

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

**ANDLER MAGNO VIEIRA DE MELO**

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DOS MODELOS AERMOD E**  
**CALPUFF ASSOCIADOS AO MODELO PRIME**

VITÓRIA

2011

**ANDLER MAGNO VIEIRA DE MELO**

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DOS MODELOS AERMOD E  
CALPUFF ASSOCIADOS AO MODELO PRIME**

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

2011

Aos meus pais, e a minha irmã...

## **AGRADECIMENTOS:**

A Prof<sup>a</sup>. Jane Meri Santos, que me orientou com todo suporte e atenção que precisei ao longo do trabalho, me dando liberdade na tomada de decisões e sendo fundamental no meu entendimento do assunto e execução da dissertação.

Ao Prof. Neyval Costa Reis Junior pela orientação em momentos importantes e pelo apoio na reta final da elaboração do trabalho.

Ao Harerton Dourado pela força ao longo do trabalho, me passando rapidamente a direção dos assuntos envolvido na dissertação, além fazer com que eu pudesse contribuir da melhor maneira para o grupo de estudos NQualiAr.

Ao Edilson Luiz Nascimento, pela contribuição na formação do curso, pela boa convivência com muita risada e por ser prestativo nos momentos difíceis.

Ao amigo Israel Pestana Soares, que sempre incentivou nos momentos bons e ruins.

Ao amigo Augusto César Rodrigues que ganhei nessa jornada, passando sempre bom humor e entusiasmo.

Ao trio parada dura Antônio, Ayres e Nadir, que sempre deram conselhos, compartilhando conhecimento em todos os momentos.

Aos demais amigos do Mestrado, aos meus primos, tios, avós e amigos mais próximos pela torcida e pela amizade que sempre me dedicaram.

E finalmente ao meu pai, minha mãe e minha irmã por serem perfeitos e me proporcionarem muita vontade e força para encarar e vencer todos os desafios da minha vida.

“Somos aquilo que repetidamente fazemos;  
portanto, a excelência não é um feito, mas um  
hábito.”

Aristóteles

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1: Dispersão de poluentes ao redor de um prédio cúbico (Mavroidis <i>et al.</i> , 2003) .....	21
Figura 1-2: Representação esquemática do efeito do obstáculo no escoamento (Adaptado, HOSKER, 1984). .....	22
Figura 1-3: A área hachurada mostra que valores de pico da concentração de um composto emitido podem provocar percepção de odor mesmo quando o valor médio está abaixo do limite de percepção (Adaptado DE MELO LISBOA <i>et al.</i> , 2006).....	25
Figura 3-1: Estrutura da camada limite planetária (Adaptado STULL, 1988). .....	29
Figura 4-1: Tratamento da Pluma na Camada Limite Convectiva pelo modelo AERMOD (adaptado de EPA, 2004a). .....	43
Figura 4-2: Aproximação da distribuição da pluma na camada limite convectiva (adaptado de EPA, 2004a). .....	46
Figura 4-3: Um <i>puff</i> em dois instantes de tempo (Adaptado MORAES, 2004). .....	53
Figura 4-4: Movimento do <i>puff</i> em relação a um receptor localizado em $(x_r, y_r)$ (adaptado SCIRE <i>et al.</i> 2000). .....	56
Figura 4-5: Definição das regiões do escoamento consideradas pelo modelo PRIME. Fonte: Schulman <i>et al.</i> (2000). .....	64
Figura 4-6: Comparação das linhas de corrente previsto pelo modelo PRIME (a) com observações de túnel de vento (b). As cinco regiões das linhas de corrente (A-E) são observados. A altura e as distâncias são dimensionadas na altura do edifício $H$ . Fonte: Schulman <i>et al.</i> (2000). .....	67
Figura 5-1: Esquema do experimento em túnel de vento (adaptado SADA e SATO, 2002b). .....	78
Figura 5-2: Configuração esquemática do experimento realizado por Sada e Sato (2002). a) Vista superior, b) Vista lateral. .....	78
Figura 5-3: Distâncias em termos adimensionais onde os perfis médios de concentração foram mensurados. ....	79
Figura 5-4: experimento em túnel de vento realizado por Aubrun, Leidl e Schatzmann (CEDVAL, 2006). .....	80

Figura 5-5: detalhe do modelo do prédio utilizado nos experimentos em túnel de vento (CEDVAL, 2006).....	80
Figura 5-6: esquema do modelo do prédio utilizado no túnel de vento, mostrando a orientação do modelo em relação ao norte (adaptado CEDVAL, 2006).....	81
Figura 5-7: dimensões do modelo de prédio utilizado no túnel de vento (mm) (adaptado CEDVAL, 2010). a) visão frontal b) visão lateral. ....	81
Figura 5-8: Configuração fonte-obstáculo em escala real. ....	82
Figura 5-9: a) Perfil adimensional de velocidade do vento na posição da chaminé; b) Perfil de intensidade de turbulência. $z_{ref}$ é a altura de referência e $U_{ref}$ é a velocidade de referência.....	83
Figura 5-10: dimensões do modelo de prédio utilizado em túnel de vento (escala real, em metros) (adaptado CEDVAL, 2010). a) visão frontal b) visão lateral.....	85
Figura 5-11: a) Perfil adimensional de velocidade do vento; b) Perfil adimensional de intensidade de turbulência. $z_{ref}$ é a altura de referência e $U_{ref}$ é a velocidade de referência.....	86
Figura 5-12: Domínio e malha computacional referente a simulação dos experimentos de Sada e Sato (2002). ....	93
Figura 5-13: Domínio e malha computacional referente a simulação dos experimentos de Aubrun e Leitl (2004). Configuração que representa incidência do vento à 40° na face do prédio.....	94
Figura 5-14: Domínio e malha computacional referente a simulação dos experimentos de Aubrun e Leitl (2004). Configuração que representa incidência do vento à 130° na face do prédio.....	94
Figura 5-15: Domínio e malha computacional referente a simulação dos experimentos de Aubrun e Leitl (2004). Configuração que representa incidência do vento à 220° na face do prédio.....	95
Figura 5-16: Domínio e malha computacional referente a simulação dos experimentos de Aubrun e Leitl (2004). Configuração que representa incidência do vento à 310° na face do prédio.....	95
Figura 5-17: Valores das alturas das faces e dos centros das células, utilizado nas modelagens referentes ao experimento Sada e Sato (2002). ....	96

Figura 5-18: Valores das alturas das faces e dos centros das células, utilizados nas modelagens referentes ao experimento Aubrun e Leiti (2004) .....	97
Figura 5-19: janela de opções de coeficientes de dispersão. ....	101
Figura 5-20: janela de opções de dispersão, utilizando os coeficientes de Pasquill-Gifford.....	104
Figura 5-21: janela de opções de dispersão, utilizando os coeficientes de Pasquill-Gifford.....	105
Figura 5-22: janela de opções de dispersão, utilizando os coeficientes de Pasquill-Gifford.....	105
Figura 5-23: janela de opções de dispersão, utilizando os coeficientes de Pasquill-Gifford.....	106
Figura 5-24: janela de opções do processamento CALPOST. ....	106
Figura 5-25: janela de opções do processamento CALPOST. ....	107
Figura 5-26: janela de opções do processamento CALPOST. ....	107
Figura 5-27: janela de opções do processamento CALPOST. ....	108
Figura 6-1: Perfil vertical de concentração média adimensionalizada, comparando os dados do túnel de vento com os resultados dos modelos.....	111
Figura 6-2: Correlação entre os dados de túnel de vento e os resultados dos modelos nas distâncias $X/H=1,5$ e $X/H=2,5$ .....	113
Figura 6-3: Correlação entre os dados de túnel de vento e os resultados dos modelos nas distâncias $X/H=3,5$ e $X/H=5$ .....	114
Figura 6-4: Perfil horizontal de concentração média adimensional, comparando os dados do túnel de vento com os resultados dos modelos.....	116
Figura 6-5: Perfil horizontal de concentração media adimensional, comparando os dados do túnel de vento com os resultados dos modelos.....	118
Figura 6-6: Perfil horizontal de concentração media adimensional, comparando os dados do túnel de vento com os resultados dos modelos.....	120
Figura 6-7: Perfil horizontal de concentração media adimensional, comparando os dados do túnel de vento com os resultados dos modelos.....	121
Figura 6-8: Cenários de concentrações médias adimensionalizadas do túnel de vento e dos modelos AERMOD e CALPUFF; direção do vento 40 graus. ....	123

Figura 6-9: Cenários de concentrações médias adimensionalizadas do túnel de vento e dos modelos AERMOD e CALPUFF; direção do vento 130 graus. ....	124
Figura 6-10: Cenários de concentrações médias adimensionalizadas do túnel de vento e dos modelos AERMOD e CALPUFF; direção do vento 220 graus. ....	125
Figura 6-11: Cenários de concentrações médias adimensionalizadas do túnel de vento e dos modelos AERMOD e CALPUFF; direção do vento 310 graus. ....	126
Figura 6-12: Correlação entre os dados de túnel de vento e os resultados dos modelos, para as direções do vento 40° e 130°. ....	128
Figura 6-13: Correlação entre os dados de túnel de vento e os resultados dos modelos, para as direções do vento 220° e 310°. ....	129
Figura 6-14: Comparação entre as duas metodologias de cálculo para os picos de concentrações (3, 5, 10 e 30 minutos), aplicadas na modelagem com direção do vento 220°. ....	131

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1: Classes de Estabilidade Atmosférica de Pasquill .....	33
Tabela 4-1: Parâmetros usados para o cálculo do $\sigma_y$ de Pasquill-Gifford.....	59
Tabela 4-2: Parâmetros usados para o cálculo do $\sigma_z$ de Pasquill-Gifford.....	60
Tabela 4-3: Fórmulas de Briggs usadas para calcular $\sigma_y$ McElroy-Pooler.....	61
Tabela 4-4: Fórmulas de Briggs usadas para calcular $\sigma_z$ McElroy-Pooler.....	61
Tabela 4-5: Taxa de crescimento dos coeficientes MESOPUFF II.....	61
Tabela 4-6: Expressões resultantes para o desvio das linhas de corrente ( $dz/dx$ ) em $z \leq H$ e o fator de decaimento vertical ( $F_z$ ) para $z > H$ .....	68
Tabela 5-1: Dados meteorológicos de superfície para a modelagem Sada e Sato (2002). .....	87
Tabela 5-2: Informações meteorológicas na superfície. ....	88
Tabela 5-3: Perfis verticais de dados meteorológicos para a modelagem de Sada e Sato (2002). ....	89
Tabela 5-4: Perfis verticais de dados meteorológicos para a modelagem de Aubrun e Leitl (2004). ....	89
Tabela 5-5: Dados geofísicos para a simulação dos experimentos de Sada e Sato (2002).....	90
Tabela 5-6: Dados geofísicos para a simulação dos experimentos de Aubrun e Leitl (2004).....	90
Tabela 5-7: Características relacionadas à fonte, nos experimentos de Sada e Sato (2002). ....	91
Tabela 5-8: Características relacionadas à fonte, nos experimentos de Aubrun e Leitl (2004). ....	91
Tabela 5-9: Informações do arquivo SURF.dat utilizado na simulação dos experimentos de Sada e Sato (2002). ....	98
Tabela 5-10: Informações do arquivo SURF.dat utilizado na simulação dos experimentos de Aubrun e Leitl (2004). ....	98
Tabela 5-11: Informações do arquivo UP.dat para as simulações dos experimentos de Sada e Sato (2002). ....	99

Tabela 5-12: Informações do arquivo UP.dat para as simulações dos experimentos Aubrun e Leitl (2004) .....	99
Tabela 5-13: Informações do arquivo GEO.dat a simulação dos experimentos de Sada e Sato (2002). .....	100
Tabela 5-14: Informações do arquivo GEO.dat a simulação dos experimentos de Aubrun e Leitl (2004). .....	100
Tabela 5-15: Informações do arquivo profile.dat na modelagem de Sada e Sato (2002). .....	102
Tabela 5-16: Informações do arquivo profile.dat na modelagem de Aubrun e Leitl (2004). .....	103

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	parâmetro de entranhamento paralelo para a linha central da pluma
$\beta$	parâmetro de entranhamento normal para a linha central da pluma
$B$	constante empírica (fator de recirculação para as concentrações <i>near wake</i> )
$B_L$	maior altura (H) e largura (W)
$B_S$	menor altura (H) e largura (W)
$C_F$	contribuição da concentração <i>far wake</i> a partir da fração de pluma capturada pela <i>near wake</i> [ $\mu\text{g m}^{-3}$ ]
$C_N$	concentração <i>near wake</i> a partir da pluma capturada pela <i>near wake</i> [ $\mu\text{g m}^{-3}$ ]
$c_p$	calor específico do ar ambiente [ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]
$C_P$	contribuição da concentração <i>far wake</i> a partir da porção da pluma não capturada pela <i>near wake</i> [ $\mu\text{g m}^{-3}$ ]
$C_p(x, y, z)$	concentração devida a fonte penetrada [ $\text{g m}^{-3}$ ]
$C_d(x, y, z)$	concentração devida a fonte direta [ $\text{g m}^{-3}$ ]
$C_r(x, y, z)$	concentração emitida pela fonte indireta [ $\text{g m}^{-3}$ ]
$C_c(x, y, z)$	concentração total na camada limite convectiva [ $\text{g m}^{-3}$ ]
$C_s(x, y, z)$	concentração total na camada limite estável [ $\text{g m}^{-3}$ ]
$C$	concentração ao nível da superfície no receptor [ $\text{g m}^{-3}$ ]
$dz/dx$	inclinação das linhas de corrente
$d_a$	distâncias do centro do puff ao receptor na direção alinhada em relação ao vento [m]
$d_c$	distâncias do centro do puff ao receptor na direção perpendicular em relação ao vento [m]
$d_z$	distâncias do centro do puff ao receptor na direção vertical em relação ao vento [m]
$F$	fração da velocidade do vento ambiente na altura $z$ na esteira.
$f$	fração da massa pluma capturada pela <i>near wake</i> .
$f_p$	fração do material emitido pela fonte que permanece na camada limite convectiva
$F_c$	valor constante de $F$ na cavidade

$f_y$	fração da massa de pluma horizontal capturada pelo <i>near wake</i> .
$F_z$	fator de decaimento vertical para a inclinação das linha de corrente para $z > H$
$f_z$	fração da massa de pluma vertical capturada pela <i>near wake</i>
$g$	aceleração da gravidade [ $\text{m s}^{-2}$ ]
$g_v$	termo vertical da equação gaussiana
$H$	altura do prédio [m]
$H_C$	altura da cavidade de recirculação à jusante ao obstáculo [m]
$H_e$	altura efetiva do <i>puff</i> acima do solo [m]
$H_F$	fluxo de calor sensível [ $\text{W m}^{-2}$ ]
$H_P$	altura da pluma [m]
$H_R$	altura máxima da cavidade de recirculação à jusante ao obstáculo [m]
$H_W$	altura do limite da esteira [m]
$h$	altura da CLP [m]
$h_{ep}$	altura da pluma que penetra além do topo da camada limite convectiva [m]
$h_s$	altura da chaminé corrigida para <i>stack tip downwash</i> [m]
$h_{es}$	altura da pluma (ou seja, altura da chaminé mais a subida da pluma) [m]
$\Delta h_i$	subida da pluma para fonte indireta [m]
$\Delta h_d$	subida da pluma para a fonte direta [m]
$i_z$	intensidade de turbulência vertical
$i_{zN}$	valor de $i_z$ típico para escoamento neutro
$i_{z0}$	valor ambiente de $i_z$
$N$	frequência Brunt-Vaisala [ $\text{s}^{-1}$ ]
$L$	comprimento de Monin-Obukhov [m]
$L_p$	comprimento projetado do prédio ao longo do escoamento [m]
$k$	constante de Von Kármán, aproximadamente 0,4
$L_R$	comprimento da cavidade de recirculação [m]
$l_*$	comprimento característico no escoamento [m]
$l$	escala de comprimento [m]
$l_n$	escala de comprimento neutra – uma componente de $l$ [m]

$l_s$	escala de comprimento estável – uma componente de $l$ [m]
$Q$	taxa de emissão [g/s]
$Q_p$	massa de poluente no <i>puff</i> [g]
$R$	escala de comprimento do prédio [m]
$R_e$	número de Reynolds
$R_p$	distância do centro do <i>puff</i> ao receptor [m]
$R_{rp}$	propriedade de radiação da pluma com valor de $9,1 \times 10^{-11}$ [ $\text{kgm}^{-2}\text{K}^{-3}\text{s}^{-1}$ ]
$r$	raio da pluma [m]
$s$	distância percorrida pelo <i>puff</i> [m]
$s_{dc}$	distância ao longo da linha central da pluma, a partir da fonte emissora [m]
$T$	temperatura da pluma [K]
$t$	tempo [s]
$T_a$	temperatura ambiente [K]
$T_{L_y}$	escala de tempo Lagrangeana na direção $y$ [s]
$T_{L_z}$	escala de tempo Lagrangeana nas direção $z$ [s]
$T_{L_{zs}}$	escala de tempo Lagrangeana vertical na camada limite estável [s]
$u$	componente de velocidade do vento [ $\text{m s}^{-1}$ ]
$U_a$	velocidade do vento ambiente [ $\text{m s}^{-1}$ ]
$U_H$	velocidade do vento na altura do obstáculo [ $\text{m s}^{-1}$ ]
$U_0$	velocidade do vento uniforme antes do obstáculo usada como parte da razão $\Delta U_0 / U_0$
$U_{sc}$	velocidade da pluma ao longo da linha central [ $\text{m s}^{-1}$ ]
$U_w$	velocidade do vento na esteira [ $\text{m s}^{-1}$ ]
$u_*$	velocidade de fricção [ $\text{m s}^{-1}$ ]
$W$	largura projetada do obstáculo na transversal do escoamento [m]
$w$	componente de velocidade vertical [ $\text{m s}^{-1}$ ]
$w_*$	escala de velocidade convectiva [ $\text{m s}^{-1}$ ]
$W'_B$	escala de largura do prédio através do qual pluma é misturada na cavidade recirculação [m]
$W_C$	largura da cavidade de recirculação [m]

$W_w$	largura do limite da esteira [m]
$x, y$ e $z$	distância segundo as direções dos eixos coordenados [m]
$z_{ieff}$	altura efetiva da camada de mistura mecânica na camada limite estável ou a camada estável acima da camada convectiva [m]
$z_i$	altura da camada de mistura [m]
$\lambda$	fator de ponderação linear ( de 0 até 1) para a contribuição a partir de $C_N$ e $C_F$ na transição da zona entre a <i>near</i> e a <i>far wake</i>
$\phi$	ângulo da inclinação da linha central da pluma com a horizontal [rad]
$\xi$	distância definida na qual é igual a R na parede atrás do prédio [m]
$\mu$	viscosidade do fluido [ $\text{Nsm}^{-2}$ ]
$\Psi_{dj}$	altura entre a base da fonte e a linha central da pluma [m]
$\lambda$	coeficiente de ponderação da distribuição
$\rho$	densidade da pluma [ $\text{kg m}^{-3}$ ]
$\rho_a$	densidade do ar ambiente [ $\text{kg m}^{-3}$ ]
$\sigma_w$	desvio padrão da flutuação de velocidade de turbulência vertical [ $\text{m s}^{-1}$ ]
$\sigma_{wT}$	turbulência vertical total [ $\text{m s}^{-1}$ ]
$\sigma_{w0}$	valor ambiental de $\sigma_w$ [ $\text{m s}^{-1}$ ]
$\sigma_{wN}$	valor de $\sigma_w$ típico de escoamento neutro [ $\text{m s}^{-1}$ ]
$\sigma_y$	desvio padrão da distribuição de concentração lateral ou coeficiente de dispersão horizontal [m]
$\sigma_{yc}$	coeficiente de dispersão horizontal para a cavidade de recirculação [m]
$\sigma_z$	desvio padrão da distribuição de concentração vertical ou coeficiente de dispersão vertical [m]
$\sigma_{zc}$	coeficiente de dispersão vertical para a cavidade de recirculação [m]
$\sigma_{zj}$	dispersão vertical total para porção superior e inferior da pluma para ambas as fontes direta e indireta [m]
$\sigma_b$	dispersão obtida a partir da turbulência induzida pelo empuxo da pluma [m]
$\sigma_{zp}$	dispersão vertical total para fonte penetrada [m]
$\sigma_{ya}$	dispersão lateral resultante da turbulência ambiente [m]

$\sigma_{za}$	dispersão vertical resultante da turbulência ambiente [m]
$\sigma_{ys}$	dispersão lateral na camada limite estável [m]
$\sigma_{zs}$	dispersão vertical total na camada limite estável [m]
$\sigma_{yas}$	$\sigma_{ya}$ na camada limite estável [m]
$\sigma_{zas}$	$\sigma_{za}$ na camada limite estável [m]
$\sigma_{zes}$	porção elevada de $\sigma_{zas}$ na camada limite estável [m]
$\sigma_{zgs}$	porção superficial de $\sigma_{zas}$ [m]
$\sigma_{yjs}$	dispersão lateral na camada limite convectiva [m]
$\sigma_{zj}$	dispersão vertical total na camada limite convectiva [m]
$\sigma_{yajjs}$	$\sigma_{ya}$ na camada limite convectiva [m]
$\sigma_{zaj}$	$\sigma_{za}$ na camada limite convectiva [m]
$\sigma_{zej}$	porção elevada de $\sigma_{zaj}$ [m]
$\sigma_{zj}$	porção superficial de $\sigma_{zaj}$ [m]
$\sigma_{wj}$	turbulência vertical, parâmetro na distribuição bi-Gaussiana ( $j$ é igual a 1 para porção superior e igual a 2 para porção inferior da pluma) [m s <sup>-1</sup> ]

## Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>21</b>
<b>2</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>27</b>
2.1	Objetivo geral.....	27
2.2	Objetivos específicos .....	27
<b>3</b>	<b>Revisão bibliográfica .....</b>	<b>28</b>
3.1	Camada limite planetária .....	28
3.2	Os modelos gaussianos (CALPUFF e AERMOD) aplicados à dispersão de compostos odorantes:.....	33
3.3	Tratamento para a presença de obstáculos.....	37
3.4	Utilização do modelo PRIME para a inclusão dos efeitos de obstáculos na dispersão de poluentes. ....	38
3.5	Síntese da revisão da literatura .....	40
<b>4</b>	<b>Descrição dos modelos .....</b>	<b>41</b>
4.1	O sistema AERMOD .....	41
4.1.1	AERMET.....	41
4.1.2	AERMOD.....	42
4.2	O sistema CALPUFF .....	51
4.2.1	CALMET .....	51
4.2.2	CALPUFF.....	52
4.3	Modelagem do efeito <i>building downwash</i> – Modelo PRIME .....	62
4.4	Concentração de curto período .....	75
<b>5</b>	<b>Metodologia .....</b>	<b>77</b>
5.1	Descrição do experimento de Sada e Sato (2002) .....	77
5.2	Descrição do experimento de Aubrun e Leitl (2004) .....	79
5.3	Similaridade entre os experimentos de Sada e Sato (túnel de vento) e a atmosfera (escala real) .....	82
5.4	Similaridade entre os experimentos de Aubrun e Leitl (túnel de vento) e a atmosfera (escala real) .....	84
5.5	Sistema AERMOD .....	87
5.5.1	Processamento AERMET.....	87
5.5.2	Processamento AERMOD.....	91
5.6	Sistema CALPUFF .....	92
5.6.1	Processamento CALMET.....	92
5.6.2	Processamento CALPUFF .....	101
<b>6</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>109</b>
6.1	Avaliação do desempenho dos modelos CALPUFF e AERMOD considerando os experimentos de Sada e Sato (2002).....	110
6.2	Avaliação do desempenho dos modelos CALPUFF e AERMOD considerando os experimentos de Aubrun e Leitl (2004).....	115
6.3	Avaliação de metodologias para o cálculo dos picos de concentração .....	130

<b>7</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>132</b>
<b>8</b>	<b>Recomendações para trabalhos futuros.....</b>	<b>136</b>
<b>9</b>	<b>Referências.....</b>	<b>137</b>
	<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>145</b>

## Resumo

A presença de casas e prédios e outras construções próximas de fontes emissoras afeta o padrão de escoamento de ar e a dispersão dos contaminantes na camada limite superficial. Além disto, o tempo de média para o qual as concentrações médias do contaminante são determinadas depende da composição química do contaminante e do tempo de impacto causado. Por exemplo, para compostos odorantes, o tempo de média deve ser relacionado ao intervalo de tempo de uma inspiração (1 à 5s) ou ao intervalo de tempo para o qual os compostos odorantes causam efetivamente o incômodo. Uma das ferramentas empregadas nos estudos desses impactos são os modelos matemáticos que tem a capacidade de incluir o efeito da presença de obstáculos e de representar concentrações de curto período no escoamento. Devido à facilidade e rapidez em sua aplicação, os modelos gaussianos são muito empregados com adaptações incorporando o efeito de obstáculos e a representação de concentrações de curto período. O presente trabalho tem como objetivo avaliar os modelos CALPUFF e AERMOD, utilizando o modelo PRIME para considerar os efeitos da presença do obstáculo, e duas metodologias para a obtenção de concentrações de pico, uma que aplica um fator de ajuste no coeficiente de dispersão e outra que aplica um fator de ajuste diretamente nas concentrações para pequenos intervalos de tempo. Os resultados das modelagens foram comparados com dados obtidos em experimentos de túnel de vento, e mostraram os que os modelos tenderam a subestimar os valores de concentração próximos aos obstáculos, com o modelo AERMOD superestimando seus resultados em relação ao CALPUFF. Além disso, foi possível inferir que o modelo CALPUFF melhora o seu desempenho à medida que a distância em relação ao obstáculo aumenta. Já com relação ao modelo AERMOD, constatou-se que seus resultados melhores ocorrem parte nas regiões próximas do obstáculo, sendo superior ao CALPUFF na maioria dos casos. Entretanto, para maiores distâncias, os dois modelos estimaram resultados semelhantes. A análise das concentrações máximas médias para intervalos de tempo de curto período sugeriu que o ajuste aplicado diretamente nas concentrações nas previsões dos modelos AERMOD e CALPUFF não diferem substancialmente. Porém quando as duas metodologias são analisadas no CALPUFF, as maiores concentrações de pico são encontradas com o fator de ajuste aplicado diretamente nas concentrações, com uma diminuição da diferença entre as metodologias à medida que se tem intervalos de tempos maiores.

**Palavras chaves:** AERMOD, CALPUFF, PRIME.

## **Abstract**

The presence of houses and buildings and other structures near emission sources affects the pattern of air flow and dispersion of contaminants in surface boundary layer. Moreover, the average time for which the average concentrations of the contaminant are determined depends on the chemical composition of the contaminant and the time of impact. For example, for compounds odorants, the average time should be related to the time interval of an inspiration (1 to 5s) or the time interval for which the compounds causing odor nuisance effectively. One of the tools used in studies of these impacts are mathematical models that have the ability to include the effect of the presence of obstacles and represent concentrations of short-term in the flow. Because of the ease and speed in implementation, the Gaussian models are widely employed with adaptations including the effect of obstacles and represent concentrations of short-term. This study aims to evaluate the models AERMOD and CALPUFF using the PRIME model to consider the effects of the presence of the obstacle, and two methodologies to obtain peak concentrations, one that applies an adjustment factor in the coefficient of dispersion and other applying an adjustment factor directly in the concentrations to small time intervals. The results of modeling were compared with data from wind tunnel experiments, and showed that the models tended to underestimate the concentration values near to those obstacles, with the AERMOD model overestimating their results in relation to CALPUFF. Furthermore, it was possible to infer that the CALPUFF model improves its performance as the distance to the obstacle increases. With respect to the AERMOD model, it was found that best results occur in regions near of the obstacle, higher than CALPUFF in most cases. However, over longer distances, both models estimated similar results. The analysis of mean peak concentrations for short periods of time suggested that the adjustment in the concentrations applied directly on predictions of the models AERMOD and CALPUFF not differ substantially. But when the two methodologies are reviewed in CALPUFF, the highest peak concentrations are found with the adjustment factor applied directly to the concentrations, with a decrease in the difference between the methodologies as they have long time intervals.

**Keywords:** AERMOD, CALPUFF, PRIME.

## 1 Introdução

A presença de obstáculos (casas e prédios, por exemplo) altera significativamente o padrão do escoamento atmosférico e conseqüentemente, altera o comportamento das plumas de poluentes na região próxima aos obstáculos. Para ilustrar essa perturbação causada por edificações, a Figura 1-1 apresenta uma fotografia dos experimentos realizados por Mavroidis (2003) a fim de estudar a dispersão de poluentes ao redor de um prédio cúbico. Nessa fotografia pode-se observar a influência do obstáculo no escoamento através da alteração das dimensões da pluma de contaminantes na atmosfera ao seu redor.

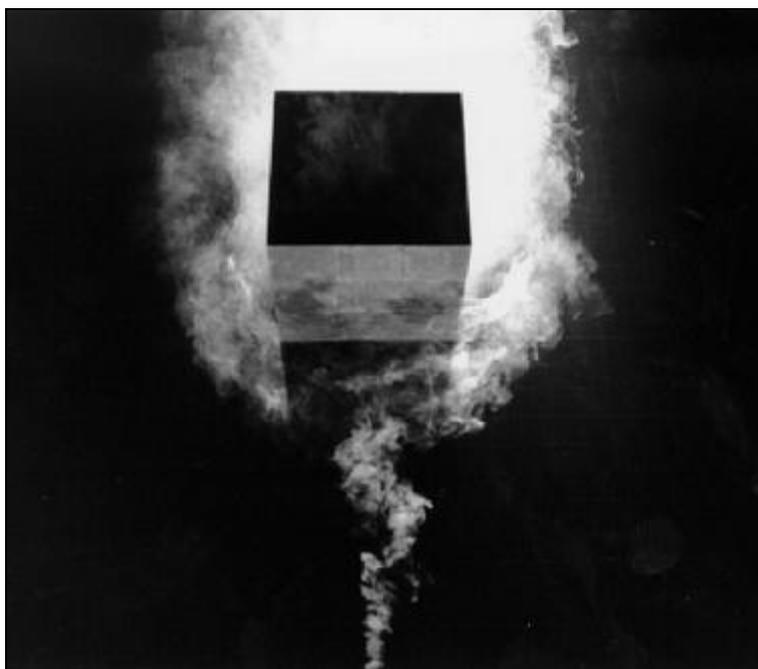


Figura 1-1: Dispersão de poluentes ao redor de um prédio cúbico (Mavroidis *et al.*, 2003)

Geralmente, o escoamento na atmosfera se desenvolve em regime turbulento, e no caso do escoamento ao redor de edificações, a pluma de poluentes é afetada por regiões de intensa recirculação e movimentos turbulentos, fortemente tridimensionais e anisotrópicos (MURAKAMI, 1993).

A fim de descrever o escoamento atmosférico e a influência de obstáculos na dispersão da pluma de poluentes, muitos estudos têm sido realizados com experimentos de túnel de vento (Sada e Sato, 2002, Mavroidis *et al.*, 2003 e Aubrun e Leitl, 2004) e com experimentos de campo (Venkatram *et al.*, 2004), principalmente em condições neutras, nas quais as chaminés estão em cima de prédios ou em regiões próximas aos prédios.

Hosker (1984) fornece uma descrição dos padrões de fluxo em três regiões perto de prédios. A Figura 1-2 mostra: (1) uma zona de deslocamento, onde o fluxo é influenciado pela alta

pressão ao longo da face do edifício contrária à incidência do vento, (2) uma zona caracterizada por cavidade de região de recirculação, alta intensidade de turbulência e baixos valores de velocidade média dos ventos e (3) uma região em que as características do escoamento e intensidade de turbulência gradualmente se aproximam dos valores a montante do obstáculo.

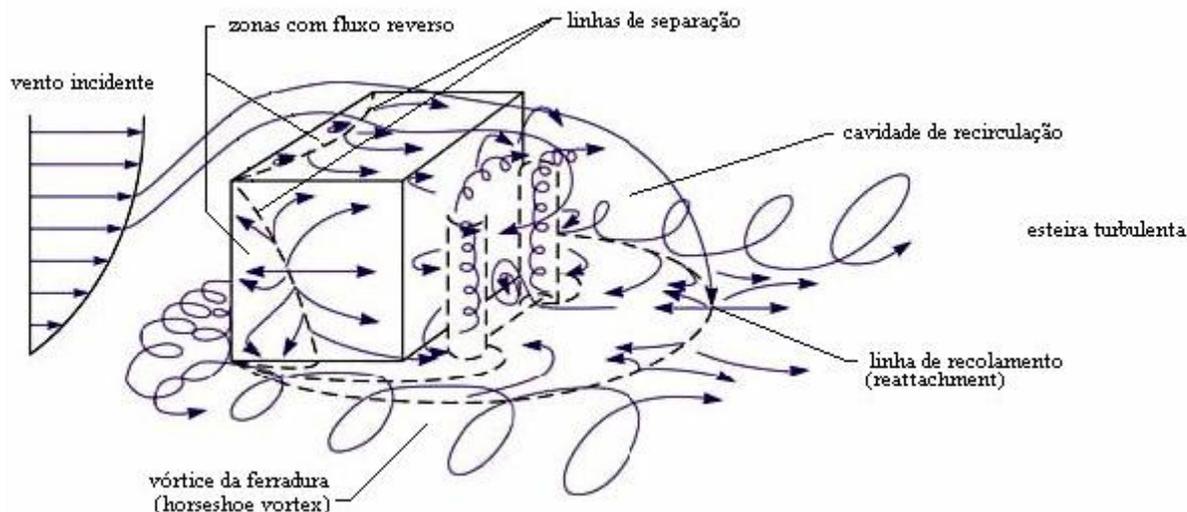


Figura 1-2: Representação esquemática do efeito do obstáculo no escoamento (Adaptado, HOSKER, 1984).

Segundo Schulman *et al.* (2000), a cavidade decorrente do efeito do prédio é definida como a região limitada acima do topo do obstáculo com a separação da linha de corrente no topo da parede frontal do obstáculo, sendo delimitada pelo recolamento das linhas de corrente. A cavidade é limitada lateralmente pela separação das linhas de corrente nas arestas laterais da face frontal do prédio. Dependendo da geometria do obstáculo, podem existir distintas cavidades no topo e após o obstáculo, ou uma cavidade de recirculação. A cavidade de recirculação logo após o obstáculo é frequentemente chamada de *near-wake*. A esteira turbulenta além do recolamento das linhas de corrente é chamada de *far wake*.

O arraste de poluentes liberados por fontes emissoras localizadas na região de esteira podem resultar em elevadas concentrações de poluentes ao nível do solo, que são significativamente maiores quando comparadas com situações ou cenários sem a presença de obstáculos. As concentrações dos contaminantes são dependentes dos padrões do escoamento ao redor de edifícios, bem como a localização da chaminé e das características dos poluentes liberados (SCHULMAN *et al.*, 2000).

Na turbulência atmosférica, os efeitos de obstáculos se referem às forças mecânicas geradas no escoamento, assim como efeitos provocados por alterações no relevo (montanhas e

depressões). A dispersão de poluentes está também fortemente associada à estratificação vertical de densidade do escoamento (estabilidade atmosférica) que pode agir como um fator de diminuição ou amplificação da turbulência gerada por obstáculos (ZHANG *et al.*, 1996), proporcionando assim, uma maior ou menor concentração de poluentes na atmosfera.

A dispersão atmosférica pode ser avaliada ou estudada através de modelos matemáticos ou experimentos de campo e de túnel de vento. Os experimentos de campo, apesar de retratar o real dado do fenômeno, têm geralmente custo elevado, além da dificuldade ou impossibilidade de controle das variáveis de interesse. Os experimentos de túnel de vento são realizados em condições controladas o que facilita a análise dos resultados, mas são modelos da realidade e os custos envolvidos também são elevados.

Como alternativa, surge a modelagem matemática para o cálculo da dispersão atmosférica de poluentes. A modelagem matemática da dispersão atmosférica tem como base a solução das equações fundamentais de transporte que não apresentam solução analítica, de forma que são necessários métodos numéricos para a obtenção da sua solução. Com isso, modelos matemáticos algébricos desenvolvidos a partir da simplificação das equações de transporte têm sido amplamente utilizados, devido ao baixo custo e rapidez na obtenção dos prognósticos de impacto ambiental.

Os modelos algébricos mais investigados e utilizados para a simulação da dispersão atmosférica de contaminantes são os modelos gaussianos. Estes modelos podem ser deduzidos utilizando ambos os métodos de descrição do movimento (Euleriano ou Lagrangeano) desde que a distribuição lateral e a vertical da concentração de contaminantes assumam distribuição gaussiana, além de simplificações como: vento com direção constante, taxa de emissão constante, difusão turbulenta desprezível na direção do escoamento, turbulência homogênea, relevo uniforme, inexistência de obstáculos no escoamento (SEINFELD e PANDIS, 1986). Entretanto, atualmente, os modelos gaussianos têm sido modificados para incluir os efeitos relativos a estas simplificações.

Entre essas modificações na modelagem matemática utilizando modelos gaussianos, está a representação da presença de obstáculos, comentada anteriormente, que implica no surgimento de regiões de intensa recirculação e movimentos turbulentos fortemente tridimensionais e anisotrópicos. Para a inclusão desses efeitos nos modelos gaussianos, estudos realizados em túnel de vento permitiram a elaboração de expressões empíricas que consideram a influência de obstáculos, desde formulações mais simples propostas por Turner

(1969); Gifford (1960 e 1968); Johnson *et al.* (1975); Huber e Snyder (1976); Scire e Schulman (1980) até formulações mais complexas como Schulman *et al.* (2000).

A abordagem mais utilizada é o modelo PRIME (*Plume Rise Model Enhancements*) desenvolvido por Schulman *et al.* (2000). O modelo PRIME, foi desenvolvido para incorporar duas características fundamentais ao *building downwash*: A reprodução de coeficientes de dispersão da pluma intensificada pela esteira e a redução da subida da pluma reforçada por uma combinação das linhas de corrente desce após o obstáculo e ascendente no arraste da esteira turbulenta (Schulman *et al.*, 2000).

Com a adaptação direcionada ao tratamento de obstáculos, o modelo gaussiano ganha uma maior aplicabilidade, principalmente na dispersão de gases odorantes, que na maioria das situações provoca problemas de incômodo em regiões com edificações e próximas à fonte. Normalmente, o problema de dispersão de odores é tratado em pequenas escalas territoriais. Sendo assim, a presença de obstáculos 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 (rural, ou urbano).

Essa adaptação da modelagem gaussiana é importante na dispersão de compostos odorantes, porque a presença de obstáculos afeta completamente a diluição dos gases odorantes, além disso, pode proporcionar um maior arraste da pluma junto ao solo e conseqüentemente próximo do nariz humano, tornando ainda mais acentuada os parâmetros responsáveis pelos picos de concentração, gerando assim, um possível incômodo na população em regiões próximas do obstáculo.

Assim, além da incorporação dos efeitos dos obstáculos na modelagem gaussiana, outro item importante consiste na reprodução dos efeitos dos vórtices de baixa frequência que promovem as oscilações na direção do vento e dos efeitos dos vórtices de alta frequência que estão associados ao tempo de média relativo a uma única inspiração (1 a 5 segundos) do ser humano.

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. Nos modelos gaussianos, os coeficientes de dispersão utilizados na modelagem são em geral válidos para tempos de média longos (60 minutos), tornando os

resultados de concentração correspondentes a intervalos de tempo longo, ocultando assim, os picos de concentração responsáveis pela percepção de odor (Figura 1-3).

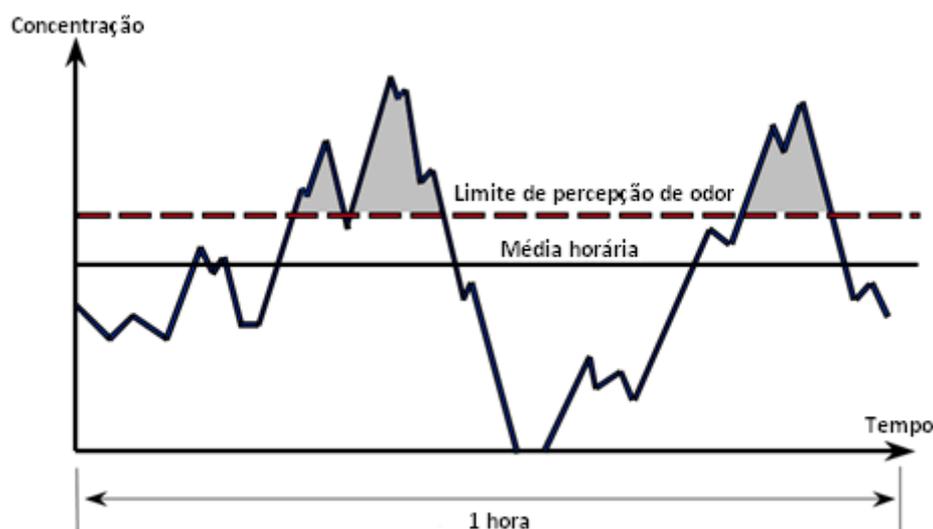


Figura 1-3: A área hachurada mostra que valores de pico da concentração de um composto emitido podem provocar percepção de odor mesmo quando o valor médio está abaixo do limite de percepção (Adaptado DE MELO LISBOA *et al.*, 2006)

Dessa forma, tais modelos necessitam de adaptações para ajuste do tempo de média, visto que no estudo de compostos odorantes o importante é a obtenção das concentrações médias correspondente aos intervalos de tempo curto, que podem ser responsáveis pela ocorrência de percepção de odor na população. Dentre as adaptações propostas para adequação do tempo de média, está a utilização do fator de escala (lei de potência 1/5) (SMITH, 1973), que pode ser aplicado para correção dos coeficientes de dispersão de Pasquill-Gifford, ou então ser aplicado ajustando diretamente as concentrações de forma a obter possíveis picos de concentração de odor (SCIRE *et al.*, 2000).

$$f(t, t_0) = (t_0 / t)^{0,2} \quad 1-1$$

onde  $(t)$  é o intervalo de tempo de interesse (curto período), e  $(t_0)$  é o intervalo de tempo compatível com os coeficientes de dispersão utilizados para obter as concentrações médias (longo período).

Atualmente, os modelos gaussianos mais utilizado para regiões urbanas são aqueles propostos originalmente por Lee *et al.* (1995), AERMOD (*American Meteorology Society Environmental Protection Agency Regulatory Model*) e Scire *et al.* (1990), CALPUFF (*California Puff Model*) que foram revisados, respectivamente, por Cimorelli *et al.* (2004), Scire *et al.* (2000). Alguns trabalhos têm sido realizados para tentar validar os resultados

desses modelos de dispersão por meio de experimentos de campo (YANG *et al.*, 2007 e YU *et al.*, 2008, por exemplo).

