados das simulações, realizadas em túnel de vento, da dispersão de uma pluma de contaminantes emitidos por uma chaminé isolada (figuras 6.4, 6.5 e 6.6). Para o cálculo dos valores para a construção das curvas de concentração média e flutuante da pluma, foi utilizada a equação de calibração 4ª ordem de concentrações volumétricas, apresentada na figura 6.2. O motivo que levou à utilização da equação para concentrações volumétricas foi um maior erro apresentado pelos valores calculados para o polinômio de 4ª ordem de concentrações mássicas. Nas tabelas 6.3 e 6.4, são apresentados os erros calculados entre as concentrações de hélio aspiradas pela sonda aspirante e os valores fornecidos pela equação da curva de calibração.

Tabela 6.3 - Erro calculado para concentrações volumétricas entre a concentração de hélio aspirada pela sonda e o valor fornecido pelo polinômio de 4ª ordem.

Concentração volumétrica aspirado pela sonda na calibração [ppm]	Valor dado pelo polinômio de 4ª ordem (curva de calibração) [ppm]	Erro do polinômio de 4ª ordem para concentrações volumétricas
0	0	-
114863	113977	-0,77%
136894	131424	-4,00%
180065	166361	-7,61%
211384	208796	-1,22%
240821	229273	-4,80%
263007	256885	-2,33%
270679	271614	0,35%
295998	324620	9,67%
313558	337535	7,65%
416477	403141	-3,20%
468409	458872	-2,04%
559248	567688	1,51%
628156	610496	-2,81%
681970	707466	3,74%
740591	738870	-0,23%
791707	779459	-1,55%
865294	850652	-1,69%
902438	916027	1,51%
946931	949381	0,26%
1000000	996415	-0,36%

**Tabela 6.4 - Erro calculado para concentrações mássicas entre a concentração de hélio aspirada pela sonda e o valor fornecido pelo polinômio de 4ª ordem.**

Concentração mássica aspirado pela sonda na calibração [ppm]	Valor dado pelo polinômio de 4ª ordem (curva de calibração) [ppm]	Erro do polinômio de 4ª ordem para concentrações mássicas
0	0	-
17615	14036	-20,32%
21446	16955	-20,94%
29451	23400	-20,55%
35715	32292	-9,58%
41991	36998	-11,89%
46993	43772	-6,86%
48781	47588	-2,45%
54907	62506	13,84%
59370	66428	11,89%
89768	88195	-1,75%
108539	109334	0,73%
149173	159526	6,94%
189248	183629	-2,97%
228575	252829	10,61%
282889	281642	-0,44%
344349	325953	-5,34%
470224	433416	-7,83%
561044	593495	5,78%
711444	718207	0,95%
1000000	991224	-0,88%



Figura 6.4 - Detalhe da instrumentação utilizada e do modelo usado para os ensaios.



Figura 6.5 - Visão parcial da seção de trabalho. Ao fundo, os ventiladores utilizados para a geração do vento a baixas velocidades.



Figura 6.6 - Vista lateral do modelo e da instrumentação utilizada.

### 6.2.1 Evolução da Pluma

Os gráficos apresentados mostram a evolução da pluma para diferentes velocidades de emissão e do escoamento, para concentrações volumétricas. É mostrada a evolução da pluma, em termos de concentrações médias (figura 6.7), concentrações médias adimensionais (figura 6.8) e intensidade das flutuações de concentrações (figura 6.9), para uma velocidade de emissão de aproximadamente 0,70 m/s e duas velocidades do escoamento, de 0,69 m/s (caso *a*) e 0,33 m/s (caso *f*). Os valores  $z/h$  e  $C/C_0$  são adimensionais;  $z/h$  obtém-se dividindo a altura de medição da concentração da pluma pela altura da chaminé (altura de referência);  $C/C_0$  é a relação entre a concentração média de hélio, em um ponto do perfil vertical da pluma, pela concentração de hélio emitida pela chaminé. O perfil da lei potencial de velocidades do vento, simulados para os casos a seguir, é o 0,11.

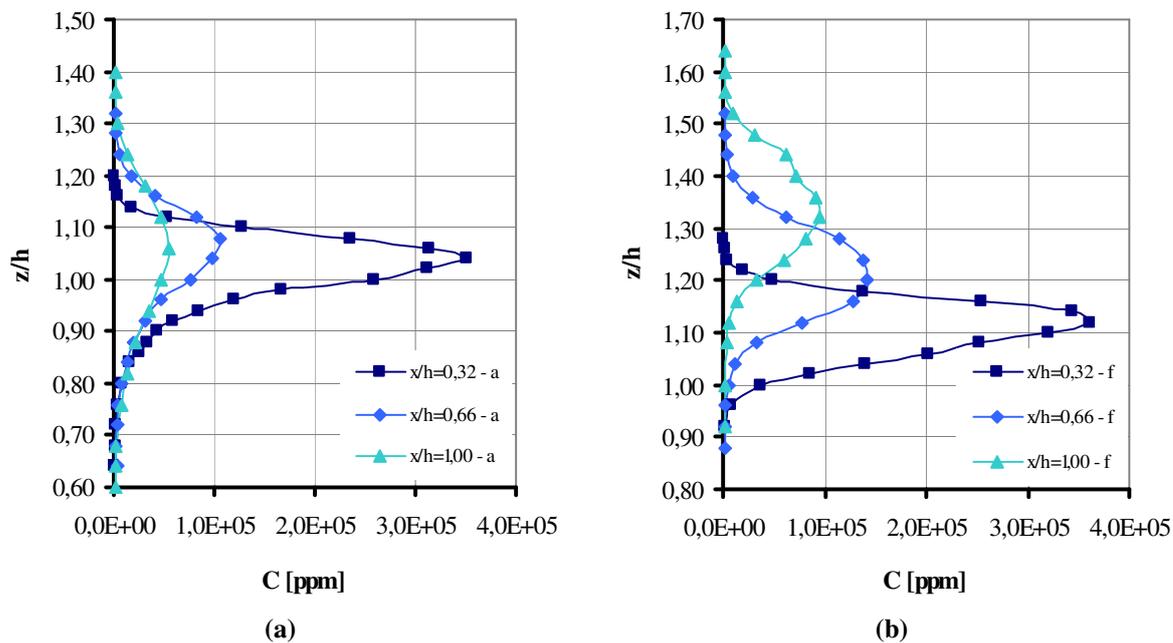


Figura 6.7 - Perfis verticais de concentrações de hélio para  $W_s = 0,70$  m/s: (a) Caso a:  $U = 0,67$  m/s. (b) Caso f:  $U = 0,33$  m/s.

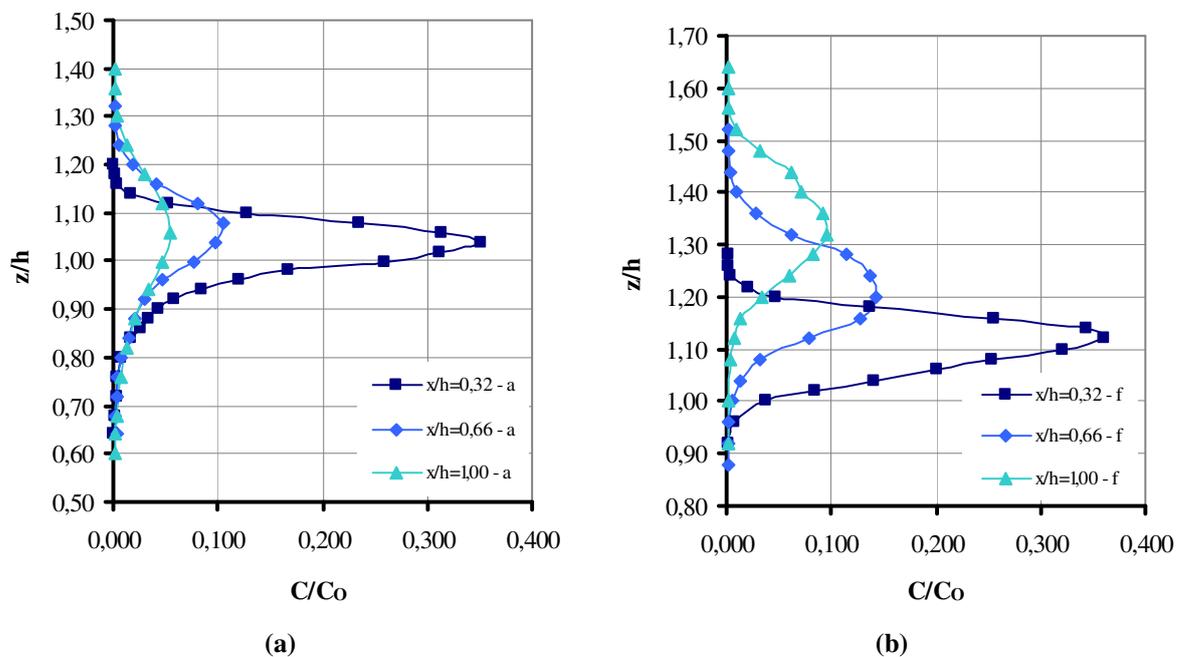


Figura 6.8 - Perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para  $W_s = 0,70$  m/s: (a) Caso a:  $U = 0,67$  m/s. (b) Caso f:  $U = 0,33$  m/s.

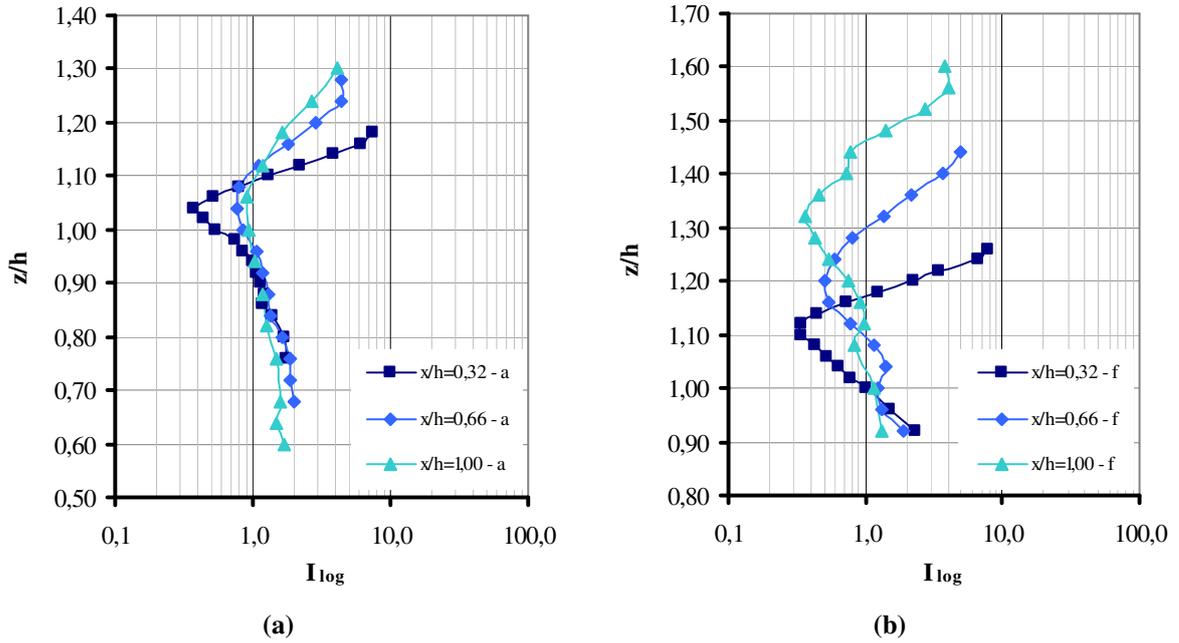


Figura 6.9 - Intensidade das flutuações de concentrações de hélio para  $W_s = 0,70$  m/s: (a) Caso a:  $U = 0,67$  m/s. (b) Caso f:  $U = 0,33$  m/s.

Nas figuras 6.10, 6.11 e 6.12 são apresentados os valores de concentração e intensidade das flutuações para uma velocidade média de emissão de 1,18 m/s e velocidades médias de escoamento de 0,67 m/s (caso b) e 0,33 m/s (caso g).

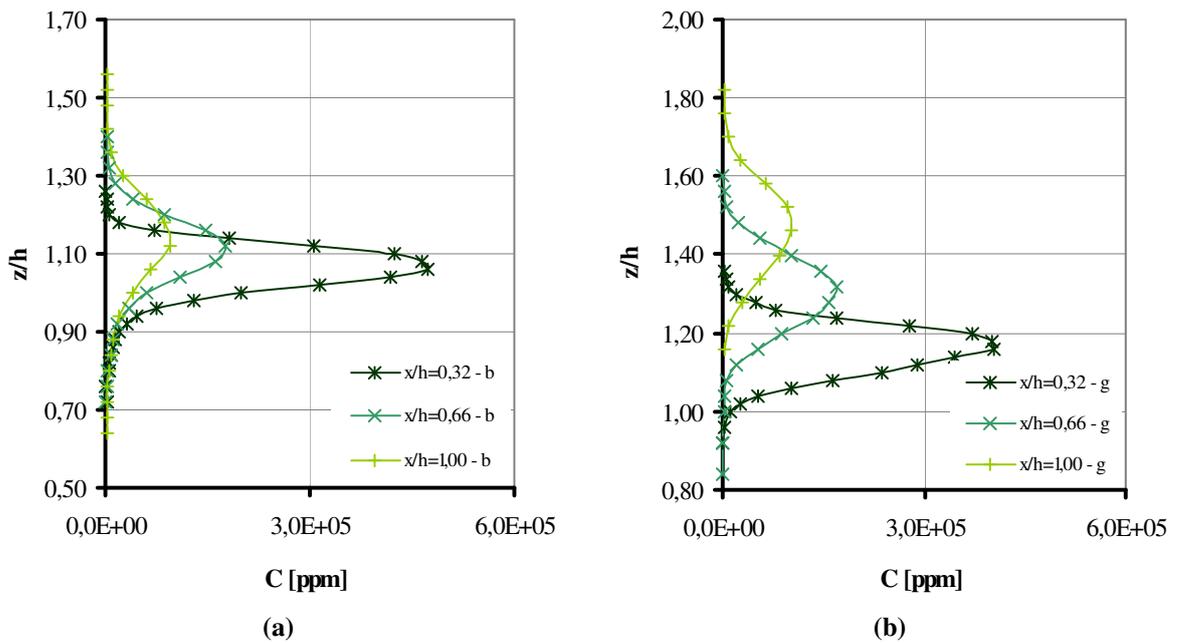


Figura 6.10 - Perfis verticais de concentrações de hélio para  $W_s = 1,18$  m/s: (a) Caso b:  $U = 0,67$  m/s. (b) Caso g:  $U = 0,33$  m/s.

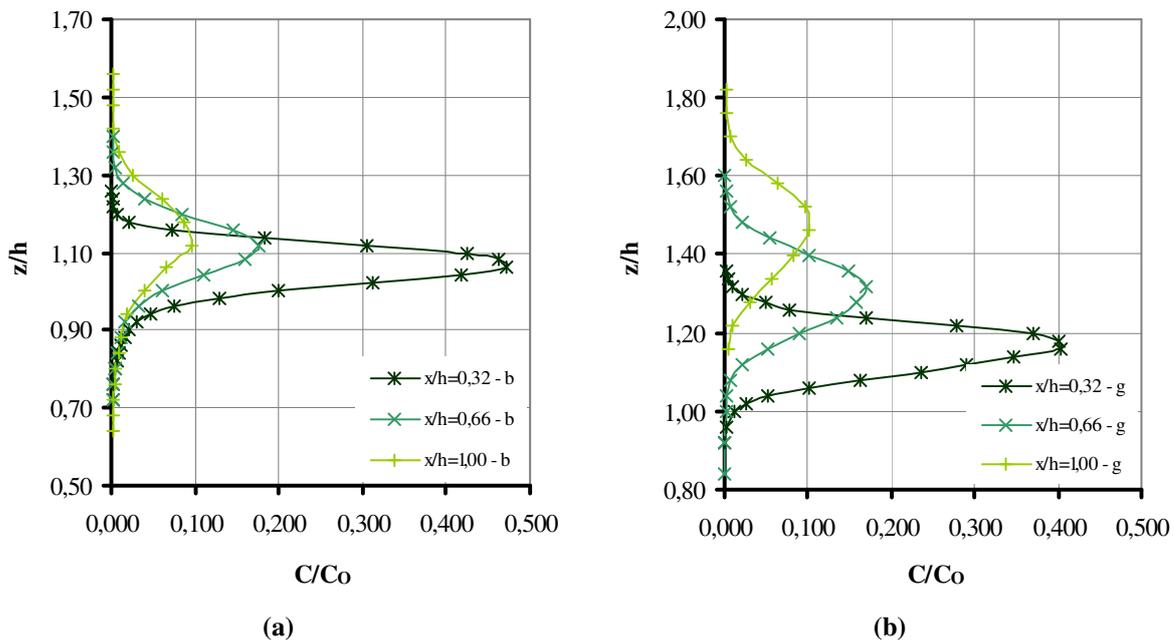


Figura 6.11 - Perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para  $W_s = 1,18$  m/s: (a) Caso b:  $U = 0,67$  m/s. (b) Caso g:  $U = 0,33$  m/s.

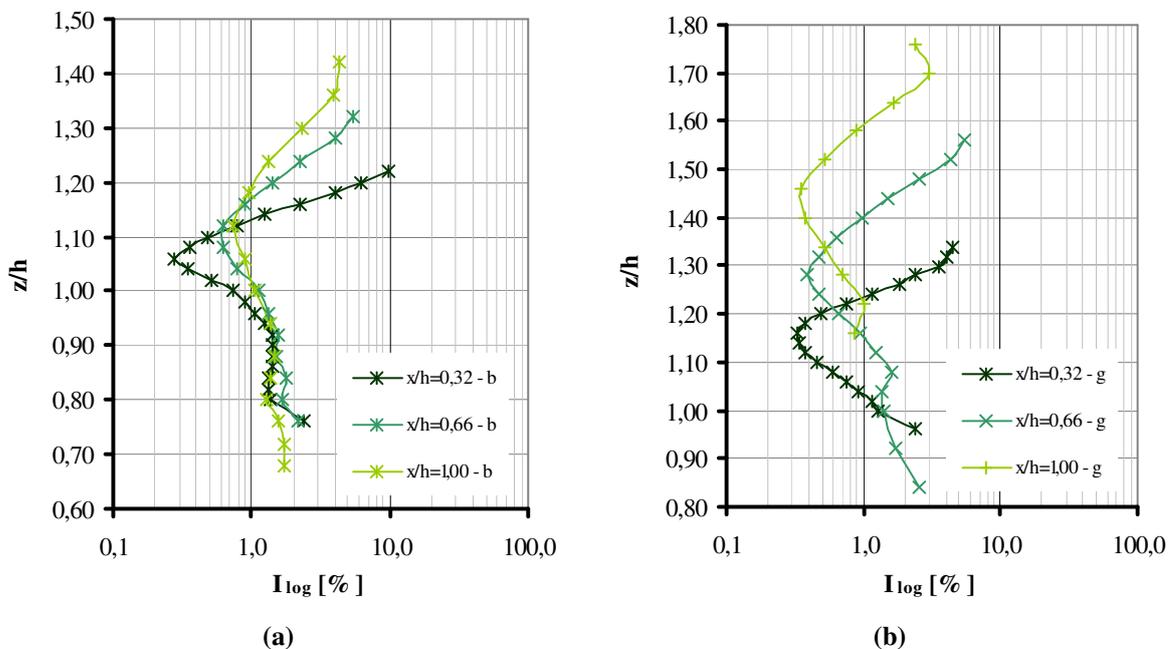


Figura 6.12 - Intensidade das flutuações de concentrações de hélio para  $W_s = 1,18$  m/s: (a) Caso b:  $U = 0,67$  m/s. (b) Caso g:  $U = 0,33$  m/s.

As figuras 6.13, 6.14 e 6.15 apresentam os valores de concentração e intensidade das flutuações para uma mistura binária de hélio e ar. Aproximadamente 74 % do volume total emitido pela chaminé foram de gás hélio. A velocidade média de emissão foi de 0,94 m/s e as velocidades médias do escoamento de 0,65 m/s (caso *c*) e 0,32 m/s (caso *h*).

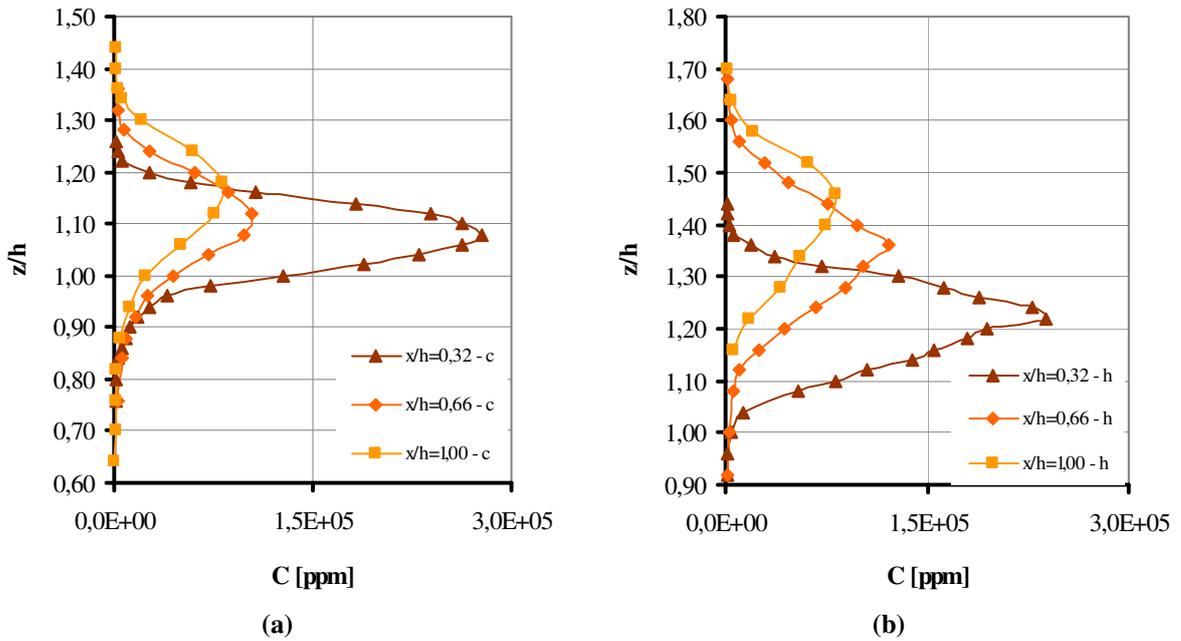


Figura 6.13 - Perfis verticais de concentrações de hélio para  $W_s = 0,95$  m/s: (a) Caso c:  $U = 0,67$  m/s. (b) Caso h:  $U = 0,33$  m/s.

