

**MINISTÉRIO DA DEFESA  
EXÉRCITO BRASILEIRO  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA  
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA NUCLEAR**

**LAURA ALICE DE ARAUJO RIBEIRO**

**PROCEDIMENTO DE DETERMINAÇÃO DOS  
COEFICIENTES DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA DO  
MODELO GAUSSIANO ATRAVÉS DE ANÁLISE  
FOTOGRAFICA DE PLUMAS DE FUMAÇA**

**Rio de Janeiro**

**2009**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**LAURA ALICE DE ARAUJO RIBEIRO**

**PROCEDIMENTO DE DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE  
DISPERSÃO ATMOSFÉRICA DO MODELO GAUSSIANO ATRAVÉS  
DE ANÁLISE FOTOGRÁFICA DE PLUMAS DE FUMAÇA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Nuclear do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Nuclear.

Orientador: Prof. Sérgio Gavazza - Ph.D.

Co-orientador: Pedro Paulo de Lima-e-Silva – D.Sc.

Rio de Janeiro

2009

C2009

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro - RJ      CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmear ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

621.48    Ribeiro, Laura Alice de Araujo  
R484p      Procedimento de Determinação dos Coeficientes de Dispersão Atmosférica do Modelo Gaussiano através de Análise Fotográfica de Plumas de Fumaça / Laura Alice de Araujo Ribeiro. - Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2009.  
116 p.: il.

Dissertação (mestrado) - Instituto Militar de Engenharia – Rio de Janeiro, 2009.

1. Dispersão Atmosférica. 2. Fotografia. I. Título. II. Instituto Militar de Engenharia.

CDD 621.48

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**LAURA ALICE DE ARAUJO RIBEIRO**

**PROCEDIMENTO DE DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE  
DISPERSÃO ATMOSFÉRICA DO MODELO GAUSSIANO ATRAVÉS  
DE ANÁLISE FOTOGRÁFICA DE PLUMAS DE FUMAÇA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Nuclear do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Nuclear.

Orientador: Prof. Sérgio Gavazza - Ph.D.

Co-orientador: Pedro Paulo de Lima-e-Silva – D.Sc.

Aprovada em 15 de abril de 2009 pela seguinte Banca Examinadora:

---

Sérgio Gavazza – Ph.D. do IME - Presidente

---

Pedro Paulo de Lima-e-Silva – D.Sc. da CNEN

---

Rex Nazaré Alves – D.Sc. do IME

---

Luiz Cláudio Gomes Pimentel – D.Sc. da UFRJ

Rio de Janeiro

2009

## AGRADECIMENTOS

À CNEN pela a oportunidade de realização deste trabalho.

Ao Professor Pedro Paulo Lima-e-Silva, orientador e criador do projeto, pelo apoio sempre presente, por sua paciência e, principalmente, por suas recomendações valiosas e conhecimentos científicos que ampliaram meus horizontes.

Aos meteorologistas e mestres Igor Luiz Bacelar Leão e Patrícia Moço Princisval Almeida pelo incentivo a ingressar na área da engenharia nuclear.

Ao professor doutor Sérgio Gavazza, orientador, por toda amizade e confiança ao longo de todo o andamento deste trabalho, além de seus conhecimentos na área de proteção radiológica.

A todos os professores do IME, principalmente a professora doutora Maysa Joppert Coelho e o professor Rex Nazaré Alves, pelo estímulo e contribuição teórica ao longo do curso.

À Eletronuclear pelos dados cedidos necessários para o desenvolvimento desta dissertação.

A todos os amigos que fiz durante o curso de Engenharia Nuclear que batalharam comigo em cada disciplina.

Aos funcionários da Seção de Engenharia Nuclear do IME pela presteza no atendimento na secretaria e na organização da seção.

A CAPES pelo financiamento da pesquisa.

Finalmente, gostaria de expressar a minha gratidão pelas pessoas mais importantes da minha vida:

Ao meu companheiro Mário por todo carinho e compreensão, além de seu incentivo em todos os meus trabalhos.

Aos meus pais Regina e Eduardo, meu irmão Rodrigo, meus avós pelo amor e apoio incondicional ao longo de toda a minha formação pessoal e acadêmica.

Aos meus tios e primos pela motivação incansável.

## SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	7	
LISTA DE TABELAS .....	10	
LISTA DE SÍMBOLOS .....	11	
LISTA DE SIGLAS .....	12	
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1	A Poluição Atmosférica.....	15
1.2	Descrição do Problema .....	16
1.3	Histórico .....	17
1.4	Objetivos.....	21
1.5	Caso Analisado .....	22
1.6	Organização do Trabalho.....	23
<b>2</b>	<b>DISPERSÃO ATMOSFÉRICA .....</b>	<b>24</b>
2.1	Física do Fenômeno .....	24
2.1.1	Parâmetros Meteorológicos .....	25
2.1.2	Influência do Aquecimento Diferencial da Superfície .....	31
2.1.3	Influência de Estruturas .....	33
2.1.4	Influência dos Parâmetros da Fonte.....	34
2.1.5	Mecanismos de Remoção de Poluentes .....	34
2.2	Modelagem da Qualidade do Ar.....	35
2.2.1	Modelo da Pluma Gaussiana .....	35
2.2.1.1	Descrição da Equação da Pluma Gaussiana .....	37
2.2.1.2	Altura Efetiva.....	42
2.2.1.3	Coefficientes de Dispersão Atmosférica.....	44
2.2.1.3.1	Sistema de Pasquill-Gifford.....	45
2.2.1.3.2	Sistema Urbano de Briggs .....	49
<b>3</b>	<b>ANÁLISE DE FOTOGRAFIAS DE PLUMAS DE FUMAÇA .....</b>	<b>51</b>
3.1	Considerações Geométricas na Imagem Fotográfica .....	51

3.2	Análise Fotográfica.....	51
3.2.1	Determinação das Dimensões Reais da Pluma de Fumaça.....	52
3.2.2	Determinação dos Coeficientes de Dispersão Atmosférica.....	60
3.3	Incertezas Associadas à Estimativa dos Coeficientes de Dispersão Atmosférica a Partir de Fotografias .....	62
<b>4</b>	<b>APLICAÇÃO DA METODOLOGIA.....</b>	<b>64</b>
4.1	Origem dos Dados Primários.....	64
4.2	As Usinas Nucleares no Contexto da Dispersão Atmosférica.....	65
4.3	Localização e Topografia da CNAAA .....	68
4.4	Monitoração da Meteorologia da CNAAA.....	69
4.5	Meteorologia e Climatologia da CNAAA .....	71
4.6	Comparação entre a Climatologia e o Comportamento Atmosférico em Fevereiro de 1987 na CNAAA .....	73
4.7	Aplicação da Técnica na Obtenção dos Coeficientes de Dispersão Atmosférica do Sítio da CNAAA .....	77
4.7.1	Estimativa de $\sigma_y$ .....	79
4.7.2	Estimativa de $\sigma_z$ .....	81
4.7.3	Conseqüências Potenciais do Uso de Sigmas Alóctones.....	86
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>87</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>91</b>
<b>7</b>	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>99</b>
<b>7.1</b>	<b>APÊNDICE 1: DERIVAÇÃO MATEMÁTICA DA DETERMINAÇÃO DE SIGMA - MÉTODO DE GIFFORD (1957).....</b>	<b>100</b>
<b>7.2</b>	<b>APÊNDICE 2: DISTRIBUIÇÃO NORMAL.....</b>	<b>103</b>
<b>7.3</b>	<b>APÊNDICE 3: INFORMAÇÕES RELEVANTES À TOMADA DAS IMAGENS FOTOGRÁFICAS .....</b>	<b>106</b>
<b>7.4</b>	<b>APÊNDICE 4: EXEMPLO NUMÉRICO DA DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE DISPERSÃO .....</b>	<b>112</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG 2.1	Comportamento dos efluentes liberados na atmosfera .....	25
FIG. 2.2	Efeito da rugosidade do terreno no perfil de velocidade do vento. ....	26
FIG 2.3	Influência da velocidade do vento (a) alta e (b) baixa.....	27
FIG 2.4	Atmosfera instável (a), neutra (b) e estável (c). ....	28
FIG 2.5	Altura Efetiva.....	30
FIG 2.6	Brisa Marítima (a); Brisa Terrestre (b).....	32
FIG 2.7	Brisa de Vale-Montanha. ....	32
FIG 2.8	Características do fluxo de ar próximo a um elemento urbano .....	33
FIG 2.9	Modelo de Pluma Gaussiana .....	36
FIG 2.10	Altura Efetiva.....	42
FIG 2.11	Curvas de Pasquill-Gifford para sigma y (a) e z (b).....	48
FIG 2.12	Curvas de Briggs (urbano) para sigma y (a) e z (b).....	50
FIG 3.1	Foto de um microdensitômetro, modelo PDS 1010A.....	53
FIG 3.2	Ilustração frontal da pluma de fumaça.Eixo focal perpendicular (situação ideal) (a) e inclinado (b) em relação à linha central (a jusante da fonte) da pluma de fumaça .....	54

FIG 3.3	Ilustração aérea da pluma de fumaça. Eixo focal perpendicular (situação ideal) (a) e inclinado (b) em relação à linha central (a jusante da fonte) da pluma de fumaça. ....	54
FIG 3.4	Vista aérea de uma pluma de fumaça e os parâmetros considerados em sua análise .....	55
FIG 3.5	Vista lateral de uma pluma de fumaça e os parâmetros considerados em sua análise .....	59
FIG 3.6	Vista aérea da CNAAA com parâmetros considerados na análise da pluma de fumaça.....	59
FIG 3.7	Parâmetros envolvidos na derivação dos coeficientes de dispersão de pluma de fumaça integradas no tempo.....	60
FIG 4.1	Barreira de Segurança de um Reator Nuclear.....	66
FIG 4.2	Localização de Angra dos Reis e da CNAAA (indicada pela seta vermelha).....	68
FIG 4.3	Vista da CNAAA .....	69
FIG 4.4	Localização das Torres Meteorológicas no CNAAA .....	70
FIG 4.5	Média pluviométrica mensal relativa ao período de 1980-2004. ....	71
FIG 4.6	Comparação entre a frequência da velocidade do vento da climatologia e a de fevereiro de 1987 para as torres A 10 (A); A60 (B); A100 (C); B15(d); C15(e) e D15(f).....	75
FIG 4.7	Frequência climatológica (1980-2006) (a) e de fevereiro de 1987 (b) das classes de estabilidade de Pasquill para o período diurno (7 às 18 horas) e noturno (19 às 6 horas). ....	76

FIG 4.8	Localização da posição do fotógrafo e detonação das bombas de fumaça na CNAAA. ....	78
FIG 4.9	Estimativa do coeficiente de dispersão horizontal através de fotografias de plumas de fumaça para a Classe de Estabilidade E .....	80
FIG 4.10	Comparação entre o coeficiente de dispersão horizontal derivado das fotografias de plumas de fumaça e dos sistemas de Pasquill-Gifford e de Briggs (urbano) – Classe de Estabilidade E .....	81
FIG 4.11	Estimativa do coeficiente de dispersão vertical através de fotografias de plumas de fumaça para as Classes de Estabilidade C, D e E.....	84
FIG 4.12	Comparação entre o coeficiente de dispersão horizontal derivado das fotografias de plumas de fumaça e dos sistemas de Pasquill-Gifford e de Briggs (urbano) – Classe de Estabilidade C.....	84
FIG 4.13	Comparação entre o coeficiente de dispersão horizontal derivado das fotografias de plumas de fumaça e dos sistemas de Pasquill-Gifford e de Briggs (urbano) – Classe de Estabilidade D .....	85
FIG 4.14	Comparação entre o coeficiente de dispersão horizontal derivado das fotografias de plumas de fumaça e dos sistemas de Pasquill-Gifford e de Briggs (urbano) – Classe de Estabilidade E.....	85

## LISTA DE TABELAS

TAB 2.1	Classe de Estabilidade de Pasquill.....	46
TAB 2.2	Relação entre a Classe de Estabilidade de Pasquill e o Gradiente de Temperatura.....	46
TAB 2.3	Parâmetros das equações dos coeficientes de dispersão do Sistema Pasquill-Gifford.....	47
TAB 2.4	Parâmetros das equações dos coeficientes de dispersão do Sistema Urbano de Briggs.....	49
TAB 4.1	Características principais das torres meteorológicas da CNAAA.....	70
TAB 4.2	Características relevantes na determinação de $\sigma_z$ .....	82

## LISTA DE SIMBOLOS

- $\Gamma_d$  - gradiente adiabático seco de temperatura
- $\delta$  - delta de Dirac
- $\pi$  - constante matemática igual a 3,1415926...
- $\Delta T$  - variação da temperatura
- $\Delta z$  - variação da altura
- $\sigma_y$  - coeficiente de dispersão horizontal
- $\sigma_z$  - coeficiente de dispersão vertical
- $\chi$  - concentração de poluentes

## LISTA DE SIGLAS

CLP	Camada Limite Planetária
CNAAA	Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
U.S.DOE	<i>United States Department of Energy</i>
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
U.S.EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
FURNAS	Furnas Centrais Elétricas S.A.
LANDSAT	<i>Land Remote Sensing Satellite</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
U.S.NRC	<i>United States Nuclear Regulatory Commission</i>

## RESUMO

Esta dissertação propõe uma técnica procedimental para estimar os coeficientes de dispersão atmosférica do modelo de dispersão atmosférica gaussiano  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ , característicos dos padrões de dispersão de uma fonte pontual de poluição. A técnica utiliza a metodologia de análise de plumas de fumaça desenvolvida pelos pesquisadores do NOAA na década de 1950 cujas bases científicas são apresentadas. Para demonstrar a eficácia da técnica, foi utilizada uma pequena amostra dos dados e registros fotográficos das plumas de fumaça dos experimentos FURNAS/NOAA de 1986 e 1987, no sítio da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto, Angra dos Reis, RJ. A hipótese foi a de que uma medição direta sobre as fotografias produziria resultados de melhor qualidade para a avaliação de impacto ambiental do que quaisquer parametrizações alóctones. A metodologia aplicada foi a medição geométrica corrigida diretamente sobre as fotografias, com as devidas considerações técnicas e científicas. Os coeficientes horizontais derivados usando-se a técnica proposta e uma pequena amostra ficaram acima dos valores esperado para Itaorna, mas o tamanho pequeno da amostra torna o resultado não-conclusivo. Os coeficientes verticais, por outro lado, com uma amostra um pouco maior, resultaram em valores centralizados no intervalo esperado. Estes foram comparados com os sistemas Pasquill-Gifford (deserto) e Briggs (urbano), demonstrando total consistência. Conclui-se que, ratificando resultados anteriores, o uso de fumaça e fotografias para caracterizar micrometeorologia de sítios é viável, de baixo custo e pode ser aplicado em tese a qualquer sítio industrial, tornando os resultados do modelo gaussiano várias ordens de grandeza mais eficiente e preciso. Mais ainda, as fotografias podem ser analisadas visualmente, sem necessidade de instrumentos especiais, e os resultados permanecem cientificamente aceitáveis e úteis.

## ABSTRACT

This master's thesis proposes a procedure technique to estimate the atmospheric dispersion coefficients of the Gaussian plume dispersion model,  $\sigma_y$  and  $\sigma_z$ , which are characteristics of dispersion patterns from a pollution point source. The technique uses the smoke plume analysis methodology developed by NOAA researchers in the 1950s, which scientific basis are herein presented. To demonstrate the technique effectiveness, a small data sample of photographic records, taken during the FURNAS/NOAA field experiment in 1986/1987, at Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA) site, Itaorna, Angra dos Reis, RJ, was used. The hypothesis was that a direct measure over the photographs would result in better quality values for local environmental impact than any offsite parametrizations. The methodology used was of geometric measures corrected directly over the photographs, with proper technical and scientific considerations. The derived horizontal coefficients using a small sample resulted in values above expectation for Itaorna, but the small size of the sample prevents a final conclusion. By other hand, the vertical coefficients, with a bigger sample, resulted in values within expected range. They were compared to the Pasquill-Gifford (desert) and Briggs (urban) systems, demonstrating full consistency. One can conclude that, confirming previous results, the usage of smoke plumes and photographs to characterize micrometeorology of sites is feasible, relatively inexpensive, and can be applied, in principle, to any industrial site using the Gaussian plume model, and making the calculations significantly more efficient and precise. Furthermore, the photographs can be visually analyzed, with no need for special instruments and the results remains scientifically acceptable and useful.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 A POLUIÇÃO AMBIENTAL

O século XX foi marcado por grandes transformações na qualidade do ar devido à enorme quantidade de poluentes lançados na atmosfera de origem antropogênica.

A Resolução CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) 03/1990 define como poluente atmosférico qualquer forma de matéria ou energia com intensidades, quantidades, concentrações, intervalo de tempo ou quaisquer características em desacordo com os níveis estabelecidos<sup>1</sup>, e que tornem ou possam tornar o ar: (i) impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde; (ii) inconveniente ao bem-estar público; (iii) danoso aos materiais, à fauna e flora; e, (iv) prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.

As crescentes inovações tecnológicas, a partir da segunda metade do século XVIII, intensificaram a produção industrial altamente dependente de fontes primárias de energia fóssil, como carvão, o que ocasionou um nível de poluição do ar capaz de comprometer os mecanismos regulatórios da atmosfera (PIRES, 2005), assim como a saúde da população. Hoje, no nível nacional, destacam-se pelas suas emissões, além das instalações industriais e de produção de energia, os veículos automotores que também têm uma parcela bastante significativa na degradação da qualidade do ar, principalmente nas áreas urbanas, onde seu número é maior.

No Brasil, a exemplo do que ocorre com a maioria dos países em desenvolvimento, a grande parte das grandes instalações industriais como refinarias, pólos petroquímicos e siderúrgicas, responsáveis pelas emissões de poluentes para a atmosfera, está concentrada em áreas urbanas (PUC, 2002 *apud* PIRES, 2005).

Algumas destas áreas, anteriormente classificadas como zonas estritamente industriais, foram colonizadas pelo crescimento desordenado das cidades, abrigando residências e expondo uma parcela considerável da população das cidades brasileiras às emissões

---

<sup>1</sup>Valores de concentração de poluentes considerados seguros para o bem estar do público em geral ou para pessoas envolvidas em atividades que as exponham a valores altos de poluentes. Os valores adotados no Brasil para os principais poluentes foram estabelecidos na própria Resolução CONAMA nº 03 de 1990.

provenientes daquele tipo de instalações.

## 1.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Em escala global, as quantidades de poluentes presentes no ar influenciam diretamente a sua qualidade. No entanto, em escala local, a magnitude da emissão não constitui o único fator determinante da qualidade do ar. Nesta escala, a relação entre os poluentes e fatores como as variáveis meteorológicas influencia significativamente a capacidade de diluição dos efluentes na atmosfera local, contribuindo assim para a definição do nível de qualidade do ar de uma determinada região.

Segundo SLADE (1968, *apud* BIAGIO, 1982), as características físicas da região onde ocorre uma liberação, como altitude, latitude, rugosidade<sup>1</sup> de superfície e outras, determinam o comportamento das condições meteorológicas locais, em resposta às condições sinóticas (ou macro-escala), às quais estão sujeitas. Esta resposta local resulta nas condições determinantes da dispersão (transporte + difusão) de poluentes na atmosfera.

A modelagem da dispersão atmosférica é um problema complexo pelo fato de envolver os escoamentos na baixa atmosfera, na chamada Camada Limite Planetária – CLP (onde as plumas<sup>2</sup> de contaminantes são dispersadas), governados pela turbulência, cuja física ainda permanece longe de ser completamente compreendida. A CLP pode ser definida como a parte inferior da atmosfera diretamente influenciada pela superfície da Terra. Tanto os efeitos térmicos quanto os efeitos mecânicos definem o grau de estabilidade da atmosfera, ou seja, sua capacidade de resistir ou intensificar os movimentos verticais. Particularmente, a dispersão atmosférica de poluentes provenientes de fontes pontuais [e.g., uma chaminé], acrescenta complicações adicionais, relacionadas com a geometria da fonte emissora, com a geometria das estruturas adjacentes e com a dinâmica do fluxo de saída.

Os níveis de poluentes do ar podem se tornar mais alarmantes quando há ocorrência de ventos fracos, ou até mesmo ausência total de vento no local de interesse, o que provoca um aumento na concentração de gases e partículas tóxicas no ambiente. Geralmente, no inverno, a

---

<sup>1</sup> Conjunto de irregularidades, ou seja, saliências (picos) e reentrâncias (vales) que caracterizam uma superfície.

<sup>2</sup> Em um corte na vertical ou na horizontal de uma pluma, as isolinhas de concentração formam a figura de uma pena ou pluma. Por esta razão, um volume de gases ou líquido liberados na atmosfera ou em um ambiente aquático recebe o nome de pluma.

situação tende a se agravar ainda mais devido ao maior número de incidência do fenômeno da inversão térmica, caracterizado pela presença de uma camada de ar frio sobre o ar quente, próximo à superfície, impedindo que este último se disperse, indicando uma atmosfera estável.

Para avaliar as consequências de uma liberação de poluentes na atmosfera, deve-se prever o destino dos efluentes no espaço e no tempo. Com este objetivo, faz-se uso de modelos matemáticos de dispersão atmosférica. Como a dispersão atmosférica é regida por mecanismos complexos, demanda hipóteses simplificadoras para torná-la mais tratável. Estas hipóteses, se por um lado necessárias, não deixam de ser fatores limitantes no sentido de impor cautela na aplicação e interpretação dos resultados em face de uma situação real (MACHADO, 1991).

O modelo matemático mais tradicionalmente utilizado é o modelo gaussiano de fontes pontuais para avaliações de impacto ambiental (EISENBUD, 1973). Neste, considera-se uma distribuição normal para as concentrações do poluente, com pico de concentração ao longo da linha de centro da pluma, de variâncias  $\sigma_y^2$  e  $\sigma_z^2$ . A preferência foi justificada por: (i) as simulações a partir destes modelos mostrarem grande concordância com as avaliações experimentais de então; (ii) por terem um custo computacional muito baixo; (iii) pela simplicidade da abordagem matemática; e (iv) pela consistência com a natureza randômica da turbulência (ARYA, 1999). O modelo, como todos, embute incertezas, principalmente em situações de geofísica complexa, pelo fato de ser extremamente dependente de seus coeficientes de dispersão atmosférica, usualmente designados por  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  (desvio padrão de dispersão horizontal e vertical, respectivamente). Conseqüentemente, estes devem ser determinados de forma adequada, considerando as condições do terreno e da atmosfera na região específica em que se pretende estudar. Quando o sítio da instalação é complexo, os coeficientes de dispersão devem ser obtidos experimentalmente no local (EISENBUD, 1973).

### 1.3 HISTÓRICO

Os modelos de dispersão atmosférica têm se tornado mais sofisticados com o avanço da tecnologia nos últimos anos. Entretanto, o modelo gaussiano ainda é o mais utilizado mesmo com a dificuldade de estimar os coeficientes de dispersão,  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ , sendo aplicado em casos

como avaliação de técnicas e estratégias para o controle de emissões, estudos de impacto ambiental (EIA), planejamento da ocupação territorial urbana, etc. Desta forma, diversos métodos vem sendo desenvolvidos e aprimorados para determinar com mais precisão estes coeficientes de crítica importância na qualidade da modelagem.

Ao longo dos anos, diversos autores, como HÖGSTRÖM (1964) e MIN *et al.* (2002), desenvolveram técnicas para obter valores destes coeficientes num local de interesse. Na literatura, os métodos mais frequentemente encontrados incluem o uso de medidas diretas (traçadores e amostradores) e indiretas (técnicas de sensoriamento remoto, como o uso do LIDAR [*Light Detection And Ranging*] e imagens fotográficas). As medidas diretas são principalmente mais difíceis de serem obtidas regularmente, devido ao custo e infraestrutura necessários (MACHADO, 1991), enquanto as demais podem ser mais econômica e viavelmente vantajosas.

RICHARDSON (1920), ROBERTS (1923) e SUTTON (1932) iniciaram o estudo da dispersão de contaminantes (MACHADO, 1991). Seus estudos envolveram técnicas de imageamento por fotografias para obtenção de parâmetros característicos da difusão.

A técnica assume que o contorno visível da pluma representa uma densidade limiar (mínimo visível) constante das partículas de fumaça (GIFFORD, 1957). Esta consideração é denominada “Teoria da Opacidade”, originada por ROBERT (1923) e aplicada em estudos quantitativos utilizando plumas de fumaça. Sua validação depende de certas características da pluma. A distribuição do tamanho das partículas deve ser razoavelmente uniforme e a luminosidade deve ser proporcional à densidade das mesmas. A idéia de opacidade é considerada aceitável pela maior parte dos autores que investigam o comportamento de plumas de fumaça através de fotografias (GIFFORD, 1957).

GIFFORD (1959, *apud* GIFFORD,1980) apresentou uma das equações mais utilizadas em estudos envolvendo imagens de plumas de fumaça para determinar valores de coeficientes de dispersão ( $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ ). Na técnica de Gifford, que pode ser vista com mais detalhes no Capítulo 3, o parâmetro de difusão para uma dada distância da fonte é estimado pelas dimensões visíveis da pluma, assumindo que a fumaça tem uma distribuição de concentração específica. A equação é obtida através de várias considerações feitas a partir da equação gaussiana. É importante ressaltar que para fazer uso deste método é necessário que a pluma possa ser visualizada por inteiro na imagem fotografada.

HEWSON (1963) utilizou a técnica recomendada por GIFFORD (1959, *apud* HEWSON, 1963) para determinar características da turbulência através de fotografias de

plumas no sítio da Usina Nuclear Big Rock Point em Charlevoix, Michigan, durante os meses de junho e julho, quando ocorreram inversões térmicas.

PASQUILL (1961, *apud* TURNER, 1984) propôs o conceito de classe de estabilidade. As classes foram determinadas de acordo com a velocidade do vento, radiação solar incidente e cobertura de nuvem e são representadas pelas letras A (extremamente instável) a G (extremamente estável). O autor ainda apresentou um método, desenvolvido em 1958, para estimar a dispersão através da determinação dos espalhamentos lateral e vertical da pluma, definidos como a largura e a altura da pluma, respectivamente. Para isso, baseou-se em dados experimentais do Projeto Prairie Grass, em O'Neil, Nebraska, EUA, coletados em um terreno homogêneo. O Projeto ocorreu em 1956 e teve como objetivo estudar a dispersão atmosférica local através de um gás traçador, emitido continuamente por uma fonte pontual próxima ao solo.

GIFFORD (1961, *apud* ARYA, 1999) converteu o espalhamento lateral e vertical da pluma em valores de  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ , desenvolvendo as correlações hoje mais frequentemente utilizadas para determinar os coeficientes de dispersão, considerando que o valor da concentração no contorno da pluma equivale a 10% do valor no eixo central, conhecidas como as “curvas de Pasquill-Gifford”, que relacionam os sigmas com a distância da fonte e com a classe de estabilidade.

Durante o período de 1963-1965, foi conduzido um estudo St. Louis, Missouri, EUA, com o objetivo de estudar a dispersão em áreas urbanas (McELROY e POOLER, 1968, *apud* VENKATRAN *et al.*, 2004). Este experimento consistiu em emissões de gases traçadores próximo ao solo, acompanhados de medidas meteorológicas. Apesar de McELROY e POOLER (1968, *apud* VENKATRAN *et al.*, 2004) terem obtido um sistema de dados de dispersão, foi BRIGGS (1973) quem desenvolveu as expressões necessárias para traçar as curvas do coeficiente de dispersão em áreas urbanas utilizando os dados de St. Louis. Na maior parte da literatura pesquisada estas curvas são chamadas de “curvas de Briggs Urbano”.

VOGT e GEISS (1974) desenvolveram um conjunto de curvas de coeficientes de dispersão para diferentes classes de estabilidade, baseado em um experimento realizado nas vizinhanças do Centro de Pesquisa Nuclear de Jülich, Alemanha, envolvendo aerossóis traçadores emitidos a 50 e 100 metros de altura.

TORSANI (1980) utilizou a técnica de Sensoriamento Remoto, através de imagens do satélite LANDSAT (*Land Remote Sensing Satellite*), para obter medidas do desvio padrão da distribuição de concentração com relação ao eixo y ( $\sigma_y$ ) em Cabo Frio. O  $\sigma_y$  foi determinado

através da equação de conversão de GIFFORD (1961, *apud* ARYA, 1999), citada acima.

BIAGIO (1982) comparou três sistemas de coeficientes de dispersão atmosférica, incluindo o de Pasquill-Gifford, com o objetivo de identificar qual sistema seria o mais adequado para ser aplicado no sítio da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA), utilizando o modelo gaussiano e, o subsequente cálculo de doses radioativas provenientes de uma liberação da Usina Nuclear Angra I, única em operação na época. A autora concluiu que o sistema de Pasquill-Gifford, embora determinado em 1958, quando as técnicas experimentais não eram tão desenvolvidas, apresenta um comportamento coerente com a estabilidade atmosférica local, enquanto os demais, embora mais sofisticados, apresentaram resultados menos satisfatórios. Além disso, o sistema de Pasquill-Gifford forneceu valores maiores de  $\chi/Q$  (concentração de efluentes por taxa de emissão) médio anual, indicando ser o método que indica valores mais conservativos, o que, do ponto de vista de segurança ambiental, é mais indicado.

NAPPO (1984) comparou estimativas de turbulência e dispersão, obtidas de análises de fotografias de plumas de fumaça em um túnel de vento, com as estimativas obtidas diretamente da pluma de gás metano como traçador, sob condições idênticas de estabilidade. A correlação encontrada entre as taxas de dispersão derivadas das fotografias da pluma e dos valores obtidos através do uso direto do traçador foi de 0,99. Os valores do coeficiente de dispersão,  $\sigma_z$ , calculado no trabalho, foi obtido através da equação proposta de GIFFORD (1957). Entretanto, em sua aplicação, o autor destaca a dificuldade em determinar a correta delimitação da pluma, principalmente no final da mesma, onde as partículas se encontram geralmente mais dispersas. Para solucionar este problema, ele submete os negativos das fotografias a um microdensitômetro<sup>1</sup>. Usando as imagens fotografadas, ele pôde calcular dados, como a taxa de dispersão do vórtice (*eddy*) e a intensidade da turbulência ao longo da direção do vento.

Em 1986 e 1987, FURNAS e NOAA se uniram com o objetivo de estimar o transporte e a difusão no sítio da CNAAA, mas não o atingiram devido à desistência de FURNAS em finalizar os experimentos na época. Contudo, foi possível coletar uma série significativa de dados, incluindo registros fotográficos de plumas de fumaça, sondagens atmosféricas e diversos outros dados meteorológicos.

ECKMAN e MIKKELSEN (1991) apresentaram um método para obter as dimensões de

---

<sup>1</sup> Dispositivo que mede o grau de escuridão (densidade ótica) da fotografia ou o grau de semi-transparentia do material ou ainda, a refletividade da superfície.

plumas de fumaça em fotografias oblíquas tiradas durante uma série de experimentos de difusão chamados *Borris Field Experiments* (BOREX), conduzidos pelo *Risoe National Laboratory*, na Dinamarca, no início dos anos 1980. O método encontrado necessita de, no mínimo, três referências físicas no solo para determinar a geometria de cada fotografia aérea oblíqua. Além das distâncias entre estas referências, a distância focal da câmera e o fator de ampliação das fotografias devem ser conhecidos.