Apesar da existência de vários estudos utilizando esses modelos algébricos e de boa parte das agências regulamentadoras de meio ambiente no mundo recomendarem o uso destes modelos, na literatura científica ainda são poucos os trabalhos, que avaliam o uso do modelo CALPUFF ou do modelo AERMOD, ambos associados a modelos adicionais para inclusão da influência dos efeitos de obstáculos no escoamento e conseqüentemente, na dispersão de poluentes (OLENSEN *et al.*, 2009, por exemplo). Dessa mesma forma, poucos estudos são apresentados para avaliação do uso desses modelos algébricos para a estimativa de impacto causado por gases odorantes devido à importância do tempo médio para qual a concentração média é calculada (ELBIR *et al.*, 2007, por exemplo). Assim, este trabalho tem por objetivo o estudo dos modelos mais utilizados pelas agências reguladoras de meio ambiente (CALPUFF e AERMOD) quanto ao seu uso associado ao modelo PRIME, que inclui os efeitos da presença de obstáculos no escoamento e às equações propostas no modelo CALPUFF originalmente proposto por Smith (1973).

## 2 Objetivos

### 2.1 Objetivo geral

Verificar o desempenho dos modelos de dispersão CALPUFF e AERMOD associados ao modelo PRIME.

### 2.2 Objetivos específicos

- Analisar os resultados dos modelos CALPUFF e AERMOD associados ao modelo PRIME por meio da comparação com os dados dos experimentos de túnel de vento realizados por Sada e Sato (2002) e Aubrun e Leiti (2004), a fim de avaliar a acurácia destes modelos para o cálculo dos perfis médios de concentração ao redor de um obstáculo cúbico e de um obstáculo com geometria complexa, respectivamente.
- Avaliar o uso de metodologias propostas no modelo CALPUFF para a correção dos valores de concentrações médias de intervalo de tempo longo fornecido pelos modelos em concentrações de curto período (valores de pico).

### 3 Revisão bibliográfica

Os modelos matemáticos de dispersão são instrumentos facilitadores para uma avaliação de impacto ambiental de compostos odorantes, e dependendo do modelo e dos recursos computacionais utilizados podem trazer rapidez e menor custo ao estudo. Entretanto, as pesquisas relacionadas aos modelos matemáticos destinados à dispersão de compostos odorantes ainda são relativamente recentes e precisam ser aprimoradas.

Os modelos matemáticos para a dispersão de compostos odorantes, além de informações da fonte emissora, necessitam de dados que caracterizam as condições meteorológicas da região, na qual se quer obter os campos de concentração. Vários parâmetros meteorológicos influenciam os fenômenos do transporte dos poluentes na atmosférica, como: direção e velocidade do vento e estabilidade atmosférica. A turbulência, fator principal na dispersão vertical dos poluentes, é resultado direto dos efeitos térmicos e mecânicos na camada limite atmosférica (SEINFELD, 2006), que estão associados aos parâmetros descritos acima.

Neste capítulo são descritos alguns aspectos relacionados à meteorologia que influenciam os níveis de poluição do ar e devem ser incluídos na modelagem matemática. Além disso, são apresentadas diferentes aplicações dos modelos de dispersão CALPUFF (*California Puff Model*) e AERMOD (*American Meteorology Society Environmental Protection Agency Regulatory Model*), e a evolução dos estudos para inclusão da influência de obstáculos na dispersão de poluentes, e da influencia do tempo de média da concentração na avaliação do impacto odorante.

#### 3.1 Camada limite planetária

A camada limite planetária (CLP) é a região na qual a atmosfera sente os efeitos da presença do solo, através da troca vertical de quantidade de movimento, calor e umidade (SEINFELD e PANDIS, 2006). Os parâmetros como os fluxos turbulentos de calor e quantidade de movimento, e gradientes de umidade e temperatura potencial influenciam na estabilidade atmosférica com a turbulência de origem mecânica ou térmica e ainda são responsáveis pela existência de diferentes camadas: camada superficial, camada de mistura, camada residual, camada estável e camada de entranhamento (STULL, 1988). A Figura 3-1 mostra uma representação esquemática da estrutura da Camada Limite Planetária.

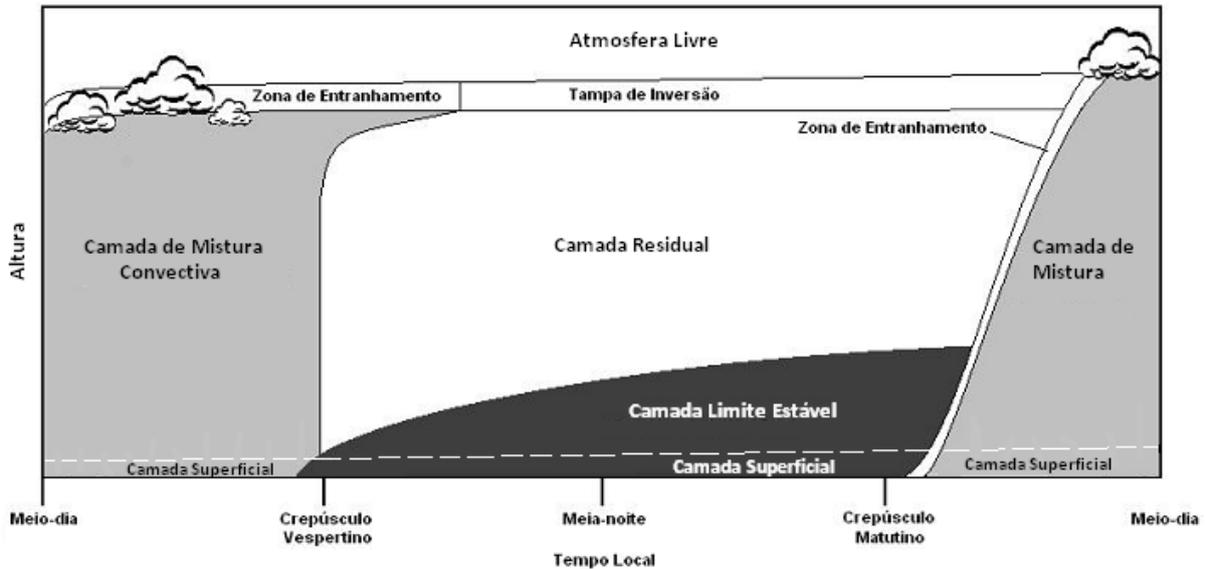


Figura 3-1: Estrutura da camada limite planetária (Adaptado STULL, 1988).

A turbulência dentro da CLP é, essencialmente, os movimentos do vento sobre escalas de tempo menores que a média de tempo utilizado para determinar o vento médio. A turbulência é composta por movimentos circulares ou vórtices horizontais, verticais e entre todas as orientações. Esses vórtices turbulentos realizam a dispersão dos poluentes através da mistura de ar com menor concentração de poluentes (TURNER, 1994).

A CLP é, em toda sua extensão, turbulenta. Um parâmetro adimensional que relaciona as forças inerciais e viscosas de um escoamento é o número de Reynolds.

$$Re = \frac{\rho u l_*}{\mu} \quad (3-1)$$

onde  $u$  é a velocidade característica,  $\rho$  é a massa específica do fluido,  $l_*$  é um comprimento característico e  $\mu$  é a viscosidade do fluido. Quando o número de Reynolds é pequeno, os efeitos viscosos predominam sobre as forças inerciais e o escoamento é caracterizado como laminar. Por outro lado, grandes valores do número de Reynolds significam que as forças inerciais predominam, e o escoamento é caracterizado como turbulento. Na atmosfera o número de Reynolds é da ordem de  $10^6$ , portanto, os efeitos viscosos não são suficientemente fortes em comparação as forças inerciais e dessa forma, vórtices turbulentos serão formados, gerando assim um escoamento turbulento.

Na camada limite planetária o surgimento de movimentos circulares ou vórtices são principalmente devido à geração de turbulência mecânica ou de empuxo térmico, bem como

pelos gradientes horizontais de pressão que determinam a velocidade do vento (SEINFELD e PANDIS, 2006).

Quando o vento passa sobre vegetações, estruturas existentes na superfície (presença de obstáculos) ou por alterações no relevo (montanhas e depressões) criam a chamada turbulência mecânica. Quanto mais forte o vento, maior a turbulência mecânica gerada. Além disso, maiores elementos de rugosidade intensificam esse tipo de turbulência. A turbulência mecânica também pode ser criada pelo cisalhamento do vento e encontro de linhas de corrente com diferentes velocidades. Isso ocorre na vertical com o vento próximo ao solo se comportando de maneira mais lenta devido ao atrito na superfície terrestre enquanto em maiores alturas a velocidade do vento é mais elevada. Dessa maneira, a ação de corte entre a variação dessas duas correntes de ar produz a turbulência mecânica (TURNER, 1994).

Esse tipo de turbulência nomeada como mecânica é predominante na parte inferior da camada limite (camada limite superficial), onde os fluxos turbulentos variam 10% da sua magnitude. A camada superficial pode ser identificada tanto na camada de mistura como na camada estável (STULL, 1988).

O aquecimento ou resfriamento do ar próximo da superfície da Terra geram a chamada turbulência de empuxo térmico. Em um extremo, durante o meio-dia com céu claro e ventos fracos, o aquecimento do sol cria um fluxo de calor ascendente na superfície do solo e isso aquece o ar nas camadas inferiores. Com o aquecimento extremo, grandes vórtices convectivos geram térmicas em ascensão que podem se estender verticalmente na ordem de 100 a 1500 metros. Isso representa a geração de turbulência por empuxo térmico positivo no seu auge, o que configura uma condição atmosférica instável (TURNER, 1994).

Esse aquecimento é essencial na formação da camada de mistura, por onde a CLP geralmente é conduzida por convecção, apesar de uma camada de mistura poder se formar em regiões com ventos fortes (STULL, 1988).

No outro extremo, à noite, com ventos fracos, a saída da radiação infravermelha esfria o solo e o ar adjacente, resultando em um fluxo de calor descendente na superfície. Esse resfriamento próximo ao solo, enquanto a temperatura do ar acima permanece relativamente inalterada resulta na geração de inversão de temperatura na camada próximo ao solo (uma inversão é uma estrutura vertical de temperatura que inverte a comum diminuição da temperatura com a altura) (TURNER, 1994).

Esse comportamento na CLP origina a camada residual e a camada estável. A inversão gerada pelo agrupamento dessas duas camadas faz com que a atmosfera para estabilize ou reduza movimentos verticais. Essa redução de transferência vertical reduz a dispersão vertical, que é o espalhamento de poluentes liberados na atmosfera (STULL, 1988).

Entre esses dois extremos (aquecimento calor e resfriamento) pode ser caracterizada uma condição atmosférica neutra. Para esta condição o fluxo de calor resultante no terreno é próximo de zero, então há pouco ou nenhum aquecimento ou resfriamento do solo e do ar adjacente. A estrutura térmica vertical sofre um ligeiro decréscimo da temperatura com a altura. Isso permite que uma parcela de ar em movimento a partir de uma altura inferior a uma superior mais elevado de expansão, devido a diminuição de pressão com a altura. Esta taxa de resfriamento é chamada de taxa de lapso adiabático e é de aproximadamente  $0,0098 \text{ K m}^{-1}$ . Adiabática é sem adição ou subtração de calor. Com o fluxo total de calor próximo da terra igual a zero, a variação da temperatura com a altura é próximo da taxa adiabática. Essas condições atmosféricas neutras podem ser causa de: (1) condições de céu coberto por nuvens que inibem a entrada ou saída de radiação, (2) as condições de vento, que rapidamente se mistura verticalmente sem aquecimento ou resfriamento na superfície, ou (3) situações de transição, perto do nascer e pôr do sol quando a atmosfera está mudando de estável para instável, ou vice-versa. Com condições atmosféricas neutras ocorre um nível intermediário de dispersão (TURNER, 1994).

Tanto as forças de empuxo térmico como as forças mecânicas influenciam na estabilidade atmosférica, que de maneira geral, pode ser definida como sendo a sua capacidade de resistir ou intensificar os movimentos verticais. Ela é geralmente utilizada em alguns modelos de dispersão como único parâmetro para definir o estado turbulento da atmosfera, ou para descrever a capacidade de dispersão de poluentes por mistura vertical (MOHAN e SIDDIQUI, 1998).

Para descrever os níveis de turbulência na atmosfera, e desta forma sua capacidade de dispersão de poluentes, são usados parâmetros como o número de Richardson ( $Ri$ ), o comprimento de Monin-Obukhov ( $L$ ) e as classes de estabilidade de Pasquill para determinar o grau de estabilidade ou instabilidade da atmosfera.

O comprimento de Monin-Obukhov ( $L$ ) pode ser fisicamente interpretado como uma altura em relação ao solo na qual a energia cinética turbulenta produzida pelas forças do empuxo

térmico equivale à energia cinética turbulenta produzida por efeitos mecânicos. Geralmente,  $L$  é definido como:

$$L = -\frac{\rho c_p T u_*^3}{kg H_F} \quad (3-2)$$

onde  $\rho$  é a densidade do ar a uma temperatura  $T$ ,  $c_p$  é o calor específico a pressão constante,  $u_*$  é a velocidade de fricção,  $k$  é a constante de Von Kármán e  $H_F$  é o fluxo de calor sensível. Os efeitos da turbulência mecânica são predominantes na camada mais próxima à superfície, isto é, para  $z < |L|$ . Enquanto, os efeitos da turbulência do tipo térmico sobressaem sobre os mecânicos em alturas elevadas, isto é, para  $z > |L|$  (MOREIRA *et. al*, 2008).

Na equação do comprimento de Monin-Obukhov as principais variáveis influenciadoras são o fluxo de calor e a velocidade de fricção. O fluxo de calor é uma variável influenciada pela quantidade de radiação solar incidente na superfície terrestre. Quando o fluxo de calor é positivo, significa que a superfície terrestre encontra-se mais aquecida que as camadas de ar superiores, aquecendo as mesmas. E quando a superfície terrestre se resfria mais rapidamente do que a atmosfera, o fluxo de calor se torna negativo, ou seja, da atmosfera para o solo. Já a velocidade de fricção, está ligada a turbulência dominada por tensões de cisalhamento (mecânico) que dependem da velocidade do vento (gradientes horizontais de pressão) e da rugosidade e irregularidades da superfície terrestre.

Segundo Seinfeld e Pandis (1998), quando  $L < 0$ , a estabilidade atmosférica assume condição instável, e quando  $L > 0$  assume condição atmosférica estável. Em condições de estabilidade atmosféricas neutras,  $L \rightarrow \pm\infty$ , ou seja, quando  $|L|$  é muito elevado em relação à CLP ( $L$  podendo ser positivo ou negativo).

Há cerca de 10 anos o sistema de classificação de Pasquill (Pasquill, 1961) era provavelmente o esquema mais usado para classificar a estabilidade atmosférica baseando-se em condições meteorológicas. Estas classes dependem da velocidade do vento, juntamente com a radiação solar durante o dia ou a fração de cobertura de nuvens durante a noite.

A Tabela 3-1 apresenta as classes de estabilidade de Pasquill em função da velocidade do vento, a fim de incorporar a turbulência induzida mecanicamente, e das condições de

aquecimento da superfície da Terra a fim de incorporar a turbulência induzida pelo empuxo térmico. Segundo Hanna *et al.* (1982), as classes de estabilidade de Pasquill foram e são, ainda utilizadas porque produzem resultados satisfatórios na previsão da dispersão de poluentes atmosféricos e são determinadas a partir de duas variáveis medidas de maneira relativamente simples.

Tabela 3-1: Classes de Estabilidade Atmosférica de Pasquill

Velocidade do Vento a 10 m do solo (m/s)	Radiação Solar (I) (W/m <sup>2</sup> )			Cobertura Noturna de Nuvens (cn)	
	I > 700	350 ≤ I ≤ 700	I < 350	cn ≥ 4/8	cn ≤ 3/8
< 2	A	A – B	B	-	-
2 – 3	A – B	B	C	E	F
3 – 5	B	B – C	C	D	E
5 – 6	C	C – D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Fonte: Seinfeld e Pandis (1998).

### 3.2 Os modelos gaussianos (CALPUFF e AERMOD) aplicados à dispersão de compostos odorantes:

Alguns estudos têm sido realizados sobre os modelos AERMOD e CALPUFF para a dispersão de compostos odorantes. Wang *et al.* (2006) realizaram um estudo comparativo entre os modelos CALPUFF e ISCST3, na modelagem da concentração de gases odorantes emitidos por uma criação de gado no Texas, no EUA. Os resultados obtidos foram comparados com amostras de campos, analisadas na *West Texas A&M University*. Nesse estudo também foi realizado um cálculo reverso para obtenção das taxas emissão de odor por meio dos modelos de dispersão e da unidade odorante (OU) medida no receptor. Nos resultados foi observado 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 olfatométricas 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 com a câmara de fluxo, podendo indicar que a câmara de fluxo forneça valores subestimados de taxa de emissão, fato que segundo os autores, necessita de investigações posteriores.

Xing *et al.* (2007) realizaram um estudo no qual utilizaram diferentes modelos de dispersão atmosférica, entre eles o CALPUFF e o ISCST3, para simular a dispersão de gases odorantes

provenientes de uma fazenda de criação de suínos no Canadá. Análises foram conduzidas para compreender como os parâmetros meteorológicos afetam as concentrações de odor à jusante da fonte e a distância máxima da fonte onde ocorre odor. Os resultados indicaram que a dispersão foi afetada principalmente pela estabilidade atmosférica, velocidade do vento, direção do vento e temperatura do ar. O transporte de odor foi favorecido pela estabilidade das condições atmosféricas, velocidade do vento baixa, e temperatura elevada. As previsões dos quatro modelos para as concentrações de gases odorantes foram significativamente diferentes dentro de 1 km a partir da fonte, além disso, o ISCST-3 e CALPUFF obtiveram resultados semelhantes. No entanto, quando a média horária e anual de dados meteorológicos foram utilizadas, o CALPUFF previu concentrações de gases odorantes com valores de até 71,4% maiores que o ISCST-3, que eram muito diferentes dos resultados obtidos sob condições meteorológicas constantes. Nesse trabalho os autores sugerem que se a simulação for realizada sob condições meteorológicas constantes, o critério de permissão concentração de compostos odorantes deve ser maior do que o critério permitido quando são usados com variabilidade de dados horários, mensais ou anuais de meteorologia.

Sattler e Devanathan (2007) realizaram um estudo no qual o objetivo principal foi determinar, por meio dos modelos de dispersão AERMOD e ISCST-3, se o aumento da concentração de compostos odorantes originadas de fontes de áreas ocorre com mais frequência no verão, quando a emissão e a dispersão são maiores, ou no inverno, quando a emissão e a dispersão são menores. A fonte poluidora escolhida para o estudo foi um clarificador de formato retangular com emissão de sulfeto de hidrogênio, localizada numa unidade de tratamento de esgoto. A modelagem da dispersão abrangeu um período de cinco anos de dados meteorológicos horários divididos por estação do ano. As taxas de emissão foram medidas em horários variados, com base em uma curva de ajuste desenvolvida a partir de dados de campo recolhidos anteriormente. Os resultados apresentados para cada estação do ano foram: a maior concentração média de 2 min, o número de eventos odor (concentrações médias de 2 min superiores aos limiares de detecção de odor), e as áreas de impacto. Após a modelagem verificou-se que, para os dois modelos, os maiores impactos foram associados ao verão, considerando os efeitos do clima sobre as emissões e a dispersão. As concentrações mais elevadas ocorreram durante as classes de estabilidade D, E, F. A comparação entre o ISCST-3 e o AERMOD revelou que para fontes de área, o ISCST-3 obteve resultados com concentrações mais elevadas, constatando mais eventos de odor de todas as estações do ano.

Elbir *et al.* (2007) avaliaram os níveis de concentração de compostos odorantes em torno de uma indústria de corte e embalagem de carne na Turquia, por meio do modelo de dispersão CALPUFF. Os níveis de concentração de compostos odorantes no ambiente também foram medidos por olfatometria em dois locais à jusante da chaminé da indústria. Isso foi possível, porque as concentrações de gases odorantes ficaram acima de 50 unidades de odor por metro cúbico (OU m<sup>-3</sup>), significando que as concentrações sempre foram superiores ao mínimo de 10 m UO<sup>-3</sup>, podendo assim, utilizar a olfatometria como técnica de medição. As amostragens dos gases odorantes foram realizadas consecutivamente em dois locais à jusante da fonte com 10s de duração cada. Estes locais de amostragem foram escolhidos porque apresentavam problemas de incômodo de odor constantemente, indicando que eles estavam perto da linha de centro da pluma. O período de amostragem global foi de 10 min em cada local, ou seja, 60 amostras de 10 s. Dados meteorológicos foram obtidos durante todo o período de amostragem. A direção do vento e as velocidades foram registradas no final de cada coleta e utilizadas no CALPUFF. Os dados de concentrações de gases odorantes obtidos na simulação e na medição foram testados para verificação do grau de correlação entre as concentrações monitoradas e as do modelo para um tempo médio de 10 min, sendo que para os modelos as concentrações de curto período foram obtidas por meio da lei de potência aplicadas diretamente nas concentrações horárias, obtendo assim, um adequado coeficiente de determinação ( $R^2=0,94$ ) entre as duas séries de dados.

Yu *et al.* (2008) desenvolveram um modelo pluma flutuante destinado a dispersão de gases odorantes provenientes de atividade pecuária no Canadá. Por meio de modelo de dispersão foi possível estimar a concentração e a frequência de ocorrência de eventos de odor. Esse modelo é baseado na teoria da pluma gaussiana flutuante, no qual possui a capacidade de captar flutuações de concentração em pequenos intervalos de tempo. No estudo, o modelo proposto primeiro foi comparado com os modelos de dispersão CALPUFF e ISCST-3 em termos dos valores de concentrações médias horárias de compostos odorantes, os resultados confirmaram que as previsões de todos os modelos foram muito semelhantes. Em seguida, o modelo foi validado por meio de experimentos de campo. Os resultados mostraram que as concentrações obtidas pelo modelo de pluma flutuante proposto apresentaram boa concordância com os dados das medições.

Yu *et al.* (2009) simularam a dispersão de odor de uma fazenda de porcos em Saskatchewan, no Canadá, onde foi utilizado o modelo CALPUFF sob condições meteorológicas constantes e sob condições com variabilidade de informações meteorológicas. O objetivo deste estudo foi

determinar os critérios equivalentes de odor em termos de concentração e frequência de ocorrências de odor, que resultam na mesma distância percorrida pelo odor para ambas as condições meteorológicas. Os resultados da modelagem com o CALPUFF mostraram que, para obter as distâncias longas (3, 4 ou 5 km) com existência de odores, as frequências de ocorrência de odor devem ser maiores em condições de estabilidade atmosféricas constantes do que sob condições com mudanças meteorológicas. Alternativamente, para a mesma frequência de ocorrência de odor, a concentração deve ser mais elevada sob condições atmosféricas constantes do que sob condições com mudanças meteorológicas. Para obter as distâncias curtas do percurso do odor (menores de 2 km), as frequências de ocorrência de odores para o nível de concentração, foram diferentes para as duas condições de tempo e dependia do nível de concentração escolhida. Dessa forma, os autores concluíram que os critérios para a determinação de padrão de concentração de odor devem ser diferentes para os dois tipos de condições meteorológicas.

Chang *et al.* (2009) realizaram um estudo de caso para correlacionar um índice de odor utilizado em Taiwan e o potencial de incômodo de poluentes provenientes de uma indústria farmacêutica, com base no limite de percepção de odor, na modelagem da dispersão de compostos odorantes por meio do AERMOD e nas taxas de emissão obtidas pelo modelo OP-FTIR. Apesar de nove diferentes poluentes serem obtidos a partir da modelagem, a contribuição para o odor foi detectado devido aos diferentes limites de percepção de odor. Consequentemente, os poluentes apenas com nível de estimulação odor maior ou igual a 1 foram utilizadas para correlacionar com o índice de odor. O nível de estimulação de odor para cada poluente é definido como a concentração de cada poluente, dividido pelo limite de percepção de odor de cada poluente. Portanto, uma equação de regressão linear entre o índice de odor utilizado na região e a estimulação de odor do poluente foi obtida com uma correlação de determinação ( $R^2 = 0,99$ ). Além disso, o AERMOD foi utilizado para modelar a dispersão de gases odorantes para identificar a área de influência. O contorno da área influência também foi estudada, obtendo assim, uma boa correlação entre as previsões AERMOD e os valores reais observados em campo.

Sironi *et al.* (2010) realizaram um estudo de avaliação de impacto de odor no norte da Itália, numa região composta por três pequenos municípios, onde quatro unidades de processamento de subprodutos animais estão localizadas próximas uma das outras. Com base nos dados de emissões resultantes de avaliação olfatométrica realizada em diferentes períodos do ano, as taxas de emissões de odores de cada fábrica foram avaliadas, mostrando que o maior

contribuinte para o impacto de odores foi a indústria com a matéria prima em maior estágio de decomposição. A modelagem da dispersão de odores utilizando o CALPUFF confirmou os resultados da avaliação olfatométrica, e ainda foram validados por meio de uma pesquisa de campo, realizada com o objetivo de envolver a população por meio de questionários para relatar os episódios de percepção de odor. O resultado dessa análise mostrou-se coerente, visto que a grande parte dos locais de maior geração de incômodo e percepção de odor ficou dentro da região apresentada na modelagem com maiores níveis de concentrações, apresentando assim, uma correspondência de 86,5% entre os dados de concentração obtidos pelo CALPUFF e a percepção de odor avaliado pelos questionários.

### 3.3 Tratamento para a presença de obstáculos

O principal efeito causado pela presença do obstáculo sobre a dispersão de poluentes é a diluição acentuada do material emitido na esteira de turbulência formada à jusante do obstáculo. Dourado (2007) descreveu seis abordagens: (i) a proposta por Turner (1969), na qual foi proposto o uso de uma “fonte virtual”, localizada a montante da fonte real, produzindo uma pluma de dimensões semelhantes à pluma real influenciada pelo obstáculo; (ii) a abordagem de Gifford (1960) que propôs a modificação da equação gaussiana, de acordo com as dimensões do obstáculo e da velocidade do vento, de forma proporcional à área frontal do prédio multiplicada pela velocidade do vento, corrigida por um fator adimensional variando de 0,5 até 2; (iii) a abordagem de Gifford (1968) que introduziu os “parâmetros de difusão total” substituindo os termos  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  da equação gaussiana; (iv) a abordagem de Huber e Snyder (1976) que empregam as chamadas “expressões melhoradas” para  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ , dependentes da relação entre a posição do receptor e a altura do obstáculo, usadas até distâncias equivalentes a 10 vezes a altura do obstáculo; (v) a abordagem de Johnson (1975) que desenvolveu o modelo de duas plumas (*Split-h*), no qual uma das plumas (na altura da chaminé) não é capturada pela esteira do prédio, ao passo que a segunda pluma (emitida ao nível do solo) é completamente capturada, nessa abordagem, a parcela da massa total emitida a ser capturada pela esteira depende da relação entre a velocidade de emissão dos gases e a velocidade do vento na altura da chaminé. Por fim, Dourado (2007) descreveu (vi) a abordagem de Scire e Schulman (1980) 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 na elevação da linha de centro da pluma.

Além dessas seis abordagens, existe a abordagem de Schulman *et al.* (2000), na qual introduz “*Plume Rise Model Enhancements*” (PRIME), ou “Melhorias no modelo de elevação de pluma”. Esse 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 velocidade do escoamento, intensidade turbulenta e inclinação das linhas de corrente, como função da área projetada do obstáculo. O tratamento da elevação da pluma é realizado levando em consideração o empuxo térmico e quantidade de movimento. O modelo considera a possibilidade de apenas uma fração do composto emitido ser capturado pela zona de recirculação do prédio, por meio do emprego de um modelo de duas plumas.

#### 3.4 Utilização do modelo PRIME para a inclusão dos efeitos de obstáculos na dispersão de poluentes.

Alguns estudos têm sido realizados utilizando modelo PRIME para o tratamento da presença do obstáculo. Venkatram *et al.* (2004) avaliaram a utilização dos modelos de dispersão AERMOD e ISCST-3 (*Industrial Source Complex Short Term Version 3*) para o cálculo do campo de concentrações nas proximidades de fontes com alturas baixas em ambiente urbano. O composto traçado foi emitido por fontes localizadas na parte superior de um *trailer* e as concentrações foram medidas em diversas localidades até a uma distância máxima de 20 m da fonte. Os dois modelos de dispersão utilizaram o modelo PRIME para o tratamento da presença do obstáculo. Os resultados obtidos mostraram que os modelos AERMOD e ISCST-3 superestimaram as concentrações máximas, ao mesmo tempo em que subestimaram os menores valores. Apesar do AERMOD possuir um módulo para incluir os efeitos da flutuação da direção do vento, este não é utilizado para os cálculos para a região próxima ao obstáculo, quando utilizado conjuntamente ao modelo PRIME, o que pode superestimar concentrações obtida pelos modelos, quando comparadas com experimentos de campo na atmosfera.

Yang *et al.* (2007) descreveram as vantagens do AERMOD sobre o modelo ISCST-3 comparando as concentrações calculadas pelos modelos e compararam com experimentos de campo no Alasca, no EUA. As emissões foram efetuadas em altura elevada ao longo de um terreno plano e em locais com escoamento influenciados pela presença de obstáculos. Para o tratamento da presença do obstáculo ambos os modelos de dispersão utilizaram o modelo

PRIME. O AERMOD mostrou significativamente melhor correlação do que o ISCST-3 que segundo os autores, frequentemente superestima a concentrações ao nível do solo em situações de fontes elevadas e sob condições de atmosfera estável. O desempenho do AERMOD pelo método de parametrização da turbulência atmosférica que, ao contrário do ISCST-3 não utiliza a classificação da estabilidade de Pasquill. Em particular, AERMOD foi coerente na representação do efeito típico da pluma em condição estável de acordo com o atual estado-da-arte das parametrizações da camada limite planetária, enquanto ISCST-3 não foi capaz de produzir esse efeito.

Petersen e Carter (2006) avaliaram o desempenho do modelo AERMOD associado ao modelo PRIME na dispersão de poluentes em dois locais com estruturas altamente complexas impostas em experimento de túnel de vento. O primeiro local possuía uma usina com duas torres de resfriamento com 130 m de altura e várias estruturas retangulares de uma possível indústria. O outro local era constituído por duas turbinas de combustão associadas a um prédio com superfície porosa. De acordo com os autores, em locais com estruturas retangulares simples, as estimativas de concentração foram razoáveis. Entretanto, quando as estruturas se tornaram mais complicadas (porosas ou cilíndricas, por exemplo), o modelo não conseguiu fornecer estimativas precisas de concentração. Além disso, o estudo também mostrou que AERMOD tendeu a subestimar as concentrações do túnel de vento, aparentemente porque o modelo associado ao PRIME não explica adequadamente o efeito *stack-tip downwash*.

Olesen *et al.* (2009) utilizou um conjunto de dados de túnel de vento, com intuito de analisar o desempenho dos modelos MISKAM, OML, e do modelo AERMOD associado ao modelo PRIME em relação aos efeitos de obstáculos com diferentes formatos. OML e o AERMOD são modelos pluma com requisitos limitados em termos de recursos de dados de entrada e de computação, enquanto MISKAM é um modelo de dinâmica de fluidos computacional, e como tal muito mais exigente. Para a maioria dos cenários considerados, o grau de discrepância no que diz respeito à concentração máxima foi inferior a um fator de dois para OML e AERMOD em relação aos dados de túnel de vento. No entanto, próximo do obstáculo, ambos os modelos, muitas vezes resultaram em diferenças maiores. O MISKAM forneceu previsões mais precisas. Além disso, o modelo AERMOD mostrou uma forte dependência com a largura do edifício, especialmente quando a chaminé possuía altura de 1,5 vezes a altura do prédio. Isso foi evidenciado no AERMOD, quando os maiores valores de concentrações ocorreram na presença do prédio mais largo, apresentando o valor máximo de concentração

ao nível do solo duas vezes maior em relação à concentração máxima das simulações com obstáculo cúbico.

### 3.5 Síntese da revisão da literatura

Os estudos apresentados mostraram diferentes aplicações dos modelos regulamentados AERMOD e CALPUFF na dispersão de compostos odorantes. Porém, diante dos trabalhos foram notados também poucos estudos pelos quais são comparados os modelos CALPUFF e AERMOD, outras questões presentes foi carência de trabalhos avaliando o desempenho do CALPUFF associado ao PRIME. Além disso, poucos trabalhos abordam as alternativas na obtenção de concentração de curto nos modelos CALPUFF e AERMOD, apesar de serem bem utilizados na dispersão de compostos.

Assim, o presente trabalho tem um importante papel: propor e comparar os modelos de dispersão CALPUFF e AERMOD (ambos associados ao modelo PRIME) avaliando os resultados de concentração na presença de obstáculos, além de comparar as equações propostas no modelo CALPUFF originalmente proposto por Smith (1973) para a obtenção de concentração de curto período.

## 4 Descrição dos modelos

### 4.1 O sistema AERMOD

O sistema utilizado para a simulação da dispersão dos contaminantes na atmosfera possui um programa principal, o AERMOD, e dois pré-processadores, (o AERMAP e o AERMET). O pré-processador AERMAP realiza o pré-processamento dos dados geofísicos para uso do AERMOD. Já o pré-processador AERMET tem como funções, avaliar, organizar informações meteorológicas disponíveis e calcular dados micro-meteorológicos necessários no processamento do AERMOD.

O modelo AERMOD e todos os seus componentes são públicos, incluindo seus manuais e códigos fontes, podendo ser obtido na internet no seguinte endereço [http://www.epa.gov/scram001/dispersion\\_prefrec.htm](http://www.epa.gov/scram001/dispersion_prefrec.htm).

#### 4.1.1 AERMET

O AERMET é um pré-processador de dados meteorológicos, que tem como umas de suas funções, organizar informações meteorológicas que serão utilizadas no AERMOD. O processamento das informações meteorológicas é separado em três diferentes estágios: o primeiro, no qual é realizada a extração e processamento dos dados meteorológicos de entrada contidos no arquivo específico do estágio. Após essa etapa, o AERMET agrupa as dados informados em períodos de 24 horas e grava em um único arquivo. Por fim, o terceiro estágio lê os dados agrupados e estima os parâmetros da camada limite necessários para o AERMOD (EPA, 2004b).

A principal função do AERMET é a estimativa dos parâmetros da CLP que gera o perfil de variáveis meteorológicas para a simulação da dispersão dos poluentes com o modelo AERMOD. Os cálculos dos parâmetros que caracterizam a CLP variam entre o dia e a noite, ou seja, entre a camada de mistura convectiva e mecânica, pois o crescimento e a estrutura da CLP são governados pelos fluxos de calor e quantidade de movimento, dependendo da troca dos efeitos da superfície. O comprimento desta camada e a dispersão do poluente dentro desta são influenciados em uma escala local, por características de superfície, tais como a rugosidade, albedo, e a disponibilidade de umidade na superfície. Os fluxos de calor e a quantidade de movimento conduzem o crescimento e estrutura da CLP.

No processamento do AERMET são obtidos os seguintes parâmetros: escalas de velocidade convectiva, comprimento de Monin-Obukhov, temperatura, altura da camada de mistura, fluxo de calor e velocidade de fricção. Estas informações meteorológicas são utilizadas posteriormente no AERMOD para o cálculo da dispersão atmosférica de poluentes por meio de dois arquivos: aermet.sfc e aermet.pfl que determinam o perfil vertical de velocidades do vento, do coeficiente de turbulência vertical e lateral e do gradiente de temperaturas, (EPA, 2004b).

#### 4.1.1.1 Dados de entrada para o AERMET

Os dados de entrada necessários para o AERMET são informações que podem ser obtidas a partir de sondagens da atmosfera e medições de dados próximos ao solo. A partir dessas informações o AERMET estima o comprimento de Monin-Obukov, a velocidade convectiva, a velocidade de fricção, o fluxo de calor, a altura da camada de mistura e a escala de temperatura.

Os dados mínimos necessários para leitura e processamento do AERMET e envio de dados meteorológicos para o AERMOD, são observações horárias da superfície e dados de atmosfera superior. Os dados de atmosfera apresentam o perfil vertical de velocidades do vento, do coeficiente de turbulência vertical, do desvio padrão da direção do vento e da temperatura. Já as observações horárias de superfície devem apresentar os dados de velocidade do vento, direção do vento, temperatura ambiente ou temperatura de bulbo seco, e de cobertura de nuvens (EPA, 2004b).

#### 4.1.2 AERMOD

Quanto ao tratamento matemático o modelo AERMOD pode simular diferentes tipos de plumas dependendo da estabilidade atmosférica e o dos locais dentro ou acima da camada limite.

Para condições atmosféricas estáveis, o AERMOD modela a pluma com distribuição gaussiana na vertical e horizontal de forma semelhante, típicas de modelos estacionários:

$$C_s(x, y, z) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}u\sigma_{zs}} F_y \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left[ \exp\left(-\frac{(z-h_{es}+2mz_{ieff})^2}{2\sigma_{zs}^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h_{es}+2mz_{ieff})^2}{2\sigma_{zs}^2}\right) \right] \quad (4-1)$$

sendo  $F_y = \left( -\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \right)$

onde  $z_{ieff}$ , é a altura da camada de mistura mecânica efetiva,  $Q$  é a taxa de emissão pela chaminé;  $u$  é a velocidade do vento,  $\sigma_{zs}$  é a dispersão vertical total na camada limite estável (item 4.1.2.1) e  $h_{es}$  é a altura da pluma,  $\sigma_y$  são os coeficientes de dispersão lateral;  $x$ ,  $y$  e  $z$  são as distância segundo as direções dos eixos coordenados e  $m$  representa o índice do somatório para fontes dentro da camada de mistura, que representa a reflexão da pluma.

O modelo AERMOD trata a distribuição horizontal de maneira gaussiana, enquanto distribuição vertical resulta a partir da combinação de três tipos de pluma: (1) pluma direta, (2) pluma indireta e (3) pluma penetrada, que é contribuição da fonte que penetra além do topo da camada limite convectiva

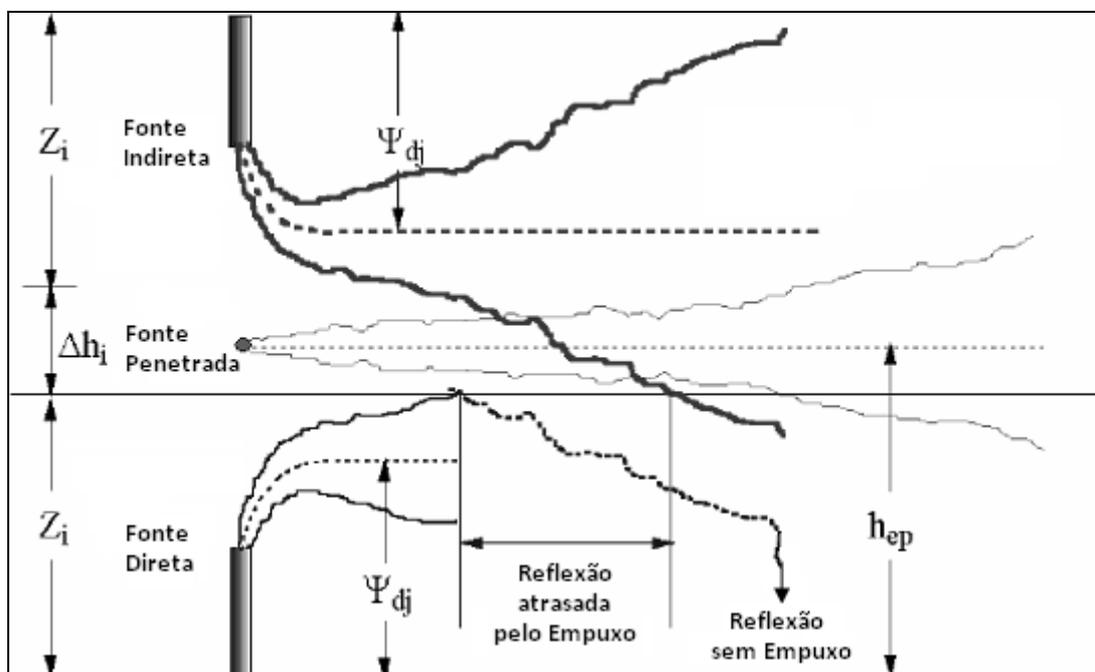


Figura 4-1: Tratamento da Pluma na Camada Limite Convectiva pelo modelo AERMOD (adaptado de EPA, 2004a).

A contribuição da fonte direta, em termos de concentração no nível do solo, se dá quando a velocidade na linha superior da pluma é suficientemente grande a ponto de se sobrepôr à

velocidade de ascendência da pluma carregando-a para a superfície. A fonte indireta consiste no tratamento da porção da pluma que primeiro atinge a altura da camada limite convectiva, denotada na Figura 4-1 por  $Z_i$ , e então é carregada à superfície. Ocorre um “atraso” em relação à contribuição da fonte direta decorrente da ação das forças de empuxo. Finalmente, o modelo AERMOD calcula a contribuição da porção da pluma que penetra além da camada limite convectiva (fonte penetrada) e reentra nesta camada posteriormente, dispersando-se na camada limite convectiva, atingindo a superfície.

A concentração total é obtida pelo modelo AERMOD, somando a contribuição de cada uma das três contribuintes ilustradas na Figura 4-1, conforme a Equação 4-2 (EPA, 2004a):

$$C(x, y, z) = C_d(x, y, z) + C_p(x, y, z) + C_r(x, y, z) \quad (4-2)$$

A contribuição da fonte direta é obtida a partir da Equação 4-3 (EPA, 2004a):

$$C_d(x, y, z) = \frac{Qf_p}{\sqrt{2\pi u}} F_y \sum_{f=1}^2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\lambda_f}{\sigma_{zj}} \left[ \exp\left(-\frac{(z - \psi_{dj} - 2mz_i)^2}{2\sigma_{zj}^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z + \psi_{dj} + 2mz_i)^2}{2\sigma_{zj}^2}\right) \right] \quad (4-3)$$

sendo  $\psi_{dj} = h_s + \Delta h_d \frac{\bar{w}_j x}{u}$

onde  $C_d$  é a concentração devida a fonte direta;  $\sigma_{zj}$  dispersão vertical total da porção da pluma (item 4.1.2.1),  $h_s$  é a altura da chaminé corrigida para o efeito de recirculação que pode ocorrer devido a chaminé (*stack tip downwash*)  $\bar{w}_j$  é a velocidade média vertical da porção da pluma,  $h_d$  é subida da pluma da fonte direta,  $f_p$  é a fração do material emitido pela fonte que permanece na camada limite convectiva ( $0 < f_p < 1$ );  $j$  é igual à 1 para linha inferior da pluma e igual à 2 para a linha superior da pluma (conforme a figura 4-1);  $z_i$  é a altura da camada convectiva,  $\psi_{dj}$  é a altura entre a base da fonte e a linha central da pluma [ $L$ ] e  $\lambda$  é o coeficiente de ponderação da distribuição.