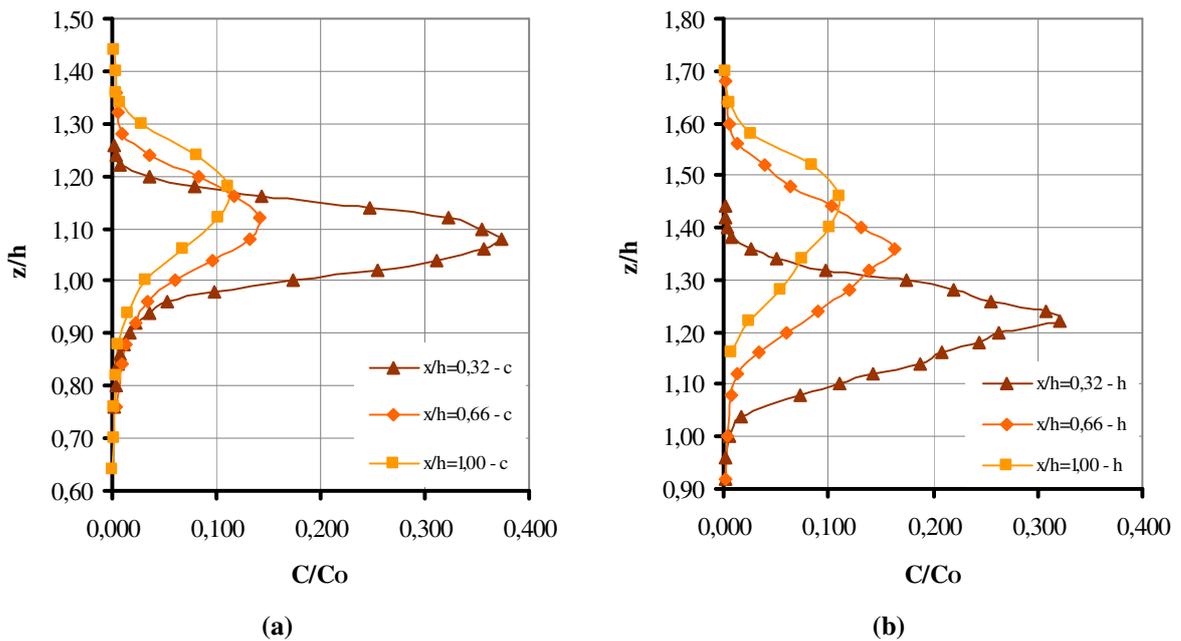


Figura 6.14 - Perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para  $W_s = 0,95$  m/s: (a) Caso c:  $U = 0,67$  m/s. (b) Caso h:  $U = 0,33$  m/s.

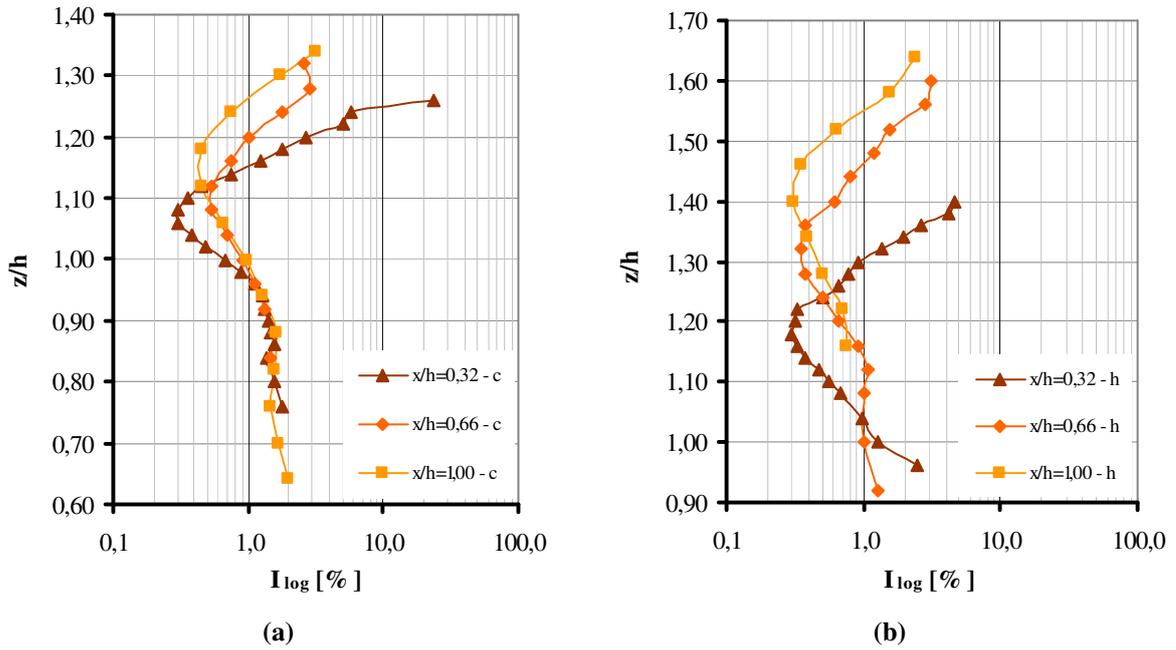


Figura 6.15 - Intensidade das flutuações de concentrações de hélio para  $W_s = 0,95$  m/s: (a) Caso c:  $U = 0,67$  m/s. (b) Caso h:  $U = 0,33$  m/s.

Também nas figuras 6.16, 6.17 e 6.18 são apresentados os valores de concentração e intensidade das flutuações para uma mistura binária de hélio e ar. Neste caso, 63 % do volume total emitido pela chaminé foram de gás hélio. A velocidade média de emissão e do escoamento são 1,11 m/s, 0,63 m/s (caso d) e 0,31 m/s (caso i), respectivamente.

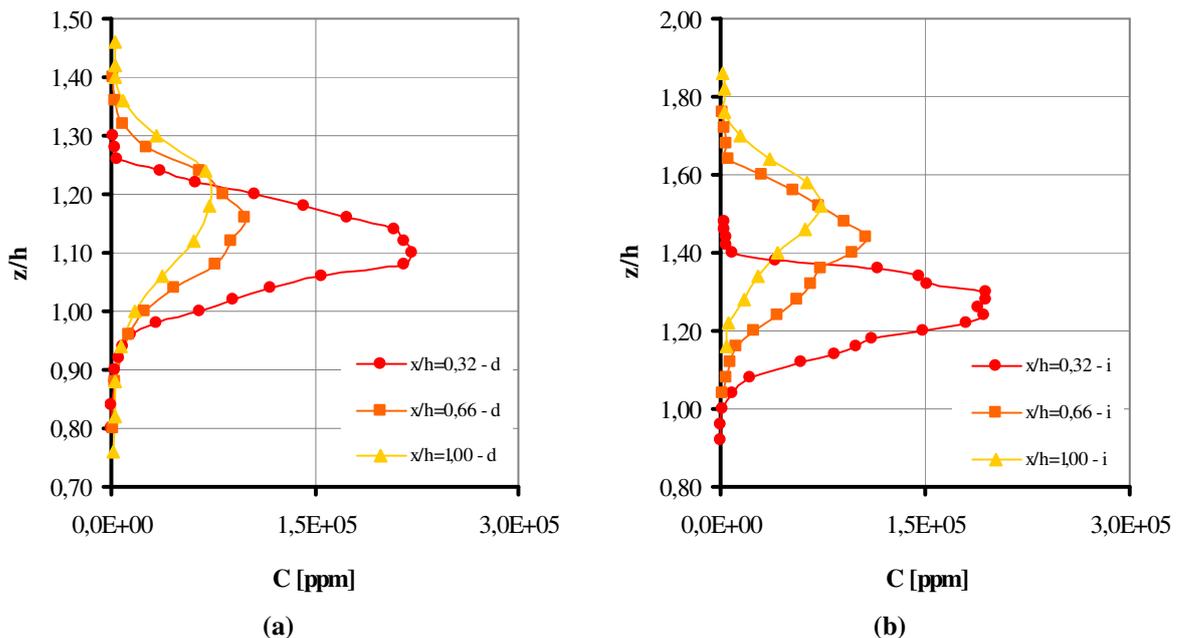


Figura 6.16 - Perfis verticais de concentrações de hélio para  $W_s = 1,12$  m/s: (a) Caso c:  $U = 0,67$  m/s. (b) Caso h:  $U = 0,33$  m/s.

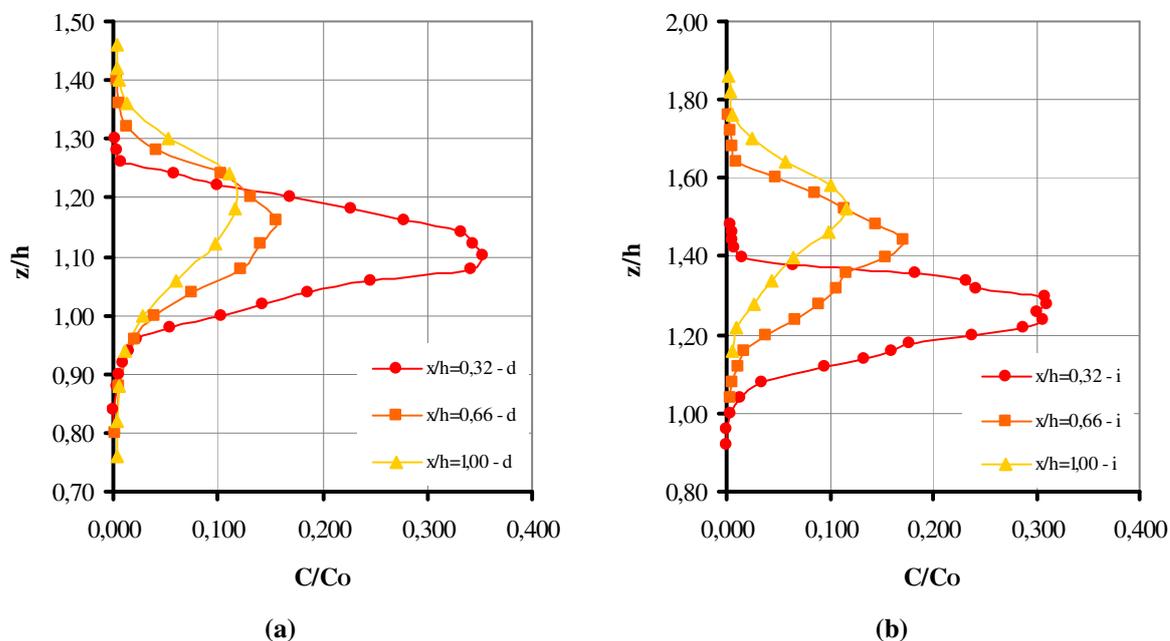


Figura 6.17 - Perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para  $W_s = 1,12$  m/s: (a) Caso c:  $U = 0,67$  m/s. (b) Caso h:  $U = 0,33$  m/s.

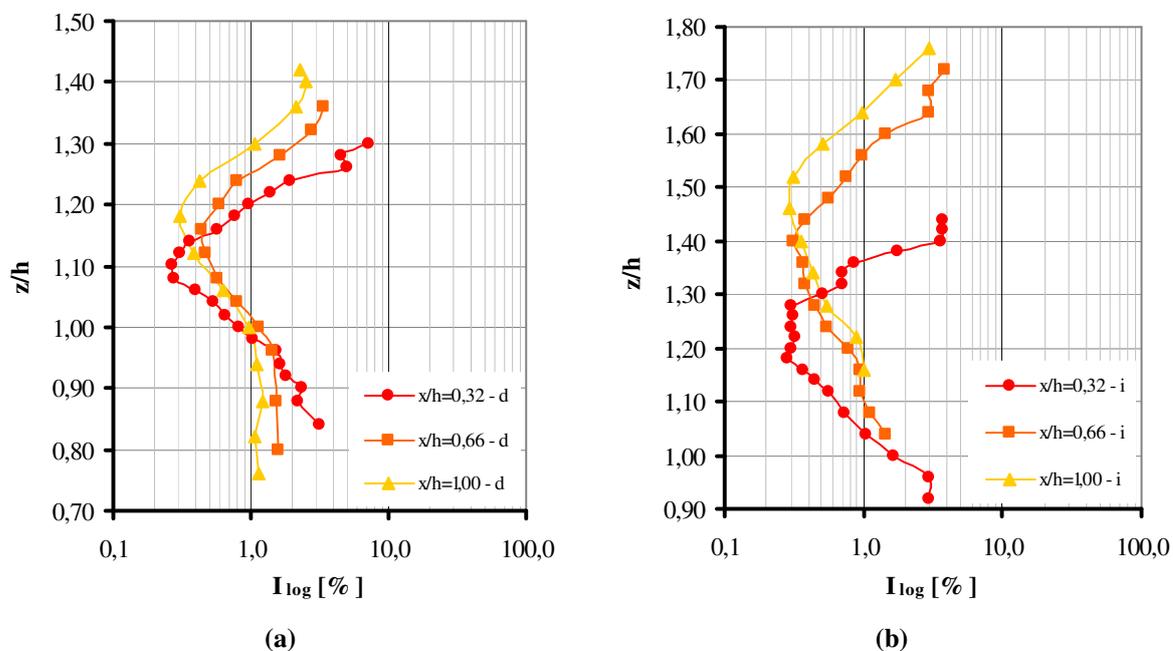


Figura 6.18 - Intensidade das flutuações de concentrações de hélio para  $W_s = 1,12$  m/s: (a) Caso c:  $U = 0,67$  m/s. (b) Caso h:  $U = 0,33$  m/s.

Nas figuras 6.19, 6.20 e 6.21, para os valores de concentração e intensidade das flutuações de concentrações para uma mistura binária de hélio e ar, 83 % do volume total emitido pela chaminé foi de gás hélio (mistura binária). A velocidade média de emissão e do escoamento são 1,42 m/s, 0,67 m/s (caso *e*) e 0,32 m/s (caso *j*), respectivamente.

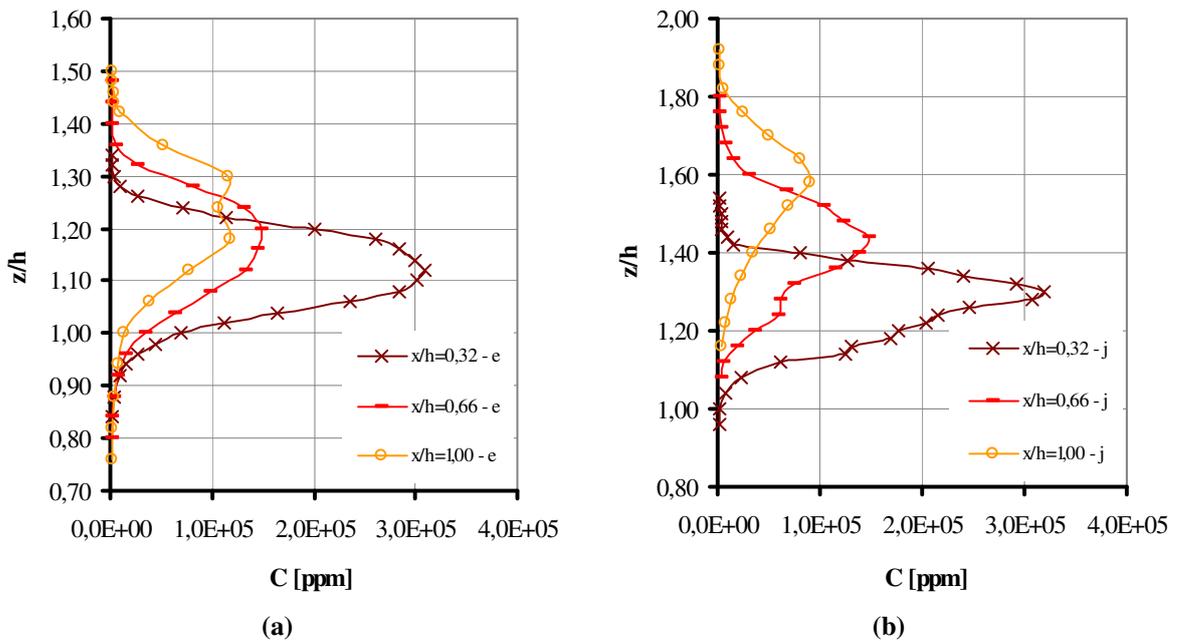


Figura 6.19 - Perfis verticais de concentrações de hélio para  $W_s = 1,43$  m/s: (a) Caso c:  $U = 0,67$  m/s. (b) Caso h:  $U = 0,33$  m/s.

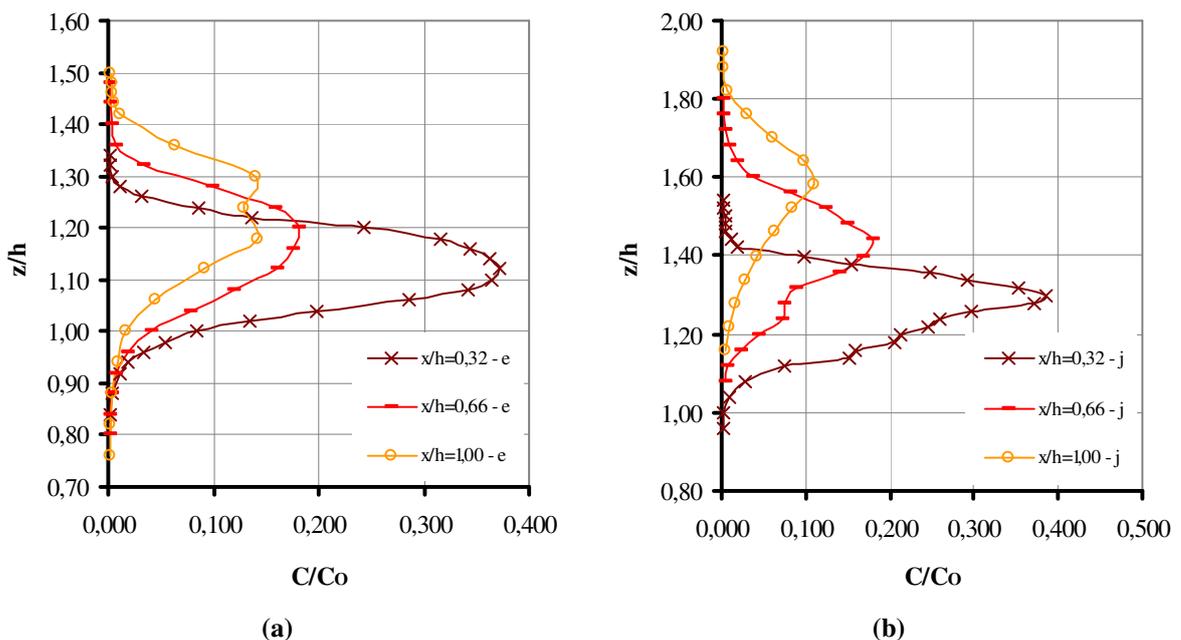


Figura 6.20 - Perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para  $W_s = 1,12$  m/s: (a) Caso c:  $U = 0,67$  m/s. (b) Caso h:  $U = 0,33$  m/s.

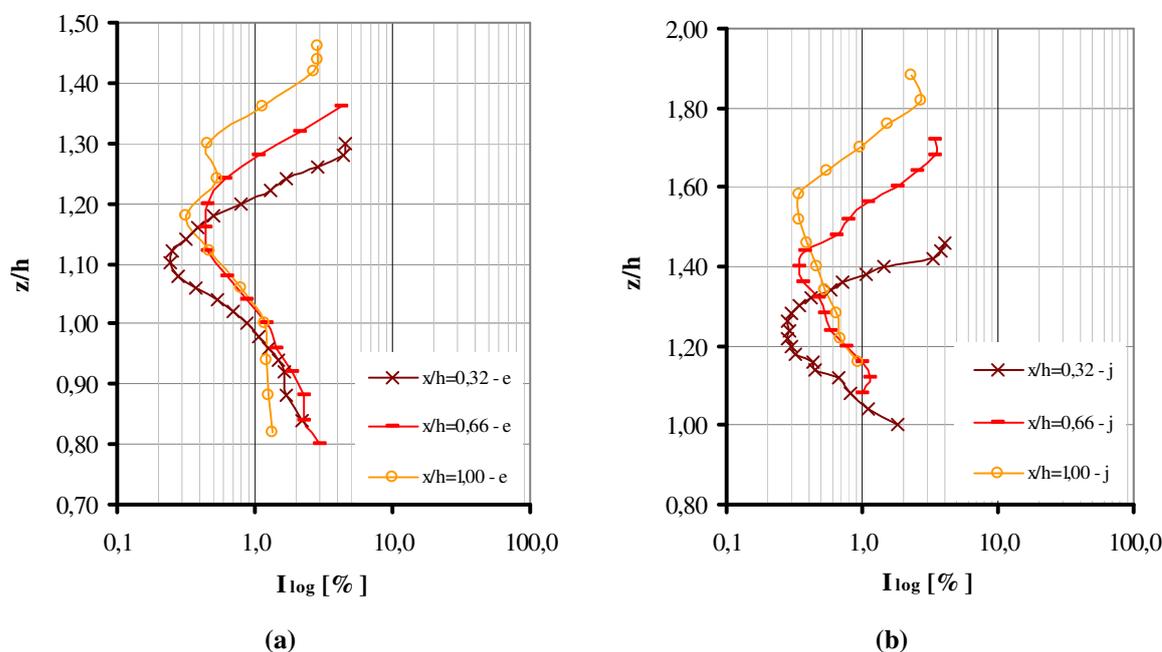


Figura 6.21 -Intensidade das flutuações de concentrações de hélio para  $W_s = 1,12$  m/s: (a) Caso c:  $U = 0,67$  m/s. (b) Caso h:  $U = 0,33$  m/s.

## 6.2.2 Resultados Comparativos para Diferentes Velocidades de Emissão

### 6.2.2.1 Perfil da Lei Potencial de Velocidades Médias do Vento 0,11

As figuras a seguir apresentam curvas comparativas, para uma mesma distância a sotavento da chaminé, para diferentes velocidades médias de emissão. São apresentadas curvas em termos de concentrações médias, concentrações médias adimensionais e intensidade da concentração.

Nas figuras 6.22, 6.23 e 6.24 abaixo, são mostrados os resultados comparativos para uma distância adimensional  $x/h$  igual a 0,32, sendo  $x$  a distância a sotavento da chaminé e  $h$  a altura da chaminé (altura de referência), para uma velocidade média do escoamento de 0,67 m/s.

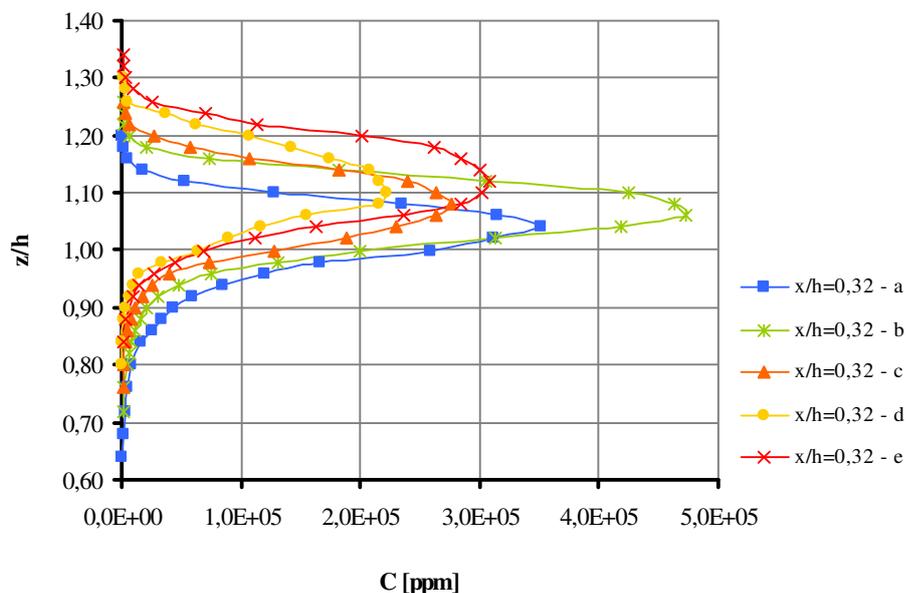


Figura 6.22 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,67$  m/s,  $p = 0,11$ ,  $x/h = 0,32$ ).

