

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA AMBIENTAL

HARERTON OLIVEIRA DOURADO

ESTUDO DA DISPERSÃO DE GASES ODORANTES  
AO REDOR DE OBSTÁCULOS ATRAVÉS DO  
MODELO DE PLUMA FLUTUANTE

VITÓRIA

2007

HARERTON OLIVEIRA DOURADO

ESTUDO DA DISPERSÃO DE GASES ODORANTES  
AO REDOR DE OBSTÁCULOS ATRAVÉS DO  
MODELO DE PLUMA FLUTUANTE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Jane Meri Santos

Co-Orientador: Prof. Dr. Neyval Costa Reis Jr.

VITÓRIA

2007

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

D739e Dourado, Harerton Oliveira, 1972-  
Estudo da dispersão de gases odorantes ao redor de obstáculos através  
do modelo de pluma flutuante / Harerton Oliveira Dourado. – 2007.  
105 f. : il.

Orientadora: Jane Meri Santos.

Co-Orientador: Neyval Costa Reis Júnior.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo,  
Centro Tecnológico.

1. Controle de odor. 2. Dispersão. 3. Pluma flutuante. I. Santos, Jane Meri. II. Reis Júnior, Neyval Costa. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 628

---

HARERTON OLIVEIRA DOURADO

ESTUDO DA DISPERSÃO DE GASES  
ODORANTES AO REDOR DE OBSTÁCULOS  
ATRAVÉS DO MODELO DE PLUMA FLUTUANTE

COMISSÃO EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Edmilson Costa Teixeira, DEA/CT/UFES

---

Prof. Dr. Davidson Martins Moreira, DM/UFP

Vitória, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

## **AGRADECIMENTOS**

A DEUS, por ser a fonte de toda ciência e sabedoria e por nos permitir tentar entender o funcionamento da sua obra.

A Prof<sup>a</sup>. Jane Meri Santos, por seu paciente trabalho de orientação durante a elaboração deste trabalho e também pela oportunidade de voltar ao convívio universitário.

Ao Prof. Neyval Costa Reis Jr., por sua orientação e pelas valiosas sugestões para a análise dos resultados.

Ao Prof. Paul Henshaw, da Universidade de Windsor, pela disponibilidade em conceder informações sobre o modelo de pluma flutuante.

A todos os colegas do mestrado, cuja convivência foi um grande estímulo para a conclusão deste trabalho.

Aos meus pais, pelo amor, carinho, suporte e pela dedicação em fornecer educação de qualidade, esforços que ainda produzem frutos!

E finalmente, agradeço à Fabiane, minha amada esposa, não somente por seu amor e carinho, mas também por seu esforço, determinação, paciência e contínuo incentivo. Sem você eu não chegaria até aqui.

À minha esposa Fabiane, razão de toda a minha vida.

“O choro pode durar uma noite, mas a alegria vem pela manhã”. Salmos 30:5

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1-1: alguns compostos odorantes e seus respectivos limites de exposição (8h e 10 min) e limite de detecção. ....	23
Tabela 4-1: Comparação da distribuição de números gerados para a posição y e da distribuição normal (gaussiana) em termos de desvios padrões (DP).....	50
Tabela 4-2: Comparação da distribuição de números gerados para a posição z e da distribuição normal (gaussiana) em termos de desvios padrões (DP).....	50
Tabela 4-3: equações de Briggs para o cálculo dos coeficientes de dispersão em função da estabilidade atmosférica, para meios rural e urbano (Hanna <i>et al.</i> , 1982) .....	54
Tabela 5-1: abordagens empregadas para incluir os efeitos do obstáculo na modelagem gaussiana empregadas no presente trabalho.....	69

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1-1: A área hachurada mostra que valores de pico da concentração de um composto emitido podem provocar sensação de odor mesmo quando o valor médio está abaixo do limite de detecção (Boeker *et al.*, 2001) ..... 23
- Figura 1-2: representação esquemática do escoamento e dispersão de contaminantes ao redor de um obstáculo considerando uma chaminé localizada sobre o obstáculo (Shaubberger & Piringer, 2004). ..... 28
- Figura 4-1: (a) representação da dispersão horizontal de uma pluma através de discos elípticos correspondendo ao modelo gaussiano não flutuante, válido para um tempo de observação longo, por exemplo, 1 hora (Gifford, 1959); (b) representação da dispersão horizontal da pluma no modelo de pluma flutuante – os centros dos discos elípticos variam a sua posição ao longo do tempo de observação (Gifford, 1959); (c) desvios padrões empregados no modelo da pluma flutuante para a direção y – parâmetros análogos são válidos para a direção z..... 46
- Figura 4-2: histograma mostrando a distribuição dos números aleatórios gerados para originar a flutuação em y. .... 50
- Figura 4-3: histograma mostrando a distribuição dos números aleatórios gerados para originar a flutuação em z. .... 51
- Figura 4-4: Ilustração do comportamento de uma pluma afetada pela presença do obstáculo, com uma pluma completamente capturada pela esteira turbulenta (a), pluma não capturada (b) e pluma com captura parcial (c) (Mussio, 1989). 61
- Figura 4-5: Experimento em túnel de vento realizado por Aubrun, Leiti e Schatzmann (CEDVAL, 2006)..... 65
- Figura 4-6: detalhe do modelo do prédio utilizado nos experimentos em túnel de vento (CEDVAL, 2006)..... 66

Figura 4-7: Esquema do modelo do prédio utilizado no túnel de vento, mostrando a orientação do modelo em relação ao norte (CEDVAL, 2006).....	66
Figura 4-8: Dimensões do modelo de prédio utilizado em túnel de vento (mm) (CEDVAL, 2006).....	67
Figura 5-1: Concentração média (normalizada pela concentração na fonte), comparando os dados do túnel de vento com os resultados do modelo, para cada uma das abordagens, sendo (a) vento 40 graus; (b) vento 130 graus; (c) vento 220 graus; (d) vento 310 graus.....	72
Figura 5-2: concentração média para o túnel de vento e para o modelo de pluma flutuante (métodos 1 a 5); vento 40 graus. Os pontos em vermelho no gráfico dos resultados do túnel de vento indicam os valores observados em pontos selecionados; nos demais gráficos, indicam a diferença percentual em relação aos resultados do túnel de vento. ....	73
Figura 5-3: concentração média para o túnel de vento e para o modelo de pluma flutuante (métodos 1 a 5); vento: 130 graus. Os pontos em vermelho no gráfico dos resultados do túnel de vento indicam os valores observados em pontos selecionados; nos demais gráficos, indicam a diferença percentual em relação aos resultados do túnel de vento. ....	74
Figura 5-4: concentração média para o túnel de vento e para o modelo de pluma flutuante (métodos 1 a 5); vento: 220 graus. Os pontos em vermelho no gráfico dos resultados do túnel de vento indicam os valores observados em pontos selecionados; nos demais gráficos, indicam a diferença percentual em relação aos resultados do túnel de vento. ....	75
Figura 5-5: concentração média para o túnel de vento e para o modelo de pluma flutuante (métodos 1 a 5); vento: 310 graus. Os pontos em vermelho no gráfico dos resultados do túnel de vento indicam os valores observados em pontos selecionados; nos demais gráficos, indicam a diferença percentual em relação aos resultados do túnel de vento. ....	76

Figura 5-6: Comparação entre os valores dos parâmetros de dispersão utilizados na abordagem 3 e no caso sem prédio para as direções (a) horizontal e (b) vertical.....	77
Figura 5-7: comprimento e largura efetiva do obstáculo utilizada no presente trabalho conforme a direção do vento .....	80
Figura 5-8: Intermitência, comparando os dados do túnel de vento com os resultados do modelo, para cada uma das abordagens, sendo (a) vento 40 graus; (b) vento 130 graus; (c) vento 220 graus; (d) vento 310 graus.....	82
Figura 5-9: Intermitência (percentagem de tempo do experimento durante o qual a concentração superou o limiar estabelecido) para o túnel de vento e para o modelo de pluma flutuante (métodos 1 a 5), vento 40 graus. Os pontos em vermelho no gráfico dos resultados do túnel de vento indicam os valores observados em pontos selecionados; nos demais gráficos, indicam a diferença percentual em relação aos resultados do túnel de vento. ....	83
Figura 5-10: Intermitência (percentagem de tempo do experimento durante o qual a concentração superou o limiar estabelecido) para o túnel de vento e para o modelo de pluma flutuante (métodos 1 a 5), vento 130 graus. Os pontos em vermelho no gráfico dos resultados do túnel de vento indicam os valores observados em pontos selecionados; nos demais gráficos, indicam a diferença percentual em relação aos resultados do túnel de vento. ....	84
Figura 5-11: Intermitência (percentagem de tempo do experimento durante o qual a concentração superou o limiar estabelecido) para o túnel de vento e para o modelo de pluma flutuante (métodos 1 a 5), vento 220 graus. Os pontos em vermelho no gráfico dos resultados do túnel de vento indicam os valores observados em pontos selecionados; nos demais gráficos, indicam a diferença percentual em relação aos resultados do túnel de vento. ....	85
Figura 5-12: Intermitência (percentagem de tempo do experimento durante o qual a concentração superou o limiar estabelecido) para o túnel de vento e para o modelo de pluma flutuante (métodos 1 a 5), vento 310 graus. Os pontos em	

vermelho no gráfico dos resultados do túnel de vento indicam os valores observados em pontos selecionados; nos demais gráficos, indicam a diferença percentual em relação aos resultados do túnel de vento. .... 86

Figura 5-13: Relação pico/média da concentração, comparando os resultados do modelo, para cada uma das abordagens, sendo (a) vento 40 graus; (b) vento 130 graus; (c) vento 220 graus; (d) vento 310 graus. .... 89

Figura 5-14: Influência do valor de  $\sigma_p$  nos valores modelados da concentração média; comparação entre o método 5, método 5 com  $\sigma_p$  modificado e túnel de vento para (a) vento 40 graus; (b) vento 130 graus; (c) vento 220 graus; e (d) vento 310 graus; os resultados do modelo com e sem modificação não apresentam diferença significativa, de forma que os traçados nos gráficos estão sobrepostos. .... 91

Figura 5-15: Influência do valor de  $\sigma_p$  nos valores modelados da intermitência; comparação entre o método 5, método 5 com  $\sigma_p$  modificado e túnel de vento para (a) vento 40 graus; (b) vento 130 graus; (c) vento 220 graus; e (d) vento 310 graus. .... 92

Figura 5-16: Influência do valor de  $\sigma_p$  nos valores modelados da relação pico/média; comparação entre o método 5 e método 5 com  $\sigma_p$  modificado para (a) vento 40 graus; (b) vento 130 graus; (c) vento 220 graus; e (d) vento 310 graus. .... 93

## Lista de símbolos

- $a, b$  : limite inferior e superior de uma distribuição de números aleatórios;
- $a_0, b_0$  : parâmetros empíricos usados nos cálculos dos parâmetros de dispersão do segmento de pluma;
- $A_P$  : área frontal do prédio, perpendicular ao escoamento [ $m^2$ ];
- $c$  : parâmetro dependente do tamanho do obstáculo;
- $C_m$  : concentração média, para um tempo  $t_m$ ;
- $C_p$  : concentração de pico, medida durante o tempo  $t_p$ ;
- $DP$  : desvio padrão;
- $d_s$  : diâmetro interno da chaminé [ $m$ ];
- $F_m$  : fluxo de quantidade de movimento [ $m^4/s^2$ ]
- $F_b$  : fluxo de empuxo térmico [ $m^4/s^2$ ]
- $H$  : altura do prédio [ $m$ ];
- $h$  : altura instantânea do centro da pluma [ $m$ ];
- $h''$  : altura da pluma, corrigida para os efeitos de abaixamento da pluma devido aos efeitos do obstáculo [ $m$ ];
- $h_e$  : altura efetiva da pluma, corrigida para efeitos de empuxo térmico e velocidade de saída dos gases [ $m$ ];
- $h_s$  : altura da chaminé [ $m$ ];
- $h'$  : altura da pluma corrigida para efeitos de abaixamento devido à

- chaminé (*stack tip downwash*) [ $m$ ];
- $i$  : intensidade da componente vertical da turbulência atmosférica;
- $L$  : comprimento do prédio, paralela à direção do vento [ $m$ ];
- $M$  : fração do contaminante capturado pela zona de recirculação do obstáculo;
- $N_{pa}$  : parâmetro função de  $Z_o$ ;
- $N_0$  : intensidade de odor na fonte, expresso em OU;
- $OU$ : : unidade odorante;
- $pos_y, pos_z$  : número gerado para o cálculo das posições instantâneas da pluma, nas direções  $y$  (horizontal) e  $z$  (vertical) [ $m$ ];
- $ppm$ : : partes por milhão;
- $q$  : expoente usado na correção dos desvios padrão para diferentes tempos de amostragem;
- $R_0$  : raio de diluição [ $m$ ];
- $s$  : parâmetro de estabilidade atmosférica;
- $t_p$ : : tempo de amostragem equivalente à duração de uma respiração;
- $T_a$  : temperatura ambiente [ $K$ ];
- $T_s$  : temperatura de exaustão dos gases da chaminé [ $K$ ];
- $T_{sd}, T_{se}$  : tempos de amostragem distintos;
- $u$ : : expoente dependente da estabilidade atmosférica;
- $u_h$  : velocidade do vento, na altura efetiva de lançamento [ $m/s$ ];

- $u_s$  : velocidade do vento, medida na altura da chaminé [ $m/s$ ];
- $V$  : variância de uma distribuição uniforme;
- $VN$  : variância da distribuição normal obtida pelo teorema do limite central;
- $v_s$  : velocidade de saída dos gases na chaminé [ $m/s$ ];
- $VU$  : variância da distribuição uniforme gerada pelo Fortran;
- $V_0$  : vazão volumétrica da fonte [ $m^3/s$ ];
- $W$  : largura do prédio, perpendicular à direção do vento [ $m$ ];
- $x$  : posição horizontal do receptor, na direção do vento [ $m$ ];
- $x_{y0}, x_{z0}$  : posição da fonte virtual [ $m$ ];
- $y$  : posição horizontal do receptor, perpendicular à direção do vento [ $m$ ];
- $y_c$  : posição horizontal instantânea do centro da pluma, perpendicular à direção do vento [ $m$ ];
- $z$  : posição vertical do receptor [ $m$ ];
- $z_c$  : posição vertical instantânea do centro da pluma [ $m$ ];
- $z_d$  : elevação da pluma devido ao empuxo térmico e velocidade de emissão, influenciada pela presença do obstáculo [ $m$ ];
- $Z_0$  : rugosidade da superfície [ $m$ ];
- $\Delta h$  : variação da altura da pluma, devido a efeitos de empuxo térmico e velocidade de saída dos gases [ $m$ ];
- $\beta_1$  : parâmetro de captura neutra;

- $\beta_j$  : coeficiente de captura de “jato”;
- $\xi_b$  : comprimento característico do prédio [ $m$ ];
- $\pi$  : constante igual a 3,159;
- $\sigma_c, \sigma_{yc}, \sigma_{zc}$  : desvio padrão da posição do centro de um elemento de pluma, para as direções y (horizontal) e z (vertical) [ $m$ ];
- $\sigma_p, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}$  : parâmetros de dispersão do segmento de pluma (curta duração), para as direções y (horizontal) e z (vertical) [ $m$ ];
- $\sigma_y, \sigma_z$  : parâmetros de dispersão de longa duração, para as direções y (horizontal) e z (vertical) [ $m$ ];
- $\Sigma_y, \Sigma_z$  : parâmetros de dispersão total, para as direções y (horizontal) e z (vertical) [ $m$ ];
- $\sigma_y', \sigma_z'$  : coeficientes de dispersão da fonte virtual, para as direções y (horizontal) e z (vertical) [ $m$ ];
- $\sigma_{y0}, \sigma_{z0}$  : parâmetros de dispersão para a fonte virtual para as direções y (horizontal) e z (vertical) [ $m$ ];
- $\sigma_{yd}$  : desvios padrão da concentração média para um tempo de amostragem  $T_{sd}$  [ $m$ ];
- $\sigma_{ye}$  : desvios padrão da concentração média para um tempo de amostragem  $T_{se}$  [ $m$ ];
- $\frac{W_a^*}{u_a}$  : logaritmo do perfil da velocidade do vento até 500m de altura.

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>21</b>
1.1	<i>IMPACTO AMBIENTAL DA EMISSÃO DE COMPOSTOS ODORANTES</i> .....	21
1.2	<i>MODELAGEM MATEMÁTICA DA DISPERSÃO DE COMPOSTOS ODORANTES</i> .....	24
1.2.1	Tempo de média na modelagem da dispersão de poluentes.....	26
1.2.2	Influência da presença de obstáculos na modelagem da dispersão atmosférica de poluentes.....	27
1.3	<i>ORGANIZAÇÃO DO TEXTO</i> .....	29
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>30</b>
2.1	<i>OBJETIVO GERAL</i> .....	30
2.2	<i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</i> .....	30
<b>3</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>31</b>
3.1	<i>CAMADA LIMITE PLANETÁRIA</i> .....	31
3.2	<i>MODELAGEM MATEMÁTICA DA DISPERSÃO DE COMPOSTOS ODORANTES</i> .....	32
3.3	<i>MODELO DE PLUMA FLUTUANTE</i> .....	38
3.4	<i>TRATAMENTO PARA A PRESENÇA DE OBSTÁCULOS</i> .....	40
3.5	<i>SÍNTESE DA REVISÃO DA LITERATURA</i> .....	42
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>44</b>
4.1	<i>MODELO GAUSSIANO DE PLUMA FLUTUANTE</i> .....	44
4.2	<i>POSIÇÃO INSTANTÂNEA DO CENTRO DA PLUMA</i> .....	47
4.3	<i>ALTURA MÉDIA DA PLUMA</i> .....	51
4.4	<i>COEFICIENTES DE DISPERSÃO</i> .....	53
4.4.1	Coeficientes de dispersão de longa duração ( $\sigma_y$ e $\sigma_z$ ) .....	53

4.4.2	Coeficientes do segmento de pluma ( $\sigma_{yp}$ e $\sigma_{zp}$ ).....	55
4.4.3	Coeficientes da flutuação do centro do segmento de pluma ( $\sigma_{yc}$ e $\sigma_{zc}$ ).....	58
4.5	<i>TRATAMENTO PARA A PRESENÇA DE OBSTÁCULOS</i> .....	58
4.5.1	Abordagem 1 (Turner, 1969) .....	58
4.5.2	Abordagem 2 (Gifford, 1960).....	59
4.5.3	Abordagem 3 (Gifford, 1968).....	59
4.5.4	Abordagem 4 (Huber & Snyder, 1976).....	60
4.5.5	Abordagem 5 (Johnson <i>et al.</i> , 1975).....	60
4.5.6	Abordagem 6 (Scire <i>et al.</i> , 2000).....	62
4.6	<i>DADOS DO EXPERIMENTO EM TÚNEL DE VENTO</i> .....	64
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>68</b>
5.1	<i>CONCENTRAÇÃO MÉDIA</i> .....	69
5.2	<i>INTERMITÊNCIA</i> .....	78
5.3	<i>RELAÇÃO ENTRE VALORES DE PICO E MÉDIA PARA A CONCENTRAÇÃO</i> .....	87
5.4	<i>AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO VALOR DE <math>\Sigma_p</math> NOS VALORES MODELADOS DA CONCENTRAÇÃO MÉDIA, INTERMITÊNCIA E RELAÇÃO PICO/MÉDIA</i> .....	90
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>94</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>97</b>
	<b>ANEXO A – CÁLCULO DAS DIMENSÕES DA ZONA DE RECIRCULAÇÃO DO PRÉDIO ..</b>	<b>103</b>

## RESUMO

A emissão atmosférica de compostos odorantes pode causar impactos ambientais, causando incômodo e trazendo prejuízos à saúde. Uma das ferramentas empregadas nos estudos desses impactos são os modelos matemáticos, baseados na solução das equações de transporte do poluente. Um aspecto importante é a capacidade dos modelos em incluir o efeito da presença de obstáculos no escoamento. Devido à facilidade e rapidez em sua aplicação, os modelos gaussianos são muitas vezes empregados, mas sua formulação original não leva em conta a presença de obstáculos. A presença de obstáculos aumenta a geração de turbulência, causando uma maior diluição do poluente emitido. A possibilidade de incluir estes efeitos na modelagem gaussiana foi objeto de estudo de vários autores. O presente trabalho estuda a modelagem matemática da dispersão atmosférica de compostos odorantes empregando a modelagem gaussiana de pluma flutuante empregada com seis diferentes abordagens para considerar os efeitos da presença do obstáculo. O modelo de pluma flutuante estabelece que a dispersão atmosférica de um poluente é o resultado da turbulência e do movimento oscilatório devido à variação da direção do vento, sendo que a concentração do poluente, bem como a variação da posição da pluma obedecem à distribuições gaussianas. A metodologia empregada permite a previsão do impacto causado fornecendo, além dos resultados de concentração média durante um determinado tempo de amostragem, informações quanto à intermitência – tempo em que a concentração do composto ultrapassa um limiar definido. São fornecidos também informações quanto à relação entre o valor de pico e o valor médio da concentração no receptor. Os resultados da modelagem são comparados a dados obtidos em experimentos realizados em túnel de vento e mostram que o modelo não é completamente adequado ao emprego para estudo da dispersão atmosférica, apesar de mostrar concordância relativamente boa com os dados experimentais quanto à concentração média. Os resultados mostram que a influência do obstáculo é bem modelada qualitativamente. Os resultados da intermitência apresentaram magnitude subestimada pelo modelo em regiões próximas do obstáculo e superestimada em

pontos mais afastados deste. Este resultado pode ser devido à maneira de modelar o efeito do formato do obstáculo ou à forma de determinação dos parâmetros de dispersão relativos à pluma flutuante. Uma modificação desses parâmetros manteve o resultado obtido para a concentração média e relação pico/média, porém alterou os resultados da intermitência, tornando-os de comportamento mais próximos ao observado em túnel de vento.

Palavras chaves: controle de odor, dispersão, pluma flutuante.

## ABSTRACT

Atmospheric dispersion of odorous compounds can originate environment impacts, causing nuisance and health effects. One of the tools employed for studying these impacts are mathematical models, based on the solution of the pollutant transport equations. An important aspect is the ability of the models to include the effect of the presence of obstacles in the flow. Due to its easy and fast implementation gaussian models are employed but its original formulation doesn't take into account the presence of obstacles, which presence augments turbulence generation and causes an increased dilution of the emitted compound. Ways to include these effects in gaussian models were the object of several authors. The present work studies the mathematical modeling of the atmospheric dispersion of odorous compounds using the fluctuating plume gaussian model along with six different approaches for taking the obstacles effects into account. The fluctuating plume model states that atmospheric dispersion of a pollutant is the result of turbulence and wind meandering. Both the concentration and fluctuation of the plume centerline will be the result of gaussian distributions. The methods employed permit the estimation of the impact caused by the pollutant giving results for concentrations during a specified averaging period, intermittency - defined as the time where the instant concentration is higher than a defined threshold, and peak-to-mean ratio. The results are compared to wind tunnel measured data and show that the model is not completely adequate for odor dispersion modeling, despite showing good agreement with experimental data in terms of average concentration results. The obstacle effects are well modeled in a qualitative manner. Intermittency results presented an underestimate magnitude in regions near the source and are overestimated farther away from it. This result can be due to the obstacle modeling procedures or the dispersion parameters calculations. A modification in one of these dispersion parameters maintained the concentration and peak-to-mean results but provided an improved behavior for the intermittency results when compared to the wind tunnel data.

Keywords: odour, fluctuating plume, dispersion

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 IMPACTO AMBIENTAL DA EMISSÃO DE COMPOSTOS ODORANTES

A sensação de odor é causada pela emissão para a atmosfera de diversos compostos, tais como compostos de enxofre, compostos orgânicos voláteis, amônia e ozônio. Estes compostos são emitidos como resultado de diversos processos que podem ter origem natural ou antropogênica, como por exemplo, degradação biológica, tratamento de esgotos e outros efluentes, indústria química e petrolífera, e pela indústria de produção de celulose.

A Política Nacional de Meio Ambiente (Brasil, 1981) define poluição como a “degradação da qualidade ambiental”, sendo causada por atividades que, de forma direta ou não, possam causar: prejuízo à saúde, segurança e bem estar da população; condições adversas às atividades sociais e econômicas; condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente desfavoráveis; e o lançamento de matéria ou energia em desacordo com padrões ambientais estabelecidos. Schiffman & Williams (2005) apontam que a sensação de odor pode desencadear sintomas relacionados a problemas de saúde como irritações nos olhos, nariz e garganta, dores de cabeça, náuseas e diarreia, além disso, o ser humano se utiliza da sensação de odor para julgar as condições sanitárias do ambiente. Esses fatores afetam diretamente as condições para a realização das atividades humanas sociais e econômicas.

O estudo do impacto ambiental causado por gases odorantes leva em conta as seguintes dimensões, conforme citadas por DEFRA (2004) e DEP (2002):

- Concentração: quantidade de odor presente em um determinado volume de ar, podendo ser expressa em frações de massa ou volume (partes por milhão – ppm; microgramas por metro cúbico –  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) ou, como a maioria dos compostos odorantes são misturas complexas de várias substâncias, em unidades odorantes (OU). 1 OU equivale a menor concentração de compos-

to odorante capaz de ser detectada por 50% de um painel de observadores treinados em um teste de olfatometria (CEN, 2003).

- Intensidade: a forma como um indivíduo percebe a magnitude de um odor, classificada em uma escala que varia, por exemplo, de “imperceptível” a “extremamente forte”, segundo definido pela norma alemã VDI 3882 (DEP, 2002);
- Nível de agrado do odor (caráter hedônico): indica a aceitabilidade do odor (Cha, 1998), numa escala que varia entre -4 e 4. Valores negativos indicam desagradabilidade e valores positivos indicam agradabilidade do odor (EA, SEPA & NIEHS, 2002);
- Qualidade: atributo expresso em termos descritivos, como “cheiro de frutas”, “cheiro de amêndoas”, “cheiro de peixe”, etc.