A contribuição da fonte indireta é obtida a partir da Equação 4-4 (EPA, 2004a):

$$C_r(x, y, z) = \frac{Qf_p}{\sqrt{2\pi}u} F_y \sum_{f=1}^2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\lambda_f}{\sigma_{zj}} \left[ \exp\left(-\frac{(z + \psi_{rj} - 2mz_i)^2}{2\sigma_{zj}^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z - \psi_{rj} + 2mz_i)^2}{2\sigma_{zj}^2}\right) \right] \quad (4-4)$$

sendo  $\psi_{rj} = \psi_{dj} - \Delta h_i$ , e  $\Delta h_i$  representa a parcela da pluma que ascende além do topo da camada limite convectiva (Figura 4-1) e  $C_r$  representa a parcela da pluma emitida pela fonte indireta.

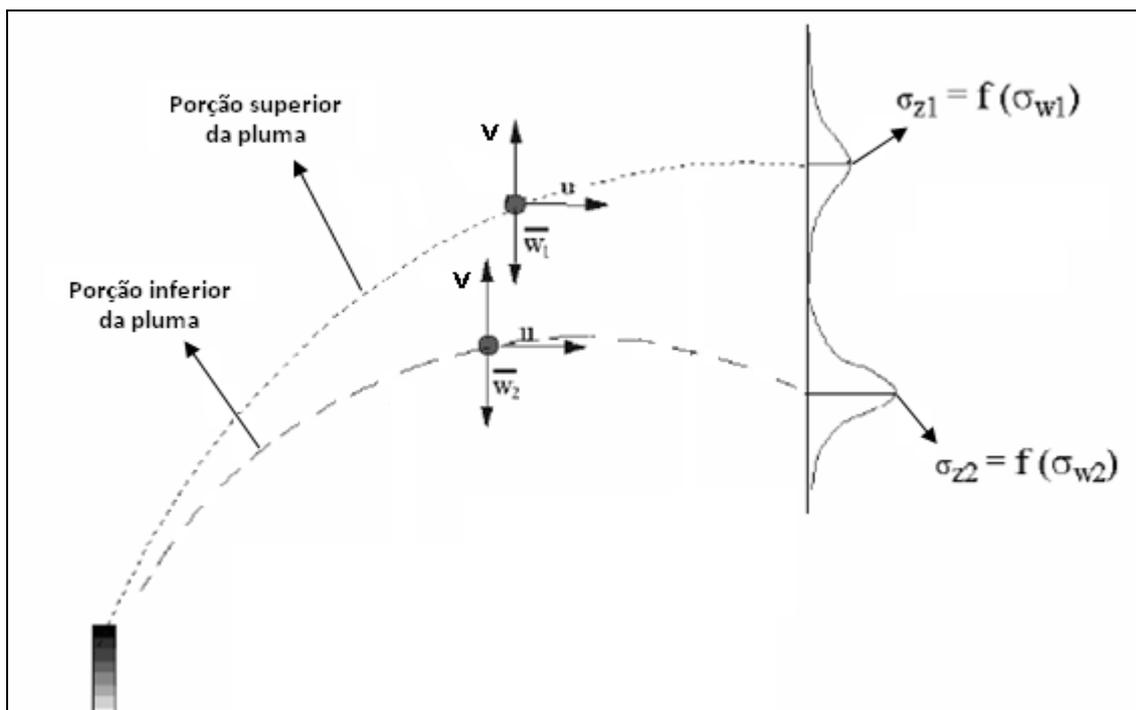
A contribuição da fonte que penetra além do topo da camada limite convectiva é dada pela Equação 4-5 (EPA, 2004a):

$$C_p(x, y, z) = \frac{Q(1-f_p)}{\sqrt{2\pi}u\sigma_{zp}} F_y \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left[ \exp\left(-\frac{(z - h_{ep} + 2mz_{ieff})^2}{2\sigma_{zp}^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z + h_{ep} + 2mz_{ieff})^2}{2\sigma_{zp}^2}\right) \right] \quad (4-5)$$

onde  $z_i$  é a altura acima da superfície refletida em uma camada estável;  $\sigma_{zp}$  é a dispersão vertical total da fonte penetrada (item 4.1.2.1) e  $h_{ep}$  é a altura da pluma que penetra além do topo da camada limite convectiva.

Analisando-se as Equações 4-3 a 4-5, que se referem às equações da pluma gaussiana, pode-se observar que o termo à esquerda da igualdade representa a concentração de um determinado poluente em um ponto qualquer do espaço. O termo  $\exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)$ , dado por  $F_y$ , representa a parcela da concentração relativa à dispersão segundo a direção do vento. O primeiro termo interno aos colchetes corresponde à parcela da concentração decorrente da dispersão vertical dos poluentes, enquanto o segundo termo no interior dos colchetes representa o acúmulo de poluente que se dá em função da consideração do efeito do contorno sólido ou contorno de reflexão, devido ao solo.

Dessa maneira, no AERMOD a pluma é transportada através de porções definidas como porção inferior e superior da pluma assumindo uma distribuição bi-gaussiana na vertical, como mostra a Figura 4-2 (EPA, 2004a).



**Figura 4-2:** Aproximação da distribuição da pluma na camada limite convectiva (adaptado de EPA, 2004a).

Maiores detalhes relativos à formulação matemática do modelo AERMOD e do pré-processador de dados meteorológicos AERMET podem ser obtidos em EPA (2004a).

#### 4.1.2.1 Coeficientes de Dispersão no AERMOD

Todos os desvios padrão de distribuição lateral e vertical de concentração ( $\sigma_{y,z}$ ) são uma combinação da dispersão (representada por  $\sigma_{ya}, \sigma_{za}$ ) resultante da turbulência ambiente e da dispersão ( $\sigma_b$ ) obtida a partir da turbulência induzida pelo empuxo da pluma. A dispersão induzida por um prédio não está incluída aqui, uma vez que uma abordagem separada é feita para situações em que o efeito da turbulência ao redor do prédio contribui para a dispersão total. A dispersão induzida pela turbulência do ambiente é conhecida por variar significativamente com a altura, tendo a sua variação mais forte perto da superfície da Terra. O AERMOD trata a dispersão vertical a partir da turbulência ambiente como uma combinação de um tratamento específico da dispersão na superfície e a abordagem mais tradicional baseada na abordagem de Taylor (1921).

A abordagem utilizada para combinar as contribuintes da dispersão assume que os efeitos são independentes uma da outra. Assim, os coeficientes de dispersão total são calculados a partir da seguinte expressão geral (PASQUILL e SMITH, 1983):

$$\sigma_{y,z}^2 = \sigma_{ya,za}^2 + \sigma_b^2 \quad (4-6)$$

onde  $\sigma_{y,z}$  são os coeficientes de dispersão lateral e vertical totais,  $\sigma_{ya,za}$  são os coeficientes de dispersão lateral e vertical ambiente e  $\sigma_b$  é coeficiente de dispersão induzida por empuxo da pluma para fonte direta e fonte indireta. Com exceção da fonte penetrada na camada limite convectiva a equação (4-6) é aplicada para toda a dispersão, com  $\sigma_{y,z}$  e  $\sigma_{ya,za}$  sendo representados como  $\sigma_{ys,zs}$  e  $\sigma_{yas,zas}$  na camada limite estável e  $\sigma_{yjs,zj}$  e  $\sigma_{yaj,zaj}$  na camada limite convectiva. Para a fonte penetrada, a dispersão total é assumida apenas a turbulência induzida pelo ambiente e empuxo. Para a fonte injetada, a dispersão total calculada é calculada como se a fonte estivesse na camada limite estável.

Com relação à dispersão lateral obtida a partir da turbulência ambiente, em termos gerais, é baseada na abordagem de Taylor (1921) como:

$$\sigma_{ya} = \frac{\sigma_v x}{u \left( 1 + \frac{x/u}{2T_{Ly}} \right)^p} \quad (4-7)$$

onde  $p=0,5$ ,  $u$  é a velocidade do vento,  $\sigma_v$  é a turbulência lateral,  $T_{Ly}$  é a escala de tempo integral Lagrangeana para a turbulência lateral. A aplicação da equação (4-7) é aplicada numa versão preliminar do AERMOD que estimava concentrações abaixo do esperado. Assim, a expressão foi reformulada para permitir um ajuste da dispersão lateral. Usando uma abordagem similar do estudo de Venkatram *et al.* (1984),  $T_{Ly}$  é encontrado para ser  $l/\sigma_v$  onde  $l$  é uma apropriada escala de comprimento para a turbulência lateral. Dessa maneira a equação (4-7) pode ser reescrita como:

$$\sigma_{ya} = \frac{\sigma_v x}{u(1 + \alpha X)^p} \quad (4-8)$$

onde  $X = \sigma_v x / uz_i$  é a distância adimensionalizada com  $u$  e  $\sigma_v$  dada por parâmetros efetivos, onde  $\alpha = z_i / l$  e  $z_i$  é a altura da camada de mistura.

Baseado na análise do  $\sigma_{ya}$  obtido pela equação (4-8) e em dados do experimento de Barad (1958) foi encontrado  $\alpha$  igual a 78 e  $p$  igual a 0,3. Como tal,  $\alpha$  é tratado como um

parâmetro de ajuste. Esses valores preliminares e a equação (4-8) foram adotados no AERMOD para o cálculo para todas as plumas em ambas as camadas limite estável e convectiva.

A componente ambiental da dispersão lateral da fonte penetrada, ou seja, uma fonte que foi lançada abaixo de  $z_i$ , mas penetra acima, é calculada usando a equação (4-8) com  $h_{es}$  igual a  $h_{ep}$  (altura da fonte penetrada). No entanto, para a fonte injetada, ou seja, fonte liberada acima de  $z_i$ , nenhuma substituição é necessária uma vez que estas fontes são modeladas como uma fonte estável.

Para dar conta do aumento da escala de comprimento da turbulência e, portanto, da escala de tempo Lagrangeana com alturas de saída maior do que no experimento *Prairie Grass* (BARAD, 1958),  $\alpha$  segue como:

$$\alpha = 78 \left( \frac{z_{PG}}{z_{\max}} \right) \quad (4-9)$$

onde  $z_{PG} = 0,46$  m (altura de emissão no experimento *Prairie Grass*). Para garantir que  $\alpha$  não se torne muito grande para emissões na superfície,  $z$  não é permitido abaixo de  $z_{PG}$  (ou seja, 0,46 m). Na camada limite estável  $z = h_{es}$ , na camada limite convectiva  $z = h_s$ , para fonte penetrada  $z = h_{ep}$ .

Quando à dispersão vertical obtida a partir da turbulência ambiente, para fonte na camada limite estável (e para fontes na camada limite convectivas que são emitidas diretamente dentro da camada estável acima da camada de mistura), a porção ambiente da dispersão ambiental ( $\sigma_{zas}$ ) é composta por uma componente elevada ( $\sigma_{zes}$ ) e uma próxima da superfície ( $\sigma_{zgs}$ ). Para  $h_{es} < z_i$  simples interpolação proporciona uma transição suave entre as duas componentes.

$$\sigma_{zas} = \left( 1 - \frac{h_{es}}{z_i} \right) \sigma_{zgs} + \left( \frac{h_{es}}{z_i} \right) \sigma_{zes} \quad (4-10)$$

Para  $h_{es} < z_i$ ,  $\sigma_{zas}$  é igual a  $\sigma_{zes}$ . Para fontes na camada limite estável  $\sigma_{zas}$  é a forma específica da porção ambiente da dispersão vertical. Na camada limite estável, a porção elevada da dispersão vertical segue a forma da equação (4-7):

$$\sigma_{zes} = \sigma_{wT} (x/u) / \left(1 + \frac{x/u}{2T_{Lzs}}\right)^{1/2} \quad (4-11)$$

onde  $\sigma_{wT}$  é a turbulência vertical devido à mistura mecânica (CIMORELLI *et al.*, 2004).

A escala de tempo Lagrangeana ( $T_{Lzs}$ ) para a turbulência vertical pode ser escrita na forma (VENKATRAM *et al.*, 1984)

$$T_{Lzs} = \frac{l}{\sigma_{wT}} \quad (4-12)$$

A escala de comprimento  $l$  é uma interpolação entre o limite da escala de comprimento de condições neutras,  $l_n = 0,36h_{es}$  e condições estáveis  $l_s = 0,27 \frac{\sigma_{wT}}{N}$ :

$$\frac{1}{l} = \frac{1}{l_n} + \frac{l}{l_s} \quad (4-13)$$

onde  $l_n = 0,36h_{es}$  e  $l_s = 0,27 \frac{\sigma_{wT}}{N}$ . Em condições muito estáveis ou em alturas elevadas,  $l$  se aproxima de  $l_s$ . Quando as condições são próximas da neutra,  $N$  é muito pequeno e  $l$  se aproxima de  $l_n$ .

A partir da combinação das equações (4-11), (4-12) e (4-13), encontramos a seguinte expressão que é usada pelo AERMOD para calcular  $\sigma_{zes}$ , a porção elevada da dispersão vertical:

$$\sigma_{zes} = \frac{\sigma_{wT} t}{\left[1 + \frac{\sigma_{wT} t}{2} \left(\frac{1}{0,36h_{es}} + \frac{N}{0,27\sigma_{wT}}\right)\right]^{1/2}} \quad (4-14)$$

Finalmente, para completar a descrição da equação (4-10), a porção superficial da dispersão vertical ( $\sigma_{zgs}$ ) na camada limite estável, é calculada de acordo com Venkatram (1992) como:

$$\sigma_{zgs} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left( \frac{u_* x}{u} \right) \left( 1 + 0,7 \frac{x}{L} \right)^{-\frac{1}{3}} \quad (4-15)$$

Para fonte direta e indireta na camada limite convectiva, a porção ambiente da dispersão vertical ( $\sigma_{za}$  da equação 4-6) é representada por  $\sigma_{zaj}$  ( $j$  é igual a 1 ou 2) para diferenciar entre porção inferior ou superior,  $\sigma_{zaj}$  é composta pela porção elevada ( $\sigma_{zej}$ ) e superficial ( $\sigma_{zg}$ ) e é dada por:

$$\sigma_{zaj}^2 = \sigma_{zej}^2 + \sigma_{zg}^2 \quad (4-16)$$

onde a porção elevada ( $\sigma_{zej}$ ) é obtida de acordo com Weil *et al.* (1997) como

$$\sigma_{zej} = \alpha_b \frac{\sigma_{wj} x}{u} \quad (4-17)$$

onde  $\sigma_{wj}$  é a turbulência vertical, um parâmetro na distribuição bi-Gaussiana ( $j$  é igual a 1 para porção superior e igual a 2 para porção inferior da pluma) e  $\alpha_b$  é designado para ser 1,0 acima da camada superficial.

Para a camada limite convectiva, a dispersão vertical a partir de uma fonte dentro da camada superficial ( $H_p \{x\} < 0, 1z_i$ ) é:

$$\sigma_{zg} = b_c \left( 1 - 10 \left( \frac{H_p}{z_i} \right) \right) (u_* / u) (x^2 / |L|) \quad (4-18)$$

onde  $b_c = 0,5$ ,  $u_*$  é a velocidade de fricção, e  $L$  é o comprimento de Monin-Obukhov, acima da camada superficial ( $H_p > 0, 1z_i$ ),  $\sigma_{zg}$  é assumido igual a zero.

A dispersão vertical total para fonte penetrada  $\sigma_{zp}$  (igual  $\sigma_z$  na equação 4-6) é uma combinação dos efeitos do ambiente e empuxo. A porção ambiental da dispersão vertical para a fonte penetrada contém apenas uma componente elevada  $\sigma_{zes}$  (igual a  $\sigma_{zss}$ ) uma vez que se presume ser dissociada da superfície do solo pela sua localização acima de  $z_i$  e, portanto não é afetada pela superfície subjacente. A dispersão vertical ambiente para fonte penetrada é calculada como uma parcela elevada da fonte estável ( $\sigma_{zes}$  da equação 4-14) com  $N = 0$  e sem

contribuição a partir da componente superficial. A frequência Brunt-Vaisala,  $N$ , é dada como zero porque a pluma penetrada passa pela camada de alta mistura (onde  $N \approx 0$ ) antes de dispersar para um setor dentro da camada de mistura.

Para todas as plumas, a dispersão induzida pelo empuxo (componente de  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ ) é calculada de acordo com Pasquill (1976) e Weil *et. al.* (1988) como:

$$\sigma_b = \frac{0,4\Delta h}{\sqrt{2}} \quad (4-19)$$

onde  $\Delta h$  é a subida da pluma apropriada para cada tipo de pluma (pluma direta, indireta, penetrada e estável).

## 4.2 O sistema CALPUFF

O CALPUFF é um modelo de dispersão de contaminantes que pode ser usado em vários estudos de modelagem de qualidade do ar. O sistema CALPUFF possui três principais componentes: CALMET (um modelo meteorológico diagnóstico tridimensional), CALPUFF (o modelo de transporte e dispersão) e CALPOST (um programa de pós-processamento). Cada um desses programas possui uma interface gráfica própria que auxilia na preparação dos arquivos de controle, escritos em linguagem FORTRAN, para a execução do programa.

O modelo sistema CALPUFF é inteiramente público, incluindo seus manuais e códigos fontes, podendo ser obtido na internet no seguinte endereço <http://www.src.com/calpuff/calpuff1.htm>.

### 4.2.1 CALMET

O CALMET (*Californian Meteorological Model*) é um modelo meteorológico que consiste em um módulo diagnóstico para a geração do campo do vento e outro módulo micro-meteorológico. O módulo micro-meteorológico tem como função calcular os parâmetros importantes da CLP. O módulo diagnóstico gerador do campo do vento utiliza duas etapas para o cálculo do campo do vento (DOUGLAS E KESSLER, 1988). Na primeira etapa, o campo de vento inicial baseado em informações meteorológicas disponíveis ou em modelos prognósticos é ajustado para considerar efeitos cinemáticos do terreno, inclinação do escoamento e de bloqueio do terreno. No final deste primeiro passo, é obtido o campo de vento. Na segunda etapa, um procedimento do tipo análise objetiva introduz as observações

meteorológicas no campo de vento obtido no primeiro passo para produzir o campo do vento final (SCIRE *et al.*, 2000).

#### 4.2.1.1 Dados de entrada para o CALMET

As observações meteorológicas para as simulações com o modelo CALMET são referentes às informações meteorológicas de superfície, dados meteorológicos de atmosfera superior (*upper air*), e dados geofísicos. As informações meteorológicas mínimas, necessárias de superfície são observações horárias de velocidade do vento, direção do vento, temperatura, cobertura de nuvens, altura da cobertura, pressão na superfície, umidade relativa, e dados de precipitação. Os dados de atmosfera superior necessários são: dois perfis verticais diários de velocidade do vento, direção do vento, temperatura, pressão. Os dados geofísicos utilizados no modelo são: elevação do terreno, categorias de uso/cobertura do solo, albedo, razão de Bowen, fluxo constante de calor no solo, fluxo de calor antropogênico e índice de área foliar vegetada. Estes parâmetros podem ser introduzidos em malha ou específicos em função do uso do solo.

No modelo CALMET, os dados meteorológicos de superfície são inseridos no modelo por meio dos arquivos SURF.DAT e PRECIP.DAT. Os dados de atmosfera superior são inseridos ao modelo através dos arquivos UP.DAT. Por fim, os dados de observações referentes às regiões cobertas por água (oceanos, mares, lagos ou rios) são inseridos no modelo por meio dos arquivos SEAn.DAT. Os dados geofísicos são informados ao modelo através do arquivo GEO.DAT (SCIRE *et al.*, 2000).

#### 4.2.2 CALPUFF

O CALPUFF (*California Puff Model*) é um modelo Gaussiano, tipo *puff*, de dispersão de poluentes, que simula a pluma contínua por meio de elevado número de *puffs* discretos de material do contaminante. Grande parte dos modelos de *puff* avalia a contribuição de um *puff* para a concentração em um receptor por meio de uma abordagem instantânea (*snapshot*), na qual cada *puff* é “congelado” em intervalos de amostragem. A concentração devido àquele *puff* naquele tempo é calculada (ou amostrada). O *puff* é então movido, evoluindo em tamanho, intensidade, até o próximo intervalo de amostragem (SCIRE *et al.*, 2000). A Figura 4-3 mostra a evolução de um *puff* emitido de uma chaminé.

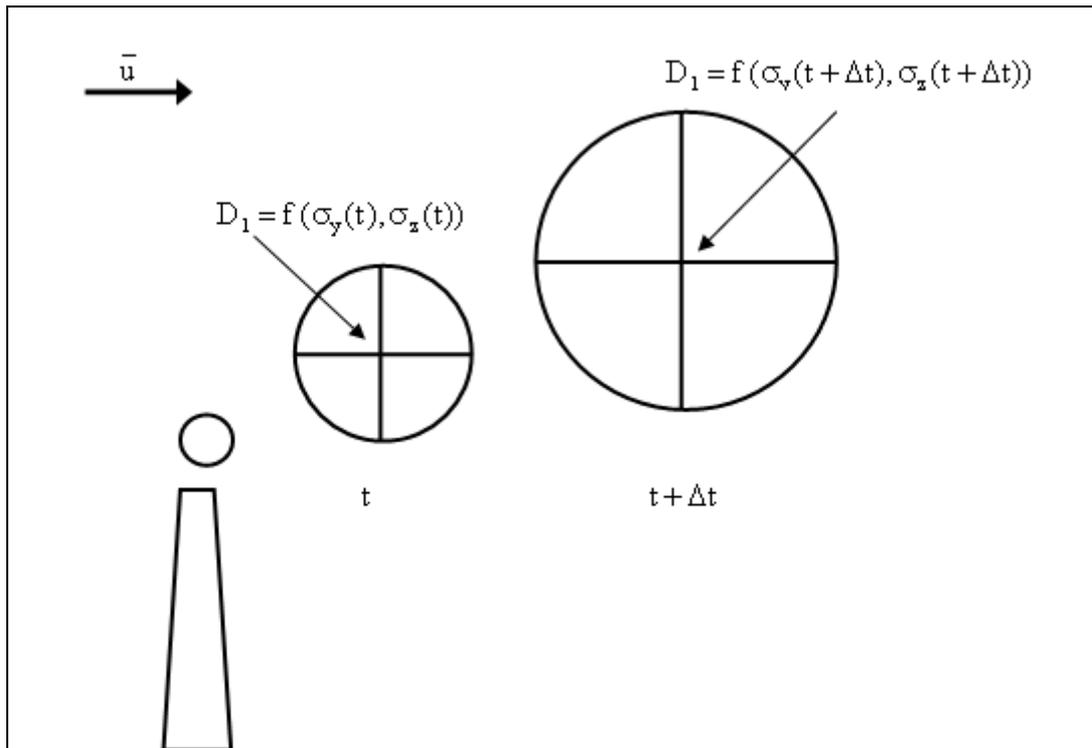


Figura 4-3: Um *puff* em dois instantes de tempo (Adaptado MORAES, 2004).

O diâmetro  $D_1$  é função dos parâmetros  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  no instante  $t$ . No instante posterior,  $t + \Delta t$ , o diâmetro  $D_1$  é agora  $D_2$ , no qual é função dos parâmetros  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  no instante  $t + \Delta t$ . A concentração do material poluente diminui à medida que o *puff* se distancia da fonte emissora. Num dado receptor, a concentração de material poluente do *puff* (naquele instante) é calculada para aquele dado receptor. A equação básica da contribuição de concentração de um *puff* para o dado receptor, naquele instante, é:

$$C = \frac{Q_p}{2\pi\sigma_x\sigma_y} g_v \exp\left[\frac{-d_a^2}{(2\sigma_x^2)}\right] \cdot \exp\left[\frac{-d_c^2}{2\sigma_y^2}\right] \quad (4-20)$$

$$g_v = \frac{2}{(2\pi)^{1/2}\sigma_z} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp\left[-(H_e + 2nz_i)^2 / (2\sigma_z^2)\right] \quad (4-21)$$

onde,  $C$  é a concentração ao nível da superfície no receptor,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  os parâmetros de dispersão na direção alinhada (direção  $x$ ), perpendicular (direção  $y$ ) e vertical (direção  $z$ ) em relação ao vento,  $Q_p$  a massa de poluente no *puff*,  $d_a$ ,  $d_c$  são as distâncias do centro do *puff* ao receptor nas direções alinhada, perpendicular em relação ao vento,  $H_e$  é a altura efetiva do *puff* acima do solo,  $z_i$  é a altura de mistura e  $g_v$  é o termo vertical da equação gaussiana.

O total de concentração em um receptor é a soma das médias das contribuições de todos os *puff* próximos para todo intervalo de amostragem dentro de um passo de tempo:

$$C(x, y, x, t) = \sum_{puff=1}^{total \text{ de } puff} C_{puff}(x, y, x, t) \quad (4-22)$$

Se o intervalo de amostragem e o passo de tempo forem correspondentes à uma hora, significa que somente uma “foto” será tomada a cada hora, ou seja, o modelo calcula a cada hora a concentração total em um determinado receptor, somando a contribuição de cada um dos *puffs* localizados próximos a ele. Uma desvantagem da abordagem tradicional de *puff* é a necessidade da liberação de muitos *puffs* para representar adequadamente uma estreita pluma contínua de a uma fonte. Ludwig *et al.* (1977) mostraram que se a distância entre os *puff* exceder um máximo a cerca de  $2\sigma_y$  resultados imprecisos podem ser obtidos. Melhores resultados são obtidos quando a separação do *puff* é reduzida para não mais do que um  $\sigma_y$ . Se o *puff* não se sobrepõe suficientemente, as concentrações de receptores localizados na brecha entre os *puffs* no momento da "foto" são subestimados, enquanto que nos centros de *puff* são superestimados.

Para solucionar esse problema duas alternativas são encontradas no CALPUFF. Ambas estão baseadas na função de amostragem integrada do modelo *Mesoscale Puff Model* MESOPUFF II (Scire *et al.*, 1984), com modificações para aplicações próximas à fonte. Um esquema de amostragem utiliza um *puff* não circular, alongado na direção do vento médio, para eliminar a necessidade de liberações frequentes de *puffs*. O outro emprega *puffs* Gaussianos radialmente simétricos.

Na formulação *puff* alongado (*slug*), os *puffs* consistem na representação do poluente emitido, em forma de porções discretas do poluente alongadas com distribuição gaussiana na direção do vento. Um *puff* alongado pode ser visualizado como *puffs* circulares sobrepostos separados por uma pequena distância (SCIRE *et al.*, 2000).

É importante lembrar, que quando o algoritmo PRIME (para inclusão dos efeitos de obstáculos) é utilizado no modelo CALPUFF, não é possível a escolha da formulação de *puff* alongada, pois tal método não foi implementado no PRIME, sendo possível apenas utilizar a formulação de *puffs* simétricos.

Para um *puff* simétrico horizontalmente  $\sigma_y = \sigma_x$ , a equação básica para a contribuição de um *puff* em um receptor reduz-se a,

$$C = \frac{Q_p(s)}{2\pi^2 \sigma_y^2(s)} g_v(s) \exp\left[\frac{-R_p^2(s)}{2\sigma_y^2(s)}\right] \quad (4-23)$$

onde  $R_p$  é a distância do centro do *puff* ao receptor e  $s$  a distância percorrida pelo *puff*.

Integrando a equação anterior (4-23) sobre a distância percorrida pelo *puff*,  $ds$ , durante o intervalo de amostragem,  $dt$ , a concentração média no tempo,  $C$ , é dada como:

$$C = \frac{1}{ds} \int_{s_0}^{s_0+ds} \frac{Q_p(s)}{2\pi^2 \sigma_y^2(s)} g_v(s) \exp\left[\frac{-R_p^2(s)}{2\sigma_y^2(s)}\right] ds \quad (4-24)$$

onde  $s_0$  é o valor de  $s$  no início do passo de amostragem. Uma solução analítica pode ser obtida se for assumido que as mais significativas dependências com a distância são com os termos  $R(s)$  e  $Q(s)$ . A Figura 4-4 ilustra o movimento de um *puff* das coordenadas  $(x_1, y_1)$  até  $(x_2, y_2)$ .

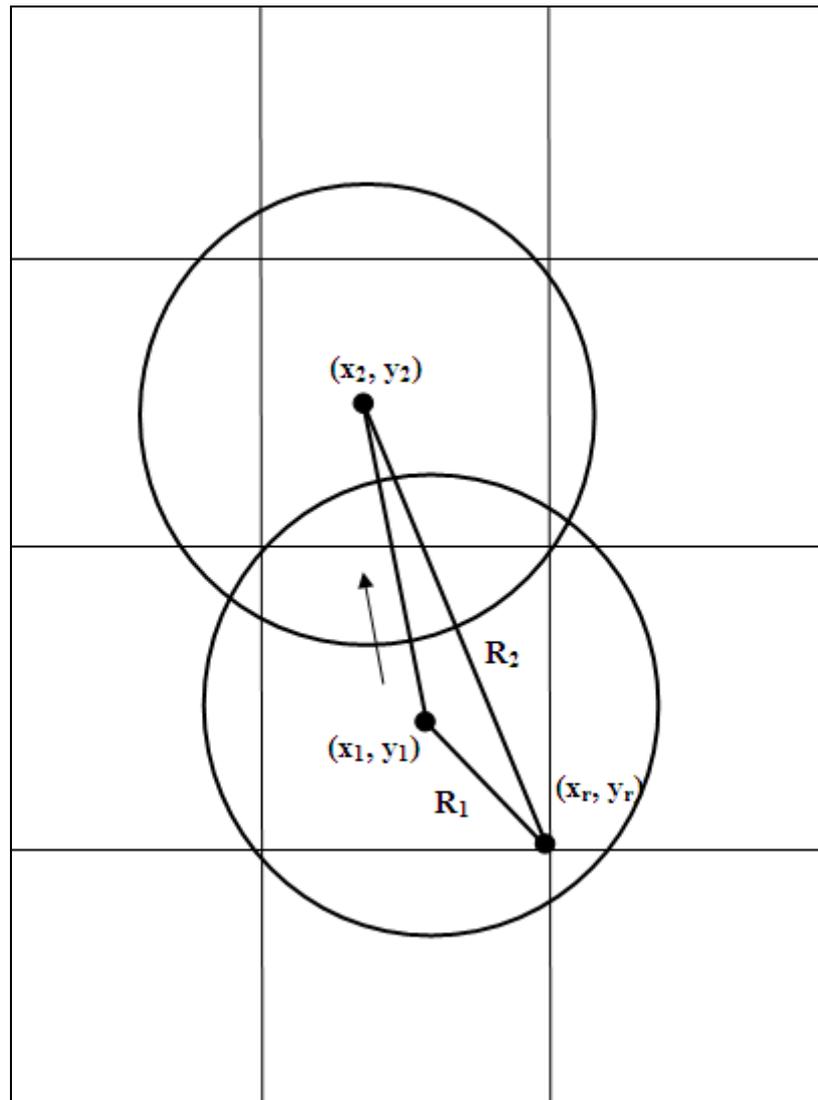


Figura 4-4: Movimento do *puff* em relação a um receptor localizado em  $(x_r, y_r)$  (adaptado SCIRE *et al.* 2000).

#### 4.2.2.1 Coeficientes de Dispersão no CALPUFF

Os coeficientes de dispersão  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  são parâmetros de grande importância em modelos gaussianos. No modelo CALPUFF existem cinco opções para o cálculo desses coeficientes (SCIRE *et al.*, 2000).

1. Coeficientes de dispersão calculados a partir dos valores da turbulência,  $\sigma_v$  e  $\sigma_w$ .
2. Coeficientes de dispersão calculados a partir de variáveis micro-meteorológicas ( $L$ ,  $w_*$ ,  $u_*$ , etc.).

3. Coeficientes de dispersão do esquema Pasquill-Gifford (PG) para áreas rurais (utilizando a aproximação das curvas ISCST-3) e coeficientes do esquema McElroy-Pooler para áreas urbanas.
4. Coeficientes de dispersão do esquema Pasquill-Gifford (PG) para áreas rurais (utilizando expressões do modelo MESOPUFF II) e coeficientes do esquema McElroy-Pooler para áreas urbanas.
5. Coeficientes do modelo CTDM utilizados para condições estáveis e neutras. Para condições convectivas os coeficientes são calculados a partir da opção 3.

As formas gerais de  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ , para as opções de dispersão 1, 2 e 5, descritas acima são:

$$\sigma_y = \sigma_v t f_y(t/T_{L_y}) \quad (4-25)$$

$$\sigma_z = \sigma_w t f_z(t/T_{L_z}) \quad (4-26)$$

onde  $\sigma_v$  e  $\sigma_w$  são os desvios padrões das velocidades  $v$  e  $w$ ,  $t$  o tempo de viagem da pluma até o receptor e  $T_{L_y}$  e  $T_{L_z}$  as escalas de tempo Lagrangeanas nas direções  $y$  e  $z$ .

O modelo CALPUFF utiliza as seguintes parametrizações para os coeficientes de dispersão dentro da CLP:

Camada superficial:  $z \leq 0,1h$  ( $L \leq 0$ )

$$\sigma_v = [4u_*^2 a_n^2 + 0,35w_*^2]^{1/2} \quad (4-27)$$

$$\sigma_v = [1,6u_*^2 a_n^2 + 2,9u_*^2 (-z/L)^{2/3}]^{1/2} \quad (4-28)$$

$$\sigma_n = \exp[-0,9(z/h)] \quad (4-29)$$

Camada de mistura:  $z = 0,1 - 0,8h$  ( $L \leq 0$ )

$$\sigma_v = [4u_*^2 a_n^2 + 0,35w_*^2]^{1/2} \quad (4-30)$$

$$\sigma_v = [1,15u_*^2 a_n^2 + 0,35w_*^2]^{1/2} \quad (4-31)$$

Camada de entranhamento:  $z > 0,8 h$  ( $L \leq 0$ )

$$\sigma_v = [4u_*^2 a_n^2 + 0,35w_*^2]^{1/2} \quad (4-32)$$

para  $z = 0,8$  até  $1,0 h$

$$\sigma_v = [1,15u_*^2 a_n^2 + a_{cl} 0,35w_*^2]^{1/2} \quad (4-33)$$

$$a_{cl} = [1/2 + (h - z)/(0,4h)] \quad (4-34)$$

para  $z = 1,0$  até  $1,2 h$

$$\sigma_v = [1,15u_*^2 a_n^2 + a_{c2} 0,35w_*^2]^{1/2} \quad (4-35)$$

$$a_{c2} = [1/3 + (1,2h - z)/(1,2h)] \quad (4-36)$$

Camada de neutra-estável:

$$\sigma_v = u_* [1,6C_s(z/L) + 1,8a_n] / (1 + z/L) \quad (L > 0) \quad (4-37)$$

$$\sigma_w = 1,3u_* [C_s(z/L) + a_n] / (1 + z/L) \quad (L > 0) \quad (4-38)$$

$$C_s = (1 - z/h)^{3/4} \quad (L > 0) \quad (4-39)$$

onde  $z$ ,  $h$ ,  $u_*$ ,  $w_*$  e  $L$  são respectivamente a altura  $z$ , a altura da CLP, velocidade de fricção (parâmetro representativo da intensidade da turbulência mecânica na CLP), escala de velocidade convectiva (parâmetro representativo da intensidade da turbulência convectiva na CLP) e comprimento de Monin-Obukhov.

As funções  $f_y$  e  $f_z$  são as propostas por Draxler (1976),

$$f_y = \left[ (1 + 0,9(t/1000)^{1/2}) \right]^{-1} \quad (L > 0) \quad (4-40)$$

$$f_z = \left[ 1 + 0,9(t/500)^{1/2} \right]^{-1} \quad (L > 0) \quad (4-41)$$

$$f_z = \left[ 1 + 0,945(t/100)^{0.806} \right]^{-1} \quad (L > 0) \quad (4-42)$$

Estas funções são utilizadas no modelo para as opções 1 e 2. Quando a opção 5 é selecionada, e o comprimento de Monin-Obukhov é positivo (estabilidade neutra à estável), as funções  $f_y$  e  $f_z$  são as do modelo CTDMPLUS (PERRY *et al.*, 1989),

$$f_z = \left[ 1 + \frac{ut}{20000} \right]^{-1/2} \quad (L > 0) \quad (4-43)$$

$$f_z = \left[ 1 + \sigma_w t \left( \frac{1}{0,72z} + \frac{N}{0,54\sigma_w} \right) \right]^{-1/2} \quad (L > 0) \quad (4-44)$$

onde  $z$  é a altura acima do solo e  $N$  a frequência de Brunt-Väisala (frequência de oscilação das parcelas de ar, devido ao empuxo, em um meio estratificado estávelmente).

A opção 3 também exige a especificação do tipo de uso do solo, o que determina quais curvas de dispersão são usadas. As equações e os parâmetros de dispersão para ambientes rurais são apresentados nas Tabelas 4-1 e 4-2 para  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ , respectivamente, e estão baseados em parametrizações das curvas de Pasquill-Gifford.

As equações e os valores dos coeficientes de dispersão urbana de McElroy e Pooler (1968) são apresentados nas tabelas 4-3 e 4-4 para  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ , respectivamente.

Tabela 4-1: Parâmetros usados para o cálculo do  $\sigma_y$  de Pasquill-Gifford

Classe de estabilidade de Pasquill	$\sigma_y = 465.11628 (x) \tan (\theta)**$ $\theta = 0.017453293 (c-d \ln x)$	
	c	d
A	24,1670	2,5334
B	18,3330	1,8096
C	12,5000	1,0857
D	8,3330	0,72382
E	6,2500	0,54287
F	4,1667	0,36191

Fonte: U.S. EPA (1992)

\*\* $\sigma_y$  expresso em metros e  $x$  em km

Tabela 4-2: Parâmetros usados para o cálculo do  $\sigma_z$  de Pasquill-Gifford

$\sigma_z(\text{metros}) = ax^b$			
Classe de estabilidade de Pasquill	x (km)	c	d
A**	< .10	122.800	0.94470
	0.10 - 0.15	158.080	1.05420
	0.16 - 0.20	170.220	1.09320
	0.21 - 0.25	179.520	1.12620
	0.26 - 0.30	217.410	1.26440
	0.31 - 0.40	258.890	1.40940
	0.41 - 0.50	346.750	1.72830
	0.51 - 3.11	453.850	2.11660
	> 3.11	**	**
B**	< .20	90.673	0.93198
	0.21 - 0.40	98.483	0.98332
	> 0.40	109.300	1.09710
C**	Todos	61.141	0.91465
D	< .30	34.459	0.86974
	0.31 - 1.00	32.093	0.81066
	1.01 - 3.00	32.093	0.64403
	3.01 - 10.00	33.504	0.60486
	10.01 - 30.00	36.650	0.56589
	> 30.00	44.053	0.51179
E	< .10	24.260	0.83660
	0.10 - 0.30	23.331	0.81956
	0.31 - 1.00	21.628	0.75660
	1.01 - 2.00	21.628	0.63077
	2.01 - 4.00	22.534	0.57154
	4.01 - 10.00	24.703	0.50527
	10.01 - 20.00	26.970	0.46713
	20.01 - 40.00	35.420	0.37615
	> 40.00	47.618	0.29592
F	< .10	24.260	0.83660
	< .20	15.209	0.81558
	0.21 - 0.70	14.457	0.78407
	0.70 - 1.00	13.953	0.68465
	1.01 - 2.00	13.953	0.63227
	2.01 - 3.00	14.823	0.54503
	3.01 - 7.00	16.187	0.46490
	7.01 - 15.00	17.836	0.41507
	15.01 - 30.00	22.651	0.32681
	30.01 - 60.00	27.074	0.27436
	> 60.00		

Fonte: U.S. EPA (1992)

\*\* Se o valor calculado de  $\sigma_z$  exceder 5000 m,  $\sigma_z$  é dado igual a 5000 m

Tabela 4-3: Fórmulas de Briggs usadas para calcular  $\sigma_y$  McElroy-Pooler

Classe de estabilidade de Pasquill	$\sigma_y$ (metros)
A	$0,32x(1,0 + 0.004x)^{-1/2}$
B	$0,32x(1,0 + 0.004x)^{-1/2}$
C	$0,22x(1,0 + 0.004x)^{-1/2}$
D	$0,16x(1,0 + 0.004x)^{-1/2}$
E	$0,11x(1,0 + 0.004x)^{-1/2}$
F	$0,11x(1,0 + 0.004x)^{-1/2}$

Fonte: U.S. EPA (1992)

x é expresso em metros

Tabela 4-4: Fórmulas de Briggs usadas para calcular  $\sigma_z$  McElroy-Pooler

Classe de estabilidade de Pasquill	$\sigma_z$ (metros)
A	$0,24x(1,0 + 0.001x)^{+1/2}$
B	$0,24x(1,0 + 0.001x)^{+1/2}$
C	$0,20x$
D	$0,14x(1,0 + 0.0003x)^{-1/2}$
E	$0,08x(1,0 + 0.0015x)^{-1/2}$
F	$0,08x(1,0 + 0.0015x)^{-1/2}$

Fonte: U.S. EPA (1992)

x é expresso em metros

Tabela 4-5: Taxa de crescimento dos coeficientes MESOPUFF II

Classe de estabilidade	$a_y$	$b_y$	$a_z$	$b_z$
A	0.36	0.9	0.00023	2.10
B	0.25	0.9	0.058	1.09
C	0.19	0.9	0.11	0.91
D	0.13	0.9	0.57	0.58
E	0.096	0.9	0.85	0.47
F	0.063	0.9	0.77	0.42

Fonte: Scire *et al.* (1984)

Se a forma MESOPUFF II das curvas de dispersão dependente da estabilidade é selecionada (Opção 4), as funções de crescimento do *puff* são:

$$\sigma_y = a_y x^{b_y} \quad (4-45)$$

$$\sigma_z = a_z x^{b_z} \quad (4-46)$$

US EPA (1993) indica que as curvas de dispersão PG, como definido anteriormente, são adequados para a previsão de uma hora concentrações médias.