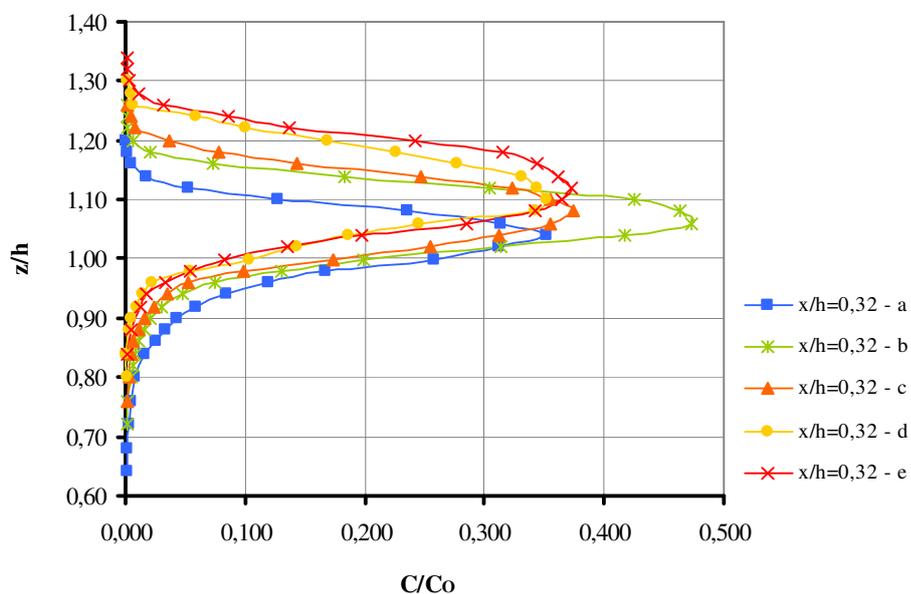


Figura 6.23 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,67$  m/s,  $p = 0,11$ ,  $x/h = 0,32$ ).

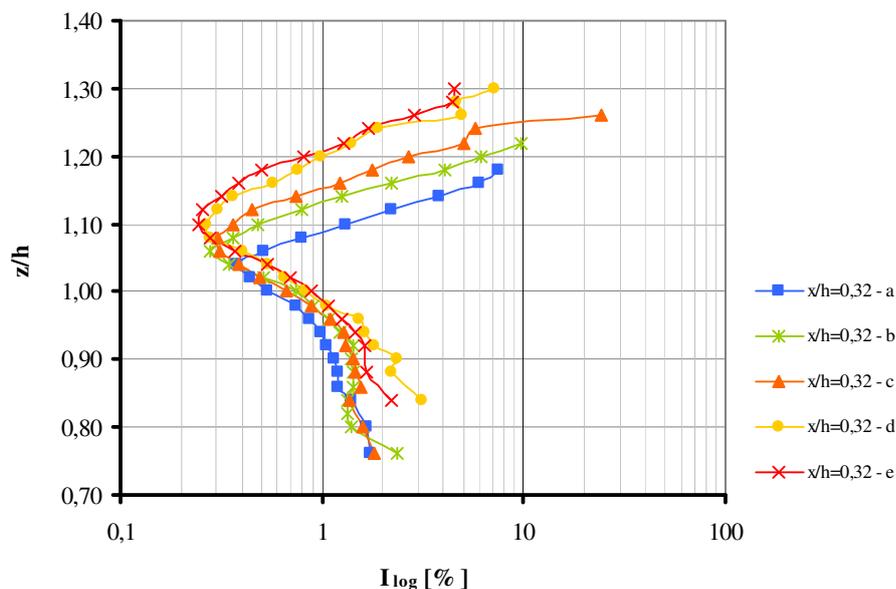


Figura 6.24 - Curvas comparativas entre as intensidades das flutuações de concentrações de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,67$  m/s,  $p = 0,11$ ,  $x/h = 0,32$ ).

As figuras 6.25, 6.26 e 6.27 mostram os resultados comparativos para uma distância adimensional  $x/h$  igual a 0,32, para uma velocidade média do escoamento de 0,33 m/s.

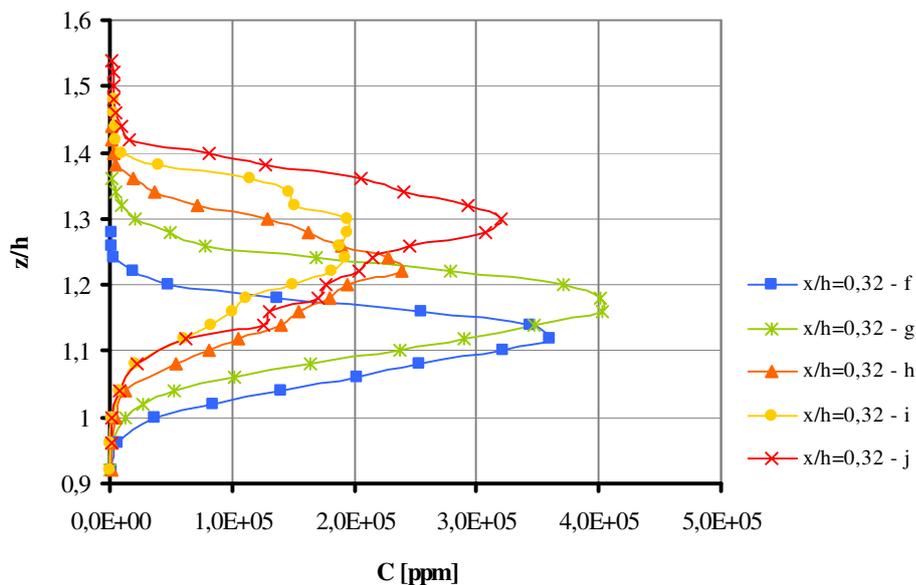


Figura 6.25 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,33$  m/s,  $p = 0,11$ ,  $x/h = 0,32$ ).

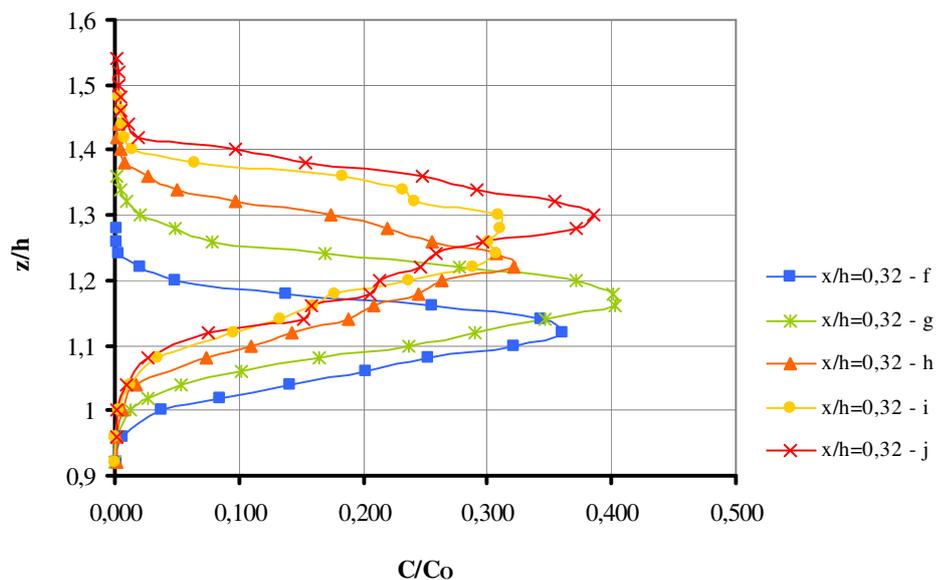


Figura 6.26 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,33$  m/s,  $p = 0,11$ ,  $x/h = 0,32$ ).

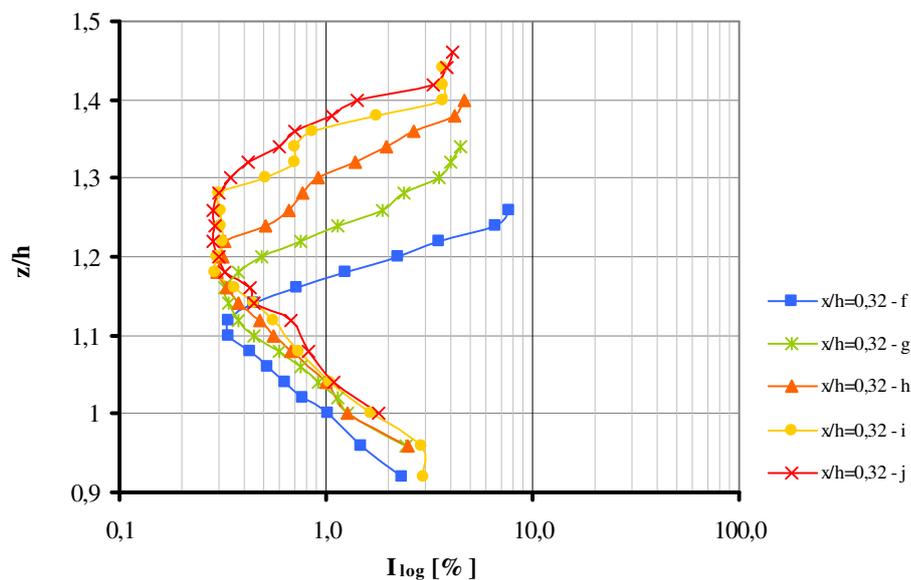


Figura 6.27 - Curvas comparativas entre as intensidades das flutuações de concentrações de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,33$  m/s,  $p = 0,11$ ,  $x/h = 0,32$ ).

As figuras 6.28, 6.29 e 6.30 mostram os resultados comparativos para uma distância  $x/h$  igual a 0,66. A velocidade média do escoamento é de 0,67 m/s.

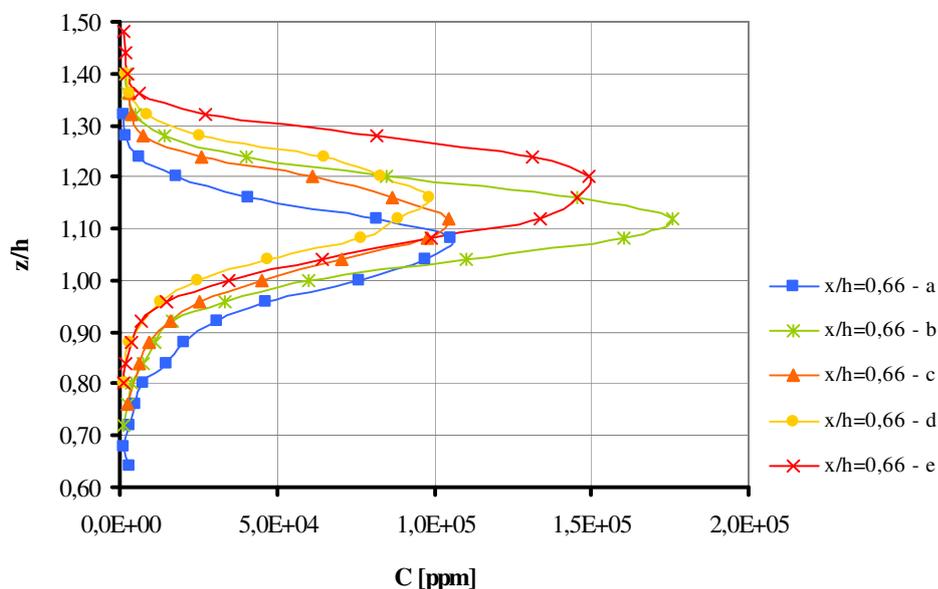


Figura 6.28 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,67$  m/s,  $p = 0,11$ ,  $x/h = 0,66$ ).

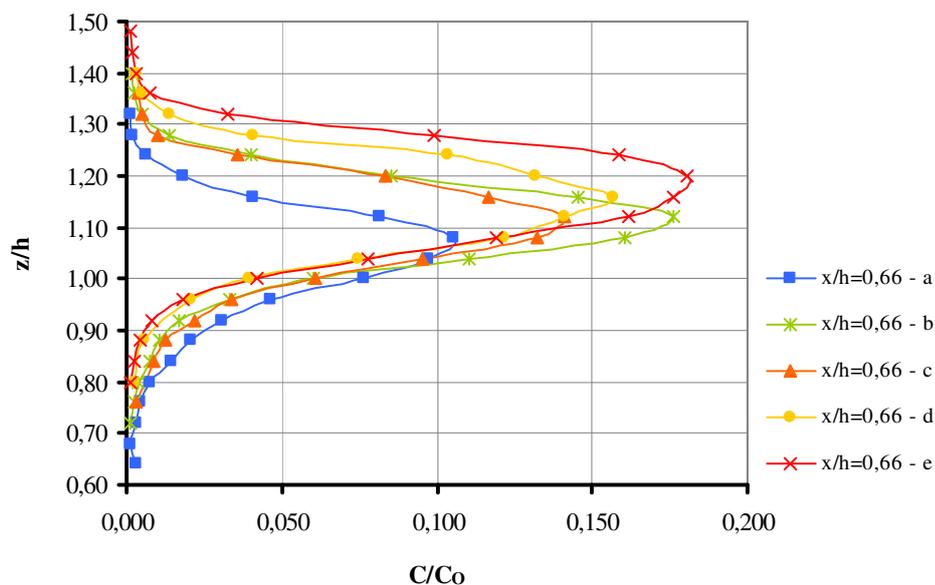


Figura 6.29 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,67$  m/s,  $p = 0,11$ ,  $x/h = 0,66$ ).

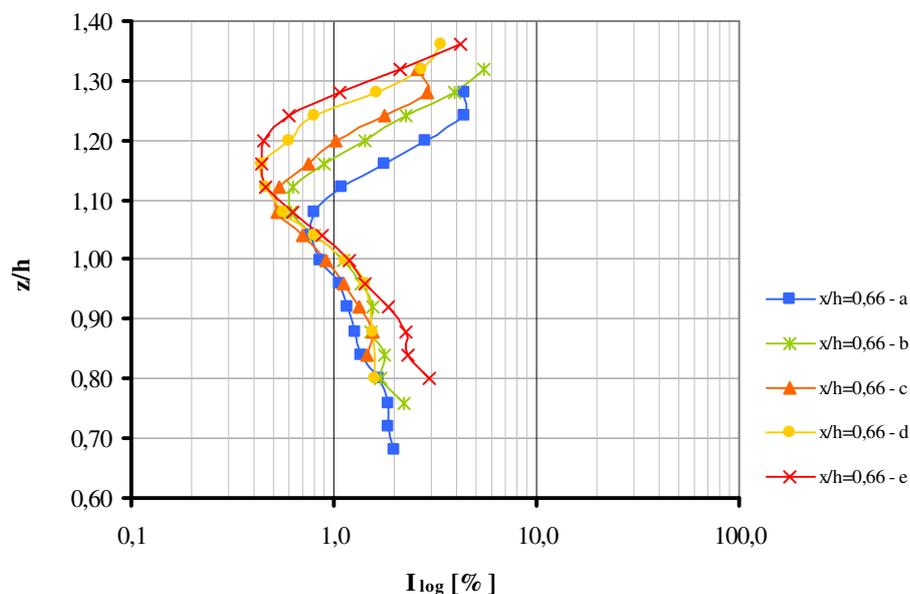


Figura 6.30 - Curvas comparativas entre as intensidades das flutuações de concentrações de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,67$  m/s,  $p = 0,11$ ,  $x/h = 0,66$ ).

A seguir, as figuras 6.31, 6.32 e 6.33 apresentam as curvas comparativas para uma distância  $x/h$  igual a 0,66, para uma velocidade média do escoamento de 0,33 m/s.

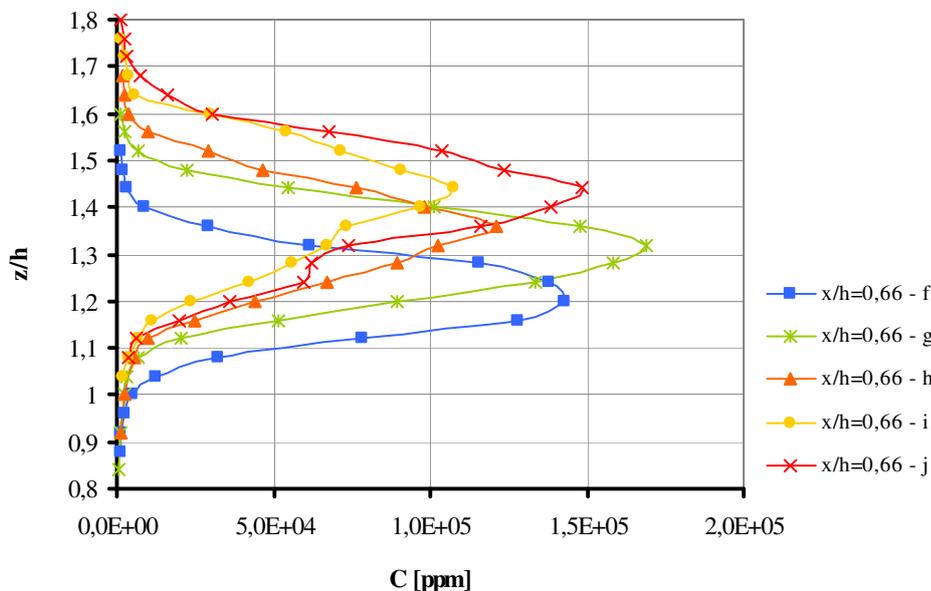


Figura 6.31 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,33$  m/s,  $p = 0,11$ ,  $x/h = 0,66$ ).

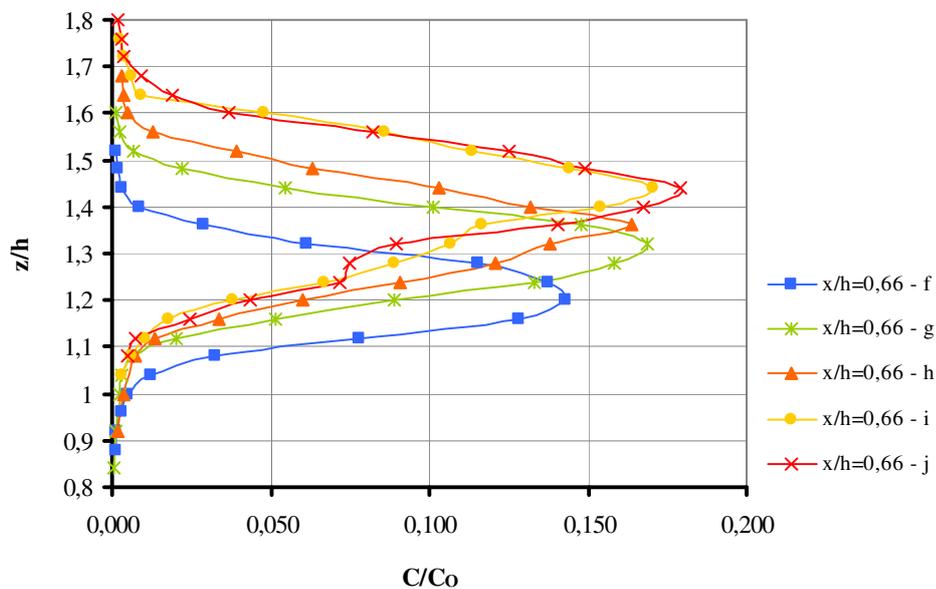


Figura 6.32 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,33$  m/s,  $p = 0,11$ ,  $x/h = 0,66$ ).

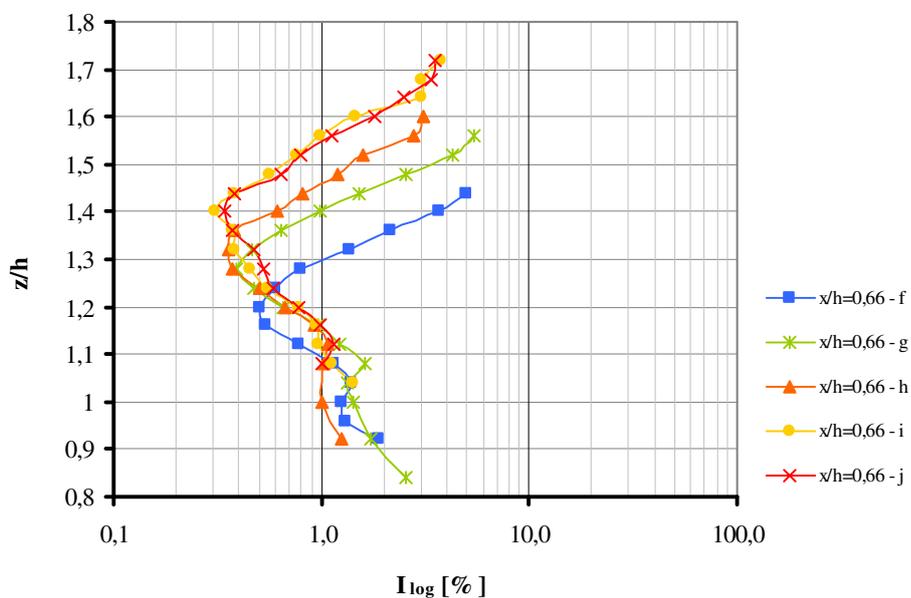


Figura 6.33 - Curvas comparativas entre as intensidades das flutuações de concentrações de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,33$  m/s,  $p = 0,11$ ,  $x/h = 0,66$ ).

Nas figuras 6.34, 6.35 e 6.36 estão apresentados os resultados comparativos para uma distância  $x/h$  igual a 1,00. A velocidade média do escoamento é de 0,67 m/s.

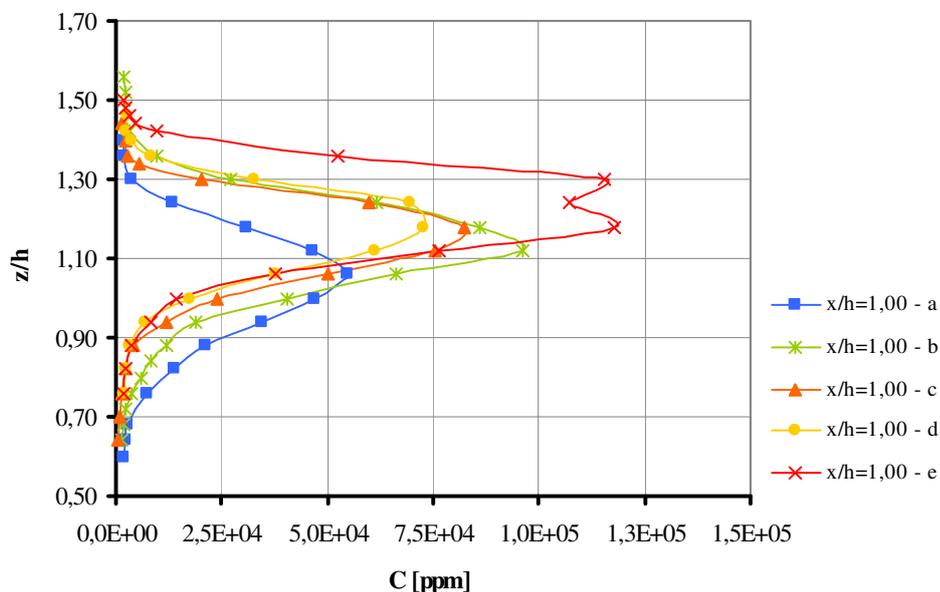


Figura 6.34 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,67$  m/s,  $p = 0,11$ ,  $x/h = 1,00$ ).