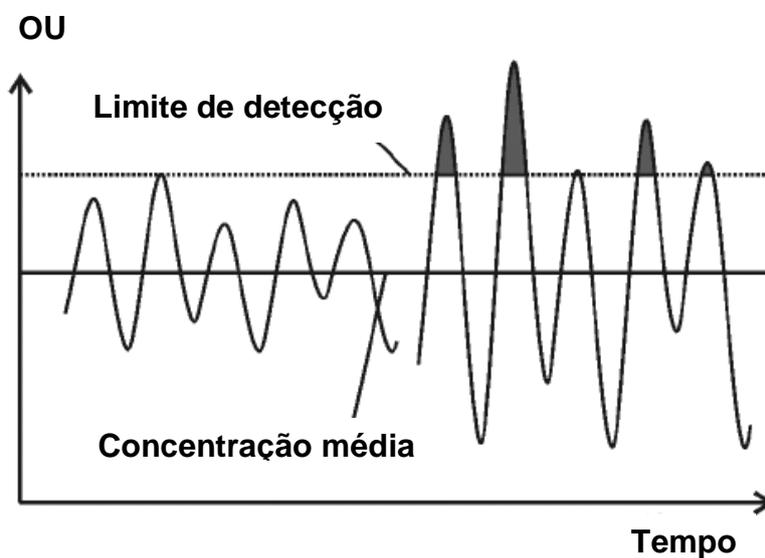
A Tabela 1-1 mostra o limite de detecção (valor mínimo da concentração que permite que um odor seja percebido) é, normalmente, bem menor que o limite de exposição que não deve ser ultrapassado durante um intervalo de tempo definido, a fim de evitar prejuízos permanentes à saúde (CEN, 2001; OSHA, 2007). A Figura 1-1 mostra como picos de curta duração no valor da concentração de um composto odorante que ultrapassem o limiar de detecção podem provocar eventos de odor mesmo quando o valor médio da concentração observado durante um período de tempo suficientemente longo – por exemplo, maior do que o de uma respiração (1 a 5 segundos) – encontra-se abaixo dos níveis de detectabilidade.

A necessidade de prognóstico do comportamento da dispersão de poluentes, inclusive de compostos odorantes, serve a diversos propósitos como: (i) avaliação da eficiência de técnicas e estratégias propostas para o controle das emissões; (ii) estudo dos impactos ambientais para um novo empreendimento; (iii) determinação de responsabilidades frente aos níveis atuais de poluição; e (iv) planejamento da ocupação territorial urbana.

**Tabela 1-1: alguns compostos odorantes e seus respectivos limites de exposição (8h e 10 min) e limite de detecção.**

	Limite de exposição de longa duração (8h), em ppm	Limite de exposição de curta duração (10min), em ppm	Limite de detecção, em ppm
Sulfeto de hidrogênio	10	15	0,0005
Metil mercaptana	0,5	-	0,0005
Etil mercaptana	0,5	2	0,0003
Amônia	25	35	17
Metilamina	10	-	4,7
Etilamina	10	-	0,27
Dimetilamina	10	-	0,34

Fonte: adaptado de Vincent & Hobson, 1998 e Morton, 2002.



**Figura 1-1: A área hachurada mostra que valores de pico da concentração de um composto emitido podem provocar sensação de odor mesmo quando o valor médio está abaixo do limite de detecção (Boeker *et al.*, 2001)**

Simms *et al.* (2000) indicam que estudos de impacto de odor têm sido geralmente de dois tipos:

- Mapeamento do odor: medições da concentração ao redor da fonte, a fim de determinar a região impactada pela emissão. A vantagem desse tipo de abordagem é a obtenção de informações representativas da situação real. Entretanto, a fim de garantir essa representatividade, devem ser realizadas diversas medições em diferentes condições atmosféricas e de emissão que pode representar altos custos para a implementação do mapeamento.
- Modelagem da dispersão: prognóstico da distribuição do composto de interesse na região de interesse baseado em princípios físicos e químicos. A modelagem pode ser utilizada para investigar o impacto ambiental em diferentes condições atmosféricas e de emissão com maior rapidez e menor custo. Entretanto, um modelo matemático possui limitações baseadas nas hipóteses simplificadoras associadas a sua concepção. No caso dos modelos matemáticos mais sofisticados, a exigência de um alto poder de processamento computacional pode implicar em aumento do custo e diminuição da rapidez na obtenção de resultados.

## 1.2 MODELAGEM MATEMÁTICA DA DISPERSÃO DE COMPOSTOS ODORANTES

A modelagem matemática da dispersão atmosférica baseia-se na solução das equações que descrevem o transporte do poluente. Estas equações são, em geral, equações diferenciais tridimensionais de segunda ordem que não apresentam solução analítica, de forma que são necessários métodos numéricos para a obtenção da sua solução. Entretanto, modelos matemáticos algébricos desenvolvidos a partir da simplificação das equações de transporte têm sido utilizados desde a década de 1960 e tiveram seu uso ampliado nas duas últimas décadas do século XX. Especialmente a partir da década de 1990, com a diminuição dos custos e o aumento do poder de processamento dos computadores, os modelos matemáticos resultantes das pesquisas científicas passaram

a ser amplamente utilizados pelo setor industrial e governamental para auxiliar a busca de soluções para problemas associados à poluição do ar (Versteeg e Malalasekera, 1995).

Além dos modelos baseados na descrição Euleriana do movimento, são empregados também modelos baseados na descrição Lagrangeana que calculam a trajetória das diversas partículas emitidas utilizando um referencial móvel, que acompanha cada uma das partículas. Estes modelos são ainda pouco utilizados, mas são mais adequados para calcular a distribuição de contaminantes em terrenos complexos e para incluir oscilações na direção do vento (Li *et al.* 2006).

Os modelos mais amplamente investigados e utilizados para a simulação da dispersão atmosférica de contaminantes são os modelos de pluma gaussiana. Conforme apresentado por Seinfeld & Pandis (1986), estes modelos podem ser obtidos ou deduzidos utilizando ambos os métodos de descrição do movimento (Euleriano ou Lagrangeano) desde que seja assumido que a distribuição lateral e vertical da concentração de contaminantes assume uma distribuição gaussiana, além de simplificações como: vento com direção constante, regime permanente, difusão turbulenta desprezível na direção do escoamento, turbulência homogênea, relevo uniforme e inexistência de obstáculos no escoamento.

A validade dos resultados fornecidos pelos modelos matemáticos da dispersão atmosférica de poluentes quando aplicado à dispersão de compostos odorantes é dependente da maneira como cada modelo leva em conta questões como o tempo de média, o tipo de fonte e a presença de obstáculos. O tempo de média utilizado está diretamente ligado à capacidade do modelo em prever o efeito das variações na concentração do composto devido à ação da turbulência e variação na direção do vento (Figura 1-1). O tipo de fonte (pontual, linha, área e volume) implica em diferentes padrões de emissão, influenciando no tipo de pluma originada. Chaminés são exemplos de fontes pontuais; uma lagoa de tratamento de efluentes é um exemplo de fonte de área; uma rodovia pode ser caracterizada como uma fonte-linha; um prédio com diversos pontos de exaustão nas laterais e parte superior é um exemplo de fonte-volume. Finalmente, a

influência desses parâmetros pode ser ainda mais acentuada quando da presença de obstáculos no campo de escoamento, uma vez que estes causam perturbações que afetam a dispersão de um poluente emitido. Dessa forma, a possibilidade de considerar a presença de obstáculos na modelagem gaussiana torna-se uma característica importante, uma vez que diversas fontes de compostos odorantes, como fábricas, indústrias químicas, criação de animais e restaurantes, estão associadas à presença de construções, como casas e prédios, não importando o tipo de ambiente (industrial, rural, ou urbano).

### **1.2.1 Tempo de média na modelagem da dispersão de poluentes**

Högström (1972) mostrou que mesmo quando o resultado da modelagem gaussiana da dispersão de odores indicasse uma concentração média inferior ao limite de detecção pelo período de 1 hora, vários picos do valor da concentração superiores ao limite de detecção podem ocorrer durante este período devido aos efeitos turbulentos, ocasionando eventos de odor, conforme indicado na Figura 1-1.

Os coeficientes de dispersão utilizados na modelagem gaussiana são em geral válidos para tempos de média entre 10 minutos a 1 hora. Sendo assim, modelos gaussianos tradicionais são inadequados à modelagem da dispersão de compostos odorantes.

Uma das soluções propostas é a utilização de fatores de correção, que tentam estimar a magnitude dos picos de concentração (valores máximos de concentração média para pequenos tempos de média). Várias formas desta solução podem ser empregadas, como, por exemplo, admitir que o valor de pico seja 10 vezes maior que o valor médio obtido, de forma que, caso a concentração média obtida seja 10% do limite de detecção, pode-se considerar que existirão picos detectáveis. Esta forma é conhecida como “fator 10” (Boeker *et al.*, 2000).

Uma formulação similar foi proposta por Smith (1973, citado por Schauburger *et al.*, 2001) para relacionar valores médios fornecidos pelo modelo gaussiano

e valores de pico (Equação 1-1) que inclui a influência da estabilidade atmosférica.

$$\frac{C_p}{C_m} = \left( \frac{t_m}{t_p} \right)^u \quad (1-1)$$

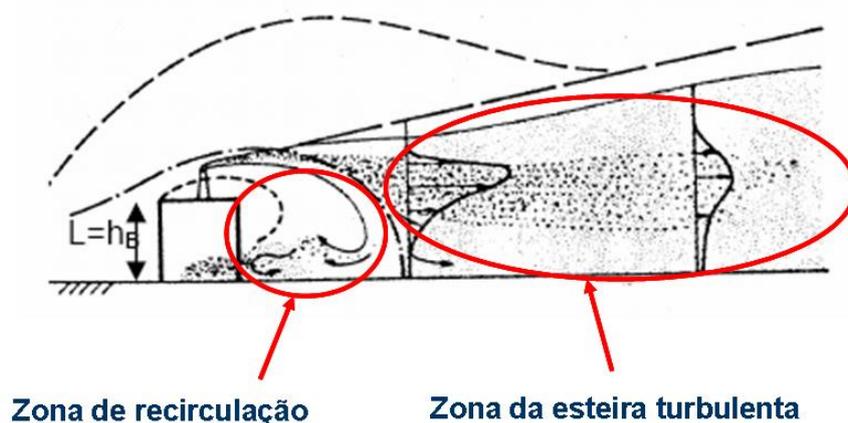
onde  $C_p$  é o valor de pico da concentração no tempo  $t_p$ ,  $C_m$  é o valor médio da concentração no tempo  $t_m$ ,  $t_p$  é o tempo equivalente à uma respiração (ex.: 1 a 5 segundos),  $t_m$  é o tempo de amostragem usado no modelo gaussiano (ex.: 10 minutos a 1 hora) e  $u$  é um expoente que depende da estabilidade atmosférica.

Gifford (1959) propôs que a dispersão de um poluente emitido para a atmosfera é o resultado do espalhamento do composto na pluma originada, bem como da flutuação desta pluma devido à variação da direção do vento. Esta teoria foi empregada com o modelo gaussiano, originando o modelo gaussiano de pluma flutuante (Murray *et al.*, 1978, Mussio *et al.* 2001 e De Melo Lisboa *et al.* 2006). Este modelo possibilita a determinação do tempo durante o qual um limiar de concentração é excedido.

### **1.2.2 Influência da presença de obstáculos na modelagem da dispersão atmosférica de poluentes**

Muitas fontes emissoras de compostos odorantes estão localizadas nas proximidades de construções, obstáculos que alteram profundamente o escoamento atmosférico, influenciando diretamente a dispersão do poluente emitido (Shauburger & Piringir, 2004; Santos *et al.*, 2005). A Figura 1-2 esquematiza os efeitos da presença de um obstáculo na dispersão de um poluente emitido nas suas proximidades. Observa-se a formação de duas regiões características, identificadas como zona de recirculação (também chamada de cavidade) e zona da esteira turbulenta. A zona de recirculação é caracterizada por alta turbulência e baixos valores de velocidade (Hosker, 1981), e pode ocasionar o abaixamento da altura da pluma emitida. A esteira de turbulência do prédio pode estender-se

por um comprimento superior a 10 vezes o comprimento característico do obstáculo (Shaubberger & Piringer, 2004). Conforme ilustrado na Figura 1-2, a presença do obstáculo afeta a dispersão, alterando o formato original da pluma de contaminantes e, conseqüentemente, a sua diluição (Shaubberger & Piringer, 2004).



**Figura 1-2: representação esquemática do escoamento e dispersão de contaminantes ao redor de um obstáculo considerando uma chaminé localizada sobre o obstáculo (Shaubberger & Piringer, 2004).**

Diversos estudos sobre a inclusão dos efeitos da presença de obstáculos na dispersão atmosférica de contaminantes foram grandemente incentivados pela indústria nuclear (Hosker, 1981), dado a necessidade de prever o comportamento de eventuais emissões radioativas a partir de reatores nucleares. A partir dos anos 70, vários estudos realizados em túnel de vento permitiram a elaboração de expressões empíricas que foram incluídas nos modelos gaussianos para considerar a influência de obstáculos desde formulações mais simples propostas por Turner, 1969; Gifford, 1960, 1968; Johnson *et al.*, 1975; Huber & Snyder, 1976; até formulações mais complexas como Scire *et al.*, 2000 e Schulman *et al.* (2000). Entretanto, a avaliação comparativa de algumas destas formulações e a aplicação conjunta com o modelo de pluma flutuante ainda não foram suficientemente investigadas (Mussio *et al.*, 2001 e Venkatram *et al.*, 2004).

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Neste capítulo, foram introduzidas a contextualização e a motivação relacionadas ao tema do estudo: o impacto causado pelos gases odorantes, a dispersão atmosférica destes compostos, a influência da presença de obstáculos no escoamento e na dispersão atmosférica de um poluente, a modelagem da dispersão de compostos odorantes e, finalmente, a modelagem matemática da dispersão de compostos odorantes. Em seguida, no Capítulo 2, são apresentados os objetivos do presente trabalho. O Capítulo 3 apresenta uma revisão da literatura. O Capítulo 4 contém a descrição da metodologia empregada e os resultados são apresentados e discutidos no Capítulo 5. Finalmente, o Capítulo 6 apresenta as conclusões e sugestões para estudos posteriores.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar a modelagem matemática da dispersão atmosférica de compostos odorantes com a presença de obstáculos.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar a aplicação da modelagem gaussiana de pluma flutuante conforme proposto por Murray *et al.* (1978) e Mussio *et al.* (2001), baseados nos trabalhos de Gifford (1959) e Högstrom (1968, 1972) na simulação da dispersão de um composto odorante com escoamento ao redor de um prédio.
- Avaliar o emprego de seis diferentes abordagens propostas por Turner (1969), Gifford (1960), Gifford (1968), Huber & Snyder (1976), Johnson (1975) e Scire *et al.* (2000) para a inclusão da influência do obstáculo na aplicação da modelagem gaussiana.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

Conquanto a modelagem matemática da dispersão de poluentes tem sido objeto de estudo desde meados do século passado, a aplicação dos modelos desenvolvidos, especialmente no campo da dispersão de compostos odorantes, é relativamente recente. A modelagem matemática tem sido especialmente mais intensamente desenvolvida a partir dos anos 80, com o advento de computadores com maior poder de processamento. O desenvolvimento do computador pessoal, juntamente com seu baixo custo e portabilidade, possibilitou a aplicação de modelos de dispersão nas mais variadas situações.

As referências selecionadas e citadas neste capítulo visam apresentar diferentes abordagens à modelagem matemática da dispersão de compostos odorantes, os estudos que levaram ao desenvolvimento do modelo gaussiano de pluma flutuante e trabalhos que objetivaram a inclusão da influência de obstáculos na dispersão de gases.

#### 3.1 CAMADA LIMITE PLANETÁRIA

A camada limite planetária (CLP) é a região da atmosfera situada próxima a superfície terrestre e diretamente influenciada por ela (Hanna *et al*, 1982; Seinfeld & Pandis, 1986). Nesta região está situada a maior parte das fontes emisoras de poluentes atmosféricos e nela se desenvolve a vida terrestre. O transporte de um poluente lançado na CLP sofre a ação da turbulência originada mecânica ou termicamente (resultado da presença de obstáculos, do tipo de relevo, bem como do aquecimento e resfriamento da superfície terrestre), bem como da velocidade do vento (Turner, 1994). Dependendo de parâmetros como os fluxos turbulentos de calor e quantidade de movimento, e gradientes de umidade e temperatura potencial, a CLP ainda pode ser dividida em 3 camadas, à saber camada superficial (podendo extender-se entre 30 e 50m), camada de mistura (até 500m) e camada de entranhamento (Seinfeld & Pandis, 1986).

### 3.2 MODELAGEM MATEMÁTICA DA DISPERSÃO DE COMPOSTOS ODORANTES

Schauberger *et al.* (2000) utilizaram o “*Austrian Odour Dispersion Model*” (AODM), um modelo regulatório baseado em modelagem gaussiana, para calcular a variação da distância de sensação de odor emitido por um prédio de criação de animais, comparando os resultados com dados de campo. A modelagem levou em conta a variação da emissão dos gases conforme as mudanças de temperatura e atividade dos animais, bem como as variações temporais das condições meteorológicas como direção e velocidade do vento, estabilidade atmosférica e temperatura durante um período de 2 anos. Os resultados fornecidos pelo modelo para a concentração média do composto odorante, obtidos para um tempo de média de 30 minutos foram transformados para valores instantâneos (tempo de média de 5 segundos) equivalentes ao tempo de uma respiração. Para tanto, foram utilizadas diferentes formulações para descrever a relação pico/média, conforme a distância da fonte, segundo proposto por Mylne & Mason (1991, citado por Schauburger *et al.*, 2000), a fim de considerar a influência das diferentes escalas de turbulência relativas ao tamanho da pluma. De modo geral, quanto maior a distância entre fonte e receptor, quanto maior a velocidade do vento e quanto mais estável a atmosfera, mais os valores de pico se aproximaram dos valores médios. Os resultados mostraram que a distância entre a fonte e o receptor para a qual ocorre a percepção de odor (distâncias de sensação de odor) apresentava uma variação mais fortemente dependente das condições meteorológicas do que das variações diárias e anuais das taxas de emissão. As menores distâncias de sensação de odor deram-se durante o verão, quando ocorrem temperaturas mais elevadas, ventos mais fracos e atmosfera instável. Já as maiores distâncias foram observadas no inverno, quando ocorrem temperaturas mais baixas, ventos mais fortes e atmosfera estável, diminuindo o espalhamento lateral da pluma nas proximidades da fonte, de forma a estender o alcance do impacto dos gases odorantes emitidos.

Schulman *et al.* (2000), desenvolveram o modelo “*Plume Rise Model Enhancements*” (PRIME) – ou “Melhorias no modelo de elevação de pluma”, baseado

em modelagem gaussiana, a fim de melhor incorporar os efeitos da presença de um obstáculo no escoamento. O modelo foi desenvolvido de modo a incorporar aspectos fundamentais associados ao efeito de obstáculos: o aumento nos coeficientes de dispersão da pluma devido à esteira de turbulência e uma redução na elevação da pluma, devido à combinação dos efeitos das linhas de correntes descendentes na região posterior do obstáculo e à captura da pluma pela esteira de turbulência. Para tanto, o modelo leva em conta a posição da fonte em relação ao prédio, calcula a intensidade da velocidade do escoamento, intensidades turbulentas e inclinação das linhas de corrente, como função do formato projetado do obstáculo. Um modelo numérico trata da elevação da pluma devido ao empuxo térmico e quantidade de movimento. O modelo PRIME considera a possibilidade de apenas uma fração do composto emitido ser capturado pela zona de recirculação do prédio, através do emprego de um modelo de duas plumas. Comparação com dados de túnel de vento e dados de campo mostraram melhoras significativas em relação ao modelo ISC3. De fato, o PRIME foi incluído no modelo ISC3 como opção para a modelagem da dispersão em presença de obstáculos e pode ser incluído em outros modelos, como o AERMOD e o CALPUFF.

Simms *et al.* (2000), discutiram os fatores importantes para a modelagem matemática da dispersão atmosférica de compostos odorantes, ressaltando a importância do tempo de média e dos efeitos da presença de obstáculos no escoamento. Os autores sugerem o emprego do modelo “Atmospheric Dispersion Modelling System” (ADMS), modelo gaussiano estacionário avançado de nova geração, desenvolvido na Inglaterra e que em sua formulação inclui os efeitos da presença de obstáculos, bem como possui um módulo para calcular a probabilidade da concentração do composto emitido exceder um limiar definido durante um intervalo de tempo determinado. O ADMS também é capaz de modelar plumas contínuas, emissões de curta duração e terrenos complexos.

Boeker *et al.* (2000), reforçaram a inadequação dos modelos gaussianos tradicionais, e fatores de correção como o “fator 10” e o modelo BAGEG para a predição da imissão de odor. No caso de fatores de correção, de posse de va-

lores médios de concentração, faz-se uma estimativa de que os valores de pico serão 10 vezes o valor médio, de forma que, se a concentração média ultrapassar  $0,1 \text{ OU/m}^3$ , pode-se afirmar que haverá impacto de odor. Já modelo BAGEG – modelo gaussiano desenvolvido por Krause (1988, citado por Boeker *et al.*, 2000) – prevê a ocorrência de eventos de odor utilizando uma transição variável, de forma que, quanto mais o valor médio for superior a  $0,1 \text{ OU/m}^3$ , maior será a probabilidade do valor de pico ultrapassar o limite de detecção.

Estes autores também afirmam que a aplicação de modelagem matemática com abordagem euleriana, citando como exemplo o modelo MISKAM – modelo que utiliza a dinâmica dos fluidos computacional para modelar a dispersão de poluentes em ambientes urbanos, também apresenta algumas limitações, como erros de difusão numérica e, no caso específico do modelo citado, impossibilidade de variação das condições de emissão e número limitado de pontos de malha a fim de reduzir o esforço computacional, o que pode levar a erros na quantificação dos efeitos de instabilidade e turbulência. Foi proposta a utilização do modelo NaSt3D, que possibilita o emprego distinto da abordagem euleriana e lagrangeana. Esse modelo utiliza a simulação numérica direta (DNS) para a solução do escoamento, possibilitando a modelagem dos efeitos turbulentos e sua influência na flutuação dos valores da concentração do poluente, o que torna o modelo apropriado para a utilização com compostos odorantes. O modelo utiliza alocação dinâmica de memória, podendo ser executado com processamento paralelo. Dados preliminares de validação indicaram que o modelo predisse de forma adequada a flutuação da concentração em experimentos realizados com o gás traçador.

Mussio *et al.* (2001) aplicaram um modelo de dispersão de compostos odorantes baseado na teoria da pluma flutuante proposto por Gifford (1959) e desenvolvido por Murray *et al.* (1978), e compararam os resultados do modelo a dados obtidos em campo. O modelo de pluma flutuante é um aperfeiçoamento da modelagem gaussiana tradicional, incluindo a flutuação do valor da concentração devido à oscilação da direção do vento, estabelecendo que a posição do centro da pluma poderá flutuar em torno do seu eixo de propagação de forma

aleatória, sendo que a probabilidade do centro da pluma ocupar determinada posição obedecerá também a uma distribuição gaussiana. O estudo foi desenvolvido para uma planta industrial, incorporando a presença de prédios no escoamento, com a utilização de um modelo de duas plumas (Johnson *et al.*, 1975) e dos parâmetros de dispersão total (Gifford, 1968). A fonte compreendia um conjunto de 64 chaminés, cada uma com 0,92 m de diâmetro e 19 m de altura, localizadas no alto de um prédio cuja altura era de 26,8 m. A comparação com os dados de campo mostrou que o modelo predisse melhor a concentração do composto odorante quanto maior foram os dados observados de intensidade e frequência de ocorrência, obtendo um bom desempenho nas regiões mais próximas à fonte. Para distâncias emissor-receptor superiores a 500 metros, o modelo tendeu a superestimar a concentração.

Brown e Fletcher (2003) utilizaram o software comercial CFX (versões 4.4 e 5.5) para a realização de um estudo sobre a formação de plumas de vapor condensado emitidos pelas chaminés de uma refinaria de alumínio e também sobre o impacto da dispersão de odor. O modelo, baseado na solução completa das equações de transporte, utilizou o modelo  $k-\epsilon$  (padrão) para incorporar os efeitos da turbulência atmosférica. Os resultados obtidos indicaram que a construção de uma nova chaminé diminuiria o impacto da formação de plumas visíveis e também das emissões odorantes. Devido à possibilidade de modelar o comportamento dessas plumas de vapor condensado e, assim, avaliar o efeito da condensação na elevação da pluma e impacto odorante, os autores recomendaram a aplicação deste tipo de modelo em detrimento a modelos como o "*The Air Pollution Model*" (TAPM) - modelo desenvolvido na Austrália cujos fundamentos são os mesmos que um código comercial de CFD, tal como o CFX, ou a modelos regulatórios como Ausplume e CALPUFF, originados da modelagem gaussiana.

Shauburger e Piringer (2004) estudaram a dispersão de compostos odorantes emitidos a partir de fontes cuja altura é inferior a 2,5 vezes a altura de um prédio próximo. Foram empregados 3 modelos: um modelo de caixa aplicado até distâncias equivalentes a 10 comprimentos de referência, um modelo de caixa

aperfeiçoado por Meroney (1982, citado por Shaubergger e Piringer, 2004) aplicado em todo o domínio, e, em distâncias acima de 10 comprimentos de referência, a modelagem gaussiana tradicional. O comprimento de referência, menor valor entre a altura e a largura do obstáculo perpendicular à direção do vento, foi equivalente à altura do prédio (cerca de 5 metros). Para a determinação dos prováveis valores de pico da concentração do odor, foi empregada para a determinação da relação pico/média, uma interpolação entre um valor calculado segundo a Equação 1-1 – empregado nas proximidades a fonte, e um valor fixo para distâncias acima de 100 metros. Os resultados obtidos mostraram que o modelo de caixa forneceu, para a região próxima ao prédio, valores até 10 vezes maiores que o modelo de Meroney; acima desta distância, os resultados do modelo de Meroney foram similares ao da modelagem gaussiana. Os autores expressam que a metodologia empregada pode ser usada como um passo inicial no estudo de casos semelhantes, a fim de detectar a possibilidade de ocorrência de eventos de odor e seu possível impacto na região próxima a fonte; em se constatando que os valores encontrados ultrapassam os limites recomendados métodos mais sofisticados devem ser empregados.

Venkatran *et al.* (2004), avaliaram a utilização de modelos de dispersão para o cálculo da concentração nas proximidades fontes baixas em ambiente urbano. O composto foi emitido por fontes localizadas na parte superior de um trailer e as concentrações foram medidas em diversos pontos localizados a uma distância máxima de 20m da fonte. Foram empregados os modelos ISCST-3 (*Industrial Source Complex Short Term*) e AERMOD (*American Meteorological Society/EPA Regulatory Model*), ambos utilizando o modelo PRIME para o tratamento da presença do obstáculo. Também foi empregado um modelo gaussiano que incorporava a flutuação da direção do vento em sua formulação. Os resultados obtidos mostraram que os modelos AERMOD e ISCST-3 superestimaram as concentrações máximas, ao mesmo tempo em que subestimaram os menores valores. Os resultados do modelo gaussiano utilizado foram mais próximos dos resultados medidos, especialmente quanto às concentrações máximas, chamando a atenção para a importância de considerar as flutuações na direção do vento. Apesar do AERMOD possuir um módulo para incluir os efei-

tos da flutuação da direção do vento, este não é usado nos cálculos para a região próxima ao obstáculo, quando utilizado conjuntamente ao modelo PRIME.