BELLASIO *et al.* (1999, *apud* FRANCO, 2005) documentaram o acidente de Chernobyl que causou a liberação para a atmosfera de inúmeras substâncias radioativas, resultando em contaminação na maioria dos países da Europa. Neste evento ficou evidenciado que as populações na área de influência precisam ser protegidas por um conjunto de procedimentos para tomadas de decisão, sendo importante o uso de modelos de dispersão de curto, médio e longo alcance.

NAPPO *et al.* (2008) utilizaram a técnica proposta por GIFFORD (1959, *apud* NAPPO, 2008) e concluíram que análises de fotografias de plumas de fumaça são uma ferramenta válida para estimar remotamente parâmetros de turbulência e parâmetros de dispersão. Entretanto, os autores afirmam ainda que o método é limitado em condições de dias claros e no período antes do pôr-do-sol em condições estáveis.

#### 1.4 OBJETIVOS

Esta dissertação tem como objetivo geral introduzir uma técnica procedimental específica para estimar os valores dos coeficientes de dispersão atmosférica do modelo gaussiano para fontes pontuais,  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ , em microescala, a partir de uma campanha de liberação de fumaça com registro fotográfico. A teoria e a metodologia geral que sustenta a proposta já existem, e já foram descritas na literatura, como em NAPPO (1984) e ECKMAN e MIKKELSEN (1991). Porém, além de pouco conhecida no Brasil, não existe um detalhamento descrito que possibilite a imediata aplicação e derivação dos sigmas a partir de fotografias existentes. Para demonstrar a viabilidade da técnica apresentada neste trabalho, foram utilizados os dados meteorológicos e as fotografias obtidas dos experimentos realizados por FURNAS e NOAA, nos anos de 1986 e 1987 no sítio da CNAAA, dos quais os coeficientes de dispersão locais nunca foram derivados.

Como objetivos secundários, é importante citar: (i) Divulgar no país uma técnica que não exige gastos elevados para determinar os parâmetros de dispersão do modelo gaussiano de fontes pontuais para instalações industriais; (ii) Demonstrar a eficácia e eficiência, assim como as limitações, da técnica empregada; (iii) Proporcionar que os modelos de dispersão gaussianos utilizados para o sítio da CNAAA, seja para licenciamento, pré-avaliação e situações de emergência, tenham seus resultados significativamente melhorados, reduzindo-se a ordem de grandeza das incertezas que envolvem as avaliações de concentração. Cabe observar que isso é potencialmente aplicável tanto a modelos que já usam os desvios-padrões determinados por classe de estabilidade como àqueles que usam outros métodos (e.g. Teoria da Similaridade) e que podem ser aprimorados pela especificação da turbulência de microescala de um local em particular.

## 1.5 CASO ANALISADO

A área estudada como aplicação da metodologia proposta está localizada em Itaorna, no município de Angra dos Reis. A região de Angra dos Reis possui uma meteorologia e climatologia de alta complexidade devido à proximidade do mar, da Serra do Mar e de elementos urbanos, o que caracteriza um terreno heterogêneo com uma fisiografia única. Todos estes fatores influenciam fortemente a trajetória de uma pluma de poluentes liberada na atmosfera, o que torna ainda mais difícil a determinação de coeficientes específicos de dispersão locais.

Os efluentes eventualmente liberados na região possuem um potencial de periculosidade elevado quando se apresentam em altas concentrações, pelo fato de conterem material radioativo.

No caso das avaliações de impacto acidental proveniente de centrais nucleares, a dose de radioatividade em um determinado ponto de interesse devido, por exemplo, à inalação de um radionuclídeo, pode ser obtida através de sua concentração no ar, por sua vez dependente do grau de turbulência da atmosfera, medida usualmente no modelo gaussiano pelos coeficientes de dispersão do modelo gaussiano. Desta forma, o cálculo da dose se torna bastante sensível à metodologia utilizada na determinação dos coeficientes de dispersão.

Finalmente, o resultado desta pesquisa também se aplica à indústria convencional, onde a dispersão atmosférica de poluentes químicos e biológicos pode fazer uso de modelos gaussianos para avaliação das concentrações na área de influência das instalações industriais. Infelizmente, no Brasil o grau de exigência dos Reguladores para avaliações de impacto de poluição atmosférica é baixo, o que se pode deduzir da desimportância em geral prestada pelas indústrias a esse tema. Esta pesquisa, nesse contexto, é uma contribuição para reduzir o custo da adaptação do modelo gaussiano, na forma simples ou de pufes, aos diversos sítios industriais do país.

## 1.6 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta dissertação está organizada em 5 capítulos. No Capítulo 1, é feita uma breve apresentação do conceito da poluição atmosférica, seguida de uma descrição do problema abordado por esta pesquisa. Encontram-se também os objetivos principal e secundário e uma seqüência cronológica dos principais trabalhos relevantes para o desenvolvimento desta dissertação. O caso analisado é apresentado juntamente com o motivo de sua escolha.

No Capítulo 2 é apresentada uma descrição das variáveis meteorológicas envolvidas diretamente no estudo da dispersão atmosférica. Os fatores que influenciam o comportamento da pluma, como altura de emissão, temperatura e velocidade de saída do efluente e efeito de estruturas são abordados. Os fenômenos da deposição seca e úmida, concomitantemente com a precipitação, o decaimento radioativo e reação química são citados. O modelo gaussiano de dispersão atmosférica é apresentado, assim como outros métodos de determinação dos coeficientes de dispersão.

No Capítulo 3, é apresentada a técnica para estimar os coeficientes de dispersão atmosférica a partir de fotografias de plumas de fumaça.

No Capítulo 4, são introduzidos os aspectos geográficos da região de Angra dos Reis, enfatizando suas características meteorológicas. No fim deste é apresentada a aplicação da técnica nas fotografias do experimento de 1987, com o propósito objetivo de validar o método.

No Capítulo 5, as conclusões desta pesquisa são apresentadas, incluindo recomendações para desenvolvimentos futuros.

## 2 DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

### 2.1 FÍSICA DO FENÔMENO

A região da atmosfera que influencia o transporte e a dispersão de poluentes é a chamada de Camada Limite Planetária (CLP), com altura de aproximadamente 1km acima do solo. É a porção da atmosfera diretamente influenciada pela superfície da Terra. Quando uma determinada substância é liberada na atmosfera, sua concentração varia no tempo e no espaço em função de reações químicas e/ou fotoquímicas, de fatores meteorológicos (ventos, turbulências e inversões térmicas), da topografia da região e de elementos antrópicos. Todos estes fatores são importantes e devem ser considerados na modelagem da dispersão atmosférica a fim de obter resultados mais realistas.

O comportamento de uma pluma ao ser liberada na atmosfera pode ser visto na FIG.2.1. Os efluentes emitidos podem sofrer processos que alterem sua concentração na atmosfera como:

- Decaimento radioativo e reações químicas;
- Deposição úmida;
- Deposição seca;
- Ressuspensão de material depositado na superfície;
- Fumigação;
- Advecção;
- Difusão Turbulenta;
- Efeito de Esteira;
- Absorção por nuvens (*rainout*).



**FIG 2.1: Comportamento dos efluentes liberados na atmosfera.**  
 Adaptado de <http://www.meted.ucar.edu>

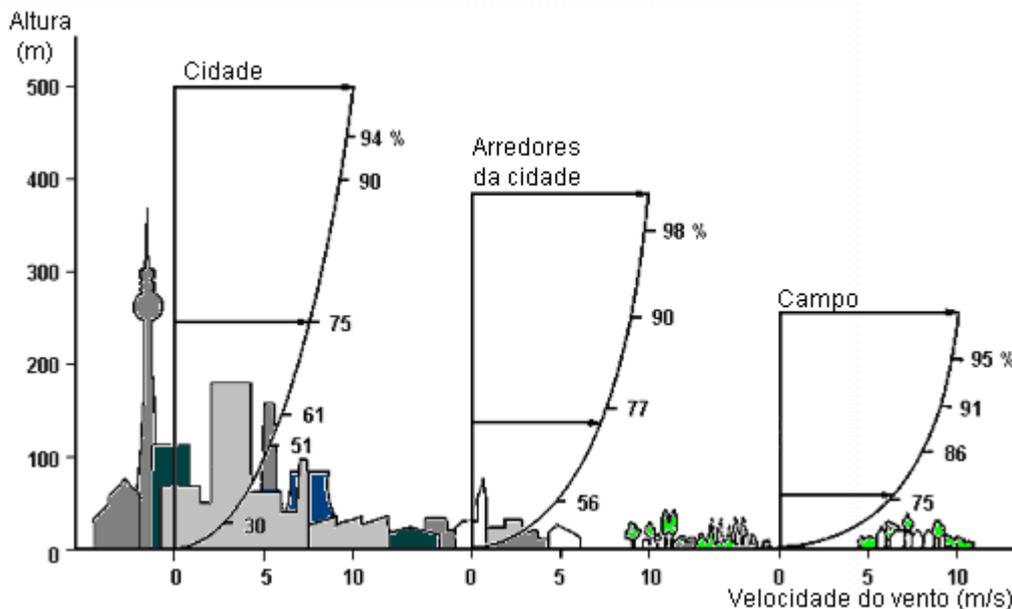
### 2.1.1 PARÂMETROS METEOROLÓGICOS

A relação entre a meteorologia e a dispersão atmosférica envolve principalmente o comportamento do vento, pois determina qual a direção preferencial que os efluentes viajarão na atmosfera.

O vento é induzido pelas variações de pressão e temperatura. Quando o vento em uma determinada região sopra numa mesma direção na maior parte do tempo, é denominado vento predominante. Quando a direção do vento permanece quase constante em um período de tempo, chamamos de persistência da direção do vento.

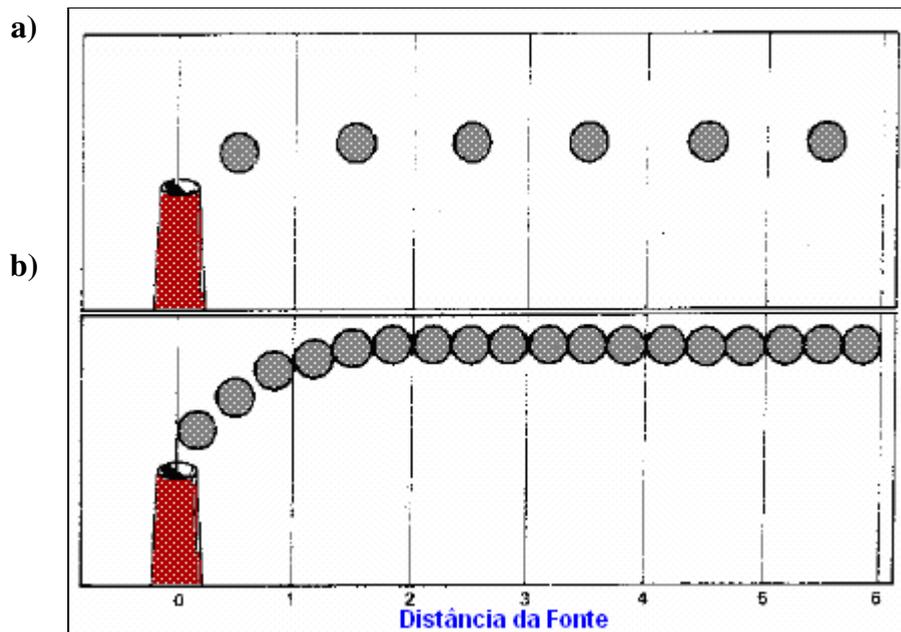
Dentro da CLP, os ventos são influenciados pelo escoamento de ar acima e pelos efeitos de fricção, topografia e trocas de calor com a superfície abaixo. Os ventos na região acima da CLP fluem perpendicularmente às isóbaras, e sua velocidade é dimensionada pelo gradiente de pressão horizontal. Próximos à superfície, os efeitos de fricção causados tanto por elementos urbanos (e.g., prédios) quanto naturais (e.g., árvores) retardam o fluxo do vento, além de poder causar mudanças na sua direção (SMITH, 1973). A FIG.2.2 ilustra o efeito de fricção em três superfícies diferentes. Os números apresentados nos diversos níveis representam a velocidade do vento em uma determinada altura relativa ao vento gradiente, em

porcentagem. O vento gradiente ocorre a certa altura onde os efeitos da superfície não são mais sentidos. O parâmetro que representa esse efeito é o comprimento de rugosidade,  $z_0$ , dado em metros, e varia de acordo com o tipo de superfície. Em superfícies urbanas, por exemplo,  $z_0$  varia de 1,0-3,0m, enquanto em superfícies líquidas,  $z_0$  é igual a 0,0001m.



**FIG. 2.2 Efeito da rugosidade do terreno no perfil de velocidade do vento. Adaptado de SMITH (1973).**

Segundo BOUBEL *et al.* (1994, *apud* MORAES, 2001), uma mudança de 5 graus na direção do vento pode causar uma redução de até 90%, dependendo da condição da atmosfera, na concentração medida por um receptor alinhado com a direção original. Em outras palavras, pequenos erros na estimativa da direção do vento podem ocasionar grandes erros nas estimativas de concentrações. A velocidade do vento também influencia a concentração de poluentes na atmosfera de forma que, quanto maior a velocidade, menor a concentração, como pode ser visualizado pelo maior espaçamento entre as partículas poluidoras (FIG.2.3).



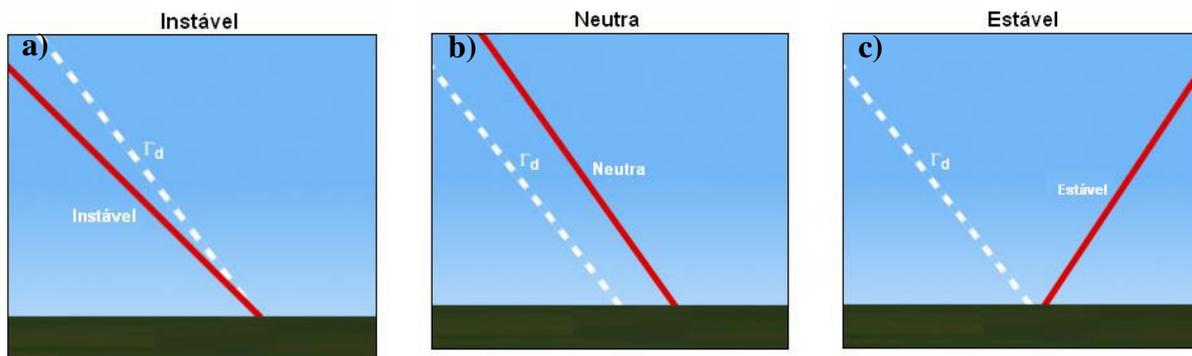
**FIG 2.3** Influência da velocidade do vento (a) alta e (b) baixa. BOUBEL *et al.* (1994).

Outro parâmetro relevante na dispersão atmosférica é o gradiente de temperatura (*lapse-rate* do ambiente), calculado a partir de observações feitas em diferentes níveis de altura. A variável define o grau de estabilidade estática da atmosfera. Para determiná-lo, o gradiente vertical de temperatura é comparado com a razão adiabática para o ar seco, ou abreviadamente, razão adiabática seca ( $\Gamma_d$ ). Fisicamente, ela exprime a variação de temperatura a que está sujeita uma parcela de ar seco (sem a presença de vapor de água), como consequência de seu movimento vertical, quando o faz obedecendo a um processo adiabático reversível. É observado em uma situação normal que a temperatura da parcela diminui a medida que a altitude aumenta e vice-versa. Como esperado, uma parcela que se eleve na atmosfera deverá resfriar-se; caso seu movimento seja subsidente, ocorrerá um aquecimento. A mudança de temperatura se efetua na proporção de aproximadamente  $1^\circ\text{C}/100\text{m}$  (VAREJÃO-SILVA, 2005).

Se o gradiente de temperatura do ambiente é maior do que a adiabática, uma parcela de ar tende a ser acelerada para cima e, neste caso, a atmosfera se encontra “instável” (FIG 2.4a). As condições instáveis ou convectivas ocorrem geralmente durante o dia, principalmente em dias ensolarados. Estas condições proporcionam uma forte mistura vertical dos poluentes, provocada pelos movimentos convectivos gerados pelo aquecimento da superfície.

Quando o gradiente de temperatura do ambiente e a razão adiabática seca variam a uma

mesma taxa, uma parcela que se desloca verticalmente na atmosfera tem a mesma temperatura e densidade do ambiente e, portanto tende a permanecer no mesmo nível no qual foi liberada. Por isso, neste caso, a atmosfera é dita “neutra” (FIG 2.4b). Quando a temperatura aumenta com a altitude, a atmosfera se encontra estável (FIG 2.4c), pois os deslocamentos verticais são inibidos, dificultando a dispersão de poluentes. Quando isso acontece, a atmosfera se encontra em uma situação de inversão térmica, ocorrendo predominantemente à noite, devido à irradiação noturna da superfície da terra.



**FIG 2.4** Atmosfera instável (a), neutra (b) e estável (c). O gradiente de temperatura do ambiente é representado pela linha vermelha e a razão adiabática seca, pela linha branca tracejada. Adaptado de <http://www.met.ed.ucar.edu>

O fenômeno da inversão térmica resulta na formação de uma “capa de inversão”, que impede a circulação atmosférica para além dela. A causa do efeito é a sobreposição de uma massa de ar frio sobre uma massa de ar mais quente. Dependendo das condições locais, estas situações podem permanecer invariáveis durante dias, até que as condições atmosféricas mudem e a inversão seja destruída.

Um problema que vem somar-se aos da contaminação pela presença de capas de inversão consiste no aumento da atividade fotoquímica. A capa de inversão é normalmente quente, seca e sem nuvens, permitindo a transmissão de uma quantidade máxima de luz solar, que interage fotoquimicamente com os poluentes confinados até formar quantidades extremas de “smog” (*smoke + fog*).

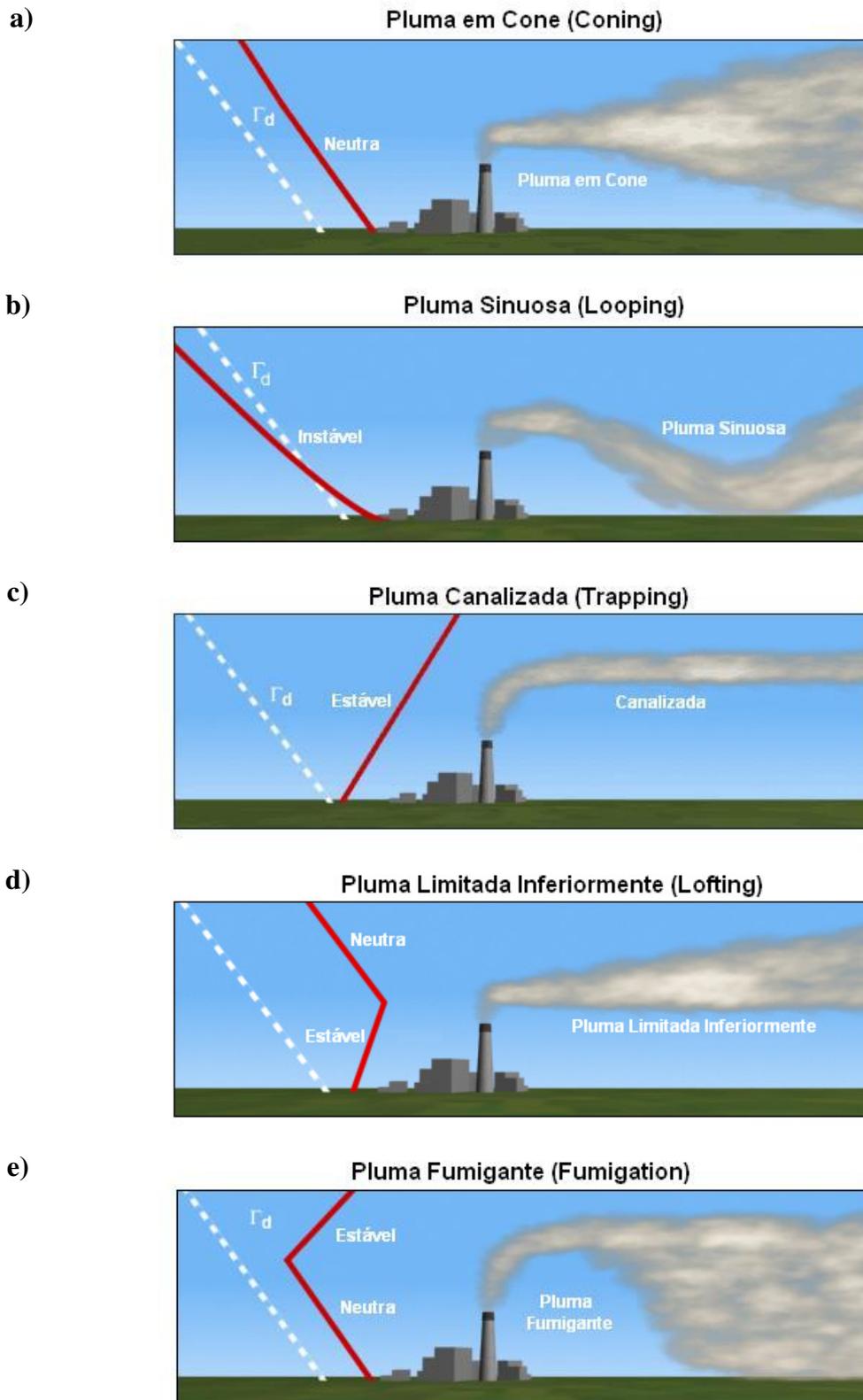
Tanto o comportamento do vento quanto o gradiente de temperatura definem o grau de turbulência da atmosfera. A turbulência é definida por movimentos que se comportam de forma não-linear, caótica, e pode ser classificada de acordo com sua origem, podendo ser térmica ou mecânica.

A turbulência térmica é produzida pelo efeito da flutuabilidade da parcela devido à diferença de densidade do ar causada pelo aquecimento/resfriamento da superfície. Já a turbulência de origem mecânica surge quando o fluxo de ar, passando sobre uma superfície de alta rugosidade, tende a acompanhar as ondulações da superfície e também a fluir em torno de obstáculos gerando, desse modo, turbulência horizontal e vertical. A turbulência gerada mecanicamente aumenta com a velocidade do vento e seus efeitos diminuem com a altura (BIAGIO, 1982).

Há 5 tipos clássicos de pluma dependente da estabilidade atmosférica (FIG 2.5). A pluma em cone (FIG 2.5a) ocorre em atmosfera neutra e é caracterizada por difusão tanto na vertical, quanto na horizontal. Este tipo é comum em dias nublados e noites com ventos intensos (U.S.EPA e NOAA, 1996).

A pluma sinuosa (FIG 2.5b) ocorre em atmosfera instáveis, com a turbulência sendo uma das principais características. Ocorre quando movimentos ascendentes, causados pelo ar aquecido, conduzem um segmento da pluma, enquanto uma corrente descendente leva a seção adjacente para baixo. Quando a parcela de ar, ao elevar-se, encontra ar mais quente ao seu redor, sua tendência é descer, evidenciando uma situação de inibição dos movimentos verticais. O aspecto da pluma é canalizado ou tubular (FIG 2.5c), marcada pela inversão térmica em noites de céu sem nuvens. Sob estas condições, com ventos fracos, o poluente pode viajar a grandes distâncias mantendo altas concentrações.

A FIG 2.5d ilustra um tipo de pluma caracterizado pela difusão vertical limitada em um determinado nível, onde o gradiente de temperatura positivo (condição estável) se inverte, apresentando condições neutras ou instáveis acima deste nível (KAWANO, 2003). Esta situação aparece ao entardecer, quando o aquecimento da superfície termina e inicia o esfriamento pela emissão da radiação. Este tipo de pluma é considerado bastante favorável à qualidade do ar próxima à superfície quando a fonte se encontra acima do nível de inversão, já que os poluentes são impedidos de alcançar níveis inferiores. O caso inverso (condições instáveis ou neutras abaixo da camada de inversão e situação estável acima), denominado fumigação (FIG 2.5e), ocorre quando os efluentes são bloqueados pela camada de inversão permanecendo próximos à superfície, causando altas concentrações de poluentes. A fumigação aparece, principalmente, nas primeiras horas da manhã, iniciando com o desaparecimento gradual da inversão noturna, devido ao aquecimento da superfície.



**FIG 2.5 Principais tipos de pluma: em cone (a), sinuosa (b), canalizada (c), limitada inferiormente (d) e fumigante (e). O gradiente de temperatura do ambiente é representado pela linha vermelha e a razão adiabática seca, pela linha branca tracejada. Adaptado de <http://www.met.ed.ucar.edu>**

Durante liberações estáveis com ventos fracos, a dispersão é bastante fraca, como mencionado anteriormente. A flutuação na direção horizontal do vento pode ser o suficiente para provocar a dispersão horizontal da pluma (BIAGIO, 1982). Assim como a dispersão vertical em casos instáveis (FIG 2.5b), a dispersão horizontal da pluma em casos estáveis também sofrerá o efeito do meandramento<sup>1</sup>.

### 2.1.2 INFLUÊNCIA DO AQUECIMENTO DIFERENCIAL DA SUPERFÍCIE - BRISAS

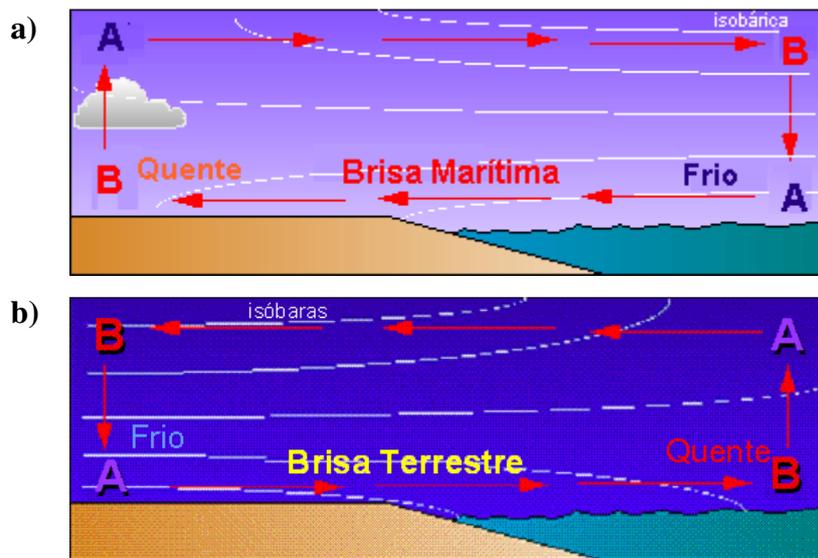
As brisas, causadas pela descontinuidade da superfície, estão associadas ao aquecimento desigual em um mesmo nível causando uma circulação em mesoescala devido à diferença de pressão. Os casos mais comuns são as brisas marítima e terrestre. Durante o dia, a superfície terrestre se aquece mais rapidamente do que as aquáticas, devido ao seu menor calor específico. O ar logo acima do solo, com o aquecimento, torna-se menos denso (menor pressão) e converge, devido à instabilidade gerada. Devido à ascensão do ar quente, o ar mais denso sobre a água avança em direção a superfície terrestre, formando a brisa marítima. Os deslocamentos de ar provocados pela brisa marítima dão origem a uma circulação ilustrada na FIG 2.6a. Uma circulação na direção oposta ocorre à noite, em resposta ao rápido resfriamento da terra, dando origem à brisa terrestre (FIG 2.67b), que sopra da terra para o mar.

Um comportamento similar ocorre ao longo das encostas de montanhas. De maneira análoga à brisa marítima e terrestre, o aquecimento diferenciado é responsável pelos gradientes de pressão que forçam os movimentos. Para o caso de brisa vale-montanha (FIG 2.7), pode-se dizer que o sistema é mais eficiente, pois requer uma quantidade menor de calor para gerar uma circulação de tamanho comparável, porém com ventos mais intensos. O estabelecimento da brisa vale-montanha é caracterizado por mudanças nos campos de temperatura, umidade e vento. Durante o dia, a superfície da montanha aquece mais rapidamente que o ar sobre o vale a um mesmo nível, causando uma diferença de pressão. O ar mais quente ascende e o ar que se encontra nos vales a uma temperatura inferior e maior pressão o substituí. Assim, durante o dia o ar sobe a encosta. Este processo é responsável pela formação de nuvens e ocorrência de precipitação sobre as montanhas, e é denominado brisa

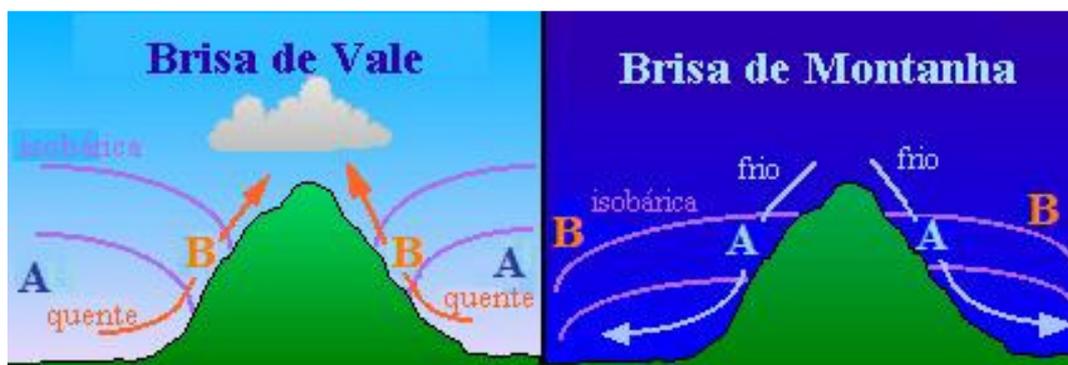
---

<sup>1</sup> Movimento em forma sinuosa provocado em um fluido devido às variações de energia e carga.

de vale. À noite, o ar nas encostas das montanhas se esfria devido à perda de radiação do solo e desce a montanha dando origem à brisa de montanha. Assim, ao amanhecer, o ar mais frio pode ser encontrado no vale e, se este contiver umidade suficiente, pode haver formação de nevoeiro.



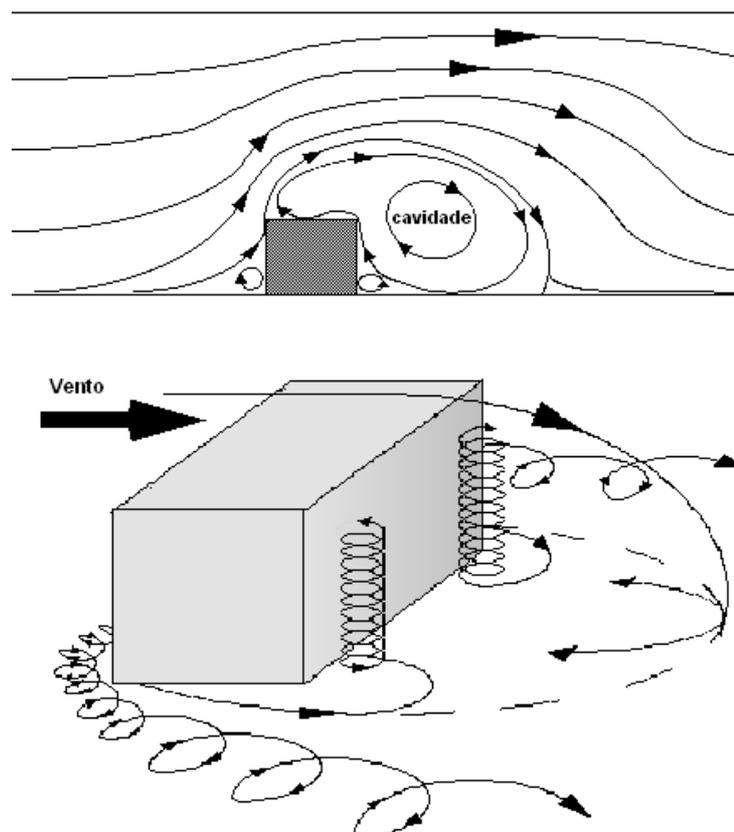
**FIG 2.6 Brisa Marítima (a); Brisa Terrestre (b).**  
As letras “A” e “B” significam alta e baixa pressão, respectivamente. Adaptado de U.S.EPA, NOAA (1996).