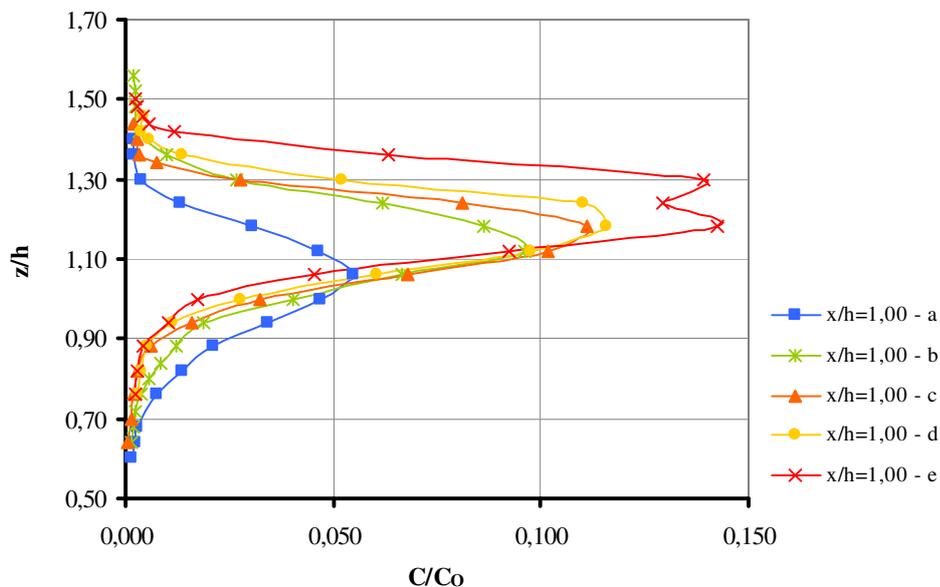


Figura 6.35 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,67$  m/s,  $p = 0,11$ ,  $x/h = 1,00$ ).

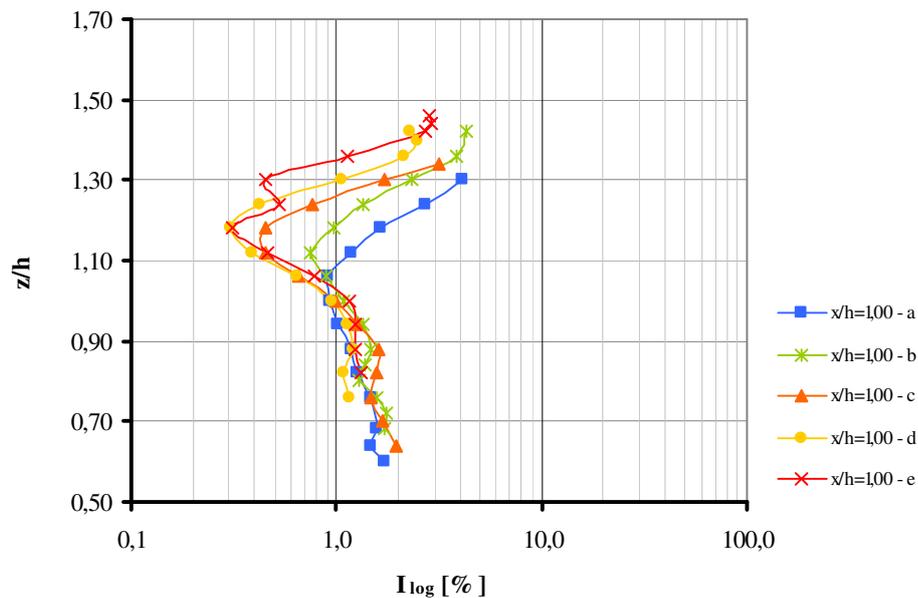


Figura 6.36 - Curvas comparativas entre as intensidades das flutuações de concentrações de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,67$  m/s,  $p = 0,11$ ,  $x/h = 1,00$ ).

Para uma velocidade de escoamento de 0,33 m/s, as figuras 6.37, 6.38 e 6.39 apresentam as curvas comparativas para uma distância  $x/h$  de 1,00.

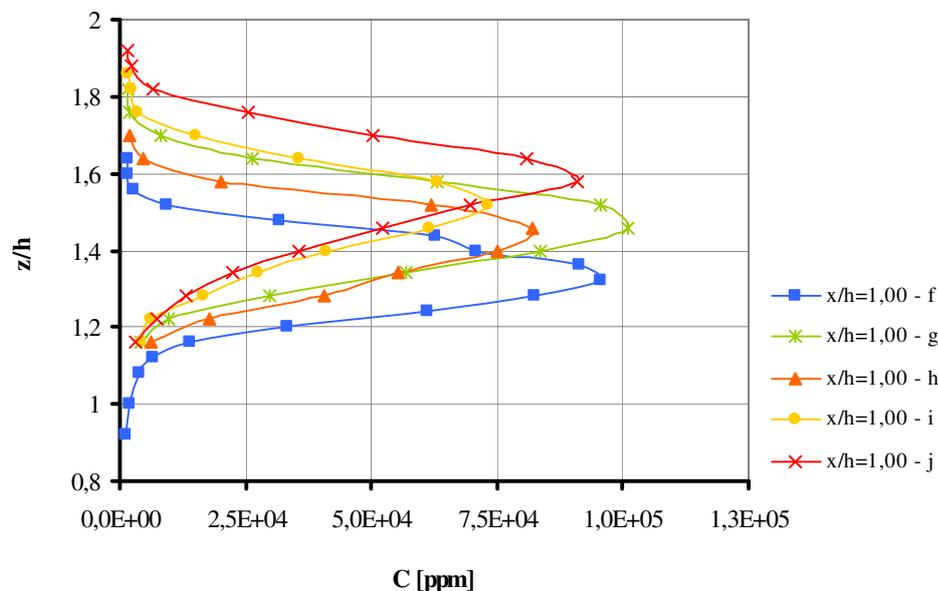


Figura 6.37 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,33$  m/s,  $p = 0,11$ ,  $x/h = 1,00$ ).

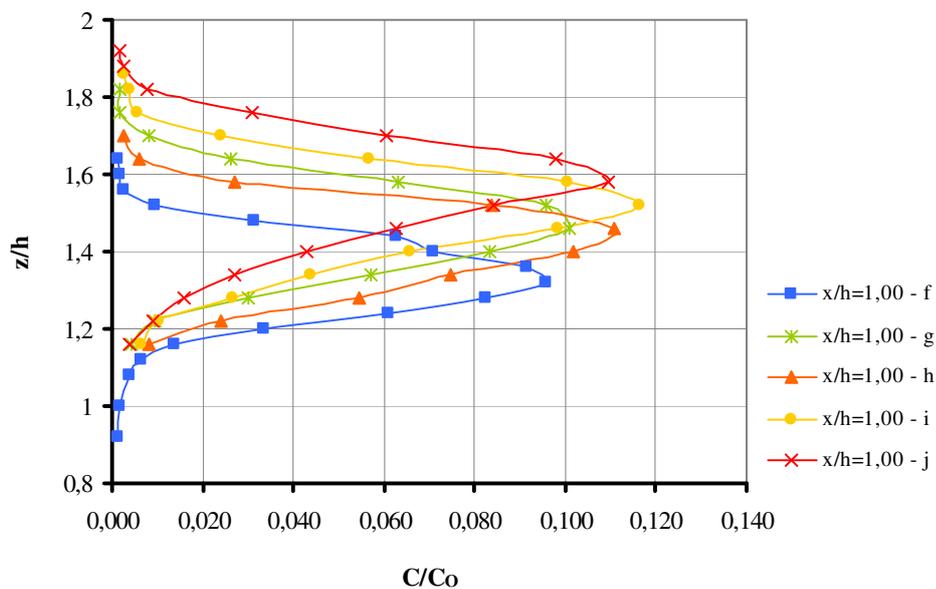


Figura 6.38 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,33$  m/s,  $p = 0,11$ ,  $x/h = 1,00$ ).

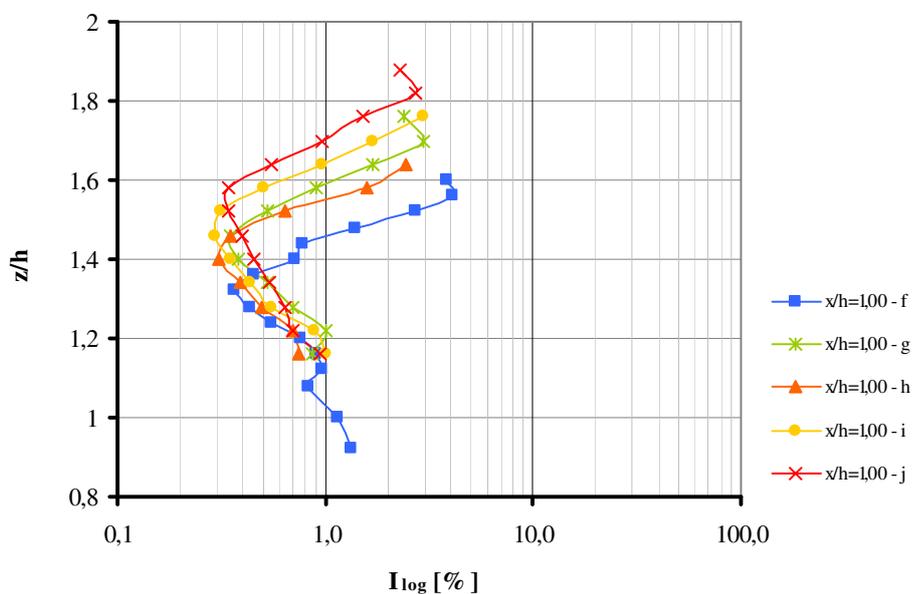
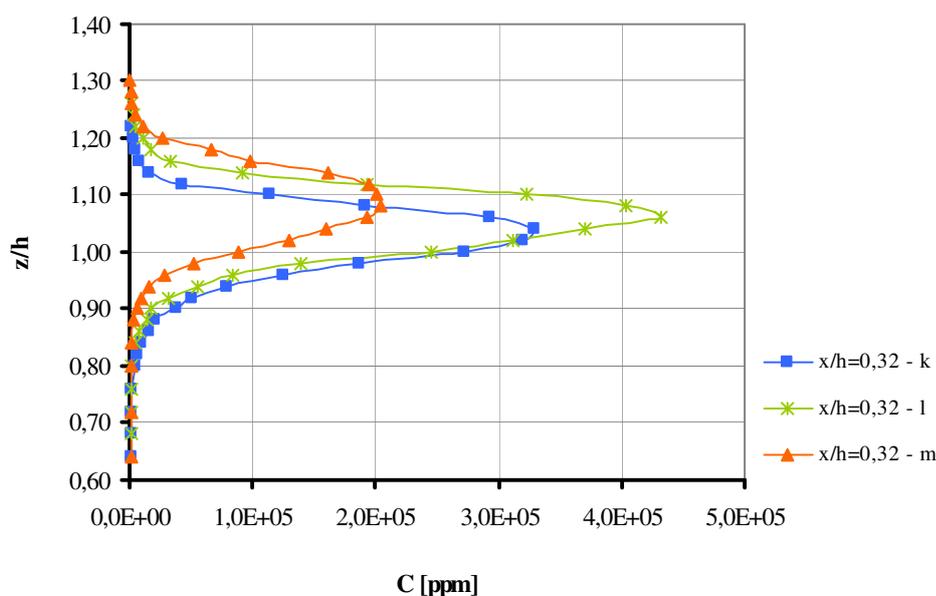


Figura 6.39 - Curvas comparativas entre as intensidades das flutuações de concentrações de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,33$  m/s,  $p = 0,11$ ,  $x/h = 1,00$ ).

**6.2.2.2 Perfil da Lei Potencial de Velocidades Médias do Vento 0,23**

As curvas comparativas apresentadas a seguir, referenciam-se às simulações realizadas para um perfil da lei potencial de velocidades médias do vento 0,23, com uma rugosidade característica categoria III e IV. Nestas, foram apenas ensaiadas para uma distância a sotavento  $x/h$  igual a 0,32, três velocidades de emissão (0,70 m/s, 1,18 m/s e 0,94 m/s). Estes ensaios foram realizados para verificar os efeitos da rugosidade na elevação da pluma.

Nas figuras 6.40, 6.41 e 6.42, estão apresentados as curvas para uma velocidade de escoamento de 0,67 m/s.



**Figura 6.40 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,67$  m/s,  $p = 0,23$ ,  $x/h = 0,32$ ).**

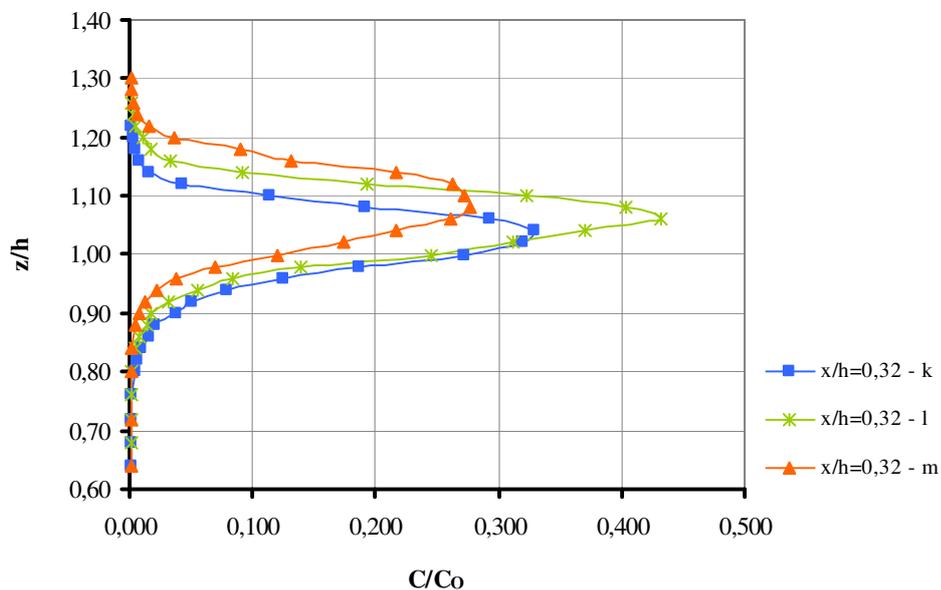


Figura 6.41 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,67$  m/s,  $p = 0,23$ ,  $x/h = 0,32$ ).

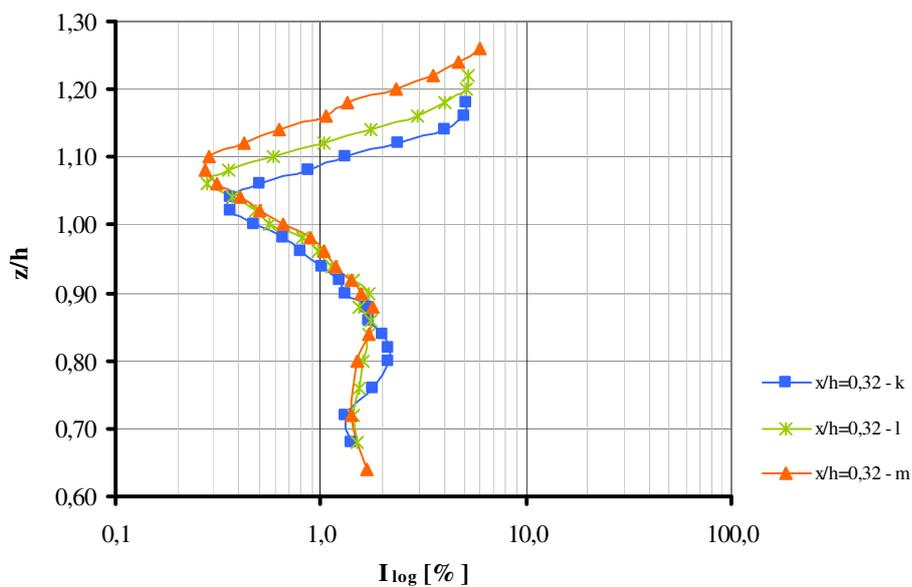


Figura 6.42 - Curvas comparativas entre as intensidades das flutuações de concentrações de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,67$  m/s,  $p = 0,23$ ,  $x/h = 0,32$ ).

Nas figuras 6.43, 6.44 e 6.45, estão apresentados as curvas para uma velocidade de escoamento de 0,33 m/s.

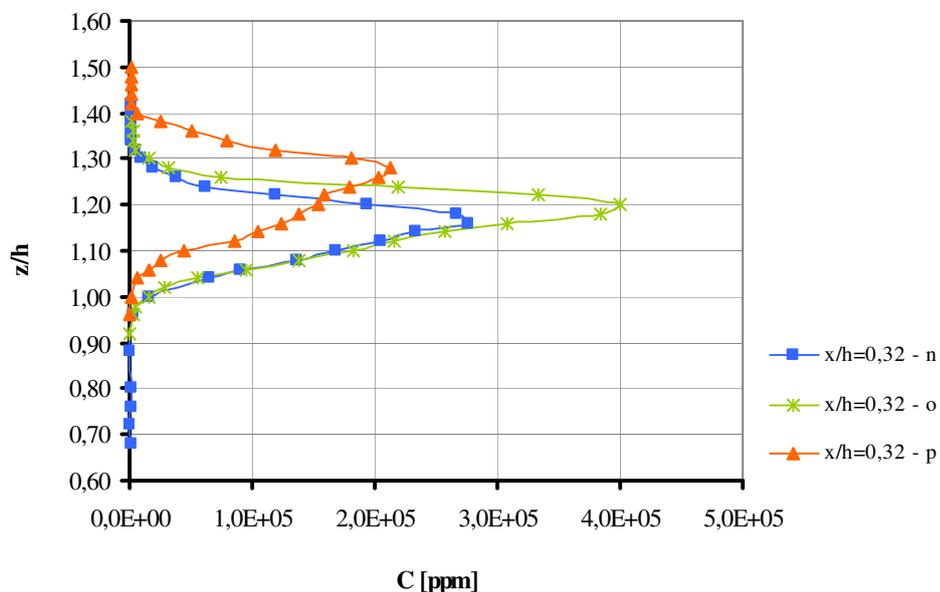


Figura 6.43 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,33$  m/s,  $p = 0,23$ ,  $x/h = 0,32$ ).

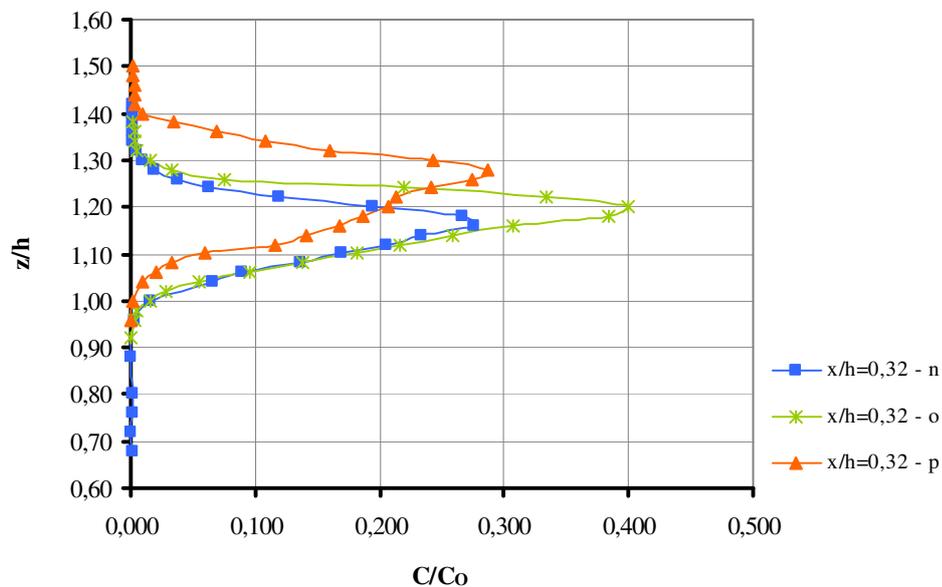


Figura 6.44 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,33$  m/s,  $p = 0,23$ ,  $x/h = 0,32$ ).

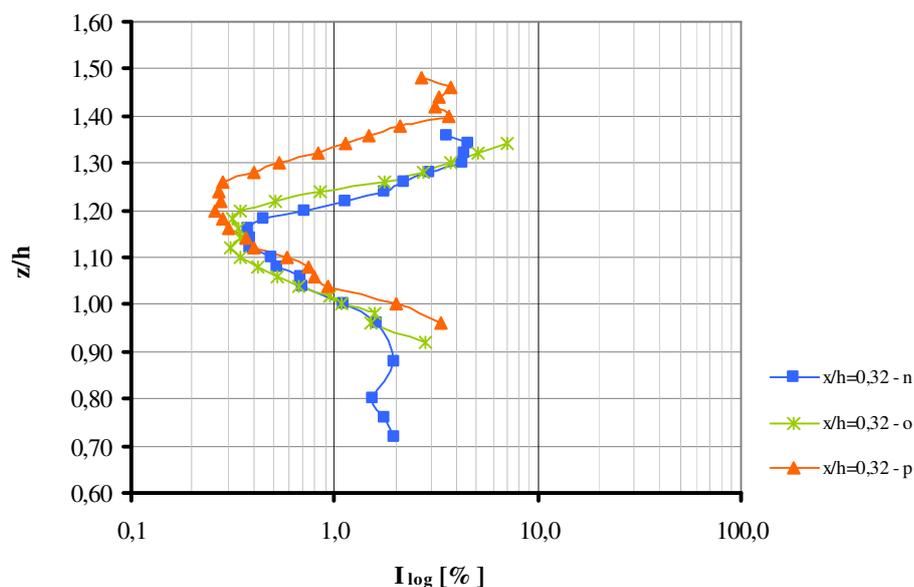


Figura 6.45 - Curvas comparativas entre as intensidades das flutuações de concentrações de hélio para diferentes velocidades de emissão ( $U = 0,33$  m/s,  $p = 0,23$ ,  $x/h = 0,32$ ).

### 6.2.3 Resultados Comparativos para Diferentes Rugosidades

Os resultados apresentados abaixo comparam o comportamento da pluma de contaminantes, a uma distância  $x/h$  igual a 0,32, para dois perfis potenciais de velocidade do vento: perfil 0,11 (campo aberto - categorias I e II) e perfil 0,23 (região urbana - categorias III e IV). Foram simuladas três velocidades médias de emissão e duas de escoamento.

Os casos que seguem foram simulados para uma velocidade de escoamento de 0,67 m/s. As curvas apresentam dados em termos de concentrações médias de hélio, concentrações médias adimensionais e intensidade de concentração. As figuras 6.46, 6.47 e 6.48 comparam a elevação da pluma para uma velocidade de emissão de 0,70 m/s para os seguintes casos: caso *a* (perfil 0,11) e caso *k* (perfil 0,23). Nas figuras 6.49, 6.50 e 6.51 são apresentadas as curvas para uma velocidade de emissão de 1,18 m/s para os casos *b* ( $p = 0,11$ ) e *l* ( $p = 0,23$ ). Para uma velocidade de emissão de 0,94 m/s, nas figuras 6.52, 6.53 e 6.54 são apresentadas os resultados para os casos *c* ( $p = 0,11$ ) e *m* ( $p = 0,23$ ).