Schiffman *et al.* (2005) utilizaram um modelo euleriano-lagrangeano para prever a concentração de compostos odorantes emitidos por uma indústria cuja atividade envolve a criação de animais confinados, contendo diversas fontes. O modelo resolve primeiramente o escoamento com abordagem euleriana e então, as trajetórias das partículas de fluido com a abordagem lagrangeana. Como dados de entrada relativos à fonte, o modelo utiliza a intensidade de odor obtida através de olfatométrica e classificada em uma escala que varia entre 0 e 8. Através de uma equação exponencial proposta, os autores relacionaram a intensidade do odor conhecido com o número de partículas emitidas na fonte para sua simulação na modelagem. Os valores de intensidade do composto emitido foram determinados para condições diurnas e noturnas. A comparação com dados de campo mostrou que o modelo proposto é adequado para prever o impacto de emissões de compostos odorantes causado por futuros empreendimentos, bem como a eficácia das possíveis técnicas de redução desse impacto.

Wang *et al.* (2006) compararam os modelos CALPUFF e ISCST3, empregando-os na modelagem da concentração de odor originado de uma criação de gado para engorda. Os resultados obtidos foram comparados a medições em campo, realizadas com o emprego de câmaras de fluxo. Os modelos também foram utilizados para calcular a taxa de emissão de odor, a partir da intensidade odorante medida no receptor. Os resultados obtidos mostraram que o CALPUFF conseguiu prever de forma adequada a concentração, enquanto o ISCST3 a subestimou. Entretanto, ambos os modelos falharam em prever os picos de concentração. A taxa de emissão calculada a partir de medições de intensidade do odor foi diferente em cada modelo, sugerindo que, segundo os autores, cálculos de emissão fornecidos por diferentes modelos não são intercambiáveis. Além disso, os valores calculados para a emissão foram superiores aos medidos, podendo indicar que o método empregado para as medições

pode subestimar a taxa de emissão, fato que segundo os autores, necessita de investigações posteriores.

Li & Guo (2006) utilizaram um modelo CFD tridimensional para simular a dispersão de odor originado por uma granja suína com mais de 3000 cabeças, sob 30 diferentes condições meteorológicas. Uma abordagem lagrangeana, alimentada por um campo turbulento resolvido com o emprego da simulação de grandes vórtices foi empregada. Este modelo foi comparado com o modelo CALPUFF, empregado nas mesmas condições. Ambos os modelos forneceram resultados qualitativamente similares, porém a concentração foi superestimada pelo CFD em distâncias curtas (até 7,62m); acima desta distância, o comportamento foi semelhante para atmosfera instável e neutra, enquanto os resultados do CALPUFF foram maiores para atmosfera estável.

Drew *et al.* (2007), estudaram a influência da escolha do tempo de amostragem utilizado na modelagem da dispersão atmosférica de compostos odorantes empregando o modelo ADMS. Os autores empregaram diferentes tempos de amostragem, variando de 1 minuto a 1 hora. A comparação com dados de monitoramento de eventos de odor de uma comunidade mostrou que quanto maior o tempo de amostragem menor a capacidade do modelo em mostrar os picos de concentração e prever o impacto das emissões.

### 3.3 MODELO DE PLUMA FLUTUANTE

Gifford (1959) propôs que a dispersão de um poluente emitido para a atmosfera é o resultado da turbulência atmosférica e do movimento oscilatório devido à variação na direção do vento. O autor destacou a importância da modelagem de propriedades modeladas como a variância da concentração em cada ponto do domínio, bem como a possibilidade de obtenção da distribuição de frequências das concentrações. Dois parâmetros de dispersão distintos são empregados para caracterizar a turbulência e a oscilação da pluma, ambos obedecendo a uma distribuição gaussiana. Estes parâmetros, a saber, o desvio padrão da concentração no interior da pluma e o desvio padrão da flutuação do centro da

pluma em torno do eixo de propagação, relacionam-se ao desvio padrão da concentração usado no modelo gaussiano tradicional através de uma soma de variâncias, conforme indicado pela Equação 3-1:

$$\sigma^2 = \sigma_p^2 + \sigma_c^2 \quad (3-1)$$

onde  $\sigma$  é o desvio padrão baseado em longa duração, por exemplo obtido das curvas de Pasquill-Gifford (Pasquill, 1961),  $\sigma_p$  é o desvio padrão da dispersão dentro do segmento de pluma e  $\sigma_c$  é o desvio padrão da oscilação da posição do centro do elemento de pluma na direção do vento. A comparação com os poucos dados de campo disponíveis à época do desenvolvimento do modelo, mostrou sua eficácia para a previsão de parâmetros como a distribuição de frequência das concentrações observadas no receptor, bem como o ponto onde a concentração atinge o maior valor, em função da estabilidade atmosférica e do tempo de média.

Högstrom (1968, 1972), baseado na teoria do modelo de pluma flutuante de Gifford, desenvolveu um modelo para o estudo do impacto da dispersão de compostos odorantes onde o cálculo de  $\sigma_p$  foi deduzido, a partir da observação do comportamento de uma pluma através de sucessivas fotografias. Os resultados obtidos para a distribuição de frequência da concentração apresentaram boa concordância com dados de campo para regiões entre 2 e 5 km da fonte, sendo que os dados de campo foram subestimados por fatores de 1,2 e 1,7 respectivamente. Para distâncias de 10 e 20 km, a relação entre os dados medidos e os calculados foi 2,6 e 3,0, respectivamente.

Posteriormente, Murray *et al.* (1978) aprofundaram o trabalho de Högström de forma a simplificar sua aplicação e desenvolveram um modelo de pluma flutuante para uso em dispersão de compostos odorantes chamado TRC (*The Research Corporation of New England*). A equação é análoga ao modelo gaussiano tradicional, com a introdução do parâmetro de dispersão da pluma conforme calculado por Högström. Dos resultados obtidos, apenas alguns foram comparados com medições em campo. A comparação revelou que a concentração

média foi subestimada para receptores com distâncias superiores a 400 e 800 metros da fonte. O valor de pico da concentração mostrou boa concordância com a medição em campo para a distância de 457 m, porém superestimou o valor de pico em 838 m, porém os poucos dados experimentais apresentados não são suficientes para determinar a precisão do modelo.

Mussio *et al.* (2001) empregaram um modelo de pluma flutuante seguindo a teoria do modelo TRC, para estudar a dispersão de compostos odorantes em um ambiente industrial e compararam os resultados a dados obtidos em campo. Os resultados obtidos são comentados na seção 3.1.

Lisboa *et al.* (2006), desenvolveram um software para modelagem da dispersão atmosférica de compostos odorantes, empregando os estudos de Högström para levar em conta a influência da oscilação da direção do vento à diferentes soluções do modelo gaussiano, incluindo a modelagem de emissões contínuas e instantâneas (*puffs*). O modelo não incluiu os efeitos de presença de obstáculo. O objetivo é a obtenção de resultados através de uma ferramenta de simples e rápida aplicação, quando comparada a outros modelos numéricos. O modelo apresentou boa concordância com dados experimentais, resultado encontrado para todas as classes de estabilidade atmosférica.

### 3.4 TRATAMENTO PARA A PRESENÇA DE OBSTÁCULOS

Os efeitos da presença de obstáculos no escoamento atmosférico foram descritos na seção 1.2.2. O principal efeito causado pela presença do obstáculo é a diluição acentuada do material emitido na esteira de turbulência formada. Hosker (1981) identificou cinco abordagens para a inclusão dos efeitos da presença de obstáculos na modelagem gaussiana, descritas a seguir. Também é descrita uma sexta abordagem, citada por Scire *et al.* (2000).

Turner (1969) propôs o uso de uma “fonte virtual”, localizada a montante da fonte real. Como o obstáculo tende a aumentar as dimensões da pluma emitida a partir do ponto onde está localizado, esta fonte virtual é posicionada de forma

a, supondo que não existisse obstáculo, produzir uma pluma de dimensões semelhantes àquela observada na presença do prédio. Esta fonte virtual é caracterizada pela substituição dos sigmas  $y$  e  $z$  por novos coeficientes que serão utilizados na equação do modelo gaussiano. As dimensões do obstáculo influenciam os valores destes novos coeficientes.

Gifford (1960) propôs a modificação da equação gaussiana, de acordo com as dimensões do obstáculo e da velocidade do vento. O obstáculo causa uma rápida diluição do material emitido que se dispersa de forma proporcional à área frontal do prédio multiplicada pela velocidade do vento, corrigida por um fator adimensional ( $c$ ), que assume valores entre 0,5 e 2, segundo Gifford (1975, citado por Hosker, 1981 e Hanna *et al.*, 1982). Segundo Hosker (1981), valores entre 0,5 e 1 são adequados a casos nos quais ocorrem o recolamento do fluxo de ar às superfícies laterais e superiores do obstáculo (relação entre comprimento e altura com valores altos); para os casos em que o fluxo de ar não sofre o recolamento (baixa relação comprimento/altura), valores mais apropriados para  $c$  estão na faixa entre 2 e 4.

Gifford (1968) introduziu os “parâmetros de difusão total”,  $\Sigma_y$  e  $\Sigma_z$ . Estes novos parâmetros são utilizados no lugar de  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  na equação gaussiana e também são baseados na diluição do composto emitido num volume dependente das dimensões do prédio e velocidade do vento, de forma semelhante à abordagem proposta por Gifford (1960).

Huber e Snyder (1976) desenvolveram as chamadas “expressões melhoradas” para  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ . Os autores sugeriram duas formulações dependentes da relação entre a posição do receptor e a altura do obstáculo, usadas até distâncias equivalentes a 10 vezes a altura do obstáculo. Esta abordagem é utilizada nos modelos ISC3 e CALPUFF (Scire *et al.*, 2000)

Johnson *et al.* (1975), citado por Hosker (1981), Murray *et al.* (1978) e Mussio *et al.* (2001), introduziram uma abordagem baseada no fato de que em muitas situações práticas a pluma não é completamente capturada pela esteira do

prédio nem tampouco passará acima desta – ou seja, uma captura parcial irá ocorrer. Assim, um “modelo de duas plumas” foi desenvolvido, onde uma das plumas (emitidas na altura física da chaminé) não será capturada pela esteira do prédio, ao passo que a segunda fonte (emitida ao nível do solo) será completamente capturada. A parcela da massa total emitida a ser capturada pela esteira dependerá da relação entre a velocidade de saída dos gases emitidos e a velocidade do vento medida na altura da chaminé. Este modelo foi denominado “*Split-h*”. Esta abordagem foi utilizada em conjunto com a abordagem proposta Gifford (1968) no modelo TRC (Murray *et al.*, 1978) e também no modelo empregado por Mussio *et al.* (2000).

Scire *et al.* (2000) descrevem a abordagem de Schulman-Scire (Scire & Schulman, 1980; Schulman & Hanna, 1986), que atribui um decaimento linear à influência do obstáculo no aumento dos coeficientes de dispersão, além de levar em conta a influência do abaixamento da pluma causado pelo obstáculo em diminuir os efeitos do empuxo térmico e da quantidade de movimento no aumento da altura da pluma. Esta abordagem também é utilizada no modelo CALPUFF.

### 3.5 SÍNTESE DA REVISÃO DA LITERATURA

Os estudos apresentados mostram diferentes abordagens para a modelagem da dispersão de compostos odorantes. Uma questão sempre presente foi a necessidade de adequação dos modelos originalmente utilizados para modelar a dispersão de poluentes para a aplicação em dispersão de odor. Uma das questões abordadas foi a necessidade da obtenção de uma relação entre valores de pico e valores médios de concentração do poluente emitido. Foram utilizados modelos gaussianos, eulerianos e lagrangeanos, e empregadas diferentes abordagens para a modelagem da turbulência e seus efeitos, bem como da presença de obstáculos. A fim de incorporar o efeito da oscilação dos valores da concentração devido aos efeitos turbulentos ocorreu o desenvolvimento de modelos baseados na teoria da pluma flutuante proposta por Gifford (1959). A

introdução da influência de um obstáculo no escoamento foi considerada com a utilização de diferentes abordagens, possibilitando uma maior eficácia da utilização da modelagem gaussiana no estudo da dispersão de odorantes quando empregado em regiões próximas a obstáculos. Assim, o presente trabalho visa empregar o modelo gaussiano de pluma flutuante para estudar a dispersão de um composto odorante emitido em presença de um obstáculo. Serão utilizadas as diferentes abordagens citadas para levar em conta os efeitos do obstáculo.

## 4 METODOLOGIA

Este capítulo descreverá a metodologia empregada no presente trabalho. A fim de modelar a dispersão atmosférica de um composto odorante emitido por uma chaminé em presença de obstáculo será empregada a modelagem gaussiana de pluma flutuante (Gifford, 1959; Murray *et al.*, 1978; Mussio *et al.*, 2001). O tratamento da presença de um obstáculo para o escoamento será realizado através de seis abordagens distintas, conforme indicadas por Hosker (1981) e Scire *et al.* (2000). Os resultados serão comparados com dados experimentais obtidos através de modelagem em túnel de vento realizada por Aubrun, Leitl e Schatzmann (Aubrun & Leitl, 2004).

A modelagem gaussiana de pluma flutuante foi escolhida por aliar facilidade de implementação e rapidez de execução à modelagem da flutuação da concentração devido a efeitos da oscilação na direção do vento.

O modelo foi empregado na mesma situação modelada no experimento em túnel de vento, utilizando as mesmas condições de contorno, o que permitirá a comparação direta com os resultados obtidos.

Como a facilidade de implementação foi um dos aspectos principais levados em conta, o presente trabalho não inclui outras abordagens para a presença de obstáculos, tais como as empregadas em modelos gaussianos como o PRIME e o ADMS.

A seguir serão apresentadas as formulações do modelo de pluma flutuante e do tratamento matemático para incluir a influência do obstáculo. Serão apresentadas também, detalhes da implementação numérica do modelo e dos dados experimentais utilizados para comparação com o modelo matemático.

### 4.1 MODELO GAUSSIANO DE PLUMA FLUTUANTE

Gifford (1959) propôs que a dispersão da pluma pode ser separada em dois componentes, a saber, espalhamento e flutuação, cada um deles descrito por

uma distribuição gaussiana. Este conceito é mostrado na Figura 4-2, onde (a) é a pluma avaliada por um período de longa duração (10 minutos a 1 hora), representada por uma série de discos elípticos cujos tamanhos dependem da concentração. Em (b), o tempo de observação é menor, de forma que os discos também são menores e possuem seus centros deslocados do eixo-x como resultado da flutuação. Um observador fixo no espaço veria diferentes valores de concentração durante um intervalo de tempo dependendo da posição de cada disco ou elemento de pluma e da dispersão do contaminante dentro de cada disco. Em (c), vê-se os desvios padrões usados no modelo. Segundo Gifford, eles estão relacionados aos desvios padrões do modelo gaussiano tradicional de longa duração através da Equação 4-1,

$$\sigma^2 = \sigma_p^2 + \sigma_c^2 \quad (4-1)$$

onde  $\sigma$  é o desvio padrão baseado em longa duração, por exemplo obtido das curvas de Pasquill-Gifford (Pasquill, 1961),  $\sigma_p$  é o desvio padrão da dispersão dentro do segmento de pluma e  $\sigma_c$  é o desvio padrão da flutuação da posição do centro do elemento de pluma ao longo do eixo de propagação do vento.

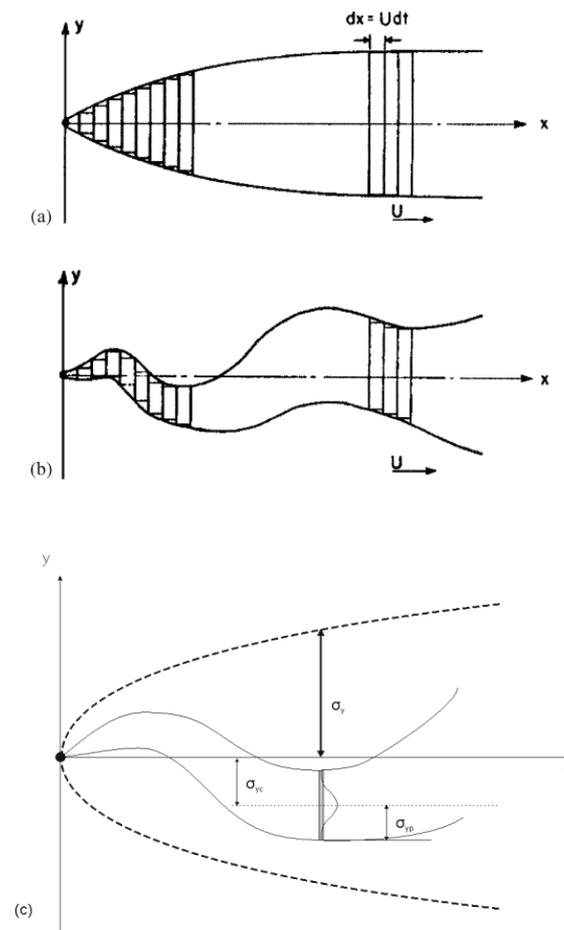


Figura 4-1: (a) representação da dispersão horizontal de uma pluma através de discos elípticos correspondendo ao modelo gaussiano não flutuante, válido para um tempo de observação longo, por exemplo, 1 hora (Gifford, 1959); (b) representação da dispersão horizontal da pluma no modelo de pluma flutuante – os centros dos discos elípticos variam a sua posição ao longo do tempo de observação (Gifford, 1959); (c) desvios padrões empregados no modelo da pluma flutuante para a direção y – parâmetros análogos são válidos para a direção z.

A formulação do modelo é mostrada na Equação (4-2):

$$\bar{C}(x, y, z) = \frac{Q}{\pi \bar{u}_H \sigma_{yp} \sigma_{zp}} \exp\left(-\frac{(y - y_c)^2}{2\sigma_{yp}^2}\right) \left[ \exp\left(-\frac{(z_c - z)^2}{2\sigma_{zp}^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z_c + z)^2}{2\sigma_{zp}^2}\right) \right] \quad (4-2)$$

Onde  $\bar{C}$  é a concentração modelada,  $Q$  é a taxa de emissão do composto,  $\bar{u}_H$  é a velocidade média do vento medida na altura do ponto de emissão,  $y$  e  $z$  são as distâncias perpendiculares à direção de propagação do vento (eixo-x) entre o receptor e os eixos  $y$  e  $z$ ;  $y_c$  e  $z_c$  são as posições instantâneas do centro do segmento de pluma nas direções  $y$  e  $z$ . Assim como no modelo gaussiano tradicional, considera-se insignificante a difusão na direção do escoamento. A equação do modelo também pode ser adaptada para obter-se o resultado em termos de intensidade de odor no receptor (expressa em OU) concentração em unidades odorantes, substituindo-se  $Q$  por  $V_0 N_0$ , onde  $V_0$  é a vazão volumétrica da fonte, e  $N_0$  é a intensidade do odor na fonte, expressa em OU.

Baseada na variação da posição do centro do elemento de pluma, a flutuação da pluma pode ser simulada através de um gerador de números aleatórios, de forma a ser obtida uma série de valores de concentração para uma dada posição de receptor durante um intervalo de tempo definido. Esta abordagem possibilita a determinação da percentagem de tempo durante a qual a concentração encontrou-se acima de um determinado limite, bem como a obtenção da distribuição das freqüências de ocorrência dos vários valores de concentração no ponto onde se localiza o receptor.

## 4.2 POSIÇÃO INSTANTÂNEA DO CENTRO DA PLUMA

Para cada ponto estudado, a posição instantânea do centro da pluma em relação aos eixos  $y$  e  $z$  é gerada com o emprego de um gerador de números aleatórios, segundo uma distribuição normal cujos desvios padrões equivalem a  $\sigma_{y_c}$  e  $\sigma_{z_c}$ .

O procedimento para geração de números aleatórios no Fortran (linguagem computacional na qual o modelo foi implementado) obedece a uma distribuição uniforme, na qual a probabilidade de ocorrência de um número dentro de um determinado intervalo é igual para todos os números. Para o modelo da pluma flutuante, necessita-se de uma distribuição normal ou gaussiana, na qual a

probabilidade de ocorrência de um número não é constante, com a curva da função densidade de probabilidade possuindo a forma característica de um sino.

A fim de obterem-se números aleatórios que obedecem à distribuição normal, foi utilizado o conceito do teorema do limite central. Este teorema estabelece que, a distribuição de uma média tende a ser normal, mesmo que a distribuição da qual esta média foi computada não apresente uma distribuição normal. Desta forma, a distribuição normal obtida tem a mesma média que a distribuição original da qual as médias foram tomadas, bem como variância igual à variância original dividida pelo tamanho da amostra.

A implementação é efetuada da seguinte forma: utilizando-se a função de geração de números aleatórios do Fortran, cuja distribuição é uniforme, são gerados 64 números aleatórios e computada a média destes números. Esta média será o número utilizado para a obtenção da posição instantânea da pluma. De acordo com o teorema do limite central (TLC), o conjunto das várias médias calculadas obedecerá a uma distribuição normal. Este procedimento será realizado de forma independente para as flutuações vertical e horizontal. Quanto maior a quantidade de números gerados para o cômputo da média, melhor será a distribuição gerada; a observação das tabelas 4-1 e 4-2, bem como das figuras 4-2 e 4-3 mostra que a utilização de 64 números mostrou-se uma boa opção. Os números obtidos ( $pos_y$ , para a flutuação horizontal e  $pos_z$ , para a flutuação vertical), que estarão contidos no intervalo (0,1), segundo o TLC, obedecerão a uma distribuição normal, centrada em 0,5. A variância da distribuição uniforme é dada por:

$$V = \frac{(b-a)^2}{12} \quad (4-3)$$

onde a e b são os limites inferior e superior do intervalo da distribuição. No caso da distribuição uniforme utilizada no Fortran, a variância será:

$$V_U = \frac{(1-0)^2}{12} = \frac{1}{12} = 0,8333333 \quad (4-4)$$

Conseqüentemente, segundo o TLC, a variância da distribuição normal obtida, que corresponde a um desvio padrão  $S_N = 0,036$  será:

$$V_N = \frac{V_U}{64} = \frac{0,8333333}{64} = 0,001302 \quad (4-5)$$

O objetivo na aplicação do modelo é permitir que a pluma oscile em torno da sua posição média e possua um desvio padrão igual a  $\sigma_p$ . No eixo y (horizontal), a posição média da pluma corresponde sempre a  $y=0$ . Sendo assim, subtraindo-se 0,5 de  $pos_y$ , ajusta-se a distribuição de forma a que esta esteja centrada em zero. Para que a distribuição possa apresentar o desvio padrão igual a  $\sigma_{yc}$ , multiplica-se a variável  $pos_y$  por  $\sigma_{yc}/S_N$ . Sendo assim, a transformação realizada para obter-se a posição instantânea do centro da pluma em relação ao eixo-y ( $y_c$ ) é:

$$y_c = (\sigma_{yc}/S_N) (pos_y - 0,5) \quad (4-6)$$

Para a posição vertical instantânea do centro da pluma, deseja-se que a flutuação ocorra em torno do valor da altura média da pluma,  $h$ . Sendo assim, o valor  $(h - 0,5)$  é somado ao número gerado. Semelhantemente ao que foi feito para a flutuação em y, a transformação para a obtenção da posição vertical instantânea do centro da pluma ( $z_c$ ) é:

$$z_c = (\sigma_{zc}/S_N) (pos_z + h - 0,5) \quad (4-7)$$

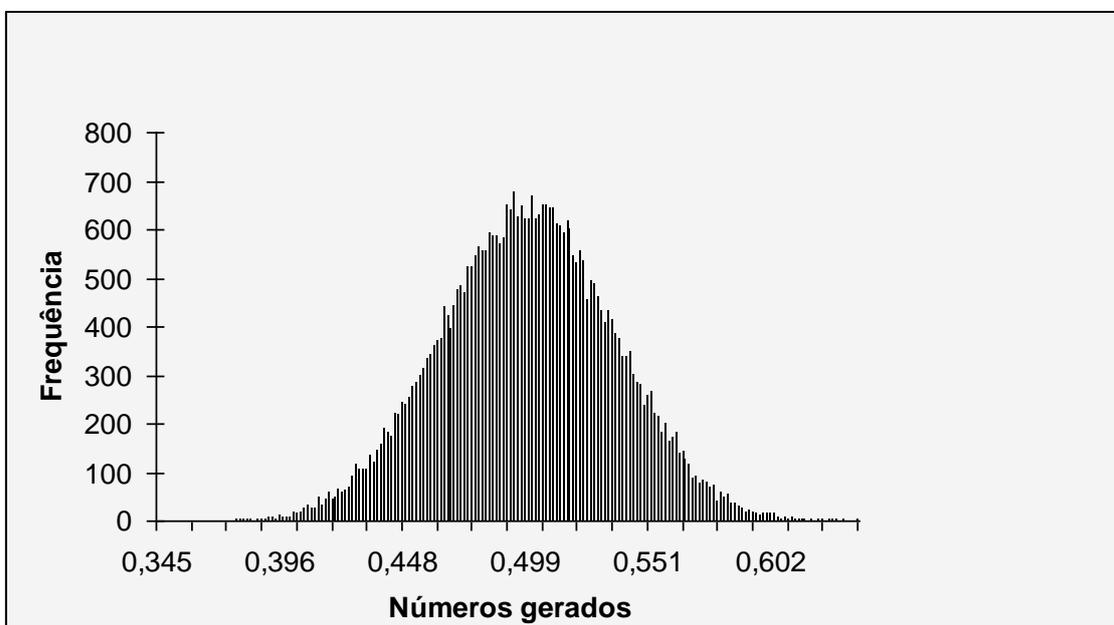
As Tabelas 4-2 e 4-3 à seguir mostram a análise estatística dos números aleatórios gerados em comparação aos dados de uma distribuição normal. Estes dados são complementados pelas Figuras 4-2 e 4-3, que mostram a distribuição de freqüência das séries geradas.