**FIG 2.7 Brisa de Vale-Montanha.** Adaptado de U.S.EPA, NOAA (1996).

### 2.1.3 INFLUÊNCIA DE ESTRUTURAS

A presença de elementos urbanos (e.g., edifícios e casas), assim naturais (e.g., árvores e morros) ocasiona mudanças na direção e velocidade do vento e no campo de pressão, fazendo surgir fluxos aerodinâmicos distorcidos (BIAGIO, 1982). Quando o vento encontra um bloqueio, ele é desviado de seu fluxo normal tendendo a fluir pelos lados e por cima da estrutura. O efeito causado por estruturas é a formação de um vórtice no lado oposto da barreira, por ser uma região de menor pressão, denominada cavidade, assim como dois vórtices próximos à lateral da estrutura (FIG 2.8). As cavidades podem formar regiões de altas concentrações de poluentes, devido ao aprisionamento do ar (U.S.EPA, NOAA, 1996). Desta forma, caso haja estruturas próximas à fonte, a pluma liberada pode modificar-se.



**FIG 2.8** Características do fluxo de ar próximo a um elemento urbano. Adaptado de U.S.EPA, NOAA (1996)

#### 2.1.4 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DA FONTE

Em relação aos parâmetros iniciais da fonte, a velocidade de saída e a temperatura do efluente são as principais variáveis que influenciam a pluma. Quando a velocidade de saída ( $V_s$ ) é menor que a velocidade do vento no nível da chaminé ( $\bar{u}$ ), ou seja,  $V_s/\bar{u} < 1$ , a pluma pode alcançar rapidamente o solo, causando “rastejamento” (“*creep*”). Outro efeito da velocidade de saída está relacionado ao momentum, que proporciona uma elevação adicional da pluma antes da massa de ar tornar-se atuante. A temperatura do efluente está relacionada com a flutuabilidade (empuxo) da parcela emitida. Muitas indústrias emitem seus efluentes na atmosfera a uma temperatura relativamente alta. A força de empuxo resultante da redução da densidade do efluente permite a ascensão da pluma acima da chaminé (SMITH, 1973). Esta ascensão da pluma, determinada principalmente pela velocidade e temperatura de saída na fonte, é vista com mais detalhes na Seção 2.2.1.2 – Altura Efetiva.

#### 2.1.5 MECANISMOS DE REMOÇÃO DE POLUENTES

Os contaminantes podem ser removidos da atmosfera por basicamente quatro mecanismos: deposição seca, deposição úmida, decaimento radioativo e reação química. A deposição seca é o processo que representa a saída dos poluentes da atmosfera para a superfície terrestre, principalmente por ação da gravidade, correntes descendentes, adsorção e absorção. Na deposição úmida, a remoção dos poluentes ocorre pela ação de chuvas, geadas ou neve. Os poluentes depositados na superfície podem retornar à atmosfera através do processo de ressuspensão, provocado principalmente por ações mecânicas (e.g., aradura) ou do vento próximo à superfície. O decaimento radioativo e reações químicas são mecanismos por meio dos quais ocorre a transformação das substâncias inicialmente presentes na atmosfera, em novas substâncias e, no caso de decaimento radioativo, acompanhada de emissão de energia na forma de partículas ou ondas eletromagnéticas.

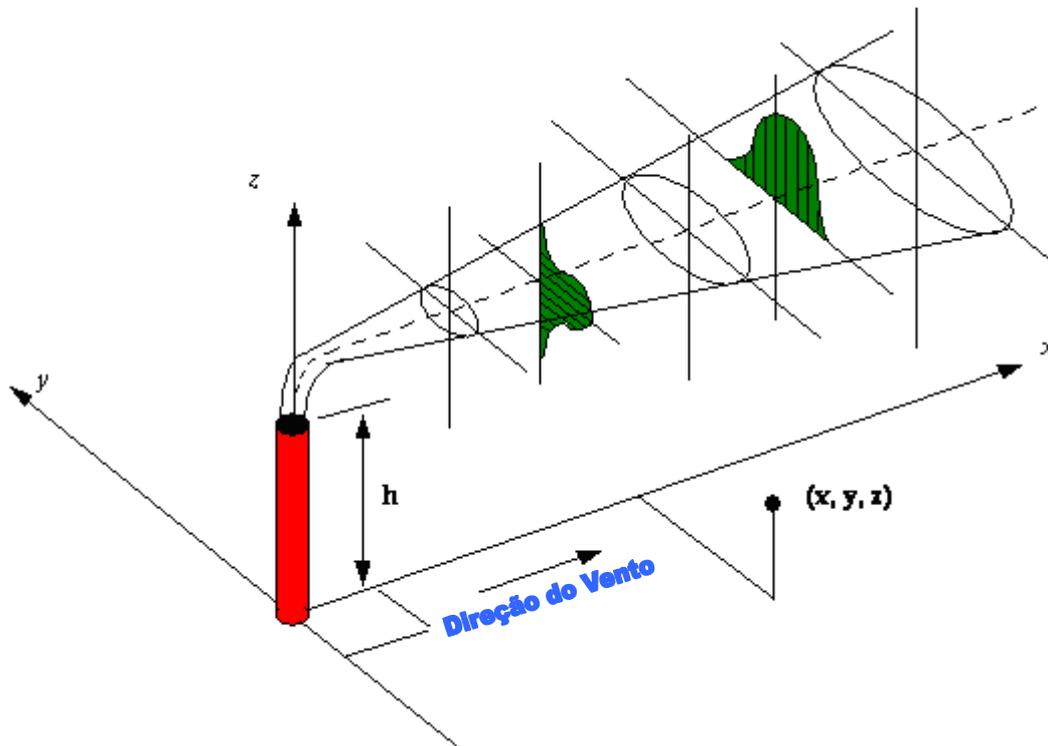
## 2.2 MODELAGEM DA QUALIDADE DO AR

Na literatura, existem diversos tipos de modelos matemáticos de dispersão atmosférica desenvolvidos com o objetivo de simular o comportamento da atmosfera. HANNA *et al.* (1982, *apud* ISNARD, 2004) classificam estes modelos da seguinte forma: modelos gaussianos, modelos estatísticos, modelos de similaridade e modelos de gradiente de transporte. Contudo, a classificação de modelos em uma única categoria não é facilmente determinada, já que muitas vezes existem características dos modelos que se encaixam em mais de uma categoria (SANTOS, 2000, *apud* ISNARD, 2004). Um exemplo disso é o caso do modelo gaussiano que pode ser classificado como modelo estatístico, já que assume uma distribuição estatística particular para os perfis de concentração. Ou mesmo, ser classificado como uma abordagem de gradiente de transporte pelo fato de poder ser obtido a partir da solução da equação fundamental que descreve o processo de transporte. Neste trabalho, apenas o modelo gaussiano será descrito.

### 2.2.1 MODELO DE PLUMA GAUSSIANA

O modelo de pluma gaussiana considera que a dispersão de uma pluma liberada na atmosfera por uma fonte pontual se dá de modo que a concentração dos componentes da pluma em função da posição relativa à fonte tem comportamento gaussiano, ou seja, segue uma distribuição normal. Ainda que a pluma sofra um meandramento, como é comum acontecer, uma fotografia de exposição prolongada, por exemplo, revelará seu comportamento gaussiano ao longo do tempo. É o que poderia ser chamado de comportamento médio de um evento turbulento, desde que a turbulência seja estacionária, ou seja, variáveis com valores médios constantes e flutuações turbulentas com características estatísticas constantes (GONÇALVES, 2003).

O sistema de coordenadas adotado no modelo é mostrado na FIG.2.9.



**FIG 2.9 Modelo de Pluma Gaussiana.**

O eixo x representa a linha central a sotavento da fonte, e mede a distância da fonte. O eixo y, perpendicular ao eixo x, mede a distância a partir da linha central, enquanto o eixo z mede o deslocamento vertical em relação ao plano de deslocamento da pluma. Os desvios padrões  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  representam os coeficiente de dispersão da pluma nos eixos y e z, respectivamente.

As equações de concentração do modelo gaussiano são obtidas analiticamente a partir da equação de conservação de um determinado poluente, adotando-se certas hipóteses simplificadoras, apresentadas adiante.

Do ponto de vista teórico não existe um modelo matemático capaz de considerar todas as condições que cercam a dispersão de uma pluma na atmosfera, fornecendo previsões de confiabilidade significativa. Assim, o modelo da pluma gaussiana, desenvolvido considerando diversas hipóteses simplificadoras, apresenta deficiências, mas continua muito usado pelas seguintes razões (GONÇALVES, 2003):

- Seus resultados são equivalentes, em muitas situações, aos de outros modelos mais sofisticados quando comparados com dados experimentais;
- É simples de ser usado, apresentado na forma de uma equação algébrica;
- É consistente com a natureza aleatória da turbulência;
- É uma solução para a equação de difusão-advectiva, ou seja, tem o mérito de conservar o fluxo de massa do poluente emitido;
- Tem sido aceito como ferramenta de avaliação de impactos ambientais pelos órgãos ambientais.

### 2.2.1.1 DESCRIÇÃO DA EQUAÇÃO DA PLUMA GAUSSIANA

O desenvolvimento da equação da pluma gaussiana é apresentado a seguir a partir da equação básica de transporte de massa derivada da conservação, que governa a dispersão de poluentes na atmosfera:

$$\underbrace{\frac{\partial c}{\partial t}}_{\text{Variação da concentração com o tempo}} + \underbrace{\frac{\partial(uc)}{\partial x} + \frac{\partial(vc)}{\partial y} + \frac{\partial(wc)}{\partial z}}_{\text{Termo do transporte}} = D \underbrace{\left[ \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right]}_{\text{Termo da difusão molecular}} \pm \underbrace{R}_{\text{Reação qualquer}} \quad (2.1)$$

Onde  $c$  é a concentração de um determinado material lançado na atmosfera e  $u, v$  e  $w$  são as componentes  $x, y$  e  $z$  do campo de velocidade do vento e  $D$  é o coeficiente de difusão molecular.

Embora informações sobre as menores escalas do escoamento turbulento sejam relevantes, em muitas situações é suficiente uma descrição do escoamento médio. Neste caso, aplica-se o conceito de Média de Reynold, considerada o ponto de partida para a maioria das simulações de escoamentos. De acordo com o método, qualquer propriedade do escoamento pode ser expressa por uma quantidade média e da flutuação associada à turbulência. Desta forma, a velocidade do vento  $u$ , por exemplo, seria a soma da velocidade média  $\bar{u}$  e uma flutuação da velocidade  $u'$ , ou seja:

$$u = \bar{u} + u' \quad (2.2)$$

Assim, a concentração também pode ser desmembrada:

$$c = \bar{c} + c' \quad (2.3)$$

Como as flutuações, tanto em  $c$  quanto em  $u$ , ocorrem em torno de valores médios, assume-se que estas flutuações sejam nulas, ou seja,  $\bar{u}' = 0$  e  $\bar{c}' = 0$ . Nota-se também que  $\overline{uc} = \overline{(\bar{u} + u')(\bar{c} + c')} = \overline{\bar{u}\bar{c}} + \overline{u'c'}$ , em que  $\overline{u'c'}$  é a covariância naquele intervalo. O mesmo raciocínio é aplicado para as outras componentes do vento  $v$  e  $w$ . Aplicando o operador  $(\bar{\quad})$  na equação acima e considerando ainda que não haja reação nem difusão molecular, já que o termo do transporte é dominante, temos:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \frac{\partial (\overline{u\bar{c}})}{\partial x} + \frac{\partial (\overline{v\bar{c}})}{\partial y} + \frac{\partial (\overline{w\bar{c}})}{\partial z} = - \frac{\partial (\overline{u'c'})}{\partial x} - \frac{\partial (\overline{v'c'})}{\partial y} - \frac{\partial (\overline{w'c'})}{\partial z} \quad (2.4)$$

As covariâncias nos termos do lado direito da EQ 2.4 obtidas após a média de Reynold são fluxos turbulentos. Caso considerássemos estes termos nulos, o escoamento seria laminar, o que não ocorre na CLP.

Para descrever o fluxo turbulento, aplica-se a teoria K. Nesta aproximação, a difusão em um ponto fixo na atmosfera é igual ao produto do coeficiente de difusão K em cada direção x, y e z e o gradiente da concentração local:

$$\begin{aligned} \overline{u'c'} &= -K_{xx} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \\ \overline{v'c'} &= -K_{yy} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \\ \overline{w'c'} &= -K_{zz} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Considerando a teoria K e que a atmosfera seja incompressível, ou seja,  $\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0$ , a equação torna-se:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right) \quad (2.6)$$

Juntamente com as condições iniciais e as condições de contorno, a equação representa a equação fundamental para a modelagem da dispersão atmosférica.

Como dito anteriormente, o modelo gaussiano considera as certas hipóteses. Estas são:

- Taxa de emissão Q;
- Regime estacionário,  $\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} = 0$ ;
- Vento unidirecional no eixo x e velocidade constante;
- Condições homogêneas de turbulência atmosférica.

Adotando as hipóteses acima:

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right) \quad (2.7)$$

A difusão na direção x é considerada desprezível em relação ao vento, que sopra na mesma direção. O termo S somado ao segundo termo da equação representa a emissão. A EQ 2.7 se reduz a:

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right) + S \quad (2.8)$$

A solução da EQ 2.8 é mostrada na EQ 2.9, que pode ser resolvida através do método da Transformada de Fourier. A EQ 2.9 considera que  $\bar{c}(x, y, z) = 0$  quando  $y, z \rightarrow \pm\infty$  (SEINFELD, 2006, *apud* LIMA-VAZ, 2008) e  $S = Q\delta(x)\delta(y)\delta(z)$ , onde Q é a taxa de emissão e  $\delta$  corresponde ao delta de Dirac.

$$\bar{c}(x, y, z) = \frac{Q}{4\pi x \sqrt{K_y K_z}} \exp\left[\frac{-u}{4x} \left(\frac{y^2}{K_y} + \frac{z^2}{K_z}\right)\right] \quad (2.9)$$

Geralmente, a pluma começa a se dispersar e tomar a direção do vento a uma altura H, chamada de altura efetiva. Esta é definida como a altura da chaminé mais a altura ascensão da pluma devido às condições iniciais do poluente, vista na seção 2.2.1.1, e deve ser considerada na modelagem. Outro fator a ser adotado é a reflexão total do solo, ou seja o poluente não penetra no solo. Neste caso a equação  $\left.\frac{\partial \bar{c}}{\partial z}\right|_{z=0} = 0$  é tida como condição de contorno. O termo fonte S passa a valer  $S = Q\delta(x)\delta(y)\delta(z - H)$  e  $c(x, y, z) \rightarrow 0$  quando  $x, z \rightarrow \infty$  e  $y \rightarrow \pm\infty$ .

Assim:

$$\bar{c}(x, y, z) = \frac{Q}{4\pi x \sqrt{K_y K_z}} \exp\left[\frac{-\bar{u}}{4x} \frac{y^2}{K_y}\right] \exp\left\{\frac{-\bar{u}}{4x} \left[\frac{(H-z)^2}{K_z} + \frac{(H+z)^2}{K_z}\right]\right\} \quad (2.10)$$

Aplicando a Teoria da Difusão de Taylor (NAPPO, 2008):

$$\begin{aligned} \sigma_y^2 &= 2K_y t = 2K_y \frac{x}{\bar{u}} \\ \sigma_z^2 &= 2K_z t = 2K_z \frac{x}{\bar{u}} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Considerando a teoria acima, obtém-se a equação básica do modelo gaussiano, onde  $\bar{c}$  passa a ser representado pela letra grega  $\chi$ :

$$\frac{\chi(x, y, z; H)}{Q} = \frac{1}{2\pi\bar{u}\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{(H-z)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(H+z)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (2.12)$$

$\chi$  = Concentração de poluente em massa por unidade de volume ( $\text{gm}^{-3}$ )

$Q$  = Taxa de emissão do poluente em massa por unidade de tempo ( $\text{gs}^{-1}$ )

$u$  = Velocidade do vento no ponto de emissão ( $\text{ms}^{-1}$ )

$\sigma_y$  = Desvio padrão da distribuição da concentração na direção y (m)

$\sigma_z$  = Desvio padrão da distribuição da concentração na direção z (m)

$\pi$  = Constante matemática igual a 3,1415926...

$H$  = Altura efetiva (m)

Em caso de receptores ao nível do solo ( $z=0$ ), a equação acima se reduz a EQ 2.13:

$$\chi(x, y, 0; H) = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \exp\left[-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right] \quad (2.13)$$

Para calcular a concentração exatamente abaixo do centro da pluma no nível do solo, considera-se  $y=z=0$ , como visto na EQ 2.14:

$$\chi(x, 0, 0; H) = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right] \quad (2.14)$$

A concentração no centro da pluma é calculada considerando  $y=0$  e  $z=H$ .

$$\chi(x, 0, H; H) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \left\{ 1 + \exp\left[-\frac{2H^2}{\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (2.15)$$

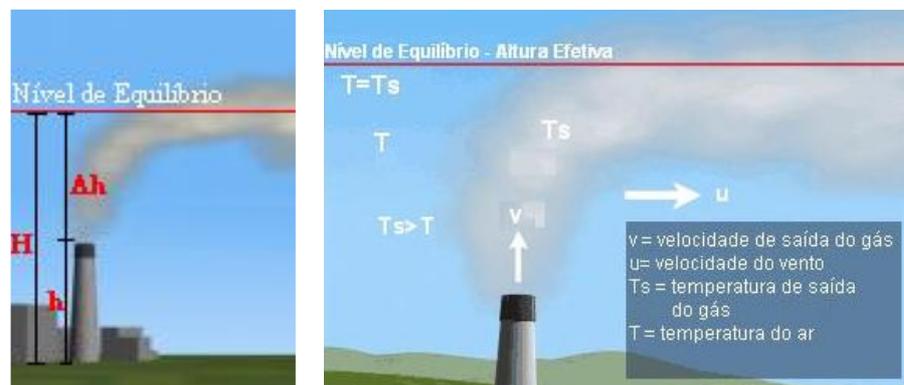
Para se obter concentrações ao longo do centro da pluma no nível do solo a partir de uma emissão na superfície, fazemos  $y=z=H=0$ , como visto abaixo:

$$\chi(x, 0, 0; 0) = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \quad (2.16)$$

Nas EQ 2.12 a 2.15 a concentração alcança um valor máximo e depois decai, como o esperado, já que a distribuição é normal. Contudo, quando a liberação ocorre no nível do solo  $H=0$ , como na EQ 2.16, os valores da concentração apenas decrescem gradativamente à medida que se distancia da fonte, não alcançando um valor máximo, como nas demais equações.

### 2.2.1.2 ALTURA EFETIVA

Uma importante consideração feita nos cálculos de concentração é a altura efetiva (H), resultante da soma da altura da chaminé (h) com a altura de ascensão da pluma no momento em que ela é liberada ( $\Delta h$ ), antes de tomar a direção do vento. A ilustração da altura efetiva pode ser vista na FIG.2.10. Este parâmetro deve incorporar os efeitos de quantidade de movimento vertical, devido à velocidade de saída do jato, e de empuxo, no caso de gases lançados à temperatura diferente daquela do ar no momento da descarga (BOÇON, 1998). A pluma irá ascender até atingir sua altura de equilíbrio, onde os parâmetros da fonte (temperatura e velocidade de saída) se equilibrarão com as condições atmosféricas.



**FIG 2.10** Altura Efetiva. Adaptado de <http://www.met.ed.ucar.edu>

Várias equações foram propostas para estimar a elevação da pluma. Dentre elas destacam-se as fórmulas desenvolvidas por Gary A. Briggs ao longo de seus estudos. O diagrama a seguir para as equações de Briggs é uma forma simplificada de determinar a altura efetiva tanto para classe de estabilidade estável, quanto para instável. O diagrama de Briggs, adaptado de BEYCHOK (2005), envolve a determinação do parâmetro F que representa o fator de empuxo ou de flutuabilidade e o parâmetro de estabilidade s. Seus cálculos podem ser feitos pela a EQ 2.17 e a EQ. 2.18, respectivamente.

$$F = \frac{gvd^2\Delta T}{(4T_s)} \quad (2.17)$$

$$s = \frac{\left( g \frac{d\theta}{dz} \right)}{T} \quad (2.18)$$

Onde:

$F$  = fluxo de empuxo,  $m^4/s^3$

$g$  = aceleração da gravidade,  $m/s^2$

$v$  = velocidade de saída do gás,  $m/s$

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

$d$  = diâmetro do interior da chaminé,  $m$

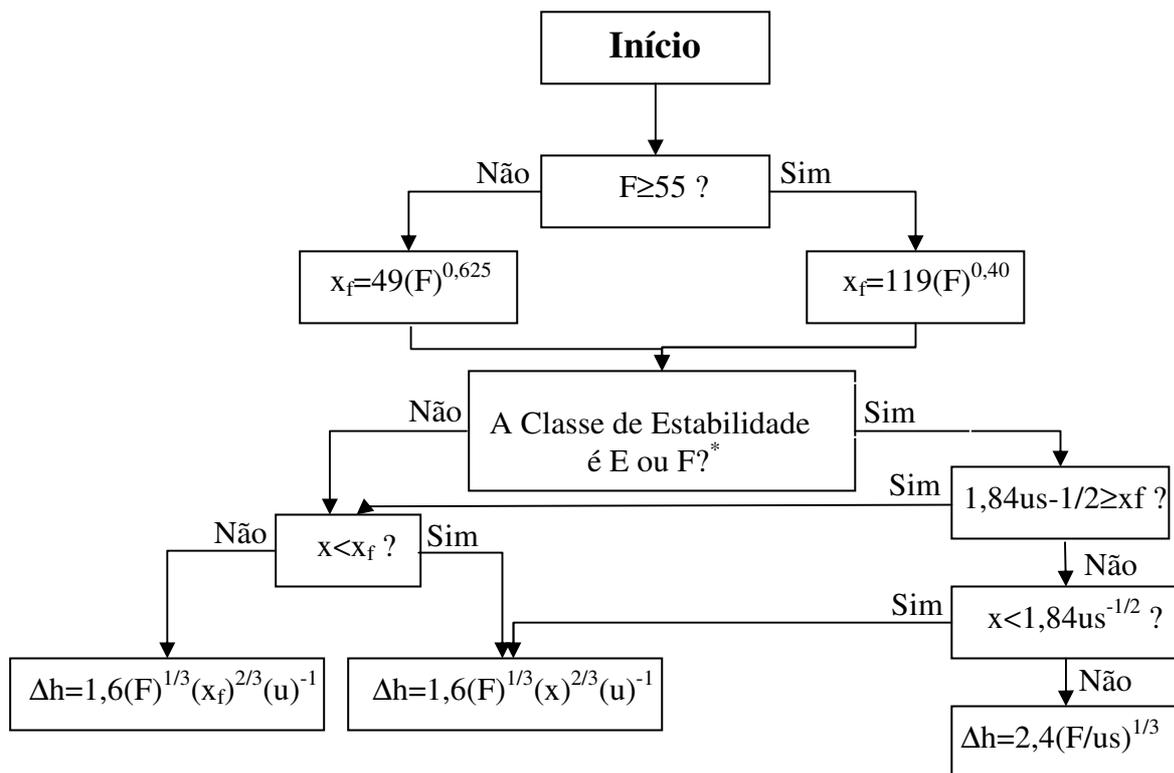
$\Delta T$  = temperatura do gás menos a temperatura do ambiente,  $^{\circ}C$

$T_s$  = temperatura do gás,  $^{\circ}C$

$d\theta/dz$  = variação da temperatura potencial com a altura =  $dT/dz + \Gamma_d$ ,  $^{\circ}C/m$

$T$  = temperatura do ar do ambiente,  $^{\circ}C$

$\Gamma_d$  = gradiente adiabático seco de temperatura =  $0,0098$   $^{\circ}C/m$  (VAREJÃO-SILVA, 2005)



Onde:

$x$  = distância a jusante da fonte (m)

$x_f$  = distância a jusante da fonte até o ponto onde a ascensão da pluma é máxima, (m).

\* As classes de cada estabilidade podem ser vistas na seção 2.2.1.3.1.

### 2.2.1.3 COEFICIENTES DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Os chamados “coeficientes de dispersão atmosférica” são parâmetros do modelo gaussiano utilizados para definir a taxa de dispersão de efluentes em uma pluma nas direções vertical e horizontal e são função da estabilidade atmosférica e distância da fonte.

Os coeficientes de dispersão mais usados são os de Pasquill-Gifford. Entretanto, há outros sistemas para determinar os parâmetros de dispersão disponíveis na literatura, como o sistema de Jülich, desenvolvido por VOGT e GEISS (1974), o sistema derivado do experimento em St. Louis, desenvolvido por BRIGGS (1973), o sistema de HÖGSTRÖM (1964), entre outros. Cada sistema é, em princípio, válido apenas para terrenos e micrometeorologias semelhantes ao do experimento no qual se baseou. Em terrenos complexos, com características únicas, nenhum conjunto de coeficientes obtidos em outros lugares descreverá de forma satisfatória a dispersão local. Nestes casos, a dispersão deve ser estimada preferencialmente através de experimentos realizados no exato local de interesse.

Os coeficientes de dispersão são normalmente determinados através de métodos experimentais. Estes podem ser realizados utilizando-se gases traçadores, plumas de fumaça, LIDAR, e túneis de vento, como no trabalho de NAPPO (1984), entre outros. Apenas os dois primeiros serão abordados deste trabalho.

Nos experimentos envolvendo traçadores, as seguintes exigências devem ser satisfeitas:

- Serem facilmente dispersados a taxas controladas;
- Simularem os movimentos da atmosfera;
- Serem detectados em pequenas quantidades;
- Serem atóxicos;
- Serem quimicamente estáveis.

É importante ressaltar que muitos traçadores, tanto gases quanto partículas, são removidos da atmosfera por deposição, ação química e precipitação.

Em experimento envolvendo gases traçadores, um material traçador é liberado na atmosfera por uma fonte pontual. Uma rede de amostradores é, então, arrumada de forma que os amostradores sejam posicionados em locais estratégicos, de acordo com a direção média do vento e as condições de estabilidade, além das características do terreno. Estes instrumentos

irão detectar a presença ou não do traçador, identificando sua concentração em um determinado tempo. Exemplos de gases traçadores são o freon e o hexafluoreto de enxofre ( $\text{SF}_6$ ), considerados os mais indicados por satisfazerem todas as exigências citadas acima. Existem também outros tipos de traçadores que envolvem amostradores, como as substâncias fluorescentes e os gases radioativos.

Os primeiros estudos desenvolvidos para determinar a dispersão atmosférica utilizaram plumas de fumaça, consideradas traçadores visíveis. Estas plumas são utilizadas com basicamente três objetivos (SMITH, 1973): (i) determinação quantitativa dos parâmetros de difusão meteorológica; (ii) verificação visual das características do vento e condições de difusão quando outros traçadores são usados e; (iii) estudo visual em grande escala dos efeitos aerodinâmicos. Há numerosos dispositivos de fumaça pirotécnica, a maioria dos que são satisfatórios inclui o óxido hexacloroetano alumínio-zinco (SMITH, 1973).

Como exemplos de sistemas de determinação dos coeficientes de dispersão atmosférica, são apresentadas brevemente duas metodologias: o Sistema de Pasquill-Gifford e Sistema Urbano de Briggs, ambos desenvolvidos a partir de experimentos envolvendo traçadores e amostradores.

#### 2.2.1.3.1 SISTEMA DE PASQUILL-GIFFORD

PASQUIL (1961) apresentou o conceito das classes de estabilidade, e foi uma enorme contribuição para os cálculos de dispersão atmosférica que utilizam o modelo de pluma gaussiana como metodologia. As classes de estabilidade de Pasquill são caracterizadas de acordo com a velocidade do vento, radiação solar incidente (no período do dia) e cobertura de nuvem (no período da noite), como visto na TAB. 2.1. As classes são divididas em extremamente instável (A), moderadamente instável (B), ligeiramente instável (C), neutra (D), ligeiramente estável (E), moderadamente estável (F). Em casos de velocidade do vento baixa à noite pode ser considerada uma sétima classe de estabilidade referida como extremamente estável (G). A TAB 2.2 mostra a relação entre a classe de estabilidade da Pasquill e o gradiente de temperatura ( $\Delta T/\Delta z$ ).

**TAB 2.1: Classe de Estabilidade de Pasquill. Fonte: Adaptado de TURNER (1994).**

Velocidade do Vento a 10m (m/s)	<i>Insolação</i>			<i>Noite</i>	
	Forte	Moderado	Fraco	Cobertura fina de nuvens ou cobertura de nuvens baixas >4/8	Cobertura de nuvens <3/8
<2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	D	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

**TAB 2.2: Relação entre a Classe de Estabilidade de Pasquill e o Gradiente de Temperatura. Fonte: Norma CNEN-NE 1.22 (1989).**

<i>Classe de Estabilidade</i>	$\Delta T/\Delta z$ ( $1^{\circ}C/100m$ )
A	$\Delta T/\Delta z \leq -1,9$
B	$-1,9 < \Delta T/\Delta z \leq -1,7$
C	$-1,7 < \Delta T/\Delta z \leq -1,5$
D	$-1,5 < \Delta T/\Delta z \leq -0,5$
E	$-0,5 < \Delta T/\Delta z \leq 1,5$
F	$1,5 < \Delta T/\Delta z \leq 4,0$

Os valores de Pasquill-Gifford são baseados em experimentos com traçadores de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) liberados continuamente por 10min, a cerca de 46 cm da superfície, e medidas de flutuação da direção do vento, realizados em 1956 no sítio praticamente homogêneo de O'Neil, Nebraska, EUA.