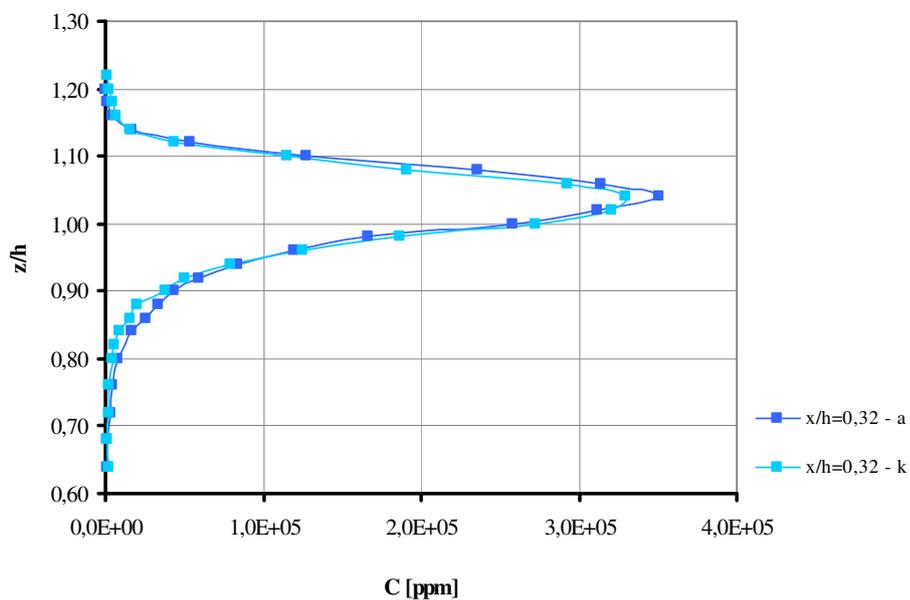


Figura 6.46 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações de hélio para diferentes rugosidades de terreno,  $p = 0,11$  e  $p = 0,23$ . ( $U = 0,67$  m/s,  $W_s = 0,70$  m/s,  $x/h = 0,32$ )

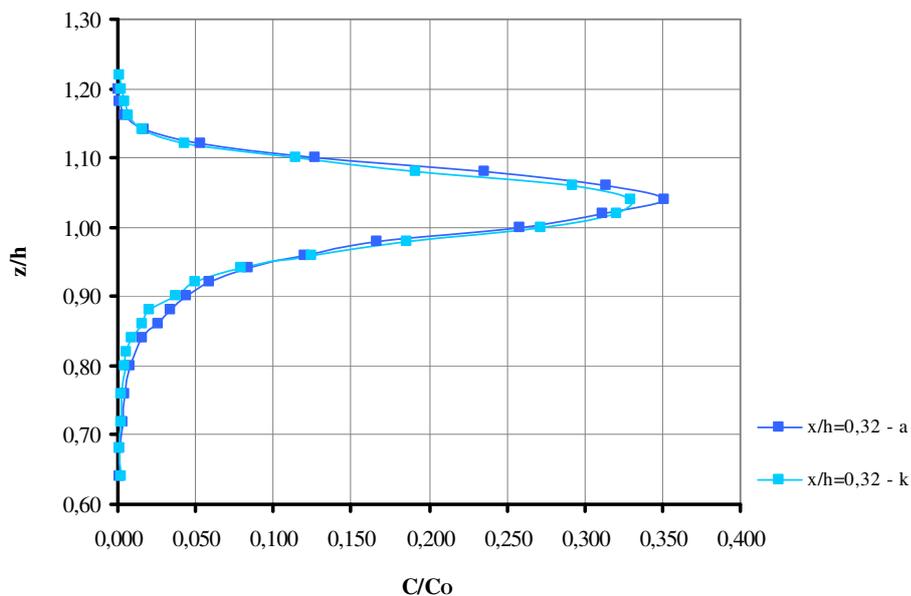


Figura 6.47 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para diferentes rugosidades de terreno,  $p = 0,11$  e  $p = 0,23$ . ( $U = 0,67$  m/s,  $W_s = 0,70$  m/s,  $x/h = 0,32$ )

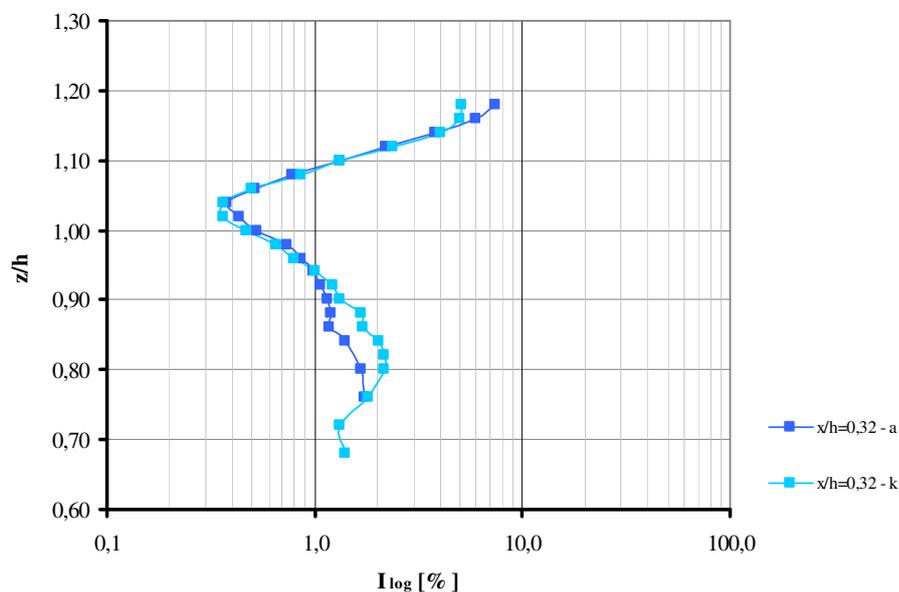


Figura 6.48 - Curvas comparativas entre as intensidades das flutuações de concentrações de hélio para diferentes rugosidades de terreno,  $p = 0,11$  e  $p = 0,23$ . ( $U = 0,67$  m/s,  $W_s = 0,70$  m/s,  $x/h = 0,32$ )

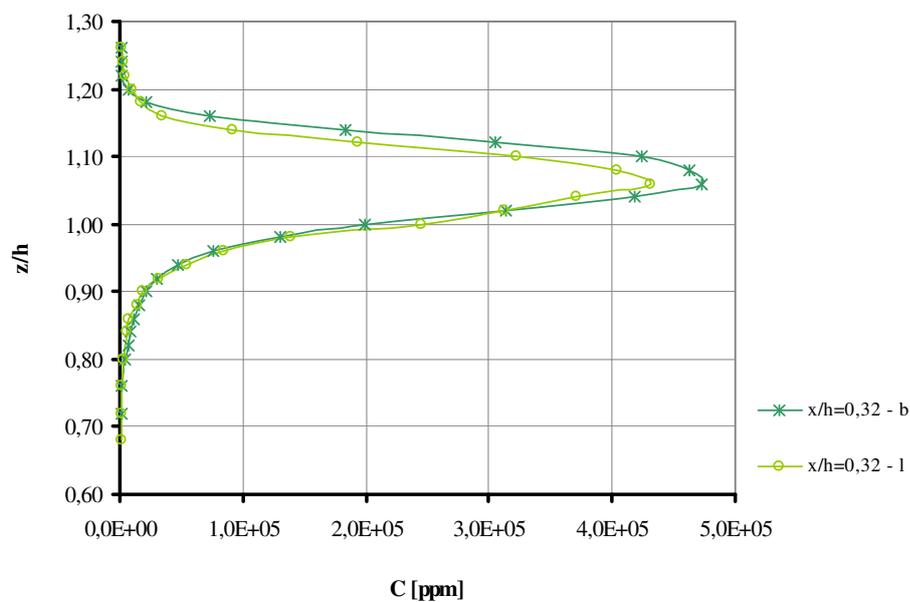


Figura 6.49 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações de hélio para diferentes rugosidades de terreno,  $p = 0,11$  e  $p = 0,23$ . ( $U = 0,67$  m/s,  $W_s = 1,18$  m/s,  $x/h = 0,32$ )

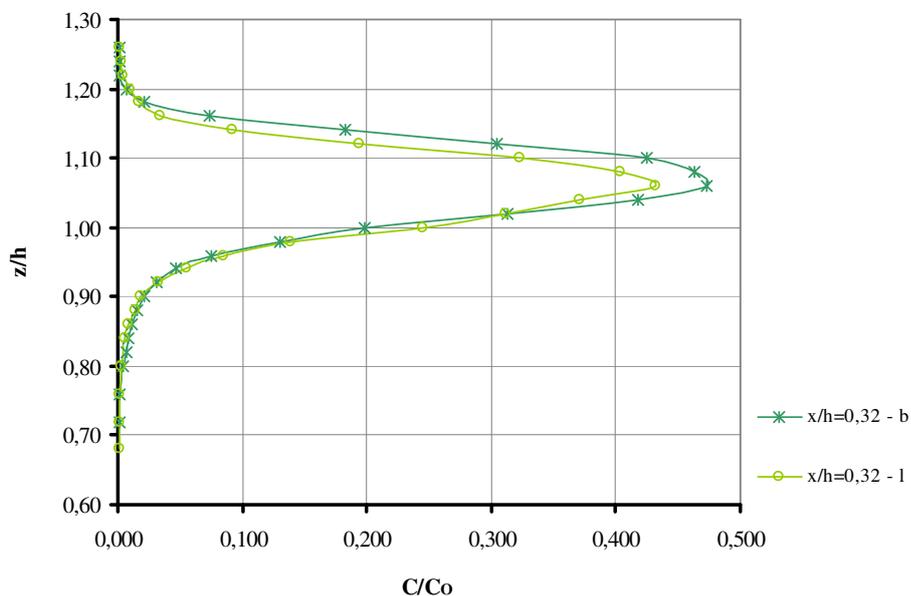


Figura 6.50 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para diferentes rugosidades de terreno,  $p = 0,11$  e  $p = 0,23$ . ( $U = 0,67$  m/s,  $W_s = 1,18$  m/s,  $x/h = 0,32$ )

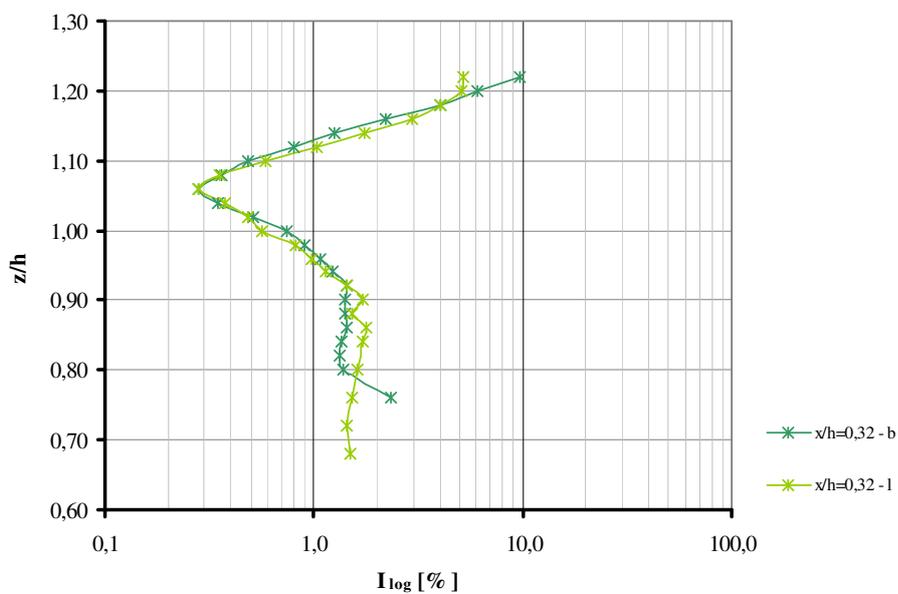


Figura 6.51 - Curvas comparativas entre as intensidades das flutuações de concentrações de hélio para diferentes rugosidades de terreno,  $p = 0,11$  e  $p = 0,23$ . ( $U = 0,67$  m/s,  $W_s = 1,18$  m/s,  $x/h = 0,32$ )

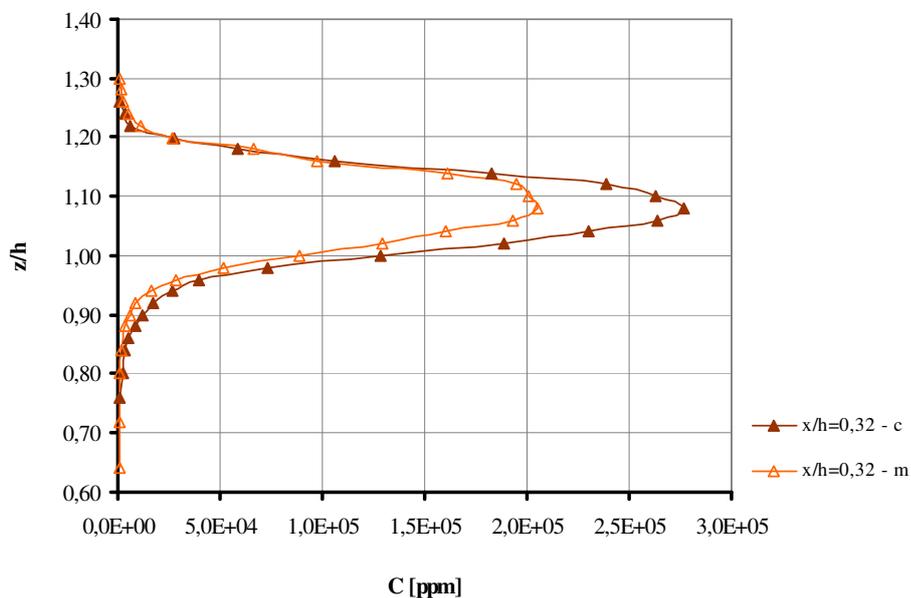


Figura 6.52 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações de hélio para diferentes rugosidades de terreno,  $p = 0,11$  e  $p = 0,23$ . ( $U = 0,67$  m/s,  $W_s = 0,95$  m/s,  $x/h = 0,32$ )

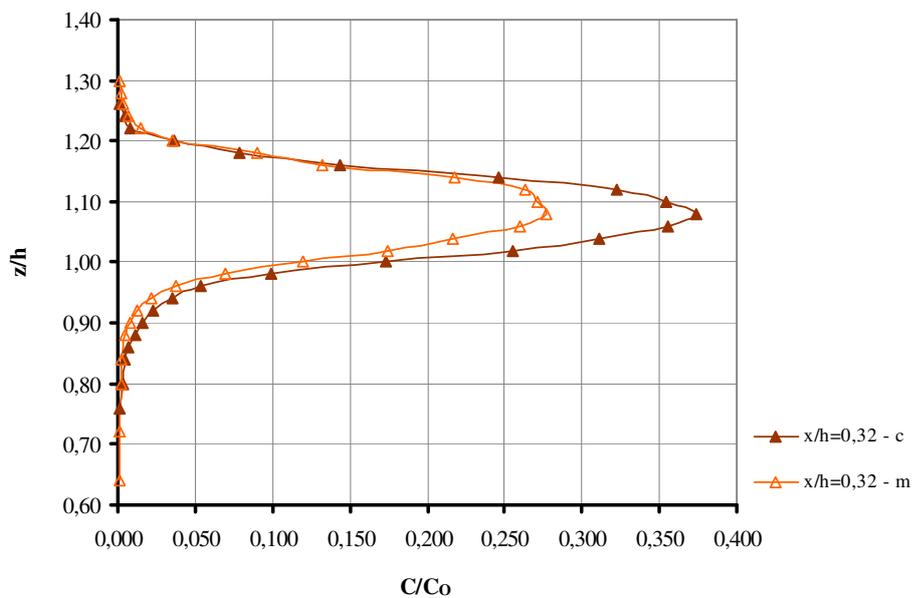


Figura 6.53 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para diferentes rugosidades de terreno,  $p = 0,11$  e  $p = 0,23$ . ( $U = 0,67$  m/s,  $W_s = 0,95$  m/s,  $x/h = 0,32$ )

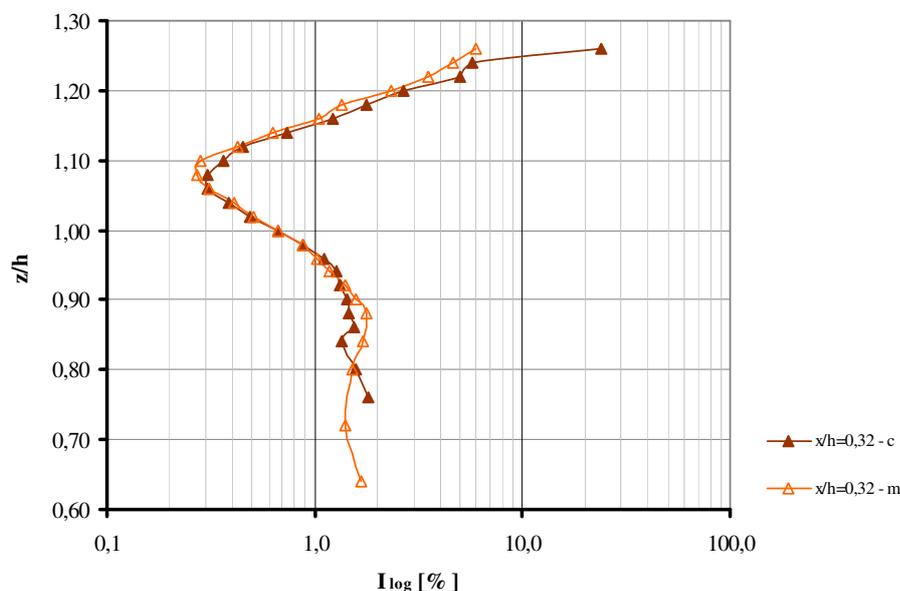


Figura 6.54 - Curvas comparativas entre as intensidades das flutuações de concentrações de hélio para diferentes rugosidades de terreno,  $p = 0,11$  e  $p = 0,23$ . ( $U = 0,67$  m/s,  $W_s = 0,95$  m/s,  $x/h = 0,32$ )

Os resultados a seguir foram realizados para uma velocidade média do vento de 0,33 m/s. As velocidades médias de emissão foram: 0,70 m/s, casos *f* (perfil 0,11) e *n* (perfil 0,23), figuras 6.55, 6.56 e 6.57; 1,18 m/s, casos *g* ( $p = 0,11$ ) e *o* ( $p = 0,23$ ), figuras 6.58, 6.59 e 6.60; 0,94 m/s, casos *h* ( $p = 0,11$ ) e *p* ( $p = 0,23$ ), figuras 6.61, 6.62 e 6.63.

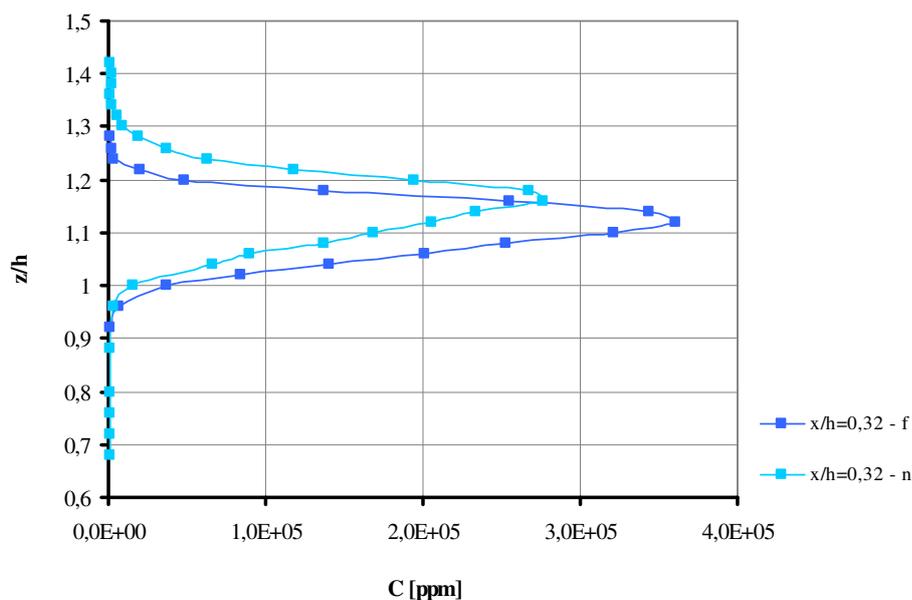


Figura 6.55 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações de hélio para diferentes rugosidades de terreno,  $p = 0,11$  e  $p = 0,23$ . ( $U = 0,33$  m/s,  $W_s = 0,70$  m/s,  $x/h = 0,32$ )

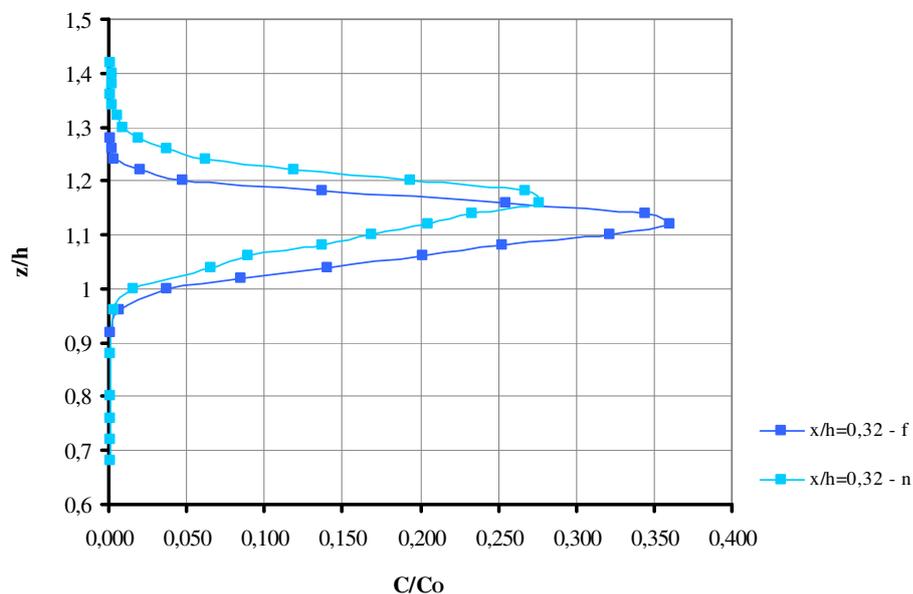


Figura 6.56 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para diferentes rugosidades de terreno,  $p = 0,11$  e  $p = 0,23$ . ( $U = 0,33$  m/s,  $W_s = 0,70$  m/s,  $x/h = 0,32$ )

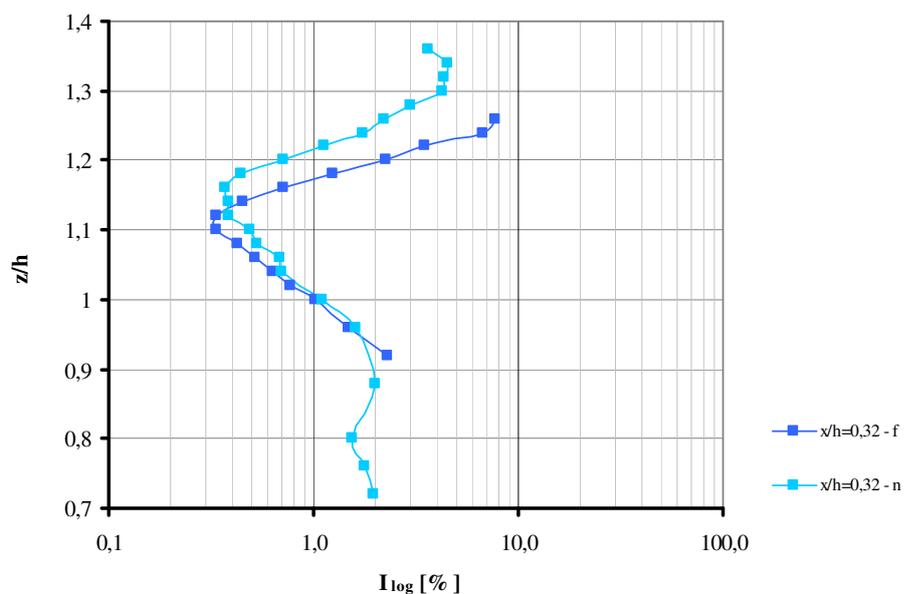


Figura 6.57 - Curvas comparativas entre as intensidades das flutuações de concentrações de hélio para diferentes rugosidades de terreno,  $p = 0,11$  e  $p = 0,23$ . ( $U = 0,33$  m/s,  $W_s = 0,70$  m/s,  $x/h = 0,32$ )