**Tabela 4-1: Comparação da distribuição de números gerados para a posição y e da distribuição normal (gaussiana) em termos de desvios padrões (DP).**

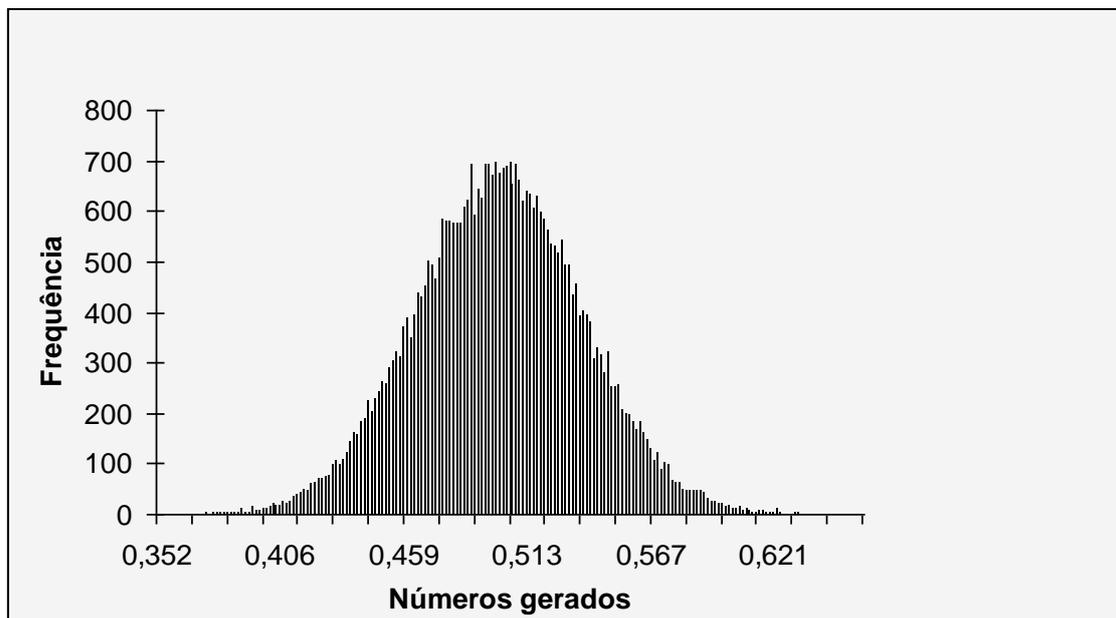
	<i>gerado</i>	<i>normal</i>
± 1DP	67,90%	68,30%
± 2DP	95,57%	95,50%
± 3DP	99,89%	99,70%

**Tabela 4-2: Comparação da distribuição de números gerados para a posição z e da distribuição normal (gaussiana) em termos de desvios padrões (DP).**

	<i>gerado</i>	<i>normal</i>
± 1DP	68,30%	68,30%
± 2DP	95,49%	95,50%
± 3DP	99,86%	99,70%



**Figura 4-2: histograma mostrando a distribuição dos números aleatórios gerados para originar a flutuação em y.**



**Figura 4-3: histograma mostrando a distribuição dos números aleatórios gerados para originar a flutuação em z.**

Testes comparando a execução do modelo com diferentes números de posições geradas (1.000, 3.000 ou 24.000) mostraram que a tendência dos resultados obtidos não é alterada, muito embora o tempo de execução seja diretamente ligado à quantidade de posições geradas. O modelo TRC (Murray *et al.*, 1978) utilizava um tempo de simulação de 1 hora, gerando entre 200 e 1000 posições. Mussio *et al.* (2001) empregaram o seu modelo utilizado 2000 posições.

### 4.3 ALTURA MÉDIA DA PLUMA

O abaixamento da pluma devido aos efeitos aerodinâmicos da chaminé e do obstáculo é tratado segundo os procedimentos propostos por Briggs (1973), conforme indicados por Hosker (1981) e descritos a seguir.

O abaixamento da pluma devido à chaminé (*stack tip downwash*) ocorrerá sempre que a velocidade da emissão for menor ou igual a 1,5 vezes a velocidade do vento na altura da chaminé, sendo que a altura da pluma após o abaixamento será determinada por:

$$h' = h_s + 2d_s \left[ \frac{v_s}{u_s} - 1,5 \right] \quad (4-8)$$

onde:  $h'$  é a altura da pluma devido ao *downwash*;  $h_s$  é a altura da chaminé;  $d_s$  é o diâmetro interno da chaminé;  $v_s$  é a velocidade de lançamento dos gases da chaminé; e  $u_s$  é a velocidade do vento medida na altura da chaminé.

A altura corrigida devido aos efeitos do obstáculo e da chaminé ( $h''$ ) é então calculada (onde  $H$  é a altura do obstáculo):

$$h'' = h' + 1,5\xi_b \quad \text{para } [h' < H] \quad (4-9)$$

$$h'' = 2h' - (H + 1,5\xi_b) \quad \text{para } [H \leq h' \leq H + 1,5\xi_b] \quad (4-10)$$

$$h'' = h' \quad \text{para } [h' \geq H + 1,5\xi_b] \quad (4-11)$$

onde  $\xi_b$  é o comprimento característico do obstáculo (menor dimensão entre altura e largura).

Após determinado o valor de  $h''$ , pode-se determinar se a pluma será capturada pela zona de recirculação do obstáculo:

- Se  $h'' > 0,5 \xi_b$ , a pluma permanece elevada, com altura efetiva igual a  $h''$ ;
- Se  $h'' < 0,5 \xi_b$ , a pluma será capturada pela zona de recirculação do prédio – considera-se a pluma como originada de uma fonte ao nível do solo (altura efetiva igual a zero).

A sugestão acima, de que a pluma ao ser capturada pela zona de recirculação do prédio passa a comportar-se como tendo sido emitida ao nível do solo, por-

tanto com altura igual a zero, ocasiona uma divisão por zero em um dos cálculos utilizados nos procedimentos de Högström para o cálculo dos coeficientes de dispersão do segmento de pluma. Sendo assim, a fim de evitar erros na execução do programa, no caso da pluma capturada pela zona de recirculação do prédio, o valor utilizado para a altura inicial da pluma não pode ser muito pequeno. Considerando-se que o efeito da zona de recirculação do prédio é de misturar o composto emitido por ela capturado devido aos vórtices turbulentos originados, a pluma capturada foi modelada como possuindo altura inicial equivalente à metade da altura do obstáculo, em conformidade ao adotado por Mussio (2001).

A altura da pluma também pode ser afetada pela velocidade de saída dos gases e pelo empuxo térmico, dependendo da temperatura e velocidade na qual são emitidos. No presente trabalho, o gás é emitido pela chaminé com temperatura igual à do ambiente e com baixa velocidade ( $< 10\text{m/s}$ ), o que, segundo a aplicação dos procedimentos propostos por Briggs (1969, 1971, 1974), conforme indicados por Seinfeld e Pandis (1996), implica na não existência de elevação da pluma devido ao empuxo térmico e velocidade de emissão. Entretanto, uma das abordagens utilizadas para considerar a presença do obstáculo, fundamenta-se na inclusão da influência do abaixamento na pluma nos efeitos térmicos e de velocidade de emissão, segundo procedimento descrito no item 6 da seção 4.5.

## 4.4 COEFICIENTES DE DISPERSÃO

### 4.4.1 Coeficientes de dispersão de longa duração ( $\sigma_y$ e $\sigma_z$ )

Os coeficientes de dispersão de longa duração,  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  – assim chamados por referirem-se a um tempo de observação bem maior do que o tempo de uma respiração – são obtidos a partir das equações de Briggs (1973) (Tabela 4-3). Estes parâmetros são válidos para um tempo de observação de 10 minutos e dependem da estabilidade atmosférica. A Tabela 4-3 mostra as equações se-

gundo as classes de estabilidade atmosférica segundo a classificação de Pasquill (1962, citado por Seinfeld e Pandis, 1986). Esta classificação divide a estabilidade atmosférica em 6 classes, variando de A a F, sendo que A corresponde à maior instabilidade, D corresponde à condição neutra e F à condição moderadamente estável. No presente trabalho, a situação considerada correspondeu a uma atmosfera neutra (classe D) em ambiente rural.

**Tabela 4-3: equações de Briggs para o cálculo dos coeficientes de dispersão em função da estabilidade atmosférica, para meios rural e urbano (Hanna *et al.*, 1982)**

Classe de estabilidade	Coeficientes de dispersão	
	$\sigma_y (m)$	$\sigma_z (m)$
<b>Ambiente Rural</b>		
<b>A</b>	$0,22 x (1 + 0,0001 x)^{-1/2}$	$0,20 x$
<b>B</b>	$0,16 x (1 + 0,0001 x)^{-1/2}$	$0,12 x$
<b>C</b>	$0,11 x (1 + 0,0001 x)^{-1/2}$	$0,08 x (1 + 0,0002 x)^{-1/2}$
<b>D</b>	$0,08 x (1 + 0,0001 x)^{-1/2}$	$0,06 x (1 + 0,0015 x)^{-1/2}$
<b>E</b>	$0,06 x (1 + 0,0001 x)^{-1/2}$	$0,03 x (1 + 0,0003 x)^{-1}$
<b>F</b>	$0,04 x (1 + 0,0001 x)^{-1/2}$	$0,016x (1 + 0,0003 x)^{-1}$
<b>Ambiente Urbano</b>		
<b>A-B</b>	$0,32 x (1 + 0,0004 x)^{-1/2}$	$0,24 x (1 + 0,001 x)^{1/2}$
<b>C</b>	$0,22 x (1 + 0,0004 x)^{-1/2}$	$0,20 x$
<b>D</b>	$0,16 x (1 + 0,0004 x)^{-1/2}$	$0,14 x (1 + 0,0003 x)^{-1/2}$
<b>E-F</b>	$0,11 x (1 + 0,0004 x)^{-1/2}$	$0,08 x (1 + 0,0015 x)^{-1/2}$

Esta formulação será utilizada na obtenção dos desvios padrões de longa duração para a pluma não capturada pela esteira de turbulência do prédio, bem como para a determinação da influência do obstáculo através das modificações destes desvios padrões empregadas nas abordagens de Turner (1969), Gifford (1960 e 1968) e Huber & Snyder (1975).

#### 4.4.2 Coeficientes do segmento de pluma ( $\sigma_{yp}$ e $\sigma_{zp}$ )

Estes coeficientes são relacionados à dispersão do composto emitido dentro de cada segmento de pluma. Högström (1972), baseado em uma série de experimentos onde a fumaça emitida por uma chaminé foi fotografada durante um certo tempo de forma a identificar a mudança nas dimensões da pluma à medida que esta se afastava da fonte, desenvolveu um método para o cálculo destes segmentos,  $\sigma_{yp}$  e  $\sigma_{zp}$ , os quais serão funções da distância da fonte ao receptor, da estabilidade atmosférica e, no caso de  $\sigma_{zp}$ , da altura da pluma.

$$\sigma_{zp} = 0,36 \frac{w_a^*}{u_a} \frac{\sqrt{2[e^{(-0,65a_0x)} + 0,65a_0x - 1]}}{0,65a_0(1 + 2,2 \times 10^{-2} \left(\frac{h}{87}\right)^{0,62} s)} \quad \begin{array}{l} \text{[atmosfera estável e neutra]} \\ (4-12) \end{array}$$

$$\sigma_{zp} = 0,554 \frac{i}{b_0} \sqrt{2 \left[ e^{-0,65b_0x} + 0,65b_0x - 1 \right]} \quad \begin{array}{l} \text{[atmosfera instável]} \\ (4-13) \end{array}$$

$$\sigma_{yp} = 50 \sqrt{2 \left[ e^{-10^{-3}x} + 10^{-3}x - 1 \right]} \left( \frac{1}{1 + 10^{-2}s} \right) \quad \begin{array}{l} \text{[todas as classes de estabilidade]} \\ (4-14) \end{array}$$

onde:

$h$  é altura média do centro da pluma (m);  $x$  é a posição do receptor (eixo x) (m);  $s$  é o parâmetro de estabilidade (eq. 4-16);  $a_0$  e  $b_0$  são parâmetros empíricos

(eqs. 4-18 e 4-19);  $W_a^*/\bar{u}_a$  equivale ao perfil logaritmo da velocidade do vento até 500m (eq. 4-17);  $i$ : intensidade da componente vertical da turbulência atmosférica, calculada segundo a Equação 4-15:

$$i = \frac{W_a^*}{\bar{u}_a} + 0,33 \left( 1 - \frac{\bar{u}}{16} \right)^3 \quad (4-15)$$

O parâmetro de estabilidade  $s$  é calculado como:

$$s = \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} / u_f^2 \right) \cdot 10^5 \quad (4-16)$$

onde  $\partial \theta / \partial z$  é o gradiente vertical da temperatura potencial ao nível do centro da pluma e  $u_f$  representa a velocidade do vento no topo da camada de mistura.

A relação  $W_a^*/\bar{u}_a$  pode ser calculada através da equação abaixo:

$$\frac{W_a^*}{\bar{u}_a} = \left( 4,31 \log \frac{h}{Z_0} \right)^{-1} \quad (4-17)$$

Onde  $h$  corresponde a altura do centro da pluma e  $Z_0$  é o coeficiente de rugosidade.

Os parâmetros empíricos  $a_0$  e  $b_0$  são determinados como:

$$a_0 = \frac{W_a^*}{\bar{u}_a} \frac{1}{0,4hN_{pa}} \quad (4-18)$$

$$b_0 = a_0 \left( \frac{\bar{u}_s}{16} \right)^{0,8} \quad (4-19)$$

onde  $N_{pa}$  é função do coeficiente de rugosidade ( $Z_o$ ) : 1,0 para terrenos planos ( $Z_o \approx 0,1$  m) e 0,5 para as grandes rugosidades (terrenos com muitas construções) [adimensional] e  $\bar{u}_s$  é a velocidade média do vento na altura média do centro da pluma (m/s);

Diferentes formulações propostas para a determinação dos parâmetros de dispersão de longa duração,  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  (Pasquill, 1961; Briggs, 1973) são baseadas em diferentes tempos de amostragem (Turner, 1994; Hanna *et al.*, 1982). Os parâmetros calculados segundo Briggs (1973), usados no presente trabalho são válidos para um tempo de 10 minutos. Estes parâmetros estão relacionados à turbulência e ao efeito da oscilação de longa duração na direção do vento. Quanto maior o tempo de observação, maior a probabilidade de mudança na direção do vento e, conseqüentemente maior o espalhamento do contaminante.

Os parâmetros de Högström são válidos para um tempo de amostragem de 1 hora (Högström, 1972). O código computacional elaborado para o presente trabalho permite a determinação, pelo usuário, do tempo da simulação. A fim de manter a coerência nos cálculos de  $\sigma_{yc}$ , é empregada a Equação 4-20 (Hanna *et al.*, 1982), a fim de que os parâmetros  $\sigma_y$  e  $\sigma_{yp}$  sejam adaptados para o mesmo tempo de simulação empregado:

$$\frac{\sigma_{yd}}{\sigma_{ye}} = \left( \frac{T_{sd}}{T_{se}} \right)^q \quad (4-20)$$

Onde  $d$  e  $e$  representam dois casos distintos cujos tempos de observação são ( $T_{sd}$  e  $T_{se}$ ) diferentes, sendo que  $T_{se}$  corresponde ao tempo para o qual se conhece o valor de  $\sigma_y$ . O expoente  $q$  vale entre 0,25 e 0,3 para  $1\text{h} < T_{sd} < 100\text{h}$  e vale aproximadamente 0,2 para  $3\text{ min} < T_{sd} < 1\text{h}$ .

Para o valor de  $\sigma_z$ , não há correção proposta. Turner (1982) indica que, na maior parte das situações, não há flutuações de longa duração para o vento na direção vertical.

#### 4.4.3 Coeficientes da flutuação do centro do segmento de pluma ( $\sigma_{yc}$ e $\sigma_{zc}$ )

Estes coeficientes referem-se à flutuação da pluma em torno do eixo da direção do vento. O método para o cálculo destes parâmetros,  $\sigma_{yc}$  e  $\sigma_{zc}$  vem da Equação (4-1):

$$\sigma_{yc} = \sqrt{(\sigma_y^2 - \sigma_{yp}^2)} \quad (4-21)$$

$$\sigma_{zc} = \sqrt{(\sigma_z^2 - \sigma_{zp}^2)} \quad (4-22)$$

## 4.5 TRATAMENTO PARA A PRESENÇA DE OBSTÁCULOS

O presente trabalho vai comparar seis diferentes abordagens empregadas com a modelagem gaussiana, conforme listadas por Hosker (1981) e Scire *et al.* (2000). Elas são basicamente modificações dos coeficientes, ou parâmetros, de difusão ( $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ ), de forma a levar em conta a difusão extra causada pelo obstáculo.

### 4.5.1 Abordagem 1 (Turner, 1969)

Esta abordagem, proposta por Turner (1969), faz uso de uma “fonte virtual”, localizada a montante da fonte real. Esta fonte virtual é caracterizada pelos coeficientes calculados de acordo com as equações abaixo, onde  $L$  = comprimento do prédio,  $H$  = altura do prédio e  $W$  = largura do prédio:

$$\sigma_{y0} \approx 2W/4,3 \quad \text{e} \quad \sigma_{z0} \approx 2H/2,15 \quad [\text{para } L/H < 1] \quad (4-23)$$

$$\sigma_{y0} \approx W/4,3 \text{ e } \sigma_{z0} \approx H/2,15 \quad [\text{para } L/H > 1] \quad (4-24)$$

A localização da fonte virtual é encontrada fazendo-se  $\sigma_y(x_{y0}) = \sigma_{y0}$  e  $\sigma_z(x_{z0}) = \sigma_{z0}$

A aplicação do modelo gaussiano é feita com a modificação dos parâmetros de longa duração, de forma que  $\sigma_y = \sigma_y(x+x_{y0})$  e  $\sigma_z = \sigma_z(x+x_{z0})$ , onde  $x$  é a distância entre o receptor e a face posterior do obstáculo.

### 4.5.2 Abordagem 2 (Gifford, 1960)

Esta abordagem, descrita por Gifford (1960), modifica a equação gaussiana, dependendo das dimensões do obstáculo e da velocidade do vento (Equação 4-26). A influência do obstáculo é a de causar uma rápida diluição do material emitido, proporcional à  $c$  vezes a área frontal do prédio ( $A_p$ ) multiplicada pela velocidade do vento ( $\bar{u}_H$ ):

$$\bar{C}(x, y, z) = \frac{Q}{(\pi\sigma_{yp}\sigma_{zp} + cA_p)\bar{u}_H} \exp\left(-\frac{(y-y_c)^2}{2\sigma_{yp}^2}\right) \left[ \exp\left(-\frac{(z_c-z)^2}{2\sigma_{zp}^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z_c+z)^2}{2\sigma_{zp}^2}\right) \right] \quad (4-25)$$

onde,

$$c = \begin{cases} 1,0 & L/H \leq 1 \text{ (ocorre recolamento do fluxo à superfície do prédio)} \\ 3,0 & L/H > 1 \text{ (não ocorre recolamento do fluxo à superfície do prédio)}. \end{cases}$$

Os parâmetros de dispersão  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ , são determinados em função da distância entre a face posterior do prédio e a posição do receptor ao longo da direção principal do vento.

### 4.5.3 Abordagem 3 (Gifford, 1968)

A terceira abordagem, também descrita por Gifford (1968), introduz os “parâmetros de dispersão total”,  $\Sigma_y$  e  $\Sigma_z$ . Estes novos parâmetros são utilizados na equação da pluma gaussiana em substituição a  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ , e são determinados pelas seguintes equações:

$$\Sigma_y = [\sigma_y^2 + cA_p / \pi]^{1/2} \quad (4-26)$$

$$\Sigma_z = [\sigma_z^2 + cA_p / \pi]^{1/2} \quad (4-27)$$

O valor  $c$  pode assumir os mesmos valores utilizados na abordagem número 2.

#### 4.5.4 Abordagem 4 (Huber & Snyder, 1976)

Desenvolvida por Huber e Snyder (1976), as chamadas “expressões melhoradas” para  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  têm o propósito de melhor levar em conta os efeitos da presença do obstáculo no campo de concentração. Os autores sugeriram formulações dependentes da razão de aspecto do obstáculo e também da posição do receptor ( $x$ ). Essa abordagem é empregada no intervalo  $3\xi_b \leq x \leq 10\xi_b$ , onde  $\xi_b$  é o comprimento de referência do obstáculo.

Para um prédio cuja largura ( $W$ ) é maior que altura ( $H$ ), de forma que  $\xi_b = H$  :

$$\sigma_z' = 0,7\xi_b + 0,067(x - 3\xi_b) \quad (4-28)$$

$$\sigma_y' = 0,35W + 0,067(x - 3\xi_b) \quad [\text{para } W/H \leq 5] \quad (4-29)$$

$$\sigma_y' = 0,35\xi_b + 0,067(x - 3\xi_b) \quad [\text{para } W/H > 5] \quad (4-30)$$

Para um prédio cuja altura é maior que a largura, de forma que  $\xi_b = W$  :

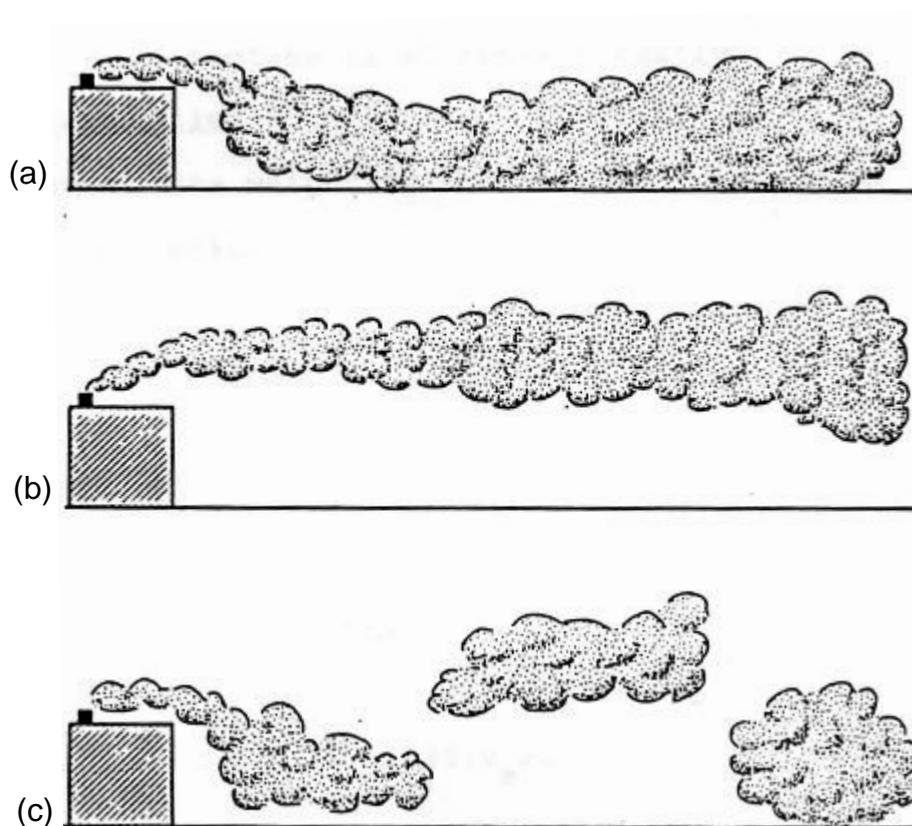
$$\sigma_z' = 0,7\xi_b + 0,067(x - 3\xi_b) \quad (4-31)$$

$$\sigma_y' = 0,35\xi_b + 0,067(x - 3\xi_b) \quad (4-32)$$

#### 4.5.5 Abordagem 5 (Johnson *et al.*, 1975)

A quinta abordagem empregada, foi introduzida por Johnson *et al.* (1975), citado por Hosker (1981), Murray *et al.* (1978) e Mussio *et al.* (2001), baseado no fato de que em muitas situações práticas a pluma não vai ser completamente capturada pela esteira do prédio (Figura 4-4a) nem tampouco passará acima

desta (Figura 4-4b) – ou seja, uma captura parcial e flutuante irá ocorrer (Figura 4-4c). A fim de levar este fato em conta, um “modelo de duas plumas” foi desenvolvido, onde uma das plumas (emitidas na altura real da chaminé) não será capturada pela esteira do prédio, ao passo que a segunda fonte (emitida ao nível do solo) será completamente capturada. A parcela da massa total emitida a ser capturada pela esteira ( $M$ ) dependerá da relação entre a velocidade de saída dos gases emitidos e a velocidade do vento medida na altura da chaminé,  $v_s/u_s$ . Este modelo foi chamado de “*Split-h*”.



**Figura 4-4: Ilustração do comportamento de uma pluma afetada pela presença do obstáculo, com uma pluma completamente capturada pela esteira turbulenta (a), pluma não capturada (b) e pluma com captura parcial (c) (Mussio, 1989).**

O cálculo da parcelas capturada é descrito por Mussio (1989):

- Se  $v_s/u_s \leq 0,9$ , então ocorrerá captura completa da pluma e  $M = 1$ ;

- Se  $0,9 \leq v_s/u_s \leq 1,5$ , então  $M = 2,2 - 1,33(v_s/u_s)$  e ocorrerá captura parcial;
- Se  $1,5 \leq v_s/u_s < 5,0$ , então  $M = 0,286 - 0,0571(v_s/u_s)$ , ainda ocorrendo captura parcial;
- A pluma não será capturada ( $M = 0$ ) quando  $v_s/u_s \geq 5,0$ .

Para a porção da pluma que é capturada, a equação gaussiana utilizará os parâmetros  $\Sigma_y$  e  $\Sigma_z$ , introduzidos pela abordagem 3.

#### 4.5.6 Abordagem 6 (Scire *et al.*, 2000)

Desenvolvida por Schulman e Scire (Scire & Schulman, 1980; Schulman & Hanna, 1986; citados por Scire *et al.*, 2000), esta abordagem aplica um decaimento linear ao parâmetro de dispersão vertical ( $\sigma'_z$ ) afetado pela presença do prédio (calculado segundo abordagem 4), além de levar em conta a redução do efeito do empuxo térmico e da velocidade de emissão dos gases na elevação da pluma quando esta sofrer os efeitos aerodinâmicos do obstáculo.