Através da classe de estabilidade e distância da fonte, Pasquill pôde determinar o espalhamento horizontal e vertical definidos como a largura e a altura da pluma, respectivamente. GIFFORD (1961, *apud* ARYA, 1999), dando prosseguimento aos trabalhos de Pasquill, apresentou as EQ 2.19 e 2.20 que relacionam o espalhamento lateral e vertical da pluma com os coeficientes  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ , respectivamente, considerando que o valor da concentração no contorno da pluma visível equivale a 10% do valor no eixo central:

$$\sigma_y \cong \frac{x \tan(\theta/2)}{2,15} \quad (2.19)$$

$$\sigma_z \cong \frac{z}{2,15} \quad (2.20)$$

Onde  $\theta$  representa o espalhamento lateral angular e  $z$  a metade do espalhamento vertical total. De acordo com as curvas originais, as equações de  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  podem ser aproximadas pelas EQ 2.20 e 2.21 (VOGT,1977 *apud* TORSANI, 1980).

$$\sigma_y(x) = (a_1 \ln x + a_2)x \quad (2.20)$$

$$\sigma_z(x) = \frac{1}{2,15} \exp(b_1 + b_2 \ln x + b_3 \ln^2 x) \quad (2.21)$$

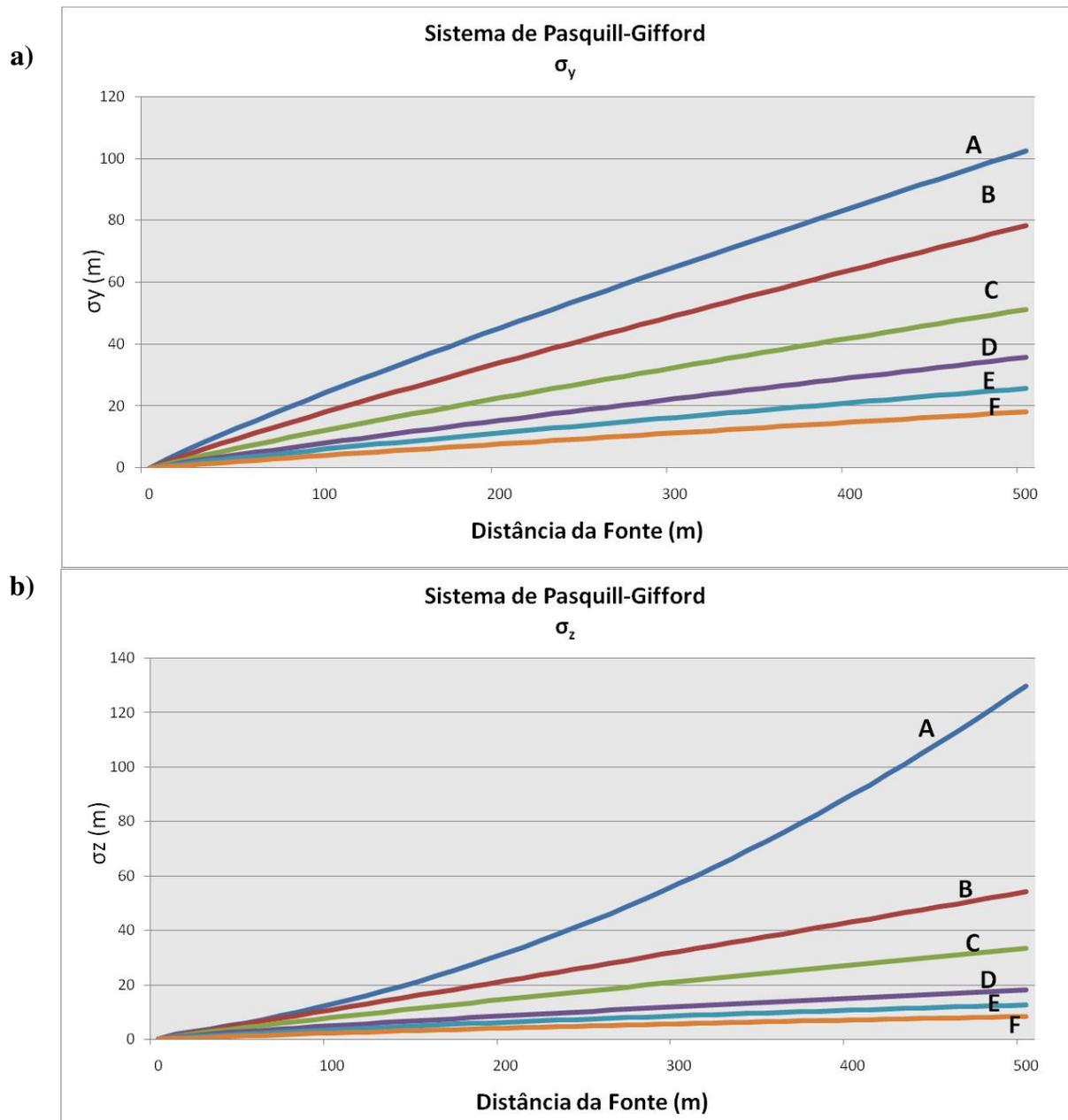
Onde os coeficientes  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  e  $b_3$  são especificados na Tabela 2.3.

**TAB 2.3 Parâmetros das equações dos coeficientes de dispersão do Sistema Pasquill-Gifford**

<i>Classe</i> <i>Parâmetros</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>
$a_1$	-0,0234	-0,0147	-0,0117	-0,0059	-0,0059	-0,0029
$a_2$	0,35	0,248	0,175	0,108	0,088	0,054
$b_1$	0,88	-0,985	-1,186	-1,35	-2,88	-3,8
$b_2$	-0,152	0,82	0,85	0,793	1,255	1,419
$b_3$	0,1475	0,0168	0,0045	0,0022	-0,042	-0,055

Obs.: Construída a partir dos dados de TORSANI (1980).

As curvas de Pasquill-Gifford podem ser vistas na FIG 2.11 para coeficiente de dispersão horizontal e vertical.



**FIG 2.11** Curvas de Pasquill-Gifford para  $\sigma_y$  (a) e  $\sigma_z$  (b).

### 2.2.1.3.2 SISTEMA URBANO DE BRIGGS

O estudo em St. Louis, Missouri, EUA, foi conduzido no período de 1963-1965 e consistiu em uma série de experimentos (26 durante o dia e 16 à noite) nos quais partículas de sulfeto de zinco-cádmio fluorescente foram liberadas próximo ao nível do solo em diversas

condições meteorológicas. O objetivo do estudo era avaliar a dispersão atmosférica em áreas urbanas, como feito por McELROY e POOLER (1968). BRIGGS (1973) elaborou expressões analíticas utilizando os dados apresentados por McELROY e POOLER (1973). Esses dados incluíram observações de outros experimentos realizados em áreas urbanas utilizando traçadores conduzidos em Johntown, Pensilvânia (SMITH,1967), e Ft. Wayne, Indiana (CSANADY *et al.*, 1967). Desta forma, as expressões de Briggs tentam descrever a dispersão de emissões em diversos sítios urbanos. As relações foram propostas por Briggs, e são válidas para médias de 10min e expressas pelas equações abaixo (VENKATRAM, 2005):

$$\sigma_y = i_y x (1 + a_y x)^{b_y} \quad (2.22)$$

$$\sigma_z = i_z x (1 + a_z x)^{b_z} \quad (2.23)$$

Onde os parâmetros  $i_y$ ,  $a_y$ ,  $b_y$ ,  $i_z$ ,  $a_z$  e  $b_z$  são especificados na TAB 2.4.

**TAB 2.4 Parâmetros das equações dos coeficientes de dispersão do Sistema Urbano de Briggs**

<i>Classe</i> <i>Parâmetros</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>
$i_y$	0,32	0,32	0,22	0,16	0,11	0,11
$a_y$	0,00040	0,00040	0,00040	0,00040	0,00040	0,00040
$b_y$	-0,50	-0,50	-0,50	-0,50	-0,50	-0,50
$i_z$	0,24	0,24	0,20	0,14	0,080	0,080
$a_z$	0,0010	0,0010	0	0,00030	0,0015	0,0015
$b_z$	0,5	0,5	0	-0,50	-0,50	-0,50

Obs.: Construída a partir dos dados de VENKATRAM (2005).

As curvas de Briggs (urbano) podem ser vistas na FIG 2.12 para coeficiente de dispersão horizontal e vertical.

Observa-se que na maior parte das condições atmosféricas, os coeficientes de dispersão desenvolvidos a partir de dados de terrenos urbanos (e.g. coeficientes de Briggs (urbano)), são maiores do que os coeficientes obtidos em terrenos planos (e.g. coeficientes de Pasquill-

Gifford), refletindo as influências do aumento da turbulência mecânica em áreas urbanas e da turbulência térmica gerada durante o período noturno como resultado da liberação do calor acumulado em estruturas e pavimentos durante o dia (TURNER, 1994).

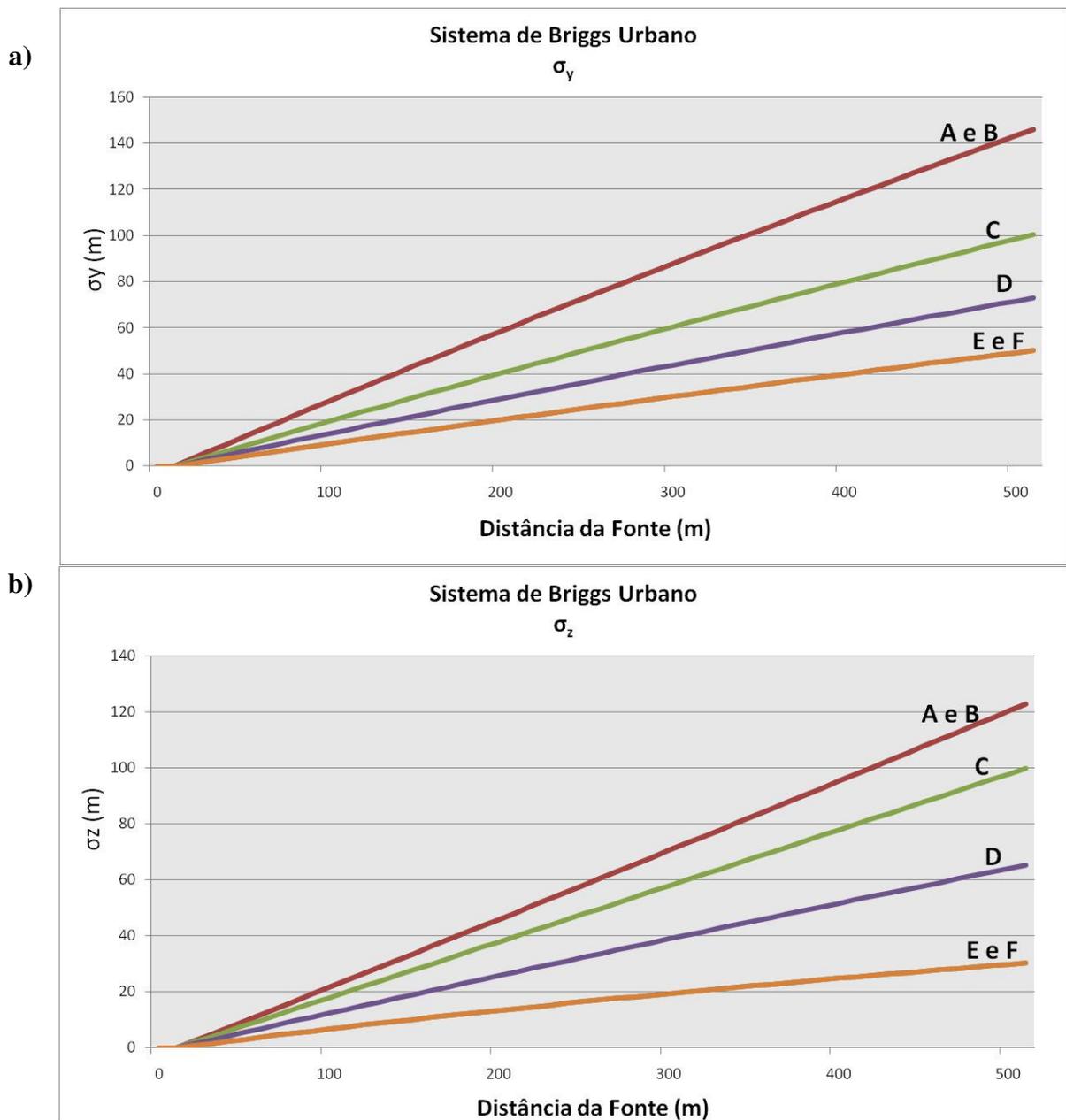


FIG 2.11 Curvas de Briggs (urbano) para  $\sigma_y$  (a) e  $\sigma_z$  (b).

### 3. ANÁLISE DE IMAGENS FOTOGRÁFICAS

A utilização de imagens fotográficas nos estudos relacionados à qualidade do ar tem se mostrado uma forma prática e confiável de estimar as características de dispersão de plumas liberadas na atmosfera, cujos principais indicadores para o modelo gaussiano de dispersão são seus coeficientes de dispersão vertical e horizontal. A sistematização de um método prático de avaliar esses coeficientes se faz muito importante, pois demonstra a viabilidade técnica e econômica de suas derivações a partir de fotografias de plumas de fumaça, que podem facilmente serem produzidas pela liberação de traçadores fumígenos. É uma proposta de tal sistematização o escopo deste capítulo.

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES GEOMÉTRICAS NA IMAGEM FOTOGRÁFICA

Uma completa interpretação fotográfica exige considerações de dimensões como alturas, comprimentos, larguras, áreas e volumes. O tamanho relativo das imagens formadas em qualquer superfície plana no campo de projeção será uma função da distância do plano para a lente das câmeras. A imagem formada num plano entre o objeto e a lente (em frente da lente) será normal enquanto a imagem formada no plano atrás da lente será invertida. Ambas as imagens serão idênticas em tamanho e forma (ignorando a inversão) de modo que os dois planos sejam paralelos (WATZLAWICK *et al.*, 2007).

#### 3.2 ANÁLISE FOTOGRÁFICA

A técnica foi desenvolvida com base na literatura específica para extrair os valores dos coeficientes de dispersão horizontal e vertical,  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ , de plumas de fumaça a partir de fotografias. O procedimento é dividido em três etapas: (1) Obtenção das dimensões reais dos elementos contidos nas imagens fotográficas; (2) Determinação do espalhamento da pluma na

fotografia; (3) Determinação dos coeficientes de dispersão, ou desvios-padrão, através das equações desenvolvidas por GIFFORD (1957) e GIFFORD (1961, *apud* ARYA, 1999).

### 3.2.1 DETERMINAÇÃO DAS DIMENSÕES REAIS DA PLUMA DE FUMAÇA

Há diversos métodos para se obter informações das dimensões reais de plumas de fumaça de imagens fotográficas para quase todos os tipos de situações envolvidas durante a obtenção ou análise da imagem, como a dificuldade de determinar o contorno real da pluma, observado por NAPPO (1984), assim como a obliquidade das fotos, destacado por RANDERSON (1971) e ECKMAN *et al.*(1991).

Algumas ferramentas podem ser utilizadas a fim de minimizar, ou mesmo eliminar, problemas encontrados no momento da análise fotográfica. Uma delas é a utilização de um microdensitômetro (FIG 3.1) que determina a densidade ótica da imagem, resultando em uma definição mais precisa do contorno do objeto de interesse, no caso, a pluma de fumaça. Quando as fotografias são oblíquas, ou seja, quando o eixo focal<sup>1</sup> é inclinado em relação ao plano da pluma, outra dificuldade é encontrada. As FIG 3.2 e 3.3 ilustram a situação ideal (FIG 3.2a e 3.3a) e a situação onde ocorre a obliquidade (FIG 3.2b e 3.3b) em fotografias aéreas e laterais. Uma solução para este problema é encontrada em ECKMAN *et al.* (1991), onde os autores desenvolveram um método específico para estimar o coeficiente de dispersão horizontal  $\sigma_y$  a partir de fotografias oblíquas aéreas de plumas de fumaça.

As medições das dimensões da pluma podem ainda ser feitas a partir de programas de computador desenvolvidos para auxiliar a fotogrametria<sup>2</sup>, que permitem a criação de modelos em três dimensões de elevada qualidade. Estes programas oferecem resultados mais precisos, já que as imagens são retificadas (correções geométricas), basicamente de inclinação e de escala (CERQUEIRA *et al.*, 2003). Um exemplo de *software* é o *PhotoModeler*, desenvolvido pela empresa *Eos Systems Inc.*, de Vancouver, Canadá.

Entretanto, quando o eixo focal é perpendicular em relação ao plano da pluma ou próximo disso pode-se adotar um método simples utilizando-se equações geométricas, considerando certa perda de resolução.

---

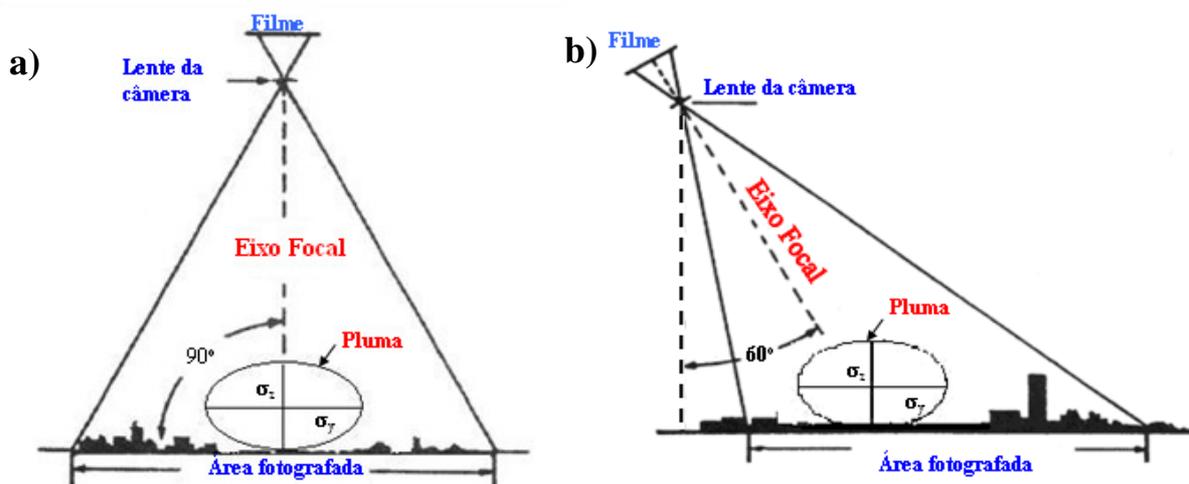
<sup>1</sup> Reta que passa pela câmera e o centro do objeto de interesse.

<sup>2</sup> Ciência e tecnologia de obter informações confiáveis através de processos de registro, interpretação e medições de imagens. Um dos seus objetivos é reconstruir o espaço tridimensional a partir de imagens bidimensionais.

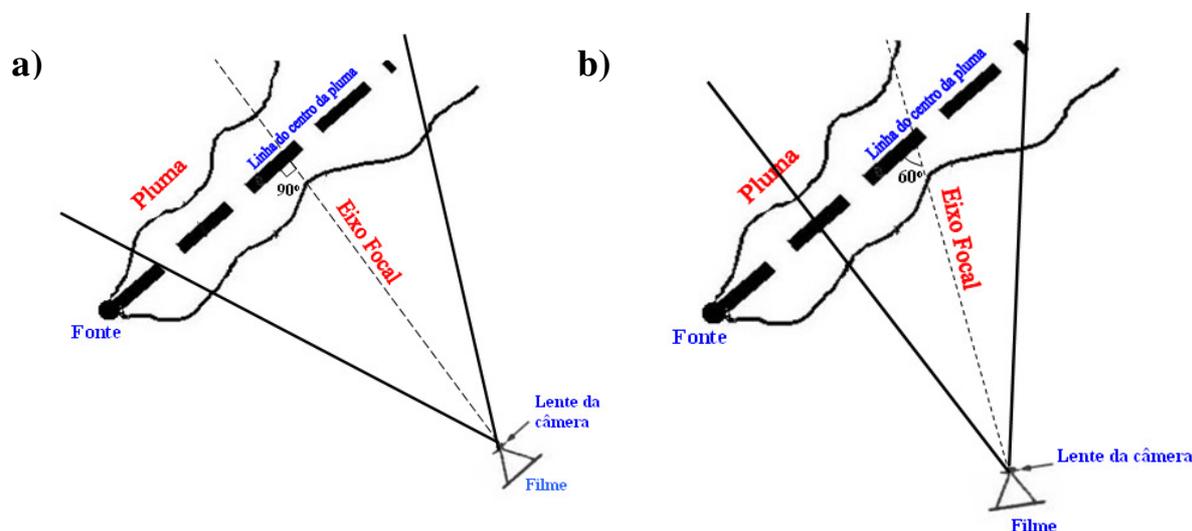


**FIG 3.1** Foto de um microdensitômetro, modelo PDS 1010A.  
**Fonte:** Instituto de Astronomia, Universidade de Cambridge, UK,  
<http://www.ast.cam.ac.uk/~mike/casu/pds/pdswww.html>

Primeiramente, será descrito o método para determinar o coeficiente de dispersão horizontal  $\sigma_y$ . O eixo focal será considerado aproximadamente perpendicular em relação ao plano da pluma, permitindo o uso de equações geométricas simples para estimar a largura da pluma, necessária para determinar  $\sigma_y$ .



**FIG 3.2 Ilustração frontal da pluma de fumaça. Eixo focal perpendicular (situação ideal) (a) e inclinado (b) em relação à linha central (a jusante da fonte) da pluma de fumaça.**

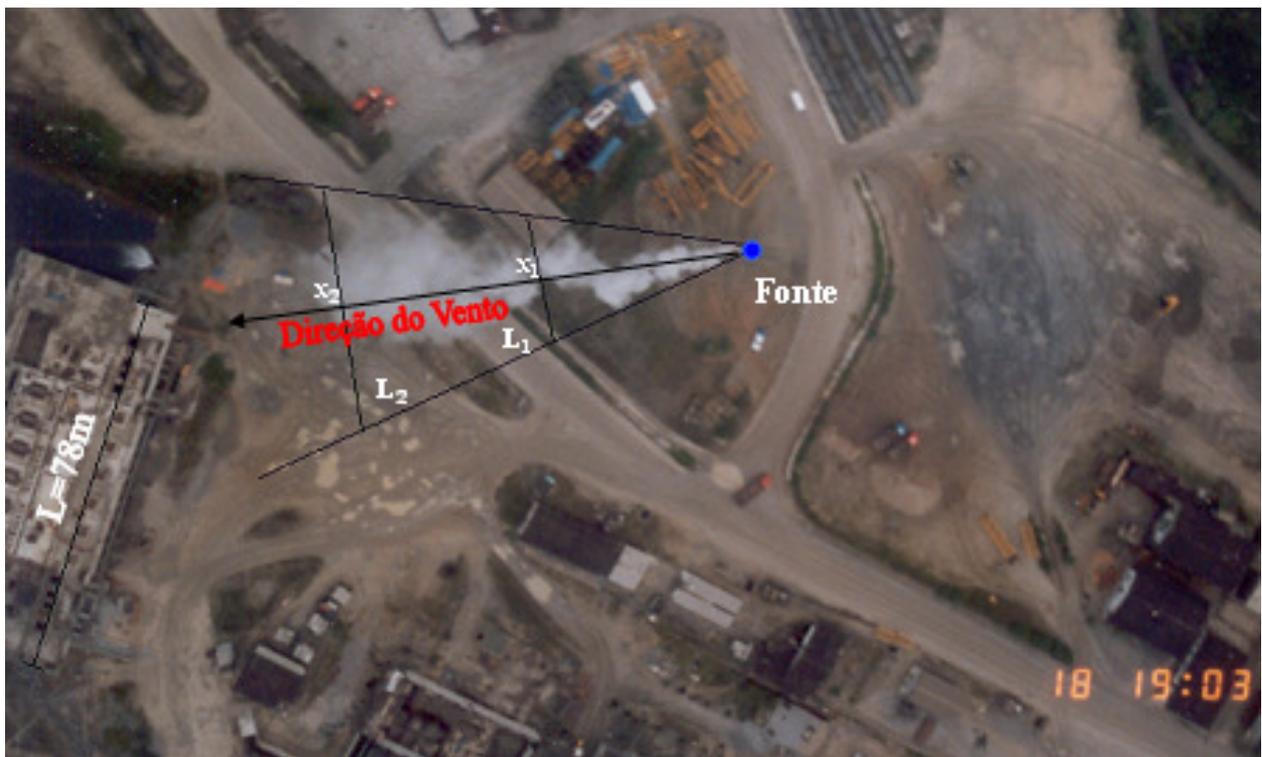


**FIG 3.3 Ilustração aérea da pluma de fumaça. Eixo focal perpendicular (situação ideal) (a) e inclinado (b) em relação à linha central (a jusante da fonte) da pluma de fumaça.**

Identificando a pluma na imagem fotográfica, traçam-se duas linhas ao longo das extremidades máximas do contorno da pluma a partir da fonte, como visto na FIG 3.4, de forma que a pluma assumira uma aparência próxima a de um cone, considerando-se o padrão gaussiano (FIG. 2.9). Caso a fotografia seja obtida em uma câmera digital ou digitalizada em um computador, recomenda-se ajustar características da imagem, como contraste e brilho, para que o contorno seja visualizado com mais nitidez. Em seguida, linhas retas são traçadas ligando as duas extremidades da pluma para diferentes distâncias da fonte, e medidas utilizando um modelo computacional de análise de imagem, ou até mesmo uma régua. Na

ilustração da FIG 3.4, o procedimento é feito para duas distâncias da fonte,  $x_1$  e  $x_2$ . Recomenda-se associar cada distância da fonte na fotografia a um elemento evidenciado na imagem (uma árvore, por exemplo) que esteja localizado próximo à pluma. Desta forma, a localização de cada ponto (cada distância da fonte) tornar-se-á mais fácil caso haja outras fotografias tomadas na mesma posição. Deve-se medir também a largura de algum elemento de dimensões conhecidas que apareça na imagem (um prédio, por exemplo), que possa ser usado como ponto de referência. Assim, as medidas das plumas terão uma referência objetiva para comparação.

As fotografias utilizadas como modelo foram retiradas dos dados do experimento realizado por FURNAS/NOAA em 1987, no sítio da CNAAA, em Itaorna (LIMA-E-SILVA, 2008).



**FIG 3.4 Vista aérea de uma pluma de fumaça e os parâmetros considerados em sua análise. Adaptado de LIMA-E-SILVA (2008).**

Após a identificação dos parâmetros descritos, a EQ 3.1 é aplicada para obter a largura da pluma.

$$L_i = \frac{L_{iF} \cdot L_{Ref}}{L_{RefF}} \quad (3.1)$$

Onde:

$i$  = ponto à jusante da fonte em que se deseja medir a largura da pluma;

$L_{iF}$  = Largura da Pluma na distância de interesse  $i$  medida diretamente da fotografia;

$L_{Ref}$  = Largura Real do Ponto de Referência;

$L_{RefF}$  = Largura do Ponto de Referência medida diretamente da fotografia.

Para o exemplo da FIG 3.4, a EQ 3.1 se transforma nas EQ 3.2 e 3.3.

$$L_1 = \frac{L_{1F} \cdot L_{Ref}}{L_{RefF}} \quad (3.2)$$

$$L_2 = \frac{L_{2F} \cdot L_{Ref}}{L_{RefF}} \quad (3.3)$$

Onde:

$L_{1F}$  = Largura da Pluma no Ponto  $x_1$  medida diretamente da fotografia;

$L_{2F}$  = Largura da Pluma no Ponto  $x_2$  medida diretamente da fotografia;

$L_{Ref}$  = Largura Real do Ponto de Referência - para a FIG 3.4, o ponto de referência é o prédio de largura igual a 78m (*Google Earth*);

$L_{RefF}$  = Largura do Ponto de Referência medida diretamente da fotografia.

O cálculo para determinar a altura da pluma é dividido em duas etapas para facilitar o entendimento: obtenção da altura da pluma sem correções de distância e obtenção da altura real da pluma. Neste caso, o erro provocado pelo efeito da obliquidade (FIG 3.3) pode ser minimizado ou mesmo corrigido.

Utiliza-se uma fotografia lateral da pluma e uma planta baixa do terreno onde foi liberada. A fotografia é utilizada inicialmente, aplicando o mesmo raciocínio já explicado para a determinação da largura da pluma, porém, neste caso, a altura de um determinado elemento de dimensões conhecidas é utilizada ao invés de sua largura. Na FIG 3.5 pode ser vista uma fotografia lateral com os parâmetros envolvidos na primeira etapa da estimativa da altura da pluma, também para duas distâncias da fonte. É importante ressaltar que, nesta figura a pluma está se afastando do fotógrafo. Desta forma, na fotografia, a pluma não é simétrica em relação ao seu eixo. O primeiro cálculo é feito através da EQ 3.4

(PRADO, 2008) para cada ponto de interesse (distância da fonte), similar à EQ 3.1, para determinar a largura da pluma. Entretanto, ao contrário da EQ 3.1, a equação abaixo não fornece a dimensão (no caso, a altura) real da pluma.

$$A_i^* = \frac{A_{iF} \cdot A_{Ref}}{A_{RefF}} \quad (3.4)$$

Onde:

$i$  = ponto à jusante da fonte em que se deseja medir a altura da pluma;

$A_i^*$  = Altura da Pluma em determinada distância da fonte sem correção;

$A_{iF}$  = Altura da Pluma em determinada distância da fonte medida diretamente da fotografia;

$A_{Ref}$  = Altura Real do Ponto de Referência (para a FIG 3.5, o ponto de referência é a torre de altura igual a 100metros);

$A_{RefF}$  = Altura do Ponto de Referência medida diretamente da fotografia.

Com  $A_i^*$  encontrada, deve-se corrigir o valor quanto à distância entre o ponto da pluma e a localização do fotógrafo, como mencionado acima. Para isso, é necessário determinar distância entre o fotógrafo e o ponto de interesse da pluma e entre o fotógrafo e o ponto de referência. Estes valores, assim como as distâncias da fonte, devem ser obtidos com o auxílio de uma planta baixa da região estudada. Com a direção do vento conhecida, ou, se for possível, com uma fotografia aérea da mesma pluma tirada simultaneamente com a fotografia terrestre, traça-se a linha central da pluma, onde a concentração é considerada máxima. Na FIG 3.6, adaptada da imagem capturada do *Google Earth*, pode ser visualizado os parâmetros considerados nesta segunda etapa.

Para obter o valor real da altura da pluma nos pontos de interesse (distância da fonte), basta aplicar a EQ 3.5 (PRADO, 2008), que corrige a altura de cada elemento de acordo com sua profundidade na fotografia:

$$A_i = \frac{A_i^* \cdot D_i}{D_{Ref}} \quad (3.5)$$

Onde:

$i$  = ponto à jusante da fonte em que se deseja medir a altura da pluma;

$A_i$  = Altura Real da Pluma no Ponto  $x_i$ ;

$A_i^*$  = Altura da Pluma em determinada distância da fonte sem correção;

$D_i$  = Distância entre o fotógrafo e o Ponto  $x_i$ ;

$D_{Ref}$  = Distância entre o fotógrafo e o Ponto de Referência.

Aplicando as EQ 3.4 na EQ 3.5, é encontrada a equação final para determinar a altura real da pluma de fumaça. Assim, tem-se:

$$A_i = \frac{A_{iF} \cdot D_i}{A_{RefF}} \left( \frac{A}{D} \right)_{Ref} \quad (3.6)$$

Quando as linhas ao redor do contorno da pluma são traçadas, uma forma triangular é formada juntamente com a linha que representa a largura ou a altura da pluma. Desta forma, a largura ou altura da pluma na fotografia poderia ser medida apenas para uma distância da fonte. Para outras distâncias, ou seja, outros pontos de interesse, as dimensões da pluma podem ser determinadas por semelhança de triângulo, já que os ângulos formados são iguais para qualquer distância da fonte. Entretanto, um cuidado deve ser tomado para que a dimensão da pluma em certo ponto seja válida. Esta dimensão deve ser totalmente visível além de ter que possuir o tamanho exato da distância entre as duas linhas traçadas que cruzam o contorno da pluma a uma dada distância da fonte de interesse. Realizando mais de uma medição na mesma fotografia ao invés de usar o método de semelhança de triângulo, é garantido que a dimensão da pluma a ser medida em um determinado ponto satisfaça estas exigências.