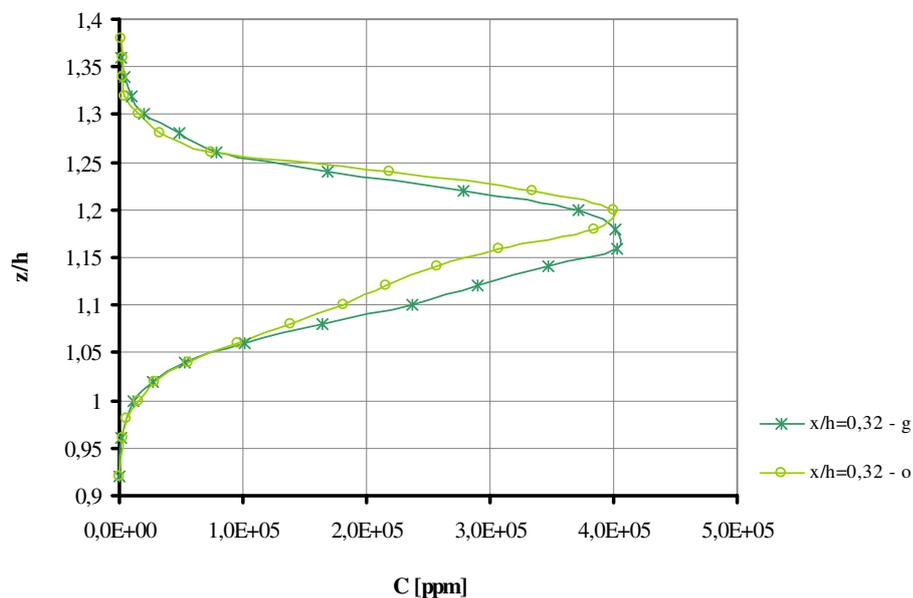


Figura 6.58 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações de hélio para diferentes rugosidades de terreno,  $p = 0,11$  e  $p = 0,23$ . ( $U = 0,33$  m/s,  $W_s = 1,18$  m/s,  $x/h = 0,32$ )

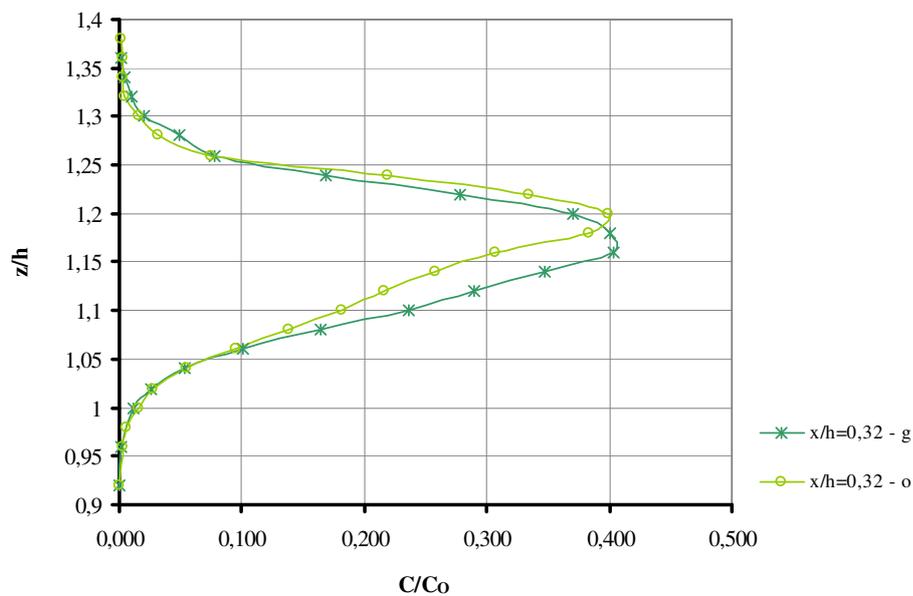


Figura 6.59 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para diferentes rugosidades de terreno,  $p = 0,11$  e  $p = 0,23$ . ( $U = 0,33$  m/s,  $W_s = 1,18$  m/s,  $x/h = 0,32$ )

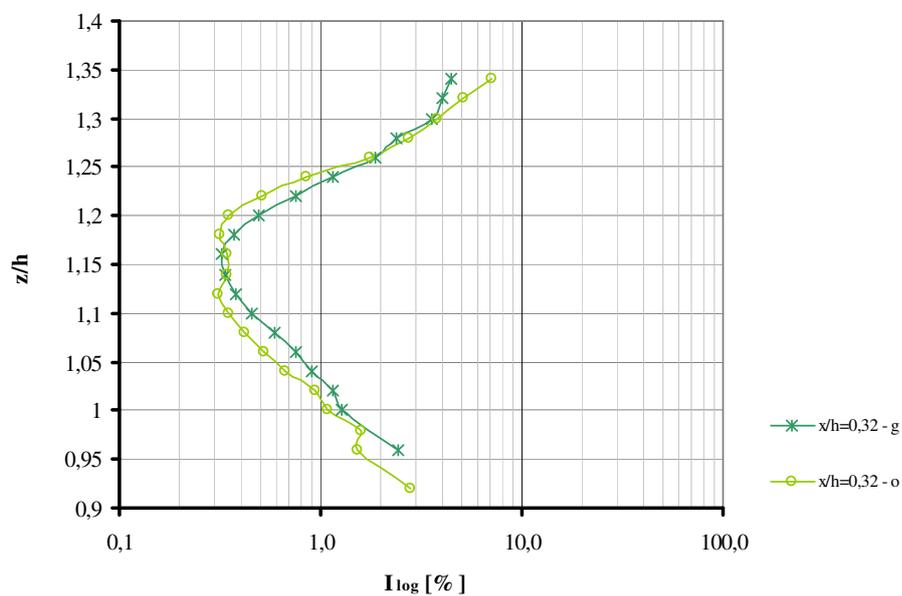


Figura 6.60 - Curvas comparativas entre as intensidades das flutuações de concentrações de hélio para diferentes rugosidades de terreno,  $p = 0,11$  e  $p = 0,23$ . ( $U = 0,33$  m/s,  $W_s = 1,18$  m/s,  $x/h = 0,32$ )

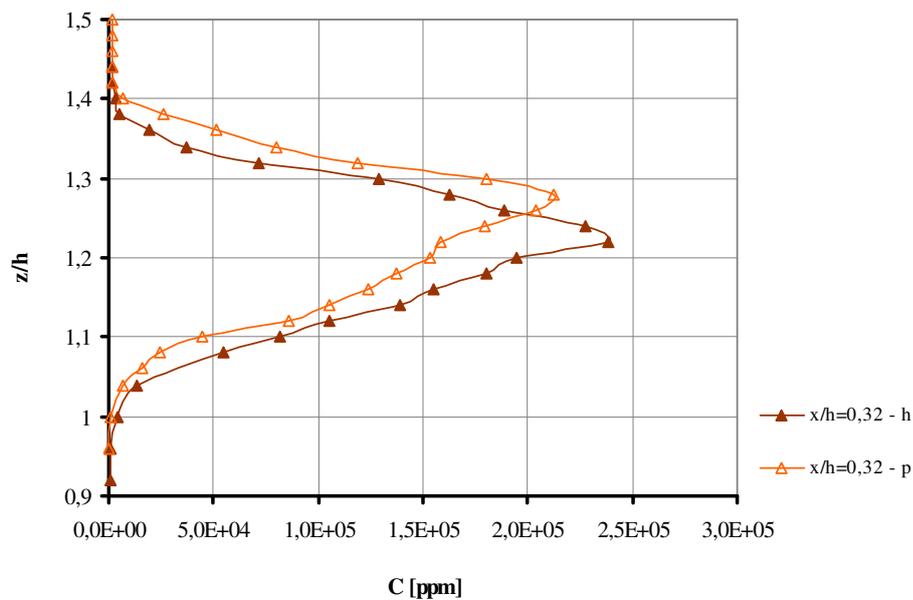


Figura 6.61 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações de hélio para diferentes rugosidades de terreno,  $p = 0,11$  e  $p = 0,23$ . ( $U = 0,33$  m/s,  $W_s = 0,95$  m/s,  $x/h = 0,32$ )

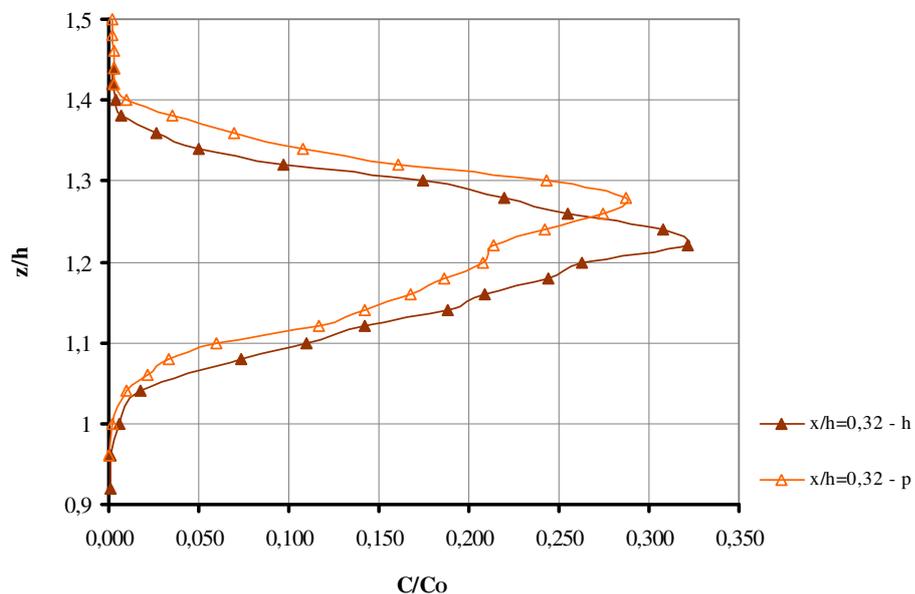


Figura 6.62 - Curvas comparativas entre os perfis verticais de concentrações adimensionais de hélio para diferentes rugosidades de terreno,  $p = 0,11$  e  $p = 0,23$ . ( $U = 0,33$  m/s,  $W_s = 0,95$  m/s,  $x/h = 0,32$ )

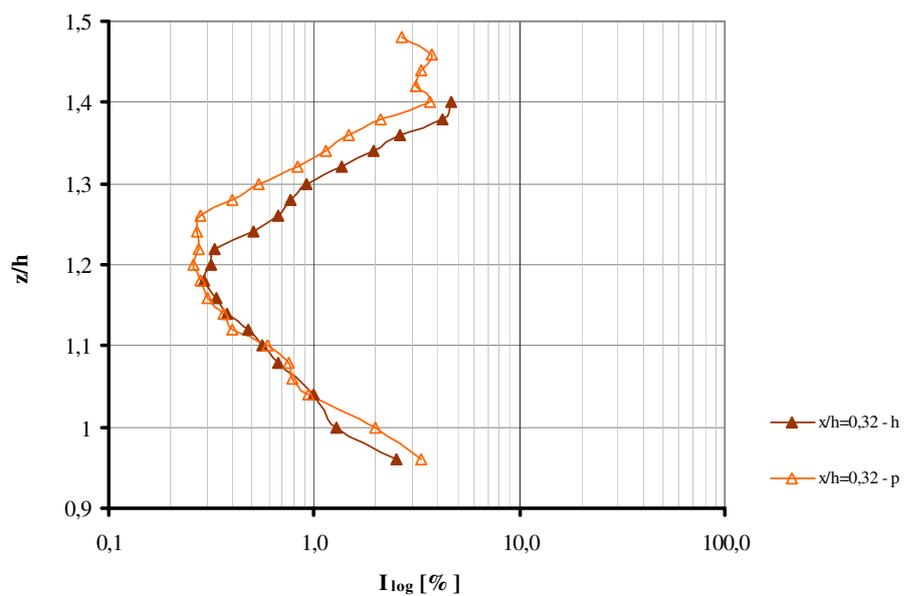


Figura 6.63 - Curvas comparativas entre as intensidades das flutuações de concentrações de hélio para diferentes rugosidades de terreno,  $p = 0,11$  e  $p = 0,23$ . ( $U = 0,33$  m/s,  $W_s = 0,95$  m/s,  $x/h = 0,32$ )

### 6.3 Resolução da Sonda Aspirante

A utilização de instrumentos de medição de concentrações de gases é importante, pois estes influenciarão na correta simulação do processo de dispersão de uma pluma de contaminantes. Os dados medidos, e posteriormente analisados, retratarão a verdadeira dimensão que uma fonte poluidora está ou poderá causar no ambiente em que será inserido.

Com base nisto, decidiu-se avaliar a resolução da sonda aspirante como instrumento de medição de concentrações de gases para a simulação em túnel de vento e as possíveis escalas de simulação: local, mesoescala e macroescala. Desse modo, testou-se a sonda aspirante para seis distâncias  $x/h$  a sotavento da chaminé: 0,32; 0,66; 1,00; 2,00; 3,00; e 3,80, com uma frequência e tempo de aquisição de 1,024 Hz e um minuto, respectivamente. A simulação testou apenas efeitos locais de poluição, uma vez que a máxima distância  $x/h$  a sotavento foi de 3,80, ou seja, 3,80 vezes a altura da chaminé. A altura do modelo era de 25 cm, com um diâmetro de 2 cm. A escala de modelagem foi de 1:300. A velocidade de emissão utilizada foi de 0,90 m/s, utilizando hélio puro. A velocidade média do escoamento, na altura da chaminé, foi de 1,46m/s. A figura 6.64 mostra os perfis de concentrações da pluma obtidos no ensaio. Na figura 6.65 são apresentados as distorções causadas pela resolução da sonda no perfil da pluma.

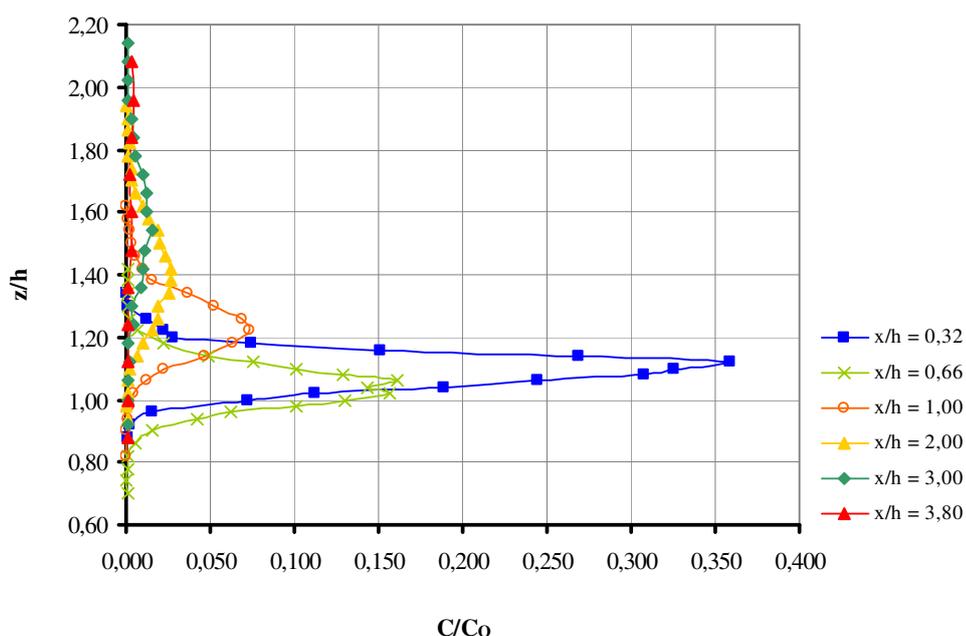
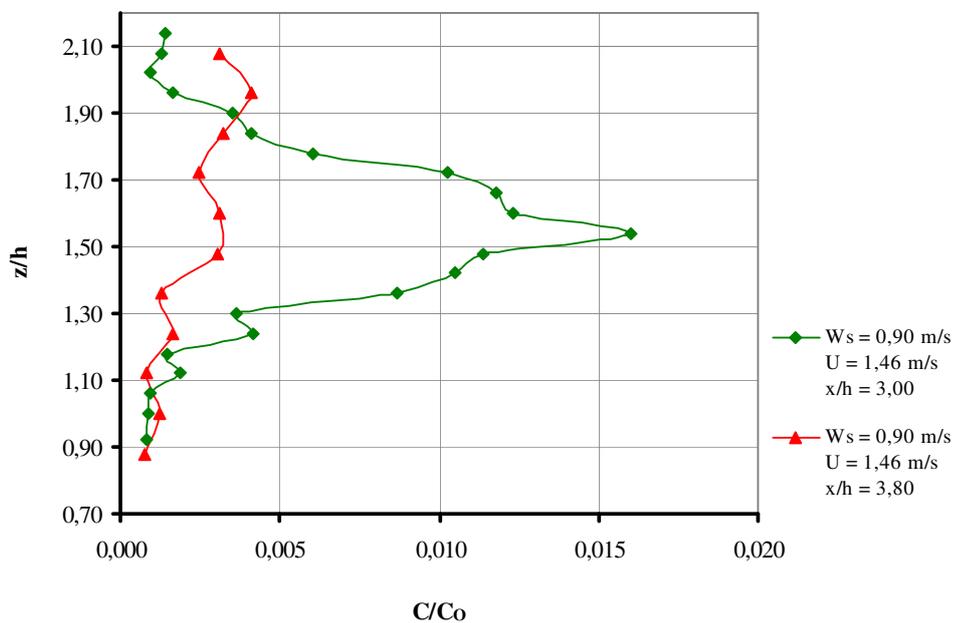


Figura 6.64 - Perfis verticais de concentrações de hélio, ( $U = 1,46$  m/s,  $W_s = 0,90$  m/s,  $p = 0,23$ ).



**Figura 6.65 - Perfis de concentrações de hélio distorcidos causados pela falta de resolução da sonda ( $U = 1,46 \text{ m/s}$ ,  $W_s = 0,90 \text{ m/s}$ ,  $p = 0,23$ ).**

## 7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 7.1 *Evolução da Pluma*

Observando as curvas apresentadas no capítulo cinco, mostrando a evolução da pluma, ou seja, a sua elevação e dispersão a sotavento, a pluma teve o mesmo comportamento e formato de uma pluma gaussiana (figura 3.2 apresentada no capítulo 3). A curva do perfil vertical de concentrações de hélio teve um formato parabólico, onde o ponto de máximo da curva de concentração diminuiu a distâncias a sotavento da chaminé, isto devido ao processo de dispersão da pluma.

Nos ensaios realizados, a estabilidade atmosférica simulada foi a neutra (camada limite neutra). A turbulência gerada na camada limite é basicamente mecânica, influenciada pelas características da rugosidade da superfície do terreno. O gradiente de temperatura é zero, isto é, o valor da temperatura ao longo da camada é constante (isotérmico). Desse modo, a pluma simulada em túnel de vento apresentou um formato do tipo cônico.

Como se esperava, a diminuição da velocidade do escoamento causou um aumento da altura de elevação da pluma. Este aumento é devido a maior quantidade de movimento da pluma, ou seja, a relação apresentada pela equação 4.22 do capítulo 4. A quantidade de movimento de emissão da pluma influi diretamente na sua altura de elevação e é um fator determinante de influência sobre a região em que está inserida.

Nas figuras 6.7 e 6.8, que apresentam as curvas dos perfis verticais de concentrações de hélio (ppm e adimensional), observa-se um leve abaixamento do pico de maior concentração a uma distância  $x/h = 1,00$  com relação ao pico anterior ( $x/h = 0,66$ ). Isto é explicado pela baixa quantidade de movimento da pluma e o valor calculado para o empuxo da pluma. Neste caso, a pluma estava tendendo a um formato do tipo *looping* (oscilante), devido às forças inerciais do escoamento serem superiores às forças inerciais da pluma, à influência da turbulência do escoamento e aos efeitos aerodinâmicos da chaminé. Na tabela 7.1 são apresentados os valores da velocidade de emissão do modelo, da massa específica do gás emitido e dos parâmetros de semelhança para a simulação de uma pluma: relação entre a velocidade de emissão e do escoamento (vento), quantidade de movimento e empuxo da pluma, para cada caso ensaiado. Quanto maior o valor calculado para o parâmetro de empuxo

da pluma, menor é sua força de empuxo e são maiores as forças inerciais. Conseqüentemente, menor é sua elevação.

Tabela 7.1 – Parâmetros de semelhança calculados, de acordo com os casos ensaiados.

Casos	$\bar{U}$ na altura da chaminé [m/s]	$W_s$ [m/s]	$\rho_{\text{mistura}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Parâmetros de semelhança		
				Razão entre as velocidades $\frac{W_s}{U}$	Quantidade de Movimento da Pluma $\frac{\rho_s W_s^2}{\rho_a U^2}$	Empuxo da Pluma $\frac{\rho_s U^3}{(\rho_a - \rho_s) g W_s D}$
a = k	0,67	0,70	0,169	1,046	0,151	0,351
b = l		1,18	0,169	1,767	0,432	0,208
c = m		0,95	0,441	1,412	0,721	0,918
d		1,12	0,560	1,665	1,271	1,164
e		1,43	0,349	2,134	1,303	0,430
f = n	0,33	0,70	0,169	2,123	0,623	0,042
g = o		1,18	0,169	3,589	1,779	0,025
h = p		0,95	0,441	2,867	2,974	0,110
i		1,12	0,560	3,380	5,241	0,139
j		1,43	0,349	4,332	5,370	0,051

Abaixo, nas tabelas 7.2 e 7.3 são apresentadas as alturas adimensionais ( $x/h$ ) para os valores de máxima concentração para as medições realizadas a sotavento da chaminé, para os perfis de velocidade média do vento  $p = 0,11$  e  $0,23$ . Nas tabelas 7.4 e 7.5, são apresentados as percentagens de elevação do ponto de maior concentração de hélio, em função da redução da velocidade média do escoamento, de  $0,67$  m/s para  $0,33$  m/s.

Tabela 7.2 - Alturas adimensionais ( $x/h$ ) para os valores de máxima concentração, para as velocidades médias do escoamento ensaiadas para o perfil  $p = 0,11$ .

$W_s$ [m/s]	Posição da sonda a sotavento da chaminé ( $p = 0,11$ )					
	$x/h = 0,32$		$x/h = 0,66$		$x/h = 1,00$	
	$z/h$ para $\bar{U} = 0,67$ m/s	$z/h$ para $\bar{U} = 0,33$ m/s	$z/h$ para $\bar{U} = 0,67$ m/s	$z/h$ para $\bar{U} = 0,33$ m/s	$z/h$ para $\bar{U} = 0,67$ m/s	$z/h$ para $\bar{U} = 0,33$ m/s
0,70	1,04	1,12	1,08	1,20	1,06	1,32
1,18	1,06	1,16	1,12	1,32	1,12	1,46
0,95	1,08	1,22	1,12	1,36	1,18	1,46
1,12	1,10	1,28	1,16	1,44	1,18	1,52
1,43	1,12	1,30	1,20	1,44	1,18	1,58

Tabela 7.3 - Alturas adimensionais ( $x/h$ ) para os valores de máxima concentração, para as velocidades médias do escoamento ensaiadas para o perfil  $p = 0,23$ .