O CALPUFF tem a opção de alterar os coeficientes de dispersão de Pasquill-Gifford para diferentes médias de tempo (explicado no item 5.4) ou diferentes comprimentos de rugosidade.

Um ajuste do comprimento de rugosidade para as curvas  $\sigma_z$  de Pasquill-Gifford e é baseado em Smith (1972). O valor ajustado é dado pela

$$\sigma'_z = a'x^{b'} \quad (4-47)$$

$$\sigma' = a \cdot \{1,585(1000)^\beta z_0^{0,1301}\} \quad (4-48)$$

$$b' = b - \beta \quad (4-49)$$

$$\beta = 0,0777 + 0,0215 \ln(z_0) \quad (4-50)$$

onde  $z_0$  é o comprimento de rugosidade (m),  $x$  é a distância em metros e  $a$  e  $b$  são parâmetros das curvas de dispersão de Pasquill-Gifford.

Para  $\sigma_y$ , o comprimento da rugosidade ajustado é:

$$\sigma'_y = \sigma_y (z_0 / z_{0(ref)})^{0,2} \quad (4-51)$$

onde o comprimento de rugosidade de referência ( $z_{0(ref)}$ ) é de 0,03 metros, e o principal indica que o valor ajustado de comprimento de rugosidade de  $\sigma_y$ .

### 4.3 Modelagem do efeito *building downwash* – Modelo PRIME

Para a inclusão da influência do obstáculo na modelagem matemática, em cada modelo de dispersão utilizado no presente trabalho será aplicada a abordagem proposta por Schulman *et al.* (2000) que implementa o modelo “*Plume Rise Model Enhancements*” (PRIME). É importante lembrar que os *softwares* dos modelos AERMOD e CALPUFF, possuem a opção de utilização do modelo (PRIME).

O modelo PRIME é baseado em estudos de campo e de túnel de vento onde foram incorporadas estimativas de velocidade do vento, desvios das linhas de corrente, e intensidade turbulenta na esteira, bem como os efeitos da posição da chaminé em relação ao obstáculo,

O PRIME calcula campos de intensidade turbulenta, velocidade do vento, inclinação das linhas de corrente média como uma função da forma do prédio projetada. Os valores desses campos decaem gradualmente após o obstáculo. Com o cálculo de subida da pluma, o PRIME determina a mudança na posição da linha central da pluma e o espalhamento da pluma. A subida da pluma incorpora a advecção ao longo das linhas de corrente médias e a subida da pluma relativa às linhas de corrente devido ao empuxo e quantidade de movimento. As concentrações são estimadas logo após o obstáculo e após a zona de recirculação, com a massa de pluma capturada pela zona de recirculação tratada separadamente da pluma primária não capturada, e reemitida em forma de fonte volume na esteira turbulenta.

A cavidade decorrente do efeito do prédio é definida como a região limitada acima do topo do obstáculo com a separação da linha de corrente no topo da parede frontal do obstáculo, sendo delimitada pelo reatamento das linhas de corrente. A cavidade é limitada lateralmente pela separação das linhas de corrente nas arestas laterais da face frontal do prédio. Dependendo da geometria do obstáculo, podem existir distintas cavidades no topo e após o obstáculo, ou uma cavidade de recirculação. A cavidade logo após o obstáculo é frequentemente chamada de *near-wake*. A esteira, além do reatamento das linhas de corrente é chamada de *far wake*. Uma esteira envolve os limites da cavidade de recirculação e da região logo após a mesma (*far wake*). Essas características da esteira são instáveis. Um esquema de esteira é demonstrado na Figura 4-5, na qual a altura e largura da cavidade ( $H_c(x)$ ,  $W_c(x)$ ) e a altura e largura da esteira ( $H_w(x)$ ,  $W_w(x)$ ) são representadas (SCHULMAN *et al.*, 2000).

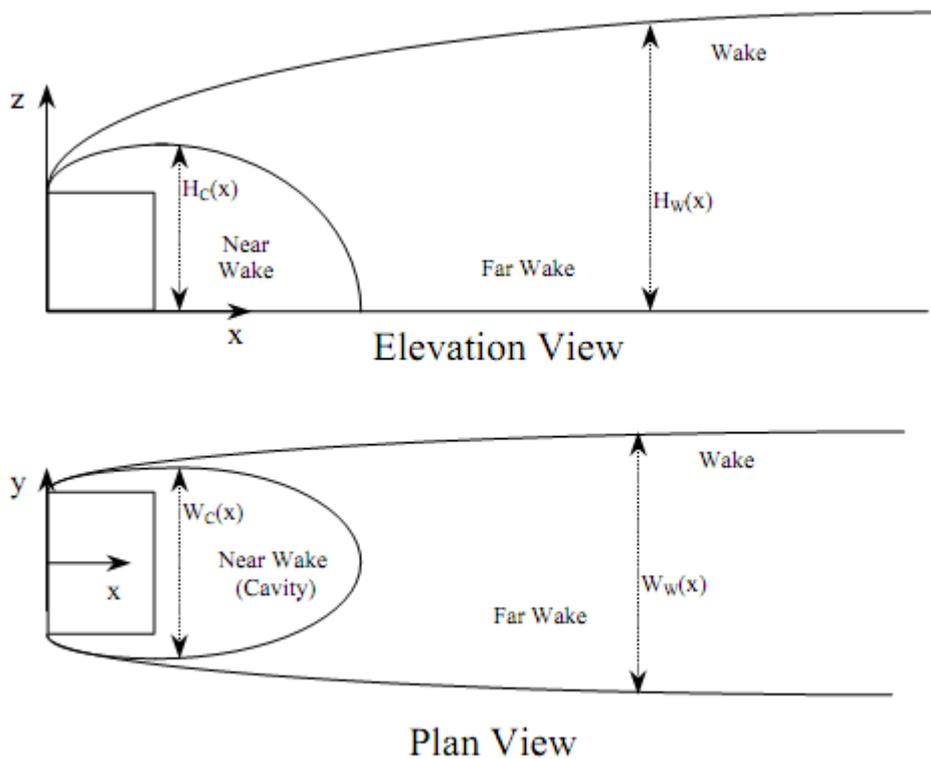


Figura 4-5: Definição das regiões do escoamento consideradas pelo modelo PRIME. Fonte: Schulman *et al.* (2000).

As estruturas cavidade e esteira são controladas pelas dimensões do prédio. Essas dimensões são a altura do prédio ( $H$ ), a largura projetada na transversal do fluxo ( $W$ ), e o comprimento projetado ao longo do escoamento ( $L$ ). Segundo Wilson (1979), uma escala de comprimento é definida como (SCHULMAN *et al.*, 2000):

$$R = B_S^{2/3} B_L^{1/3} \quad (4-52)$$

Onde  $B_S$  é o menor e  $B_L$  é o maior de  $H$  e  $W$ . A cavidade no topo do obstáculo é recolada no próprio topo se  $L > 0.9R$ , caso isso aconteça, a altura máxima da cavidade de recirculação após o obstáculo é  $H_R = H$  (WILSON e BRITTER, 1982). Se a cavidade no topo, não é recolada, a altura máxima da cavidade após o obstáculo é  $H_R = H + 0.22$  em  $x = 0.5R$ , onde  $x$  é distancia ao longo do escoamento medida a partir da face frontal do prédio (WILSON, 1979). O comprimento da cavidade de recirculação logo após o obstáculo, medida a partir da face posterior do prédio, é estimada como (FACKRELL, 1984; SCHULMAN *et al.*, 2000):

$$L_R = \frac{1,8W}{\left[ (L/H)^{0,3} (1 + 0,24W/H) \right]} \quad (0,3 \leq L/H \leq 3) \quad (4-53)$$

onde  $H$  é a altura do obstáculo,  $L$  é o comprimento do obstáculo e  $W$  é a largura do obstáculo. Quando a relação  $L/H$  está fora do intervalo indicado,  $L_R$  é calculado usando o limite mais próximo da relação.

Usando  $R$ ,  $L_R$ , e  $H_R$ , para calcular a altura e a largura da cavidade em função da distância ao longo do vento a partir da face do edifício frontal ao vento ( $H_c(x)$ ,  $W_c(x)$ ). Se a cavidade em cima do telhado reata sobre o prédio, a altura da cavidade é calculada como (SCHULMAN *et al.*, 2000):

$$H_c = H \quad (0 < x \leq L) \quad (4-54)$$

$$H_c = H \left[ 1 - \left( \frac{x-L}{L_R} \right)^2 \right] \quad (L > x > L + L_R) \quad (4-55)$$

Se a cavidade no topo não recola sobre o prédio:

$$H_c = H_R + \frac{4 \left( x - \frac{R}{2} \right)^2 (H - H_R)}{R^2} \quad (0 > x > R/2) \quad (4-56)$$

$$H_c = H_R \left[ 1 - \frac{\left( x - \frac{R}{2} \right)^2}{(L + L_R - R)^2} \right]^{1/2} \quad (R/2 > x > L_R) \quad (4-57)$$

Baseado na análise das linhas de corrente no plano-horizontal no túnel de vento, simuladas por Snyder e Lawson (1993), o tamanho máximo da cavidade é estimada como (SCHULMAN *et al.*, 2000):

$$W_c = \frac{W}{2} + \frac{R}{3} - \frac{(X-R)^2}{3R} \quad (0 < x \leq R) \quad (4-58)$$

$$W_c = \left( \frac{W}{2} + \frac{R}{3} \right) \sqrt{1 - \left( \frac{x-R}{L+L_R-R} \right)^2} \quad (R < x < L+L_R) \quad (4-59)$$

A altura do limite da esteira ( $H_w(x)$ ) é estimada pela combinação da formulação empírica baseada nas medições fora do prédio (WILSON, 1979) eq. (4-44),

$$H_w = H + 0,28R \left[ \frac{x}{R} \right]^{1/3} \quad (4-60)$$

com a formulação de Weil (1996) eq.(4-45) para a esteira após o edifício

$$H_w = 1,4H \left[ \frac{x}{H} \right]^{1/3} \quad (4-61)$$

que gera:

$$H_w = 1,2R \left[ \frac{x}{R} + \left( \frac{H}{1,2R} \right)^3 \right]^{1/3} \quad (4-62)$$

Para um prédio com  $H=W$ , a equação (4-60) estima uma altura da esteira de 1,4 vezes a altura do prédio em uma vez a altura prédio a partir da face do edifício frontal ao vento e 3,3 vezes a altura do prédio, em vinte vezes a altura prédio a partir da face do edifício frontal ao vento.

O limite lateral da esteira ( $W_w(x)$ ) é estimado a partir das linhas de correntes monitoradas por Snyder e Lawson (1994) como,

$$W_w = \frac{W}{2} + \frac{R}{3} \left[ \frac{x}{R} \right]^{1/3} \quad (4-63)$$

Essa fórmula inclui a característica de dependência  $x^{1/3}$  do crescimento tridimensional da esteira após o ponto de recolamento das linhas de corrente *far wake* e compara muito bem com os dados.

O tratamento do modelo para as linhas de corrente média é baseado no local e altura máxima da cavidade de recirculação, no comprimento da cavidade de recirculação ( $L_R$ ) e na escala de

comprimento ( $R$ ). Os dados de túnel de vento, em geral, mostram que a inclinação das linhas de corrente médias podem ser divididas em cinco regiões. A Figura 4-6 ilustra essas cinco regiões para um obstáculo cúbico ( $H=W=L$ ). As linhas de corrente são mostradas na Figura 4-6(a), e os observados no túnel de vento de Snyder e Lawson (1994) na Figura 4-6(b). A inclinação das linhas de corrente média é zero até cerca de uma distância  $R$  antes do obstáculo (região A). A região ascendente antes do obstáculo e a região sobre o obstáculo (Regiões B e C) mostram as linhas de corrente atingem a inclinação máxima perto da face frontal do prédio e continuam a subir até o ponto máximo da cavidade de recirculação em cima do edifício. Na região B, as linhas de corrente abaixo de  $2H/3$  não sobem sobre o prédio, ficando estagnada, ou desviando em torno dos lados. A região descendente das linhas de corrente (região D), seguindo depois até o final da cavidade de recirculação após o obstáculo, em que a inclinação das linhas de corrente segue o limite superior da zona de recirculação. Depois, na região após o ponto de reatamento da cavidade de recirculação (*far wake*) (região E), há uma diminuição gradual da taxa de descendência das linhas de corrente. Além disso, a magnitude absoluta de inclinação em qualquer  $x$  diminui com a altura acima do edifício. O formato do prédio também afeta a inclinação das linhas de corrente. Por exemplo, a descida das linhas de corrente média para uma maior largura não é tão inclinada quanto para um prédio estreito, com mesma altura e comprimento. A magnitude da descida muda com a direção do vento que influencia na projeção da largura e comprimento do prédio. Além disso, as inclinações observadas no túnel de vento próximo ao solo mostram que para prédios altos ( $H > W$ ) apenas o ar acima da parte superior a um terço do prédio flui sobre o prédio, mas para prédios muito largos quase todo o ar escoar por cima (SCHULMAN *et al.*, 2000).

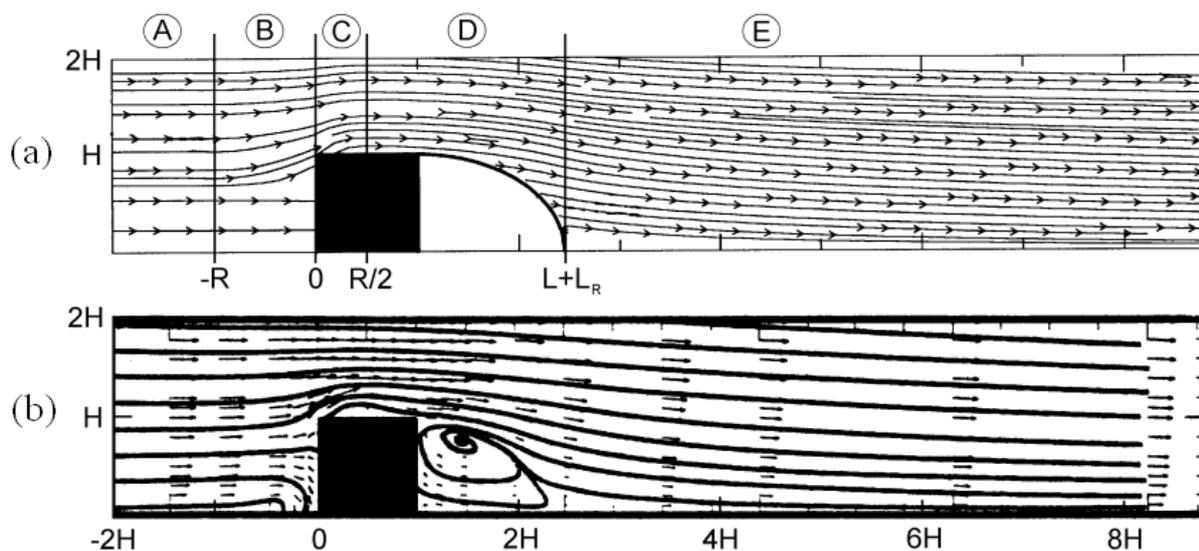


Figura 4-6: Comparação das linhas de corrente previsto pelo modelo PRIME (a) com observações de túnel de vento (b). As cinco regiões das linhas de corrente (A-E) são observados. A altura e as distâncias são dimensionadas na altura do edifício  $H$ . Fonte: Schulman *et al.* (2000).

Usando essas observações gerais, relações empíricas para inclinações das linhas de corrente média para  $z \leq H$  foram construídas para cada região, e um fator de decaimento dependente da altura foi aplicado para as inclinações em elevações acima de  $z=H$ :

- (1) Uma inclinação zero é usada para todos os pontos na região A;
- (2) Nas regiões B, C, e D, são geradas inclinações que mudam linearmente com a distância, as linhas de corrente sobem  $0,22R$  na região B e região C, e caem  $0,22R$  na região D;
- (3) A inclinação das linhas de corrente no início da região E decaem como  $x^{-1}$ ;
- (4) As inclinações calculadas em  $z=H$  decaem com  $z^{-3}$  nas regiões de linha de corrente ascendente e  $z^{-1}$  na região de descida. Antes do prédio (região B), a inclinação das linhas de corrente são mantidas em zero para  $z < \frac{2}{3}H$  onde  $R \leq H$  e para  $z < \frac{2}{3}(2H - R)$  onde  $R > H$ . As expressões resultantes para o desvio das linhas de corrente ( $dz/dx$ ) em  $z \leq H$  e o fator de decaimento vertical ( $F_z$ ) que é aplicado para  $z > H$  são:

Tabela 4-6: Expressões resultantes para o desvio das linhas de corrente ( $dz/dx$ ) em  $z \leq H$  e o fator de decaimento vertical ( $F_z$ ) para  $z > H$

Região	Inclinação da linha de corrente	Distância a partir da face frontal ao vento	Fator para $z > H$	
A	$\frac{dz}{dx} = 0$	$(x < -R)$	$F_z = 1$	(4-64)
B	$\frac{dz}{dx} = \frac{2(H_R - H)(x + R)}{R^2}$	$(-R \leq x < 0)$	$F_z = \left[\frac{z}{H}\right]^{-3}$	(4-65)
C	$\frac{dz}{dx} = \frac{-4(H_R - H)\left(\frac{2x}{R} - 1\right)}{R}$	$(0 \leq x < 0,5R)$	$F_z = \left[\frac{z}{H}\right]^{-3}$	(4-66)
D	$\frac{dz}{dx} = \frac{(H_R - H)(R - 2x)\left(\frac{z}{H}\right)^{0,3}}{\left(L + L_R \frac{R}{2}\right)^2}$	$(0,5R \leq x \leq L + L_R)$	$F_z = \left[\frac{z}{H}\right]^{-1}$	(4-67)

Para distâncias transversais ao vento fora da largura projetada do prédio as inclinações são linearmente diminuídas a zero em uma distância transversal ao vento  $\frac{W}{2} + \frac{R}{3}$ .

O tratamento da subida de pluma no modelo PRIME é realizada com uma solução numérica das equações de massa, energia, e quantidade de movimento (ZHANG e GHONIEM, 1993).

O modelo permite decidir a estratificação da temperatura ambiente, o cisalhamento do vento e o tamanho inicial da pluma. A implementação do modelo de ascensão da pluma no PRIME permite considerar os efeitos de subida e descida das linhas de corrente, bem como o aumento de diluição devido à turbulência imposta pelo obstáculo. Uma característica fundamental do modelo é a possibilidade de incluir efeitos de cisalhamento vertical do vento, que são importantes para muitos lançamentos com empuxo a partir de emissões mais próximas do solo. Além disso, o *déficit* da velocidade do vento induzido pelo prédio é modificado em função da distância após o prédio. O *déficit* também leva ao aumento da subida da pluma em emissões mais próximas do solo (SCHULMAN *et al.*, 2000).

As equações governantes para a subida da pluma são:

(1) Massa

$$\frac{d}{ds_{dc}}(\rho U_{sc} r^2) = 2r\alpha\rho|U_{sc} - U_a \cos \Phi| + 2r\beta\rho_a|U_a \sin \Phi| \quad (4-68)$$

onde  $\alpha = 0,11$  e  $\beta = 0,6$  são os parâmetros de arraste de Hout e Weil (1972), correspondentes às diferenças das componentes de velocidade entre o vento e a pluma nas direções paralela e perpendicular ao eixo da pluma,  $U_a(z)$  é a velocidade do vento ambiente horizontal, que pode ser uma função arbitrária de altura, e  $U_{sc} = \sqrt{u^2 + w^2}$  é a velocidade da seção transversal ao longo da linha central, com duas componentes  $u$  e  $w$  na direção horizontal e vertical,  $\rho$  e  $\rho_a$  são a densidade da pluma e densidade do ar, respectivamente,  $s_{dc}$  é a distância ao longo da linha central da pluma medidas a partir da fonte emissora,  $r$  é o raio da pluma, e  $\Phi$  é a linha central de inclinação.

(2) Momentum – Ao longo do vento

$$\frac{d}{ds_{dc}}(\rho U_{sc} r^2 (u - U_a)) = r^2 \rho w \frac{dU_a}{dz} \quad (4-69)$$

(3) Momentum – Vertical

$$\frac{d}{ds_{dc}}(\rho U_{sc} r^2 w) = gr^2 (\rho_a - \rho) \quad (4-70)$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade

## (4) Energia

$$\frac{d}{ds_{dc}} \left[ \rho U_{sc} r^2 (T - T_a) \right] = - \left[ \frac{dT_a}{dz} + \frac{g}{c_p} \right] \rho w r^2 - R_{rp} r (T^4 - T_a^4) \quad (4-71)$$

onde  $T$  é a temperatura da pluma,  $T_a$  é a temperatura ambiente,  $c_p$  é o calor específico do ar ambiente e  $R_{rp}$  é uma variável que caracteriza as propriedades de radiação com um valor de  $9.1 \times 10^{-11} \text{ Kg}/(\text{m}^2 \text{K}^3 \text{s})$ .

O efeito de crescimento da esteira turbulenta no arraste é incluído pela suposição que a equação do arraste da massa (equação 4-66) pode ser controlada, por vezes, pelo crescimento da pluma devido à turbulência da esteira. Isso é implementado usando o máximo de duas taxas de arraste em cada etapa (SCHULMAN *et al.*, 2000),

$$\frac{d}{ds_{dc}} (\rho U_{sc} r^2) = \text{Máximo} \left( \left( \frac{d}{ds_{dc}} (\rho U_{sc} r^2) \right)_{\text{arraste}}, 2r \rho_a U_a \left( \frac{dr}{ds_{dc}} \right)_{\text{wake}} \right) \quad (4-72)$$

A taxa de crescimento radial devido à turbulência da esteira é obtida a partir da taxa de crescimento do parâmetro de dispersão vertical  $\sigma_z$ , (cuja formulação é discutida na próxima seção).

$$\left( \frac{dr}{ds_{dc}} \right)_{\text{wake}} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{d\sigma_z}{dx} \quad (4-73)$$

Para subida da pluma após o obstáculo, o perfil de velocidade vertical é modificado para refletir as velocidades do vento reduzido na esteira, para que

$$U_w(z) = F(z)U_a(z) \quad (4-74)$$

Onde  $F(z)$  é a fração da velocidade do vento ambiente. Dentro da cavidade,  $F$  é igual a uma constante ( $F_c$ ), e sobre a esteira,  $F = 1$ .  $F$  é uma função linear da altura entre  $H_c$  e  $H_w$ ,

$$F = F_c + \left[ \frac{1 - F_c}{H_w - H_c} \right] (z - H_c) \quad (H_c \leq z \leq H_w) \quad (4-75)$$

$F_c$  é calculado assumindo um déficit da velocidade fracional média em toda a espessura da esteira na parede atrás do prédio,  $\Delta U_0 / U_0$ , onde  $U_0$  é uma velocidade uniforme antes do prédio. Essa restrição com a Equação 4-73 força  $F_c$  a ser:

$$F_c = 1 - \left[ \frac{H_w (\Delta U_0 / U_0)}{0,5 (H_w - H_c)} \right] \quad (4-76)$$

O valor de  $\Delta U_0 / U_0$  foi estimado em 0,7 a partir dos dados de túnel de vento de (SNYDER e LAWSON, 1993).

No modelo PRIME, a dispersão é baseada na abordagem de Weil (1996). Os valores de intensidade de turbulência e do *déficit* de velocidade são calculados dentro da região da esteira. Esses valores chegam ao máximo na parede atrás do prédio e decaem com o vento dois terços da intensidade. A formulação apresentada para a dispersão vertical é análoga para a dispersão horizontal segundo Weil (1996), que estima as constantes a partir dos dados de túnel de vento de Arya e Gadiyaram (1986), a intensidade de turbulência,  $i_z$ , é calculada dentro da esteira a uma distância ( $\xi - R$ ) a partir da parede atrás do prédio (onde  $\xi$  é definida de tal forma que  $\xi = R$  na parede atrás do prédio) como o quociente da velocidade de turbulência, e a velocidade média do vento na esteira (SCHULMAN *et al.*, 2000),

$$i_z = \frac{\sigma_w}{U} = \frac{\sigma_{w0} + (1,7\sigma_{wN} - \sigma_{w0}) \left[ \frac{\xi}{R} \right]^{-\frac{2}{3}}}{U_0 - \Delta U_0 \left[ \frac{\xi}{R} \right]^{-\frac{2}{3}}} \quad (4-77)$$

onde o índice 0 denota valores ambientais e o  $\sigma_{wN}$  denota a típica intensidade de turbulência em escoamento neutro. Na parede atrás do prédio,  $\xi = R$ , a intensidade turbulência é máxima:

$$i_z = \frac{1,7\sigma_{wN}}{U_0 - \Delta U_0} = \frac{1,7i_{zN}}{1 - \frac{\Delta U_0}{U_0}} \quad (4-78)$$

Na região maior que  $\xi / R$ , a turbulência ambiental é recuperada

$$i_z = \frac{\sigma_{w0}}{U_0} = i_{z0} \quad (4-79)$$

Equação (4-75) reformulada usando intensidade de turbulência, reorganizando os termos:

$$i_z = i_{z0} \left[ 1 + \frac{\left( \frac{1,7i_{zN} - 1}{i_{z0}} \right) + \frac{\Delta U_0}{U_0}}{\left[ \frac{\xi}{R} \right]^{\frac{2}{3}} - \frac{\Delta U_0}{U_0}} \right] \quad (4-80)$$

Consistente com a formulação de subida de pluma,  $\Delta U_0 / U_0$ , foi estimado como 0,7 por meio de dados de túnel de vento. Os valores de 0,06 para  $i_{zN}$  e 0,08 para  $i_{yN}$  foram inferidos por meio da formula dos coeficientes de dispersão de Briggs para condições de estabilidade neutra e rural como reportado em (GIFFORD, 1976). As intensidades de turbulência para  $i_{z0}$  e  $i_{y0}$  foram inferidas por meio das fórmulas dos coeficientes de dispersão de Briggs para regiões rurais e urbanas (SCHULMAN *et al.*, 2000).

Dentro da região que abrange uma distância igual ao comprimento da cavidade de recirculação, a mudança na dispersão da pluma é proporcional a intensidade de turbulência local,  $\frac{d\sigma_z}{dx} = i_z(x)$ . Após essa região, de acordo com Weil (1996), um modelo de crescimento da difusividade turbulenta é usado,

$$\frac{d\sigma^2}{dx} = \frac{2K_z}{U} = \frac{k\sigma_w H_w}{U} = k i_z(x) H_w(x) \quad (4-81)$$

onde  $K_z$  é o coeficiente de difusividade mássica turbulenta. Ao conferir a taxa de crescimento em  $x_d$ , a distância a partir da face edifício contra o vento até o início do crescimento de difusividade turbulenta, tem-se:

$$\frac{d\sigma^2}{dx} = 2\sigma_z(x_d) i_z(x) \frac{H_w(x)}{H_w(x_d)} \quad (4-82)$$

A taxa de crescimento da difusividade turbulenta segue até a distância que a intensidade turbulenta decai para valores ambientais, ou  $15R$  a partir da face do prédio contrária ao vento, seja qual for a distância menor.

Ambos os coeficientes de dispersão horizontal e vertical são intensificados na esteira após o prédio. Isto é reportado por Snyder e Lawson (1993) e pelos dados originais de túnel de vento de Huber e Snyder (1982).

Assim, o modelo PRIME, considera a posição relativa entre a fonte e o obstáculo, a deflexão das linhas de corrente em torno do obstáculo, o arraste vertical e a diminuição de velocidade na subida da pluma, que são fatores importantes na dispersão de poluentes na atmosfera.

O modelo PRIME separa ainda a região estudada em sub-regiões, de acordo com o nível de influência causada pela presença do obstáculo, de forma que cada região definida possui tratamento diferente. Para garantir uma transição suave entre as concentrações estimadas pelo PRIME na esteira e as estimativas do modelo dispersão utilizado fora da região de influência do obstáculo, as concentrações são estimadas como a soma ponderada dos dois cálculos.

$$C_{TOTAL} = \gamma C_{PRIME} + (1 - \gamma) C_{MD} \quad (4-83)$$

onde  $C_{PRIME}$  é a concentração estimada pelo PRIME, enquanto  $C_{MD}$  é a concentração calculada pelo modelo de dispersão desconsiderando a presença do obstáculo. Existe ainda na equação o fator de peso  $\gamma$ , que define a contribuição do PRIME, que decresce exponencialmente com a distância vertical, horizontal, e no sentido do escoamento da região de recirculação. Este fator é dado por:

$$\gamma = \exp\left(\frac{-(x - \sigma_{xg})^2}{2\sigma_{xg}^2}\right) \exp\left(\frac{-(y - \sigma_{yg})^2}{2\sigma_{yg}^2}\right) \exp\left(\frac{-(z - \sigma_{zg})^2}{2\sigma_{zg}^2}\right) \quad (4-84)$$

onde  $x$  é a distância da aresta do obstáculo até o receptor,  $y$  é a distância em relação à linha de centro do receptor,  $z$  é a altura do receptor em relação ao solo,  $\sigma_{xg}$  é a dimensão longitudinal da esteira,  $\sigma_{yg}$  é a distância da linha de centro do obstáculo em relação à aresta lateral da esteira, e  $\sigma_{zg}$  é a altura da esteira em relação ao solo.

O modelo PRIME estima a concentração na região próxima ao prédio através da criação de uma fonte virtual a jusante do prédio, a fim de aprimorar a qualidade da avaliação nesta região. A massa emitida por esta fonte virtual é estimada de acordo com a fração de entrada de massa na região, definida por (SCHULMAN *et al.*, 2000)

$$f_z(x) = erf\left(\frac{H_c(x) - H_p(x)}{\sqrt{2}\sigma_z(x)}\right) \quad (4-85)$$

onde  $H_c$  é a altura da cavidade de recirculação,  $H_p$  é altura da pluma e  $\sigma_z$  é o desvio padrão da distribuição vertical de concentrações referentes.

As concentrações calculadas pelo PRIME para estas regiões estão em função da distância do prédio, de acordo com a posição, somando ou não as contribuições da região próxima e distante do obstáculo, de acordo com o critério:

$$C = C_N \quad (L \leq x \leq L + 0,85L_R) \quad (4-86)$$

$$C = \lambda C_N + (1 - \lambda)C_F \quad (L + 0,85L_R \leq x < L + L_R) \quad (4-87)$$

$$C = C_P - \lambda C_N + (1 - \lambda)C_F \quad (L + L_R \leq x < L + 1,15L_R) \quad (4-88)$$

$$C = C_P + C_F \quad (x \geq L + 1,15L_R) \quad (4-89)$$

onde  $\lambda$  decresce linearmente de  $\lambda = 1$  em  $x = L + 0,85 L_R$  a  $\lambda = 0$  em  $x = L + 1,15 L_R$ , e  $C_N$  é a concentração na região da cavidade,  $C_F$  é a concentração longe da cavidade, e  $C_P$  é a contribuição da porção que não é capturada pela cavidade na concentração. Estas concentrações são dadas por:

$$C_N = \frac{BfQ \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_{yc}}\right)^2\right)}{U_H H_c W'_B} \quad (4-90)$$

$$C_F = \frac{fQ \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right)}{\pi U_s \sigma_{zc} \sigma_{yc}} \quad (4-91)$$

$$C_P = \frac{(1-f)Q \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{H_p}{\sigma_y}\right)^2\right) \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right)}{\pi \sigma_y \sigma_z U_s} \quad (4-92)$$

onde  $B$  é fator empírico de recirculação para a região próxima do obstáculo,  $f$  é fração de massa da pluma capturada pela região de recirculação após o obstáculo,  $Q$  é taxa de emissão,  $y$  é a altura,  $\sigma_{yc}$  é o coeficiente de dispersão horizontal para a cavidade de recirculação,  $\sigma_{zc}$  é o coeficiente de dispersão vertical para a cavidade de recirculação,  $\sigma_y$  é o desvio padrão da distribuição lateral de concentrações,  $\sigma_z$  é o desvio padrão da distribuição vertical de concentrações,  $U_H$  é velocidade do vento na altura do prédio,  $H_c$  é a altura da cavidade de recirculação e  $W'_B$  é a largura do prédio, com valor máximo de  $3H_B$  e valor mínimo de  $H_B/3$ .

#### 4.4 Concentração de curto período

Para obtenção dos picos de concentração de odor devem-se levar em consideração as especificações de cada modelo de dispersão. As adaptações impostas a cada modelo buscam, no geral, a reprodução dos efeitos dos meandros da pluma (flutuações do vento sobre o fluxo médio horário) sobre o espalhamento lateral do gás odorante.

O CALPUFF possui como opção, dois métodos para estimativa das concentrações de pico destinadas às aplicações que avaliam a percepção do odor. Esses dois métodos utilizam um fator de escala descrito por meio de uma adaptação da lei de potência (SMITH, 1973):

$$f(t, t_0) = \left( \frac{t_0}{t} \right)^{0,2} \quad (4-93)$$

onde  $(t)$  é a média de tempo de interesse, e  $(t_0)$  é o tempo médio compatível com os índices de dispersão utilizados para obter as concentrações médias.

O primeiro método utilizado no CALPUFF lida diretamente com os coeficientes de dispersão. Nesse caso, o fator de ajuste é aplicado ao  $\sigma_y$  (coeficiente de dispersão de Pasquill-Gifford/McElroy-Pooler), da seguinte maneira:

$$\sigma_{y(t)} = \sigma_{y(t_0)} \left( \frac{t}{t_0} \right)^{0,2} \quad (4-94)$$

onde,  $\sigma_{y(t)}$ ,  $\sigma_{y(t_0)}$  são os valores de  $\sigma_y$  assumidos para médias de curto e longo período respectivamente. Dessa forma, utilizando um tempo médio de curto período, o  $\sigma_y$  é reduzido, o que aumenta as concentrações da linha central da pluma, e diminui a propagação lateral da pluma.

No segundo método, o fator de escala é aplicado diretamente à concentração média. Este é obtido por meio da aplicação do fator de escala na fase de pós-processamento (CALPOST). Assim, todas as concentrações serão, então, aumentadas para tempos de curto período, na fase final da modelagem.

Já no modelo de dispersão AERMOD não existe nenhum método para a aproximação e conversão de concentrações médias de longo período em concentração de pico de curto período, dessa forma, uma alternativa para a obtenção dos picos de concentração de gases odorantes no AERMOD é aplicar a lei de potência nas concentrações:

$$\frac{C_p}{C_m} = \left( \frac{t_0}{t} \right)^{0,2} \quad (4-95)$$

onde  $C_p$  é o valor de pico da concentração no tempo  $t$ ,  $C_m$  é o valor médio da concentração. Assim, todas as concentrações serão, então, aumentadas para tempos de média de curto período, na fase final da modelagem.

## 5 Metodologia

A metodologia envolve a modelagem matemática da dispersão atmosférica de um composto odorante de dois experimentos realizados em experimentos de túnel de vento, por meio dos modelos gaussianos CALPUFF proposto por Scire *et al.* (1990) e revisado por Scire *et al.* (2000) e o modelo AERMOD proposto originalmente por Lee *et al.* (1996) e revisado por Cimorelli *et al.*, (2005). Dessa forma, o trabalho se desenvolverá da seguinte maneira:

- Inicialmente serão realizadas simulações com os dois modelos selecionados, nas condições do experimento de túnel de vento realizado por Sada e Sato (2002), no qual o obstáculo utilizado é um modelo de prédio com formato cúbico. A partir disso, os valores referentes aos perfis médios de concentração ao redor de um obstáculo cúbico obtidos na modelagem matemática e mensurados na modelagem física serão analisados e comparados.
- Após a fase anterior, serão realizadas outras simulações com os mesmos modelos matemáticos, porém, dessa vez, os dados utilizados para comparação e análise serão provenientes dos experimentos de túnel de vento de Aubrun e Leitzl (2004), no qual o obstáculo utilizado é um modelo de um prédio de criação de animais com geometria complexa. Também nesta fase, será possível uma análise comparativa entre os resultados da modelagem matemática e os dados mensurados na modelagem física, referentes aos valores de concentração média ao redor do obstáculo.

### 5.1 Descrição do experimento de Sada e Sato (2002)

A fim de proceder à validação dos modelos de dispersão AERMOD e CALPUFF (associados ao modelo PRIME) foi utilizado o experimento de túnel de vento realizado por Sada e Sato (2002) que permitiu a comparação entre os resultados das medições de concentração realizadas no túnel de vento e os resultados das concentrações estimadas pelos modelos de dispersão.

No experimento de Sada e Sato (2002), o túnel de vento com superfície plana tinha dimensões 3 m, 1,5 m e 20 m (largura, altura e comprimento), e foi usado um modelo de um prédio com formato cúbico com dimensões de 0,2 m. Uma chaminé com 0,2 m de altura foi colocada de forma perpendicular à seção transversal a uma distância de 0,3 m do centro do prédio cúbico. O gás lançado pela chaminé foi uma mistura de etileno e ar.

Um detector de flutuações de concentração foi utilizado com frequência de 100 Hz, os sinais de concentrações foram coletadas com 0,002 s de duração, e um tempo de média de 40 s foi selecionado. Assim o número total de sinais coletados foi 20 000 em cada ponto de medição. As Figuras 5-1 a 5-3 mostram detalhes da configuração do modelo do prédio e do túnel de vento de Sada e Sato (2002).

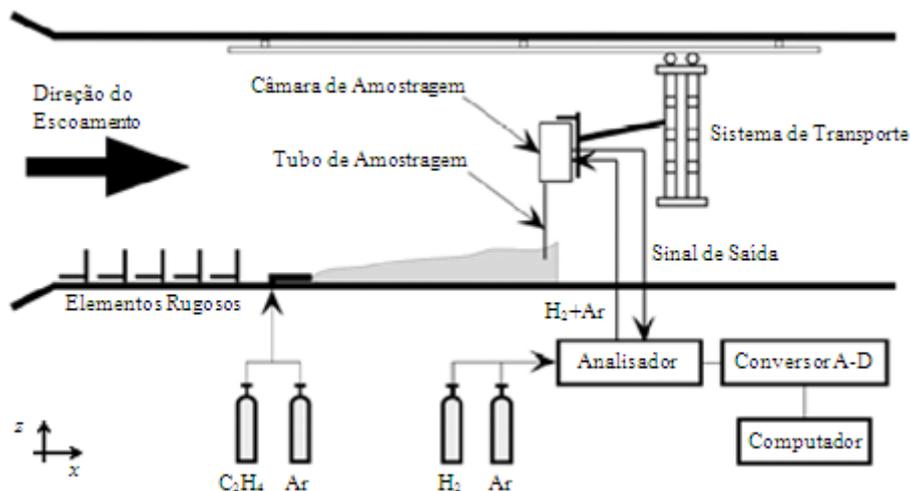


Figura 5-1: Esquema do experimento em túnel de vento (adaptado SADA e SATO, 2002b).

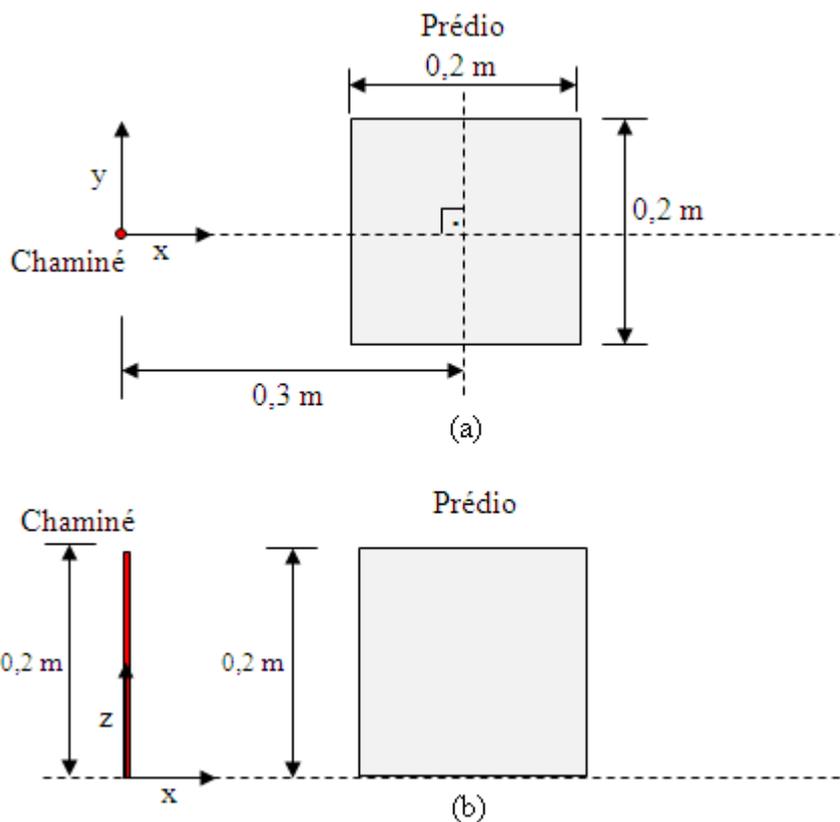


Figura 5-2: Configuração esquemática do experimento realizado por Sada e Sato (2002). a) Vista superior, b) Vista lateral.

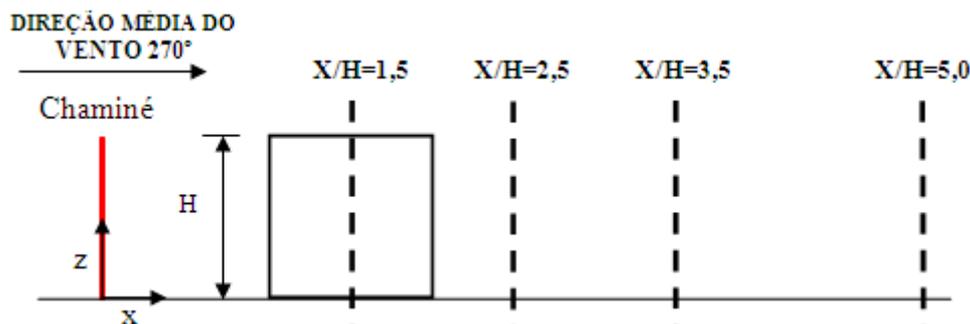


Figura 5-3: Distâncias em termos adimensionais onde os perfis médios de concentração foram mensurados.