A largura da pluma também pode ser obtida de forma similar à determinação da altura da pluma, envolvendo os dois processos citados acima. Para isso, porém, deve-se ter uma fotografia lateral obtida no mesmo momento da fotografia aérea para determinar a altura efetiva da pluma. Além disso, deve-se saber a posição exata do helicóptero no sítio, de forma que seja possível calcular a distância entre o ponto de referência e o helicóptero, assim como a distância entre ponto de interesse ao longo da altura efetiva da pluma e o helicóptero. Desta forma, o cálculo da largura da pluma envolveria uma série de dificuldades, além de embutir mais incertezas devido aos erros de cada variável a mais envolvida através deste método. Assim, como visto, este método foi rejeitado e a largura da pluma foi estimada diretamente, sem correções de distância, ao contrário do método para estimar a altura da pluma.

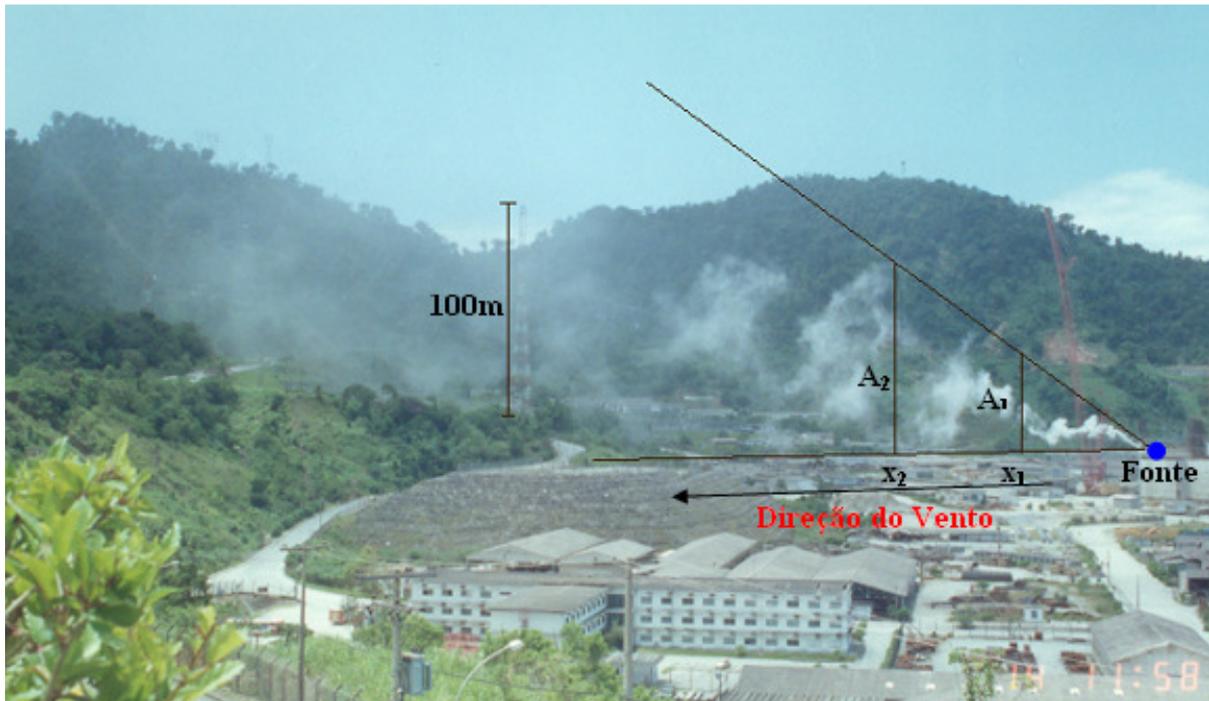


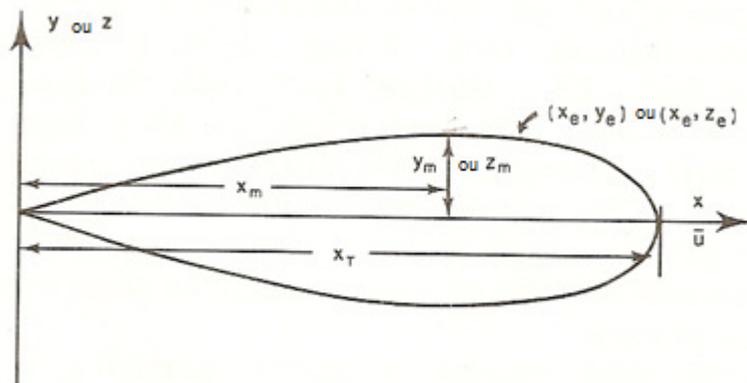
FIG 3.5 Vista lateral de uma pluma de fumaça e os parâmetros considerados em sua análise. Adaptado de LIMA-E-SILVA (2008).



FIG 3.6 Vista aérea da CNAAA com parâmetros considerados na análise da pluma de fumaça. Adaptado do *Google Earth*, 2008.

### 3.2.2 DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Na literatura pesquisada, dois meios de determinar os coeficientes de dispersão do modelo gaussiano ou desvios-padrão se destacaram. A primeira e mais conhecida técnica foi desenvolvida por GIFFORD (1957). O método envolve a aplicação de equações implícitas, representadas pelas EQ 3.9 e 3.10, para coeficiente de dispersão vertical e horizontal, respectivamente. Estas equações são obtidas através de diversas considerações feitas a partir da equação simples da pluma gaussiana (NAPPO, 2008), envolvendo os parâmetros ilustrados na FIG 3.7. No Apêndice 1, encontra-se a derivação das EQ 3.9 e 3.10.



**FIG 3.7** Parâmetros envolvidos na derivação dos coeficientes de dispersão de pluma de fumaça integradas no tempo.

Fonte: NAPPO (2008).

$$\sigma_y^2 = y^2 \left[ \ln \left( \frac{ey_m^2}{\sigma_y^2} \right) \right]^{-1} \quad (3.9)$$

$$\sigma_z^2 = z^2 \left[ \ln \left( \frac{ez_m^2}{\sigma_z^2} \right) \right]^{-1} \quad (3.10)$$

Onde:

$\sigma_y$  = coeficiente de dispersão vertical

$\sigma_z$  = coeficiente de dispersão horizontal

y = largura da metade da pluma em uma determinada distância da fonte

$z$  = altura da metade da pluma em uma determinada distância da fonte

$y_m$  = largura máxima da metade da pluma

$z_m$  = altura máxima da metade da pluma

$e$  = base natural logarítmica

As equações acima podem ser resolvidas tanto gráfica quanto numericamente, utilizando-se o método de iteração de Newton. Este método, no entanto, deve ser aplicado em fotografias de plumas integradas no tempo, que são imagens com geometria média da pluma. A técnica é fortemente dependente de uma forma específica da pluma, e deve ser utilizada preferencialmente em casos em que as condições atmosféricas permaneçam constantes. Além disso, é preciso que a pluma seja visualizada por inteiro na imagem fotográfica, necessitando-se de uma distância relativamente grande entre a pluma e o fotógrafo. Caso esta condição não seja satisfeita, a largura ou altura máxima da pluma não será visualizada e, portanto, a técnica não poderá ser aplicada. NAPPO (1984) utilizou este método em análise de fotografias de plumas médias integradas no tempo, obtendo um comportamento médio da pluma com uma forma similar à visualizada na FIG 3.7.

Quando a pluma não aparece por inteiro na fotografia, ou quando não há registros fotográficos de sua geometria média num intervalo de tempo, outras técnicas devem ser adotadas. Neste caso, pode-se utilizar a conversão do espalhamento lateral e vertical da pluma em desvios-padrão, como realizada por GIFFORD (1961, *apud* ARYA, 1999) para determinar os coeficientes de Pasquill-Gifford. Nesta, assume-se que o contorno da pluma equivale a 10% do valor de sua linha central (PASQUILL, 1974). Esta conversão é feita através das EQ 3.11, 3.12 e 3.13 (PASQUILL, 1974), similares às EQ 2.19 e 2.20.

$$Y = 4,30\sigma_y \quad (3.11)$$

$$Z = 4,30\sigma_z \quad (\text{fonte elevada}) \quad (3.12)$$

$$Z_0 = 2,15\sigma_z \quad (\text{fonte ao nível do solo sem ascensão da pluma}) \quad (3.13)$$

Onde:

$\sigma_y$  = coeficiente de dispersão horizontal

$\sigma_z$  = coeficiente de dispersão vertical

$Y$  ou  $L_i$  = largura total da pluma em uma determinada distância da fonte

$Z$  ou  $A_i$ = altura total da pluma em uma determinada distância da fonte

$Z_0$  ou  $A_{i0}$ = altura total da pluma em uma determinada distância da fonte quando a fonte se encontrar posicionada na altura do solo ( $z=0$ ).

Os coeficientes numéricos correspondem à ordenada de 10% na distribuição gaussiana. Mais detalhes sobre a determinação das EQ 3.11, 3.12 e 3.13 podem ser vistos no Apêndice 2.

TORSANI (1980) aplicou a EQ 3.11 para estimar os coeficientes de dispersão horizontal da pluma gaussiana a partir de imagens do satélite LANDSAT. Ele comparou seus valores derivados das imagens com os valores obtidos no Sistema de Pasquill-Gifford e no Sistema de Jülich, e comprovou a eficácia da técnica.

Um exemplo numérico da determinação dos coeficientes de dispersão é encontrado no Apêndice 4.

### 3.3 INCERTEZAS NA ESTIMATIVA DOS COEFICIENTES DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA A PARTIR DE FOTOGRAFIAS DE PLUMAS DE FUMAÇA

Assim como outras técnicas de determinação da dispersão, a técnica fotogramétrica introduz erros que levam a incertezas nas estimativas dos coeficientes de dispersão atmosférica. As principais incertezas são descritas abaixo.

As medições das dimensões das plumas de fumaça diretamente das fotografias embute uma série de erros, principalmente se o método adotado não envolver ferramentas que auxiliem o processo, como programas de computador ou densitômetros. Caso alguma destas ferramentas seja utilizada, sua precisão deve ser considerada. Adotando-se apenas cálculos geométricos, o erro dependerá da forma como a dimensão da pluma na fotografia é determinada, seja através de programas computacionais para análise de imagem ou de instrumentos de medida como réguas. O erro também dependerá da sensibilidade e dos conhecimentos do profissional realizando as medidas, o que inviabiliza uma pré-determinação teórica das incertezas envolvidas. Não é possível descartar a interferência do “observador”, o profissional envolvido, e assim é lícito afirmar que há necessidade de uma competência mínima para perceber atributos importantes que podem interferir significativamente na definição do contorno das plumas, como presença de nevoeiro e reflexão no solo.

Existem também outros fatores geradores de incertezas, como iluminação, plano de fundo e grau de visibilidade atmosférica, que em certos casos podem tornar mais difícil a determinação do contorno da pluma.

A linha do eixo da pluma também deve ser traçada com cuidado, principalmente pelo seu potencial de causar erros nas medidas posteriores que dependam deste parâmetro, como a determinação da distância real da fonte na planta do sítio e, no caso de fotografias laterais, correção quanto à distância entre fotógrafo e ponto de interesse a sotavento da fonte. Este passo deve ser feito analisando-se a direção da pluma de fumaça na fotografia e a direção do vento conhecida no momento da tomada da imagem.

O efeito da obliquidade na análise das fotos é outro problema que gera dificuldade na estimativa das dimensões de plumas de fumaça. Para fotografias laterais, este tipo de erro pode ser minimizado através da correção entre distâncias envolvendo a posição do fotógrafo e a localização do ponto a ser medido na pluma. Esta correção, entretanto, embute incertezas quanto à confiabilidade da planta baixa ou resolução da imagem de satélite do sítio. No caso de fotografias aéreas, o erro provocado pela inclinação do eixo focal é mais difícil de ser reduzido com cálculos geométricos simples, necessitando-se de um estudo específico para cada tipo de dados obtidos do experimento fotográfico, como número de imagens tomadas simultaneamente da mesma pluma em diferentes ângulos, altitude da câmera fotográfica contida no helicóptero, entre outros fatores. Uma outra forma de minimizar a obliquidade pode ser feita com a utilização de programas de computador de fotogrametria, capazes de retificar geometricamente a imagem. Esta retificação é realizada através das coordenadas geográficas de pontos localizados na imagem fotografada, que podem ser obtidas através do uso de receptores GPS (*Global Positioning System*).

Outra fonte de incerteza está nas considerações de GIFFORD (1957) feitas para relacionar a forma da pluma com a distribuição da concentração de fumaça na mesma. Na técnica apresentada de GIFFORD (1961, *apud* ARYA, 1999), a maior fonte de incerteza está na convenção adotada na qual se assume que o contorno da pluma é igual a 10% do valor da concentração ao longo do eixo central, considerada apenas uma aproximação.

## 4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

### 4.1 ORIGEM DOS DADOS PRIMÁRIOS

A metodologia apresentada no Capítulo 3 foi aplicada a uma série de registros fotográficos de plumas de fumaça obtidas em um experimento realizado no sítio CNAAA por FURNAS Centrais Elétricas S.A. (pessoal da então Divisão de Segurança Ambiental, Departamento de Engenharia Nuclear) em conjunto com o National Oceanic and Atmospheric Administration (pessoal do Atmospheric Turbulence and Diffusion Division) em 1987. Das cerca de 2.600 fotografias obtidas, foi feita uma triagem que resultou em 261 fotografias que foram utilizadas para este estudo. Surpreendentemente, não existe nenhuma referência bibliográfica daquele experimento, devido ao fato de que ele não foi terminado, por interrupção de uma das partes, a empresa FURNAS Centrais Elétricas S.A.. Existe apenas um relatório referente à primeira fase daquele experimento no ano anterior (PENDERGRASS *et al.*, 1986).

A primeira fase (1986) objetivou caracterizar a micrometeorologia do sítio da CNAAA, e a segunda (1987) derivar os coeficientes através das plumas de fumaça. A primeira parte foi completada, gerando o relatório já citado, mas a segunda foi interrompida após o término da parte de campo do experimento, por razões desconhecidas.

A aplicação da técnica aqui descrita foi feita diretamente sobre os dados primários do experimento de 1987, trazidos para o Brasil após serem recuperados em cerca de 80%, no Atmospheric Turbulence and Diffusion Division (NOAA), Oak Ridge, TN, USA, por um especialista da CNEN, em novembro de 2000 (LIMA-E-SILVA, 2008). Os dados estão disponíveis na Sede da CNEN, Rio de Janeiro, RJ, no setor SESER/CODRE/CGRC/DRS.

## 4.2 AS USINAS NUCLEARES NO CONTEXTO DA DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

As usinas nucleares, em sua operação normal, liberam quantidades residuais de efluentes radioativos ao longo de sua vida útil. Entretanto, no caso de um acidente severo, a quantidade de material radioativo liberado na atmosfera pode se tornar significativa, causando sérias conseqüências ao ambiente e à população nas vizinhanças da usina.

Importante dizer que as eventuais liberações acidentais dependem muito do tipo de usina e do seu projeto específico, não devendo seus riscos serem julgados numa base genérica. O projeto do reator acidentado de Chernobyl, por exemplo, difere muito do projeto dos reatores de Angra dos Reis, sendo estes últimos, para citar apenas cinco diferenças notáveis, [i] refrigerados e moderados à água pressurizada, [ii] com estrutura de contenção, [iii] submetidos às normas de segurança internacionais e [iv] sofrendo inspeções periódicas da Agência Internacional (*International Atomic Energy Agency*<sup>1</sup>). A quinta diferença refere-se especificamente aos reatores da CNAEA. Os riscos dos reatores nucleares também são controlados via as constantes auditorias, regulamentações e autorizações específicas em seus processos de alocação, construção e operação em território nacional emanadas da Comissão Nacional de Energia Nuclear, que dispõe de um departamento inteiro dedicado a esta tarefa, com cerca de 50 especialistas com alto grau de qualificação.

Para que haja uma liberação acidental de material radioativo para a atmosfera em uma usina com reator do tipo PWR (*Pressurized Water Reactor*), como os de Angra, é preciso que três barreiras de segurança, mostradas na FIG 4.1, falhem. A primeira barreira é representada pelas varetas de combustível (elemento combustível) feitas de uma liga especial de zircônio, onde o urânio-235 e os produtos de fissão ficam contidos; a segunda, pelo vaso de pressão do reator feito de aço; e a terceira barreira, pela contenção, composta por uma cúpula de aço e um envoltório de concreto, o próprio edifício do reator (CARDOSO *et al.*, 2001). No caso de Angra 1, o envoltório externo tem 1,0 m de concreto de espessura e a cúpula interna 10 cm de aço (LIMA-E-SILVA, 2003).

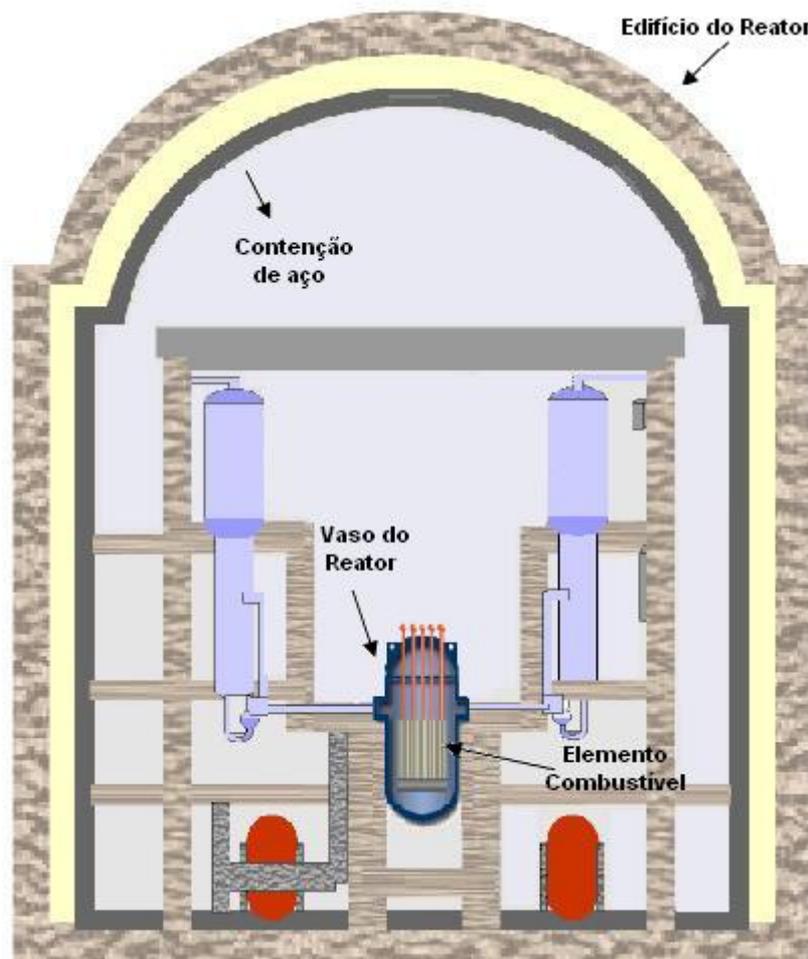
Essencialmente, em caso de acidente estima-se que os radionuclídeos liberados na atmosfera seriam: gases nobres (Xenônio-133 e Criptônio-85), gases ativados (Argônio-41, Carbono-14, Nitrogênio-16 e Enxofre-35), Trício (vapor e gás), halogênios e particulados (DIAS, 2006). No caso do acidente de Chernobyl, por exemplo, as nuvens radioativas

---

<sup>1</sup> <http://www.iaea.org/>

desprendidas pelo acidente eram compostas por elementos como o Césio-137, Estrôncio-90 e Iodo-131, com radioatividade equivalente a 200 vezes a das bombas de Hiroshima e Nagasaki combinadas (BIZZOTTO, 2006). Para se ter idéia da gravidade do acidente, até 2005 cerca de 5.000 casos de câncer de tiróide, (provocado pelo contato com o Iodo-131) foram registrados entre moradores da Belarus, Rússia e Ucrânia que tinham menos de 18 anos na época do desastre (BIZZOTTO, 2006).

O propósito de estudar a dispersão de material radioativo liberado na atmosfera pela usina nuclear é obter dados para análise de segurança, com o intuito de assegurar que, sob condições normais de operação, a dose radioativa recebida pelo público seja desprezível e no caso de um acidente minimizar suas conseqüências (GONÇALVES JUNIOR, 2006).



**FIG 4.1 Barreira de Segurança de um Reator Nuclear.**  
Adaptado de CARDOSO *et al.* (2001).

Quando um acidente industrial envolve material radioativo, o conhecimento dos níveis de dose (quantidade e qualidade da energia radioativa absorvida pelo corpo humano) é um passo importante para a avaliação dos riscos associados às exposições individuais ou coletivas. O cálculo da dose equivalente<sup>1</sup> recebida por um indivíduo do público, em especial, é de extrema importância para estimar o dano causado pela radiação no tecido ou órgão. O cálculo desta variável devido à inalação de matéria radioativa é feito pela EQ 4.1 (adaptada de PETERSON, 1998):

$$H_T = \chi.FCD.T_r.t \quad (4.1)$$

Onde:

$H_T$ = Dose equivalente (Sv);

$\chi$ =Concentração de um tipo de radionuclídeo em Becquerel por unidade de volume ( $Bq.m^{-3}$ ), considerando a atividade em 1 grama de um radionuclídeo específico;

FCD= fator de conversão de dose para o radionuclídeo  $i$  ( $Sv.Bq^{-1}$ );

$T_r$ = taxa de inalação ( $m^3.s^{-1}$ );

$t$ = tempo de exposição (s);

O fator de conversão de dose (FCD) é dependente do tipo de radionuclídeo inalado e do órgão do corpo humano no qual se pretende calcular a dose. Este fator é tabelado e pode ser encontrado no U.S.NRC *Regulatory Guide* 1.109 (U.S.NRC, 1977). A taxa de inalação depende da idade da pessoa exposta. Para um adulto, ela é igual a  $8.400 m^3$  por ano, de acordo com PETERSON (1998).

---

<sup>1</sup>A Dose Equivalente ( $H_T$ ) é uma medida da dose de radiação num tecido, usado na área de proteção radiológica. Esta grandeza tem maior significado biológico, pois permite relacionar os vários efeitos biológicos de vários tipos de radiação. A sua unidade no Sistema Internacional é Sievert (Sv) A unidade antiga desta grandeza é o REM que se relaciona com o Sv da seguinte forma: 1 Sv = 100 REM.

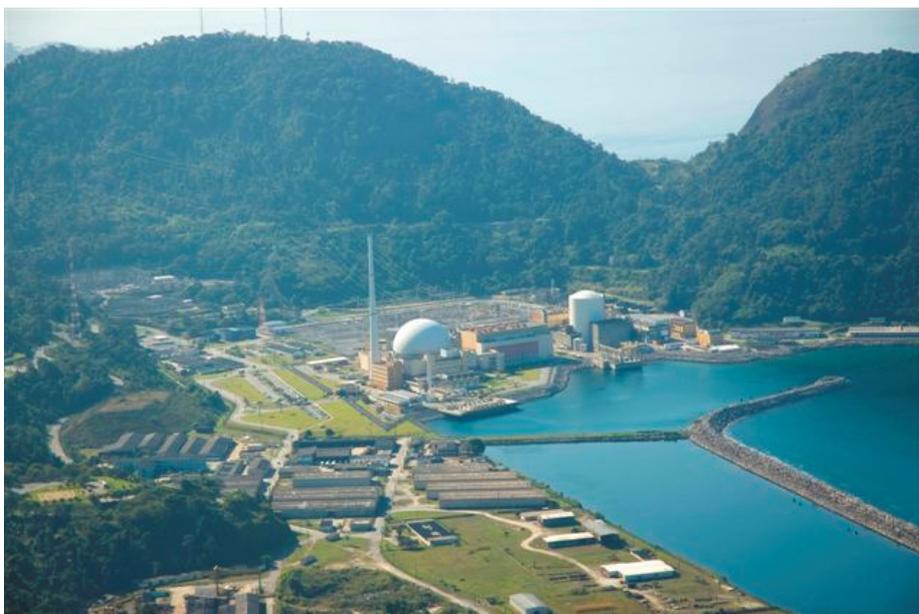
### 4.3 LOCALIZAÇÃO E TOPOGRAFIA

A CNAAA, com área aproximada de 1.250 hectares, está situada na praia de Itaorna, no município de Angra dos Reis (RJ) (FIG 4.2), entre a Serra do Mar e a Baía de Ilha Grande, a aproximadamente 133 km da cidade do Rio de Janeiro (RJ), 216 km da cidade de São Paulo (SP) e 343 km de Belo Horizonte (MG) (ROSA, 2006), com as coordenadas geográficas: 23° 01' S e 44° 27' W (DIAS, 2006).

O contorno da costa está orientado da direção NNO para SSE com a baía à sudoeste. O sítio é cercado por montanhas que variam de 300 a 700 metros de altura em três lados, e pelo mar no outro lado, além de possuir uma densa cobertura vegetal e complexos elementos urbanos, como visto na FIG 4.3.



**FIG 4.2** Localização de Angra dos Reis e da CNAAA (indicada pela seta vermelha) .  
Fonte: [www.governo.rj.gov.br](http://www.governo.rj.gov.br)



**FIG 4.3 Vista da CNAEA. Fonte: [www.eletronuclear.gov.br](http://www.eletronuclear.gov.br)**

#### 4.4 MONITORAÇÃO DA METEOROLOGIA DA CNAEA

A monitoração dos dados meteorológicos na CNAEA é feita principalmente por quatro torres (A, B, C e D) instaladas em locais estratégicos na CNAEA (ver FIG 4.4). Através das torres, são obtidas variáveis meteorológicas como direção (dir) e velocidade do vento ( $u$ ), temperatura do ar ( $T$ ), gradiente de temperatura ( $dT/dz$ ) e umidade relativa (UR). A identificação da localização das medidas obtidas através das torres é feita por uma letra representando a torre (A, B, C ou D) e um número, que representa a altura em que o instrumento está localizado (10, 15, 60 ou 100m).

A TAB 4.1 descreve as principais características das torres meteorológicas, como suas respectivas coordenadas geográficas, as altitudes da base da torre, níveis de medição e variáveis meteorológicas medidas.

Além dos instrumentos situados nas torres meteorológicas, a CNAEA conta ainda com um pluviômetro<sup>1</sup> localizado próximo à Torre A.

---

<sup>1</sup> Instrumento meteorológico usado para recolher e medir a quantidade de precipitação (líquido ou sólida) durante um determinado tempo.



**FIG 4.4** Localização das Torres Meteorológicas no CNAEA. Adaptado do *Google Earth* (2008).

**TAB 4.1** Características principais das torres meteorológicas da CNAEA.

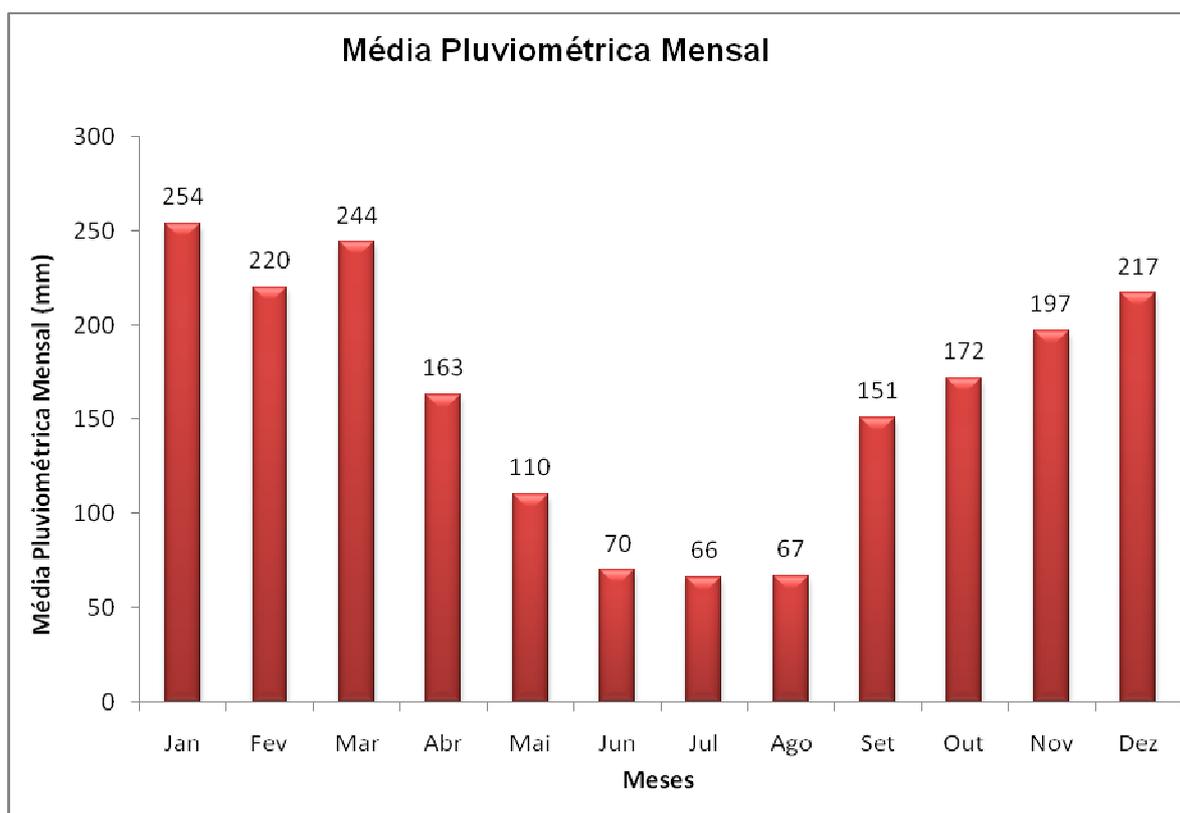
<i>Torre</i>	<i>Coordenadas Geográficas</i>	<i>Altitude da base da torre</i>	<i>Níveis de Medida</i>	<i>Variáveis Meteorológicas</i>
A	23°00'19''S 44°27'30''W	50m	10, 60 e 100m	dir(°), u(m/s), T <sub>10m</sub> (°C), dT/dz <sub>10-60m</sub> , dT/dz <sub>10-100m</sub> e UR (%)
B	23°01'00''S 44°27'33''W	10m	15m	dir(°) e u(m/s)
C	23°00'29''S 44°28'21''W	80m	15m	dir(°) e u(m/s)
D	23°00'16''S 44°26'56''W	290m	15m	dir(°) e u(m/s)

Obs.: Construída a partir dos dados de PENDERGRASS, *et al.* (1986) e OLIVEIRA JUNIOR (2008)

#### 4.5 METEOROLOGIA E CLIMATOLOGIA DA CNAAA

Em relação à climatologia do período de 1980-2004, a pressão atmosférica é de 1014,8 mb. A temperatura do ar varia entre 19,9 °C (média das temperaturas mínimas) a 37,0 °C (média das temperaturas máximas), sendo a máxima absoluta de 39,3 °C em 11/02/1966, e a mínima absoluta de 9,4 °C em 12/08/1988. A nebulosidade média varia de 6 a 8 décimos de céu encoberto, a umidade relativa do ar é de 82% (DIAS, 2006), enquanto o número médio de dias com chuva por ano é de 164 (SOARES, 2006). As médias pluviométricas mensais podem ser vistas na FIG 4.5.

Os sistemas meteorológicos dominantes na região de Angra dos Reis são: Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), frentes frias, Complexos Convectivos de Mesoescala, Linhas de Instabilidade, Vórtices Ciclônicos dos Altos Níveis, brisa marítima e terrestre, brisa de vale e montanha, chuvas orográficas e chuvas de verão (SOARES, 2006).