Ws [m/s]	Posição da sonda a sotavento da chaminé ( $p = 0,23$ )	
	$x/h = 0,32$	
	$z/h$ para $\bar{U} = 0,67$ m/s	$z/h$ para $\bar{U} = 0,33$ m/s
0,70	1,04	1,16
1,18	1,06	1,20
0,95	1,08	1,28

Tabela 7.4 - Percentagens de elevação do ponto de maior concentração da pluma, em função do decréscimo da velocidade do escoamento para o perfil  $p = 0,11$ .

Ws [m/s]	Posição da sonda a sotavento da chaminé ( $p=0,11$ )		
	$x/h = 0,32$	$x/h = 0,66$	$x/h = 1,00$
0,70	7,7%	11,1%	24,5%
1,18	9,4%	17,9%	30,4%
0,95	13,0%	21,4%	23,7%
1,12	16,4%	24,1%	28,8%
1,43	16,1%	20,0%	33,9%

Tabela 7.5 - Percentagens de elevação do ponto de maior concentração da pluma, em função do decréscimo da velocidade do escoamento para o perfil  $p = 0,23$ .

Ws [m/s]	Posição da sonda a sotavento da chaminé ( $p = 0,23$ )
	$x/h = 0,32$
0,70	11,5%
1,18	13,2%
0,95	18,5%

Para os casos onde há emissão de hélio puro ( $W_s = 0,70$  m/s e  $1,18$  m/s), quanto maior a velocidade de emissão de hélio, maior é a altura de elevação da pluma, com a redução da velocidade do escoamento. Para os casos ensaiados com a emissão da mistura binária, observou-se o mesmo comportamento. Mas um dado interessante, observado na tabela 7.2, entre os casos ensaiados com hélio puro e com a mistura binária hélio-ar, foi uma maior altura de elevação do ponto de maior concentração da pluma, para os casos ensaiados com a mistura binária com velocidade de emissão  $0,95$  m/s e  $1,12$  m/s, com relação ao ponto de máxima concentração para a emissão de hélio puro, com velocidade de  $1,18$  m/s. Para explicar este fenômeno, temos que observar a tabela 7.1, apresentada anteriormente. A quantidade de movimento calculada da pluma para as misturas binária dos casos *c*, *d*, *h* e *i* (perfil da lei potencial de velocidades do vento  $p = 0,11$ ) e os casos *m* e *p* (perfil da lei potencial de velocidades do vento  $p = 0,23$ ) é maior que para a pluma de hélio puro para os casos *b* e *h* ( $p = 0,11$ ), *l* e *p* ( $p = 0,23$ ). Desse modo, é inserida uma maior quantidade de energia ao movimento para elevação da pluma, mesmo que as velocidades de emissão e as forças de empuxo da mistura binária para os casos citados sejam menores que para o caso onde se utiliza hélio puro. O valor da quantidade de movimento da pluma é diretamente proporcional ao valor da massa específica do gás emitido pela chaminé. Desse modo, a massa específica da mistura binária é maior que a do hélio, aumentando a energia da quantidade de movimento da pluma e, conseqüentemente, a sua altura de elevação.

Calculando-se a percentagem de elevação do ponto de maior concentração da pluma, para cada caso, quando se diminui a velocidade média do escoamento, de  $0,67$  m/s para  $0,33$  m/s (entre os casos *a* e *f*, *b* e *g*, *k* e *n*, *l* e *o*), observa-se que, para os casos simulados com hélio puro, quanto maior a velocidade de emissão, maior será a percentagem de elevação da pluma, à medida que nos distanciamos a sotavento da fonte, isto em função da maior quantidade de movimento e das forças de empuxo da pluma. Já os casos em que se utilizou a mistura binária hélio-ar, não houve a mesma tendência que para os casos anteriores, onde a percentagem de elevação era maior com o aumento da velocidade de emissão. Por serem misturas hélio-ar em proporções diferentes e, por conseqüência, massas específicas distintas, as forças de empuxo e de quantidade de movimento influenciaram no decorrer movimento de elevação. Para o caso onde a velocidade de emissão é de  $1,43$  m/s, a percentagem de elevação da pluma é somente maior para o caso onde a velocidade de emissão é de  $1,12$  m/s a uma distância  $x/h$  de  $1,00$ . A pluma, para  $W_s = 1,43$  m/s, possui uma massa específica menor que a pluma emitida para  $W_s = 1,12$  m/s. Assim, o escoamento dificulta a subida da pluma. Para

uma distância a  $x/h = 1,00$ , as forças de empuxo da pluma se sobressaem às forças de inércia, devido à maior parcela de hélio na mistura, aumentando a percentagem de elevação para a emissão de  $W_s = 1,43$  m/s.

Os perfis de concentrações e intensidades das flutuações de poluentes, obtidos neste trabalho, também podem ser encontrados nos trabalhos de Isyumov e Tanaka (1980), Li e Meroney (1983) e Wittwer (2006).

Nas curvas que apresentam as intensidades das flutuações de concentrações de hélio na pluma, observa-se maiores intensidades nos extremos da pluma (regiões de menor concentração). A intensidade das flutuações da concentração são mais amplificadas na parte superior da curva do que na parte inferior. A força de empuxo é a responsável por esta situação, causando grandes variações nas medições de concentrações nesta região. Na parte inferior da curva, para velocidades médias do escoamento de 0,67 m/s, observa-se a influência aerodinâmica da chaminé na distribuição das intensidades. Fazendo uma comparação da curva de intensidade das flutuações de concentração de hélio entre as velocidades do escoamento de 0,67 m/s e 0,33 m/s, para uma distância  $x/h = 0,32$  (próximo à fonte), nota-se uma distorção da parte inferior da curva. Os turbilhões gerados pela presença da chaminé aumentam a dispersão da pluma no ambiente, diminuindo a intensidade das flutuações. Já no centro da curva, região de máximas concentrações de hélio, a intensidade das flutuações são baixas, sendo menores do que 1 %. Nas figuras 7.1 a 7.5, são apresentadas as séries de dados medidas com a sonda aspirante (processadas pelo programa MATLAB R2006a), para os perfis de velocidade média  $p = 0,11$  e  $0,23$ , em três posições distintas: parte inferior da pluma, centro da pluma (máxima concentração) e parte superior. São observados três regiões distintas da pluma, cada uma apresentando um comportamento característico. Nota-se também que, para as séries temporais da parte inferior da pluma, há uma modificação do comportamento dos dados, para diferentes velocidades do escoamento, devida à influência aerodinâmica da chaminé. A parte superior é caracterizada pela intermitência dos dados, devido às forças de empuxo que são mais intensas nesta região da pluma. O mesmo comportamento foi observado por Wittwer (2006).

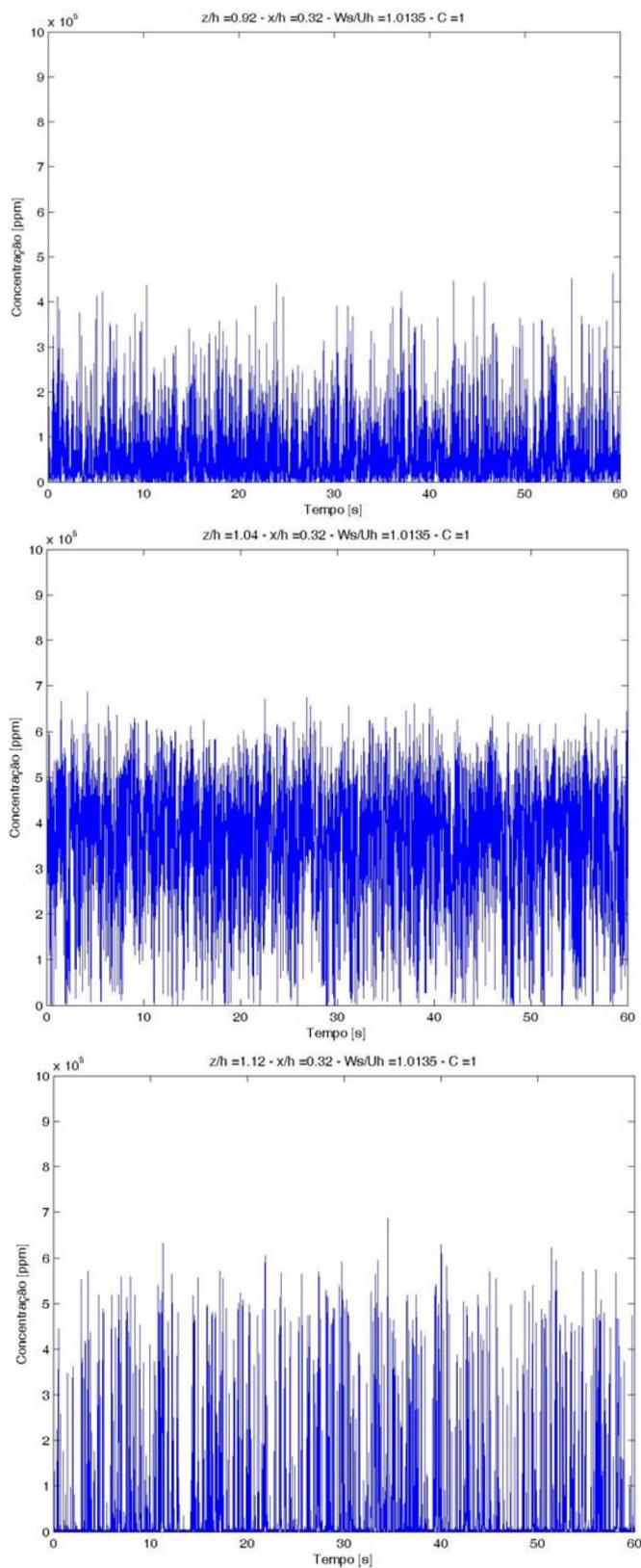


Figura 7.1 - Série temporal de dados de concentração de hélio, para o caso  $a$  ( $W_s = 0,70$  m/s,  $\bar{U} = 0,67$  m/s e  $p = 0,11$ ), representando três regiões características da pluma. De cima para baixo: porção inferior da pluma (com influência aerodinâmica da chaminé), centro (maior concentração média) e porção superior da pluma (dominada pelas forças de empuxo).

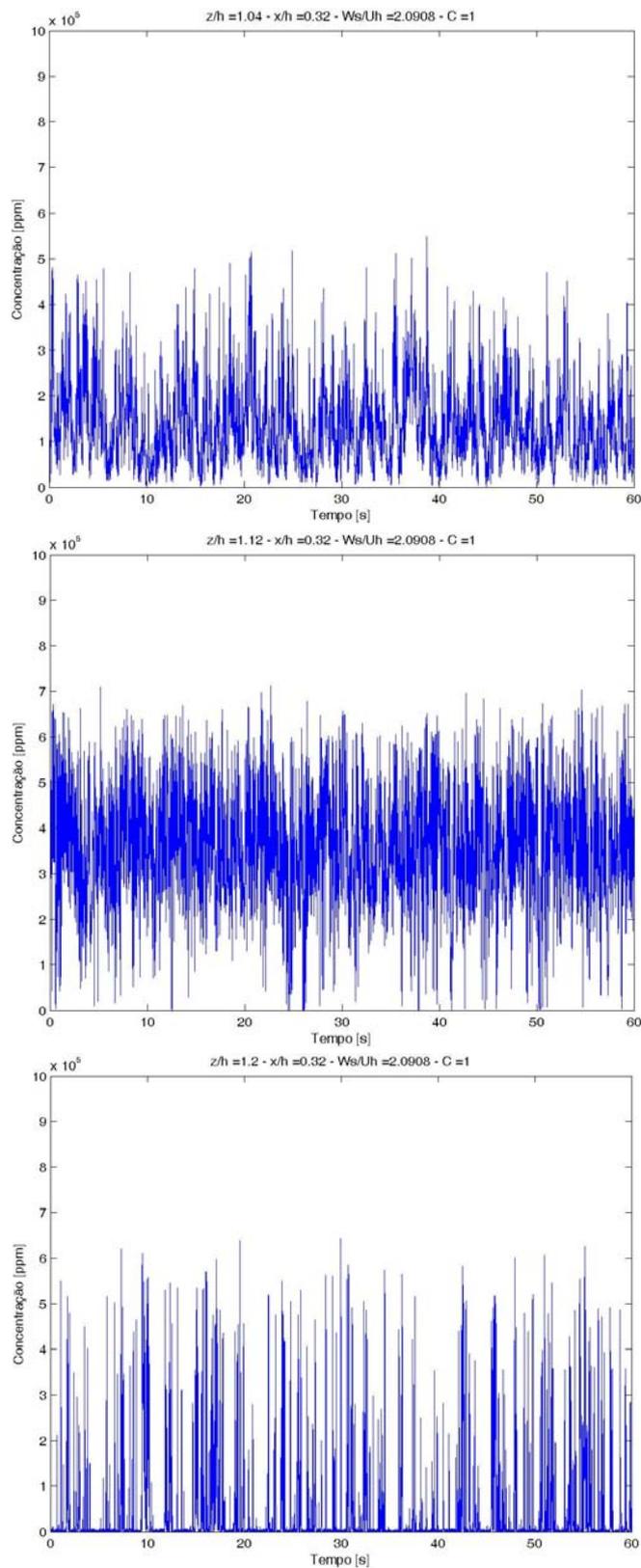


Figura 7.2 - Série temporal de dados de concentração de hélio, para o caso  $f$  ( $W_s = 0,70$  m/s,  $\bar{U} = 0,33$  m/s e  $p = 0,11$ ), representando três regiões características da pluma. De cima para baixo: porção inferior da pluma (sem influência aerodinâmica da chaminé), centro (maior concentração média) e porção superior da pluma (dominada pelas forças de empuxo).

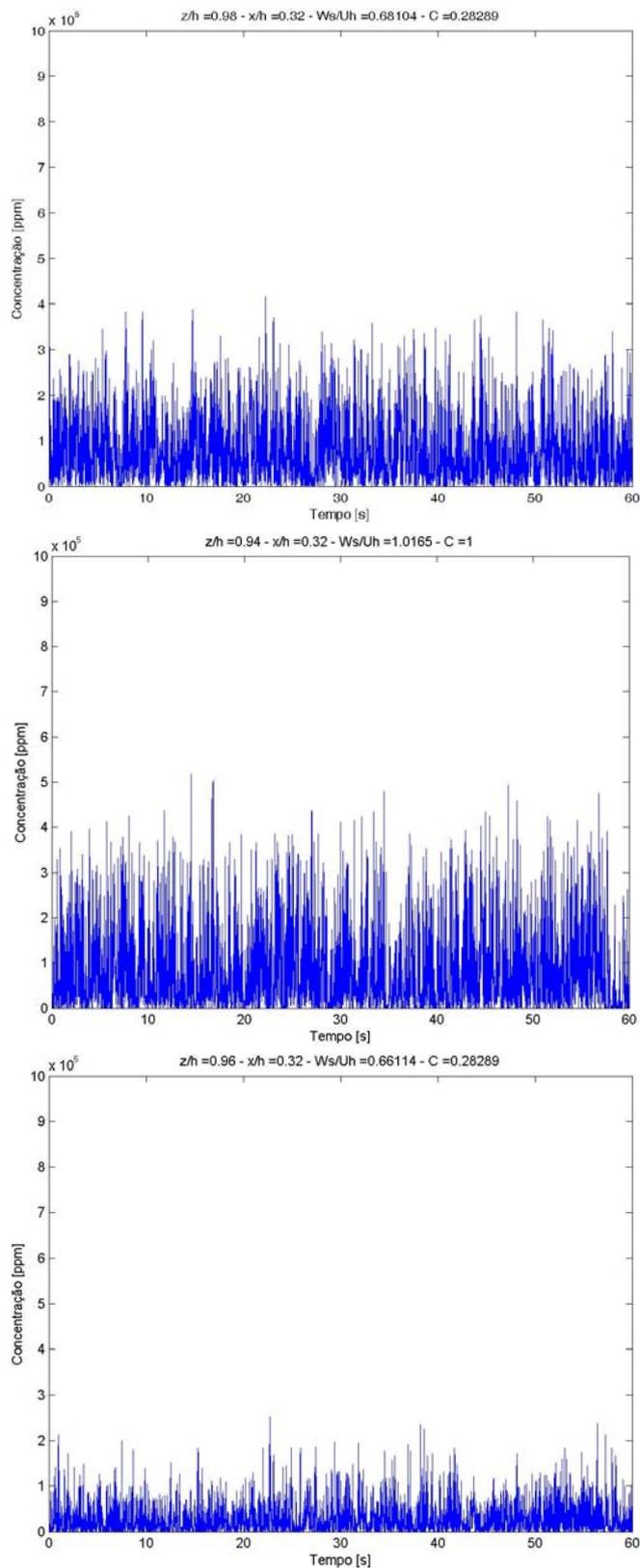


Figura 7.3 - Série temporal de dados de concentração de hélio, representando a porção inferior da pluma com a influência aerodinâmica da chaminé, para três casos distintos, com  $\bar{U} = 0,67$  m/s: *c* ( $W_s = 0,90$  m/s,  $p = 0,11$ ); *k* ( $W_s = 0,70$  m/s,  $p = 0,23$ ) e *m* ( $W_s = 0,90$  m/s,  $p = 0,23$ ).

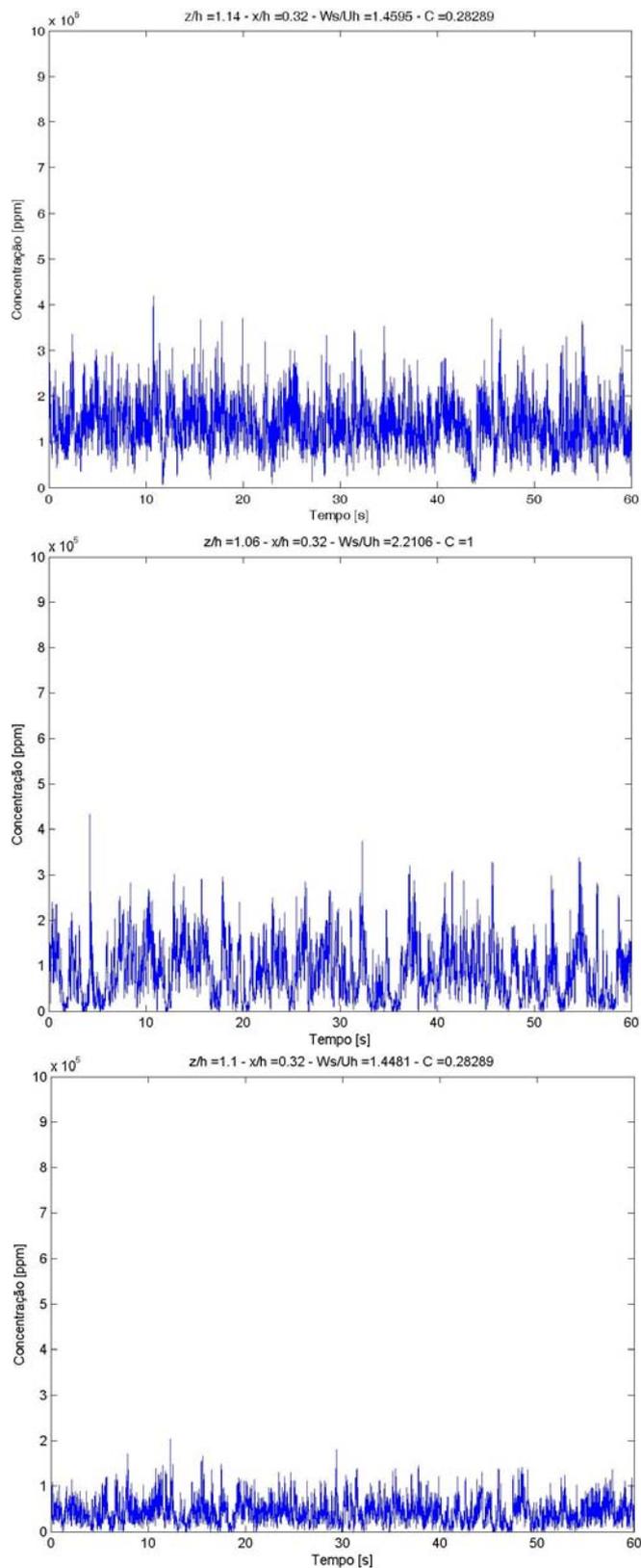
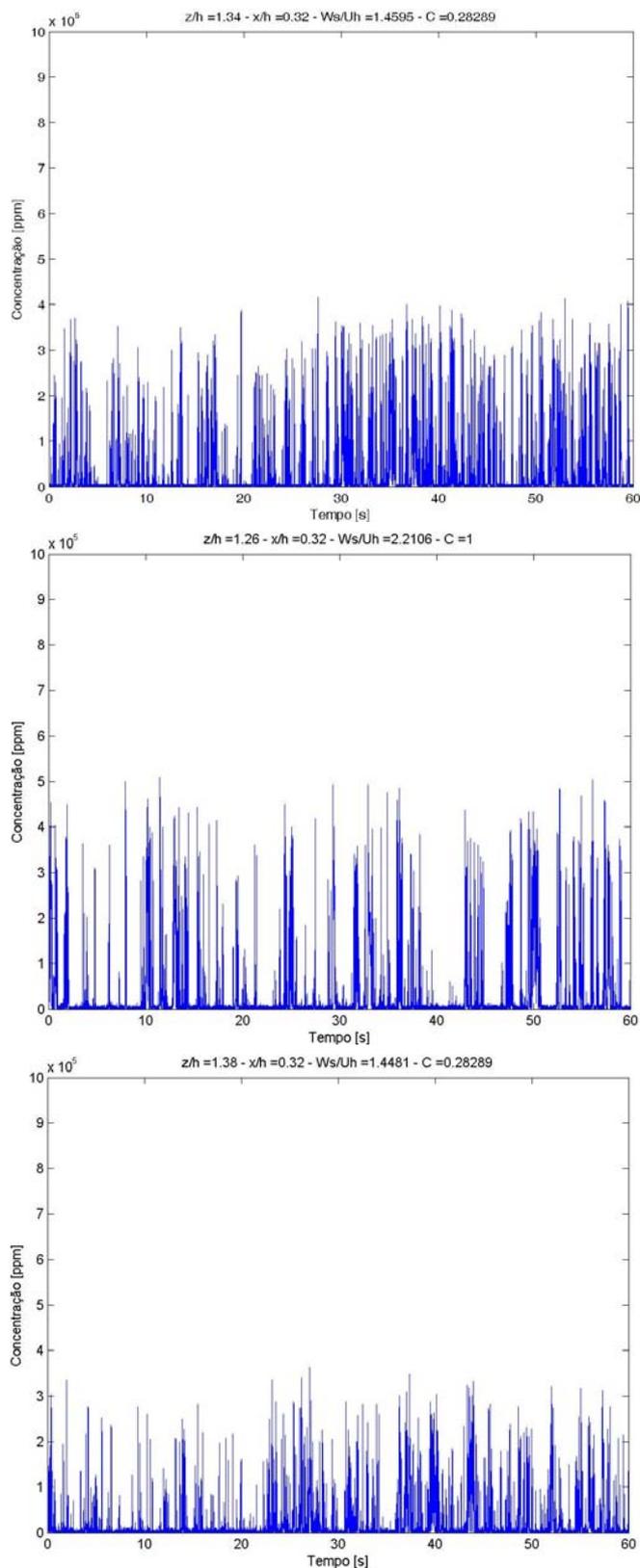


Figura 7.4 - Série temporal de dados de concentração de hélio, representando a porção inferior da pluma sem a influência aerodinâmica da chaminé, para três casos distintos, com  $\bar{U} = 0,33$  m/s: *h* ( $W_s = 0,90$  m/s,  $p = 0,11$ ); *n* ( $W_s = 0,70$  m/s,  $p = 0,23$ ) e *p* ( $W_s = 0,90$  m/s,  $p = 0,23$ ).