O primeiro passo é calcular o valor dos parâmetros de dispersão, calculados segundo a abordagem 4, para uma distância equivalente a 3 alturas do prédio. Caso  $\sigma'_y \leq \sigma'_z$ , o próximo passo é então calcular a eventual elevação da pluma  $z_d$ , influenciada pelo efeito da presença do obstáculo, através da Equação 4-33:

$$z_d^3 + (3R_0 z_d / \beta_1 + 3R_0^2 / \beta_1^2) z_d = 3F_m x / (\beta_j^2 u_s^2) + 3F_b x^2 / (2 \quad (4-33)$$

onde,

$z_d$  é a elevação da pluma devido ao empuxo térmico e velocidade de emissão, influenciada pela presença do obstáculo [m];

$\beta_1$  é parâmetro de captura neutra ( $\approx 0,6$ );

$\beta_j$  é coeficiente de captura de "jato" (eq. 4-34);

$R_0$  é o raio de diluição [m] (eq. 4-35);

$F_m$  é o fluxo de quantidade de movimento [ $m^4/s^2$ ](eq. 4-36);

$F_b$  é o fluxo de empuxo térmico [ $m^4/s^2$ ] (eq. 4-37);

$$\beta_j = 1/3 + u_s/v_s \quad (4-34)$$

$$R_0 = 2^{1/2} \sigma_{z0} \quad (4-35)$$

$$F_m = v_s^2 d_s / 4 \quad (4-36)$$

$$F_b = g d_s v_s (T_s - T_a) / 4 T_s \quad (4-37)$$

$v_s$  é a velocidade de saída dos gases na chaminé;

$d_s$  é o diâmetro interno da chaminé;

$T_a$  é a temperatura ambiente;

$T_s$  é a temperatura de exaustão dos gases da chaminé.

A altura da pluma afetada pelo empuxo térmico e/ou velocidade de emissão ( $h_e$ ) é dada por:

$$h_e = h'' + z_d \quad (4-38)$$

com  $h''$  calculado segundo o item 4.3.

Então, o parâmetro de dispersão vertical será:

$$\sigma_z'' = A \sigma_z' \quad (4-39)$$

onde,

$$A = 1 \quad , \text{ para } h_e \leq H$$

$$A = \frac{H - h_s}{2\xi_b} + 1 \quad , \text{ para } H < h_e \leq H + 2\xi_b$$

$$A = 0 \quad , \text{ para } H + 2\xi_b < h_e$$

## 4.6 DADOS DO EXPERIMENTO EM TÚNEL DE VENTO

A fim de proceder à validação do modelo proposto, este será aplicado a condições idênticas a um experimento realizado em túnel de vento por Aubrun, Leiti e Schatzmann para o programa “*Compilation of Experimental Data for Validation of Microscale Dispersion Models*” (CEDVAL), da Universidade de Hamburgo (Aubrun & Leiti, 2004), com o objetivo de investigar a dispersão atmosférica de um gás traçador emitido pelo sistema de ventilação de uma edificação onde funcionava uma criação suína. Os dados obtidos neste experimento estão disponibilizados no site da referida instituição, disponível no endereço <<http://www.mi.uni-hamburg.de/cedval>>.

O experimento, realizado no túnel de vento do Instituto Meteorológico da Universidade de Hamburgo, empregou um modelo em escala 1:400 representando um prédio onde funcionava um estábulo equipado com um sistema de exaustão forçada de gases através de chaminé. As dimensões do prédio modelado eram 10,6m de altura (H), 64,5m de comprimento (L) e 42,5m de largura (W).

Através do sistema de exaustão do prédio foi emitida uma mistura controlada de etano e ar. A concentração do composto emitido foi medida em diversos pontos através de um sistema de detecção de alta frequência, de forma a simular o tempo de respiração do ser humano. Foram realizadas diversas medições, correspondentes a diferentes direções de incidência do vento.

A seção de testes do túnel de vento possui 1,5m de largura, 1m de altura e 4m de comprimento. A velocidade do vento foi mantida constante em 3m/s. A atmosfera modelada apresentava condição de estabilidade neutra. O gás foi emitido em temperatura ambiente com velocidade de saída de 3 m/s.

Cada série temporal de medida da concentração compreendia 150.000 pontos de amostragem, realizada em frequência de 500Hz (equivalente a 1,25Hz em escala real), durante 5 minutos (equivalente a 2000 minutos em escala real).

O conjunto de dados a ser utilizado no presente trabalho inclui medidas da concentração do composto emitido com diferentes configurações da direção do vento. A topografia não foi modelada no experimento.

As Figuras 4-4 a 4-7 mostram detalhes da configuração do modelo e do túnel de vento.



**Figura 4-5: Experimento em túnel de vento realizado por Aubrun, Leiti e Schatzmann (CEDVAL, 2006).**



Figura 4-6: detalhe do modelo do prédio utilizado nos experimentos em túnel de vento (CEDVAL, 2006).

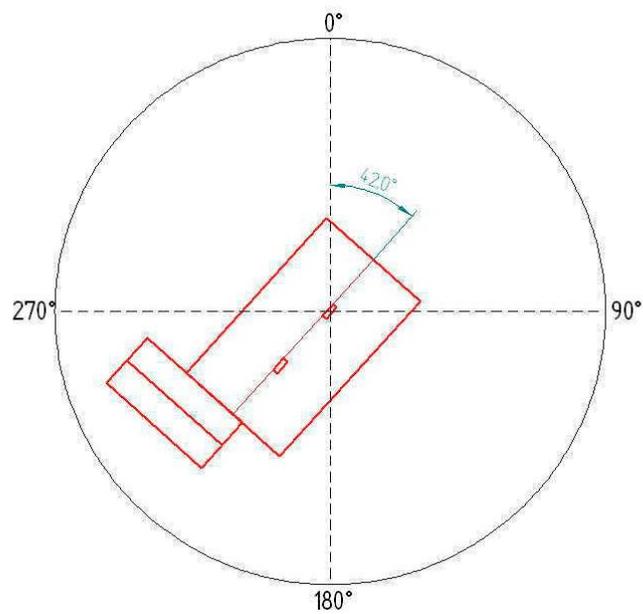


Figura 4-7: Esquema do modelo do prédio utilizado no túnel de vento, mostrando a orientação do modelo em relação ao norte (CEDVAL, 2006).

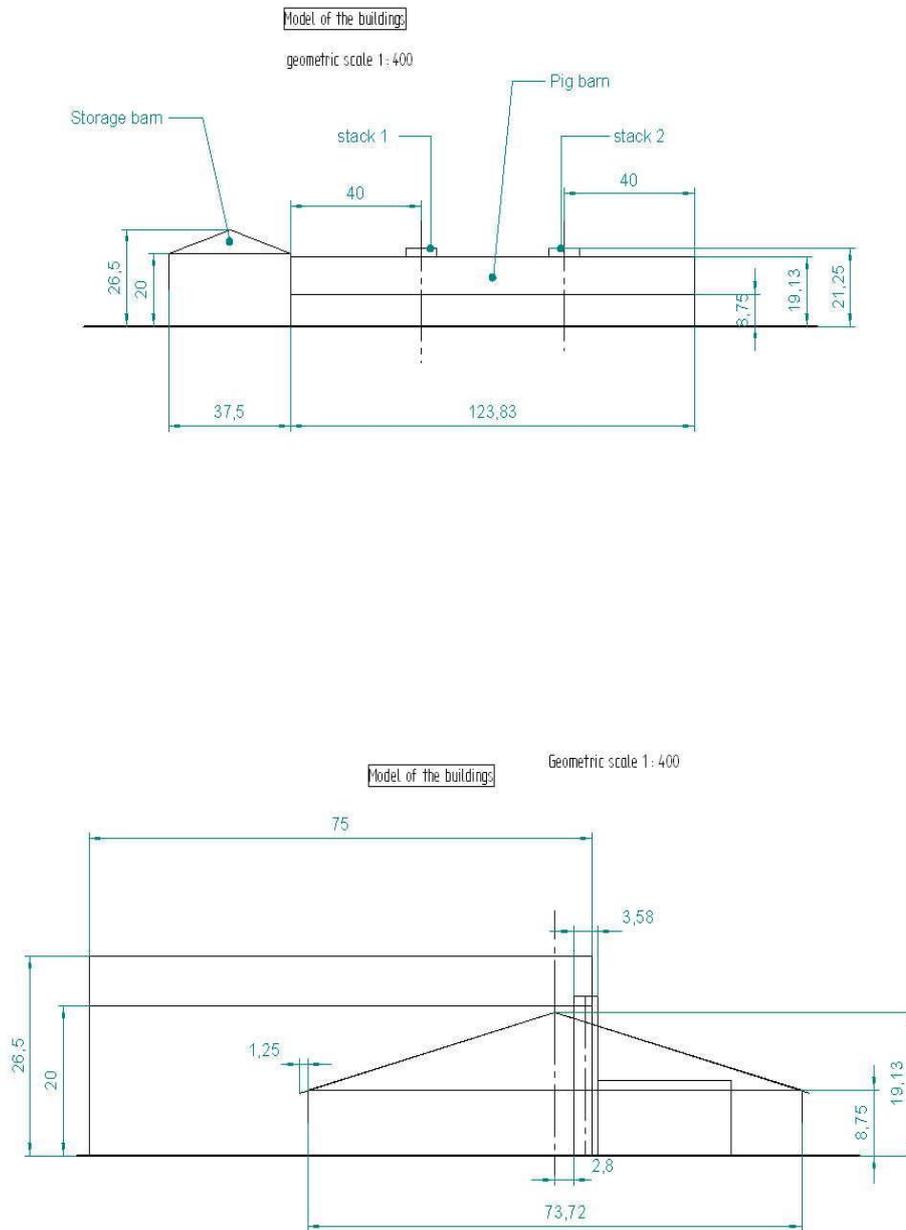


Figura 4-8: Dimensões do modelo de prédio utilizado em túnel de vento (mm) (CEDVAL, 2006).

## 5 RESULTADOS

A dispersão atmosférica de compostos odorantes em presença de obstáculos foi estudada com o emprego de um modelo gaussiano de pluma flutuante baseado na teoria proposta por Gifford (1959). Este modelo simula os efeitos da mudança de direção do vento e sua influência na dispersão de um composto emitido para a atmosfera. Os efeitos do obstáculo no escoamento foram considerados empregando-se seis diferentes abordagens sugeridas na literatura (Tabela 5-1). Estas abordagens são, basicamente, modificações nos parâmetros de dispersão utilizados em modelagem gaussiana tradicional. Os resultados do modelo foram comparados a dados experimentais obtidos em túnel de vento (Aubrun & Leitl, 2004), uma vez que o modelo foi aplicado com as mesmas condições encontradas no experimento.

São apresentados nas seções a seguir resultados relativos à:

- Concentração média;
- Intermitência;
- Relação entre valores de concentração de pico e média;
- Avaliação da influência dos valores de  $\sigma_p$  na concentração média, intermitência e relação pico/média.

Foram considerados os casos do vento com direção 40°, 130°, 220° e 310°, incidindo praticamente de forma perpendicular aos eixos de simetria do prédio. O tempo de simulação utilizado no modelo foi de 2.000 (dois mil) minutos e o número de posições aleatórias geradas para a pluma foi de 3.000 (três mil).

**Tabela 5-1: abordagens empregadas para incluir os efeitos do obstáculo na modelagem gaussiana empregadas no presente trabalho.**

<i>Abordagem</i>	<i>Autor/descrita por</i>
Abordagem 1	Turner, 1969
Abordagem 2	Gifford, 1960
Abordagem 3	Gifford, 1968
Abordagem 4	Huber e Snyder, 1976
Abordagem 5	Johnson <i>et al.</i> , 1975
Abordagem 6	Scire <i>et al.</i> , 2000

## 5.1 CONCENTRAÇÃO MÉDIA

Os resultados da concentração média do composto emitido estão ilustrados nas Figuras 5-1 a 5-5.

A concentração média modelada (Figura 5-1) atinge o seu valor máximo à jusante do obstáculo, por volta de 75 metros de distância da fonte, equivalendo a cerca de 10 alturas do prédio para os métodos 1, 3 e 5. Para a abordagem 2, isso acontece sempre numa distância acima de 100 metros. Para as abordagens 4 e 6, essa distância varia segundo a direção do vento. À medida que o receptor se afasta da fonte, o valor da concentração média diminui.

No presente trabalho, o modelo gaussiano de pluma flutuante foi empregado inclusive na região da zona de recirculação, a fim de verificar o seu comportamento nesta região do escoamento. Segundo relação empírica sugerida por Hosker (1981) e descrita no ANEXO 1, os limites calculados para a zona de

recirculação foram 86,9 m, 74,8 m, 55,3 m e 60,3 m para os casos do vento com direção 40°, 130°, 220° e 310°, respectivamente, variando, portanto, entre cerca de 5 e 8 vezes a altura do prédio. Sendo assim, segundo o modelo, o valor máximo da concentração média é sempre atingido após a cavidade. Entretanto, os dados do experimento em túnel de vento indicam, para as direções 130°, 220° e 310°, que a máxima concentração média é atingida na cavidade. Hosker (1981) sugere a aplicação do modelo gaussiano e das diversas abordagens para considerar a presença de obstáculo somente após a região da cavidade. Scire *et al.* (2000) indicam que as abordagens 4 e 6 são válidas para distâncias acima de 3 comprimentos de referência, o que para o prédio estudado no presente trabalho, equivale à sua altura (10,6m).

As abordagens 1 e 2 forneceram sempre os menores valores para a concentração média, indicando que o efeito do obstáculo no escoamento e na dispersão do composto emitido (maior diluição, com maiores concentrações próximas à fonte) pode estar sendo subestimado. Este comportamento foi observado em todas as situações analisadas, independente da direção do vento. No caso da abordagem 2, a recomendação de calcular o valor dos parâmetros de dispersão em função da distância medida à partir da face posterior do prédio (Hosker, 1981) faz com que esses parâmetros assumam valores muito baixos na região próxima ao prédio, resultando nos baixos valores obtidos para a concentração.

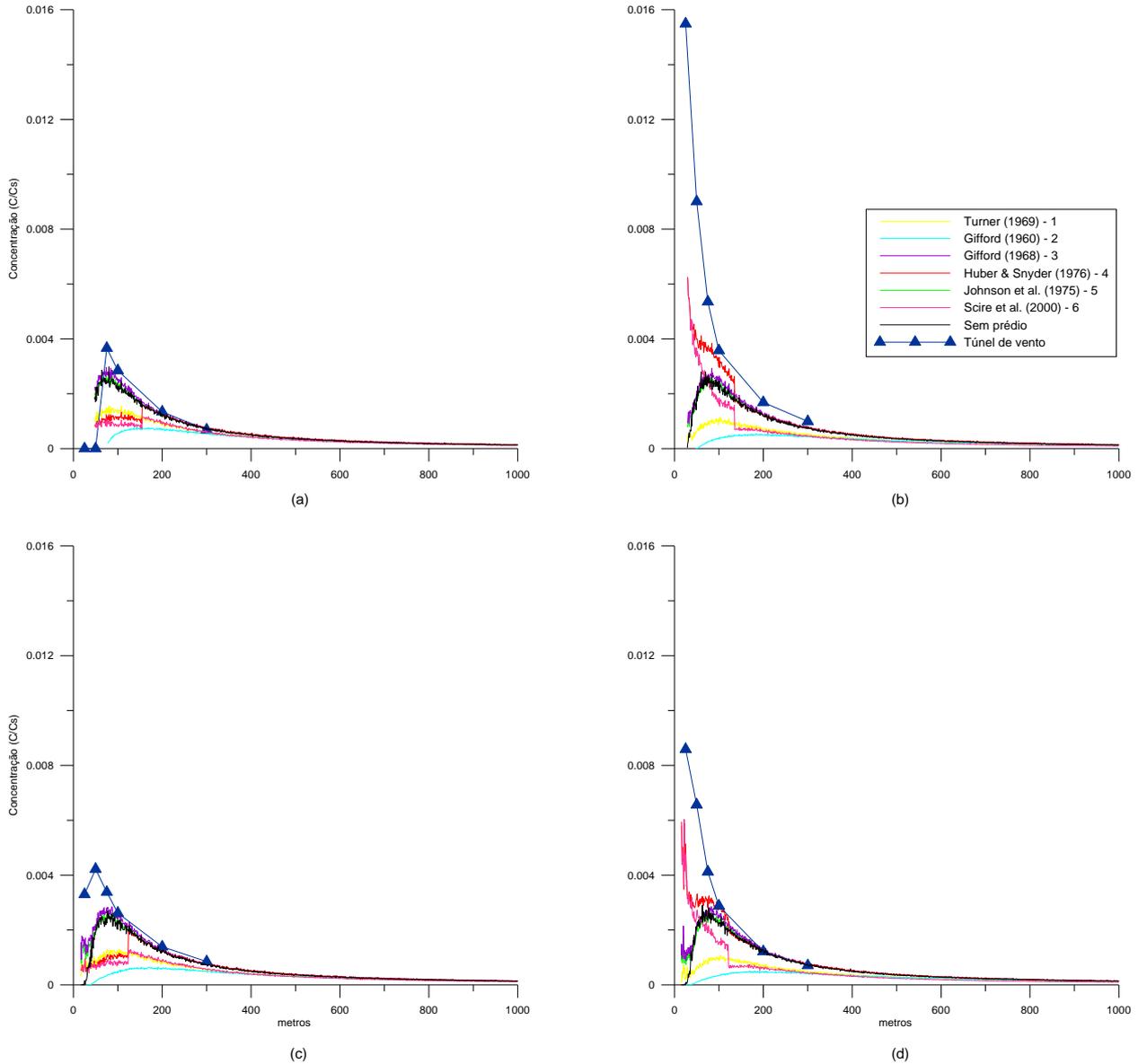
O modelo exibiu uma tendência de subestimar a concentração, principalmente nos casos do vento com direção 130° e 310°, bem como na região próxima ao obstáculo, para todas as direções do vento. Para as direções 130° e 310° os resultados apresentados pela abordagem 4 e 6 foram mais elevados, mostrando a influência da largura do obstáculo, conforme considerada pelas equações 4-29 e 4-30.

A descontinuidade apresentada pelas abordagens 4 e 6, conforme observa-se na Figura 5-1, é resultado da sua aplicação até um limite de 10 vezes o comprimento de referência do obstáculo ( $10\xi_b$ , com x medido à partir da face poste-

rior do obstáculo). Acima dessa distância, foram utilizados os parâmetros de dispersão sem modificação.

Também são mostrados os resultados obtidos para o modelo aplicado sem a presença do obstáculo. A concentração média obtida apresentou comportamento semelhante aos resultados das abordagens 3 e 5. Este fato pode ser explicado pela comparação do valor dos parâmetros de dispersão  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  (utilizados sem o prédio) com o valor dos parâmetros de difusão  $\Sigma_y$  e  $\Sigma_z$  (utilizados com a presença do prédio), mostrado pela Figura 5-6. Como os valores de  $\sigma_y$  foram semelhantes a  $\Sigma_y$ , e os valores de  $\Sigma_z$  apresentaram a tendência de se aproximarem de  $\sigma_z$ , o resultado da concentração também foi semelhante.

Os dados obtidos em túnel de vento foram fornecidos para uma distância máxima equivalente a 300m da fonte. Comparando-se os resultados do modelo para a concentração média na direção do escoamento ( $y=0$ ; Figura 5-1) para distâncias até 1000 metros na direção principal do escoamento (eixo-x), com os dados obtidos em túnel de vento, observa-se que o comportamento do modelo aproxima-se da tendência apresentada pelos dados do túnel. Este fato é observado especialmente nas abordagens 3 e 5, para todas as direções do vento. Em ambos os casos – valores medidos e valores estimados – observa-se que a presença do obstáculo causa uma rápida diluição do composto emitido, com resultados de concentração sempre abaixo de 1% da concentração na fonte. Vale ressaltar que a abordagem 5, um modelo de duas plumas, foi empregado no presente trabalho de forma a tratar a porção da pluma capturada pela esteira de turbulência do prédio utilizando os parâmetros de dispersão calculados segundo a abordagem 3. Uma vez que, segundo os cálculos empregados (Mussio, 1989), mais de 80% do material emitido foi capturado pela esteira de turbulência, a abordagem 5 sempre forneceu resultados semelhantes à abordagem 3.



**Figura 5-1: Concentração média (normalizada pela concentração na fonte), comparando os dados do túnel de vento com os resultados do modelo, para cada uma das abordagens, sendo (a) vento 40 graus; (b) vento 130 graus; (c) vento 220 graus; (d) vento 310 graus.**

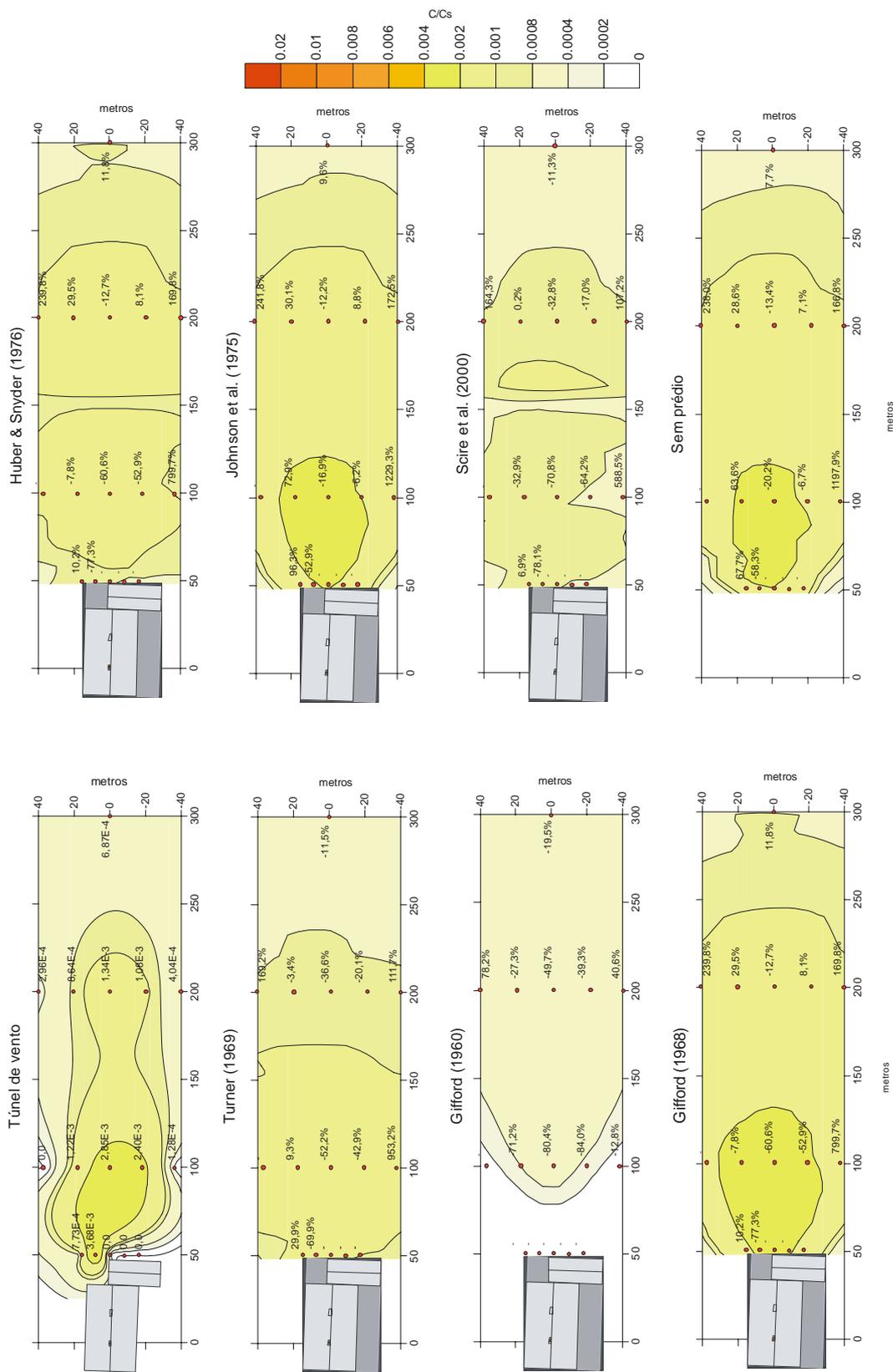


Figura 5-2: concentração média para o túnel de vento e para o modelo de pluma fluante (métodos 1 a 5); vento 40 graus. Os pontos em vermelho no gráfico dos resultados do túnel de vento indicam os valores observados em pontos selecionados; nos demais gráficos, indicam a diferença percentual em relação aos resultados do túnel de vento.

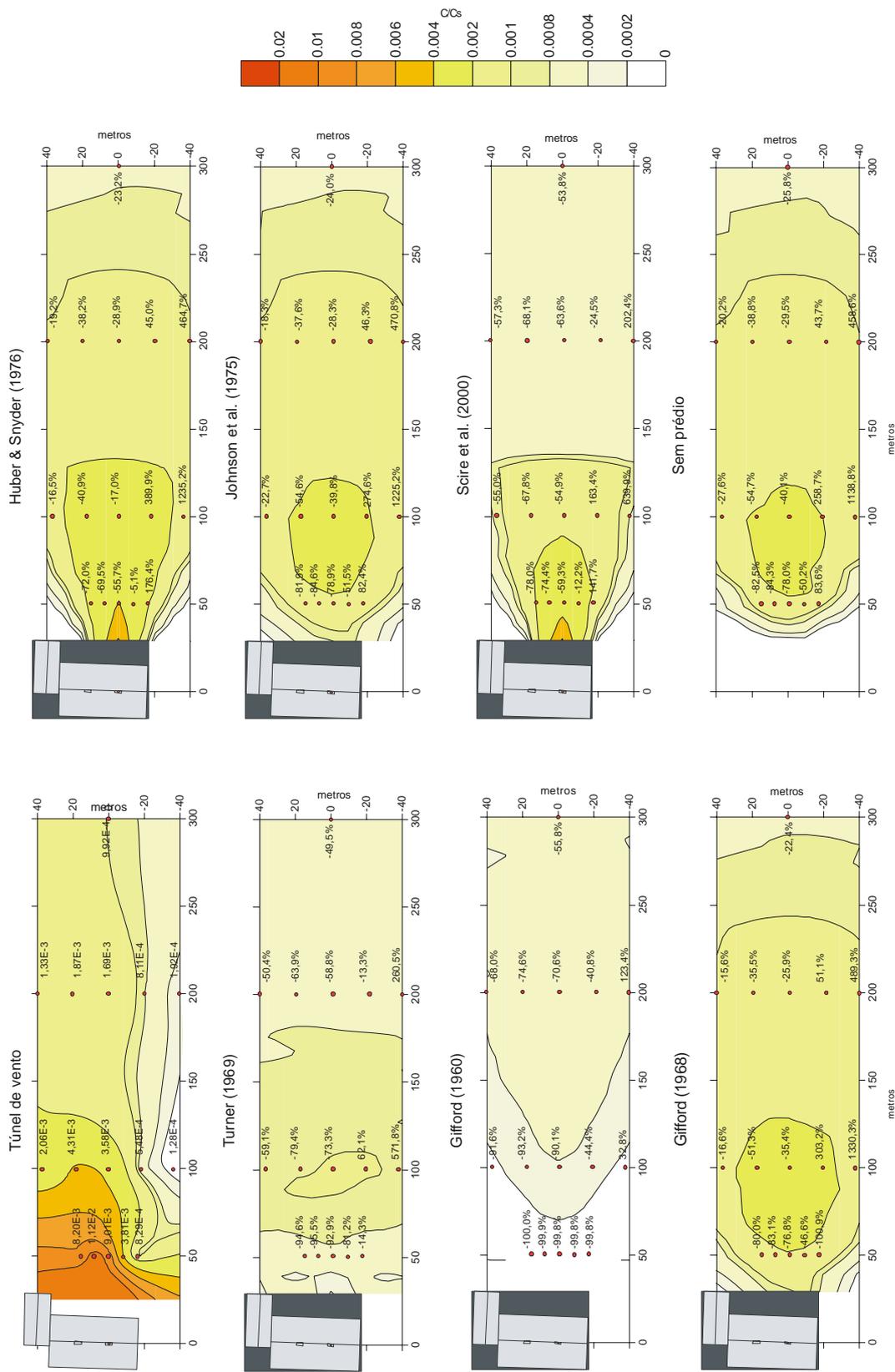


Figura 5-3: concentração média para o túnel de vento e para o modelo de pluma flutuante (métodos 1 a 5); vento: 130 graus. Os pontos em vermelho no gráfico dos resultados do túnel de vento indicam os valores observados em pontos selecionados; nos demais gráficos, indicam a diferença percentual em relação aos resultados do túnel de vento.