**FIG 4.5 Média pluviométrica mensal relativa ao período de 1980-2004.**  
Fonte: Adaptado de DIAS (2006, *apud* SOARES, 2006)

A meteorologia do sítio da CNAAA é considerada bastante peculiar em função da topografia complexa e do contraste oceano-continente, que influencia significativamente o regime de vento e a estabilidade atmosférica, causando modificações no comportamento da atmosfera local.

A meteorologia local é dominada pelo efeito da brisa terrestre e marítima. Durante o dia, a brisa marítima cria um fluxo em superfície (< 150m) de SE. À noite, a região é influenciada pelos fluxos de ar que descem ao longo das encostas das montanhas ao redor do sítio. Geralmente, particularmente no verão, a mudança da direção do fluxo de ar é abrupta, em relação ao tempo e duração, com a mudança de vento e em função da insolação. A transição do fluxo do mar (SO) para dentro do continente (N), por exemplo, ocorre em menos de 30 minutos (PENDERGRASS *et al.*, 1986).

Outro efeito que dificulta o estudo da meteorologia local é o efeito combinado da brisa marítima/terrestre com o vento catabático/anabático — originado pela presença dos maciços muito próximos da costa naquela localidade — que ocorre em determinadas horas do dia. Esses mecanismos podem agir em simetria e intensificarem a velocidade do vento ou pode ocorrer uma situação inversa, onde o efeito do acoplamento pode conduzir a uma desintensificação da velocidade do vento, quando atuarem em sentidos opostos como nos períodos de transição no início da manhã e final da tarde.

Através dos dados das torres, OLIVEIRA JUNIOR (2008) identificou a existência de duas classes predominantes: regime de calmaria e ventos de intensidade entre 1-3 m/s. A velocidade média do vento é menor que 2 m/s (ventos fracos) (BIAGIO, 1982).

De acordo com OLIVEIRA JUNIOR (2008), os valores indicados em cada torre meteorológica da CNAAA possuem certa discrepância. Quanto à velocidade do vento, a situação média de ventos muito fracos, com velocidade de 0 a 1m/s<sup>1</sup>, encontrada na CNAAA foi de 50% durante o período de 1982-2001, sendo que nas torres A60, A100 e B15, a frequência é maior comparada às demais torres, alcançando o nível de 60% dos casos. A Torre D detectou a menor frequência de ventos de 0 a 1,0 m/s com 45%. Estes percentuais de velocidades do vento podem ser vistos na FIG 4.6, assim como a frequência de outras classes de velocidade do vento.

As predominâncias de direção do vento (1991-2001) foram: nas torres A10 (N, NNE, SSW e SW) e B15 (N e S) – devido às forçantes térmicas responsáveis pela formação do

---

<sup>1</sup> OLIVEIRA JUNIOR (2008) considerou o intervalo de 0 a 1m/s como sendo eventos de calmaria. Nesta dissertação, é denominada “calmaria” quando o anemômetro não consegue detectar a velocidade do vento. Desta forma, o evento de calmaria depende exclusivamente da sensibilidade do instrumento de medida.

vento de encosta e brisas marítima-terrestre; nas torres A60 e A100 (W, SW, WSW, SSW, NE e ENE), C15 (N, E, SSE, S e NNW) e D15 (W, WSW e NE) – devido à forçantes térmicas associadas ao vento de encosta, brisas marítima-terrestre e a forçante dinâmica associada à canalização forçada pelo terreno (OLIVEIRA JUNIOR, 2008).

As classes de estabilidade de Pasquill (TAB 2.2) predominantes durante o período de 1992-2001 derivadas dos dados da Torre A foram D, E e F (FIG 4.7), indicando a ocorrência de um condicionamento estaticamente estável ou neutro, tanto no período diurno quanto no período noturno (OLIVEIRA JUNIOR, 2008).

#### 4.6 COMPARAÇÃO ENTRE A CLIMATOLOGIA E O COMPORTAMENTO ATMOSFÉRICO EM FEVEREIRO DE 1987 NA CNAAA

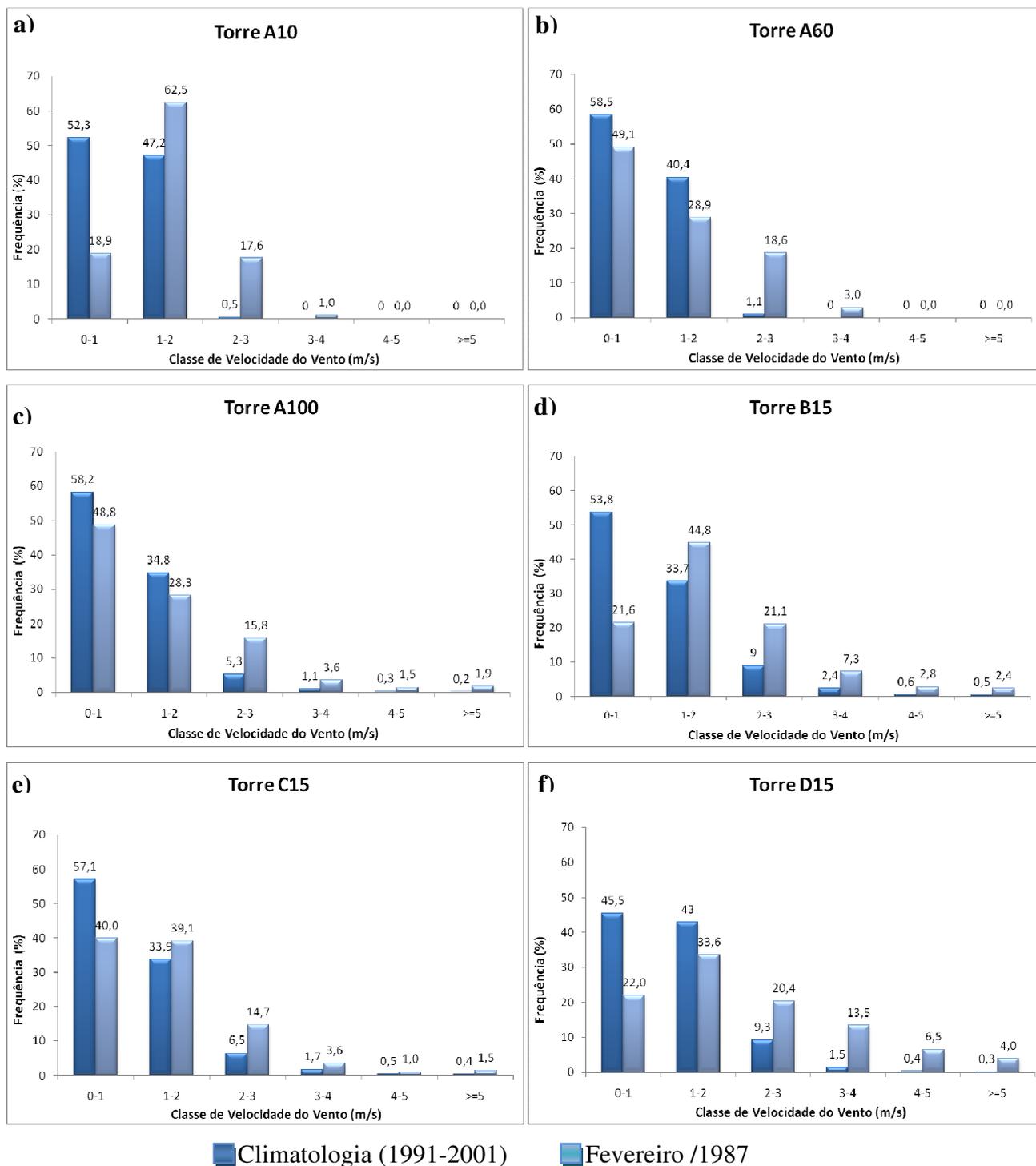
Com o propósito de aumentar a confiabilidade da utilização dos coeficientes de dispersão atmosféricos estimados a partir de fotografias de plumas de fumaça tomadas durante o experimento de 1987 na CNAAA, fez-se uma comparação da climatologia da região (1982-2001) com o comportamento atmosférico médio do mês de fevereiro de 1987. Mostrando que a atmosfera durante o período de estudo teve um comportamento relativamente aproximado com a climatologia local, pode-se aplicar os resultados obtidos para outras épocas. Como a climatologia disponível envolve todos os meses do ano no período de 1982-2001, dificilmente seus dados irão coincidir com os valores encontrados do mês de fevereiro de 1987. Assim, o objetivo desta comparação é observar se as classes (intervalos) predominantes de uma determinada variável são as mesmas apresentadas pela climatologia.

A partir dos dados climatológicos e do mês de fevereiro de 1987 de velocidade do vento e classe de estabilidade de Pasquill foram construídos gráficos comparativos, representados pelas FIG 4.6 e 4.7. A FIG 4.5 ilustra a distribuição de frequência relativa da velocidade do vento detectada em cada torre meteorológica. Para a Torre A, são apresentados três gráficos, um para cada nível de medida (10, 60 e 100m). Observa-se, de uma maneira geral, que a frequência de ocorrência de cada classe de velocidade do vento (0-1m/s, 1-2m/s, 2-3m/s, 3-4m/s, 4-5m/s e  $\geq 5$ m/s) apresentou um comportamento aproximado nas duas séries de dados, destacando as classes “0-1m/s” e “1-2m/s” como predominantes.

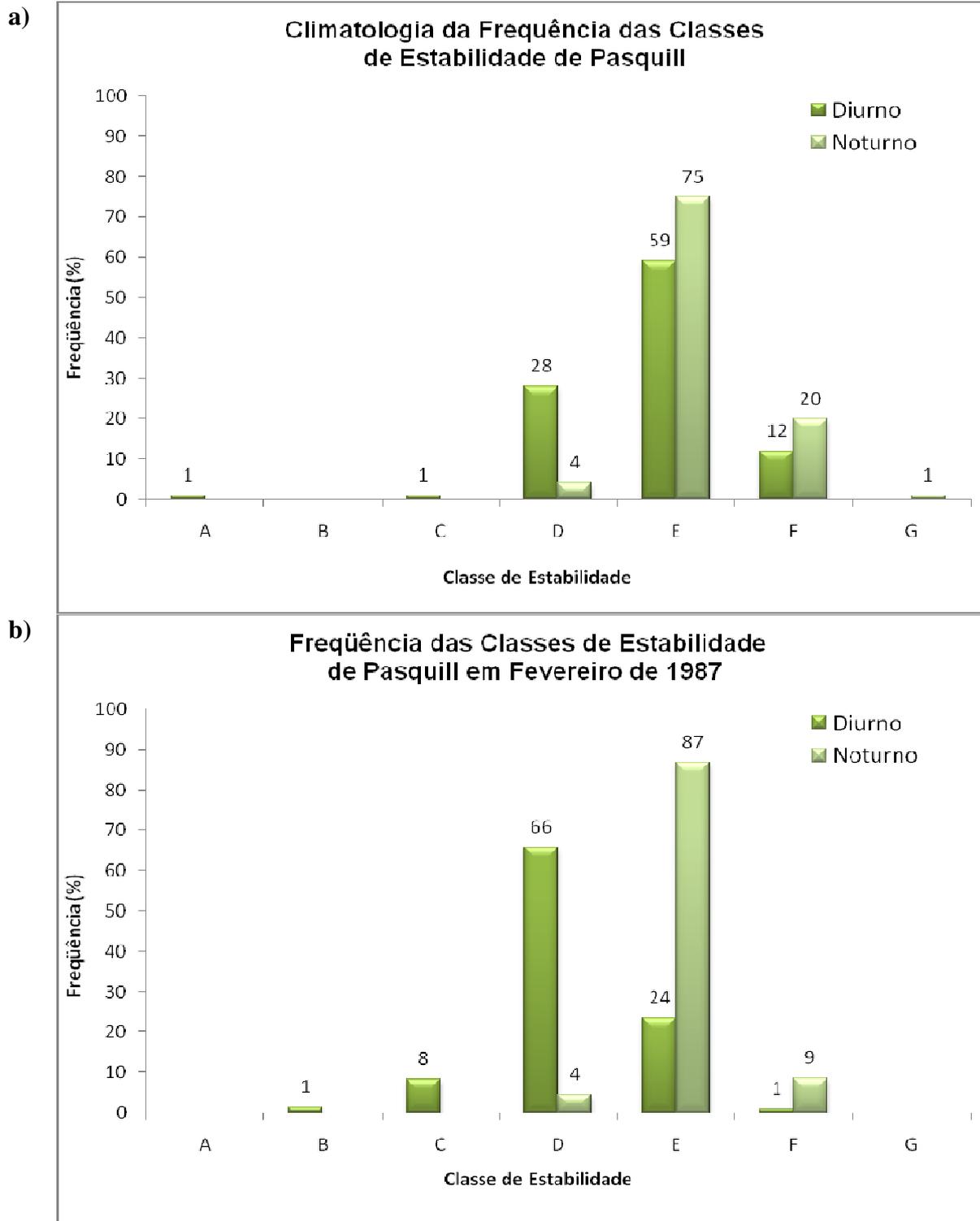
Para as classes de estabilidade de Pasquill, as séries foram divididas em dois períodos:

diurno (7 às 18 horas) e noturno (19 às 6 horas), de acordo com a climatologia disponível. As classes de estabilidade predominantes naquele mês de fevereiro foram D, E e F, tal como na climatologia. Entretanto, a classe C também se destacou, com uma frequência de 8% no período diurno. Este valor, assim como a frequência de 66% da classe D e a menor ocorrência da classe E para o mesmo período do dia pode estar associados ao fato do mês de fevereiro ser verão, época em que a atmosfera tem uma tendência de se apresentar mais estaticamente instável do que nas demais estações do ano, devido à maior incidência de radiação solar.

Desta forma, os dados obtidos no experimento de 1987 podem ser utilizados para posterior determinação dos coeficientes de dispersão atmosférica no sítio da CNAAA, Angra dos Reis.



**FIG 4.6** Comparação entre a frequência da velocidade do vento da climatologia e a de fevereiro de 1987 para as torres A 10 (A); A60 (B); A100 (C); B15(d); C15(e) e D15(f). Dados obtidos de OLIVEIRA JUNIOR (2008) e ELETRONUCLEAR (2008).



**FIG 4.7** Frequência climatológica (1980-2006) (a) e de fevereiro de 1987 (b) das classes de estabilidade de Pasquill para o período diurno (7 às 18 horas) e noturno (19 às 6 horas). Dados: OLIVEIRA JUNIOR (2008) e ELETRONUCLEAR (2008).

#### 4.7 APLICAÇÃO DA TÉCNICA NA OBTENÇÃO DOS COEFICIENTES DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA DO SÍTIO DA CNAAA

A validação da técnica apresentada no Capítulo 3 foi feita utilizando as fotografias do experimento de 1987 no sítio da CNAAA, como já mencionado. Os valores das distâncias envolvidos na determinação dos coeficientes de dispersão foram obtidos através do programa *Google Earth*, no qual, para o sítio da CNAAA, apresenta uma imagem de alta qualidade com resolução de 1,0 m. A técnica envolve as equações geométricas (Seção 3.2.1) e determinação do espalhamento da pluma de GIFFORD (1961, *apud* ARYA, 1999) (Seção 3.2.2).

De aproximadamente 2.600 fotografias, apenas 261 foram analisadas, considerando-se que esta dissertação objetiva o desenvolvimento da técnica procedimental, e não a derivação propriamente dita dos sigmas locais. As imagens foram selecionadas obedecendo aos seguintes critérios, de forma que as fotografias deveriam:

- ter hora exata da tomada de cada imagem — o que excluiu cerca de 1.470 fotografias;
- ter nitidez suficiente de forma que o contorno da pluma de fumaça seja visualizado com facilidade;
- apresentar as plumas de fumaça totalmente formadas — excluindo imagens tomadas antes e, nos primeiros momentos, após a detonação da bomba de fumaça, quando a pluma ainda não alcançou sua altura efetiva;
- apresentar plumas de fumaça que não tenham se separado de sua fonte (local da detonação), considerando que a emissão de fumaça provocada pela detonação da bomba não é contínua;
- apresentar plumas que não tenham tido variações em seu comportamento, causadas por mudanças bruscas na direção e velocidade do vento;

Evidentemente, quanto maior o número de imagens analisadas, maior a representatividade estatística dos resultados obtidos, porém, o tempo de análise cresce correspondentemente e, assim, o tamanho da amostra foi restringido para não prejudicar o propósito da pesquisa.

Na série selecionada, pôde-se apenas estimar os coeficientes de dispersão para a classe de estabilidade de Pasquill C, D e E, pois não houve fotografias tomadas nos períodos de ocorrência das demais classes. As fotografias laterais foram tomadas durante as classes C, D e

E, enquanto as aéreas, apenas durante a classe E.

As posições do fotógrafo e os locais de detonação das bombas de fumaça das fotografias selecionadas são visualizados na FIG 4.8.



**FIG 4.8 Localização da posição do fotógrafo e detonação das bombas de fumaça na CNAAA. Adaptado do Google Earth, 2008.**

No Apêndice 3, os horários das tomadas das fotografias selecionadas são apresentados, incluindo, posição do fotógrafo, número do local da detonação (fonte) e direção do vento e classe de estabilidade no instante da tomada da fotografia.

Após a aplicação da técnica citada acima para estimar os coeficientes de dispersão, foram calculadas as médias aritméticas de  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  para cada classe de estabilidade. Um exemplo numérico da determinação dos coeficientes de dispersão da CNAAA é encontrado no Apêndice 4, como já mencionado no Capítulo 3.

#### 4.7.1 ESTIMATIVA DE $\sigma_Y$

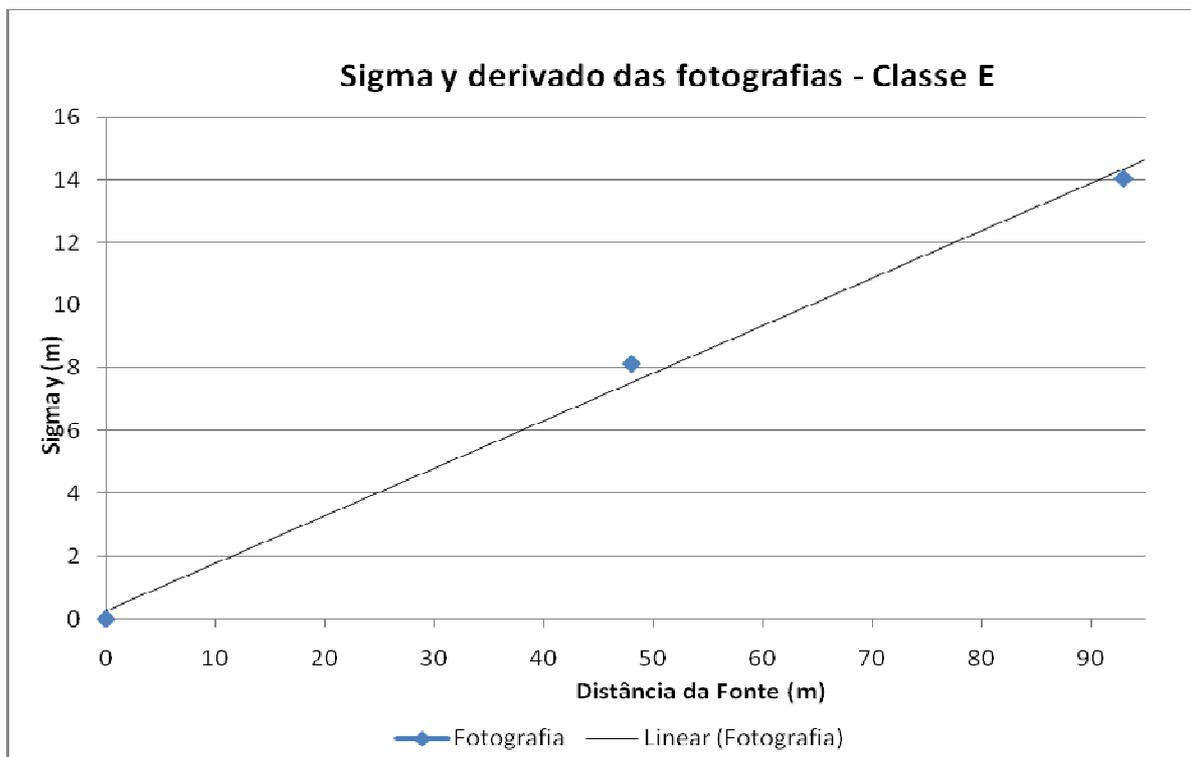
Dentre, aproximadamente, 550 fotografias aéreas tomadas durante o experimento de 1987, apenas 8 fotografias obedeciam os critérios de seleção mencionados anteriormente. A maior parte das fotografias aéreas descartadas não continha registros do horário exato de sua tomada, impedindo a relação das fotografias com seus respectivos dados meteorológicos. Todas as 8 fotografias analisadas foram tomadas durante a classe de estabilidade E. Os coeficientes de dispersão atmosférica horizontal foram determinados para duas distâncias da fonte, 48 e 93 m, além de a largura da pluma na fonte ser assumida igual a zero. Para cada distância da fonte foi feita uma média aritmética das oito medidas, mostrada na FIG 4.9. A melhor reta foi traçada usando-se regressão linear. Observa-se que a largura aumenta com a distância da fonte devido à difusão horizontal do poluente, no caso, a fumaça proveniente da detonação da bomba, como esperado. O valor de  $\sigma_y$ , por exemplo, aumentou aproximadamente 8 metros em 50 metros desde o local da fonte. É importante lembrar que o  $\sigma_y$  representa a metade da largura da pluma a partir da sua linha central, desta forma, a largura total nesta distância da fonte foi de aproximadamente 16 metros.

Os coeficientes de dispersão adotados pela CNEN e Eletronuclear, voltados para a modelagem da qualidade do ar ao redor da CNAAA, são derivados do Sistema de Pasquill-Gifford (Seção 2.2.1.3.1) e dos dados do experimento realizado em St. Louis, assim como o Sistema Urbano de Briggs (Seção 2.2.1.3.2), respectivamente. Desta forma, realizou-se uma análise comparativa entre os coeficientes derivados das fotografias de plumas de fumaça através da técnica apresentada e os coeficientes obtidos através dos sistemas citados acima. Esta etapa é importante para validar a ordem de grandeza dos resultados obtidos pela técnica de registro fotográfico.

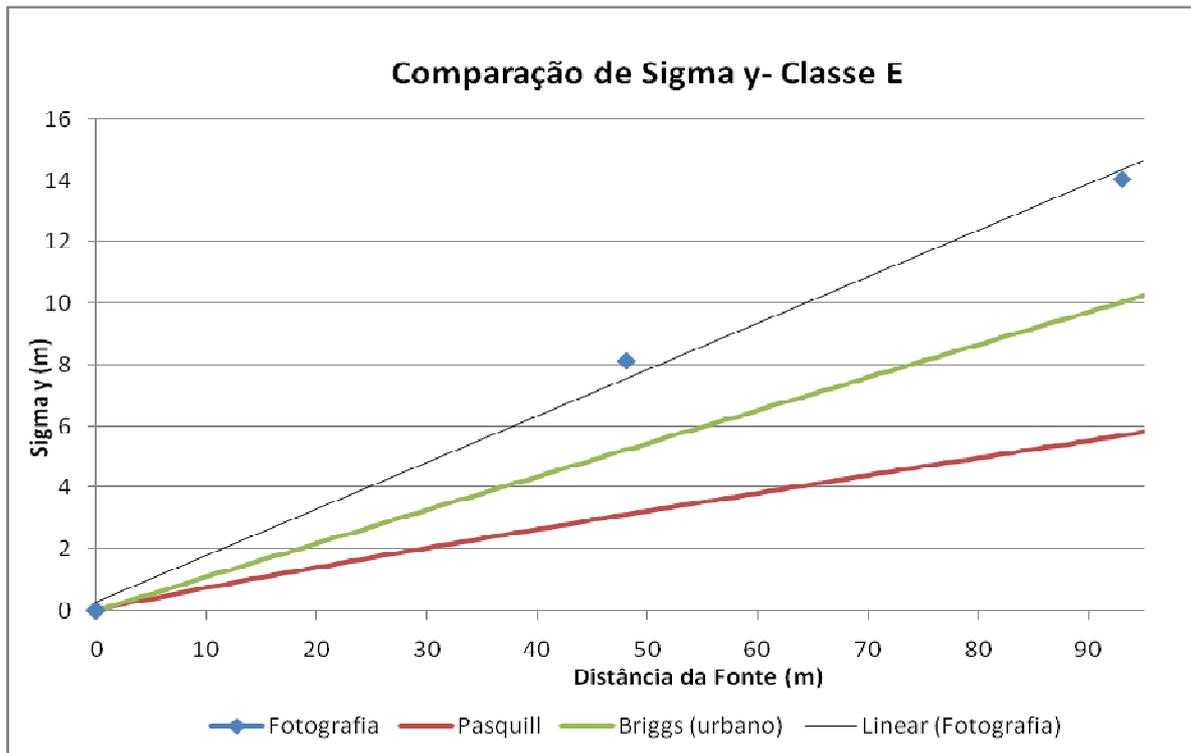
Na FIG 4.10, é visto que o coeficiente  $\sigma_y$  obtido das fotografias apresentou valores superiores aos demais, o que não é esperado, se levarmos em consideração apenas a rugosidade intermediária do sítio da CNAAA quando comparado às rugosidades dos terrenos que originaram os sistemas de Pasquill-Gifford (terreno plano) e de Briggs (urbano). Além disso, como dito anteriormente, estes experimentos envolveram liberações próximas ao solo, o que nos leva a conjecturar sobre a inexatidão dos valores encontrados. Caso suas liberações fossem realizadas a uma maior altura da superfície, os valores encontrados através das fotografias estariam coerentes, pois a dimensão de suas plumas seria menor por não haver

elementos urbanos que intensifiquem a turbulência mecânica.

Entretanto, vale lembrar que o coeficiente calculado envolveu apenas oito fotografias de pluma de fumaça, o que é estatisticamente pouco representativo, e essas deduções devem ser encaradas apenas como conjecturas, não conclusões científicas, enquanto sob o ponto de vista dos valores dos sigmas encontrados. Considerando-se que o objetivo principal não foi derivar os sigmas e sim mostrar a viabilidade da metodologia, os resultados mostram-se consistentes e de fácil explicação.



**FIG 4.9 Estimativa do coeficiente de dispersão horizontal através de fotografias de plumas de fumaça para a Classe E**



**FIG 4.10 Comparação entre o coeficiente de dispersão horizontal derivado das fotografias de plumas de fumaça e dos sistemas de Pasquill-Gifford e de Briggs (urbano) – Classe de Estabilidade E**

#### 4.7.2 ESTIMATIVA DE $\sigma_z$

A derivação do coeficiente de dispersão vertical contou com 253 fotografias das cerca de 2.000 fotografias laterais obtidas no experimento de 1987. Assim como no caso da estimativa de  $\sigma_y$  (seção 4.7.1), a maior parte das fotografias foi descartada por não conter a hora exata da tomada da imagem. Nos horários das tomadas das 253 fotografias utilizadas houve a ocorrência das classes de estabilidade de Pasquill C, D e E. Em cada fotografia, foi calculado o coeficiente de dispersão vertical em duas distâncias da fonte, assim como no cálculo do coeficiente horizontal na seção 4.7.1.

O número de fotografias envolvido no cálculo do coeficiente de dispersão vertical para cada classe de estabilidade, assim como as distâncias da fonte onde a altura da pluma foi medida e, posteriormente, transformada em coeficiente, é apresentado na TAB 4.2. Nas classes de estabilidade D e E, os  $\sigma_z$  foram estimados em mais de duas distâncias da fonte. Isso

é explicado pelo fato das fotografias terem sido tiradas em mais de uma posição no sítio e, portanto, com diferentes elementos de fácil visualização na imagem utilizados para simplificar a localização de um mesmo ponto da pluma (seção 3.2.1).

**TAB 4.2 Características relevantes na determinação de  $\sigma_z$**

<i>Classe de Estabilidade de Pasquill</i>	<i>Número de fotografias utilizadas no cálculo de <math>\sigma_z</math></i>	<i>Distância da fonte (m) para onde os <math>\sigma_z</math> foram calculados</i>
C	23	56 e 135
D	163	56, 100, 116, 135, 219 e 247
E	67	38, 100, 163, 230, 247 e 425

Como a maior parte das fotografias foi tirada no período diurno, o grande número de imagens obtidas durante a classe D é justificado com base na FIG 4.7b, que mostra uma alta ocorrência desta classe durante o mês de fevereiro de 1987.

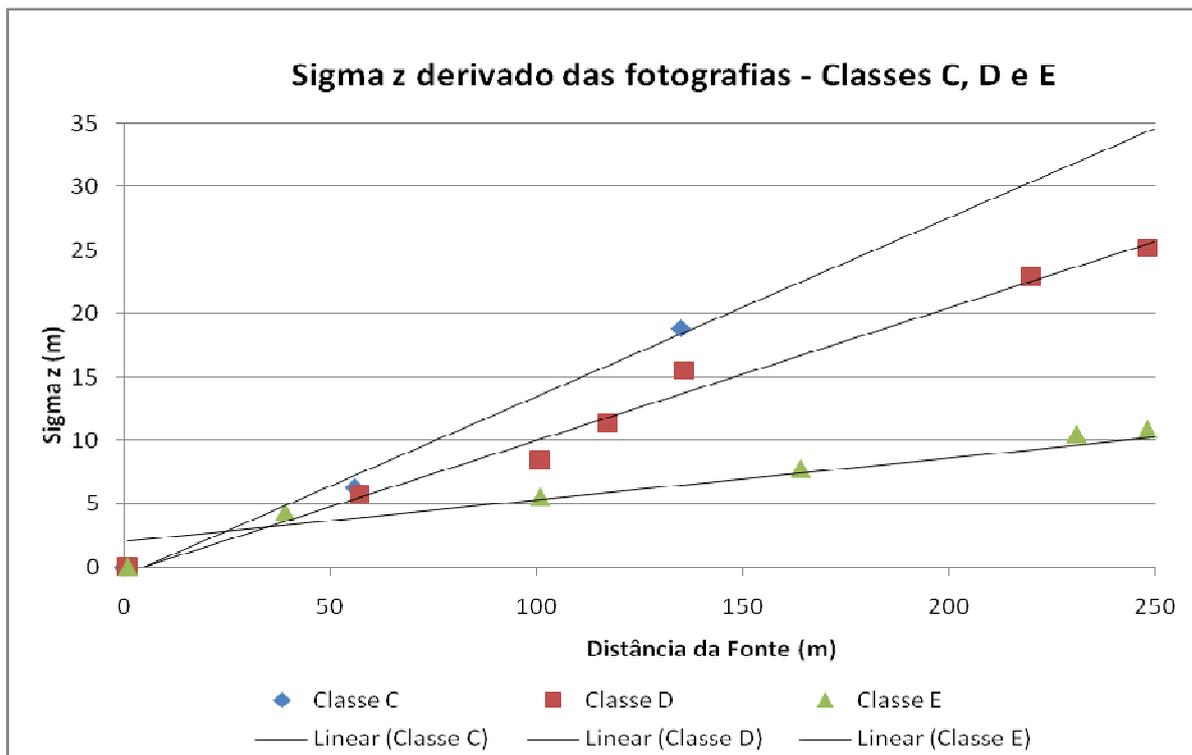
Encontram-se na FIG 4.11 as curvas derivadas das fotografias das plumas de fumaça para as três classes de estabilidade em questão. Na mesma figura, é observado que o comportamento das retas é pertinente com a difusão referente a cada classe de estabilidade. A classe D, por exemplo, se encontra localizada no gráfico entre as duas outras classes, como esperado. Nos primeiros 50 m, os coeficientes de dispersão vertical das três classes de estabilidade se comportaram praticamente da mesma forma. A partir desta distância, as retas começam a se afastar umas das outras, principalmente a classe E, que apresenta baixos coeficientes à medida que se distancia da fonte.