## 5.2 Descrição do experimento de Aubrun e Leitl (2004)

Novamente, a fim de proceder à validação dos modelos AERMOD e CALPUFF, serão simulados os experimentos realizados em túnel de vento por Aubrun, Leitl e Schatzmann para o programa “*Compilation of Experimental Data for Validation of Microscale Dispersion Models*” (CEDVAL), da Universidade de Hamburgo (Aubrun e Leitl, 2004). E este experimento tem 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 do experimento estão disponibilizados no site da referida instituição, disponível no endereço <<http://www.mi.uni-hamburg.de/cedval>>.

No experimento de Aubrun e Leitl (2004), o gás lançado pela chaminé foi uma mistura controlada de etano e ar com temperatura ambiente e com velocidade de saída de 3 m/s . A concentração do composto emitido foi medida em 150000 pontos de amostragem, com frequência de 500 Hz, durante 5 minutos. Foram realizadas diversas medições, correspondentes a diferentes direções de incidência do vento.

A seção de testes do túnel de vento possuía 1,5m de largura, 1m de altura e 4m de comprimento. As dimensões do prédio modelado tinham 26,5 mm de altura, 161,5 mm de comprimento e 106,25 mm de largura. A atmosfera modelada apresentava condição de estabilidade neutra e a topografia não foi modelada no experimento. As Figuras 5-4 a 5-7 mostram detalhes da configuração do modelo do prédio e do túnel de vento.



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



Figura 5-5: detalhe do modelo do prédio utilizado nos experimentos em túnel de vento (CEDVAL, 2006).

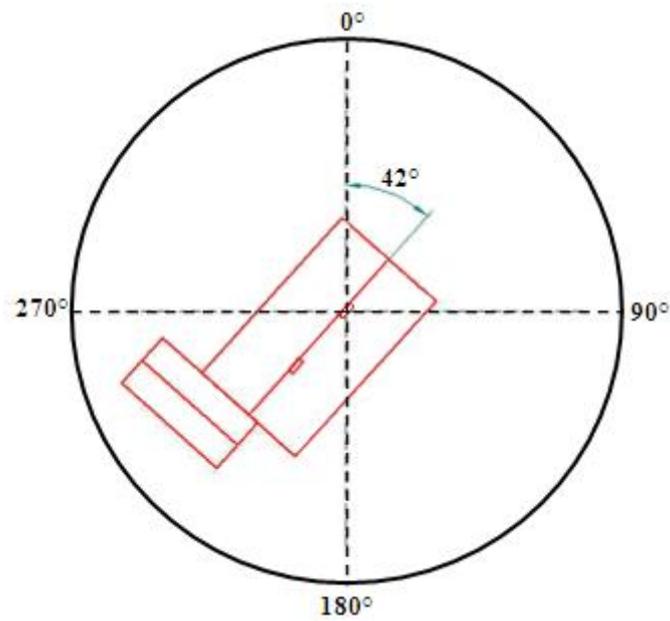


Figura 5-6: esquema do modelo do prédio utilizado no túnel de vento, mostrando a orientação do modelo em relação ao norte (adaptado CEDVAL, 2006).

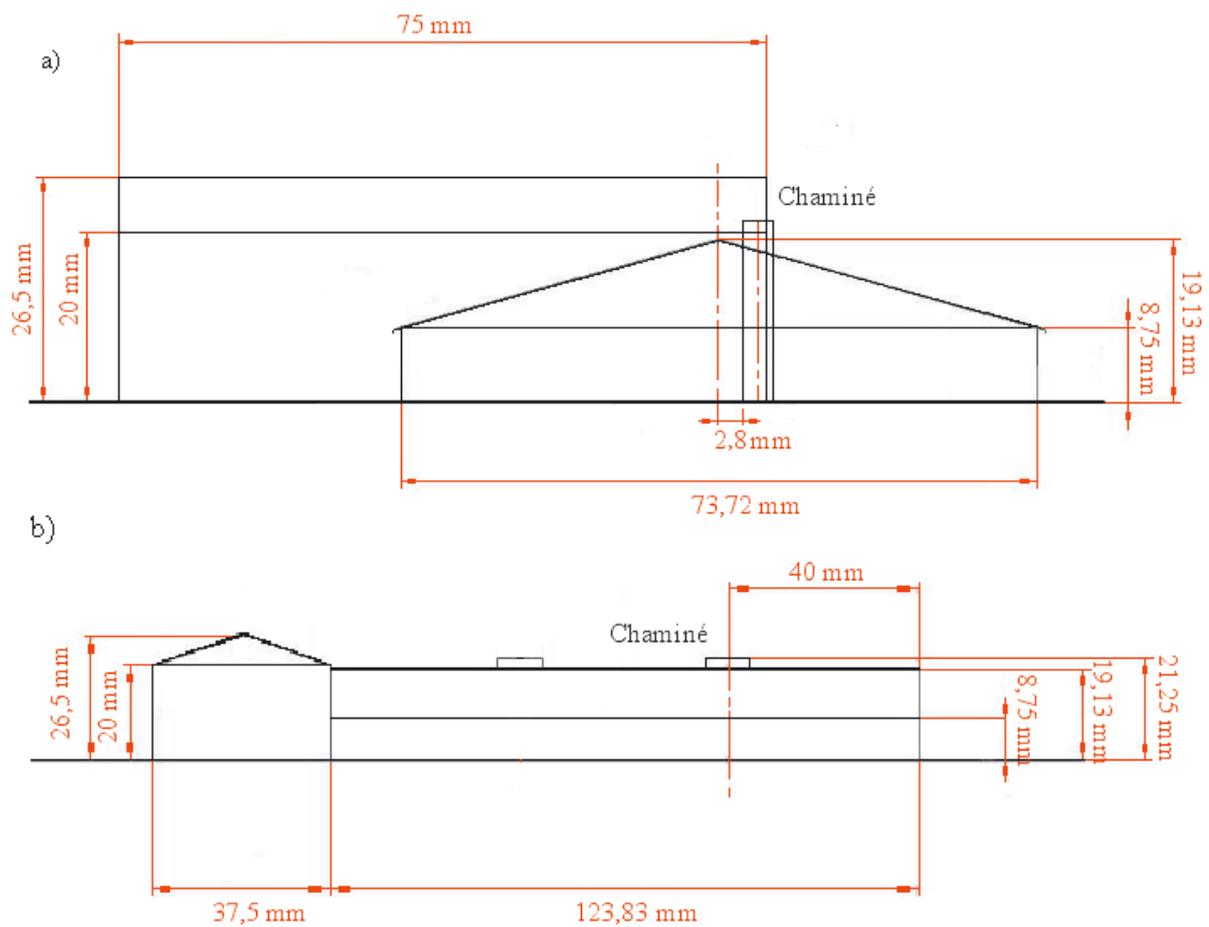


Figura 5-7: dimensões do modelo de prédio utilizado no túnel de vento (mm) (adaptado CEDVAL, 2010). a) visão frontal b) visão lateral.

### 5.3 Similaridade entre os experimentos de Sada e Sato (túnel de vento) e a atmosfera (escala real)

Para a realização das modelagens matemática utilizando modelos algébricos de dispersão como o AERMOD e CALPUFF, foi necessário o conhecimento de informações meteorológicas e geofísicas, que serviram como dados de entrada no processamento meteorológico e estimativa dos parâmetros da camada limite atmosférica.

Então, junto às informações disponibilizadas do experimento realizado por Sada e Sato (2002), foram necessárias algumas considerações, a fim de garantir a similaridade entre os experimentos e a atmosfera (escala real), sendo possível assim, a utilização dos modelos de dispersão.

Inicialmente, utilizando a escala de 1:250 m informada por Sada e Sato (2002), foi realizado a conversão das dimensões referentes configuração esquemática do experimento de túnel, em dimensões representativas na atmosfera (escala real). A Figura 5-8 a seguir mostra a configuração fonte-obstáculo do experimento de túnel de vento de Sada e Sato (2002) em escala real:

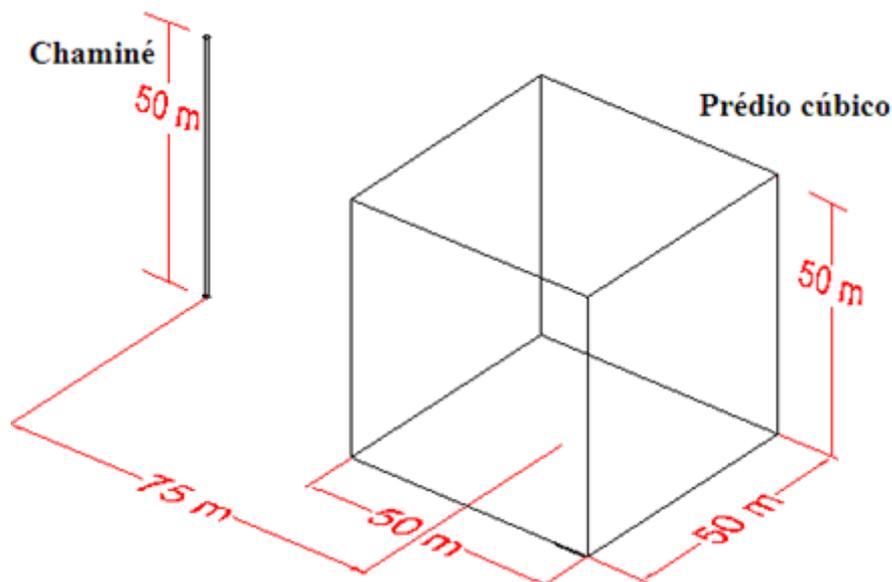


Figura 5-8: Configuração fonte-obstáculo em escala real.

Para garantir a similaridade do escoamento da atmosfera e do túnel de vento, foram mantidos o perfil vertical de velocidade média do vento e o perfil de intensidade de turbulência, em termos adimensionais, normalizados pelos seus respectivos valores na altura de referência  $z_{ref}$ . A Figura 5-9 a seguir mostra o perfil adimensional de velocidade média do vento medidos e o

perfil adimensional de intensidade de turbulência, monitorados no túnel de vento, e também utilizados na modelagem matemática na atmosfera.

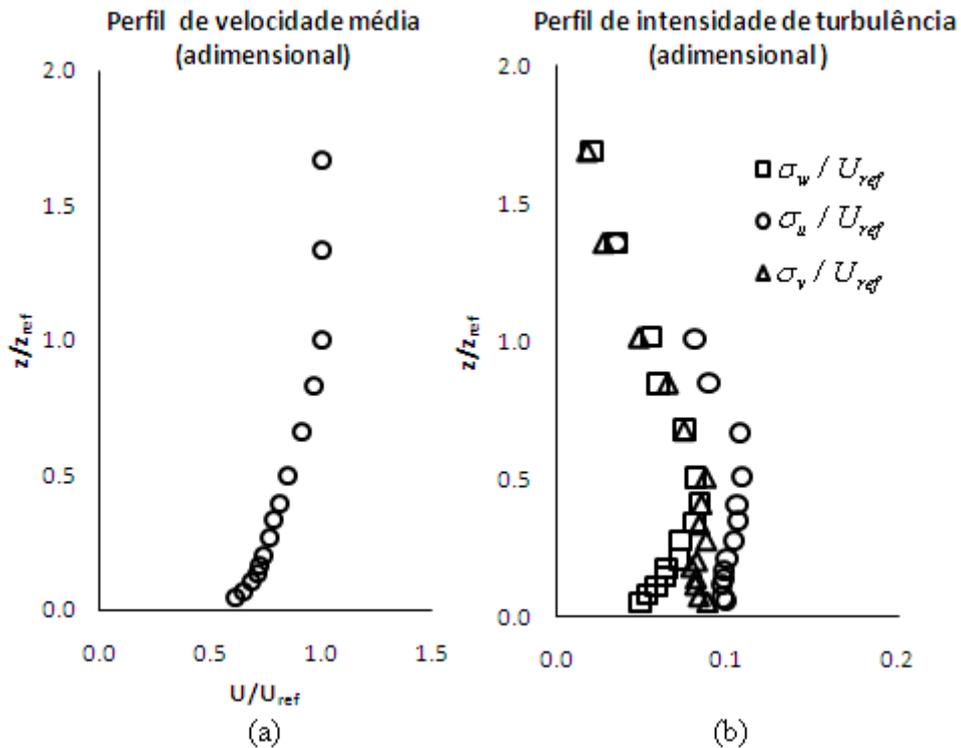


Figura 5-9: a) Perfil adimensional de velocidade do vento na posição da chaminé; b) Perfil de intensidade de turbulência.  $z_{ref}$  é a altura de referência e  $U_{ref}$  é a velocidade de referência.

Partindo do princípio de que o experimento de túnel de vento foi realizado em condições de estabilidade atmosférica, baseado na variação da velocidade em função da altura encontrada no túnel de vento, foi utilizada a seguinte relação logarítmica (STULL, 1988):

$$\frac{\bar{U}}{u_*} = \left(\frac{1}{k}\right) \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (5-1)$$

onde  $\left(\frac{1}{k}\right)$  é uma constante de proporcionalidade, sendo que  $k$  é a constante de Von Karman ( $k = 0,4$ ).

Normalizando os termos da equação (5-1), utilizando uma altura e velocidade característica ( $H_b$  e  $U_{Hb}$ ), temos:

$$\frac{\bar{U} / U_{Hb}}{u_* / U_{Hb}} = \left( \frac{1}{k} \right) \ln \left( \frac{z / H_b}{z_0 / H_b} \right) \quad (5-2)$$

Desse modo, quando foi utilizado o mesmo perfil adimensional de velocidade média do vento e de intensidade de turbulência (Figura 5-9), obteve-se a mesma relação logarítmica (equação 5-2), no experimento de túnel de vento e na atmosfera.

Visando a similaridade entre o experimento de túnel de vento e a atmosfera outro fator analisado foi o número de Reynolds. Quando a escala do experimento de túnel de vento (1:250 metros) foi usada, não foi possível utilizar o mesmo número de Reynolds do experimento, pois os valores de velocidade na atmosfera ficariam extremamente baixos ( $U_{ref} = 0,008$  m/s). Sendo assim, foi necessário adotar a concepção de que o escoamento no túnel de vento é sempre similar à atmosfera quando o número de Reynolds é suficientemente grande (maior que  $3,8 \times 10^4$ ), para garantir independência do número de Reynolds (KATO e HANAFUSA, 1996).

Então, levando em consideração a altura característica  $H_b$  (altura do obstáculo) convertidas em escala reais (1:250 metros) e estabelecendo o perfil vertical de velocidade média a partir da velocidade de referência informada no experimento de Sada e Sato (2002), foi obtido um número de Reynolds igual à  $32,5 \times 10^6$ , além de garantir um valor de velocidade de fricção do próximo do adotado no experimento do túnel de vento.

#### 5.4 Similaridade entre os experimentos de Aubrun e Leitl (túnel de vento) e a atmosfera (escala real)

Novamente, para a realização de modelagens matemáticas utilizando modelos algébricos de dispersão como o AERMOD e CALPUFF, foi necessário o conhecimento de informações meteorológicas e geofísicas, que serviram como dados de entrada no processamento meteorológico e estimação dos parâmetros da camada limite atmosférica.

Dessa forma, junto das informações disponibilizadas do experimento de Aubrun e Leitl (2004), foram realizadas algumas considerações com o objetivo de garantir a similaridade entre a atmosfera e o experimento de túnel de vento.

Para isso, primeiramente, foi empregada a escala de 1:400 informada por Aubrun e Leitl (2004), obtendo novas dimensões do prédio, 10,6 m de altura, 64,5 m de comprimento e 42,5 m de largura. A Figura 5-10 mostra a nova configuração esquemática adotada.

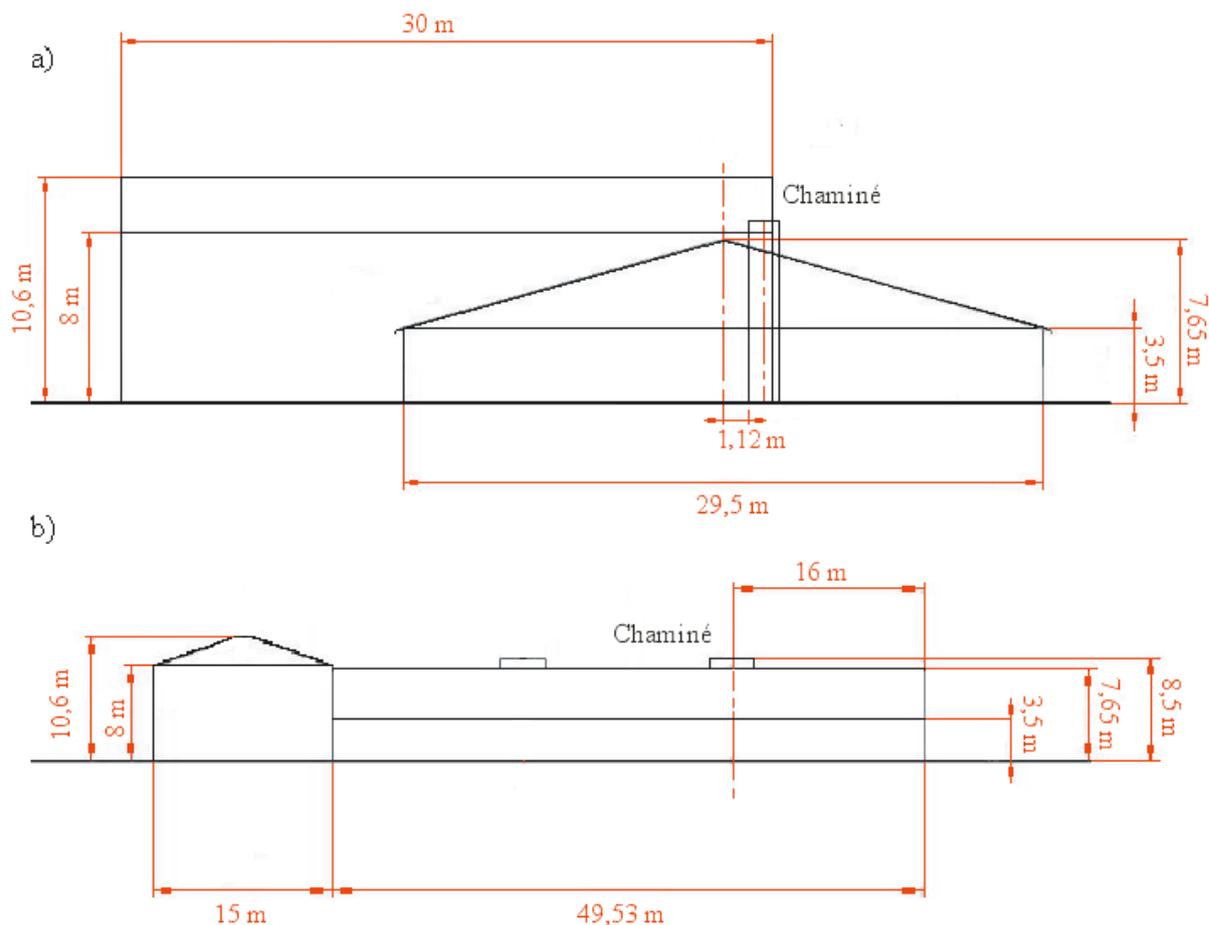


Figura 5-10: dimensões do modelo de prédio utilizado em túnel de vento (escala real, em metros) (adaptado CEDVAL, 2010). a) visão frontal b) visão lateral.

Para garantir a similaridade do escoamento da atmosfera e do túnel de vento, foram mantidos o perfil vertical de velocidade média do vento e o perfil de intensidade de turbulência, em termos adimensionais, normalizados pelos seus respectivos valores na altura de referência  $z_{ref}$ . A Figura 5-11 a seguir mostra o perfil adimensional de velocidade média do vento medidos e o perfil adimensional de intensidade de turbulência, monitorados no túnel de vento, e também utilizados na modelagem matemática na atmosfera.

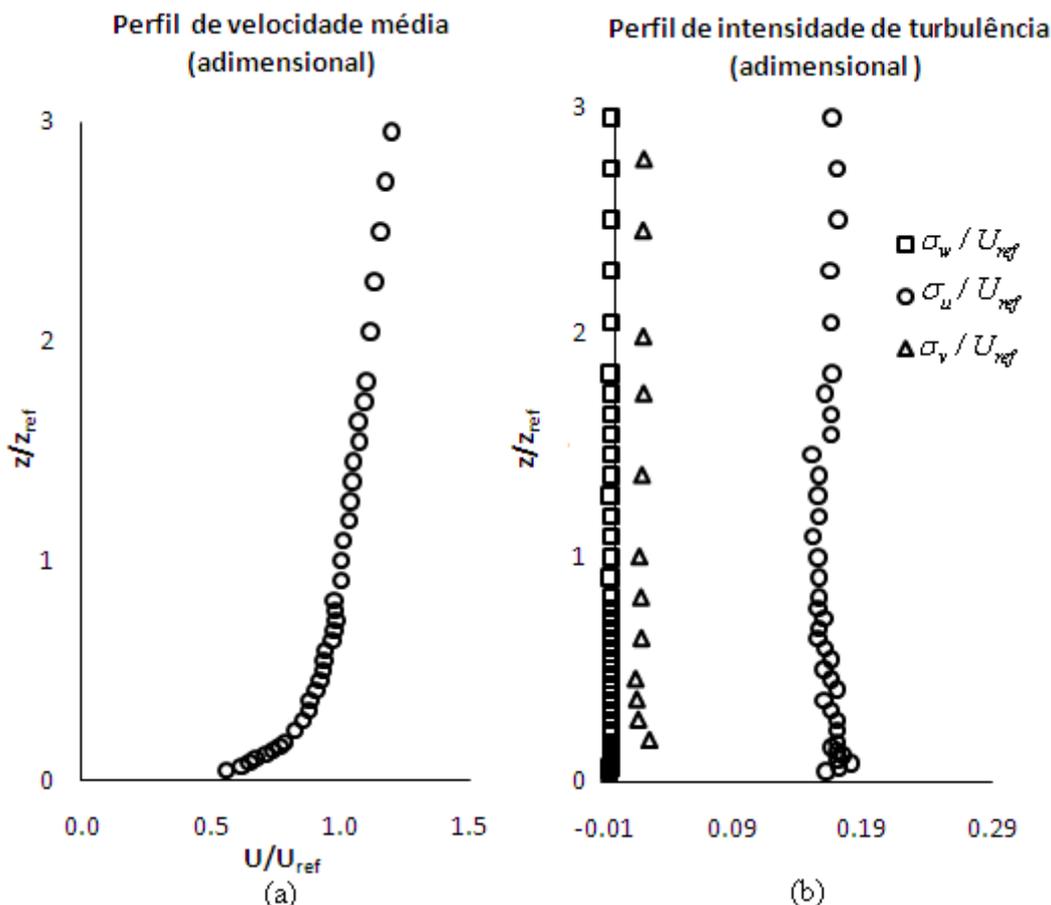


Figura 5-11: a) Perfil adimensional de velocidade do vento; b) Perfil adimensional de intensidade de turbulência.  $z_{ref}$  é a altura de referência e  $U_{ref}$  é a velocidade de referência.

De acordo com Aubrun e Leitl (2004), a condição de estabilidade atmosférica utilizada no experimento de túnel de vento foi a neutra, sendo possível então, a utilização da relação logarítmica (equação 5-1).

Realizando o mesmo procedimento do item 6.3, normalizando os termos da equação (5-1), utilizando uma altura e velocidade característica ( $H_b$  e  $U_{Hb}$ ), obtendo a equação (5-2), foi possível também estabelecer a mesma relação logarítmica com os dados experimentais e com os dados utilizados para a modelagem matemática na atmosfera.

Outro fator também analisado foi o número de Reynolds. Quando a escala do experimento de túnel de vento (1:400 metros) foi usada, não foi possível utilizar o mesmo número de Reynolds do experimento, pois os valores de velocidade na atmosfera ficariam extremamente baixos. Sendo assim, como exemplo no item 5.3, a similaridade entre o escoamento do túnel de vento e da atmosfera foi garantida mantendo o número de Reynolds suficientemente grande (maior que  $3,8 \times 10^4$ ) (KATO e HANAFUSA, 1995).

Dessa forma, levando em consideração a altura característica  $H_b$  (altura do obstáculo) convertidas em escala reais (1:400 metros) e estabelecendo o perfil vertical de velocidade média a partir da velocidade de referência informada no experimento de Aubrun e Leiti (2004), foi obtido um número de Reynolds igual à  $21,4 \times 10^5$ , além de garantir um valor da velocidade de fricção próximo do encontrado no experimento do túnel de vento.

## 5.5 Sistema AERMOD

Para a avaliação do desempenho do AERMOD (associados ao modelo PRIME) foram utilizados o programa principal, o AERMOD, e o pré-processador meteorológico AERMET. Em todas as etapas do sistema AERMOD foram necessárias considerações específicas, a fim de simular ou modelar os experimentos de Sada e Sato (2002) e de Aubrun e Leiti (2004).

### 5.5.1 Processamento AERMET

No AERMET, tanto na modelagem matemática do experimento de Sada e Sato (2002) como na modelagem do experimento de Aubrun e Leiti (2004) foram seguidos os três estágios para o processamento total dos dados meteorológicos, o primeiro estágio que extrai e avalia a qualidade dos dados meteorológicos de altitude e superfície, o segundo que combina os dados disponíveis para um período de 24 horas e armazena-os em um arquivo intermediário e o terceiro estágio que assimila os arquivos de dados e realiza a estimativa dos parâmetros meteorológicos.

No primeiro estágio foram utilizados dados meteorológicos locais de superfície e altitude. Para a escolha dos dados de entrada, no AERMET foi assumido que os experimentos de túnel de vento utilizados foram realizados em condições de estabilidade atmosférica neutra.

A Tabela 5-1 mostra os valores adotados para os dados meteorológicos de superfície necessários à primeira etapa do processamento do AERMET na modelagem matemática do experimento de túnel de vento de Sada e Sato (2002).

Tabela 5-1: Dados meteorológicos de superfície para a modelagem Sada e Sato (2002).

Velocidade de fricção na superfície ( $u_*$ ) (m/s)	Pressão no nível do mar <sup>1</sup> (milibar)	Pressão local <sup>1</sup> (milibar)	Cobertura de nuvens <sup>2</sup> (décimos)
0,05	1013,3	1013,3	10

Base bibliográfica:

1- Arya (1999)

2- Pasquill (1961)

A Tabela 5-2 mostra os valores adotados para os dados meteorológicos de superfície necessários à primeira etapa do processamento do AERMET na modelagem matemática do experimento de túnel de vento de Aubrun e Leitl (2004).

Tabela 5-2: Informações meteorológicas na superfície.

Velocidade de fricção na superfície ( $u_*$ ) (m/s)	Pressão no nível do mar <sup>1</sup> (milibar)	Pressão local <sup>1</sup> (milibar)	Cobertura de nuvens <sup>2</sup> (décimos)
0,182	1013,3	1013,3	10

Base bibliográfica:

1- Arya (1999)

2- Pasquill (1961)

As velocidades de fricção utilizadas no AERMET foram as mesmas obtidas no processamento do CALMET com base no perfil de velocidades de cada experimento de túnel de vento. Os valores adotados para pressão no nível do mar e para a pressão local foi a pressão média ao nível do mar na atmosfera padrão, 1013,3 mb (ARYA,1999). Com o objetivo de garantir atmosfera neutra, com base na tabelas das classes de estabilidade de Pasquill-Tuner (Tabela3-1), a variável cobertura de nuvem apresentou valores máximos, indicando cobertura total de nuvens.

Além dessas variáveis, também são necessários os perfis verticais de variáveis específicas. As tabelas 5-3 e 5-4 mostram estas variáveis para a modelagem dos experimentos de Sada e Sato (2002) e de Aubrun e Leitl (2004), respectivamente:

Tabela 5-3: Perfis verticais de dados meteorológicos para a modelagem de Sada e Sato (2002).

Altitude <sup>1</sup> (m)	Desvio padrão da direção do vento <sup>2</sup> ( $\sigma\theta$ ) (graus)	Desvio padrão da velocidade do vento na vertical <sup>1</sup> ( $\sigma_w$ ) (m/s)	Temperatura (°C)	Direção do vento <sup>1</sup> (graus)	Velocidade do vento <sup>1</sup> (m/s)
3,5	0,1	0.10	25	270	1.22
5,0	0,1	0.11	25	270	1.30
7,7	0,1	0.12	25	270	1.38
10,4	0,1	0.13	25	270	1.43
12,6	0,1	0.13	25	270	1.45
15,0	0,1	0.14	25	270	1.48
20,0	0,1	0.14	25	270	1.53
25,0	0,1	0.16	25	270	1.58
29,7	0,1	0.17	25	270	1.63
37,2	0,1	0.16	25	270	1.70
49,8	0,1	0.15	25	270	1.82
62,6	0,1	0.12	25	270	1.94
75,0	0,0	0.11	25	270	2.00
100,0	0,0	0,07	25	270	2.00
127,5	0,0	0,04	25	270	2.00

Base bibliográfica:

1- Sada e Sato (2002)

2- Slade (1968)

Tabela 5-4: Perfis verticais de dados meteorológicos para a modelagem de Aubrun e Leitl (2004).

Altitude <sup>1</sup> (m)	Desvio padrão da direção do vento <sup>2</sup> ( $\sigma\theta$ ) (graus)	Desvio padrão da velocidade do vento na vertical <sup>1</sup> ( $\sigma_w$ ) (m/s)	Temperatura (°C)	Direção do vento <sup>1</sup> (graus)	Velocidade do vento <sup>1</sup> (m/s)
2,0	0,0	-0,02	25	270	2,04
3,6	0,0	-0,01	25	270	2,36
5,2	0,0	-0,01	25	270	2,58
6,8	0,0	-0,01	25	270	2,79
10,0	0,0	-0,01	25	270	3,00
14,0	0,0	-0,01	25	270	3,20
18,0	0,0	-0,01	25	270	3,30
22,0	0,0	-0,01	25	270	3,40
26,0	0,0	-0,01	25	270	3,43
30,0	0,0	-0,01	25	270	3,56
40,0	0,0	-0,01	25	270	3,66
48,0	0,0	-0,01	25	270	3,68
56,0	0,0	-0,01	25	270	3,79
64,0	0,0	-0,01	25	270	3,83
72,0	0,0	-0,01	25	270	3,89
80,0	0,0	-0,01	25	270	4,02
100,0	0,0	-0,01	25	270	4,12
120,0	0,0	-0,01	25	270	4,29
140,0	0,0	-0,01	25	270	4,46
170,0	0,0	-0,01	25	270	4,71

Base bibliográfica:

1- Aubrun e Leitl (2004)

2- Slade (1968)

As direções do vento adotadas como entradas no modelo para a simulação do experimento de Sada e Sato (2002) assumiram direção oeste (270°), ou seja, perpendicular a uma das faces do obstáculo cúbico. É importante lembrar que na simulação dos experimentos de Aubrun e Leitl (2004) ocorrem quatro situações distintas, com o vento nas direções 40°, 130°, 220° e 310°, porém, assim como no experimento de túnel de vento, ao invés de mudar os valores de direção do vento na entrada do AERMET, foi alterada a posição do obstáculo, representando da mesma forma as quatro diferentes direções do vento em relação às faces do obstáculo de geometria complexa. Os valores de velocidade do vento, a altura e desvio padrão de velocidade do vento na componente vertical também foram obtidos com base nas medições realizadas em ambos os experimentos utilizados no estudo.

Quanto à variável temperatura, assumiu-se temperatura ambiente constante e igual a 25°C em todas as simulações. Os valores dos desvios padrão da direção lateral do vento ( $\sigma_\theta$ ), foram estimados por meio da equação, dada por Slade (1968):

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_v}{\bar{u}} \quad (5-3)$$

onde  $\sigma_v$  é o desvio padrão da velocidade do vento e  $\bar{u}$  é a velocidade média do vento, ambas as variáveis estavam disponíveis para os dois experimentos de túnel de vento investigados.

Após a segunda etapa, responsável pela combinação dos dados, no terceiro e último estágio do AERMET foram informados os dados geofísicos essenciais para o processamento dos parâmetros atmosféricos. As Tabelas 5-5 e 5-6 mostram os dados geofísicos utilizados para a simulação dos experimentos de Sada e Sato (2002) e de Aubrun e Leitl (2004), respectivamente:

Tabela 5-5: Dados geofísicos para a simulação dos experimentos de Sada e Sato (2002)

Comprimento da rugosidade <sup>1</sup> (m)	Albedo	Razão de Bowen
0,035	1	1

Base bibliográfica:

1- Stull (1988)

Tabela 5-6: Dados geofísicos para a simulação dos experimentos de Aubrun e Leitl (2004)

Comprimento da rugosidade <sup>1</sup> (m)	Albedo	Razão de Bowen
0,03131	1	1

Base bibliográfica:

1- Aubrun e Leitl (2004)

Na simulação do experimento de Sada e Sato (2002) com o AERMOD, o valor do comprimento de rugosidade utilizada foi obtido com base no perfil vertical encontrado no túnel de vento por meio do ajuste do perfil logaritmo para atmosfera neutra (Stull, 1988). Já na simulação do experimento de Aubrun e Leitl (2004), o valor do comprimento de rugosidade foi obtida da documentação descritiva do experimento.

No AERMET, com exceção dos parâmetros velocidade de fricção ( $u_*$ ) e comprimento da rugosidade ( $z_0$ ), foram estimados os seguintes parâmetros meteorológicos: comprimento de Monin-Obukhov ( $L$ ), fluxo de calor sensível na superfície ( $H_F$ ), escala de velocidade convectiva ( $w_*$ ) e as alturas da camada de mistura mecânica ( $Z_{im}$ ) e convectiva ( $Z_{ic}$ ), respectivamente. Para definição da estrutura vertical da camada limite atmosférica, foram utilizados os perfis apresentados nas tabelas 5-3 e 5-4.

### 5.5.2 Processamento AERMOD

As simulações foram realizadas de acordo com as características de cada experimento de túnel de vento (em escala real) utilizado no estudo. As tabelas 5-7 e 5-8 mostram as características relacionadas à fonte emissora inseridas nas simulações referentes aos experimentos de Sada e Sato (2002) e de Aubrun e Leitl (2004), respectivamente:

Tabela 5-7: Características relacionadas à fonte, nos experimentos de Sada e Sato (2002).

<b>Tipo de fonte</b>	Emissão (g/s)	Diâmetro (m)	Altura da fonte emissora <sup>1</sup> (m)	Altura da base da fonte emissora <sup>1</sup> (m)	Velocidade de exaustão do gás (m/s)	Temperatura de exaustão do gás (K)
Chaminé (Pontual)	5	1	50	0	1,82	298,1

Base bibliográfica:

1- Sada e Sato (2002)

Tabela 5-8: Características relacionadas à fonte, nos experimentos de Aubrun e Leitl (2004).

<b>Tipo de fonte</b>	Emissão (g/s) <sup>1</sup>	Diâmetro (m) <sup>1</sup>	Altura da fonte emissora <sup>1</sup> (m)	Altura da base da fonte emissora <sup>1</sup> (m)	Velocidade de saída <sup>1</sup> (m/s)	Temperatura de saída <sup>1</sup> (K)
Chaminé (Pontual)	0,006866	1,52	8,5	0	3	298,1

Base bibliográfica:

1- Aubrun e Leitl (2004)

O efeito do obstáculo foi incorporado em todas as simulações, através do modelo PRIME. Foi utilizado o programa BPPRIME, que gera o arquivo BPIP.out para o fornecimento dos dados específicos ao AERMOD e cálculo do modelo PRIME. As informações contidas no arquivo BPIP.out, que foram inseridas no AERMOD para a inclusão do obstáculo na modelagem referente ao experimento de Sada e Sato (2002), estão apresentadas no Apêndice A (Tabela

A-1), e foram baseadas na configuração fonte-obstáculo do experimento em escala real (Figura 5-8).

Na simulação referente ao experimento de túnel de vento de Aubrun e Leitl (2004), a fim de representar o vento nas direções 40°, 130°, 220° e 310°, foi necessário processar o programa BPPRIME, criando um arquivo BPIP.out para cada configuração. Os dados gerados pelo BPPRIME estão apresentadas no Apêndice A (Tabelas A-2 à A-5) e foram baseados na configuração prédio em escala real do experimento de Aubrun e Leitl (2004) (Figura 5-10).

Além dos resultados de concentração destinados à comparação com as concentrações mensuradas em cada experimento de túnel de vento, foi realizado um estudo com o objetivo avaliar os métodos para o cálculo de picos de concentração (concentrações de curto período) (item 4.4). Para isso, foi utilizada a única metodologia possível de ser aplicada nos resultados do AERMOD, a fim de obter de concentrações médias de 3 min, 5 min, 10 min e 30 min. A metodologia usada para o ajuste do tempo de média das concentrações foi a aplicação de um fator de ajuste diretamente nas concentrações médias horárias através da lei de potência 1/5 (equação 4-81).

## 5.6 Sistema CALPUFF

Para a avaliação do desempenho do modelo CALPUFF (associados ao modelo PRIME) na simulação do experimento de Sada e Sato (2002) e de Aubrun e Leitl (2004) foi utilizado o software CALPRO versão 6.0. No estudo, foram utilizados os três principais componentes do sistema CALPUFF: CALMET, CALPUFF, e CALPOST. Em todas as etapas do sistema CALPUFF foram necessárias considerações específicas, a fim de obter as mesmas condições dos experimentos investigados.

### 5.6.1 Processamento CALMET

Nas modelagens meteorológicas com o CALMET, foi necessária a criação dos arquivos de entrada referentes às observações meteorológicas de superfície, de atmosfera superior e dados geofísicos que uma vez processados, fornecem os campos de velocidade, direção do vento, e parâmetros micro-meteorológicos necessários para a execução do modelo CALPUFF.

### 5.6.1.1 Definição do domínio computacional

O domínio computacional no processamento do CALMET foi o mesmo em todas as modelagens referentes aos experimentos de Sada e Sato (2002) e Aubrun e Leitl (2004), sendo definido de maneira a conter a área de influência da fonte e o obstáculo investigado nas simulações.

O espaçamento estipulado para cada célula foi de 10 metros, com um número de 30 células na direção norte-sul e 40 células na direção leste-oeste, formando assim, uma malha de 300x400 metros. Nas Figuras 5-12 a 5-16 é possível verificar a vista superior da malha proposta e a posição dos obstáculos nas simulações dos experimentos de Sada e Sato (2002) e de Aubrun e Leitl (2004):

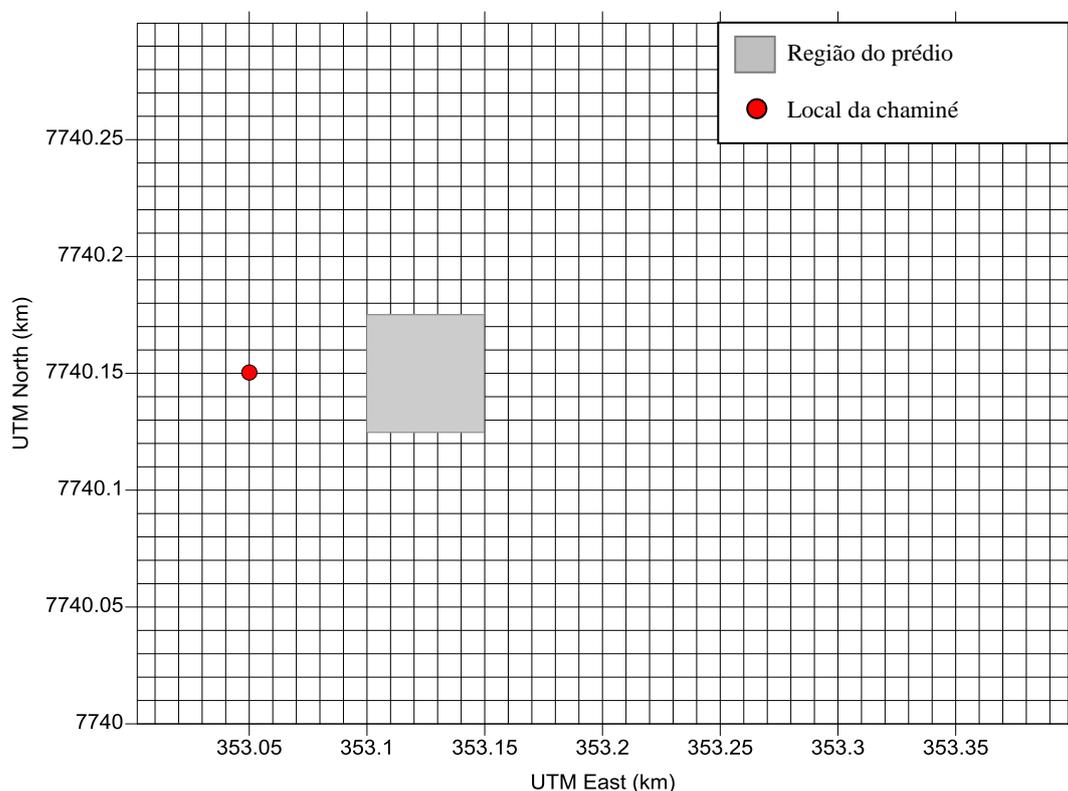


Figura 5-12: Domínio e malha computacional referente a simulação dos experimentos de Sada e Sato (2002).

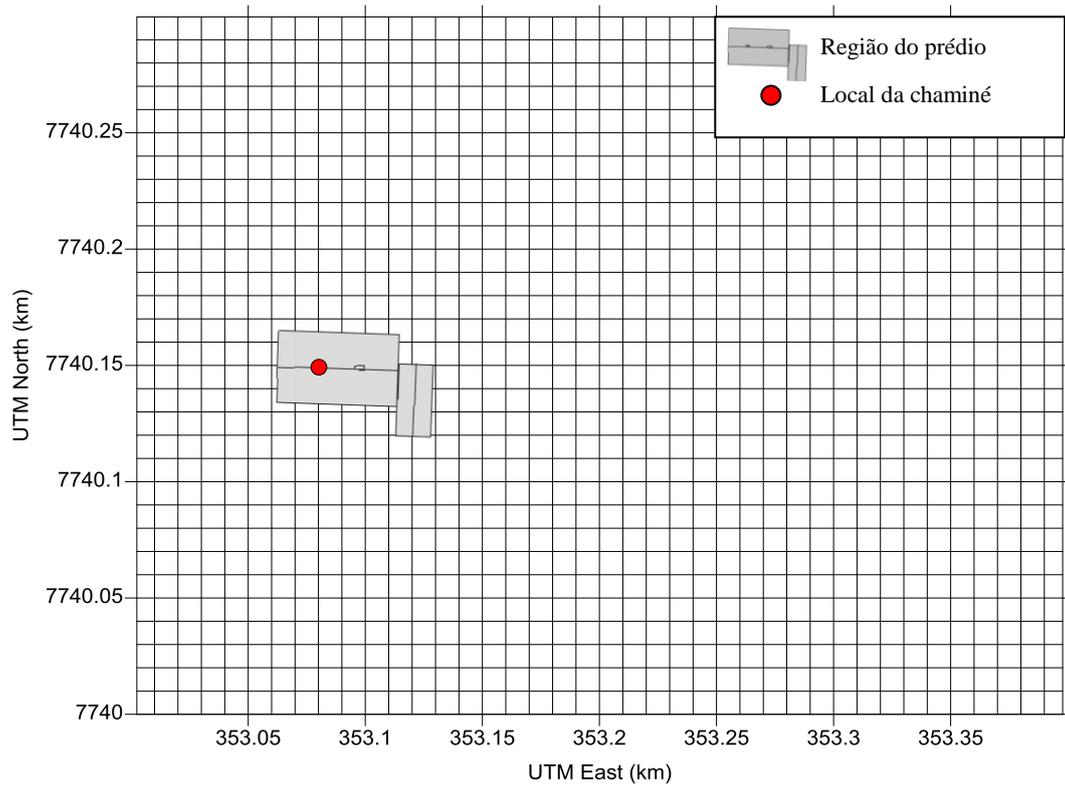


Figura 5-13: Domínio e malha computacional referente a simulação dos experimentos de Aubrun e Leitl (2004). Configuração que representa incidência do vento à  $40^\circ$  na face do prédio.