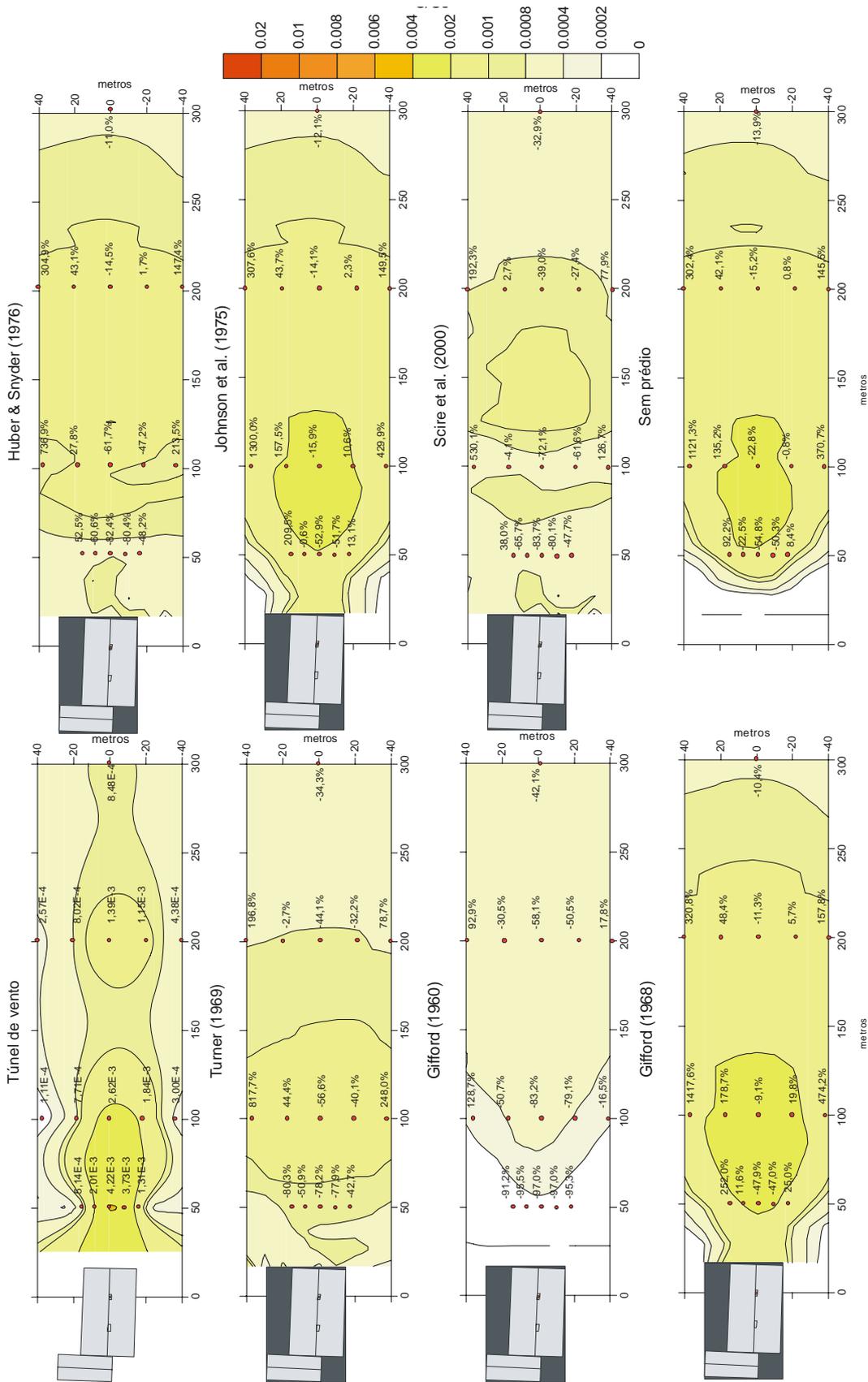


Figura 5-4: concentração média para o túnel de vento e para o modelo de pluma flutuante (métodos 1 a 5); vento: 220 graus. Os pontos em vermelho no gráfico dos resultados do túnel de vento indicam os valores observados em pontos selecionados; nos demais gráficos, indicam a diferença percentual em relação aos resultados do túnel de vento.

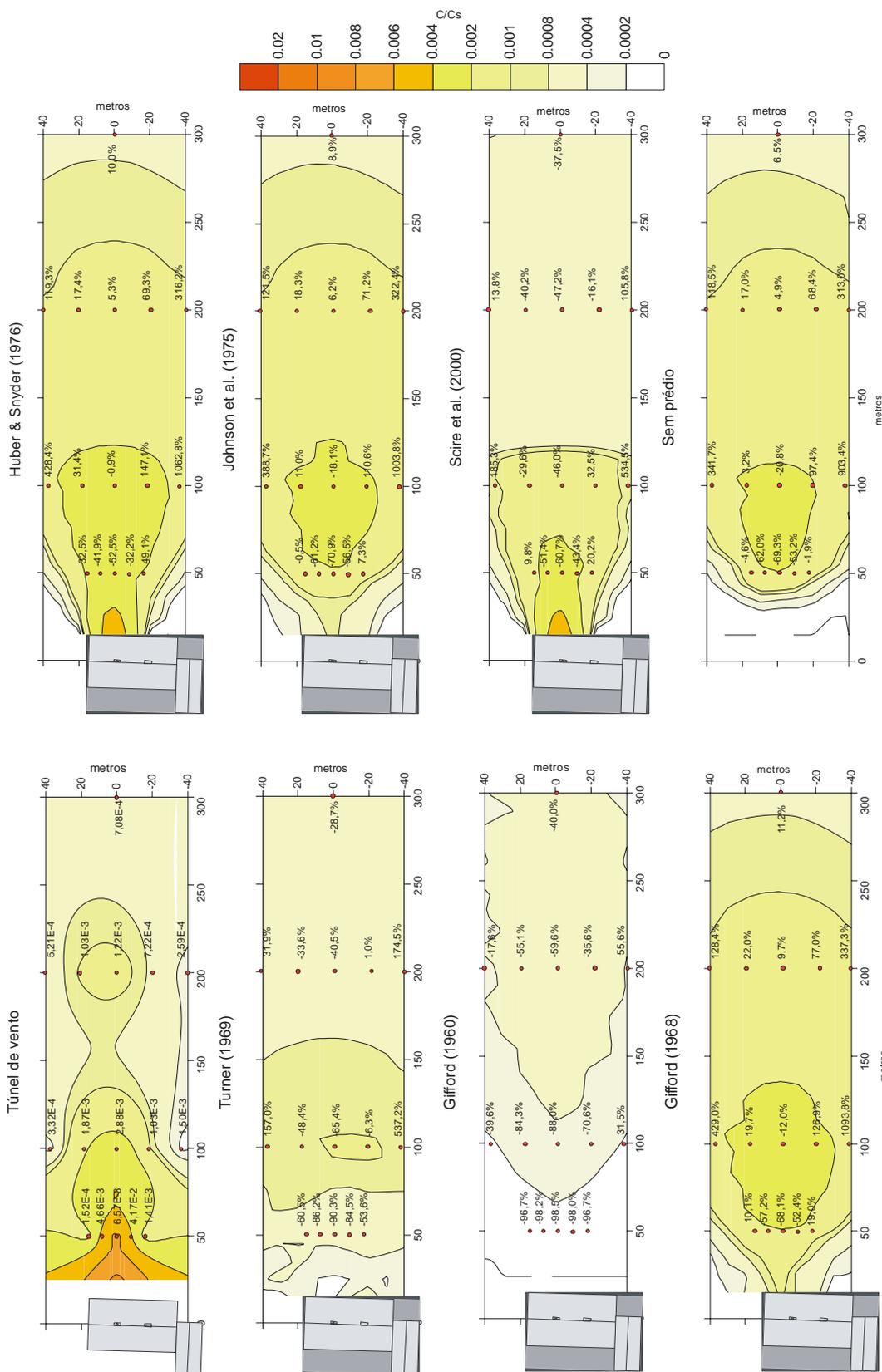
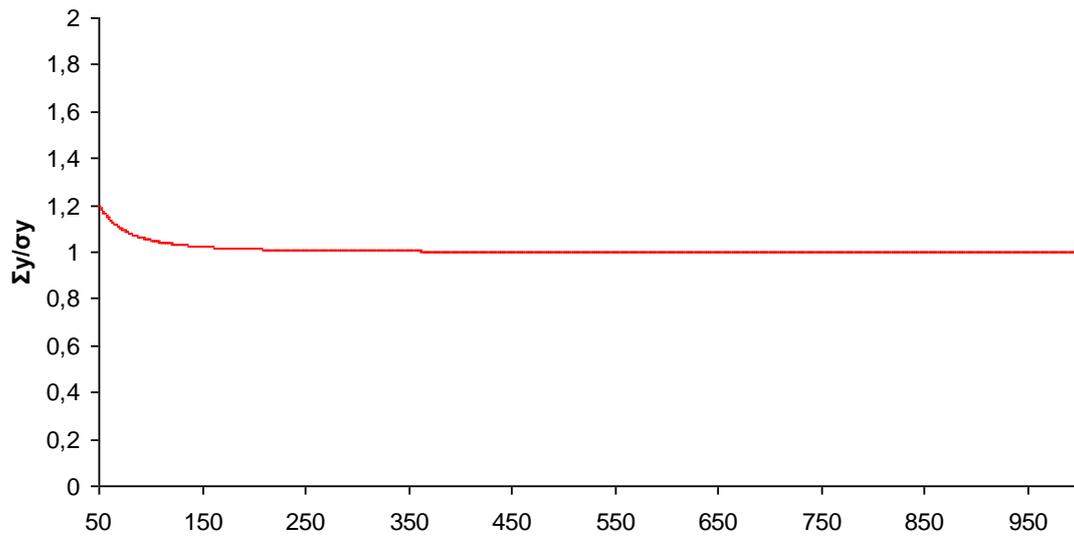
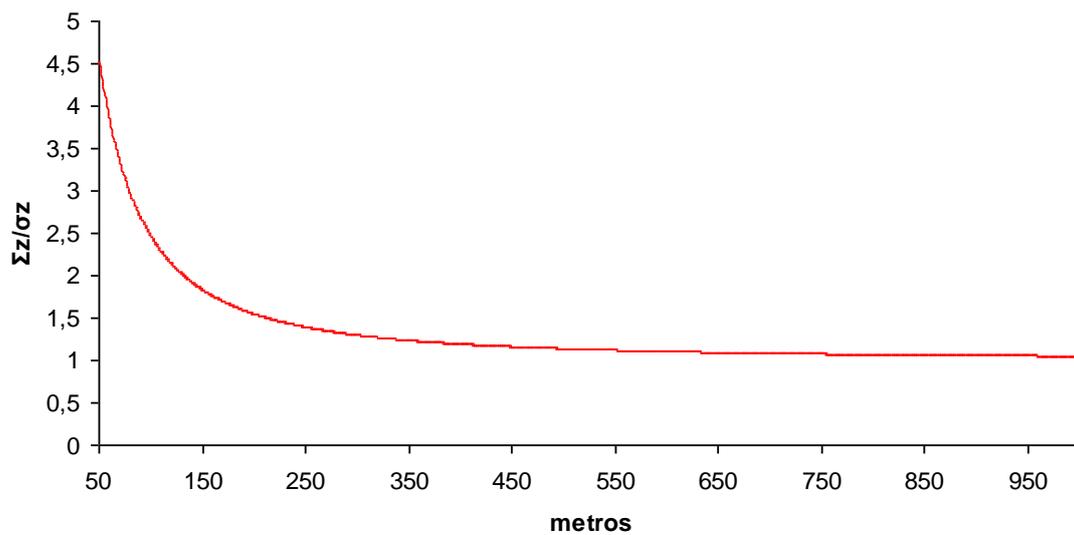


Figura 5-5: concentra o média para o túnel de vento e para o modelo de pluma flutuante (métodos 1 a 5); vento: 310 graus. Os pontos em vermelho no gráfico dos resultados do túnel de vento indicam os valores observados em pontos selecionados; nos demais gráficos, indicam a diferença percentual em rela o aos resultados do túnel de vento.



(a)



(b)

**Figura 5-6: Comparação entre os valores dos parâmetros de dispersão utilizados na abordagem 3 e no caso sem prédio para as direções (a) horizontal e (b) vertical.**

A análise dos resultados da concentração média mostra que as abordagens 3 e 5 forneceram os melhores resultados, mesmo considerando-se que na cavidade, nenhuma abordagem foi capaz de prever as altas concentrações observadas no túnel de vento. A abordagem 4 apresentou um desempenho melhor quando da largura do prédio foi maior do que o comprimento, porém os resultados apresentam descontinuidades devido à restrição no intervalo de aplicação do modelo.

## 5.2 INTERMITÊNCIA

A intermitência, no presente trabalho, foi definida como a porcentagem de tempo na qual um determinado limite de concentração foi ultrapassado. Em situações práticas, este limite corresponde ao limite de detecção de um composto odorante, de forma que a intermitência fornece a provável quantidade de tempo durante o qual a presença do composto emitido seria detectada pelo sistema olfativo humano. A intermitência é um dos parâmetros de maior importância no estudo da dispersão atmosférica de compostos odorantes, pois está diretamente relacionado à probabilidade da ocorrência de percepção do odor. Conforme o critério adotado no experimento em túnel de vento, o limite de detecção foi definido como 25% da concentração observada na fonte. Os dados de saída do modelo (Figuras 5-8 a 5-12) mostram que nas regiões mais próximas do obstáculo o limite definido foi ultrapassado mais vezes, sendo que quanto mais o receptor se afasta do obstáculo, o valor da intermitência diminui, até chegar a zero, indicando que, neste ponto, em uma situação prática, não haveria a detecção da presença do composto odorante.

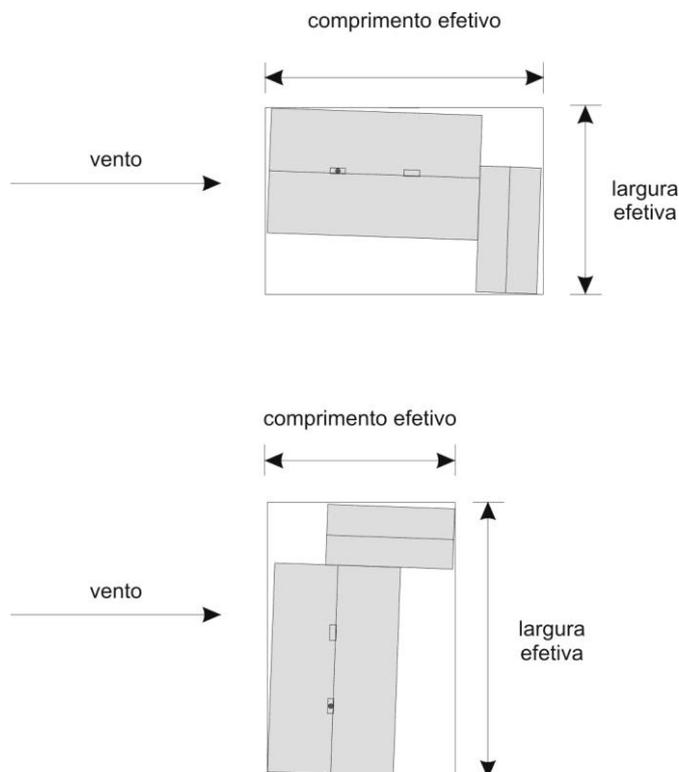
No túnel de vento o limiar de concentração foi ultrapassado mais vezes na região próxima ao obstáculo em comparação com o modelo do presente trabalho.

Nas abordagens 1 e 2, o pico dos valores da intermitência ocorrem em maiores distâncias da fonte, apresentando valores menores na comparação com as abordagens 3 e 5 e com o caso sem prédio.

As abordagens 4 e 6 apresentam descontinuidades nos resultados devido às restrições para a região de aplicação, apresentando valores mais próximos aos das abordagens 3 e 5, bem como ao caso sem prédio para as direções 130 e 310 graus. Os dados do túnel indicam uma queda mais rápida da intermitência, com o aumento da distância fonte-receptor, ao passo que o modelo indica ultrapassagem do limiar por cerca de 100 metros a mais em todos os métodos, com exceção do método 2. Mussio (2001) observou comportamento com semelhante tendência, com valores de intermitência subestimados em regiões mais próximas à fonte e superestimados em regiões mais afastadas.

A rápida diluição sugerida pelos resultados do modelo de pluma flutuante pode indicar que, na região próxima ao obstáculo, o modelo superestima a oscilação da pluma. Isto implica em que a pluma estará por mais tempo afastada do receptor, levando aos resultados de concentração com valores menores aos constatados no túnel de vento.

A flutuação da pluma depende de  $\sigma_c$ , uma vez que este é usado na geração da posição do centro da pluma; este, por sua vez, depende diretamente dos parâmetros  $\sigma$  de longa duração e  $\sigma_p$ . Sendo assim, cabem três hipóteses para a ocorrência do comportamento observado na região próxima ao obstáculo. Primeiramente, os diferentes métodos para considerar a presença do obstáculo, com modificações nos sigmas de longa duração, podem estar fornecendo valores altos para estes parâmetros, superestimando a diluição causada pelo prédio. A segunda hipótese é de que o valor de  $\sigma_p$  fornecido pelo modelo esteja subestimado, de forma a que a pluma tenha uma espessura menor, diminuindo o impacto sobre o receptor. A terceira hipótese é que as estimativas para os parâmetros de dispersão não se adequariam ao estudo da dispersão ao redor de obstáculos com formato irregular, como é o caso do prédio estudado pelo experimento do túnel de vento, o que influencia o campo de concentração na região afetada pela esteira de turbulência. O modelo empregado no presente trabalho considera um prédio com formato regular de um paralelepípedo. Sendo assim, na sua aplicação, a largura e comprimento utilizados dependiam da direção de incidência do vento, conforme indicado na Figura 5-7.



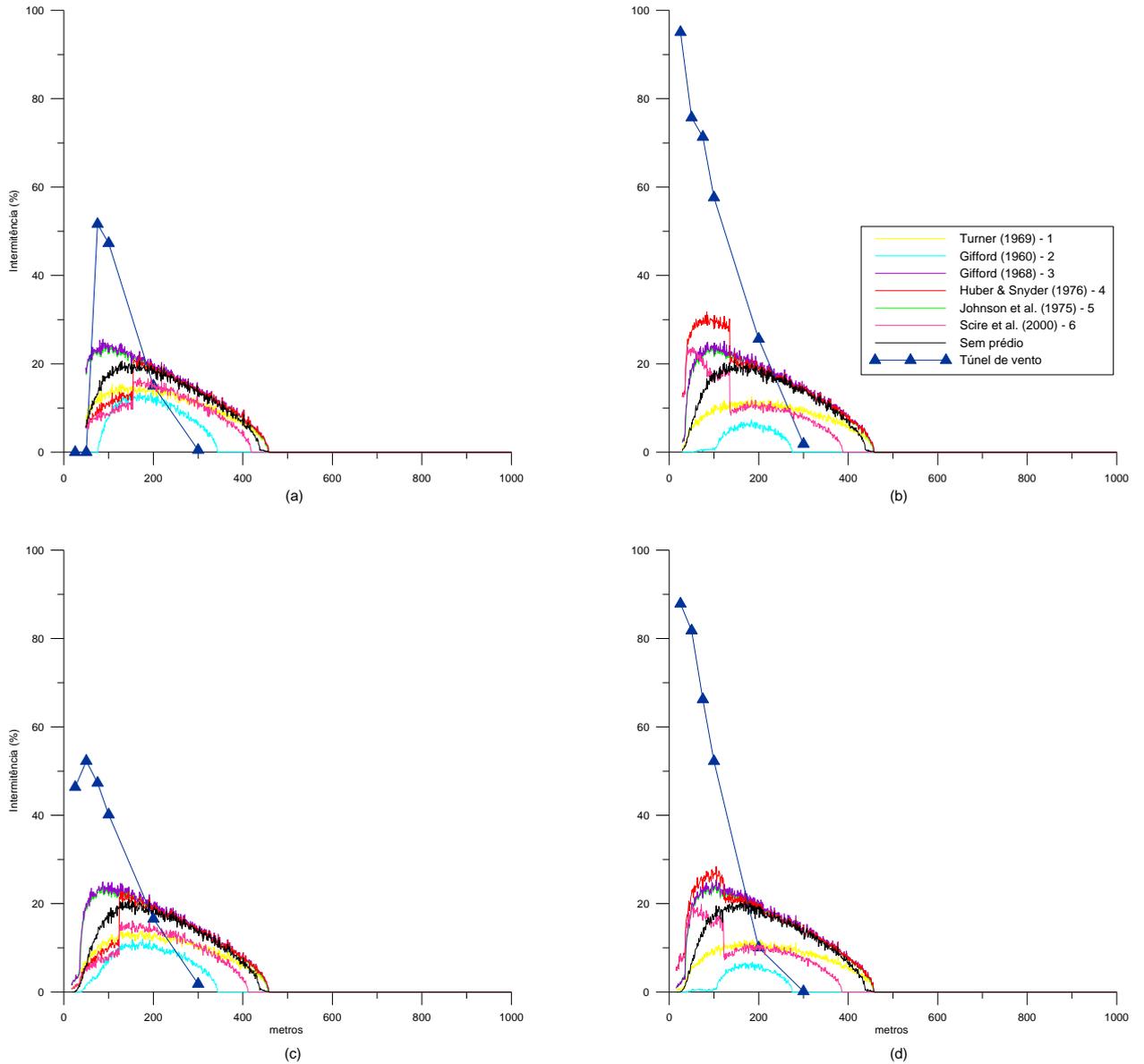
**Figura 5-7: comprimento e largura efetiva do obstáculo utilizada no presente trabalho conforme a direção do vento**

Hosker (1981) aponta que os diferentes métodos para incluir a influência do obstáculo no modelo gaussiano tradicional (sem flutuação) podem fornecer valores para a concentração média diferentes do que os observados em campo, quando o formato do obstáculo diverge de formas simples como um cubo cuja incidência do vento é perpendicular à uma das faces ou então quando o prédio possuir formato arredondado. Nestes casos, Hosker (1981) cita que a concentração nas regiões mais próximas ao obstáculo apresenta valores mais altos do que os fornecidos pelo modelo gaussiano.

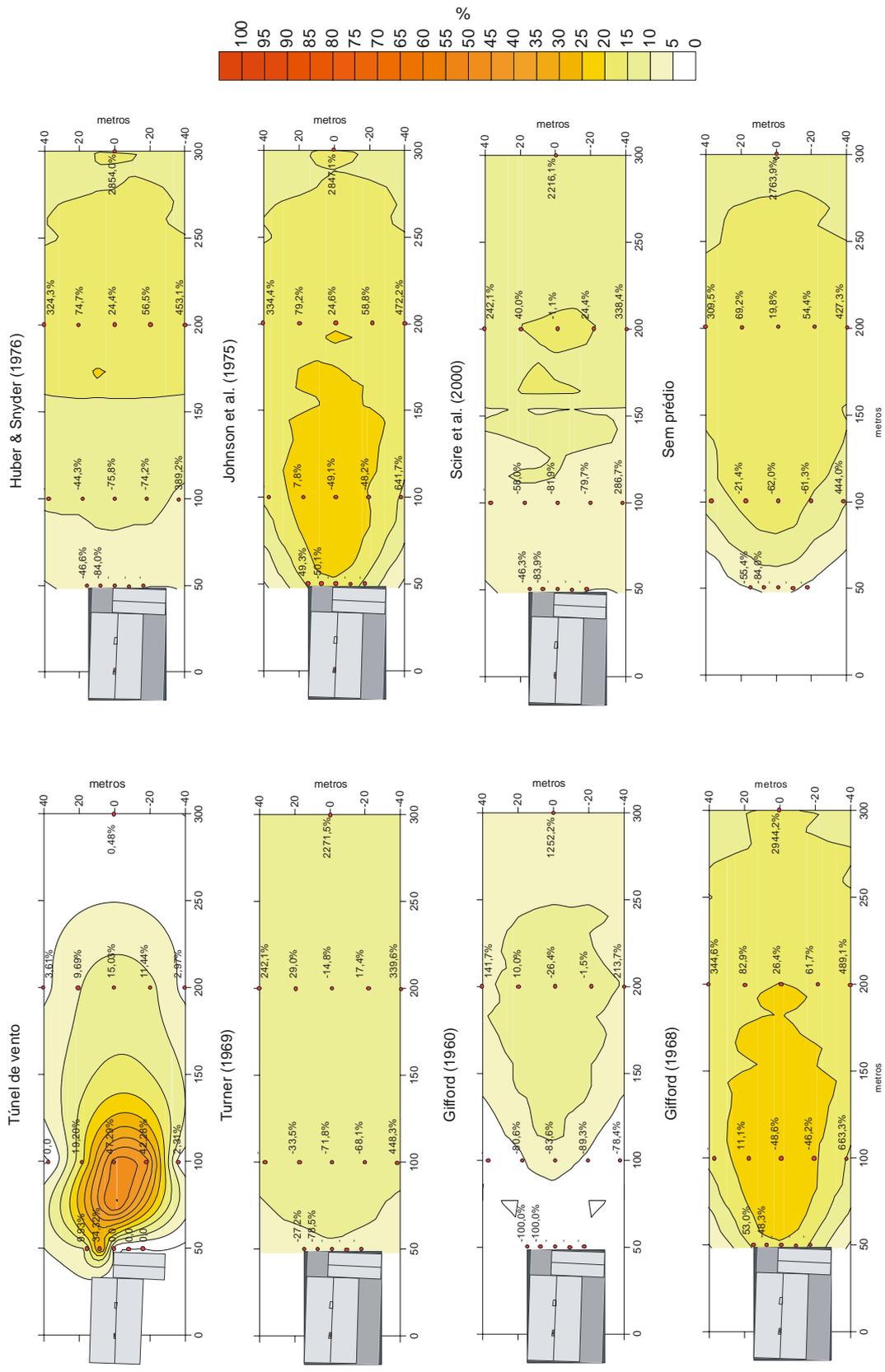
O exame das Figuras 5-9, 5-10, 5-11 e 5-12 revela a influência do formato do prédio nos valores obtidos em túnel. Devido ao formato diverso de um cubo ou paralelepípedo – formato considerado pelo modelo de pluma flutuante empre-

gado no presente trabalho – o campo das intermitências é afetado pela configuração do prédio estudado, na realidade a junção de dois prédios, dispostos perpendicularmente um ao outro. Esta configuração implica a ocorrência de zonas de recirculação distintas dependendo da direção do vento.