Assim como na estimativa do coeficiente de dispersão horizontal, foi feita uma análise comparativa entre os coeficientes de dispersão vertical derivados das fotografias, do Sistema de Pasquill-Gifford e do Sistema Urbano de Briggs, vista na FIG 4.12.

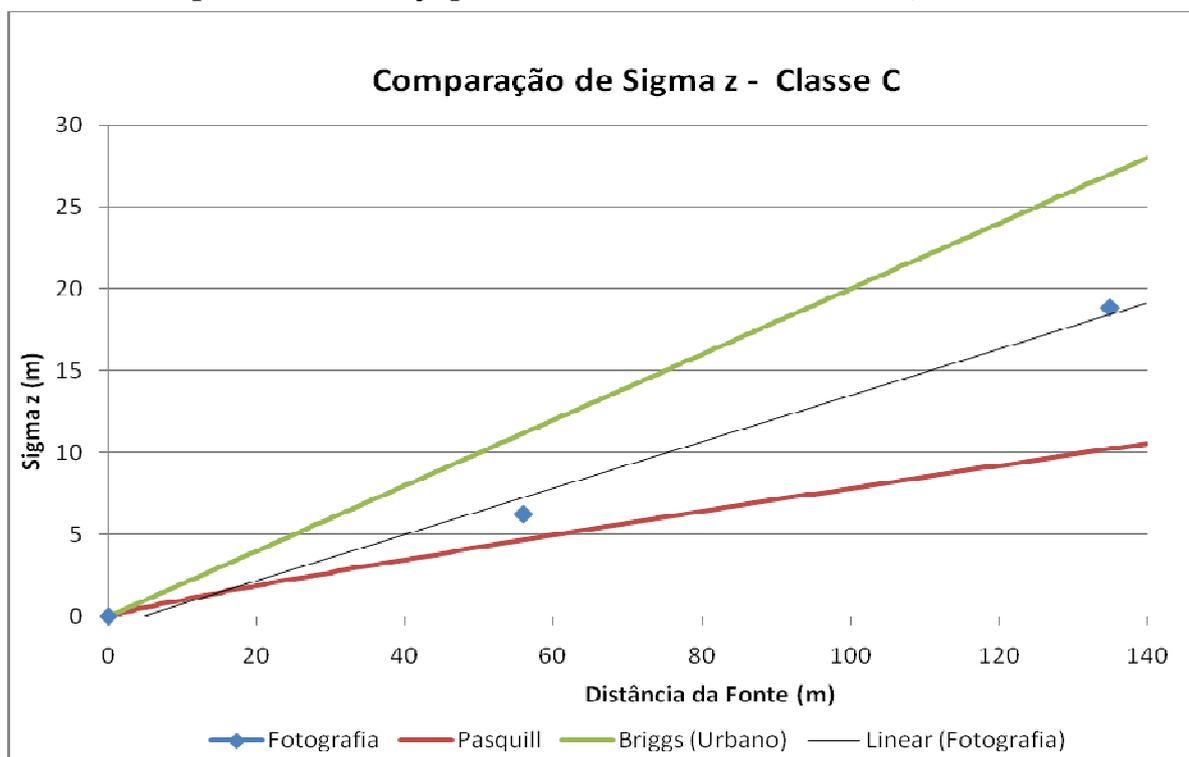
Considerando a rugosidade média do sítio da CNAAA, que apresenta poucos elementos urbanos em comparação com o sítio de St. Louis, Johntown e Ft. Wayne, nos quais Briggs se baseou (Seção 2.2.1.3.2), a reta que representa os coeficientes obtidos através das fotografias ficou localizada em uma posição coerente, entre os sistemas de Pasquill e de Briggs (urbano), como visto nas FIG 4.12 (classe C), 4.13 (classe D) e 4.14 (classe E).

Na classe C (FIG 4.12), os coeficientes de dispersão vertical das fotografias ficaram quase exatamente entre os valores do Sistema de Pasquill-Gifford e Briggs (urbano).

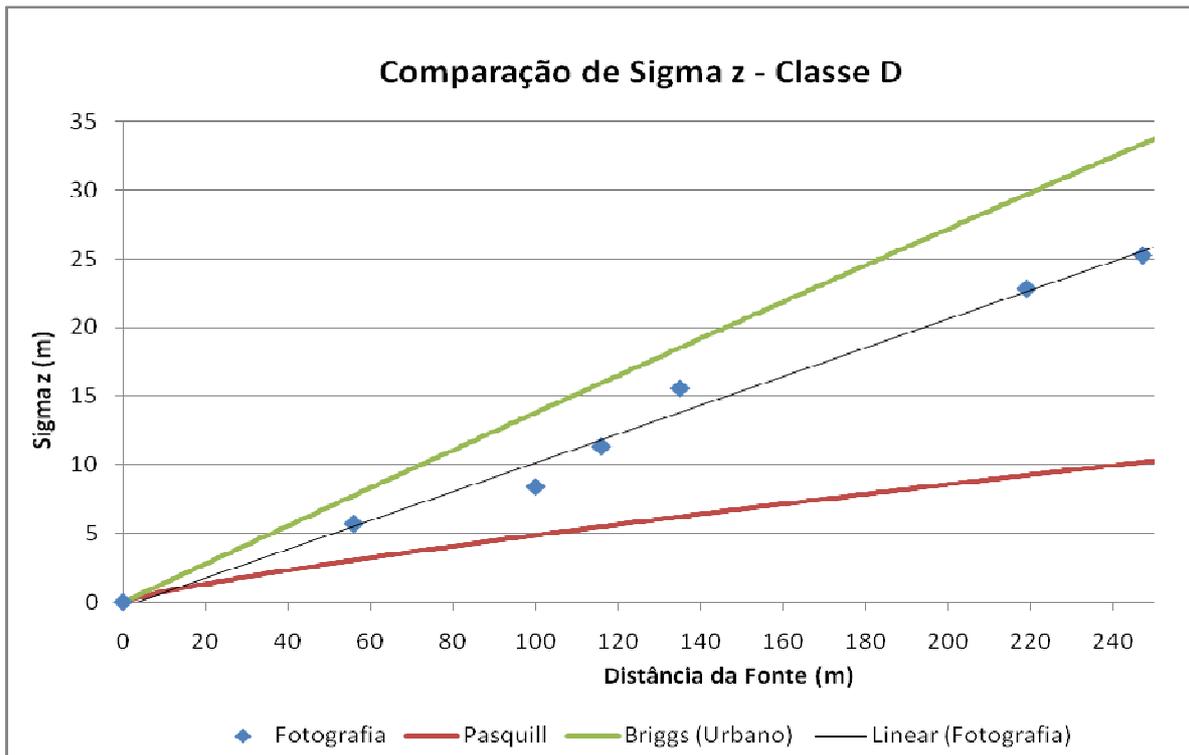
Na classe D, entretanto, os valores calculados a partir dos dados do experimento de 1987 se aproximaram mais dos coeficientes de Briggs, enquanto, na classe E, estes valores se aproximaram mais dos de Pasquill. Esta relação pode estar associada à geração de turbulência no sítio da CNAAA, de forma que, com uma menor turbulência (classe E), o coeficiente local se comporta de forma mais próxima com os coeficientes derivados de experimentos realizados em terrenos planos. Ao passo que, quando a turbulência aumenta (classe D), os elementos urbanos presentes na CNAAA tendem a gerar fluxos de ar irregulares, vórtices e redemoinhos que favorecem a dispersão, apresentando maiores valores de  $\sigma_z$  e, conseqüentemente, colaborando com uma maior mistura de poluentes na atmosfera.



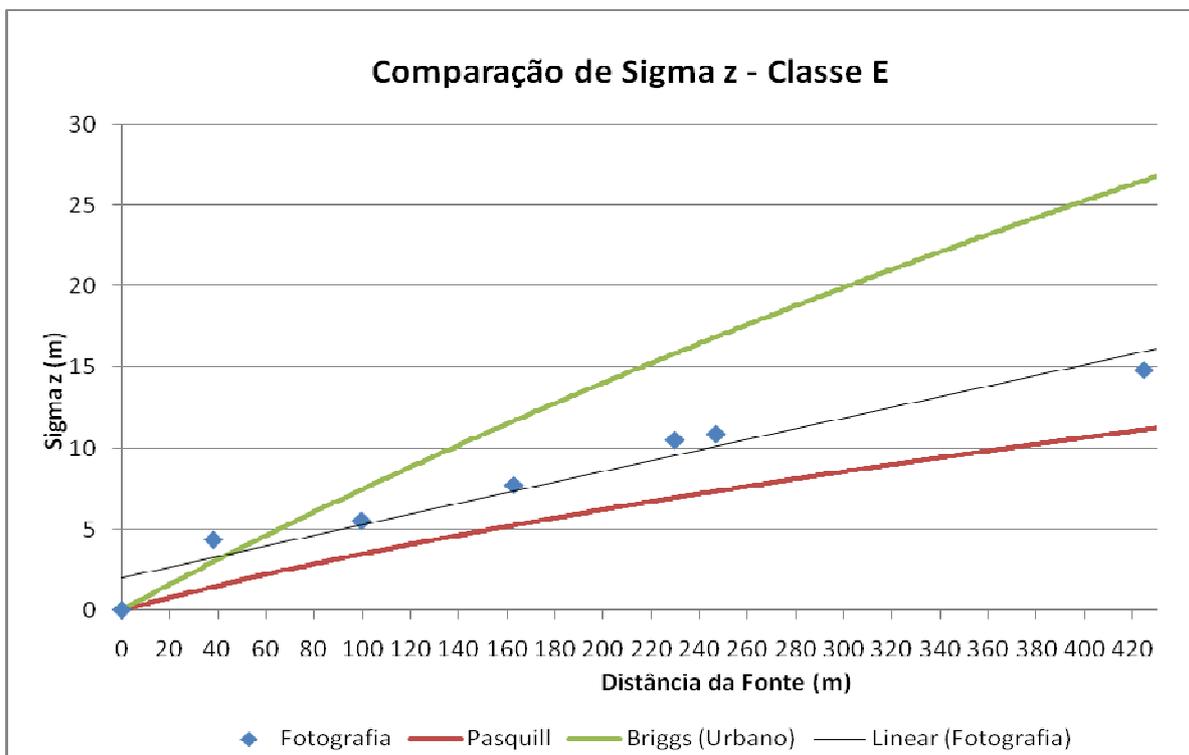
**FIG 4.11** Estimativa do coeficiente de dispersão vertical através de fotografias de plumas de fumaça para as Classes de Estabilidade C, D e E.



**FIG 4.12** Comparação entre o coeficiente de dispersão vertical derivado das fotografias de plumas de fumaça e dos sistemas de Pasquill-Gifford e de Briggs (urbano) - Classe de Estabilidade C.



**FIG 4.13** Comparação entre o coeficiente de dispersão vertical derivado das fotografias de plumas de fumaça e dos sistemas de Pasquill-Gifford e de Briggs (urbano) - Classe de Estabilidade D.



**FIG 4.14** Comparação entre o coeficiente de dispersão vertical derivado das fotografias de plumas de fumaça e dos sistemas de Pasquill-Gifford e de Briggs (urbano) - Classe de Estabilidade E.

#### 4.7.3 CONSEQÜÊNCIAS POTENCIAIS DO USO DE SIGMAS ALÓCTONES

Com o objetivo de comparar as conseqüências potenciais de um acidente hipotético no sítio da CNAAA em relação ao método de determinação dos coeficientes de dispersão atmosférica, o termo  $\chi/Q$  foi calculado (ver EQ 2.12) para a classe de estabilidade E utilizando os seguintes sistemas: Pasquill-Gifford, Briggs (urbano) e a técnica envolvendo o uso fotografias. Consideraram-se como dados de entrada:  $y=10\text{m}$ ,  $z=10\text{m}$ ,  $u=1\text{m/s}$ ,  $H=2\text{m}$  e,  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  em  $x=1000\text{m}$ . O valor encontrado de  $\chi/Q$  obtido através da técnica fotográfica foi 4,75 e 1,10 vezes menor do que aplicando os sistemas de Pasquill-Gifford e de Briggs (urbano), respectivamente. O quociente entre os valores de  $\chi/Q$  obtidos através do Sistema de Pasquill-Gifford e do Sistema de Briggs (urbano) foi de, aproximadamente, 4,31.

A aproximação entre os valores de  $\chi/Q$  encontrados através da técnica das fotografias e do Sistema de Briggs (urbano) se deve ao fato do  $\sigma_y$  do primeiro assumir um valor superior aos demais (ver FIG 4.10), de forma que este “compense” o  $\sigma_z$  posicionado entre as “curvas” de Pasquill-Gifford e de Briggs (urbano), considerado o intervalo mais satisfatório (ver FIG 4.14) para o terreno em questão.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho, teve-se por objetivo apresentar uma técnica procedimental para estimar os coeficientes de dispersão horizontal e vertical,  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ , locais a partir de registros fotográficos. Estas variáveis possuem uma importância singular por representarem os termos da difusão atmosférica na equação do modelo gaussiano, pela qual a concentração de poluente é calculada.

A técnica foi dividida em três etapas. A primeira etapa consiste em obter as dimensões reais dos elementos contidos nas imagens fotográficas, como largura e altura de um prédio, por exemplo. Estes valores, além das medidas diretas na fotografia, são utilizados na segunda etapa, que determina o espalhamento da pluma na fotografia. Esta fase envolve equações geométricas simples aplicadas na determinação das dimensões da pluma de fumaça, no caso em que não haja necessidade de alta precisão.

A terceira e última etapa determina os coeficientes de dispersão, que pode ser feita de duas formas. Quando é feita uma sobreposição das imagens, deixando a câmera “aberta”, obtém-se um comportamento da pluma de fumaça integrado no tempo, de forma que o formato da mesma se assemelhe com o de uma “pluma” perfeita. Neste caso, aplica-se a técnica apresentada por GIFFORD (1957), fortemente dependente da forma da pluma. Esta equação foi utilizada por NAPPO (1984) e NAPPO (2008).

Entretanto, quando as fotografias são instantâneas e não assumem a forma perfeita de “pluma”, faz-se uso da equação desenvolvida por GIFFORD (1961, *apud* ARYA, 1999), que assume que a concentração nas extremidades da pluma equivale a 10% da concentração no centro da pluma, considerada máxima. Esta equação foi utilizada para determinar os coeficientes de Pasquill-Gifford, universalmente utilizados.

A validação da técnica foi feita através dos dados do experimento realizado no sítio da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA), Angra dos Reis, RJ, em 1987 por NOAA/FURNAS, cedidos pela CNEN. Os sítios de centrais nucleares exigem uma atenção especial no estudo da dispersão atmosférica, devido ao fato de seus efluentes conterem material radioativo que, em altas concentrações, podem se tornar nocivos à população e ao ambiente.

O banco de dados fotográficos cedido continha cerca de 2.500 fotografias de pluma de

fumaça, das quais 261 foram selecionadas para serem analisadas neste trabalho, obedecendo aos critérios descritos. Além de fotografias, também foram utilizados dados meteorológicos, principalmente para classificar a estabilidade atmosférica no momento da tomada de cada fotografia, de acordo com o sistema de classe de estabilidade de Pasquill. Este trabalho é o primeiro a utilizar dados locais na busca de estimativas de  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ . Os estudos conhecidos que tratam de coeficientes de dispersão atmosférica do modelo gaussiano para o sítio da CNAAA utilizam valores originários de outros terrenos, como o Sistema de Pasquill-Gifford e Jülich.

Como o sítio da CNAAA possui uma rugosidade (variável escolhida neste trabalho para diferenciar terrenos) intermediária, a validação da técnica proposta foi feita comparando os valores de  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  calculados a partir das fotografias com os valores de  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  obtidos por dois sistemas desenvolvidos para terrenos planos, representado pelo Sistema de Pasquill-Gifford, e para terrenos urbanos, Sistema Urbano de Briggs. Se a amostra para a estimativa dos sigmas fosse estatisticamente suficiente, o esperado era que os coeficientes de dispersão obtidos através das fotografias ficassem entre os coeficientes dos dois outros sistemas.

Assumindo-se, apenas para mostrar como o raciocínio sobre os resultados da aplicação da técnica em sua total extensão poderia ser consequente, que a pequena amostra usada seria válida, no caso de  $\sigma_y$ , os valores calculados não seriam esperados, pois são superiores aos encontrados no sistemas de Briggs (urbano). Seu resultado poderia ser explicado pelo pequeno número de fotografias, apenas 8 imagens, selecionadas de acordo com os critérios mencionados na Seção 4.7, o que diminui sua confiabilidade. Essa conclusão é corroborada pelos outros resultados encontrados neste mesmo trabalho em relação a  $\sigma_z$ .

Importante chamar atenção, contudo, de que uma situação diferente pode estar ocorrendo: a possibilidade de que o resultado esteja correto, e que as diversas outras variáveis não comparadas entre os três sistemas de fato conduzam a curva de  $\sigma_y$  para as relações encontradas.

Ao contrário de  $\sigma_y$ , os valores de  $\sigma_z$  se situaram quase que exatamente entre os valores apresentados pelos sistemas de Pasquill-Gifford e Briggs, nas três classes de estabilidade presentes durante a tomada das fotografias selecionadas, também obedecendo aos critérios utilizados na estimativa de  $\sigma_y$ . Por conter um número significativamente maior de fotografias, um total de 261 imagens, o cálculo de  $\sigma_z$  se torna mais confiável. Dessa forma, os valores de  $\sigma_z$  situaram-se exatamente na região do gráfico esperada.

Apesar de  $\sigma_y$  não ter apresentado os valores esperados considerando-se apenas a

rugosidade do terreno, a técnica apresentada foi considerada válida para determinar os coeficientes de dispersão atmosférica utilizando um número relativamente grande de amostras (fotografias), mesmo embutindo as incertezas envolvidas durante a análise das plumas de fumaça nas imagens fotográficas. Estatisticamente, sabemos que estas incertezas diminuem quanto maior o número de amostras envolvidas no cálculo da média aritmética de  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ . As equações de GIFFORD (1961, *apud* ARYA, 1999) utilizadas para calcular  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  também embute incertezas por considerar que a concentração ao longo do contorno da pluma equivale a 10% da concentração em seu centro. Entretanto, estas equações são aceitas mundialmente e apresentadas em diversas referências bibliográficas, como GIFFORD (1961, *apud* ARYA, 1999), ARYA (1999), BIAGIO (1982), entre outros, inclusive pelos documentos que citam o Sistema de Pasquill-Gifford já que este faz uso da mesma aproximação e, conseqüentemente, das mesmas equações utilizadas em seu desenvolvimento.

Para obter maior precisão na estimativa de  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ , recomenda-se a utilização de equipamentos e/ou *software* que ofereçam maior confiabilidade nas medidas da dimensão da pluma de fumaça.

Como mencionado, o sítio da CNAAA possui um terreno bastante complexo incluindo, por exemplo, superfícies aquáticas, elementos urbanos e áreas de florestas, o que torna seu terreno de extrema heterogeneidade. Neste trabalho, os  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ , a partir de uma pequena amostra de fotografias, foram calculados para o terreno de uma forma geral, ignorando-se para qual setor do terreno o vento levava a pluma, o que não é cientificamente correto, porque sendo a rugosidade do terreno e a qualidade térmica da superfície significativamente diferenciadas por direção, espera-se que a dispersão atmosférica seja igualmente diferenciada. Assim, recomenda-se também que os coeficientes de dispersão atmosférica sejam calculados para cada direção ou conjunto de direções diferenciada a partir do ponto de emissão, caso o sítio apresente essa diferenciação, como o da CNAAA, aumentando-se a precisão e exatidão da avaliação dos impactos ambientais na área de influência da instalação em pauta.

Segundo Einstein, “*A percepção dos sentidos humanos só fornece informação do mundo externo, ou “realidade física”, indiretamente; assim, somos capazes apenas de estimar esta última por meios especulativos. Segue-se daí que nossas noções da realidade física não poderão nunca ser definitivas*” (EINSTEIN, 1988). Os experimentos com bombas de fumaça são muito úteis porque trazem diretamente para nossa visão o campo de vento, que de outra forma somente pode ser inferido a partir de umas poucas medidas do vento. Considerando-se isso, pode-se dizer que estes experimentos são uma forma relativamente barata e tecnicamente

viável de se obter informação importante sobre a micrometeorologia de um lugar, e assim permitir que as instalações industriais com liberações atmosféricas rotineiras ou potenciais realizem suas atividades de forma mais segura e socialmente aceitável.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARYA, S. Pal, **Air Pollution, Meteorology, and Dispersion**. New York: Oxford University Press. 1999. 310p. ISBN 0-19-507398-3
- BELLASIO R., BIANCONI, R., GRAZIANI, G., MOSCA, S. RTMOD: An Internet based System to Analyse the Predictions of Long-range Atmospheric Dispersion Models, **Computers and Geosciences**, v.25, n.7, pp.819-833. 1999.
- BEYCHOK, Milton R.. **Fundamentals of Stack Gas Dispersion**. 4.ed. Califórnia. Consulting Engineer Newport Beach. 2005. 201p. ISBN: 0964458802. ISBN-13: 9780964458802. [online]. 2005. Disponível: <http://www.air-dispersion.com/>. [capturado em 21 de setembro de 2008]
- BIAGIO, Rosa Maria de Souza. **Análise Comparativa de Três Sistemas de Coeficientes de Dispersão Atmosférica na Região de Angra dos Reis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Nuclear). Universidade Federal do Rio de Janeiro. 1982.
- BIZZOTTO, Márcia. **Europa ainda está contaminada por Chernobyl, diz estudo**. BBCBrasil.com [online], Bruxelas, 19 abr. 2006. Disponível: [http://www.bbc.co.uk/portuguese/reporterbbc/story/2006/04/060419\\_chernobylmarciars.shtml](http://www.bbc.co.uk/portuguese/reporterbbc/story/2006/04/060419_chernobylmarciars.shtml) [capturado em 28 jan. 2009].
- BOÇON, FernandoTadeu. **Modelagem Matemática do Escoamento e da Dispersão de Poluentes na Microescala Atmosférica**. 1998. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Federal de Santa Catarina, Faculdade de Engenharia Mecânica, 1998.
- BOUBEL, Richard W., FOX, Donald L., TURNER, Bruce, STERN, Arthur C. **Fundamentals of Air Pollution**. 3ed. Academic Press. 574p. 1994. ISBN-10: 0121189309. ISBN-13: 978-0121189303

BRIGGS, G.A. **Diffusion Estimation for Small Emissions**. Environmental Research Laboratories. Air Resources Atmospheric Turbulence and Diffusion Laboratory. Annual Report ATDL-106. NOAA. 1973.

CARDOSO, Eliezer de Moura, e colaboradores. **Apostila Educativa: Energia nuclear**. Comissão Nacional de Energia Nuclear [online]. 2001. Disponível: <http://www.cnem.gov.br/ensino/apostilas/energia.pdf> . [capturado em 8 de setembro de 2008]

CERQUEIRA, Rodrigo Wanderley, SOUZA, Patrícia Paiva, ARAUJO, Rodrigo Lopes. **Utilização do Software Photomodeler na Conservação e Restauração de Monumentos**. XXI Congresso Brasileiro de Cartografia. Belo Horizonte. Brasil. 7p. 2003.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA nº3/1990 [online]. Disponível: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=100>. [capturado em 10 jun. 2008]

CNEN, Comissão Nacional de Energia Nuclear, **Programas de Meteorologia de Apoio de Usinas Nucleoelétricas**. CNEN-NE-1.22. Agosto 1989.

CSANADY, G.T., HILST, G.R., BOWNE, N.E. **The diffusion from a cross-wind line source at Fort Wayne, Indiana**. Unpublished Report, Travelers Research Center, Hartford, CT. 1967.

DIAS, Cíntia Melazo. **Emissão de 14 C pelas Unidades I e II da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA) e seu efeito local nos níveis ambientais**. 2006. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade de Brasília. 2006.

ECKMAN, Richard M., MIKKELSEN, Torben. Estimation of Horizontal Diffusion from Oblique Aerial Photographs of Smoke Clouds. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**. v. 8, n. 6, pp. 873-878. 1991.

EISENBUD, Merrill. **Environmental Radioactivity: An Interdisciplinary Monograph**

**Series**. 2. ed. New York: Academic Press. 1973. 542 p. ISBN-13: 9780122351501 ISBN: 0122351509.

EINSTEIN, Albert. **Ideas and Opinions**. Bonanza Books. 1988. 384p. ISBN-10: 0517003937 ISBN-13: 978-0517003930

FRANCO, Nilo José do Nascimento. **Aplicação de um Modelo de Trajetórias na Simulação do Transporte de Radionuclídeos na Atmosfera**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2005.

GIFFORD, Frank. Relative Atmospheric Diffusion of Smoke Puffs. **Journal of Meteorology**. v.14. n. 5. p. 410-414. 1957.

GIFFORD, Frank. Smoke Plumes as Quantitative Air Pollution Indices. **International Journal of Air Pollution**, v. 2, p. 42-50.1959.

GIFFORD, Frank. Use of routine meteorological observations for estimating atmospheric dispersion. **Nuclear Safety**, v.2, n.4. p. 91-92. 1961.

GONÇALVES, José Manuel Ferreira. **Modelagem da Qualidade do Ar: Revisão de Modelos e Proposta para a Consideração da Movimentação de Fontes Móveis**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Federal de Engenharia de Itajubá. 2003.

GONÇALVES JUNIOR, Milton Alves . **Aplicação da Fluidodinâmica Computacional à Dispersão Atmosférica de Radionuclídeos na Vizinhança de uma Central Nuclear**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Nuclear) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

HANNA, S. R., BRIGGS, G. A., HOSKER, R. P. **Handbook on Atmospheric Diffusion**, U.S. Dept. of Energy Report DOE/TIC-11223, Washington, DC, U.S. 1982. 102p. ISBN-10: 0870791273. ISBN-13: 978-0870791277

- HEWSON, Wendell, GILL, Gerald, Walke, Gerald. **Smoke Plume Photography Study Big Rock Point Nuclear Plant**. Consumers Power Company Jackson. Michigan. Department of Meteorology and Oceanography. University of Michigan. 1963.
- HÖGSTROM, Ulf. An Experimental Study of Atmospheric Diffusion. *Tellus* , v. 16, n. 1 , p. 205-251, 1964.
- ISNARD, André Augusto. **Investigação Computacional do Escoamento e da Dispersão de Poluentes Atmosféricos sobre Topografias Complexas**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2004
- KAWANO, Mauricy. **Desenvolvimento, Validação e Aplicação de um Modelo Matemático para Dispersão de Poluentes Atmosféricos**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina. 2003.
- LIMA-E-SILVA, Pedro Paulo. **Sistema Holístico de Avaliação de Impactos Ambientais de Projetos Industriais**. 2003. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.
- LIMA-E-SILVA, Pedro Paulo. **Dados do Experimento FURNAS/NOAA de 1987: Derivação dos Coeficientes de Dispersão Atmosférica Através de Fotografias de Plumas de Fumaça**. Rio de Janeiro, CNEN, setor SESER/CODRE/CGRC/DRS. 2008.
- LIMA-VAZ. Jose Luiz. **Estudo da Dispersão de Particulado na Atmosfera Considerando-se Meio floresta**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Nuclear) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.
- MACHADO, Lúcia Helena Ribas. **Estudo da Camada Limite Atmosférica por Imagens de Satélite Landsat**. 1991. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1991.
- McELROY, J.L e POOLER, F. **The St. Louis Dispersion Study—Analysis**, v.2. National Air Pollution Control Administration, USDHEW AP-53, Arlington, 1968.

- MIN, I.A., ABEMATHY, N.A., LUNDBLAD, H.L. Measurement and Analysis of Puff Dispersion above the Atmospheric Boundary Layer Using Quantitative Imagery. **Journal of Applied Meteorology**. vol. 41. n. 10. p. 1027–1041. outubro 2002.
- MORAES, Marcelo Romero de. **Implantação de um Sistema de Modelos para a Qualidade do Ar**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina. 2001.
- NAPPO, Carmen J. Turbulence and dispersion parameters derived from smoke-plume photoanalysis. **Atmospheric Environmental**, v. 18, n. 2, p. 299–306, fevereiro 1984.
- NAPPO, Carmen J., MILLER, David R., HISCOX, April L. **Atmospheric turbulence and diffusion estimates derived from plume image analysis**. 15th Joint Conference on the Applications of Air Pollution Meteorology with the A&WMA. New Orleans. 2008.
- OLIVEIRA JUNIOR, José Francisco. **Estudo da Camada Limite Atmosférica na Região de Angra dos Reis Através do Modelo de Mesoescala MM5 e Dados Observacionais**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.
- PASQUILL, Frank. The Estimation of the Dispersion of Windborne Material. **The Meteorological Magazine**, v. 90, n. 1063, p. 33-49, fevereiro 1961.
- PASQUILL, Frank. **Atmospheric Diffusion**. London, Ellis Horwood Limited. 1974. 429p. ISBN 0853120153.
- PENDERGRASS, W.R., McMillen, Robert T., LIMA-E-SILVA, Pedro Paulo. **Field Experiment – Phase I: Site Representativeness**. NOAA/FURNAS. 1986.
- PETERSON, R.P. **Methods of Dose Calculations. LLNL Environmental Report for 1998**. Appendix A. [online]. 2006. Disponível: <http://www.llnl.gov/saer/saer98/98pdfs/mv-apA.pdf> [capturado em 15 ago 2006].

PIRES, Dilson Ojeda. **Inventário de Emissões Atmosféricas de Fontes Estacionárias e sua Contribuição para a Poluição do Ar na Região Metropolitana do Rio de Janeiro.** 2005. Dissertação (Mestrado em Ciências de Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, 2005.

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO (PUC). **Memórias do Seminário sobre Emissões Atmosféricas de Fontes Estacionárias.** 2002.

PRADO, Walter da Silva. Rio de Janeiro, Engenharia Cartográfica, IME, 8 Mai. 2008. Comunicação Pessoal.

RANDERSON, Darryl. Photogrammetric and Photometric Investigation of a Smoke Plume Viewed from Space. **Journal of Applied Meteorology.** v. 10, n. 6, p.1122-1130. julho, 1971.

RICHARDSON, Lewis. Some Measurements of Atmospheric Turbulence. **Philosophical Transaction of the Royal Society of London Series A.** v. 221, n. 1, p. 1-28, 1921.

ROBERTS, O.F.T. The Theoretical Scattering of Smoke in a Turbulent Atmospheric. **Proceedings of the Royal Society of London Series A,** v. 104, n. 728, p. 640-654, dezembro 1923.

ROSA, Alexandre Nunes. **Relatório de Impacto Ambiental – RIMA - da Unidade 3 da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto.** 211p. [online]. 2006.  
Disponível: [http://www.eletronuclear.gov.br/pdf/relatorio\\_de\\_impacto\\_ambiental.pdf](http://www.eletronuclear.gov.br/pdf/relatorio_de_impacto_ambiental.pdf)  
[capturado em 21 ago 2008].

SANTOS, J. M. **Wind Flow and Dispersion around Single Obstacles.** 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Química). University of Manchester, UMIST, Grã-Bretanha. 2000.

SEINFELD, John H. **Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution.** John Wiley & Sons. New York. 2006. 768p. ISBN-10: 0471828572. ISBN-13: 978-0471828570.