**Figura 7.5-** Série temporal de dados de concentração de hélio, representando a porção superior da pluma com domínio das forças de empuxo, para três casos distintos, com  $\bar{U} = 0,33$  m/s: *h* ( $W_s = 0,90$  m/s,  $p = 0,11$ ); *n* ( $W_s = 0,70$  m/s,  $p = 0,23$ ) e *p* ( $W_s = 0,90$  m/s,  $p = 0,23$ ).

## 7.2 Comparações entre Perfis de Concentrações

### 7.2.1 Perfil de concentrações para $p = 0,11$

Para a realização da análise comparativa dos perfis de concentrações, a tabela 7.6 mostra a concentração de hélio emitida para cada tipo de emissão.

Tabela 7.6 - Concentração de hélio emitida pela chaminé para cada caso ensaiado.

Casos	Ws [m/s]	Concentração de hélio emitida - $C_o$ [ppm]
<i>a, f, k e n</i>	0,70	1.000.000
<i>b, g, l e o</i>	1,18	1.000.000
<i>c, h, m e p</i>	0,95	740.591
<i>d e i</i>	1,12	628.156
<i>e e j</i>	1,43	828.321

Em termos de concentrações absolutas, em ppm, as medições a uma distância  $x/h = 0,32$  apresentaram um resultado lógico, ou seja, quanto maior a emissão e a concentração de hélio de saída da chaminé, maior a concentração medida. Porém, quando analisamos em termos de concentrações adimensionais, dividindo-se a concentração de hélio medida no local pela concentração de hélio emitida pela chaminé, vemos que, para os casos ensaiados com a emissão de uma mistura binária hélio-ar, houve uma menor dispersão das concentrações de hélio do que para os casos com emissão de hélio puro, para qualquer das velocidades do escoamento utilizadas.

Para distâncias de  $x/h = 0,66$  e  $1,00$ , torna-se mais visível o fenômeno da dispersão para as emissões com misturas binárias hélio-ar. Nota-se que, tanto em termos de concentrações absolutas como adimensionais, a dispersão da pluma com a mistura é menor do que com hélio puro. As concentrações absolutas para emissões da mistura hélio-ar para velocidades médias do escoamento de  $0,33$  m/s, a uma distância  $x/h = 1,00$ , são maiores que àquelas emitidas com hélio puro. Um dos fatores que influenciaram neste fenômeno foi a turbulência da camada limite simulada em túnel de vento. De acordo com a curva de intensidade de turbulência para o perfil  $p = 0,11$ , a medida que subimos através da camada limite, a intensidade do turbilhões diminui. Assim, quanto maior a altura de elevação da pluma, menor será a intensidade da turbulência e, conseqüentemente, menor a sua elevação.

Em outras palavras, o acréscimo de quantidade de movimento com a soma de ar com o gás hélio para a elevação da altura de emissão, a dispersão das concentrações de hélio serão menores.

Para as curvas que mostram as intensidades das flutuações de concentrações de hélio, os valores de intensidade entre os casos ensaiados são semelhantes a uma distância  $x/h = 0,32$ . As diferenças de intensidade entre os casos é mais pronunciada a distâncias de  $x/h = 0,66$  e  $1,00$ , o que mostra a influência da turbulência da camada limite atmosférica no processo de dispersão de poluentes. Observa-se que as curvas de intensidade, de cada caso ensaiado, na metade inferior praticamente coincidem. Na metade superior há um afastamento causado pela maior altura de elevação da pluma, pela quantidade de movimento e pelas forças de empuxo.

### 7.2.2 Comparações de concentrações para os perfis 0,11 e 0,23

Para uma velocidade de escoamento de  $0,67$  m/s, para os casos onde foi utilizado hélio puro (figuras 6.46 a 6.54), as curvas praticamente coincidem, tanto para os perfis verticais de concentrações médias (valores absolutos e adimensionais), quanto para as intensidades das flutuações de concentrações. Há uma pequena diminuição do pico da maior concentração para o caso em que é simulado um escoamento com perfil 0,23. Para o caso onde se simula a emissão de uma pluma, utilizando uma mistura binária hélio-ar, a diminuição da região de maior concentração é mais visível, porém para a curva de intensidade das flutuações há praticamente uma coincidência entre os dois casos.

Os resultados apresentados para uma velocidade média do escoamento de  $0,33$  m/s (figuras 6.55 a 6.63), os valores de concentrações da pluma são praticamente os mesmos entre os casos  $f$  e  $n$  e os casos  $g$  e  $o$ . Há uma diferença visível dos níveis de concentrações entre os casos  $h$  e  $p$ . Nos resultados apresentados, observa-se que há uma maior elevação da altura da pluma simulada num perfil da lei potencial de velocidades médias do vento 0,23 do que no perfil 0,11. Isto pode ser explicado pelo fato de que há uma diminuição das forças inerciais do perfil 0,23 com a altura, quando comparadas com o perfil 0,11. Dessa forma, as forças de empuxo se sobressaem, aumentando a cota de elevação da pluma no perfil 0,23.

### 7.3 Avaliação da Resolução da Sonda Aspirante

Na simulação realizada para a verificação da resolução da sonda aspirante, utilizando uma velocidade média do escoamento na altura da chaminé de 1,46 m/s e uma velocidade de emissão de 0,70 m/s, observou-se que a sonda aspirante somente pode ser aplicada em situações de estudos de efeitos locais de dispersão de poluentes, num raio de abrangência de 200 m a 500 m na escala real.

A figura 6.65, apresentada no capítulo 6, mostra a perda de resolução da sonda para uma distância maior do que 3 vezes a altura da chaminé, o equivalente a 225 m em escala real. O motivo da falta de resolução da sonda é a massa específica do gás aspirado que está muito próxima da do ar. A sonda aspirante somente pode ser usada como instrumento de medição de concentrações de gases quando há uma grande diferença entre a massa específica do gás a ser medido e o gás ambiente. Desse modo, como observado na figura 6.65, a distorção apresentada pelas curvas mostra a limitação da sonda para estudos mais complexos, simulados em meso e macro escala. As figuras 7.6 e 7.7 mostram o sinal da sonda, na região da curva, onde há maior concentração média de hélio.

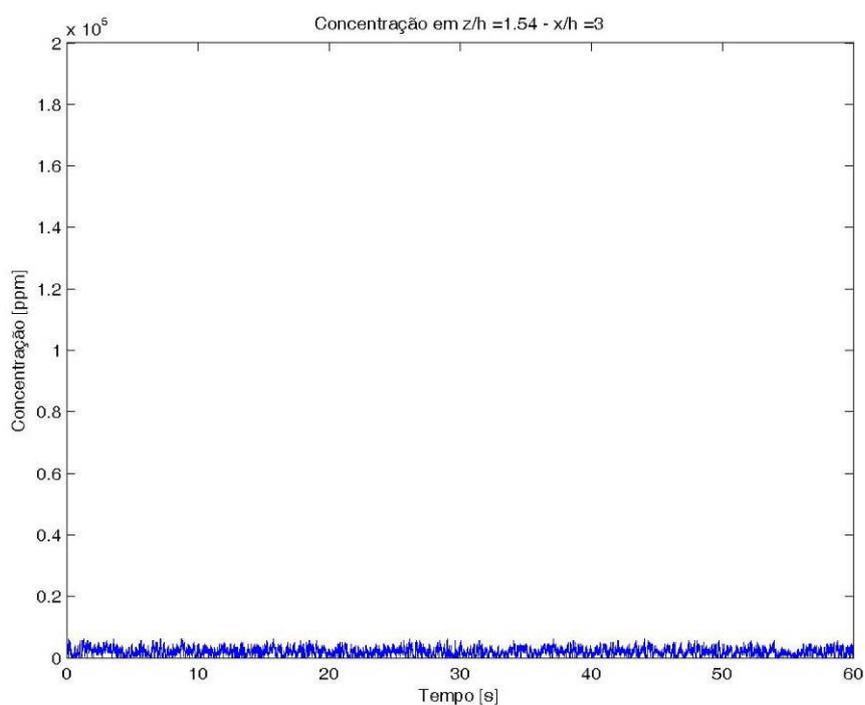


Figura 7.6 - Série temporal obtida com a sonda aspirante no centro da pluma, a uma distância  $x/h = 3$ .

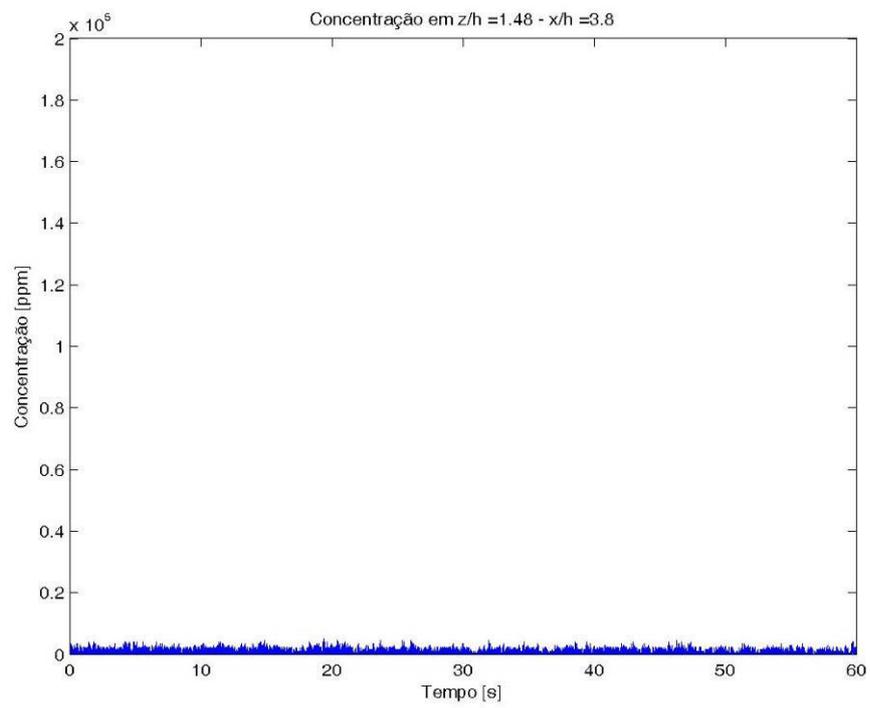


Figura 7.7 - Série temporal obtida com a sonda aspirante no centro da pluma, a uma distância  $x/h = 3,8$ .

## 8 CONCLUSÕES

Os ensaios realizados em túnel de vento de camada limite atmosférica, para simular a dispersão de uma pluma de contaminantes emitida por uma chaminé isolada apresentaram, qualitativamente, resultados satisfatórios, uma vez que a pluma teve um comportamento semelhante a uma pluma do modelo gaussiano, muito utilizado para estudos de dispersão de contaminantes. O Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, mostrou-se adequado para a realização destes tipos de estudos.

Concluiu-se que para as velocidades mais altas da simulação, há influência da presença da chaminé sobre o processo de dispersão da pluma, modificando a intensidade das flutuações de concentrações. A velocidades mais baixas, não houve influência da chaminé, uma vez que houve o aumento da altura de elevação da pluma.

Os parâmetros de semelhança que calculam a quantidade de movimento, as forças de empuxo da pluma (Froude densimétrico modificado) e as forças inerciais do escoamento mostraram ser fundamentais para a definição do comportamento da pluma. Quando as forças inerciais do escoamento são maiores que as forças de empuxo da pluma, verifica-se uma influência aerodinâmica da chaminé sobre a pluma. Quando há a inversão dessas forças, o comportamento da pluma passa a não ser influenciado pela chaminé.

O acréscimo do ar no sistema de emissão (mistura binária hélio-ar) aumenta a massa específica do gás emitido, aumentando a quantidade de movimento e, conseqüentemente a altura de elevação da pluma. Nos casos simulados usando a emissão da mistura binária hélio-ar, houve uma menor dispersão das concentrações relativas médias do gás hélio comparado com os casos onde se utilizou hélio puro. Este efeito parece estar associado a uma diminuição da intensidade da turbulência, situação encontrada pela pluma ao elevar-se devido ao aumento da quantidade de movimento.

A pluma de hélio possui três regiões distintas. Cada região apresenta um comportamento característico com relação aos valores instantâneos de concentração, como pode ser visto nas séries temporais dos dados. A parte inferior da pluma é governada pelas forças inerciais, pela turbulência do escoamento e pela influência aerodinâmica da chaminé (quando existente); a parte central é somente influenciada pela turbulência do escoamento; na

parte superior da pluma há, além da turbulência, a influência das forças de empuxo, responsáveis pela intermitência das flutuações de concentração.

Nas comparações entre as curvas de concentrações médias de hélio e intensidade das flutuações de concentrações, para os tipos de vento simulados, percebeu-se a diminuição das concentrações médias na região central da curva para o escoamento mais turbulento. Para o mesmo tipo de vento, porém com velocidades mais baixas, observou-se um aumento da elevação da região central da curva de concentrações, em comparação ao escoamento menos turbulento.

Quanto à instrumentação utilizada, conclui-se que a sonda aspirante, em conjunto com o anemômetro de fio- quente, constitui um bom sistema de aquisição instantânea da concentração de poluentes para simulações em túnel de vento. Porém, sua utilização está limitada apenas aos estudos de efeitos locais de dispersão de poluentes. Sua limitação está ligada à falta de resolução, para distâncias superiores a três vezes a altura do modelo de chaminé. Para estas distâncias, o fio- quente é praticamente insensível às variações de massa específica.

### ***8.1 Sugestões para Trabalhos Futuros***

Com o desenvolvimento da área de pesquisa sobre simulação da dispersão de poluentes em túnel de vento no Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC/UFRGS), abre-se um campo muito amplo para vários estudos sobre o comportamento da pluma e a utilização de modelos de canhões urbanos, para avaliação do processo de dispersão.

Um trabalho a ser realizado é o estudo do comportamento da pluma em escoamentos estratificados, simulando uma camada limite estável, para avaliar os efeitos de bloqueio da elevação da pluma. Além disso, um estudo sobre influência aerodinâmica da chaminé no processo de dispersão, com o uso de diferentes formas geométricas de chaminés, avaliando as modificações provocadas no perfil de concentrações de poluentes.

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BLESSMANN, Joaquim. **O Vento na Engenharia Estrutural**. Porto Alegre: Editora da Universidade, 1995. 166p.
2. BLESSMANN, Joaquim. The Boundary Layer TV-2 Wind Tunnel of the UFRGS. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, v.10, n° 2, p.231-248, Aug 1992.
3. CAMAÑO SCHETTINI, E. B. Turbulência em escoamentos estratificados : aplicações industriais. In: II ESCOLA BRASILEIRA DE PRIMAVERA TRANSIÇÃO E TURBULÊNCIA, 2., 2000, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: 2000. p. 1-41.
4. CAMAÑO SCHETTINI, E. B. **Etude expérimentale des jets coaxiaux avec différences de densité**. 1996. 177 f. Thèse (Docteur em Mécanique des Fluides et Transferts) – l’Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, 1996.
5. CERMAK, J. E., TAKEDA, K. Physical Modeling of Urban Air-Pollutant Transport. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, v.21, p.51-67, 1985.
6. CHEUNG J. C. K., MELBOURNE, W. H., Building downwash of plumes and plume interactions. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, v.54/55, p.543-548, 1995.
7. CONAMA. **Resolução nº 003**, de 28 de junho de 1990. Estabelece padrões de qualidade do ar e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/conama>>. Acesso em: 15 maio 2004.
8. CROOKS, G., ISYUMOV, N. **A Study of the Acceptability of Proposed Stacks on University of Western Ontario Chemistry Building**. London: Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory, 1990. (Série Texto Técnico, BLWT – SS38 – 1990).

9. DANTEC DYNAMICS: Constant Temperature Anemometry. **Dantec Dynamics A/S**. Tonsbakken, 2006. Disponível em: <<http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=654>>. Acesso em 01 nov. 2006.
10. DAVIS, M. L., CORNWELL, D. A. **Introduction to Environment Engineering**. 3.ed. New York: WCB McGraw-Hill, 1998.
11. EPSTEIN, M. **Turbulent air – flow and dispersion of pollutants in the atmosphere**. Haifa: Technion, 74 p. These (Doctor in Environment Engineering) – Israel Institute of Technology Graduate School, Technion, Haifa, 1978.
12. FOX, R. W., McDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. Trad. Ricardo Nicolau Nassar Koury e Geraldo Augusto Campolina França. 5.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2001.
13. HALSTEAD, A. G., WOOD, C. J. The calibration of an aspirating conductivity probe for thermal pollution experiments. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, v.9, p.237-249, 1982.
14. ICHIKAWA, Y., SADA, K. Simulation of diffusion phenomena under unstable condition using a Lagrangian particle dispersion model. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, v.46 & 47, p.681-688, 1993.
15. ISYUMOV, N., FERRARO, V. **A Study of Stack Gas Dispersion and the Extent of the Aerodynamic Cavity for the Ontario Hydro Darlington Nuclear Generating Station**. London: Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory, 1982. (Série Texto Técnico, BLWT – SS13 – 1982).
16. ISYUMOV, N., HELLIWELL, S., DAVENPORT, A. G. **Study of Air Quality in Precinct “A” of the Railway Lands**. London: Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory, 1986. (Série Texto Técnico, BLWT – SS13 – 1986).

17. ISYUMOV, N., MAHEU, J.M. **A Study of Stack Gas Dispersion for the Ontario Hydro Atikokan Power Generating Station.** London: Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory, 1980. 46p. (Série Texto Técnico, BLWT – SS9 – 1980).
18. ISYUMOV, N., TANAKA, H. Wind Tunnel Modelling of Stack Gas Dispersion – Difficulties and Approximations. In: WIND ENGINEERING PROCEEDINGS OF THE FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE, Fort Collins, 1979. **Anais...** Fort Collins: Pergamon Press, 1980, p.987-1001.
19. JANDALI, T., ISYUMOV, N., DAVENPORT, A.G. **A Study of Stack Gas Dispersion for the Powerton Plant.** London: Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory, 1974. 47p. (Série Texto Técnico, BLWT – SS4 – 74).
20. JANSSEN, L. A. M. Wind-tunnel modeling of dispersion of odours in the neighbourhood of pig houses. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, v.4, p.391-398, 1979.
21. KASTNER-KLEIN, P., PLATE, E. J. Wind-Tunnel Study of Concentration Fields in Street Canyons. **Atmospheric Environment**. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, v.33, p.3973-3979, 1999.
22. LESIEUR, M. **Turbulence in Fluids**. 2.ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995.
23. LI, Wen-Whai, MERONEY, Robert N. Gas Dispersion Near a Cubical Model Building. Part I. Mean Concentration Measurements. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, v. 12, p.15-33, 1983.
24. LI, Wen-Whai, MERONEY, Robert N. Gas Dispersion Near a Cubical Model Building. Part II. Concentration Fluctuation Measurements. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, v. 12, p.35-47, 1983.

25. LIPTÁK, B. G. **Instrument Engineers' Handbook**. 3. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, c1995. 2 v. : il.
26. LORA, E. E. S. **Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energético, Industrial e de Transporte**. 2.ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência Ltda, 2002.
27. LOREDO SOUZA, A. M., SCHETTINI, E. B. C., PALUCH, M. J. Simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento. In: MÖLLER, S. V., SILVESTRINI, J. H. **Turbulência**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Ciências e Engenharia Mecânica, 2004, vol.4, p.137-164.
28. MERONEY, R. N. Lift Off of Buoyant Gas Initially on the Ground. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, v.5, p.1-11, 1979.
29. MERONEY, R. N., NEFF, D. E. Dispersion of Vapor from Liquid Natural Gas Spills – Evaluation of Simulation in a Meteorological Wind Tunnel: Five-Cubic-Meter China Lake Spill Series. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, v.10, p.1-19, 1981.
30. MIGUEL, Jacques. **El Anemómetro de Hijo Caliente: Elementos Básicos de su Teoría, su Funcionamiento y sus Aplicaciones**. [Chile]: [S.n.], 1972. Marzo.
31. MÖLLER, S. V., SILVESTRINI, J. H. Turbulência: fundamentos. In: MÖLLER, S. V., SILVESTRINI, J. H. **Turbulência**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Ciências e Engenharia Mecânica, 2004, vol.4, p.1-32.
32. MORAES, Osvaldo L. L., ACEVEDO, Otávio. Fluxos turbulentos na atmosfera. In: MOREIRA, D. M., CARVALHO, J. C., VILHENA, M. T. **Tópicos em Turbulência e Modelagem da Dispersão de Poluentes na Camada Limite Planetária**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005, p. 17-29.
33. MORIGUCHI, Y., UEHARA, K. Numerical and Experimental Simulation of Vehicle Exhaust Gas Dispersion for Complex Urban Roadways and their Surroundings.

- Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, v.46 & 47, p.689-695, 1993.
34. NEFF, D. E., TAN, T. Z., MERONEY, R. N. **Fluid Modeling of Exhaust Gas Dispersion from the Boston-Edison Ventilation Site, Central Artery/Third Harbor Tunnel Project**. Fort Collins: Colorado State University, 1988. 73 p. (Série Texto Técnico, CER88 - 89DEN – TZT – RNM - 7).
35. PARKER, Albert (org.). **Industrial Air Pollution Handbook**. Londres: McGraw-Hill, p.123-141, 1978.
36. POREH, M., KACHERGINSKY, A. Simulation of Plume Rise Using Small Wind-Tunnel Models. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, v.7, p.1-14, 1981.
37. RAMSAY, S. **Air Pollution**. 1992. Notas de Aula. Mimeografado.
38. RIVA, Roland. **Ecoulements de fluids inhomogènes: stabilité des jets transferts turbulents dans les couches limites**. 1991. 246 f. Thèse (Docteur en Mécanique) – l’Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, 1991.
39. ROBINS, Alan. Wind Tunnel Dispersion Modelling Some Recent and Not So Recent Achievements. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, v.91, issue 12-15, p.1777-1790, Dez 2003.
40. RUSCHEWEYH, H., FISCHER, K. Aerodynamic Effects of Large Natural-Draught Cooling Towers on the Atmospheric Dispersion from a Stack. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, v.4, p.399-413, 1979.
41. Secretaria Municipal do Meio Ambiente de Porto Alegre. A Poluição Atmosférica, In: ZURITA, Manuel Luiz Leite, (Org.), TOLFO, Alessandra Moschem, (Org.). **A Qualidade do Ar em Porto Alegre**. Porto Alegre: Secretaria Municipal do Meio Ambiente, 2000, p.30-35.
42. SCHLICHTING, Hermann. **Boundary Layer Theory**. Trad. J. Kestin. New York: McGraw-Hill Book Company Inc., 1960.

43. SHAPIRO, Ascher H. **The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow**. New York: Roland Press Company, Vol. I, p.100, 1953.
44. STULL, Roland B. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988.
45. TENNEKES, H., LUMLEY, J. L. **A First Course in Turbulence**. Cambridge: The MIT Press, 1972.
46. WITTEWER, A. **Simulação do Vento Atmosférico e dos Processos de Dispersão de Poluentes em Túnel de Vento**. Porto Alegre: UFRGS, 208 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
47. WHITE, B. R., STEIN, W. Wind-Tunnel Studies of Variable Stack Heights for a Low-Profile Building. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, v.36, p.675-687, 1990.
48. WILSON, D. J., NETTERVILLE, D. D. J. A fast-response, heated-element concentration detector for wind-tunnel applications. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, v.7, p.55-64, 1981.
49. ZANNETTI, Paolo. The Problem: Air Pollution. In: ZANNETTI, Paolo. **Air Pollution Modeling: Theories, Computational Methods and Available Software**. New York: Computational Mechanics Publications, p. 41-55, 1990.