Quanto à determinação de  $\sigma_p$ , o procedimento empregado não leva em conta a presença de obstáculos. Se for empregado um raciocínio análogo ao utilizado nos sigmas de longa duração, de que o obstáculo tende a aumentar o tamanho da pluma, um valor maior para  $\sigma_p$ , deveria ser empregado. Este aspecto será discutido no item 5.5.



**Figura 5-8: Intermittência, comparando os dados do túnel de vento com os resultados do modelo, para cada uma das abordagens, sendo (a) vento 40 graus; (b) vento 130 graus; (c) vento 220 graus; (d) vento 310 graus.**



**Figura 5-9: Intermittência (percentagem de tempo do experimento durante o qual a concentração superou o limiar estabelecido) para o túnel de vento e para o modelo de pluma flutuante (métodos 1 a 5), vento 40 graus. Os pontos em vermelho no gráfico dos resultados do túnel de vento indicam os valores observados em pontos selecionados; nos demais gráficos, indicam a diferença percentual em relação aos resultados do túnel de vento.**

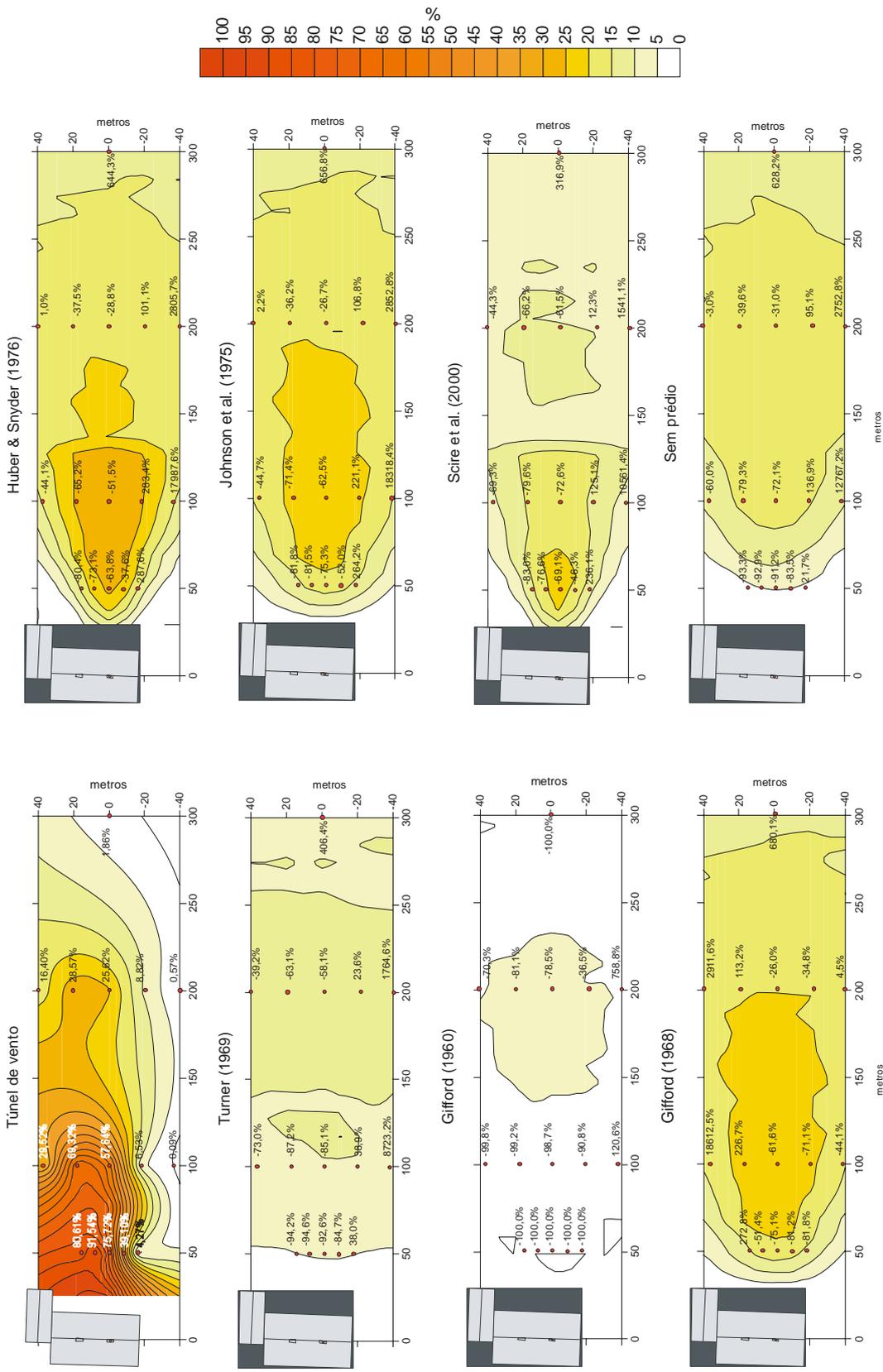
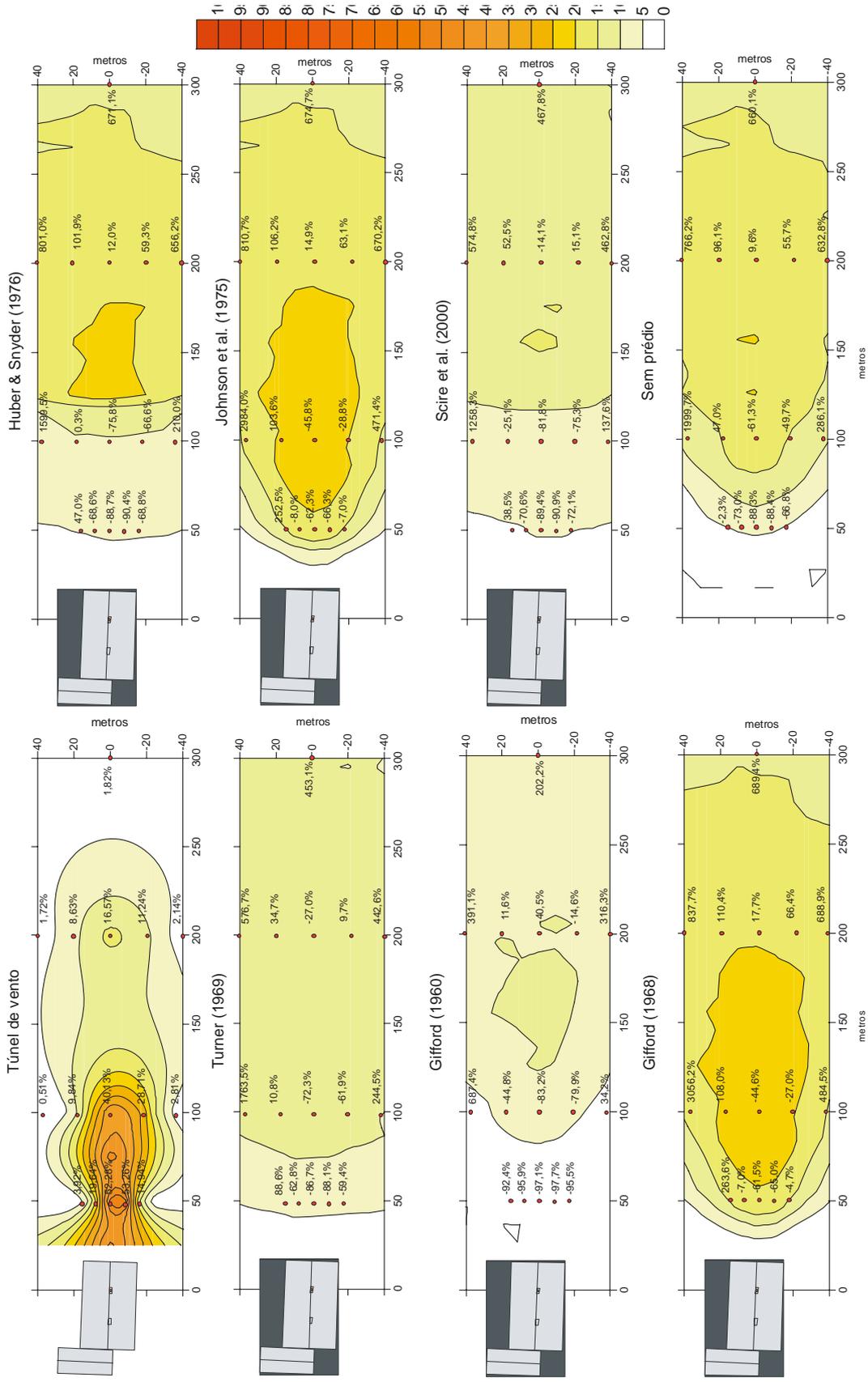


Figura 5-10: Intermittência (percentagem de tempo do experimento durante o qual a concentração superou o limiar estabelecido) para o túnel de vento e para o modelo de pluma flutuante (métodos 1 a 5), vento 130 graus. Os pontos em vermelho no gráfico dos resultados do túnel de vento indicam os valores observados em pontos selecionados; nos demais gráficos, indicam a diferença percentual em relação aos resultados do túnel de vento.



**Figura 5-11: Intermittência (percentagem de tempo do experimento durante o qual a concentração superou o limiar estabelecido) para o túnel de vento e para o modelo de pluma flutuante (métodos 1 a 5), vento 220 gaus. Os pontos em vermelho no gráfico dos resultados do túnel de vento indicam os valores observados em pontos selecionados; nos demais gráficos, indicam a diferença percentual em relação aos resultados do túnel de vento.**

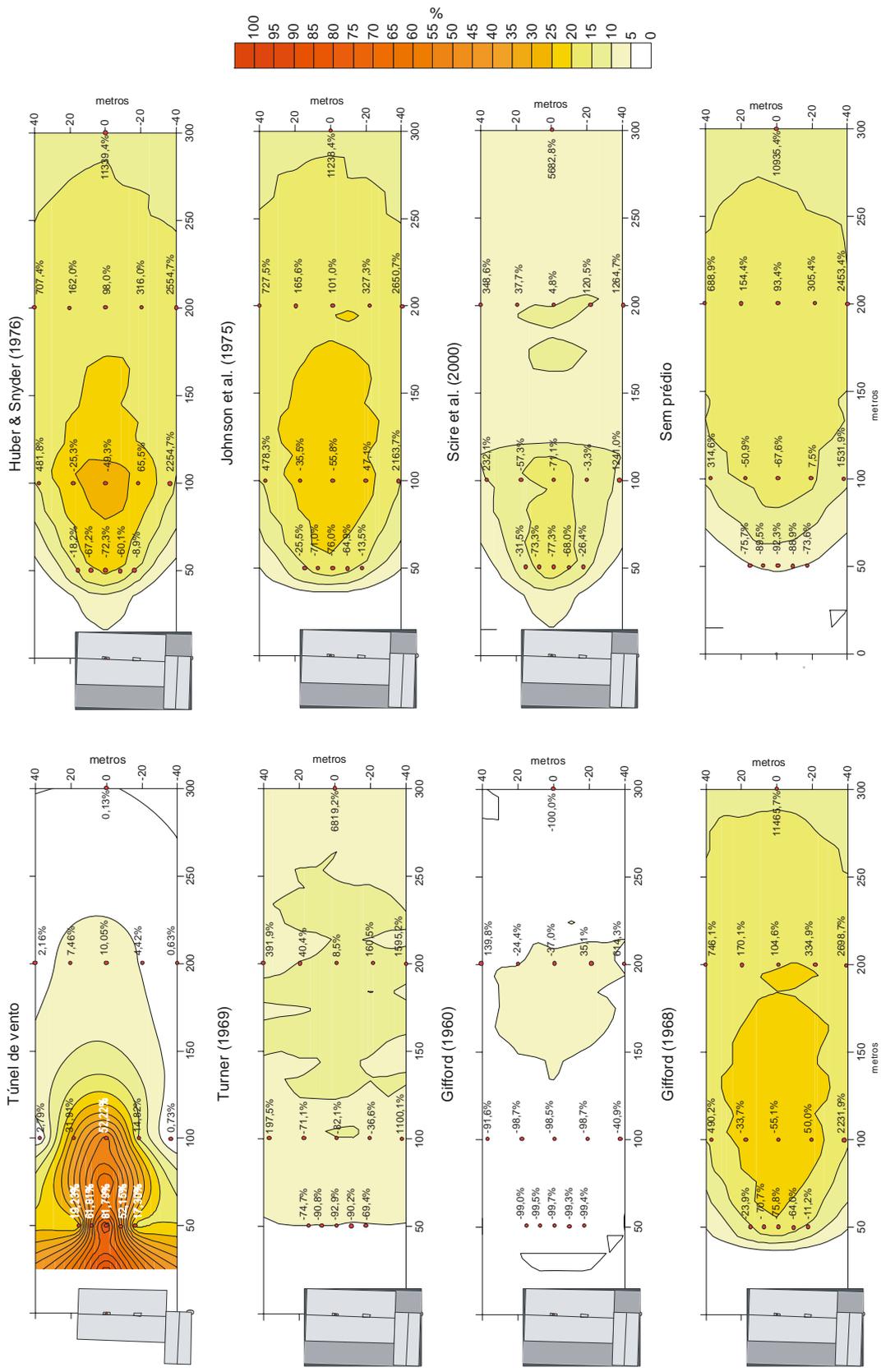


Figura 5-12: Intermittência (percentagem de tempo do experimento durante o qual a concentração superou o limiar estabelecido) para o túnel de vento e para o modelo de pluma flutuante (métodos 1 a 5), vento 310 graus. Os pontos em vermelho no gráfico dos resultados do túnel de vento indicam os valores observados em pontos selecionados; nos demais gráficos, indicam a diferença percentual em relação aos resultados do túnel de vento.

Assim como foi observado nos resultado de concentração média, o melhor desempenho do modelo foi conseguido com o emprego das abordagens 3 e 5 para a inclusão dos efeitos do obstáculo. A abordagem 4 forneceu resultados melhores apenas para as direções 130 e 310 graus, porém apenas na região onde a influência do obstáculo é modelada.

### 5.3 RELAÇÃO ENTRE VALORES DE PICO E MÉDIA PARA A CONCENTRAÇÃO

Os valores para a relação pico/média encontrados para as abordagens 1 a 6, bem como para o caso sem prédio estão expressos na Figura 5-12, cuja observação mostra que quanto mais perto o observador estiver do obstáculo, maiores serão os picos de concentração. Os maiores valores foram observados para os métodos 1 e 4, muito embora, a medida em que a posição do observador vai sendo afastada do obstáculo todos os métodos fornecem valores parecidos. De fato, as Figuras 5-13b e 5-13d (vento com direção 130 e 310 graus) mostram os dados válidos para distâncias acima de 60 metros da fonte ( $x \geq 60\text{m}$ ) e a Figura 5-13c (vento com direção 220 graus), para distâncias acima de 50 metros ( $x \geq 50\text{m}$ ), a fim de facilitar a representação gráfica uma vez que próximo à fonte, foram encontrados valores de pico de concentração mais de duas mil vezes superiores à concentração média, dependendo da direção do vento e do método considerado. Este fato indica que, apesar dos baixos valores de concentração encontrados próximo ao prédio, o modelo previu a ocorrência de picos de concentração bastante intensos. A partir de uma distância de 200m da fonte, o valor da relação pico/média está situado entre 10 e 5 para todas as abordagens. As abordagens 3 e 5 apresentaram à partir da distância de 100m um próximo a 6.

Shauberger & Piringer (2004) calculam o valor da relação pico/média empregando, uma interpolação entre um valor da relação pico/média calculado segundo a Equação 1-1 (usado próximo a fonte) e um valor fixo para distâncias acima de 100 metros. Este valor pode ser os tradicionalmente utilizados em

modelagem gaussiana tradicional como 10 ou mesmo 4 (Shauburger & Piringer, 2004; Boeker *et al.*, 2000). Mussio (2001), aplicando um modelo de pluma flutuante também baseado no modelo TRC encontrou um valor médio de 6,71, mas chamou a atenção para o fato de que este valor poderia ser específico para o caso estudado. A mesma observação pode ser válida para o presente trabalho.

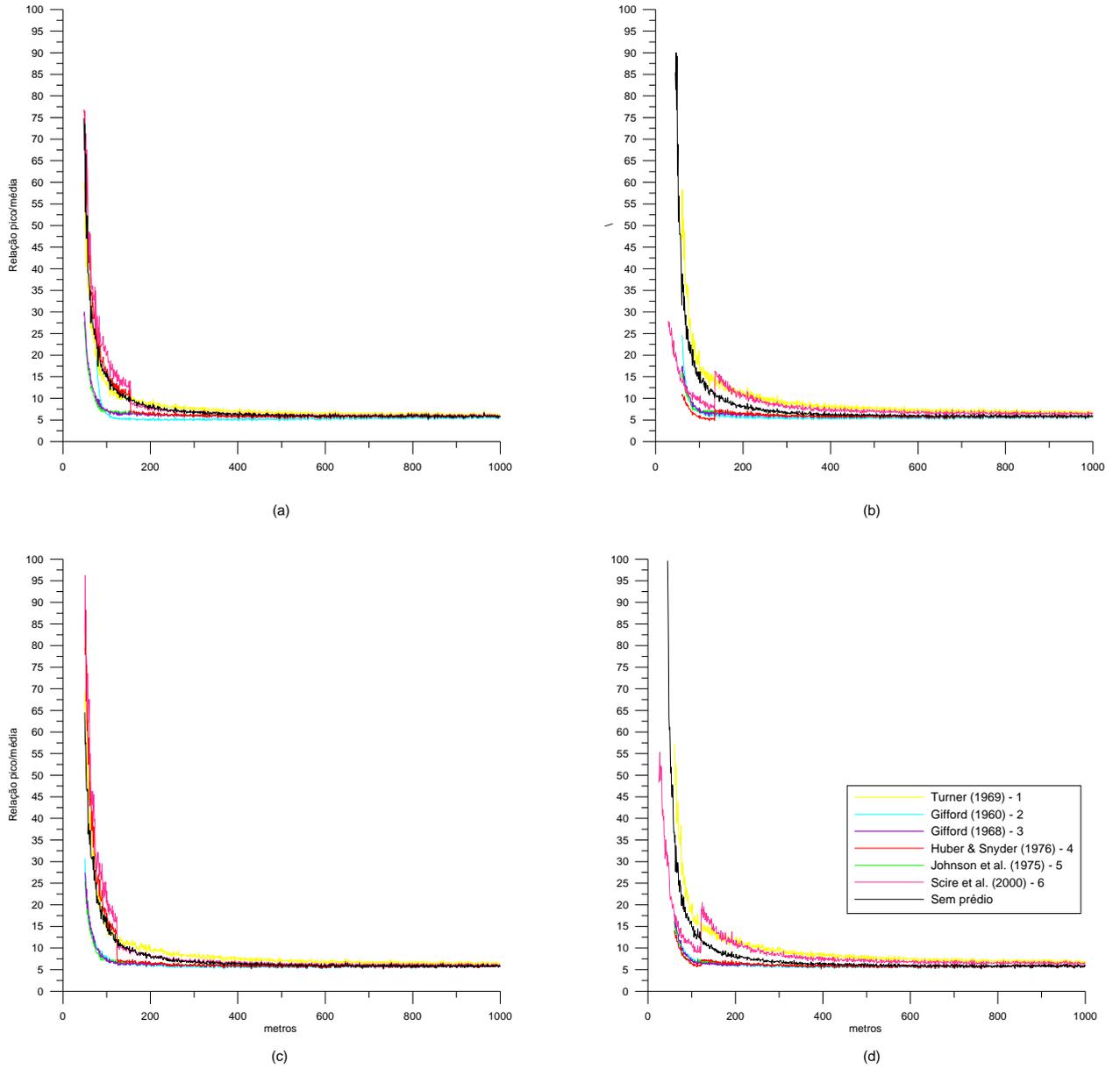


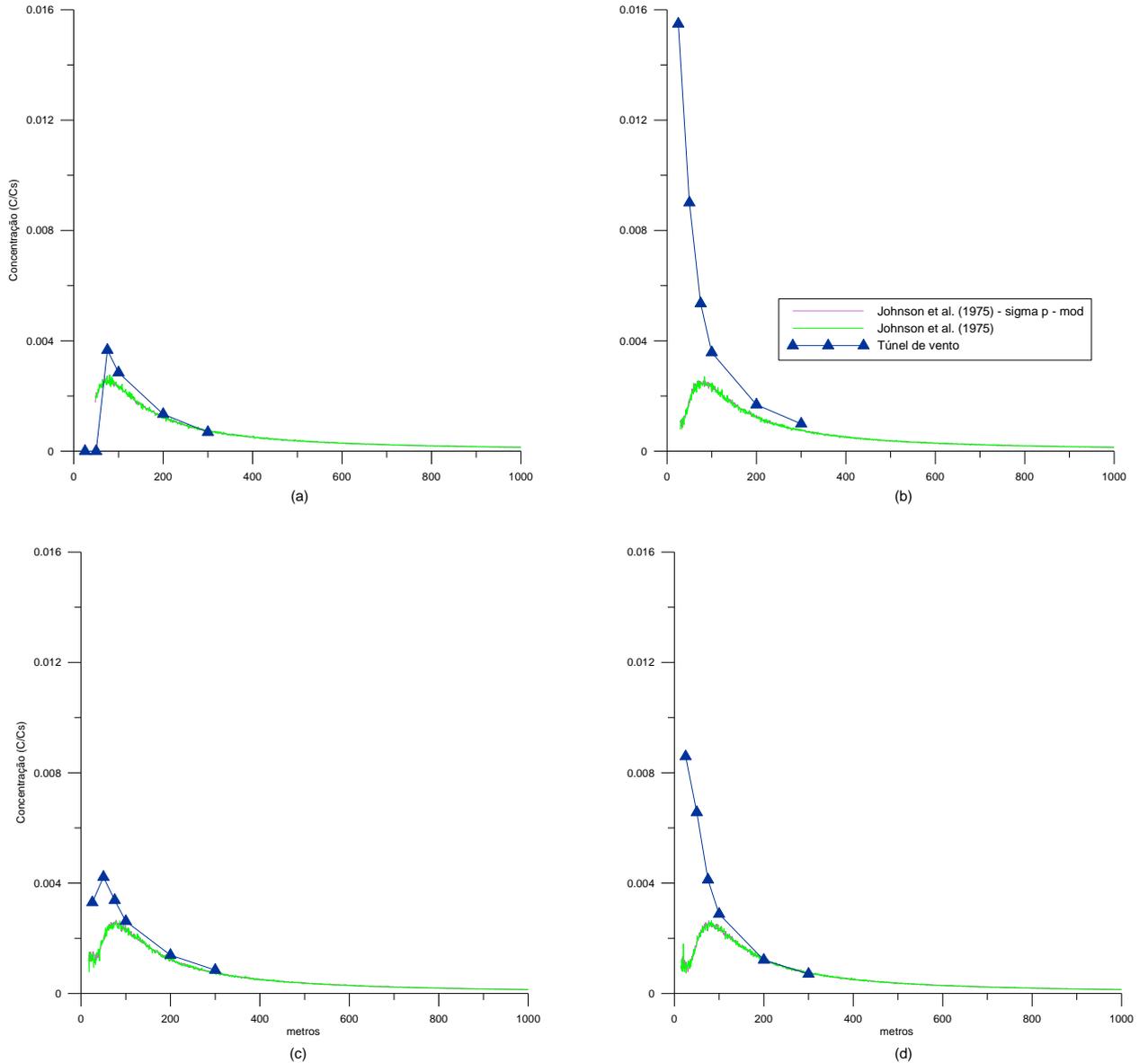
Figura 5-13: Relação pico/média da concentração, comparando os resultados do modelo, para cada uma das abordagens, sendo (a) vento 40 graus; (b) vento 130 graus; (c) vento 220 graus; (d) vento 310 graus.