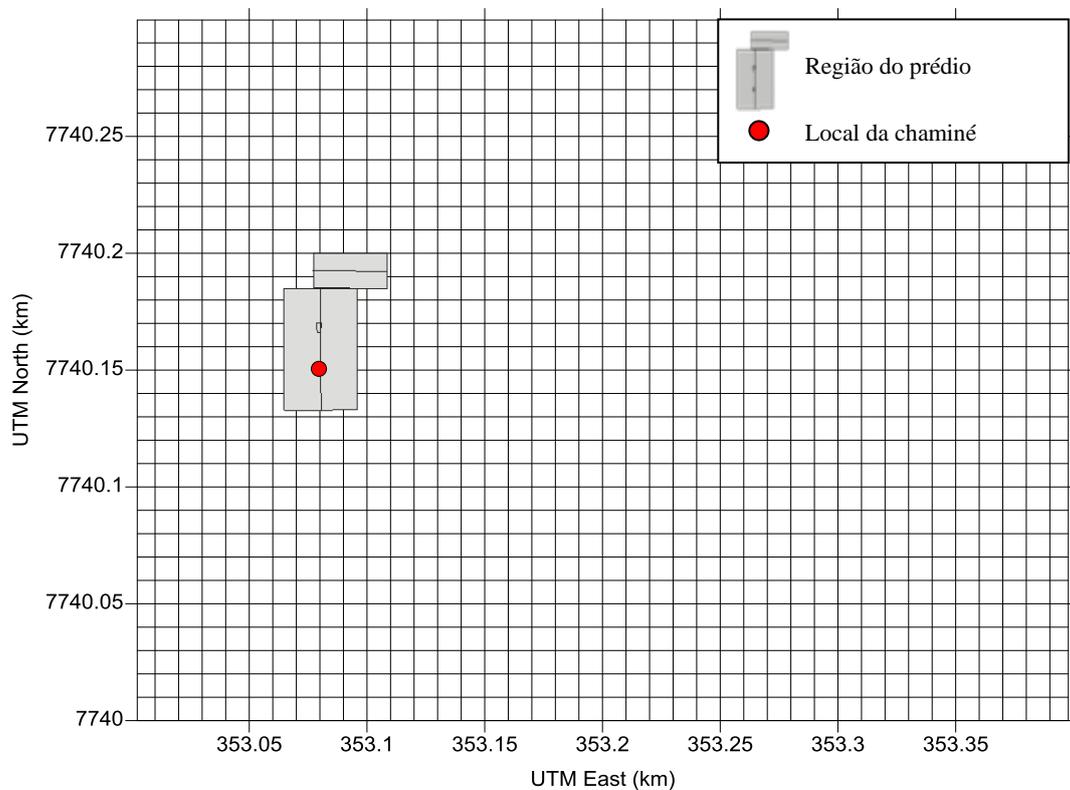


Figura 5-14: Domínio e malha computacional referente a simulação dos experimentos de Aubrun e Leitl (2004). Configuração que representa incidência do vento à  $130^\circ$  na face do prédio.

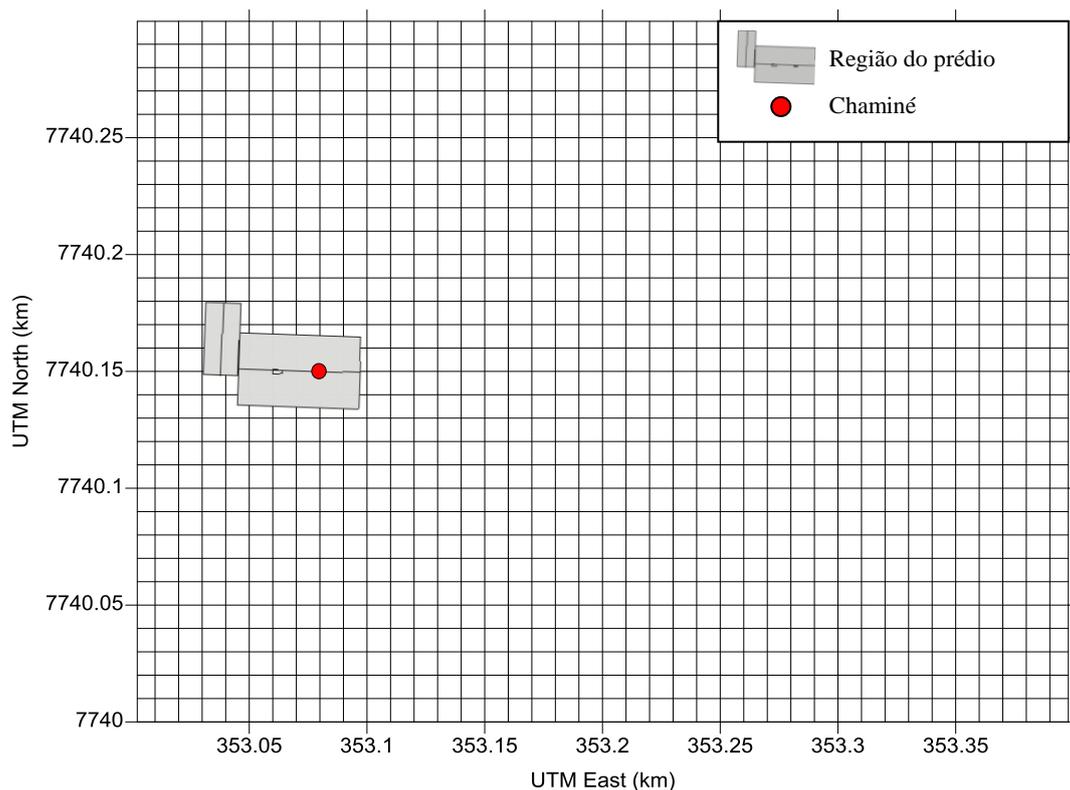


Figura 5-15: Domínio e malha computacional referente a simulação dos experimentos de Aubrun e Leitl (2004). Configuração que representa incidência do vento à  $220^\circ$  na face do prédio.

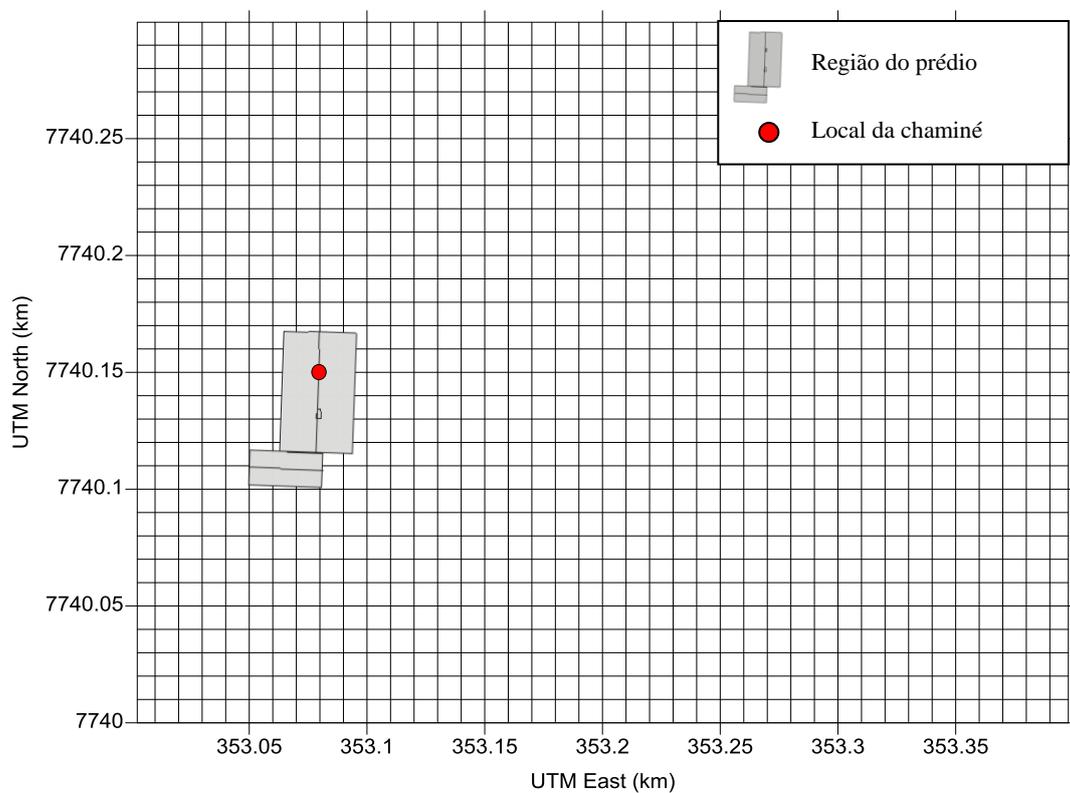


Figura 5-16: Domínio e malha computacional referente a simulação dos experimentos de Aubrun e Leitl (2004). Configuração que representa incidência do vento à  $310^\circ$  na face do prédio.

É importante lembrar que nas simulações referentes ao trabalho de Aubrun e Leiti (2004), foram impostas diferentes posições do obstáculo, visando representar o vento nas direções 40°, 130°, 220° e 310°, visto que em todas as modelagens foi inserido na entrada do modelo direção 270°.

Para a configuração do sistema tridimensional, foram criadas ao todo 12 camadas de células, com as dimensões das malha representadas nas Figuras 5-12 a 5-16, o centro das células foi determinado pela altura da face de cada célula, para a escolha dos valores foi levado em consideração a altura de medição em cada experimento de túnel de vento. As Figuras 5-17 e 5-18 mostram os valores estipulados das alturas das faces e dos centros das células, para formação do domínio computacional.

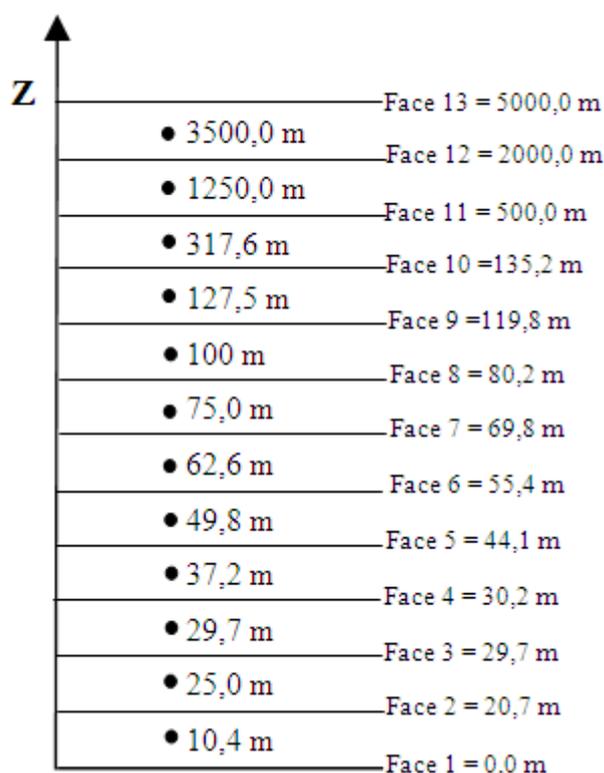


Figura 5-17: Valores das alturas das faces e dos centros das células, utilizado nas modelagens referentes ao experimento Sada e Sato (2002).

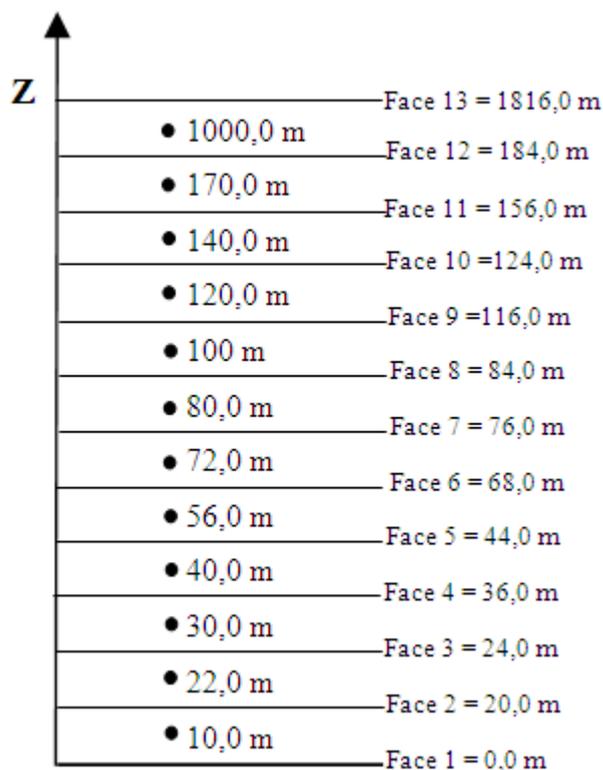


Figura 5-18: Valores das alturas das faces e dos centros das células, utilizados nas modelagens referentes ao experimento Aubrun e Leitl (2004)

#### 5.6.1.2 Dados de entrada no CALMET

Os arquivos referentes aos dados geofísicos e aos dados de superfície e altitude que foram necessários para o processamento do CALMET foram, respectivamente, os arquivos GEO.dat, SURF.dat e UP.dat. Os dados de superfície e altitude foram configurados como provenientes de estações meteorológicas com elevado raio de abrangência, de forma a envolver toda a malha do domínio.

Como relação ao período de modelagem, o CALMET processa apenas dados horários, com isso, as informações contidas nos arquivos de entradas foram suficientes para 1 hora. Após o processamento do modelo meteorológico CALMET, foi obtido o arquivo CALMET.dat que posteriormente foi utilizado no CALPUFF.

Para a inserção das observações meteorológicas de superfície necessárias para o processamento do CALMET foi criado o arquivo SURF.dat, que representa as informações da estação meteorológica de superfície à uma altura de 10,4 m nas simulações do experimento de Sada e Sato (2002) e 10,0 m nas simulações dos do experimento de Aubrun e Leitl (2004). As Tabelas 5-9 e 5-10 mostram as informações do arquivo SURF.dat para ambos os experimentos simulados.

Tabela 5-9: Informações do arquivo SURF.dat utilizado na simulação dos experimentos de Sada e Sato (2002).

Velocidade do vento <sup>1</sup> (m/s)	Direção do vento <sup>1</sup> (graus)	Cobertura de nuvens <sup>3</sup> (décimos)	Temperatura (K)	Pressão <sup>2</sup> (milibar)	Código de Preciptação <sup>1</sup>
1,43	270	10	298,1	1013,3	0

Base bibliográfica:

1- Sada e Sato (2002)

2- Arya (1999)

3- Pasquill(1961)

Tabela 5-10: Informações do arquivo SURF.dat utilizado na simulação dos experimentos de Aubrun e Leitl (2004).

Velocidade do vento <sup>1</sup> (m/s)	Direção do vento <sup>1</sup> (graus)	Cobertura de nuvens <sup>3</sup> (décimos)	Temperatura (K)	Pressão <sup>2</sup> (milibar)	Código de Preciptação <sup>1</sup>
3,0	270	10	298,1	1013,3	0

Base bibliográfica:

1. Aubrun e Leitl (2004)

2. Arya (1999)

3. Pasquill (1961)

O valor adotado para pressão foi a pressão média ao nível do mar na atmosfera padrão, 1013,3 mbar (ARYA,1999). A fim de garantir atmosfera neutra, com base na tabelas das classes de estabilidade de Pasquill-Tuner (Tabela 3-1), a variável cobertura de nuvem foi definida com valores máximos para indicar cobertura total de nuvens.

Os dados meteorológicos de altitude necessários ao CALMET (arquivo UP.dat) foram os perfis verticais de velocidade do vento, direção do vento, temperatura, pressão e altitude. As Tabelas 5-11 e 5-12 mostram as informações inseridas nos arquivos UP.dat para as simulações dos experimentos.

Tabela 5-11: Informações do arquivo UP.dat para as simulações dos experimentos de Sada e Sato (2002).

Pressão <sup>2</sup> (milibar)	Altitude <sup>1</sup> (m)	Temperatura (K)	Direção do vento <sup>1</sup> (graus)	Velocidade do vento <sup>1</sup> (m/s)
1013,3	0,0	298,1	270	0,0
1013,3	10,4	298,1	270	1,4
1013,3	25,0	298,1	270	1,6
1013,3	29,7	298,1	270	1,6
1013,3	37,2	298,1	270	1,7
1013,3	49,8	298,1	270	1,8
1013,3	62,6	298,1	270	1,9
1013,3	75,0	298,1	270	2,0
1013,3	100,0	298,1	270	2,0
1013,3	127,5	298,1	270	2,0
1013,3	317,6	298,1	270	2,0
1013,3	1250,0	298,1	270	2,0
1013,3	3500,0	298,1	270	2,0

Base bibliográfica:

- 1- Sada e Sato (2002)
- 2- Arya (1999)

Tabela 5-12: Informações do arquivo UP.dat para as simulações dos experimentos Aubrun e Leitl (2004)

Pressão <sup>2</sup> (milibar)	Altitude <sup>1</sup> (m)	Temperatura (K)	Direção do vento <sup>1</sup> (graus)	Velocidade do vento <sup>1</sup> (m/s)
1013,3	0,0	298,1	270	0,0
1013,3	10,0	298,1	270	3,0
1013,3	22,0	298,1	270	3,4
1013,3	30,0	298,1	270	3,6
1013,3	40,0	298,1	270	3,7
1013,3	56,0	298,1	270	3,8
1013,3	72,0	298,1	270	3,9
1013,3	80,0	298,1	270	4,0
1013,3	100,0	298,1	270	4,1
1013,3	120,0	298,1	270	4,3
1013,3	140,0	298,1	270	4,5
1013,3	170,0	298,1	270	4,7
1013,3	1000,0	298,1	270	4,7
1013,3	2000,0	298,1	270	4,7

Base bibliográfica:

1. Aubrun e Leitl (2004)
2. Arya (1999)

Partindo do princípio que na seção transversal do experimento de túnel de vento não houve variação significativa da pressão com a altura, os valores no perfil vertical foram os mesmos da superfície, 1013,3 mbar (ARYA,1999). A velocidade, direção do vento, a altura foram inseridos com base nas medições realizadas no experimento de Sada e Sato (2002) e Aubrun e

Leitl (2004). Quanto à variável temperatura, foi adotada a temperatura ambiente constante e igual a 298,1 K (25°C).

O CALMET também requer dados geofísicos, que inclui elevações do terreno e características do solo. As informações foram organizadas de acordo com a malha do domínio computacional demonstrada nas Figuras 5-12 a 5-16. É importante lembrar, que como se trata da simulação dos experimentos de Sada e Sato (2002) e Aubrun e Leitl (2004), todas as informações foram constantes ao longo de toda malha. As Tabelas 5-13 e 5-14 mostram os dados do arquivo GEO.dat para as simulações realizadas.

Tabela 5-13: Informações do arquivo GEO.dat a simulação dos experimentos de Sada e Sato (2002).

Elevação de terreno <sup>1</sup> (m)	Comprimento da rugosidade <sup>2</sup> (m)	Albedo	Razão de Bowen	Fluxo de calor no solo <sup>1</sup> (w/m <sup>2</sup> )	Fluxo de calor antropogênico <sup>1</sup> (w/m <sup>2</sup> )
0,0	0,035	1	1	0	0

Base bibliográfica:

1- Stull (1988)

Tabela 5-14: Informações do arquivo GEO.dat a simulação dos experimentos de Aubrun e Leitl (2004).

Elevação de terreno <sup>1</sup> (m)	Comprimento da rugosidade <sup>2</sup> (m)	Albedo	Razão de Bowen	Fluxo de calor no solo <sup>1</sup> (w/m <sup>2</sup> )	Fluxo de calor antropogênico <sup>1</sup> (w/m <sup>2</sup> )
0,0	0,03131	1	1	0	0

Base bibliográfica:

1. Aubrun e Leitl (2004)

Na simulação do experimento de Sada e Sato (2002), o valor do comprimento de rugosidade utilizada foi obtido com base no perfil vertical encontrado no túnel de vento por meio do ajuste do perfil logaritmo para atmosfera neutra (Stull, 1988). Já na modelagem do experimento Aubrun e Leitl (2004), o valor do comprimento de rugosidade foi retirada da documentação descritiva do experimento, onde o parâmetro é informado. Sabendo que o túnel de vento utilizado no experimento de Sada e Sato (2002) possuía superfície plana, os valores de elevação de terreno (relevo) adotados informados no CALMET foram todos iguais à zero.

Por fim, no módulo micro-meteorológico do CALMET, com exceção apenas do comprimento da rugosidade ( $z_0$ ) (informado no arquivo GEO.dat), foram realizados os cálculos dos parâmetros da camada limite: velocidade de fricção ( $u_*$ ), comprimento de Monin-Obukhov ( $L$ ), fluxo de calor sensível na superfície ( $H_F$ ), escala de velocidade convectiva ( $w_*$ ), e as alturas da camada de mistura mecânica ( $Z_{im}$ ) e convectiva ( $Z_{ic}$ ).

## 5.6.2 Processamento CALPUFF

As informações da fonte emissora foram as mesmas utilizadas na modelagem com o modelo AERMOD (Tabela 5-7 e 5-8).

O efeito de obstáculo também foi incorporado ao problema, assim como no modelo AERMOD, no CALPUFF foi empregado o modelo PRIME. Foi utilizado o programa BPPRIME, que gerou o arquivo BPIP.out, que por sua vez foi inserido no processador CALPUFF para o fornecimento dos dados específicos necessários no cálculo com o modelo PRIME. Esses dados estão apresentados no Apêndice A (Tabelas A-1 à A-5).

Diferente do AERMOD, no modelo CALPUFF, pode-se escolher o método para o cálculo do coeficiente de dispersão. Nessa fase, foi possível inserir os dados de turbulência, como o desvio padrão da velocidade do vento na vertical baseado no experimento de Sada e Sato (2002) e no experimento de Aubrun e Leitl (2004) e o desvio padrão lateral da direção do vento proposto por Slade (1968) calculado para cada modelagem. No modelo AERMOD, essa etapa ocorre na fase do pré-processamento meteorológico (AERMET), onde os dados de turbulência são inseridos. O método para o cálculo dos coeficientes de dispersão foram os mesmos nas modelagens referentes ao trabalho de Sada e Sato (2002) e Aubrun e Leitl (2004) (Figura 5-19).

Figura 5-19: janela de opções de coeficientes de dispersão.

Sendo assim, a inserção dos dados de turbulência obtidos com base nos experimentos de túnel de vento e na literatura científica, foi realizada por meio de um arquivo “profile.dat”. As Tabelas 5-15 e 5-16 mostram as informações do arquivo profile.dat para as simulações dos trabalhos de Sada e Sato (2002) e Aubrun e Leitl (2004), respectivamente.

Tabela 5-15: Informações do arquivo profile.dat na modelagem de Sada e Sato (2002).

Altitude <sup>1</sup> (m)	Direção do vento <sup>1</sup> (graus)	Velocidade do vento <sup>1</sup> (m/s)	Temperatura (K)	Desvio padrão da direção do vento <sup>2</sup> ( $\sigma_\theta$ ) (graus)	Desvio padrão da componente vertical de velocidade do vento <sup>1</sup> ( $\sigma_w$ ) (m/s)
3,5	270	1,22	298,1	0,1	0,10
5,0	270	1,30	298,1	0,1	0,11
7,7	270	1,38	298,1	0,1	0,12
10,4	270	1,43	298,1	0,1	0,13
12,6	270	1,45	298,1	0,1	0,13
15,0	270	1,48	298,1	0,1	0,14
20,0	270	1,53	298,1	0,1	0,14
25,0	270	1,58	298,1	0,1	0,16
29,7	270	1,63	298,1	0,1	0,17
37,2	270	1,70	298,1	0,1	0,16
49,8	270	1,82	298,1	0,1	0,15
62,6	270	1,94	298,1	0,1	0,12
75,0	270	2,00	298,1	0,0	0,11
100,0	270	2,00	298,1	0,0	0,07
127,5	270	2,00	298,1	0,0	0,04
317,6	270	2,00	298,1	0,0	0,04
1250,0	270	2,00	298,1	0,0	0,04
3500,0	270	2,00	298,1	0,0	0,04

Base bibliográfica:

1- Sada e Sato (2002)

2- Slade (1968)

Tabela 5-16: Informações do arquivo profile.dat na modelagem de Aubrun e Leitl (2004).

Altitude <sup>1</sup> (m)	Direção do vento <sup>1</sup> (graus)	Velocidade do vento <sup>1</sup> (m/s)	Temperatura (K)	Desvio padrão da direção do vento <sup>2</sup> ( $\sigma_\theta$ ) (graus)	Desvio padrão da componente vertical de velocidade do vento <sup>1</sup> ( $\sigma_w$ ) (m/s)
2,0	270	2,04	298,1	0,0	-0,02
3,6	270	2,36	298,1	0,0	-0,01
5,2	270	2,58	298,1	0,0	-0,01
6,8	270	2,79	298,1	0,0	-0,01
10,0	270	3,00	298,1	0,0	-0,01
14,0	270	3,20	298,1	0,0	-0,01
18,0	270	3,30	298,1	0,0	-0,01
22,0	270	3,40	298,1	0,0	-0,01
26,0	270	3,43	298,1	0,0	-0,01
30,0	270	3,56	298,1	0,0	-0,01
40,0	270	3,66	298,1	0,0	-0,01
48,0	270	3,68	298,1	0,0	-0,01
56,0	270	3,79	298,1	0,0	-0,01
64,0	270	3,83	298,1	0,0	-0,01
72,0	270	3,89	298,1	0,0	-0,01
80,0	270	4,02	298,1	0,0	-0,01
100,0	270	4,12	298,1	0,0	-0,01
120,0	270	4,29	298,1	0,0	-0,01
140,0	270	4,46	298,1	0,0	-0,01
170,0	270	4,71	298,1	0,0	-0,01
1000,0	270	4,71	298,1	0,0	-0,01
2000,0	270	4,71	298,1	0,0	-0,01

Base bibliográfica:

1- Aubrun e Leitl (2004)

2- Slade (1968)

Após o processamento do CALPUFF para as simulações dos experimentos de Sada e Sato (2002) e Aubrun e Leitl (2004) inserindo os dados de turbulência mostrados anteriormente foram obtido o arquivo “CONC.dat”, que foi encaminhado ao CALPOST para o pós-processamento das concentrações médias horárias correspondentes a cada simulação.

Além dos resultados de concentração destinados à comparação com as concentrações mensuradas em cada experimento de túnel de vento, foi realizado um estudo com o objetivo avaliar os métodos disponíveis no CALPUFF para o cálculo de picos de concentração (concentrações de curto período) (item 4.4). Para isso, duas metodologias foram utilizadas no CALPUFF para a obtenção de concentrações médias de 3 min, 5 min, 10 min e 30 min. Uma metodologia se baseou na aplicação de um fator de ajuste nos coeficientes de dispersão de Pasquill-Gifford baseada na lei de potência 1/5 (equação 4-80) e ocorreu no processador CALPUFF (Figura 5-20 a 5-23). A outra metodologia avaliada para o ajuste do tempo de média das concentrações foi a aplicação do fator de ajuste diretamente nas concentrações médias horárias através da lei de potência 1/5 (equação 4-81) que ocorreu no pós-processador CALPOST (Figura 5-24 a 5-27).

Para a metodologia que aplica a lei da potência nas concentrações foram realizados dois processamentos do CALPUFF: Um processamento utilizando como opção de dispersão os coeficientes de Pasquill-Gifford (Tabelas 4-1 e 4-2), e outro utilizando como opção de dispersão, o cálculo dos coeficientes de dispersão a partir de dados de turbulência, a fim de comparar com os resultados do AERMOD, nos quais também foi utilizado a lei de potência diretamente nas concentrações.

Para a metodologia que aplica o fator de ajuste nos coeficiente de Pasquill-Gifford, o processamento do CALPUFF ocorreu utilizando como opção de dispersão os coeficientes de Pasquill-Gifford (Tabelas 4-1 e 4-2).

Plume Element Modeled as:  Puff  Slug Edit Advanced Variables

Dispersion Option: **PG coef. (Rural, ISC curves) and MP coef. (Urban)** Configure Dispersion

Use PDF Method for Sigma-z in the Convective BL:  No  Yes

Turbulence Data

Measurements Used:

Backup Method:

Profile File:

File Type: **CTDM PLUS** Browse... Default

Adjust PG Dispersion Coefficients

Roughness Adjustment **Averaging Time Adjustment Factor for Sigma-y:  $(t_{ave}/t_{pg})^{0.2}$**

tave: **3** min. tpg: **60** min.

Figura 5-20: janela de opções de dispersão, utilizando os coeficientes de Pasquill-Gifford.

Na figura 5-20 acima é possível observar a escolha dos coeficientes de dispersão de Pasquill-Gifford. Foram obtidas concentrações médias de intervalo de tempo de 3 minutos, por meio do fator de ajuste aplicado nos coeficientes de dispersão.

Plume Element Modeled as:  Puff  Slug Edit Advanced Variables

Dispersion Option: PG coef. (Rural, ISC curves) and MP coef. (Urban) Configure Dispersion

Use PDF Method for Sigma-z in the Convective BL:  No  Yes

Turbulence Data

Measurements Used:

Backup Method:

Profile File:

File Type: CTDm PLUS Browse... Default

Adjust PG Dispersion Coefficients

Roughness Adjustment **Averaging Time Adjustment Factor for Sigma-y:  $(tave/tpg)^{0.2}$**

tave: 5 min. tpg: 60 min.

Figura 5-21: janela de opções de dispersão, utilizando os coeficientes de Pasquill-Gifford

Na figura 5-21 acima é possível observar a escolha dos coeficientes de dispersão de Pasquill-Gifford. Foram obtidas concentrações médias de intervalo de tempo de 5 minutos, por meio do fator de ajuste aplicado nos coeficientes de dispersão.

Plume Element Modeled as:  Puff  Slug Edit Advanced Variables

Dispersion Option: PG coef. (Rural, ISC curves) and MP coef. (Urban) Configure Dispersion

Use PDF Method for Sigma-z in the Convective BL:  No  Yes

Turbulence Data

Measurements Used:

Backup Method:

Profile File:

File Type: CTDm PLUS Browse... Default

Adjust PG Dispersion Coefficients

Roughness Adjustment **Averaging Time Adjustment Factor for Sigma-y:  $(tave/tpg)^{0.2}$**

tave: 10 min. tpg: 60 min.

Figura 5-22: janela de opções de dispersão, utilizando os coeficientes de Pasquill-Gifford

Na figura 5-22 acima é possível observar a escolha dos coeficientes de dispersão de Pasquill-Gifford. Foram obtidas concentrações médias de intervalo de tempo de 10 minutos, por meio do fator de ajuste aplicado nos coeficientes de dispersão.

Plume Element Modeled as:  Puff  Slug Edit Advanced Variables

Dispersion Option: PG coef. (Rural, ISC curves) and MP coef. (Urban) Configure Dispersion

Use PDF Method for Sigma-z in the Convective BL:  No  Yes

Turbulence Data

Measurements Used:

Backup Method:

Profile File:

File Type: CTDM PLUS Browse... Default

Adjust PG Dispersion Coefficients

Roughness Adjustment **Averaging Time Adjustment Factor for Sigma-y: (tave/tpg)\*\*0.2**

tave: 30 min. tpg: 60 min.

Figura 5-23: janela de opções de dispersão, utilizando os coeficientes de Pasquill-Gifford

Na figura 5-23 acima é possível observar a escolha dos coeficientes de dispersão de Pasquill-Gifford. Foram obtidas concentrações médias de intervalo de tempo de 10 minutos, por meio do fator de ajuste aplicado nos coeficientes de dispersão.

Title 1: Concentrações médias de 3 minutos

2:

3:

Run all periods in CALPUFF data file(s) Process every nth period: 1

Processing Period

Starting Time	Year	Month	Day	HH	MM	SS	Base Time Zone
2009	12	31	23	0	0	0	UTC-0300 Eastern S.America
Ending Time	2010	1	1	0	0	0	

-or-

Run Length: 1 Time-Steps Time-Step (sec) 3600 Update Run Length

Note: run for 1 day starts at time 00:00 and ends at 24:00 or at 00:00 of the next day

Source Contributions Receptors:  Gridded  Discrete  Subgrid Complex Terrain Select Gridded Subset Select Discrete Subset

Apply Scaling Method  $X(\text{new}) = X(\text{old}) * 1.8205642 + 0$

Use Hourly Background Concentrations Browse.. Default

Background Data File:

Figura 5-24: janela de opções do processamento CALPOST.

Na figura 5-24 é possível observar a aplicação do fator de ajuste (lei da potência 1/5) diretamente nas concentrações médias horárias para obtenção de concentrações de 3 min.

<b>Title</b>	1: Concentrações médias de 5 minutos
	2:
	3:
<input type="checkbox"/> Run all periods in CALPUFF data file(s) <span style="float: right;">Process every nth period: 1</span>	
<b>Processing Period</b>	
Starting Time:	Year: 2009 Month: 12 Day: 31 HH: 23 MM: 0 SS: 0 Base Time Zone: UTC-0300 Eastern S.America
Ending Time: <input checked="" type="radio"/>	2010 1 1 0 0 0 <input type="button" value="Update Run Length"/>
-or-	
Run Length: <input type="radio"/>	1 <input type="button" value="Time-Steps"/> Time-Step (sec): 3600 <small>Note: run for 1 day starts at time 00:00 and ends at 24:00 or at 00:00 of the next day</small>
<b>Source Contributions</b>	<b>Receptors:</b> <input type="checkbox"/> Gridded <input checked="" type="checkbox"/> Discrete <input type="checkbox"/> Subgrid Complex Terrain <input type="button" value="Select Gridded Subset"/> <input type="button" value="Select Discrete Subset"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Apply Scaling Method	$X(\text{new}) = X(\text{old}) * 1.6437518 + 0$
<input type="checkbox"/> Use Hourly Background Concentrations	<input type="button" value="Browse.."/> <input type="button" value="Default"/>
Background Data File :	

Figura 5-25: janela de opções do processamento CALPOST.

Na figura 5-25 é possível observar a aplicação do fator de ajuste (lei da potência 1/5) diretamente nas concentrações médias horárias para obtenção de concentrações de 5 min.

<b>Title</b>	1: Concentrações médias de 10 minutos
	2:
	3:
<input type="checkbox"/> Run all periods in CALPUFF data file(s) <span style="float: right;">Process every nth period: 1</span>	
<b>Processing Period</b>	
Starting Time:	Year: 2009 Month: 12 Day: 31 HH: 23 MM: 0 SS: 0 Base Time Zone: UTC-0300 Eastern S.America
Ending Time: <input checked="" type="radio"/>	2010 1 1 0 0 0 <input type="button" value="Update Run Length"/>
-or-	
Run Length: <input type="radio"/>	1 <input type="button" value="Time-Steps"/> Time-Step (sec): 3600 <small>Note: run for 1 day starts at time 00:00 and ends at 24:00 or at 00:00 of the next day</small>
<b>Source Contributions</b>	<b>Receptors:</b> <input type="checkbox"/> Gridded <input checked="" type="checkbox"/> Discrete <input type="checkbox"/> Subgrid Complex Terrain <input type="button" value="Select Gridded Subset"/> <input type="button" value="Select Discrete Subset"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Apply Scaling Method	$X(\text{new}) = X(\text{old}) * 1.4309690 + 0$
<input type="checkbox"/> Use Hourly Background Concentrations	<input type="button" value="Browse.."/> <input type="button" value="Default"/>
Background Data File :	

Figura 5-26: janela de opções do processamento CALPOST.

Na figura 5-26 é possível observar a aplicação do fator de ajuste (lei da potência 1/5) diretamente nas concentrações médias horárias para obtenção de concentrações de 10 min.

<b>Title</b>	1: Concentrações médias de 30 minutos
	2: <input type="text"/>
	3: <input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Run all periods in CALPUFF data file(s) <span style="float: right;">Process every nth period: <input type="text" value="1"/></span>	
<b>Processing Period</b>	
Starting Time:	Year: 2009 Month: 12 Day: 31 HH: 23 MM: 0 SS: 0 Base Time Zone: UTC-0300 Eastern S.America
Ending Time: <input type="radio"/>	2010 1 1 0 0 0 <input type="button" value="Update Run Length"/>
-or-	
Run Length: <input type="text" value="1"/>	<input type="button" value="Time-Steps"/> Time-Step (sec): 3600 <small>Note: run for 1 day starts at time 00:00 and ends at 24:00 or at 00:00 of the next day</small>
<b>Source Contributions</b>	<b>Receptors:</b> <input type="checkbox"/> Gridded <input checked="" type="checkbox"/> Discrete <input type="checkbox"/> Subgrid Complex Terrain <input type="button" value="Select Gridded Subset"/> <input type="button" value="Select Discrete Subset"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Apply Scaling Method	$X(\text{new}) = X(\text{old}) * 1.1486983 + 0$
<input type="checkbox"/> Use Hourly Background Concentrations	<input type="button" value="Browse.."/> <input type="button" value="Default"/>
Background Data File :	<input type="text"/>

Figura 5-27: janela de opções do processamento CALPOST.

Na figura 5-27 é possível observar a aplicação do fator de ajuste (lei da potência 1/5) diretamente nas concentrações médias horárias para obtenção de concentrações de 30 min.

## 6 Resultados

Para avaliação e comparação dos modelos investigados, foram simulados matematicamente os experimentos de túnel de vento realizados por Sada e Sato (2002) e Aubrun e Leitl (2004).

Nas simulações, as concentrações obtidas pelos modelos de dispersão foram adimensionalizadas para comparação com as concentrações fornecidas pelos experimentos de túnel de vento. A adimensionalização adotada foi baseada na relação proposta por Mavroidis *et al.* (2003):

$$Kc = \frac{CUH^2}{Q} \quad (6-1)$$

onde  $C$  é a concentração ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  $Q$  é a taxa de emissão ( $\mu\text{g}/\text{s}$ ), e  $U$  é a velocidade média (m/s) na altura  $H$  (m), que corresponde à altura do obstáculo utilizado no estudo.

Em ambas as simulações o ponto referencial (origem) para análise dos resultados está localizado em cima da chaminé. Entretanto, a posição da chaminé depende de cada experimento simulado. Nas simulações referentes aos experimentos de Sada e Sato (2002), a chaminé está localizada a uma distância de  $1,5 H$  à montante do centro do obstáculo cúbico, e nas simulações dos experimentos de Aubrun e Leitl a chaminé está localizada em cima do obstáculo de geometria complexa.

### 6.1 Avaliação do desempenho dos modelos CALPUFF e AERMOD considerando os experimentos de Sada e Sato (2002).

Nas simulações dos experimentos de Sada e Sato (2002) comprimento da cavidade recirculação do vento, medido da face sotavento do edifício, foi calculado com uso da fórmula de Fackrell (1984) (Equação 4-39) utilizada no algoritmo PRIME (SCHULMAN *et al.*, 2000). O valor encontrado foi de 1,5H. Enquanto no experimento de túnel de vento de Sada e Sato (2002) o comprimento da cavidade da recirculação observada foi de 1,2H.

A Figura 6-1 mostra os perfis de concentração ao redor de um obstáculo cúbico em quatro regiões:  $X/H=1,5$ ,  $X/H=2,5$ ,  $X/H=3,5$  e  $X/H=5$ , onde H é a altura do prédio, x é a distância entre a região do perfil de concentração e a chaminé que está localizada a uma distância de 1,5 H à montante do centro do obstáculo. Os resultados de ambos os modelos são apresentados juntamente com os dados experimentais, para fins de comparação. Ambos os modelos subestimam as concentrações em todas as regiões de interesse, apesar de apresentarem coerência na posição da linha central da pluma.

As diferenças mais significativas entre os modelos AERMOD e CALPUFF aparecem na região acima do obstáculo ( $X/H=1,5$ ), na qual o modelo AERMOD estima concentrações maiores que as obtidas pelo CALPUFF. Nessa região, o modelo CALPUFF subestimou as concentrações em relação aos dados do túnel de vento em toda a extensão da pluma, enquanto o modelo AERMOD apresentou valores bem próximos das medições de túnel de vento, subestimando apenas na linha central da pluma.

Na região do perfil de concentração mais próximo a jusante do obstáculo ( $X/H=2,5$ ) que fica dentro da região de recirculação das simulações e do túnel de vento, ainda permanecem grandes diferenças entre os resultados dos modelos CALPUFF e AERMOD em alturas maiores que 1H e menores que 1,5H, porém para alturas menores que 1H e maiores que 1,5 H, ou seja, fora da região central da pluma, os resultados de concentração obtidos entre os modelos são bem semelhantes.

Nas regiões mais afastadas à jusante do obstáculo ( $X/H=3,5$  e  $X/H=5$ ), as diferenças entre os resultados dos modelos CALPUFF e AERMOD diminuem na linha central da pluma, evidenciando dessa maneira, semelhança entre os resultados dos modelos em toda extensão da pluma.