SLADE, D.H. **Meteorology and Atomic Energy**. Oak Ridge: USAEC Technical Information Center. 1968. OSTI ID: 4492043. TID-24190.

SMITH, M.E. **Recommended Guide for the Prediction of the Dispersion of Airborne Effluents**. ed. 2. New York: American Society for Mechanical Engineers, 1973. Library of Congress Number 68-31123.

SMITH, D.B. **Tracer Study in an Urban Valley**. Johnstown, Pennsylvania. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Pennsylvania State University, University Park, PA, 1967.

SOARES, Elenir Pereira. **Caracterização da Precipitação na Região de Angra dos Reis e a Sua Relação com a Ocorrência de Deslizamentos de Encostas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

SUTTON, O.G. A Theory of Eddy Diffusion in the Atmosphere. **Proceedings of the Royal Society of London Series A**, v. 135, n. 826, p. 143-165, fevereiro 1932. ISSN 0950-1207.

TORSANI, J.A. **Aplicação de Sensoriamento Remoto no Estudo da Dispersão de Poluentes na Atmosfera**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1980.

TURNER, B.D. **Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates: An Introduction to Dispersion Modeling**. ed. 2. Lewis Publishers, 1994. ISBN-10: 156670023X ISBN-13: 978-1566700238

U.S.EPA e NOAA. **Air Quality Meteorology: A Developmental Course of the US Environmental Protection Agency in conjunction with the US National Oceanic and Atmospheric Administration**. U.S. Environmental Protection Agency, National Oceanic and Atmospheric Administration. [online]. 1996. Disponível: <http://www.shodor.org/metweb/>. [capturado em 15 ago 2006].

U.S.NRC. Regulatory Guide 1.109: “Calculation of Annual Doses to Man from Routine Releases of Reactor Effluent for the Purpose of Evaluation Compliance with 10 CFR part

50”, Appendix 1, 1977.

VAREJÃO-SILVA, Mário Adelmo, 2005: Meteorologia e Climatologia, Versão Digital, 522p. Recife, Brasil.

VENKATRAN, Akula, ISACOV, VLAD, YUAN, Jing, PANKRATZ, DAVID. *Modeling dispersion at distances of meters from urban sources. Atmospheric Environmental.* v. 38, p. 4633-4641. 2005

VÖGT, K.J. e GEISS, H. **Tracer Experiments on the Dispersion of Plumes over Terrain of Major Surface Roughness.** Asian Regional Congress on Radiation Protection. Bombay, Índia. p.15-20. 1974.

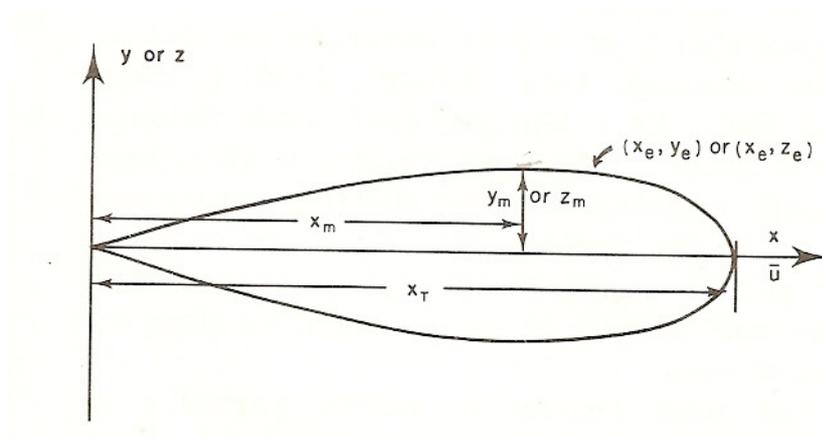
VÖGT, K.J. Empirical Investigations of the Diffusion of Waste Air Plumes in the Atmospheric. **Nuclear Technology**, v. 34, n. 6, p.47-56, 1977.

WATZLAWICK, Luciano Farinha; SCHOENINGER, Emerson Roberto; KIRCHNER, Flávio Felipe. Elementos de interpretação fotográfica. Guarapuava. Unicentro, 2007. v. 400. 94 p.

## **7 APÊNDICES**

## 7.1 APÊNDICE 1: DERIVAÇÃO MATEMÁTICA DA DETERMINAÇÃO DE SIGMA - MÉTODO DE GIFFORD (1957)

Neste anexo, é apresentada a derivação da equação proposta por GIFFORD (1957) para estimar os coeficientes de dispersão, ou seja, os desvios padrão da pluma gaussiana. A derivação será feita para determinar o coeficiente de dispersão na horizontal,  $\sigma_y$ . A FIG A.1.1 ilustra os parâmetros envolvidos no cálculo de  $\sigma_y$  ou  $\sigma_z$ .



**FIG A.1.1 Parâmetros envolvidos na análise da pluma de fumaça. NAPPO (2008)**

A equação proposta por GIFFORD (1957) é obtida através de uma série de considerações da equação simplificada da pluma gaussiana, EQ A.1.1:

$$\chi = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \cdot \exp\left[-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right] \quad (\text{A.1.1})$$

O primeiro passo é assumir que a pluma é vista de uma grande altura (HELSON, 1963). Integrando a EQ. A.1.1 em relação à z:

$$\chi_i = \int_0^{\infty} \chi dz = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \int_0^{\infty} \exp\left[-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right] dz \quad (\text{A.1.2})$$

Sabendo que  $\int_0^{\infty} \exp\left[-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right] dz = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma_z$  tem-se:

$$\int_0^{\infty} \exp\left[-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right] dz = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma_z \quad (\text{A.1.3})$$

$$\chi_i = \int_0^{\infty} \chi dz = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma_z = \frac{Q}{2^{3/2} \sqrt{\pi u} \sigma_y} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \quad (\text{A.1.4})$$

Como a velocidade do vento é constante durante a modelagem,  $k = \frac{Q}{2^{3/2} \sqrt{\pi u}}$ , a EQ A.1.4 se reduz à EQ A.1.5.

$$\chi_i = k \frac{1}{\sigma_y} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \quad (\text{A.1.5})$$

Considerando  $\chi_i$  uma constante integrada da concentração ao longo do contorno visível da pluma (ROBERT, 1923 *apud* NAPPO, 2008) e diferenciando logicamente em relação à  $x$ :

$$\frac{1}{\chi_i} \frac{\partial \chi_i}{\partial x} = -\frac{1}{\sigma_y} \frac{\partial \sigma_y}{\partial x} - \frac{y}{\sigma_y^2} \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{y^2}{\sigma_y^3} \frac{\partial \sigma_y}{\partial x} = 0 \quad (\text{A.1.6})$$

Pela FIG A.1.1,  $y_m$  é o valor máximo que  $y$  assume, onde  $x=x_m$ .

$$\frac{\partial y}{\partial x} = 0 \quad , \text{ em } x_m \quad (\text{A.1.7})$$

Aplicando EQ A.1.7 na EQ A.1.6:

---

<sup>1</sup> A equação A.3 é obtida pela regra de integração  $\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-ax^2) dx = \sqrt{\pi/a}$ . Como  $\exp(-ax^2)$  é uma função par,  $\int_0^{\infty} \exp(-ax^2) dx = 1/2 \sqrt{\pi/a}$ .

$$y_m^2 = \sigma_{y,m}^2 \quad (\text{A.1.8})$$

Onde  $\sigma_{y,m}$  é o valor de  $\sigma_y$  em  $x_m$ .

Aplicando as considerações feitas e fazendo  $x = x_m$ , a EQ A.1.5 se torna:

$$\chi_i = \frac{k}{\sigma_{y,m}} \exp\left[\frac{-1}{2}\right] \quad (\text{A.1.9})$$

Colocando em evidência o fator  $k$  e substituindo na EQ A.1.5, obtém-se a EQ A.1.10 que segue abaixo:

$$1 = \frac{\sigma_{y,m}}{\sigma_y} \exp\left[\frac{1}{2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \quad (\text{A.1.10})$$

Como  $y_m = \sigma_{y,m}$  :

$$\sigma_y = y_m \exp\left[\frac{1}{2}\left(1 - \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)\right] \quad (\text{A.1.11})$$

Elevando a EQ A.1.11 ao quadrado e aplicando a função logaritmo em ambos os lados, encontramos a equação final para a determinação do coeficiente de dispersão lateral  $\sigma_y$ :

$$\sigma_y^2 = y^2 \left[ \ln\left(\frac{ey_m^2}{\sigma_y^2}\right) \right]^{-1} \quad (\text{A.1.12})$$

A equação implícita acima pode ser resolvida tanto graficamente quanto numericamente, utilizando o método de iteração de Newton. A derivação da equação para o coeficiente de dispersão vertical  $\sigma_z$ , é feita de forma análoga.

## 7.2 APÊNDICE 2: DISTRIBUIÇÃO NORMAL

A distribuição normal é uma das mais importantes distribuições da estatística, conhecida também como Distribuição Gaussiana. Além de descrever uma série de fenômenos físicos e financeiros, possui grande uso na estatística inferencial ou indutiva<sup>1</sup>. Se a variável aleatória  $x$  é normalmente distribuída com média aritmética  $\mu$  e desvio padrão  $\sigma$  (variância  $\sigma^2$ ), sua função densidade de probabilidade é dada por:

$$Y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad (\text{A.2.1})$$

Sendo:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_j - \mu)^2}{n}} \quad (\text{A.2.2})$$

$$\mu = \frac{\sum x_j}{n} \quad (\text{A.2.3})$$

Onde:

$x$  é a distância horizontal (ou vertical) transversal ao eixo central da pluma;

$x_j$  representa qualquer um dos  $n$  valores assumidos pela variável  $x$ ;

$\mu$  representa a média aritmética de um conjunto de  $n$  números assumidos pela variável  $x$ ;

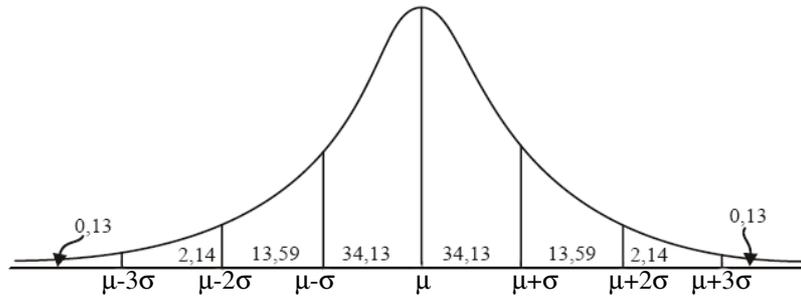
$n$  é o número total de eventos.

A distribuição gaussiana pode ser vista na FIG A.2.1, onde a área sob a curva é igual a 1 ou 100%. Para distribuição normal, tem-se:

- 68,27% da área total sob a curva estão entre  $\mu-\sigma$  e  $\mu+\sigma$  ;
- 95,44% estão entre  $\mu-2\sigma$  e  $\mu+2\sigma$ ;
- 99,73% estão entre  $\mu-3\sigma$  e  $\mu+3\sigma$ .

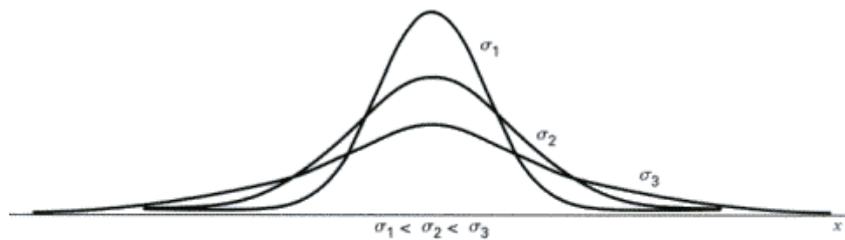
---

<sup>1</sup> Nome dado ao conjunto de técnicas analíticas utilizado para estabelecer conclusões sobre populações baseando-se em suas amostras. A principal finalidade é a tomada de decisões em situações onde há incerteza e variação.

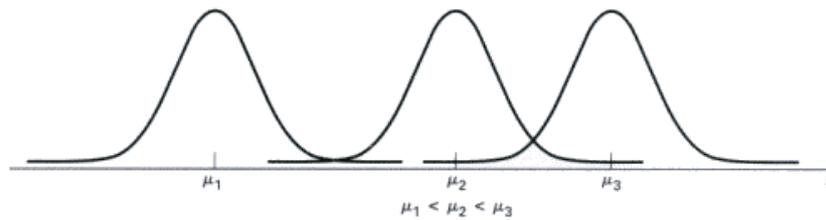


**FIG A.2.1 Distribuição Normal**

A forma da distribuição na horizontal é determinada pela magnitude do desvio padrão  $\sigma$ , como visto na FIG A.2.2. Outra característica da distribuição normal é a sua simetria em torno da média aritmética  $\mu$  (linha do centro da pluma), como na FIG. A.2.3.



**FIG A.2.2 Distribuição Normal com  $\mu=0$ , variando a dispersão com diferentes desvios padrão.**



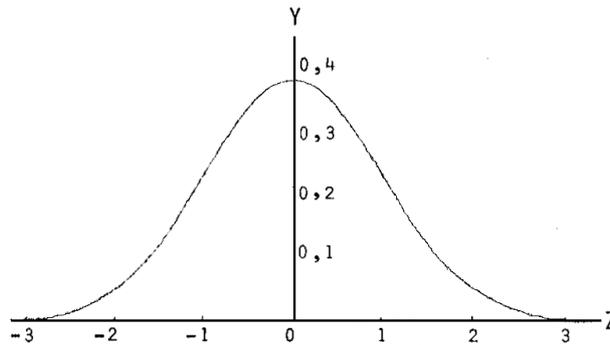
**FIG A.2.3 Distribuição Normal com  $\sigma=1$ , variando a posição do eixo central com diferentes médias aritméticas.**

Quando a variável é expressa em termos de unidade reduzida ou padrão,

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma} \tag{A.2.4}$$

Desta forma, a equação da distribuição normal passa a ser representada pela equação abaixo, com curva mostrada na FIG A.2.4.

$$Y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}Z^2\right) \quad (\text{A.2.5})$$



**FIG A.2.4 Distribuição Normal Reduzida.**

A área correspondente a 68,27% das medidas que se encontravam entre  $\mu-\sigma$  e  $\mu+\sigma$ , agora, ficam compreendidos entre  $Z=-1$  e  $Z=1$ , pois  $\mu=0$  e  $\sigma=1$ .

Para  $Z=0$ , a concentração máxima, ou seja, a concentração no centro da pluma  $Y$  vale 0,4, como visto no gráfico acima. Desta forma, considerando que o contorno da pluma equivale a 10%, então  $Y=0,04$ . Aplicando este valor na EQ A.2.5, encontramos  $Z= 2,15$ . Assim, para cada lado da pluma, temos:

$$\sigma = \frac{x}{2,15} \quad (\text{A.2.6})$$

Aqui,  $x$  representa qualquer parâmetro analisado na pluma, como distância ou quantidade de partículas, por exemplo. Ambas variáveis apresentadas usadas como exemplo devem ser medidas do centro da pluma à extremidade da mesma.

7.3 APÊNDICE 3: INFORMAÇÕES RELEVANTES À TOMADA DAS IMAGENS FOTOGRAFICAS

<i><b>Dia</b></i>	<i><b>Hora das Fotografias Analisadas</b></i>	<i><b>Posição do Fotógrafo</b></i>	<i><b>Local da Detonação (FIG 4.8)</b></i>	<i><b>Direção do Vento Horária</b></i>	<i><b>Classe de Estabilidade Horária</b></i>	<i><b>Exemplo de Fotografia</b></i>
<b>11</b>	17:36, 17:37, 17:38, 17:39, 17:40, 17:41, 17:42, 17:43	Centro de Visitantes	1 (elevada ≈ 8m)	SW(A10), WSW(A60), WSW(A100), S(B15), SSW(C15), E(D15)	D	
<b>12</b>	16:03, 16:04, 16:05, 16:06, 16:07, 16:08, 16:09, 16:10, 16:12, 16:13, 16:15, 16:16, 16:17, 16:18	Centro de Visitantes	3 (elevada ≈ 4m)	WSW(A10), WSW(A60), SSW(A100), SSW(B15), SE(C15), SSW(D15)	D	
<b>13</b>	10:03, 10:04, 10:05, 10:06, 10:07, 10:08, 10:09, 10:10, 10:11, 10:12, 10:13, 10:14, 10:46, 10:47, 10:48, 10:49, 10:50, 10:51	Centro de Visitantes	1 (elevada ≈ 8m)	SSW(A10), SSW(A60), SSW(A100), SSE(B15), SSE(C15), ESE(D15)	D	

13	11:05, 11:06, 11:07, 11:08, 11:09, 11:10, 11:11, 11:30, 11:31, 11:32, 11:33, 11:34, 11:35, 11:36, 11:37, 11:38, 11:39, 11:40, 11:41, 11:42, 11:43, 11:44, 11:45	Centro de Visitantes	1 (elevada ≈ 8m)	SSW(A10), SSW(A60), SSW(A100), SSW(B15), SSE(C15), SW(D15)	C	
13	16:17, 16:18, 16:19, 16:20, 16:21, 16:22, 16:23, 16:24, 16:25, 16:26, 16:27, 16:28, 16:29, 16:30, 16:31	Centro de Visitantes	1 (elevada ≈ 8m)	SSW(A10), SSW(A60), SSW(A100), S(B15), S(C15), SW(D15)	D	
13	17:03, 17:04, 17:10, 17:11, 17:12, 17:13, 17:14, 17:15, 17:16, 17:17, 17:18, 17:32, 17:33, 17:34,	Centro de Visitantes	1 (elevada ≈ 8m)	SW(A10), WSW(A60), WSW(A100), WSW(B15), SW(C15), WSW(D15)	D	

	17:35, 17:36, 17:37, 17:38, 17:39, 17:40					
<b>14</b>	11:21, 11:22, 11:23, 11:24, 11:25, 11:26, 11:27, 11:28, 11:29, 11:30, 11:31, 11:32, 11:33, 11:34, 11:35, 11:36, 11:37, 11:38, 11:39, 11:51, 11:52, 11:53, 11:55, 11:56, 11:57, 11:58, 11:59	Centro de Visitantes	1 (elevada ≈ 8m)	SSW(A10), SW(A60), WSW(A100), S(B15), S(C15), - (D15)	D	
<b>14</b>	12:00, 12:01, 12:02, 12:06, 12:07, 12:09	Centro de Visitantes	1 (elevada ≈ 8m)	SSW(A10), SW(A60), WSW(A100), S(B15), S(C15), - (D15)	D	

<p><b>14</b></p>	<p>17:31, 17:32, 17:33, 17:34, 17:35, 17:36, 17:37, 17:39, 17:40, 17:41, 17:42, 17:43, 17:44, 17:45, 17:46, 17:47, 17:50, 17:51, 17:52, 17:53, 17:54, 17:55, 17:56, 17:57</p>	<p>Centro de Visitantes</p>	<p>1 (elevada ≈ 8m)</p>	<p>SSW(A10), SSW(A60), SSW(A100), SSW(B15), S(C15), - (D15)</p>	<p>D</p>	
<p><b>16</b></p>	<p>11:02, 11:03, 11:04, 11:05, 11:06, 11:07, 11:08, 11:09, 11:10, 11:11, 11:12, 11:13, 11:14, 11:15, 11:16, 11:17, 11:18, 11:19, 11:41, 11:42, 11:43, 11:44, 11:45, 11:46, 11:47, 11:48, 11:49, 11:50, 11:51,</p>	<p>Centro de Visitantes</p>	<p>1 (elevada ≈ 8m)</p>	<p>SSW(A10), SSW(A60), SW(A100), S(B15), SSE(C15), W(D15)</p>	<p>D</p>	

	11:54, 11:55, 11:56					
<b>17</b>	17:38, 17:39, 17:40, 17:41, 17:42, 17:43, 17:44, 17:45, 17:46, 17:47, 17:48, 17:49, 17:50, 17:51	Centro de Visitantes	4 (nível do solo)	NNE(A10), ENE(A60), NW(A100), NE(B15), NNW(C15), NW(D15)	E	
<b>18</b>	18:07, 18:08, 18:09, 18:10, 18:11, 18:11, 18:12, 18:13, 18:14, 18:22, 18:41, 18:43, 18:44, 18:45	Centro de Visitantes	4 (nível do solo)	N(A10), NNE(A60), WNW(A100), SE (B15), N(C15), N(D15)	E	
<b>18</b>	19:03, 19:04, 19:05, 19:06, 19:07, 19:08, 19:09, 19:10	Helicóptero	4 (nível do solo)	N(A10), WNW(A60), WNW(A100), SE (B15), N(C15), N(D15)	E	
<b>19</b>	06:03, 06:04, 06:05, 06:06, 06:07, 06:08, 06:09, 06:10, 06:11	Centro de Visitantes	4 (nível do solo)	N(A10), - (A60), - (A100), - (B15), N(C15), NNE(D15)	E	

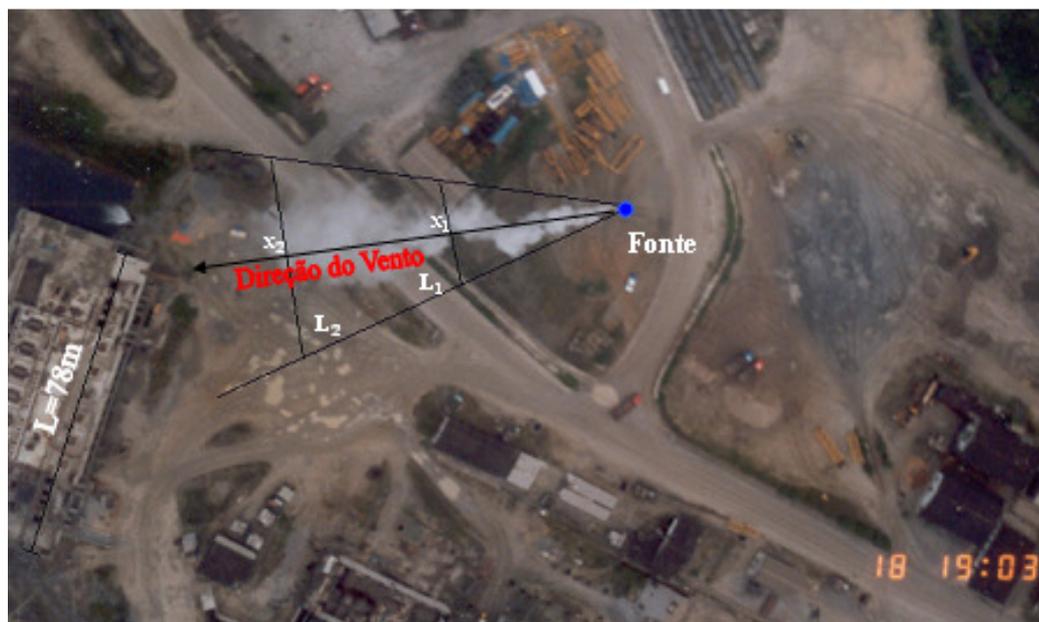
<b>19</b>	17:39, 17:40, 17:41	Centro de Visitantes	4 (nível do solo)	WNW(A10), W(A60), WSW(A100), WSW(B15), WSW(C15), WSW(D15)	D	
<b>21</b>	05:48, 05:49, 05:50, 05:51, 05:54	Centro de Visitantes	4 (nível do solo)	NNE(A10), ESE(A60), E(A100), WNW(B15), ENE(C15), ENE(D15)	E	
<b>21</b>	06:15, 06:16, 06:17, 06:18, 06:19, 06:20, 06:22, 06:23, 06:25, 06:26, 06:27, 06:40, 06:41, 06:42, 06:44, 06:45, 06:46, 06:48, 06:50, 06:52, 06:54	Centro de Visitantes	4 (nível do solo)	NE(A10), NE(A60), - (A100), WNW(B15), NW(C15), N(D15)	E	
<b>21</b>	07:11, 07:12, 07:13, 07:14	Ponta Fina	2 (elevada ≈ 4m)	NNE(A10), -(A60), -(A100), E(B15), E(C15), NE(D15)	E	

## 7.4 APÊNDICE 4: EXEMPLO NUMÉRICO DA DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE DISPERSÃO

Neste apêndice será mostrado um exemplo numérico da aplicação da metodologia apresentada no Capítulo 3 da dissertação desenvolvida para estimar os coeficientes de dispersão atmosférica horizontal e vertical do modelo gaussiano,  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ .

- Estimativa de  $\sigma_y$

Após identificar a pluma de fumaça na fotografia e traçar as duas retas ao longo das extremidades da pluma, como explicado na Seção 3.1.1 desta dissertação, traça-se uma linha reta ligando o contorno da pluma representando a largura da pluma em uma determinada distância à jusante da fonte, formando um triângulo aproximadamente isóscele, como visto na FIG A.4.1 (ou FIG 3.4). Esta fotografia foi tomada durante a classe de estabilidade E de Pasquill.



**FIG A.4.1** Vista aérea de uma pluma de fumaça e os parâmetros considerados em sua análise. Adaptado de LIMA-E-SILVA (2008).

Esta largura é então medida na fotografia, seja utilizando um programa computacional ou ainda, uma régua que, embora seja o método mais simples, pode embutir mais erros na medida desejada. O valor encontrado, em uma unidade qualquer (cm, pixel, etc.) é convertido em valor verdadeiro, ou seja, o valor real da largura da pluma no instante da tomada da fotografia a certa distância da fonte. Para isso, deve-se ter conhecimento de alguma medida real da largura de um ponto de referência visualizado na fotografia, como o prédio de comprimento igual a 78 m, na FIG A.4.1, além do comprimento do mesmo medido na fotografia. Com estes valores obtidos, basta aplicar a equação abaixo:

$$L_i = \frac{L_{iF} \cdot L_{Ref}}{L_{RefF}} \quad (A.1.1)$$

Onde:

$i$  = ponto à jusante da fonte em que se deseja medir a largura da pluma;

$L_{iF}$  = Largura da Pluma medida diretamente da fotografia em  $x_i$ ;

$L_{Ref}$  = Largura Real do Ponto de Referência;

$L_{RefF}$  = Largura do Ponto de Referência medida diretamente da fotografia.

Para  $i=1$  (distância de 48m à jusante da fonte) e  $i=2$  (distância de 93m à jusante da fonte), respectivamente, tem-se:

$$L_1 = \frac{L_{1F} \cdot L_{Ref}}{L_{RefF}} \quad (A.4.1)$$

$$L_2 = \frac{L_{2F} \cdot L_{Ref}}{L_{RefF}} \quad (A.4.2)$$

Substituindo os valores,  $L_{1F}=70,45\text{px}$  ,  $L_{2F}=125\text{px}$  ,  $L_{Ref}=73$  m,  $L_{RefF}= 212\text{px}$  , encontramos  $L_1$  e  $L_2$  iguais a 25,90m e 45,90m, respectivamente.

Em seguida, como se trata de uma fotografia instantânea, aplica-se a equação de GIFFORD (1961, *apud* ARYA, 1999):

$$Y = 4,30\sigma_y \quad (\text{A.4.3})$$

Onde:

$\sigma_y$  = coeficiente de dispersão horizontal

Y ou  $L_i$  = largura total da pluma em uma determinada distância da fonte

Obtém-se então,  $\sigma_y = 6,27\text{m}$  (para  $x=48\text{m}$ ) e  $\sigma_y = 11,13\text{m}$  (para  $x=93\text{m}$ ) para a fotografia analisada. O termo x se refere à distância à jusante da fonte. Para cada classe de estabilidade, deve-se ter uma série de fotografias tomadas na mesma posição para, em seguida, calcular a média aritmética das medidas da largura da pluma de fumaça em cada distância da fonte.

- Estimativa de  $\sigma_z$

A determinação de  $\sigma_z$  é feita de forma parecida com o cálculo de  $\sigma_y$ . O tratamento da fotografia, incluindo as linhas retas e a medição da altura da pluma, obedece ao mesmo procedimento (FIG A.4.2.2 ou FIG 3.5), substituindo largura por altura, evidentemente. É utilizada agora a altura da pluma assim como a altura do ponto de referência visualizado na fotografia, tomada durante a atuação da classe de estabilidade D de Pasquill.



**FIG A.4.2 Vista lateral de uma pluma de fumaça e os parâmetros considerados em sua análise. Adaptado de LIMA-E-SILVA (2008).**

Medem-se a altura da pluma de fumaça, assim como a altura do ponto de referência (torre de 100m de altura), ambas tiradas diretamente da fotografia. No caso da estimativa de  $\sigma_z$ , o efeito da obliquidade da fotografia é considerado, ao contrário do que é feito na determinação de  $\sigma_y$ . Desta forma, utiliza-se uma planta baixa do terreno para que se possa medir a distância entre o fotógrafo e o ponto onde se deseja determinar a altura da pluma e a distância entre o fotógrafo e o ponto de referência.



**FIG A.4.3 Vista aérea da CNAAA com parâmetros considerados na análise da pluma de fumaça. Adaptado do *Google Earth*, 2008.**

Então, a equação abaixo é aplicada.

$$A_i = \frac{A_{iF} \cdot D_i}{A_{RefF}} \left( \frac{A}{D} \right)_{Ref} \quad (A.4.4)$$

Onde:

$i$  = ponto à jusante da fonte em que se deseja medir a altura da pluma;

$A_i$  = Altura Real da Pluma no Ponto  $x_i$ ;

$A_{iF}$  = Altura da Pluma medida diretamente da fotografia em  $x_i$ ;

$A_{Ref}$  = Altura Real do Ponto de Referência;

$A_{RefF}$  = Altura do Ponto de Referência medida diretamente da fotografia;

$D_i$  = Distância entre o fotógrafo e o Ponto  $x_i$ ;

$D_{Ref}$  = Distância entre o fotógrafo e o Ponto de Referência.

Para  $i=1$  ( $x=56m$ ) e  $i=2$  ( $x=125m$ ), a equação acima se transforma em:

$$A_1 = \frac{A_{1F} \cdot D_1}{A_{RefF}} \left( \frac{A}{D} \right)_{Ref} \quad (A.4.5)$$

$$A_2 = \frac{A_{2F} \cdot D_2}{A_{RefF}} \left( \frac{A}{D} \right)_{Ref} \quad (A.4.6)$$

Substituindo os valores,  $A_{1F}=26px$ ,  $A_{2F}=84px$ ,  $A_{Ref}=100$  m,  $A_{RefF}=115px$ ,  $D_1=673m$  e  $D_2=631m$  e  $D_{Ref}=747m$ , encontramos  $A_1$  e  $A_2$  iguais a 20,37m e 61,70m, respectivamente.

Em seguida, aplica-se a equação de GIFFORD (1961, *apud* ARYA, 1999):

$$Z = 4,30\sigma_z \quad (\text{fonte elevada}) \quad (3.12)$$

Onde:

$\sigma_z$  = coeficiente de dispersão horizontal

Z ou A = altura total da pluma em uma determinada distância da fonte

O valor de  $\sigma_z$  é 4,93m e 14,94m para  $x=56m$  e  $x=125m$ , respectivamente.

Para traçar a linha de cada classe de estabilidade basta, após o cálculo da média aritmética de  $\sigma_y$  ou  $\sigma_z$ , elaborar um gráfico de  $\sigma_y$  ou  $\sigma_z$  por distância à jusante da fonte ( $x$ ), traçando a melhor reta através da regressão linear. Existe apenas um  $\sigma_y$  ou  $\sigma_z$  para cada distância da fonte, determinado pela média. Quanto mais pontos forem ligados, ou seja, quanto maior o número de distâncias da fonte analisadas, melhor é a qualidade da reta traçada.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)