## 5.4 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO VALOR DE $\sigma_p$ NOS VALORES MODELADOS DA CONCENTRAÇÃO MÉDIA, INTERMITÊNCIA E RELAÇÃO PICO/MÉDIA

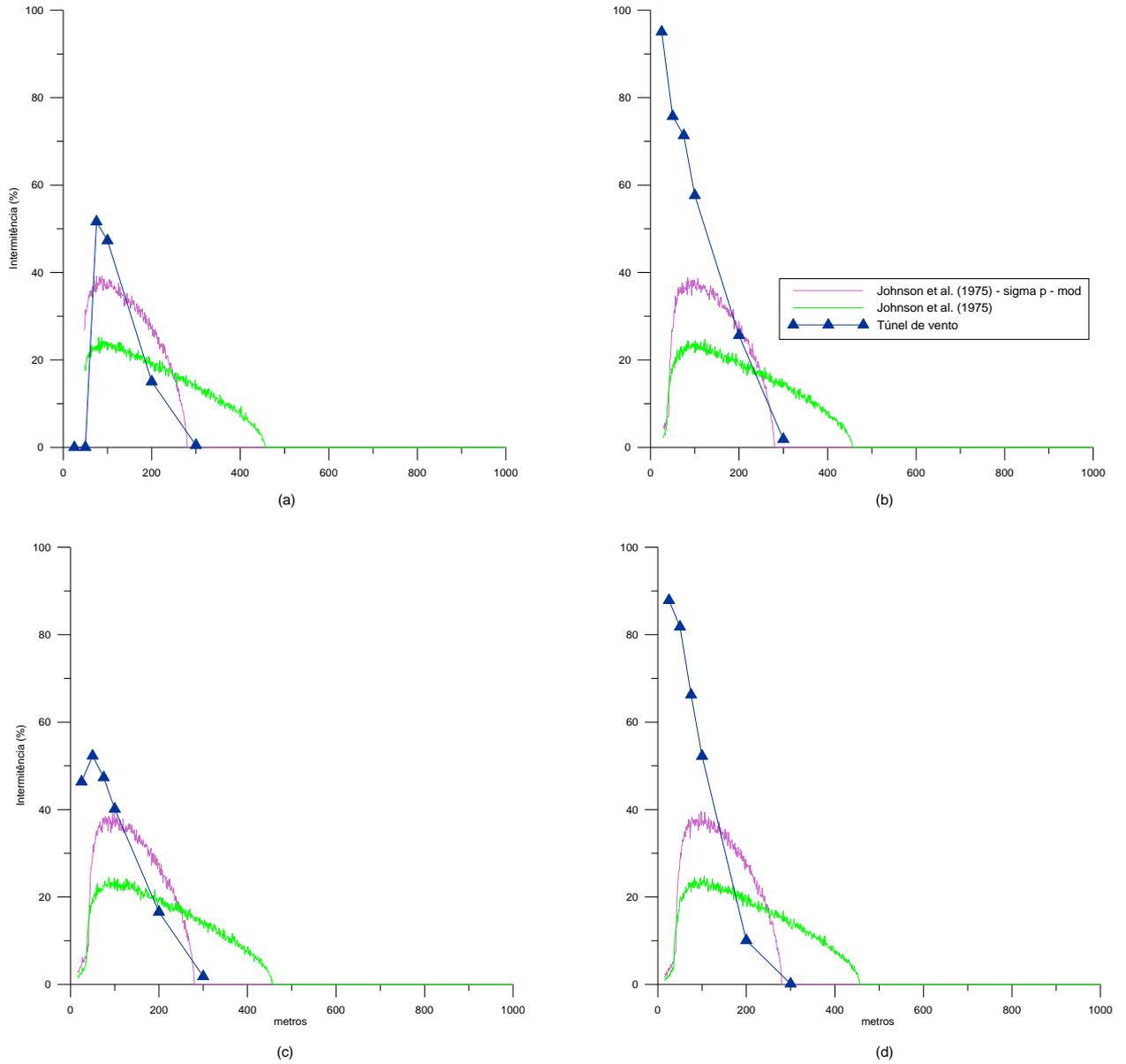
Conforme citado na seção 5.2, o procedimento empregado para o cálculo de  $\sigma_p$  não leva em conta a presença de obstáculos. As abordagens empregadas na modelagem gaussiana para incluir a presença de um obstáculo consideram que este causa uma tendência em aumentar o tamanho da pluma devido ao espalhamento. Este efeito é representado pelo emprego de valores modificados para os parâmetros de dispersão  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ . Um raciocínio análogo implicaria em adotar uma modificação nos valores de  $\sigma_p$  a fim de incluir o efeito do prédio.

Uma das hipóteses consideradas na análise dos resultados da intermitência (Seção 5.2) é que o valor de  $\sigma_p$  empregado na modelo de pluma flutuante em presença de obstáculos pode estar subestimado. Högström (1972) afirma que o cálculo de  $\sigma_p$  pode não representar corretamente a física do processo dependendo da situação na qual ele é empregado. De fato, uma modificação no valor de  $\sigma_p$ , de forma que este assuma o dobro do valor calculado, forneceu resultados com uma significativa modificação na intermitência, que assumiu um comportamento mais próximo ao observado no túnel de vento, conquanto ainda com seu valor máximo subestimado. Os resultados também mostraram que a concentração média não sofreu alterações dignas de nota, conforme pode ser observado na Figura 5-14, onde o traço do gráfico para os resultados do modelo com e sem modificação sobrepõem-se. Entretanto, como consequência da modificação em  $\sigma_p$ , o valor da relação pico média foi reduzido em cerca de 50%, uma vez que a largura da pluma duplicou, aumentando a diluição do composto emitido, de forma que, para uma mesma concentração média, os valores de pico serão menores.

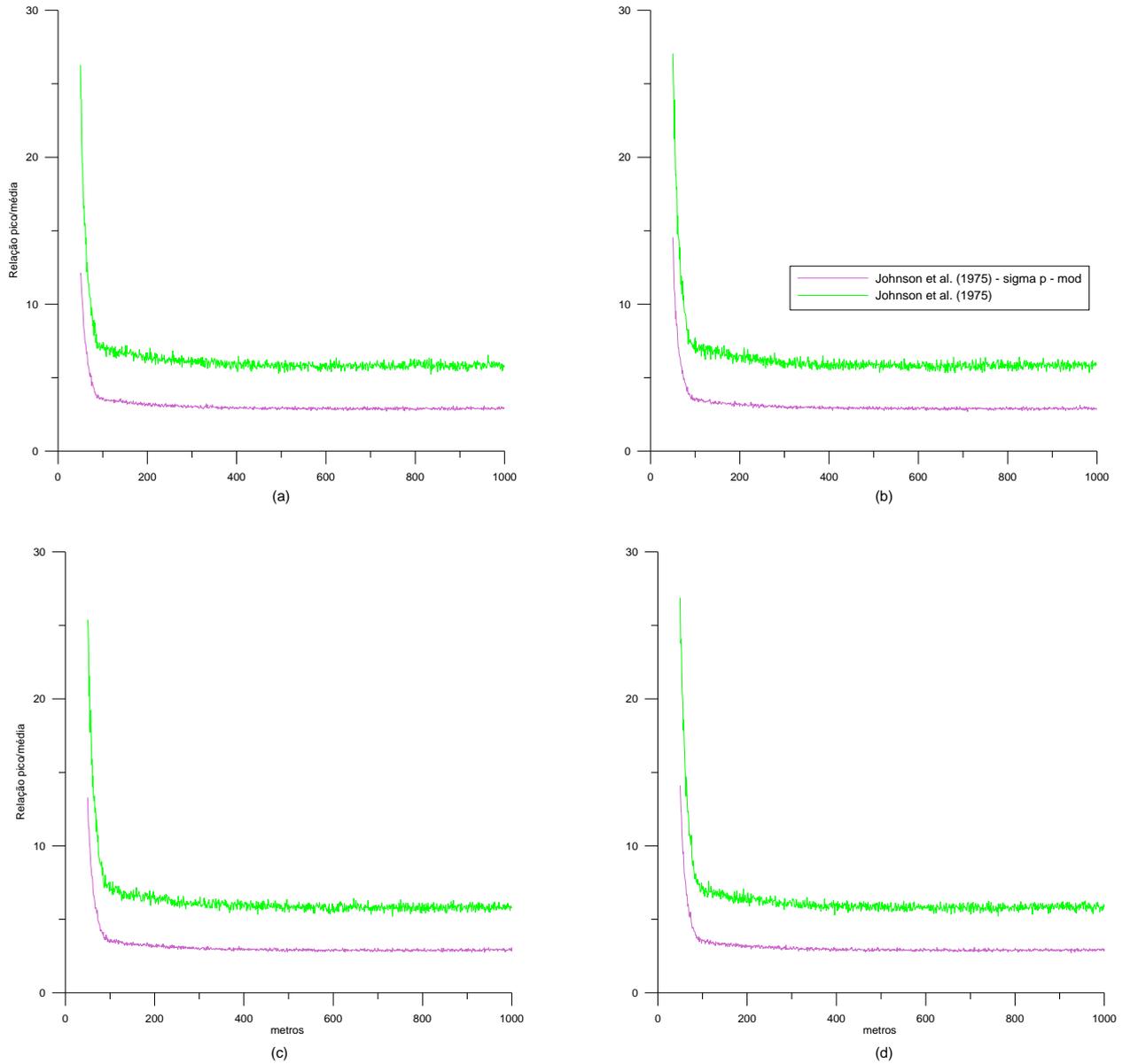
Estes resultados são ilustrados nas Figuras 5-15 a 5-17, na comparação entre os dados modelados com e sem modificação de  $\sigma_p$  (abordagem 5), e os resultados do túnel de vento.



**Figura 5-14: Influência do valor de  $\sigma_p$  nos valores modelados da concentração média; comparação entre o método 5, método 5 com  $\sigma_p$  modificado e túnel de vento para (a) vento 40 graus; (b) vento 130 graus; (c) vento 220 graus; e (d) vento 310 graus; os resultados do modelo com e sem modificação não apresentam diferença significativa, de forma que os traçados nos gráficos estão sobrepostos.**



**Figura 5-15: Influência do valor de  $\sigma_p$  nos valores modelados da intermitência; comparação entre o método 5, método 5 com  $\sigma_p$  modificado e túnel de vento para (a) vento 40 graus; (b) vento 130 graus; (c) vento 220 graus; e (d) vento 310 graus.**



**Figura 5-16: Influência do valor de  $\sigma_p$  nos valores modelados da relação pico/média; comparação entre o método 5 e método 5 com  $\sigma_p$  modificado para (a) vento 40 graus; (b) vento 130 graus; (c) vento 220 graus; e (d) vento 310 graus.**

## 6 CONCLUSÃO

O presente trabalho objetivou estudar a modelagem matemática da dispersão atmosférica de compostos odorantes com a presença de obstáculos, investigando a aplicação da modelagem gaussiana de pluma flutuante conforme proposto por Murray *et al.* (1978) e Mussio *et al.* (2001). Seis diferentes abordagens (Turner, 1969; Gifford, 1960; Gifford, 1968; Huber & Snyder 1976; Johnson, 1975 e Scire, 2000) para a inclusão da influência do obstáculo na aplicação da modelagem gaussiana foram avaliadas. Além disso, o modelo foi empregado em uma situação sem a presença do prédio. Os resultados da concentração média e intermitência foram comparados com dados experimentais obtidos através de modelagem em túnel de vento realizada por Aubrun, Leidl e Schatzmann (Aubrun & Leidl, 2004) para os casos do vento com direção 40°, 130°, 220° e 310°.

As abordagens 1 (Turner, 1969) e 2 (Gifford, 1960) forneceram sempre os menores valores para a concentração média, subestimando o efeito do obstáculo no escoamento e na dispersão do composto emitido. As abordagens 4 (Huber & Snyder, 1976) e 6 (Scire *et al.*, 2000) apresentaram um melhor desempenho para as situações nas quais o vento incidiu perpendicularmente à maior face do prédio, direções 130° e 310°. Entretanto, a limitação de aplicação da formulação que modifica os parâmetros de dispersão a uma distância do prédio de até 10 comprimentos característicos ocasiona uma descontinuidade nos resultados. Os resultados das abordagens 3 (Gifford, 1968) e 5 (Johnson *et al.*, 1975) em geral, apresentaram melhor desempenho em todas as simulações efetuadas quando comparados aos resultados do túnel de vento. Quando o prédio é retirado, os valores encontrados foram semelhantes aos da abordagem 3 e 5. Esse fato pode ser explicado pelos valores fornecidos para a modificação dos parâmetros de dispersão utilizada nessas abordagens, que ficaram próximos aos valores não modificados.

Os resultados da intermitência, definida como a porcentagem de tempo na qual um determinado limite de concentração foi ultrapassado, foram menores em comparação aos valores medidos em túnel de vento nas proximidades do obs-

táculo, apresentando, porém, decaimento mais lento, superando os valores do túnel em regiões mais afastadas. Este fato pode indicar que, na região próxima ao obstáculo, a oscilação da pluma é modelada com maior intensidade, de forma que a pluma permaneça por mais tempo afastada do receptor. Este comportamento pode ser resultante da falta de possibilidade em modelar a influência de obstáculos com formatos irregulares e também dos valores calculados para  $\sigma_p$ , que podem estar sendo subestimados. De fato, uma modificação do valor de  $\sigma_p$ , de forma a dobrar o seu valor, forneceu resultados para a intermitência cujo comportamento foi mais próximo dos valores medidos em túnel de vento, sem contanto alterar os resultados da concentração média. As abordagens 3 e 5 também apresentaram o melhor comportamento, com resultados também semelhantes ao caso sem prédio, muito embora nenhuma das abordagens empregadas foi capaz de prever os altos valores de intermitência observados na região da cavidade.

Os valores calculados para a relação pico/média, em todas as abordagens, foram mais altos na proximidade do obstáculo, estabilizando-se nas regiões mais afastadas com valores entre 10 e 5. Estes valores foram reduzidos pela metade quando o valor de  $\sigma_p$  foi dobrado.

Os resultados obtidos mostram que o modelo gaussiano de pluma flutuante não se mostrou completamente adequado ao emprego para o estudo da dispersão atmosférica de compostos odorantes. Apesar da concordância relativamente boa para os níveis de concentração média, existem significativas discrepâncias entre os níveis de intermitência preditos e os observados em túnel de vento. As abordagens 3 e 5 apresentaram os melhores resultados nas comparações com resultados experimentais. As diferenças observadas entre os resultados modelo empregado no presente trabalho e os dados do experimento em túnel de vento podem estar relacionadas às diferenças na forma entre obstáculo real e o considerado no modelo matemático, bem como à forma de cálculo dos parâmetros de dispersão da pluma.

Os resultados obtidos no presente trabalho mostram que estudos posteriores devem ser realizados a fim de adequar a aplicação do modelo gaussiano de

pluma flutuante em situações com a presença de obstáculos. Sendo assim, são sugeridas as seguintes linhas de estudo:

- Investigar a influência do obstáculo na determinação dos parâmetros de dispersão da pluma flutuante;
- Investigar a influência da geometria do prédio nos resultados do modelo de pluma flutuante, com a comparação com dados experimentais para um obstáculo com formato de paralelepípedo;
- Investigar a influência da flutuação da direção do vento, empregando um modelo gaussiano estacionário juntamente às abordagens para considerar o obstáculo ao caso estudado no presente trabalho
- Empregar o modelo PRIME no caso estudado no presente trabalho, uma vez que sua formulação se propõe a modelar a dispersão no interior da zona de recirculação, o que se mostra uma deficiência dos modelos apresentados.

## 7 REFERÊNCIAS

AUBRUN, S.; LEITL, B. Unsteady characteristics of the dispersion process in the vicinity of a pig barn. Wind tunnel experiments and comparison with field data. **Atmospheric Environment**, n.38, 2004, p.81-93.

BOEKER, P., WALLENFANG, O., KOSTER, F., CROCE, R., DIEKMANN, B., GRIEBEL, M., LAMMERS, P. S., The Modelling of Odour Dispersion with Time-Resolved Methods. **Agrartechnische Forschung** 6, (2000) Heft 4, S. E 84-E 89.

BOEKER, P., WALLENFANG, O., WITTKOWSKI, M., KOSTER, F., LAMMERS, P. S., DIEKMANN, B., GRIEBEL, M. Odour Dispersion and Fluctuation Modelling With a Non-Stationary Lagrangian Model. **Seventh International Conference On Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes**. Belgirate, Italia, 28-31 maio de 2001. Disponível em: <<http://rtmod.jrc.it/~thunis/harmo7/P212.pdf>>. Acesso em 4 ago. 2004.

BRASIL. Lei nº. 6938/81, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Ministério da Ciência e Tecnologia**. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/9104.html>>. Acesso em 5 ago. 2007.

BROWN, G.J., FLETCHER, D.F. CFD Prediction Of Odour Dispersion And Plume Visibility For Alumina Refinery Calciner Stacks. **Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries**, CSIRO, Melbourne, Australia, 10-12 December 2003. Disponível em: <[http://wissrech.ins.uni-bonn.de/research/pub/koster/lt20004e\\_atf\\_084\\_089.pdf](http://wissrech.ins.uni-bonn.de/research/pub/koster/lt20004e_atf_084_089.pdf)>. Acesso em 28 jul. 2004.

CHA, S. S. In: RAFSON, H. J. **Odor and VOC Control Handbook**. New York: McGraw-Hill, 1998.

COMITÉ EUROPEEN DE NORMALISATION. Air quality – **Determination of odour concentration by dynamic olfactometry**. EN 13725. Bruxelles, 2003.

COMPILATION of Experimental Data for Validation of Microscale Dispersion Models – CEDVAL. WebSite provided by the Environmental Wind Tunnel Laboratory (EWTL) of the Meteorological Institute. Apresenta uma compilação de resultados de experimentos em túnel de vento para a utilização em validação de modelos matemáticos de dispersão atmosférica. Disponível em: <[http://www.mi.uni-hamburg.de/CEDVAL\\_Validation\\_Data.427.0.html](http://www.mi.uni-hamburg.de/CEDVAL_Validation_Data.427.0.html)>. Acesso em 18 mai. 2006.

DE MELO LISBOA, H. ; GUILLOT, J. M. ; FANLO, J. L.; LE CLOIREC, P. Dispersion of odorous gases in the atmosphere — Part I: Modeling approaches to the phenomenon. **Science of the Total Environment**. v.361, n.1-3, mai 2006, p.220–228

DEPARTMENT FOR ENVIRONMENT, FOOD AND RURAL AFFAIRS – DEFRA. **Consultation on the draft Code of Practice and Local Authority Guide on Odour Nuisance from Sewage Treatment Works**. Londres: Crown, 2004.

DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION (DEP) – WESTERN AUSTRALIA. **Odour Methodology Guideline**. Perth – Australia, 2002.

DREW, G.H.; SMITH, R.; GERARD, V.; BURGE, C.; LOWE, M.; KINNERSLEY, R.; SNEATH, R.; LONGHURST, P.J. Appropriateness of selecting different averaging times for modelling chronic and acute exposure to environmental odours. **Atmospheric Environment**. v.41, n.13, abr 2007, p.2870-2880

ENVIRONMENTAL AGENCY FOR ENGLAND AND WALES (EA), SCOTTISH ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (SEPA), NORTHERN IRELAND ENVIRONMENT AND HERITAGE SERVICES (NIEHS). **Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) – Horizontal Guidance for Odour. Part 1. Regulation and Permitting**. Bristol, 2002

GIFFORD, F. An Outline of Theories of Diffusion In The Lower Layers of the Atmosphere. In: SLADE, D. H. (Ed.). **Meteorology and Atomic Energy 1968**. Division of Reactor Development and Technology. Springfield, USA: US Atomic Energy Commission, 1968.

GIFFORD, F. Atmospheric Dispersion Calculations Using the Generalized Gaussian Plume Model. **Nuclear Safety**, v.2, n.2, p.50-59. 1960.

GIFFORD, F. Statistical properties of a fluctuating plume dispersion model. **Advances in Geophysics**, n.6, p.117-137. 1959.

GOSTELOW, P.; PARSONS, S. A.; STUETZ, R. M. Odour Measurements for Sewage Treatment Works. **Water Research**, v. 35, n. 3, p. 579-597. 2001.

HANNA, S. R.; BRIGGS, G. A.; HOSKER, R. P. **Handbook on Atmospheric Diffusion**. Springfield, US: Technical Information Center, U.S. Department Of Energy, 1982.

HOGSTRÖM, U. A Method for predicting odour frequencies from a point source. **Atmospheric Environment**. v.6, p.103-121. 1972

HOGSTRÖM, U. A statistical approach to the air pollution problem of chimney emission. **Atmospheric Environment**. n.2, p.251-277. 1968.

HOSKER, R. P. **Methods for Estimating Wake and Effluent Dispersion Near Simple Block-like Buildings**. NOAA Technical Memorandum. Silver Springs, US: Air Resources Laboratories, 1981.

HUBER, A. H.; SNYDER, R. S. Building wake effects on short stack effluents. In: Preprints of Third Sympos. In: **Atmospheric Turbulence, Diffusion and Air Quality**, Raleigh, NC, Oct. 19-22, 1976. Amer. Meteorol. Soc., Boston, MA. p.235-242.

JOHNSON, W. B.; SHELAR, E; RUFF, R. E.; SINGH, H. B.; SALAS, L. **Gas Tracer Study of Roof-Vent Effluent Diffusion at Millstone Nuclear Power**

**Station.** Atomic Industrial Forum. Report AIF/NESP-007b, 1975, Washington, DC.

LI, X. X.; LIU, C. H.; LEUNG, D. Y. C. ; LAM, K. M. Recent progress in CFD modelling of wind field and pollutant transport in street canyons. **Atmospheric Environment**. n.40, 2006, p.5640-5658.

LI, Y.; GUO, H. Comparison of odor dispersion predictions between CFD and CALPUFF models. **Transactions of The ASABE**. V.49, n.6, nov-dez 2006, p.1915-1926.

MORTON, C. Sources of Odors from Wastewater Treatment Processes. **Air Currents**. Jan 2002, section 4. Disponível em:  
<[http://www.pirnie.com/docs/resources\\_pubs\\_air\\_jan02\\_2.html](http://www.pirnie.com/docs/resources_pubs_air_jan02_2.html)> Acesso em 05 mar. 2006.

MURRAY, D.R., CHA, S.S., BOWNE, N.E. Use of a fluctuating plume model for prediction of the impact of odorous emissions. Paper 78-68.6. **Proceedings of the 72nd Annual Meeting of the Air Pollution Control Association**, Houston, TX, 25-30 June 1978. p. 1-14. Pittsburgh, USA: Air and Waste Management Association, 1978.

MUSSIO, P. **Development of a Fluctuating Plume Model for the Determination of Odour Impact Frequencies**. Thesis (Master of Applied Science). Faculty of Graduated Studies and Research, University of Windsor, Windsor, Canada, 1989.

MUSSIO, P., GNYP, A. W., HENSHAW, P. F. A fluctuating plume dispersion model for the prediction of odour-impact frequencies from continuous stationary sources, **Atmospheric Environment** , v.35, n16 , Jun 2001, p.2955-2962.

PASQUILL, F. The estimation of the dispersion of windborne material. **Meteorol. Mag.** n.90, 1961, p.33-49.

SANTOS, J. M.; GRIFFITHS, R. F.; ROBERTS, I. D.; REIS JR., N. C. A field experiment on turbulent concentrations fluctuation of an atmospheric tracer gas in the vicinity of a complex-shaped building. **Atmospheric Environment**, n.39, 2005, p.4999-5012

SCHAUBERGER G., PIRINGER M.: Assessment of the odour concentration in the near-field of small sources. **Environmental Odour Management**. VDI Berichte 1850, VDI , 2004. Verlag, Düsseldorf, p.343-352

SCHIFFMAN, S. S.; MCLAUGHLIN, B.; KATUL, G. G.; Nagle, H.T. Eulerian-Lagrangian model for predicting odor dispersion using instrumental and human measurements. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v.106, n.1, 29 April 2005, p.122-127

SCHIFFMAN, S. S.; WILLIAMS, C. M. Science of Odor as a Potential Health Issue. **J. Environ. Qual.** n.34, 2005. p.129-138.

SCHULMAN, L. L.; HANNA, S. R. Evaluation of downwash modifications to the Industrial Source Complex Model. **JAPCA**, n.36, 1986, p.258-264.

SCHULMAN, L. L.; STRIMAITIS, D. G.; SCIRE, J. S. Development and Evaluation of the PRIME Plume Rise and Building Downwash Model. **J. Air & Waste Manage. Assoc.** n.50, mar 2000, p.378-390

SCIRE, J. S.; SCHULMAN, L. L. Modeling plume rise from low-level buoyant line and point sources. **Proceedings Second Point Conference on Applications of Air Pollution Meteorology**, 24-28 de março de 1980, New Orleans, USA. p.133-139.

SCIRE, J. S.; STRIMAITIS, D. G. ; YAMARTINO, R. J. **A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model**. Concord, USA: Earth Tech, 2000.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. (1998) *Atmospheric Chemistry and Physics – From Air Pollution to Climate Change*. New York, USA: Wiley & Sons.

SHAUBERGER, G., PIRINGER, M., PETZ, E. Diurnal and annual variation of the sensation distance of odour emitted by livestock buildings calculated by the Austrian odour dispersion model (AODM). **Atmospheric Environment**, n.34, 2000, p. 4839-4851.

SIMMS, K. L.; WILKINSON, S.; BETHAN, S. Odour nuisance and dispersion modelling: an objective approach to a very subjective problem. **Water Science and Technology**. v.41, n.6, 2000, p.89-96.

TURNER, B. Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates. An Introduction To Dispersion, Modeling. 1994, 2ed. Boca Raton, US: CRC Press

TURNER, B. **Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates**. US Dept. of HEW, Public Health Service, Publication n. 999-AP-26, 1969, viii.

U.S. DEPARTMENT OF LABOR - OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION (OSHA). **Guidance for Hazard Determination**. Disponível em <<http://www.osha.gov/dsg/hazcom/ghd053107.html>>. Acesso em 31 jul. 2007.

VENKATRAM, A.; ISAKOV, V.; YUAN, J.; PANKRATZ, D. Modeling dispersion at distances of meters from urban sources. **Atmospheric Environment**, n.38, 2004, p.4633-4641.

VERSTEEG, H. K., MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics**. The finite Volume Method. Essex, UK: Longman, 1995.

VINCENT, A., HOBSON, J. **Odour Control**. Lavenham, UK: Terence Dalton, 1998.

WANG, L.; PARKER, D. B.; PARNELL, C. B.; LACEY, R. E.; SHAW, B. W. Comparison of CALPUFF and ISCST3 models for predicting downwind odor and source emission rates. **Atmospheric Environment**. v.40, n.25, ago 2006, p.4663–4669.

## ANEXO A – CÁLCULO DAS DIMENSÕES DA ZONA DE RECIRCULAÇÃO DO PRÉDIO

Hosker (1981) sugeriu a seguinte relação empírica para o cálculo do comprimento da zona de recirculação, medido a partir da face posterior do prédio, no sentido do escoamento:

$$\frac{x_R}{H} = \frac{A\left(\frac{W}{H}\right)}{1 + B\left(\frac{W}{H}\right)} \quad (\text{A-0-1})$$

onde,

$x_R$  = o comprimento da cavidade (m);

$H$  = altura do prédio

$W$  = largura do prédio, perpendicular à direção do vento.

Os fatores A e B são calculados segundo a seguinte expressão, para casos onde a relação entre o comprimento do obstáculo (na direção do escoamento) e a altura do prédio for pequena (menor ou igual a unidade), de forma a que não haja recolamento do fluxo à superfície do prédio:

$$A = -2,0 + 3,7\left(\frac{L}{H}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{A-0-2})$$

$$B = -0,15 + 0,305\left(\frac{L}{H}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{A-0-3})$$

onde  $L$  é o comprimento do prédio, medido na direção do escoamento.

Para os casos em que  $L/H > 1$ , os seguintes valores são sugeridos:

$$A = 1,75$$

$$B = 0,25$$

Para o prédio modelado pelo experimento do tunnel de vento, os limites calculados para a zona de recirculação foram 86,9 m, 74,8 m, 55,3 m e 60,3 m para os casos do vento com direção 40°, 130°, 220° e 310°, respectivamente.