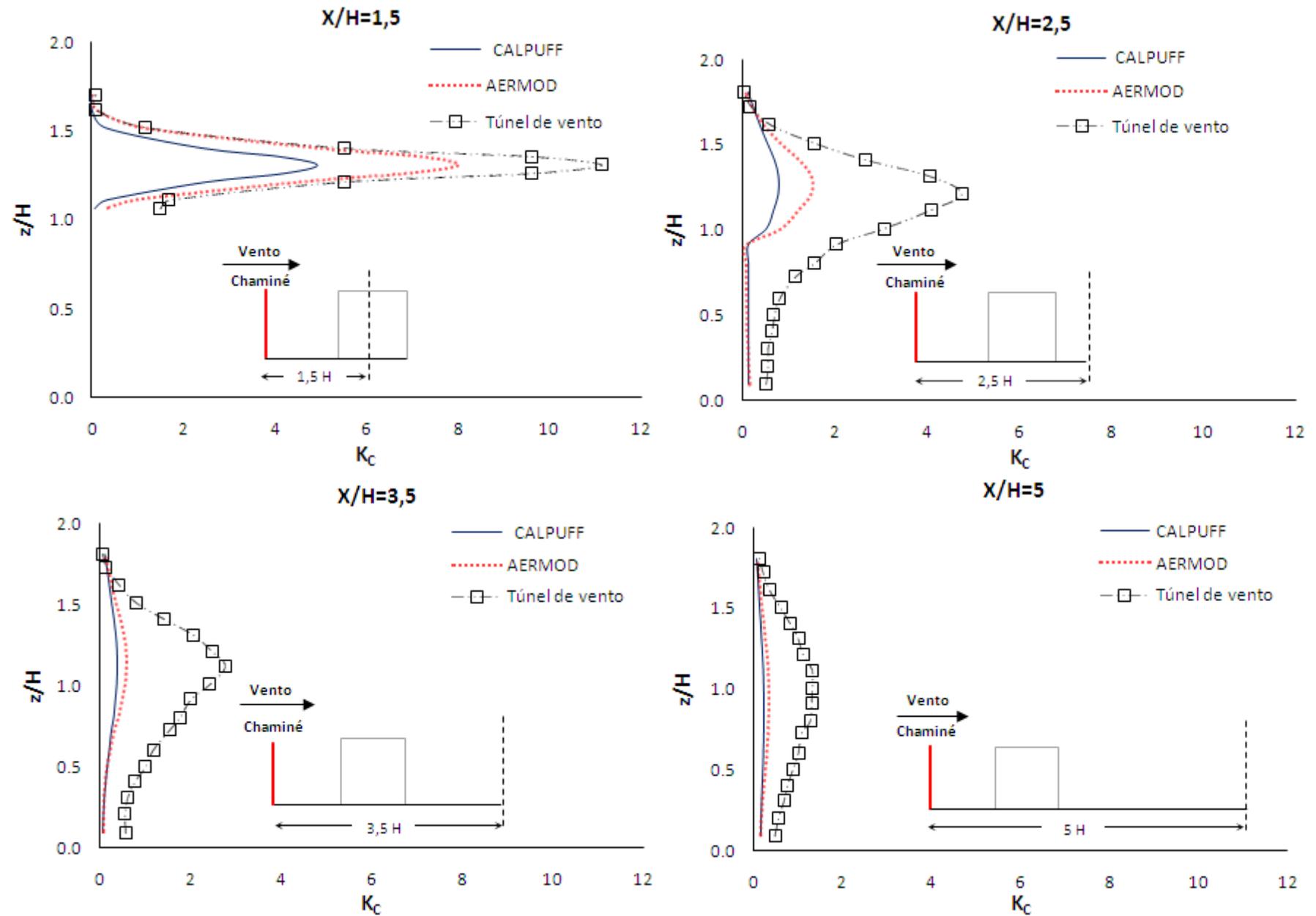


Figura 6-1: Perfil vertical de concentração média adimensionalizada, comparando os dados do túnel de vento com os resultados dos modelos.

Os gráficos dos perfis verticais de concentração apresentados na Figura 6-1 e os gráficos de correlação apresentados nas Figuras 6-2 e 6-3 mostram que ambos os modelos apresentam melhores resultados em cima do obstáculo ( $X/H=1,5$ ), com uma análise de regressão linear ( $K_{C(CALPUFF)}=0,43 \times K_{C(\text{Túnel de vento})}$ ) para o modelo CALPUFF e ( $K_{C(AERMOD)}=0,75 \times K_{C(\text{Túnel de vento})}$ ) para o modelo AERMOD, o que também confirma o comentário anterior referente aos perfis de concentração, no qual é mencionado a superioridade do modelo AERMOD nessa região ( $X/H=1,5$ ).

Nos locais à jusante do obstáculo, o modelo AERMOD apresentou melhor desempenho ( $K_{C(AERMOD)}=0,32 \times K_{C(\text{Túnel de vento})}$ ) na cavidade de recirculação ( $X/H=2,5$ ) em relação aos perfis de concentração estimados em locais mais afastadas, que apresentaram uma análise de regressão de  $K_{C(AERMOD)}=0,24 \times K_{C(\text{Túnel de vento})}$  em  $X/H=3,5$  e  $K_{C(AERMOD)}=0,28 \times K_{C(\text{Túnel de vento})}$  em  $X/H=5$ . Já o modelo CALPUFF obteve uma pequena melhora nos resultados em regiões mais afastadas ( $X/H=5$ ) apresentando uma análise linear de ( $K_{C(CALPUFF)}=0,20 \times K_{C(\text{Túnel de vento})}$ ).

Dessa maneira, é possível concluir que ambos os modelos AERMOD e CALPUFF tendem a subestimar os valores de concentração em regiões à jusante do obstáculo, quando a chaminé possui a mesma altura do obstáculo e está a montante do mesmo. Além disso, também é possível inferir nesse caso que para as concentrações localizadas próxima a linha central da pluma o modelo AERMOD tende superestimar as concentrações em relação aos resultados do modelo CALPUFF em regiões sob a influência de obstáculos.

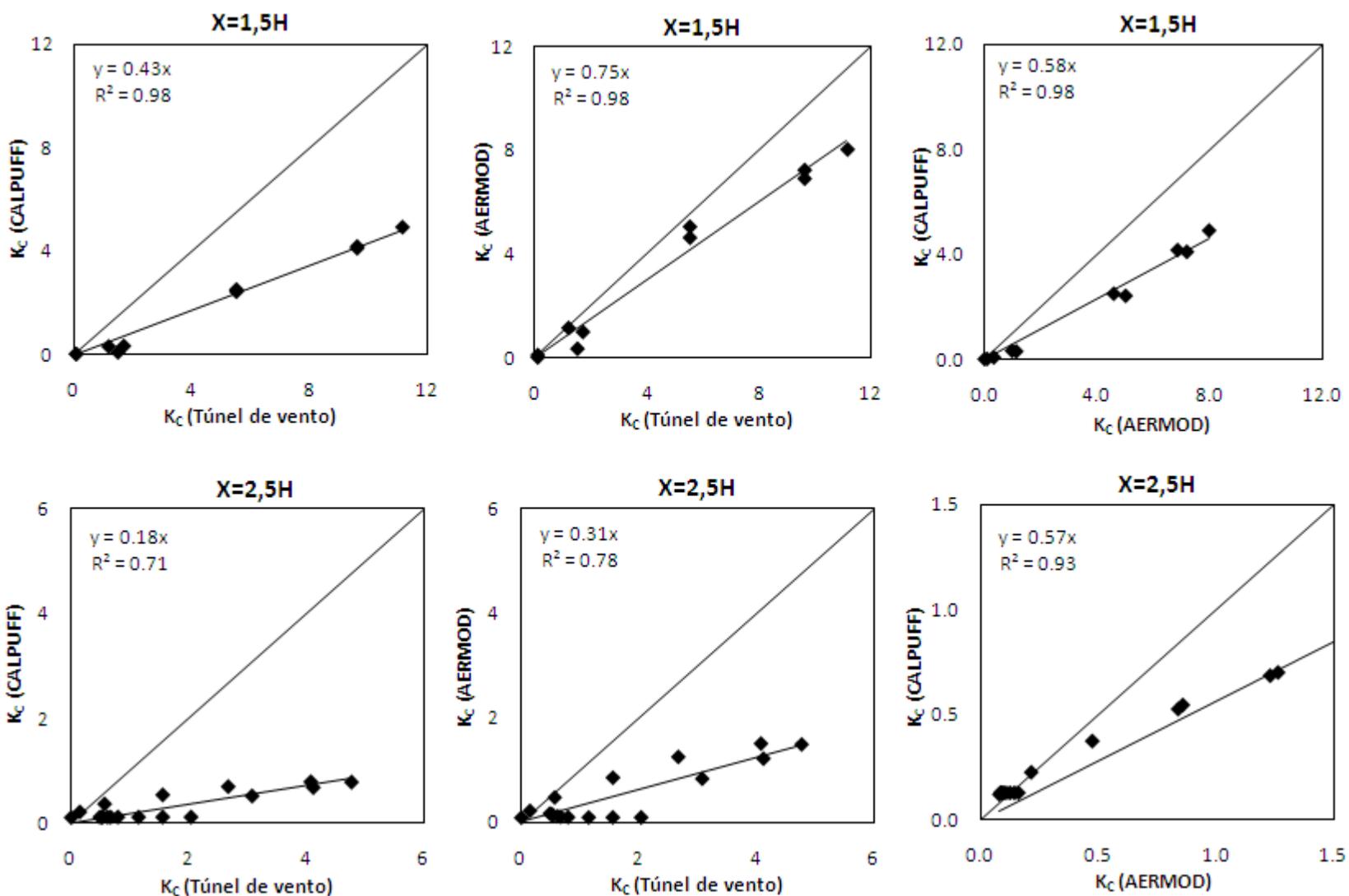


Figura 6-2: Correlação entre os dados de túnel de vento e os resultados dos modelos nas distâncias  $X/H=1,5$  e  $X/H=2,5$

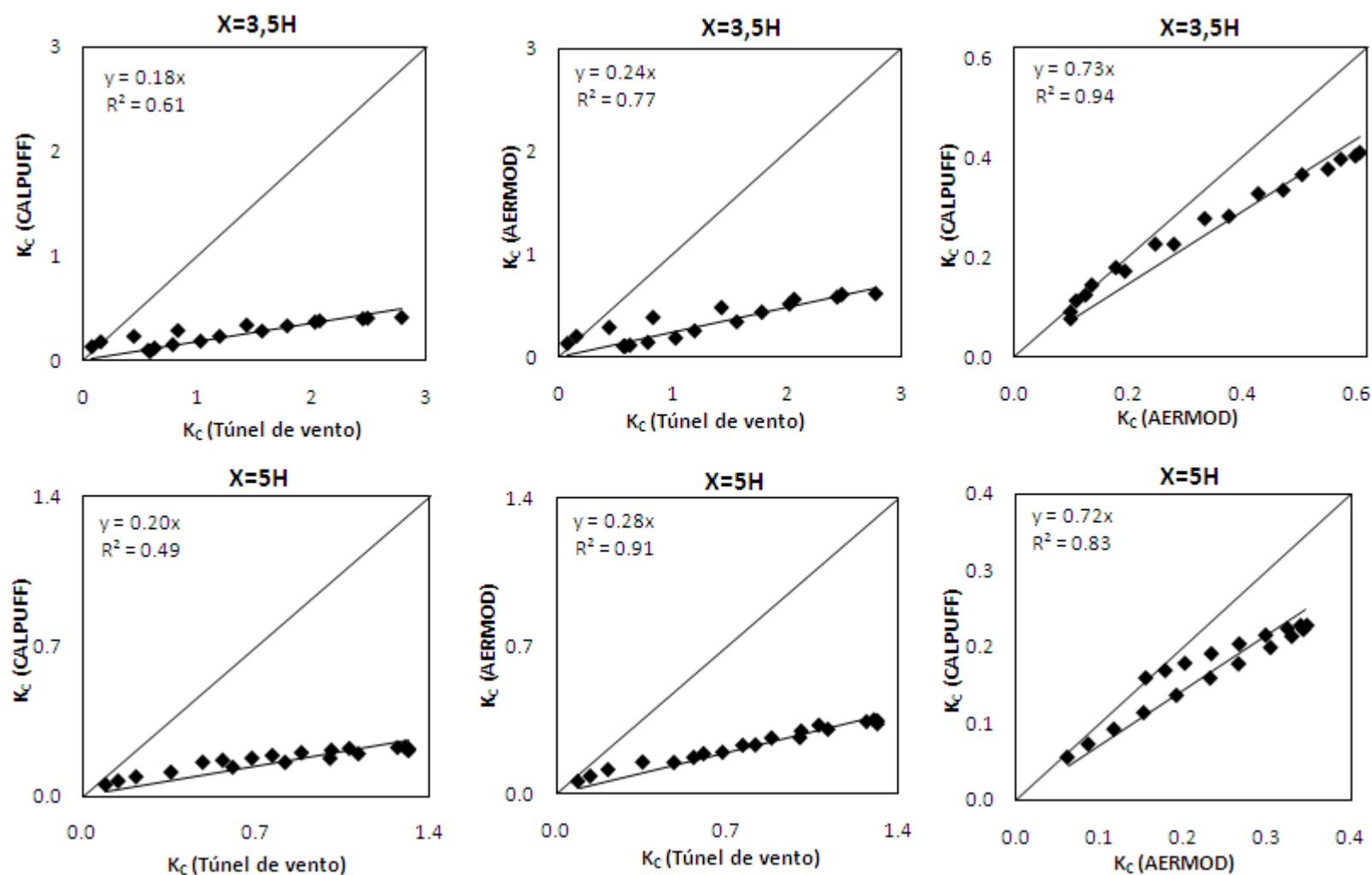


Figura 6-3: Correlação entre os dados de túnel de vento e os resultados dos modelos nas distâncias  $X/H=3,5$  e  $X/H=5$

## 6.2 Avaliação do desempenho dos modelos CALPUFF e AERMOD considerando os experimentos de Aubrun e Leitl (2004).

Na modelagem matemática correspondente ao experimento de túnel de vento de Aubrun e Leitl (2004), os resultados foram relativos às concentrações médias ao redor de um obstáculo com geometria complexa, em quatro situações, nas quais o vento incide em regiões diferentes no obstáculo, ou seja, as simulações foram realizadas com direção do vento à  $40^\circ$ ,  $130^\circ$ ,  $220^\circ$ , e à  $310^\circ$ .

A Figura 6-4 mostra a distribuição da concentração longitudinal após o obstáculo ao longo de do vento em  $Y/H=0$  ( $H$  é a altura aproximada do obstáculo com geometria complexa) para as quatro direções do vento. Os resultados de ambos os modelos são apresentados juntamente com os dados experimentais, para fins de comparação. Ambos os modelos AERMOD e CALPUFF estimam as concentrações médias mais a jusante do prédio de forma adequada, onde eles fornecem resultados muito semelhantes. A única exceção é o resultado do modelo AERMOD para a direção do vento  $220^\circ$ , que superestima as concentração por um fator de aproximadamente 2. No entanto, perto do obstáculo ( $X/H=5$ ) os dois modelos parecem superestimar as concentrações para a direção do vento  $40^\circ$  e subestima as concentrações para as outras três direções do vento.

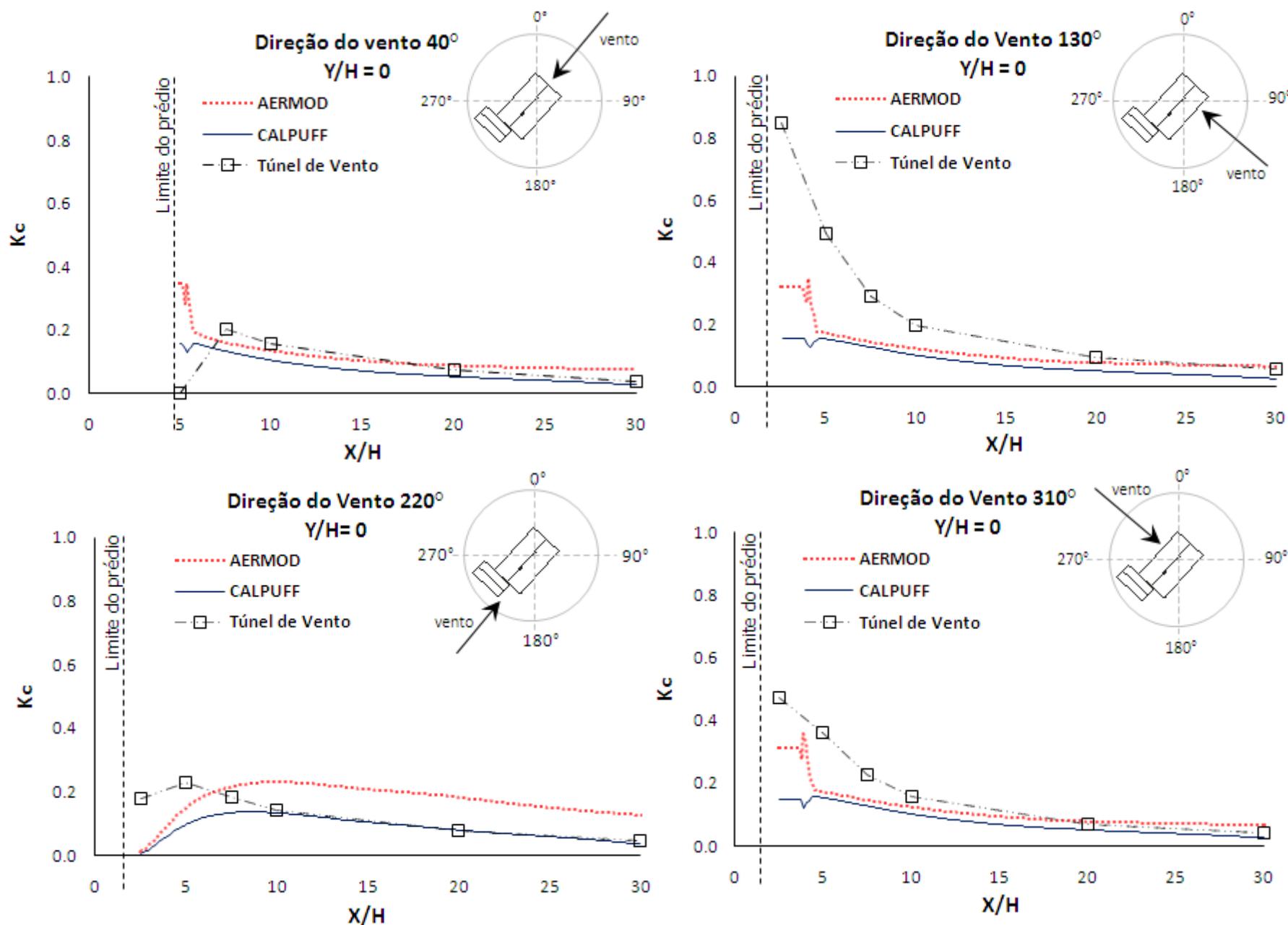


Figura 6-4: Perfil horizontal de concentração média adimensional, comparando os dados do túnel de vento com os resultados dos modelos

Os perfis de concentração lateral para três distâncias longitudinais,  $X/H=5$ ,  $X/H=10$  e  $X/H=20$  são apresentados nas Figuras 6-5, 6-6 e 6-7.

Os resultados mais próximos ao prédio ( $X/H=5$ ) apresentam as seguintes características:

- Para a direção do vento  $40^\circ$  ambos os modelos tendem a superestimar as concentrações na esteira perto do prédio. Entretanto, o CALPUFF fornece resultados que mais se aproximam aos do túnel de vento, fornecendo menores valores de concentração máxima da encontrada no túnel de vento.
- Para as outras três direções do vento no túnel de vento concentrações medidas são maiores que as previstas pelos dois modelos. Nos três casos, os dois modelos fornecem resultados semelhantes, com AERMOD calculando as concentrações máximas um pouco mais elevadas, especialmente para a direção do vento de  $220^\circ$ , quando uma concentração máxima mais acentuada é observada no perfil de concentração lateral.
- A característica mais interessante é, contudo, que os dois modelos não conseguem captar o deslocamento lateral da pluma e da localização lateral de sua concentração máxima observada no túnel de vento, devido à tamanha complexidade do obstáculo. A razão é que o algoritmo PRIME, que é usado em ambos os modelos, a fim de incorporar ascensão da pluma e efeitos *downwash*, não pode ver a estrutura complexa, como tal, mas apenas um edifício de planta retangular com representação total das linhas de corrente e das dimensões transversais ao vento do prédio. Como resultado, os modelos não conseguem captar a distorção da pluma, principalmente para a direção do vento  $40^\circ$ . Esse comportamento pode ser explicado pela orientação do prédio (Figura 6-8) e pelos seus efeitos na cavidade de recirculação, ocorridos quando a pluma passa pela estrutura do prédio menor. Nesse caso, os modelos não podem prever a linha central da pluma, apresentando um comportamento diferente nas previsões na cavidade de recirculação logo após o prédio, como ambas as Figuras 6-4 e 6-5 demonstram. Um efeito similar, também é observado para direção do vento  $130^\circ$ , provavelmente também devido à distorção da pluma causada pelo prédio menor.
- Assim, como nas simulações de Sada e Sato as simulações de Aubrun e Leitl apresentadas nas Figuras 6-5, 6-6 e 6-7 indicam que os modelos subestimam os valores de concentração e que os valores dos modelos podem se aproximar dos dados experimentais a medida que a distância aumenta.

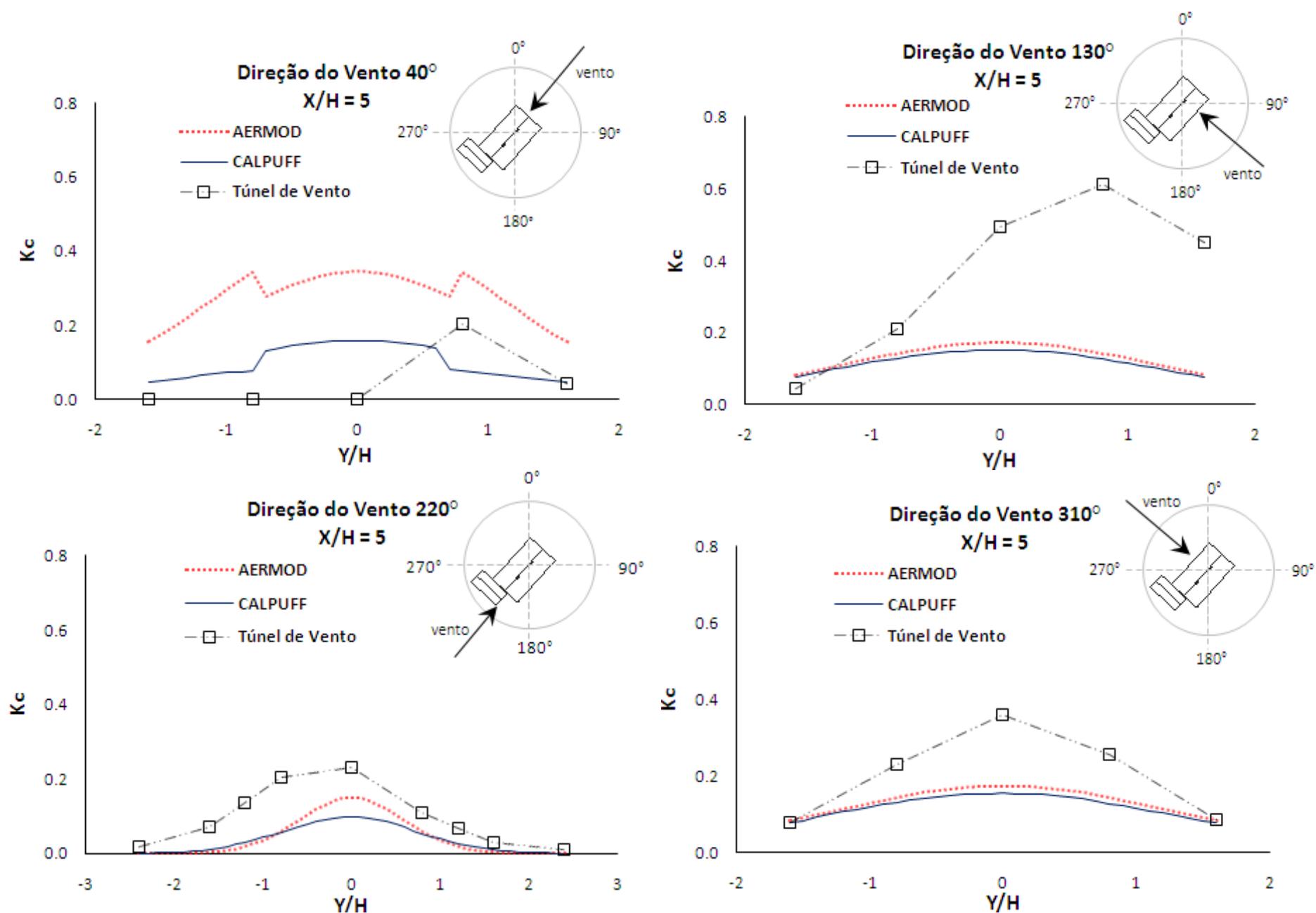


Figura 6-5: Perfil horizontal de concentração média adimensional, comparando os dados do túnel de vento com os resultados dos modelos

Os perfis de concentração transversal ao vento após o obstáculo ( $X/H=10$ , Figura 6-6) demonstram que, com o aumento da distância, há uma melhora nos resultados tanto no AERMOD como no CALPUFF (permanecendo uma pequena diferença entre os modelos) que ocorre, provavelmente devido à geometria do obstáculo que apresenta menor influência quanto maior a distância em relação ao obstáculo. Isso fica ainda mais evidente quando é realizada a comparação entre as concentrações médias máximas obtidas em diferentes direções do vento, que apresenta valores próximos (em torno de 0,15).

Os perfis de concentração transversal ao vento após o obstáculo ( $X/H=20$ , Figura 6-7) mostram que as diferenças entre as concentrações médias medidas são suavizadas, especialmente quando o vento é normal à face estreita do edifício com maior comprimento (direção do vento  $40^\circ$ ). As concentrações previstas pelos dois modelos são muito similares às concentrações medidas em túnel de vento para a direção do vento de  $40^\circ$  e  $310^\circ$ .

Para a direção do vento  $220^\circ$ , CALPUFF prediz as concentrações de  $X/H = 20$  com acurácia, enquanto AERMOD superestima a concentração máxima observada no eixo da pluma e subestima concentrações nas bordas da pluma. Isso é corroborado com o comportamento diferenciado do AERMOD para a direção do vento  $220^\circ$  observada nos perfis longitudinais apresentados na Figura 6-4.

Para a direção do vento  $130^\circ$ , ambos os modelos apresentam resultados comparáveis aos dados observados no túnel de vento, mas os experimentos revelam uma distorção da pluma. A distorção ainda persiste a esta distância para esta direção do vento, devido ao vento incidente na face mais larga do prédio maior que provoca uma distorção do fluxo é maior no escoamento e, portanto, torna o efeito sobre o perfil lateral mais evidente.

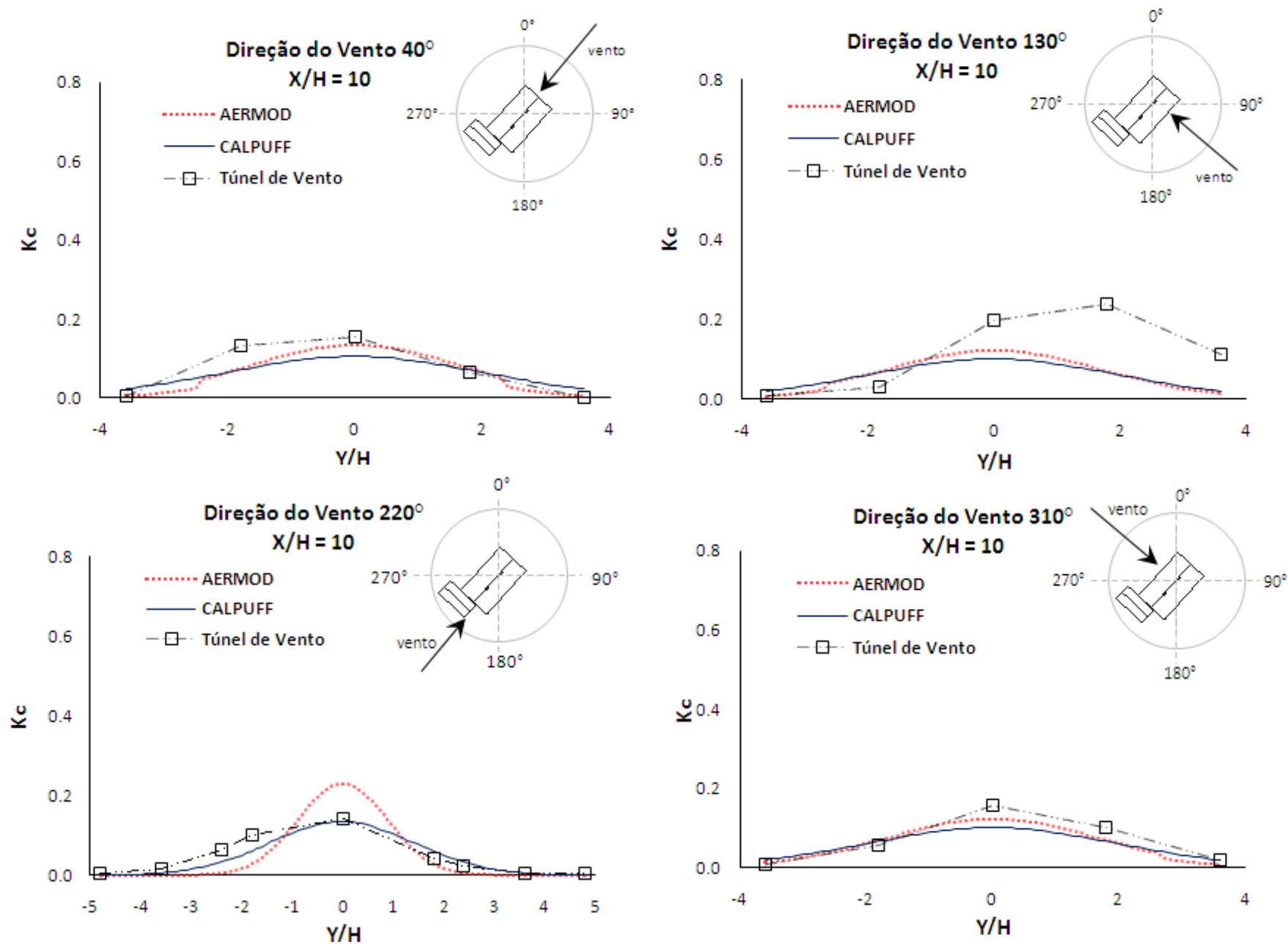


Figura 6-6: Perfil horizontal de concentração media adimensional, comparando os dados do túnel de vento com os resultados dos modelos

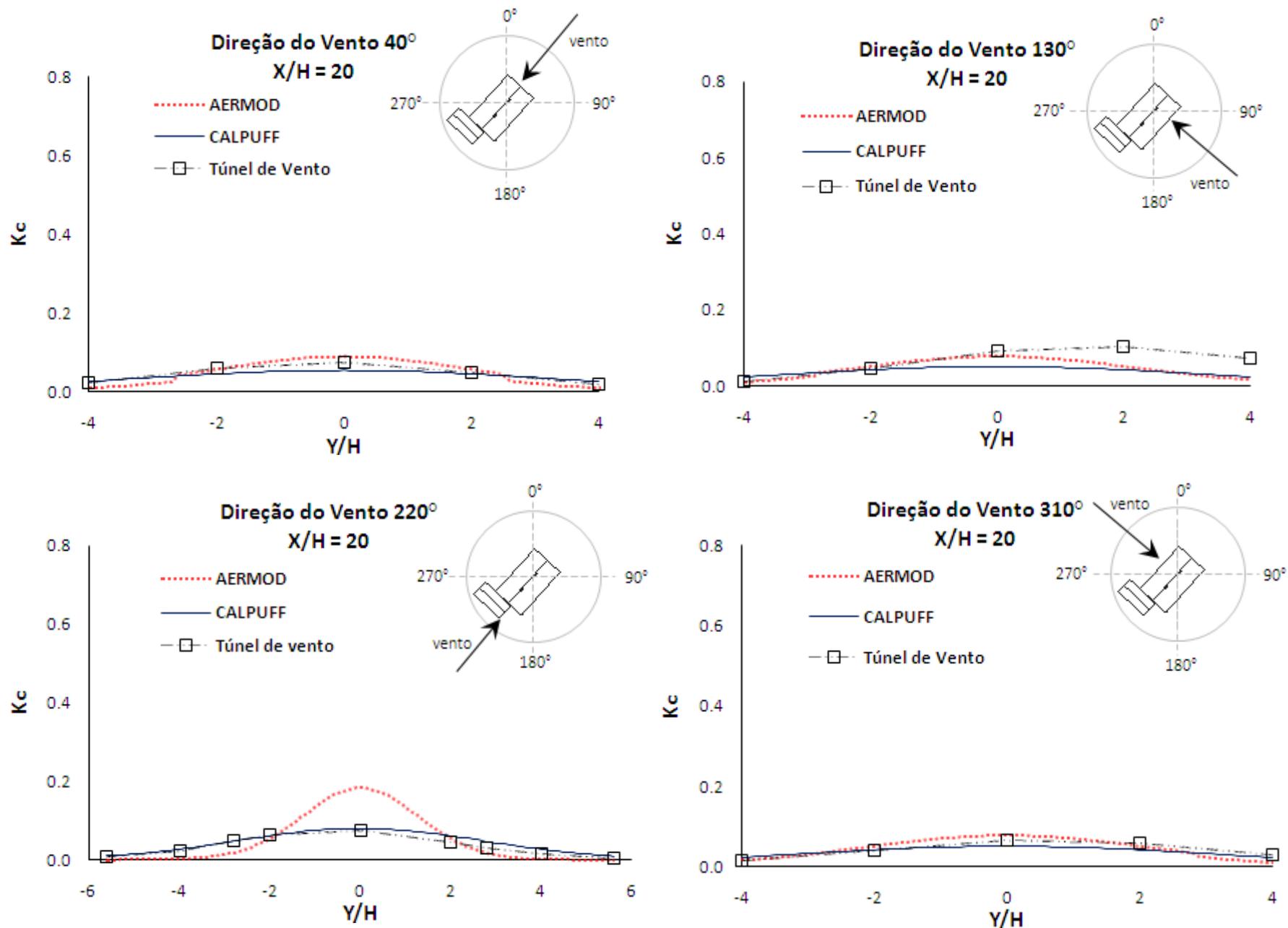


Figura 6-7: Perfil horizontal de concentração média adimensional, comparando os dados do túnel de vento com os resultados dos modelos

Observando-se a área de influência da configuração fonte-obstáculo é possível notar a grande influência da direção do vento e das dimensões projetadas do prédio na dispersão dos contaminantes. As concentrações mais elevadas próximas ao prédio ocorreram devido à formação da cavidade de recirculação que proporcionou um maior contato da pluma de poluentes no solo, e conseqüentemente na altura de estudo (1,6m). A diferença dos cenários de concentração se dá pelo fato da cavidade de recirculação gerada após prédio, depender das dimensões projetadas do obstáculo, que são definidas de acordo com a direção do vento incidente, podendo promover diferentes comportamentos da pluma ao longo do escoamento.

As maiores concentrações encontradas tanto nos modelos CALPUFF e AERMOD como nas medições do túnel de vento de Aubrun e Leidl (2004) ocorreram quando o vento incidiu na face do prédio com maior largura, ou seja, nas direções do vento  $130^\circ$  e  $310^\circ$ , justamente quando se obteve as maiores cavidades ou regiões de recirculação, com o ponto de recolamento em aproximadamente  $3,24H$  a partir da face posterior ao prédio nas modelagens utilizando o PRIME. Já nas modelagens com direção do vento  $40^\circ$  e  $220^\circ$  o ponto de recolamento ficou em torno de  $1,78H$ . Segundo Schulman *et al.* (2000) a inclinação das linhas de corrente à jusante do prédio de maior largura não é tão pronunciada quanto para um prédio estreito, o que proporciona maior região de recirculação, com maior contato da pluma de poluentes no solo, o que justifica o fato dos cenários de concentração com direções  $130^\circ$  e  $310^\circ$  apresentarem as maiores concentrações próximas do obstáculo

Outra observação realizada de forma mais clara com a ajuda dos cenários de concentração, é a identificação das regiões nas quais cada modelo obtém o melhor desempenho. O melhor desempenho do modelo CALPUFF em relação ao modelo AERMOD, ocorreu predominantemente nas distâncias a partir de  $X/H=20$ , enquanto para o modelo AERMOD o melhor desempenho ocorreu em distâncias menores que  $X/H=20$ .

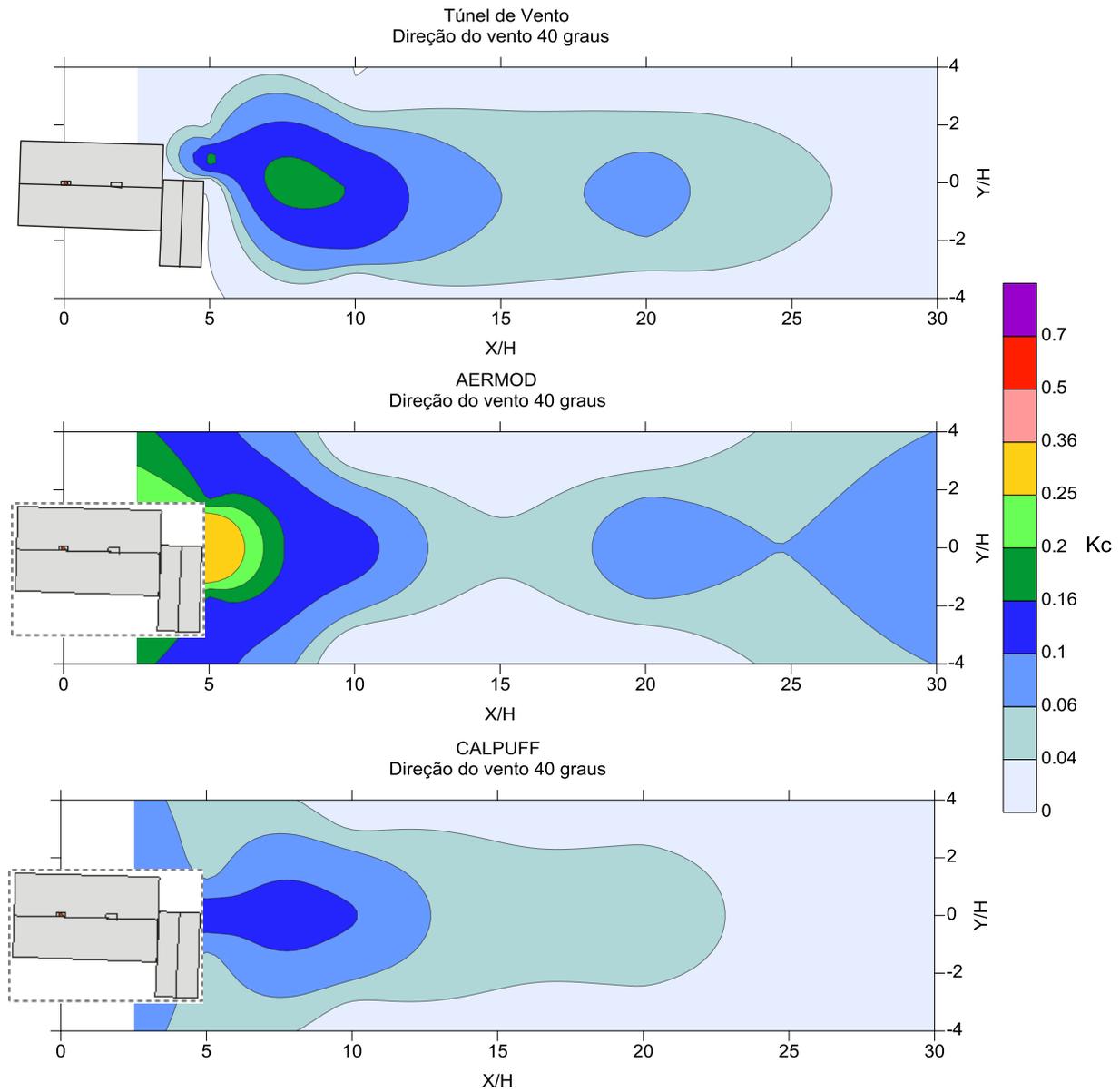


Figura 6-8: Cenários de concentrações médias adimensionalizadas do túnel de vento e dos modelos AERMOD e CALPUFF; direção do vento 40 graus.

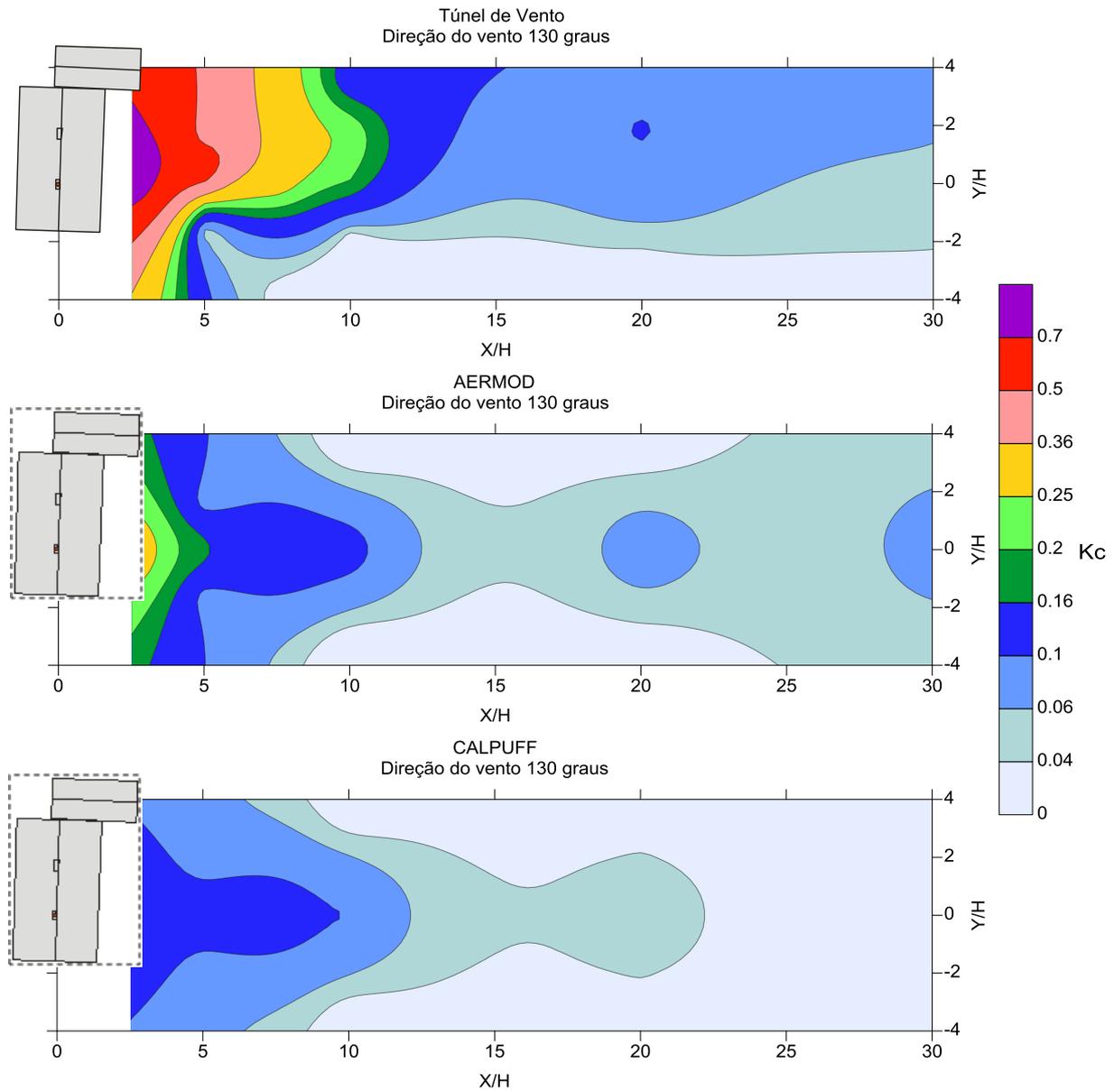


Figura 6-9: Cenários de concentrações médias adimensionalizadas do túnel de vento e dos modelos AERMOD e CALPUFF; direção do vento 130 graus.

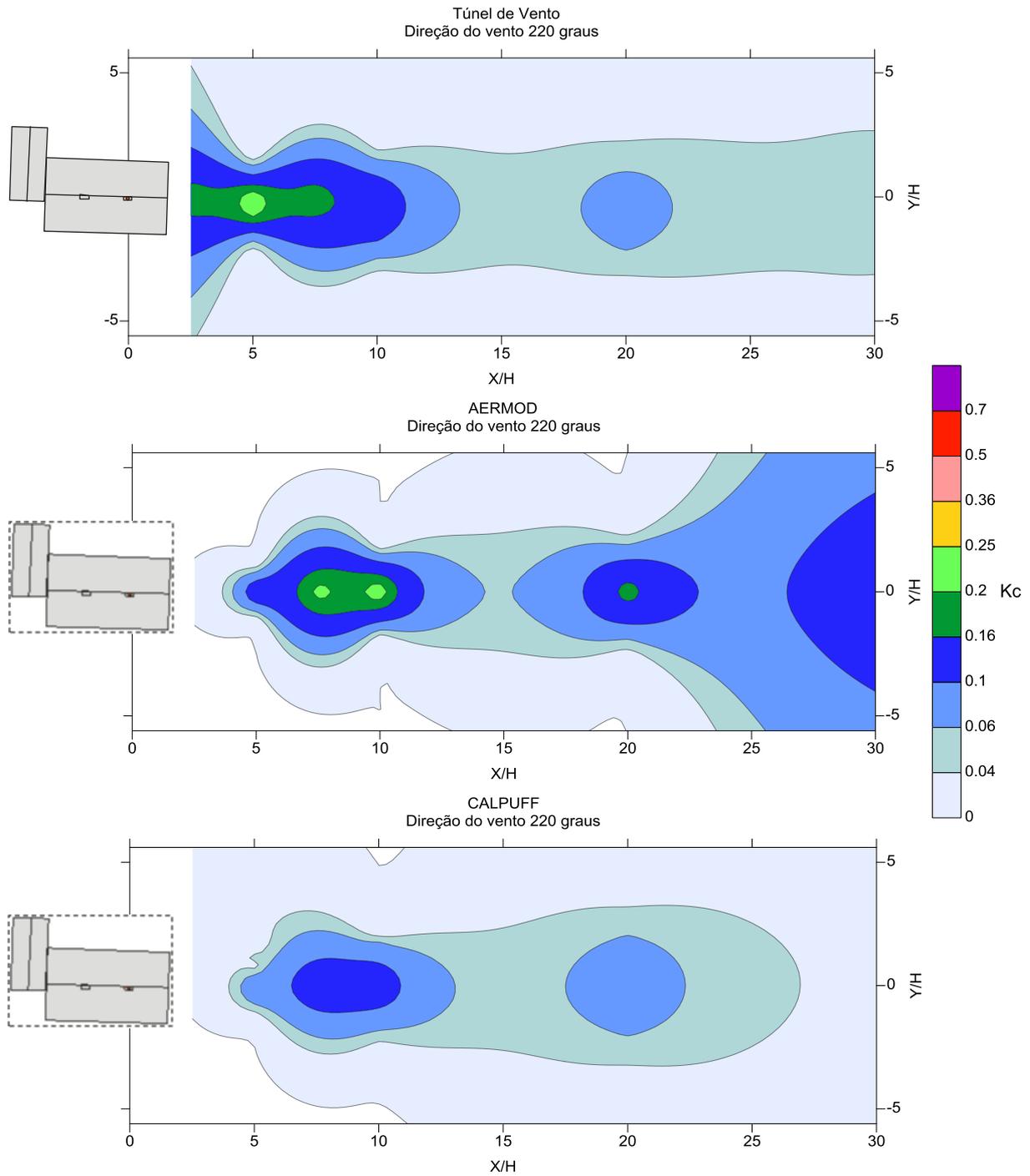


Figura 6-10: Cenários de concentrações médias adimensionalizadas do túnel de vento e dos modelos AERMOD e CALPUFF; direção do vento 220 graus.

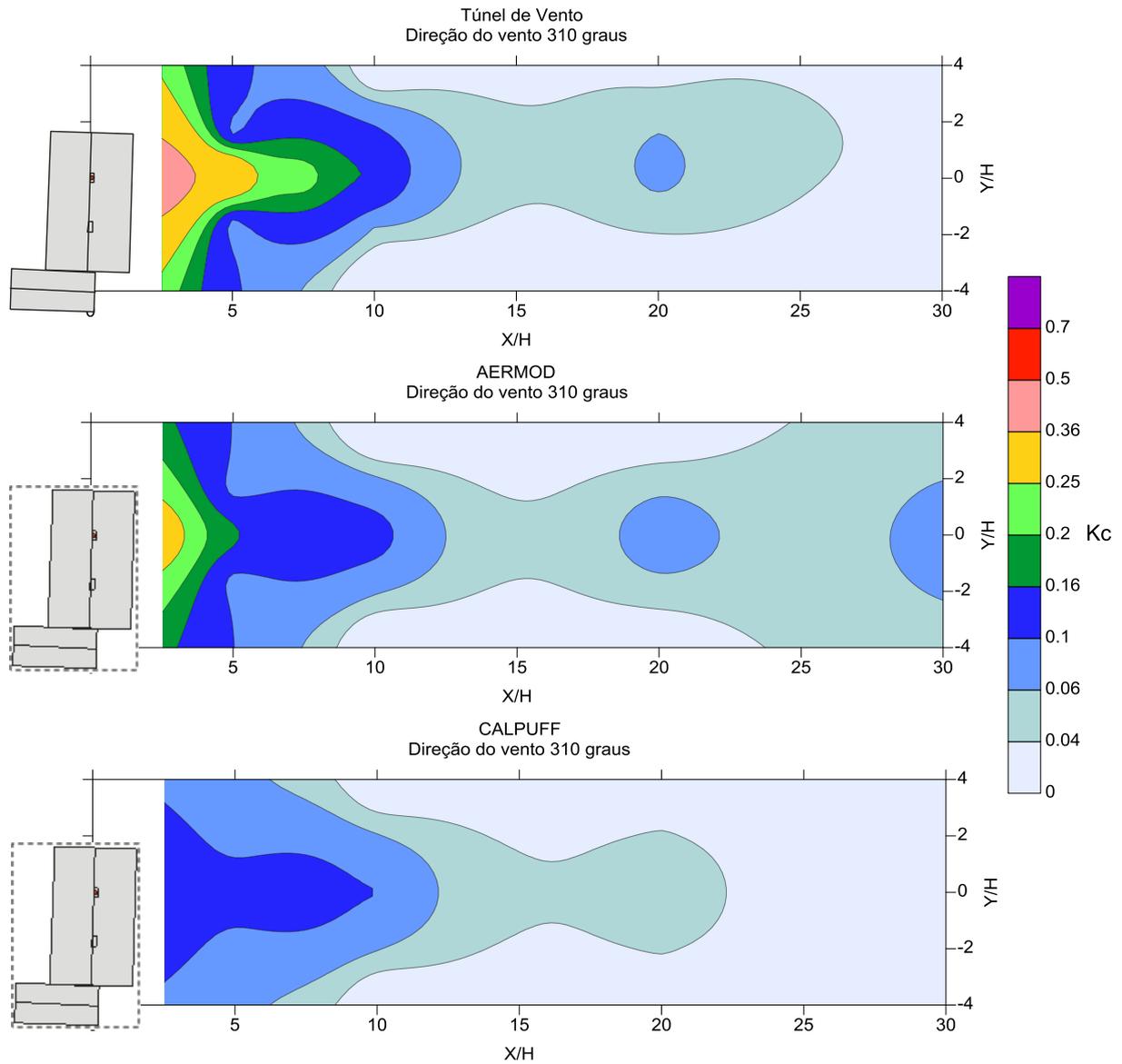


Figura 6-11: Cenários de concentrações médias adimensionalizadas do túnel de vento e dos modelos AERMOD e CALPUFF; direção do vento 310 graus.

As linhas de isoconcentração apresentadas nas Figuras 6-8 à 6-11 e os gráficos de correlação apresentados nas Figuras 6-12 e 6-13 sugerem que, em geral, os dois modelos, AERMOD e CALPUFF, tendem a subestimar as concentrações. Entretanto é mais apropriado concluir que em situações nas quais a chaminé está em cima do obstáculo e a altura de emissão é próxima de  $1H$ , os modelos tendem a subestimar os valores de concentração próximos à fonte (ou do obstáculo) e superestimar esses valores na região de esteira mais afastada do obstáculo.

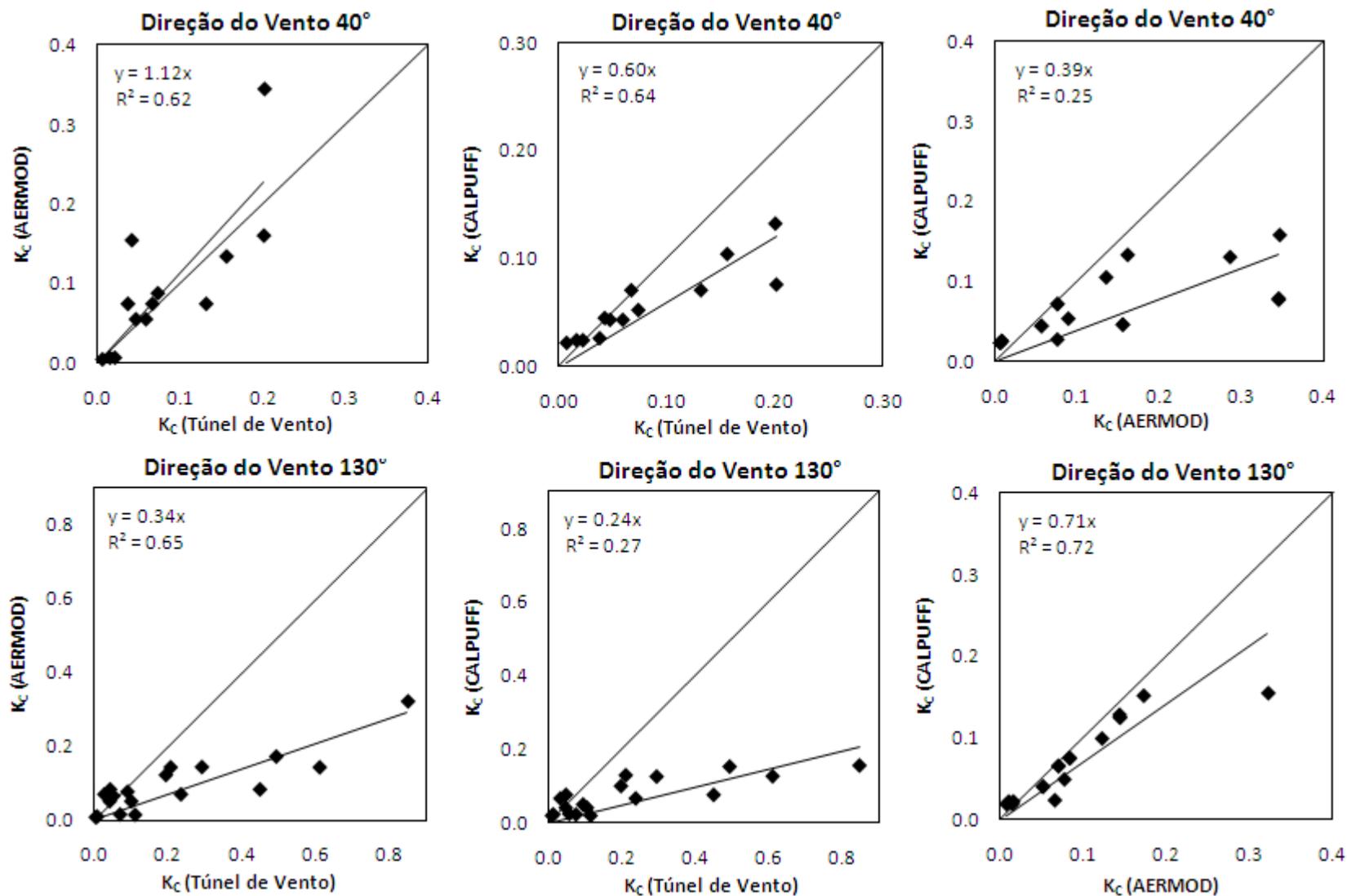


Figura 6-12: Correlação entre os dados de túnel de vento e os resultados dos modelos, para as direções do vento 40° e 130°.

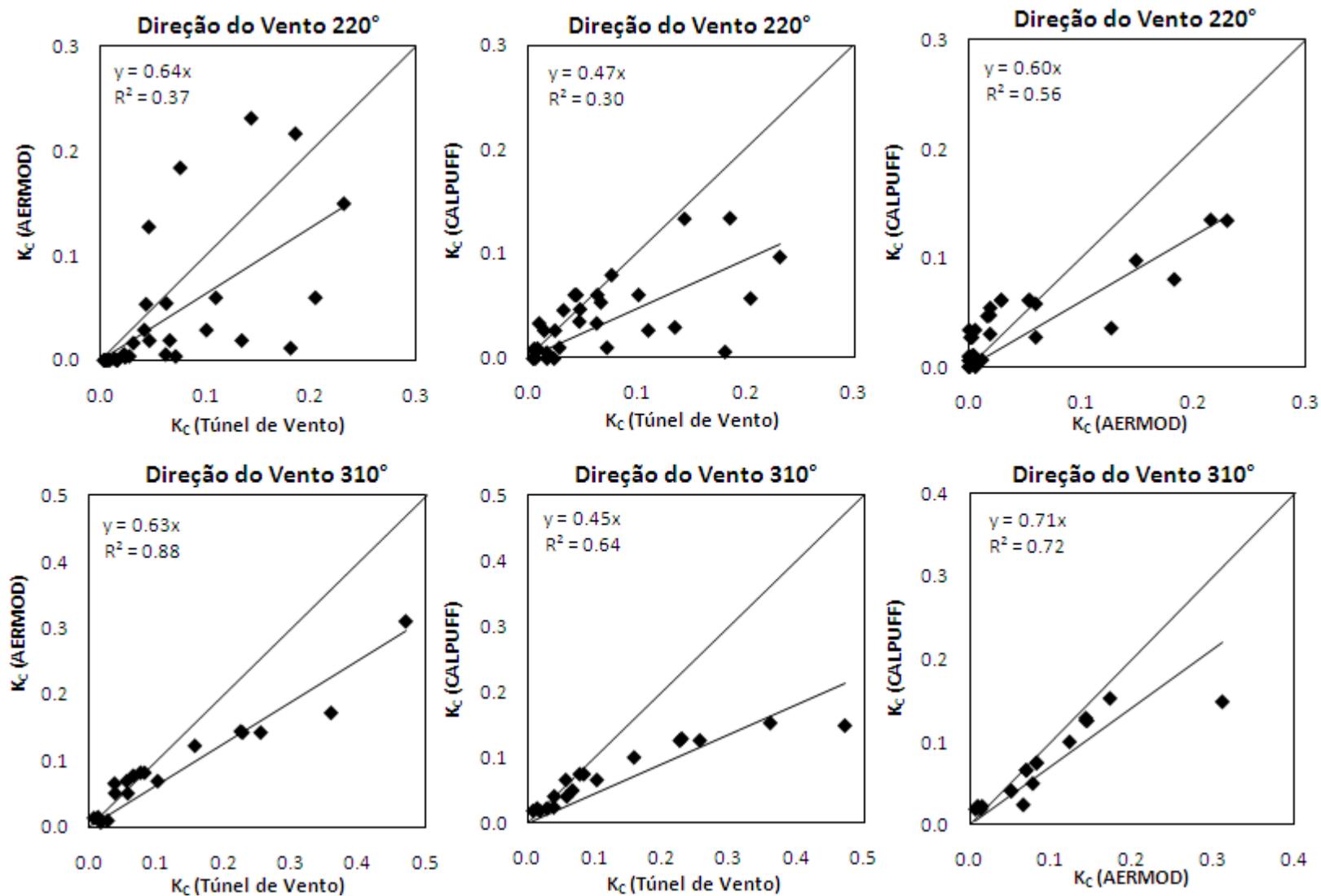


Figura 6-13: Correlação entre os dados de túnel de vento e os resultados dos modelos, para as direções do vento 220° e 310°.

### 6.3 Avaliação de metodologias para o cálculo dos picos de concentração

Os modelos CALPUFF e AERMOD utilizados no estudo fornecem estimativas para concentrações médias de longo período, 1 hora. No entanto, para avaliação do impacto do odor é útil ter informações sobre as concentrações de pico (ou seja, a média máxima) observadas para os tempos de média mais curtos. As metodologias aplicadas para obter as concentrações médias máximas em tempos de média menores são descritas no item 4.3.

A Figura 6-14 apresenta gráficos de dispersão das concentrações calculadas para diferentes tempos de média para a direção do vento de 220° com o CALPUFF, utilizando duas metodologias diferentes explicadas no item 4.3, uma primeira metodologia que realiza o tratamento dos coeficientes de dispersão, e uma segunda que realiza o tratamento diretamente nas concentrações obtidas nos modelos. Os resultados que sugerem as previsões de AERMOD e CALPUFF, por meio da segunda metodologia para calcular concentrações em pequenos intervalos de tempo, não diferem substancialmente, essa diferença é a mesma para todos os tempos médios considerados, devido à utilização da mesma metodologia. A análise de regressão linear indica que, em geral para todas as direções, o CALPUFF subestima as concentrações de pico em relação às obtidas pelo AERMOD (como por exemplo,  $K_{C(CALPUFF)} = 0,60 \times K_{C(AERMOD)}$ , na direção do vento 220°), o que mantém a mesma relação entre as concentrações médias de longo período dos modelos.

A comparação entre os resultados do CALPUFF usando as duas diferentes metodologias mostra que, para tempos de média menores que uma hora, porém ainda relativamente longos (por exemplo, 30 minutos), as duas metodologias fornecem resultados bem similares, mas com os tempos médios ficando mais curtos, os resultados dos diferentes métodos mostram diferenças cada vez maiores (embora dentro de um fator de dois). É importante lembrar que quando comparadas, as duas metodologias foram aplicadas em modelagens utilizando os coeficientes de Pasquill-Gifford no CALPUFF. O uso do segundo método, no qual o tratamento ocorre diretamente nas concentrações ( $K_C$ ) resulta em maiores estimativas de concentrações de pico que a metodologia que envolve a correção em cima dos coeficientes de dispersão. Finalmente, o comportamento semelhante para as concentrações de pico referentes à modelagem com orientação do vento 220° é observado para as quatro direções do vento examinadas no estudo.

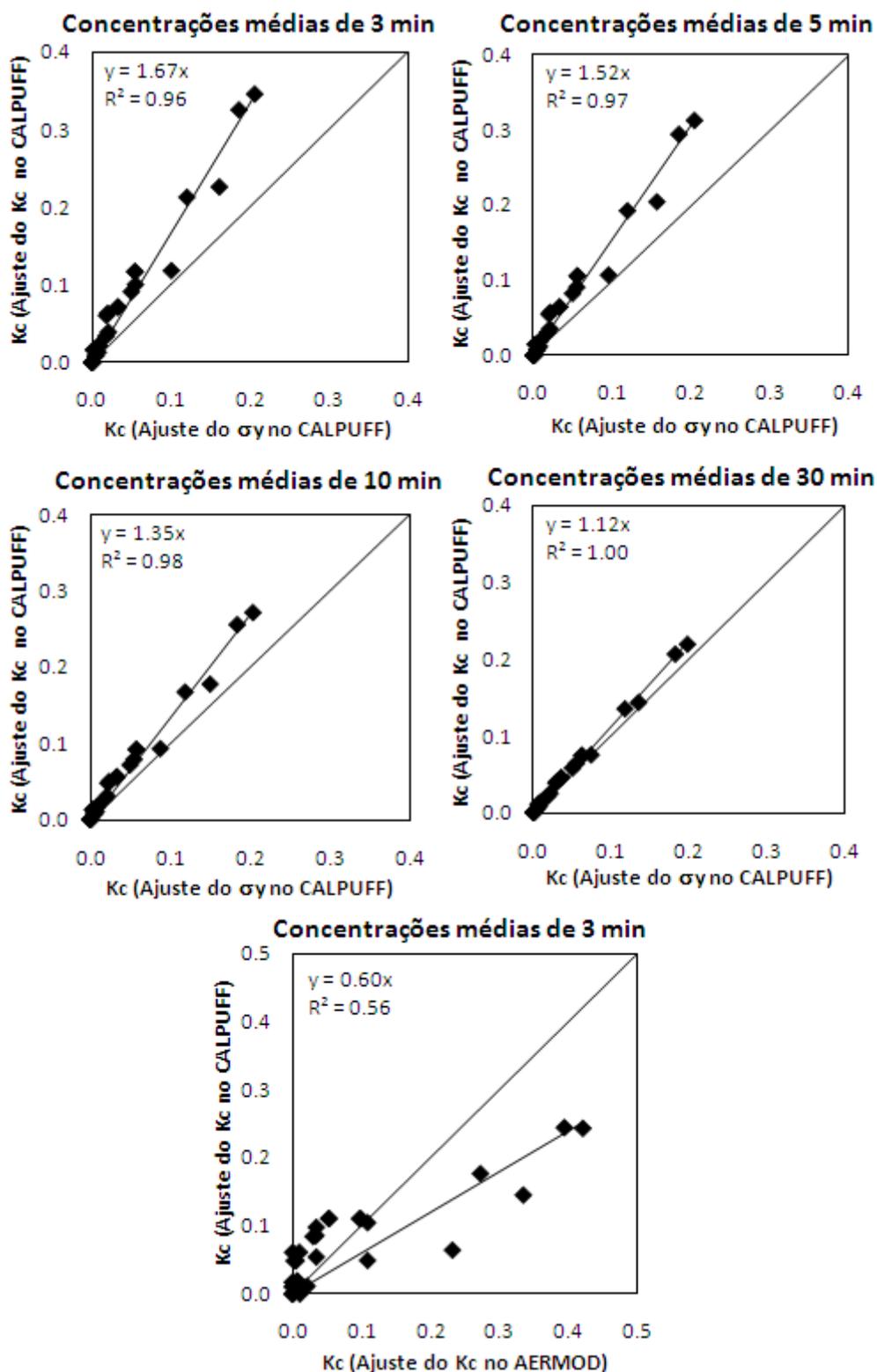


Figura 6-14: Comparação entre as duas metodologias de cálculo para os picos de concentrações (3, 5, 10 e 30 minutos), aplicadas na modelagem com direção do vento 220°.

## 7 Conclusões

O presente trabalho objetivou avaliar o desempenho dos modelos gaussianos AERMOD e CALPUFF utilizando os dados de túnel de vento dos experimentos de Sada e Sato (2000) envolvendo um obstáculo cúbico e de Aubrun e Leitl (2004) envolvendo um obstáculo com geometria complexa.

Os resultados relativos às simulações dos experimentos de Sada e Sato (2002) sugeriram que para os cenários investigados (quando a chaminé possui a mesma altura do obstáculo e esta à montante do mesmo), ambos os modelos AERMOD e CALPUFF tendem a subestimar os perfis verticais de concentração no topo de obstáculo e em regiões à jusante do obstáculo. As diferenças mais significativas entre os modelos AERMOD e CALPUFF ocorreram onde ambos os modelos obtiveram seus melhores resultados, na região acima do obstáculo, na qual o modelo AERMOD superestimou seus resultados em relação ao modelo CALPUFF, apresentando uma análise de regressão linear de  $K_{C(CALPUFF)}=0,58 \times K_{C(AERMOD)}$ .

Uma constatação importante particularmente encontrada nas simulações dos experimentos de Sada e Sato (2002) foi que os modelos CALPUFF e AERMOD apresentaram resultados semelhantes em alturas menores que 1H e maiores que 1,5 H, ou seja, fora da região central da pluma. Além disso, os modelos CALPUFF e AERMOD estimaram concentração média semelhantes em regiões mais distantes do obstáculo, apresentando uma análise de regressão linear de  $K_{C(CALPUFF)}=0,72 \times K_{C(AERMOD)}$ .

Quanto às simulações dos experimentos de Aubrun e Leitl (2004) com obstáculo com geometria complexa, os resultados referentes ao perfil de concentração longitudinal após o obstáculo ao longo de do vento em  $Y/H=0$  mostraram que ambos os modelos CALPUFF e AERMOD estimam as concentrações médias de forma adequada, onde eles fornecem resultados muito semelhantes. A única exceção é o resultado do modelo AERMOD para a direção do vento  $220^\circ$ , que superestimou as concentrações por um fator de aproximadamente 2.

Os perfis de concentração lateral à jusante do obstáculo mostraram que na direção do vento  $40^\circ$ , ambos os modelos tenderam a superestimar as concentrações na esteira próxima ao prédio, e para as direções  $130^\circ$ ,  $220^\circ$  e  $310^\circ$  os dois modelos forneceram resultados semelhantes, com AERMOD calculando as concentrações máximas um pouco mais elevadas, especialmente para a direção do vento de  $220^\circ$ .

A característica mais interessante apresentada nas simulações dos experimentos de Aubrun e Leitl (2004) foi a limitação dos dois modelos na captura do deslocamento lateral da pluma e da localização lateral de concentração máxima mensurada no túnel de vento, devido à complexidade do obstáculo. A razão é que o algoritmo PRIME, que foi usado em ambos os modelos, a fim de incorporar ascensão da pluma e efeitos *downwash*, não pode ver a estrutura complexa, como tal, mas apenas um edifício de planta retangular com representação total das linhas de corrente e das dimensões transversais ao vento do prédio. Dessa maneira, os modelos não conseguiram captar a distorção da pluma, principalmente para as direções do vento 40° e 130°.

Os perfis de concentração transversal ao vento após o obstáculo em regiões mais distantes confirmam que, com o aumento da distância, há uma melhora nos resultados tanto no AERMOD como no CALPUFF (permanecendo uma pequena diferença entre os modelos) que ocorre, provavelmente, devido à geometria do obstáculo que apresenta menor influência quanto maior a distância em relação ao obstáculo. Além disso, nas simulações do experimento de Aubrun e Leitl (2004) foi possível notar a grande influência da direção do vento e das dimensões projetadas do prédio na dispersão dos contaminantes que promoveu diferentes comportamentos da pluma ao longo do escoamento.

Em geral, analisando as simulações para ambos os experimentos de túnel de vento, os dois modelos, AERMOD e CALPUFF, tenderam a subestimar os valores de concentração próximos aos obstáculos, com o modelo AERMOD na maioria dos casos prevendo concentrações maiores que as obtidas pelo modelo CALPUFF. Além disso, foi possível inferir que à jusante do obstáculo o modelo CALPUFF melhora o seu desempenho à medida que a distância aumenta. Já com relação ao modelo AERMOD observou-se que seus resultados melhores ocorrem em parte nas regiões próximas do obstáculo, sendo superior ao CALPUFF em quase na maioria dos casos. Entretanto, foi possível constatar nas simulações de ambos os experimentos de túnel de vento que, para maiores distâncias, os dois modelos estimam resultados semelhantes.

As diferenças ocorridas entre as simulações de cada experimento de túnel de vento se devem ao fato de que os mesmos envolvem dois problemas de dispersão distintos. A primeira diferença entre as simulações dos experimentos de Sada e Sato (2002) e Aubrun e Leitl (2004) está na geometria dos obstáculos estudados, um utiliza geometria simples (cubo) e o outro geometria complexa. Outra diferença está na posição da chaminé, um experimento utiliza a chaminé em cima do prédio e o outro a montante do obstáculo. Além disso, simulações dos

experimentos de Sada e Sato (2002) ocorreram com valores dos perfis de velocidade do vento menores que nos experimentos de Aubrun (2004). Essas características podem influenciar nos cálculos dos modelos utilizados, pelos seguintes motivos, respectivamente:

- No cálculo do modelo PRIME são utilizadas as projeções ao invés das dimensões exatas do obstáculo, de modo que estruturas complexas não sejam representadas de forma adequada. Assim, utilizando os modelos CALPUFF e AERMOD associados ao PRIME em situações com obstáculos de geometrias complexas podem ser gerados resultados fora da normalidade de situações em que são empregados obstáculos de geometria simples.
- As concentrações calculadas pelo modelo PRIME são obtidas em função da distância do prédio, de acordo com a posição do receptor, somando ou não as contribuições da região próxima e distante do obstáculo. Além disso, o modelo possui um tratamento diferenciado das linhas de corrente, em cinco regiões distintas, próxima ao obstáculo. Dessa maneira, diferentes posições da chaminé, bem como diferentes alturas de emissão poluente, podem acarretar resultados distintos nos modelos associados ao PRIME.
- Os valores dos coeficientes de dispersão, necessários nos cálculos dos modelos AERMOD e CALPUFF, são calculados utilizando os dados de turbulência, como os desvios padrão da velocidade vento, que, por sua vez, são específicos para cada perfil de velocidade inserido na modelagem. Portanto, diferentes velocidades vento podem influenciar os modelos CALPUFF e AERMOD gerando diferentes resultados concentração.

Por fim, a análise das concentrações máximas médias para intervalos de tempo de curto período utilizando duas metodologias diferentes, uma que ajusta o coeficiente de dispersão e outra que ajusta o  $K_c$  para pequenos intervalos de tempo, sugeriu que as previsões dos modelos AERMOD e CALPUFF por meio da segunda metodologia não diferem substancialmente, essa diferença é a mesma para todos os tempos médios considerados, devido à utilização da mesma metodologia. Já a análise com os resultados do CALPUFF comparando as duas metodologias mostrou maiores resultados de concentração com ajuste nas concentrações ( $K_c$ ) do que os resultados de concentrações obtidas pelo ajuste do coeficiente de dispersão, com uma diminuição dessa diferença em intervalos tempo relativamente longos (30 minutos), porém menores que uma hora. Essas diferenças ocorrem, porque no primeiro método ocorre a redução do valor do coeficiente de dispersão, fazendo com que a turbulência na direção horizontal seja dada para uma média de tempo inferior ao intervalo de tempo para o qual a velocidade média do vento é utilizada (1 hora). Assim,

obtem-se a representação do valor máximo de concentração consistente com a turbulência, mas não fornece a caracterização da extensão lateral que é afetada pelas concentrações referentes ao intervalo de longo período (1 hora). Este campo de concentração pico deve ser interpretado como uma “fotografia” da trajetória mais provável dentro de um intervalo de 1 hora. Enquanto no segundo método, com a aplicação do fator de ajuste diretamente nas concentrações, são obtidas concentrações elevadas em toda a extensão da pluma, porém as concentrações fora da linha de centro da pluma devem ser interpretadas como uma probabilidade de ocorrência ponderada das concentrações máximas.

## **8 Recomendações para trabalhos futuros**

Os resultados obtidos no presente trabalho mostram que estudos posteriores devem ser realizados a fim de investigar ainda mais a aplicação dos modelos CALPUFF e AERMOD associados ao PRIME em situações com a presença de obstáculos. Sendo assim, são sugeridas as seguintes linhas de estudo:

- Investigar na literatura científica maneiras para lidar com as limitações modelo PRIME referente à influência de obstáculos com geometrias complexas.
- Investigar o desempenho dos CALPUFF e AERMOD comparando dados de túnel de vento utilizando valores de velocidades de vento mais elevados, visto que no presente trabalho as simulações para os dois experimentos de túnel de vento ocorreram em velocidades baixas.
- Investigar nos modelos AERMOD e CALPUFF associado ao modelo PRIME a influência da altura da chaminé associada à diferentes alturas de obstáculos através de um mesmo experimento de túnel de vento com uma boa variedade de dados.
- Investigar a influência da velocidade de saída do poluente na chaminé na dispersão próximo ao obstáculo, empregando o modelo PRIME.
- Investigar a influência de diferentes classes de estabilidade atmosférica no desempenho dos modelos AERMOD e CALPUFF associado ao modelo PRIME.

## 9 Referências

ARYA, S.P.S., GADIYARAM, P.S. An experimental study of flow and dispersion in the wakes of three-dimensional flow. *Atmospheric Environment*. v. 20, p. 729-740, 1986.

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, p.81-93, 2004.

BARAD, M. L. Project Prairie Grass, A Field Program in Diffusion. *Geophysical Research Papers*. Air Force Cambridge Research Center, v.1, p. 439, 1958.

CHANG, W. S.; CHEN, S. S.; CHANG, J. H.; T. C. H.; CHANG T. C. Odor Load Investigation for a Pharmaceutical Plant by Open Path Fourier Transform Infrared (OP-FTIR)/Environmental Protection Agency Regulatory Dispersion Model (AERMOD). *Environmental Forensics*, v 10, p. 82-91, 2009.

CIMORELLI, A.J.; PERRY, S.G.; VENKATRAM, A.; WEIL J.; PAINE, R.; WILSON, R.B.; LEE, R.F., PETERS, E.D. E BRODE, R.W. AERMOD: a dispersion model for industrial source applications. Part I: general model formulation and boundary layer characterization, *Journal of Applied Meteorology*, 2004.

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. 2010.

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, p.220–228, mai 2006.

DOUGLAS, S. AND KESSLER, R. *User's Guide to the Diagnostic Wind Field Model (Version 1.0)*. San Rafael, CA: System Applications, Inc. p. 1988.

DOURADO 2007. Estudo da dispersão de gases odorantes ao redor de obstáculos através do modelo de pluma flutuante. *Dissertação de mestrado pela Universidade Federal do Espírito Santo*. 2007.

DRAXLER, R.R.,. Determination of atmospheric diffusion parameters. *Atmospheric Environment*, 10, 99-105, 1976.

ELBIR, T., DINCER, F., MUEZZINOGLU, A. Evaluation of Measured and Predicted Odor Concentrations Around a Meat Packaging and Rendering Plant Personal *Environmental Engineering Science*. p. 313-320, April, 2007.

EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). *AERMOD description of model formulation*. EPA-454/R-03-004. 2004a.

EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Interagency Workgroup on Air Quality Modeling (IWAQM) Phase I report: Interim recommendations for modeling long range transport and impacts on regional visibility*. U.S.EPA, Research Triangle Park, NC, 1993a.

EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Protocol for Determining the Best Performing Model.*, 1992.

EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Users guide for the AERMOD meteorological preprocessor (AERMET)*. EPA-454/B-03-002. 2004b.

EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *User's guide to the Building Profile Input Program (BPIP)*. Research Triangle Park, NC, 1993b.

FACKRELL, J.E. J. *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 16, p. 97-118, 1984.

GIFFORD, F. A. *Nuclear Safety*. V 17, p. 68-86. 1976.

GIFFORD, F. An Outline of Theories of Diffusion In The Lower Layers of the Atmosphere. In: SLADE, D. H. (Ed.). *Meteorolgy and Atomic Energy 1968*. Division of Reactor Development and Technology. Springfield, USA: US Atomic Energy Commision, 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.
- HANNA, S.R.; BRIGGS, G.A.; HOSKER Jr., R.P. Handbook on Atmospheric Diffusion. Springfield: Technical Information Center U.S. Department of Energy. 1982.
- HOSKER, R. P. Flow and diffusion near obstacles. *Atmospheric Science and Power Production*. 1984.
- HOULT, D.P.; WEIL, J.C., *Atmospheric Environment*, v.6, p. 513-531, 1972.
- 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*. Amer. Meteorol. Soc., Boston, MA. p.236-242, 1976.
- HUBER, A. H.; Snyder, W.H. *Atmospheric Environment*, v 176, p. 2837-2848, 1982.
- 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 100 Station*. Atomic Industrial Forum., Washington, DC. 1975.
- KATO, M., HANAFUSA, T. Wind tunnel simulation of atmospheric Turbulent flow over a flat terrain. *Atmospheric Environment*, v. 30, n. 16, p. 2853-2858, 1996.
- LEE, R. F., S. G. PERRY, A. J. CIMORELLI, R. J. PAINE, A. VENKATRAM, J. C. WEIL, AND R. B. WILSON. AERMOD - the developmental evaluation. Preprints, *Tewnty-First NATO/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modeling and Its Application*, Baltimore, MD, U.S.A. 1995.
- LUDWIG, F.L.; GASIOREK, L.S.; RUFF, R.E. Simplification of a Gaussian Puff Model for Real-time Minicomputer Use. *Atmospheric Environment*, v. 11, p. 431-436, 1977.
- MAVROIDIS I., GRIFFITHS R.F., HALL D.J. Field and wind tunnel investigations of plume dispersion around single surface obstacles. *Atmospheric Environment*, 37, 2903-2918, 2003.
- MCELROY, J.L. AND F. POOLER. The St. Louis dispersion study. U.S. *Public Health Service, National Air Pollution Control Administration*. 1968.

MOHAN, M., SIDDIQUI, T. A. Analysis of various schemes for the estimation of atmospheric stability. *Atmospheric Environment*, v.32, n.21, p.3776-3781, 1998.

MORAES, M., R. “Ferramenta para a previsão de vento e dispersão de poluentes na Micro-escala atmosférica.” *Tese de doutorado, apresentado ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da UFSC*, 2004.

MOREIRA, D. M., TIRABASSI, T., MORAES, M. R. Meteorologia e poluição atmosférica. *Ambiente & Sociedade*, v.11, n.1, p.1-13, 2008.

MURAKAMI, S. Comparison of various turbulence models applied to a bluff body. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. v. 46 e 47. p. 21-36, 1993.

OLESEN, H. R., BERKOWICZ, R., KETZEL, M., LØFSTRØM, P. Validation of OML, AERMOD/PRIME and MISCAM using the Thompson wind tunnel data set for simple stack building configurations, *Boundary-Layer Meteorology*, n 131, p. 73-83, 2009.

PASQUILL, F. *Atmospheric dispersion parameters in Gaussian plume modeling - Part III: possible requirements for change in the Turner's Workbook values*. EPA-600/4-76-030B, U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, 1976.

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

PASQUILL, F., SMITH, R. *Atmospheric Diffusion*. John Wiley and Sons Inc., New York, p. 440, 1983.

PERRY, S.G., BURNS, D.J. ADAMS, L.H. PAINE, R.J. DENNIS, M.G. MILLS, M.T. STRIMAITIS, D.G. YAMARTINO, R.J. INSLEY, E.M.. *User's Guide to the Complex Terrain Dispersion Model Plus Algorithms for Unstable Situations (CTDMPLUS) Volume 1: Model Description and User Instructions*. EPA/600/8-89/041, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, 1989.

PETERSEN, R. L, CARTER J. J. Evaluation of AERMOD/PRIME For Two Sites with Unusual Structures. *Air and Waste Management Associations 99<sup>th</sup> Annual Conference*, Jun 2006.

SADA, K.; SATO, A. Estimation of gas concentration fluctuations using a numerical model and comparison with those of wind tunnel experiments. *8th International Conference on Harmonization within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*. 2002. Sofia, Bulgaria. 2002b.

SADA, K.; SATO, A. Numerical calculation of flow and stack-gas concentration fluctuation around a cubical building. *Atmospheric Environment*, v. 36, n. 35, p. 5527, 2002.

SATTLER, M., DEVANATHAN, S. Which meteorological conditions produce worst-case odors from area sources? *Journal of the Air and Waste Management Association*, p. 1296-1306, 2007.

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

SCIRE, J. S.; SCHULMAN, L.L. *In Second Joint Conference on Applications of Air Pollution Meteorology*; American Meteorological Society: Boston, MA, p. 133-139, 1980.

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

SCIRE, J.S., D.G. STRIMAITIS AND R.J. YAMARTINO. *Model formulation and user's guide for the CALPUFF dispersion model*. Prepared for the California Air Resources Board by Sigma Research Corporation, Concord, MA. 1990.

SCIRE, J.S., F.W. LURMANN, A. BASS AND S.R. HANNA. *Development of the MESOPUFF II dispersion model*, Research Triangle Park, NC: U.S. Environmental Protection Agency, (Report EPA-600/3-84-057), 1984.

SEINFELD, J. H., *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*. John Wiley & Sons. New York, 1986.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. *Atmospheric Chemistry and Physics – From Air Pollution to Climate Change*. Wiley-Interscience. USA, 1998.

SEINFELD, J.H; PANDIS, S.N. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. Wiley –Interscience, 2<sup>a</sup> ed, 2006.

SIRONI, S., CAPELLI, L., CÉNTOLA, P., ROSSO R. D., PIERUCCI, S. Odour impact assessment by means of dynamic olfactometry, dispersion modelling and social participation, *Atmospheric Environment*, v. 44, n. 3, p. 354-360, Jan 2010.

SLADE, D.H. *Meteorology and Atomic Energy 1968*, Air Resources Laboratory, U.S. Dept. of Commerce, 1968.

SMITH F.B. A scheme for estimating the vertical dispersion of a plume from a source near ground level. *Proceedings of the NATO Expert Panel on Air Pollution Modelling*, Report NATO-CCMS-14. North Atlantic Treaty Organization: Brussels, 1972.

SMITH, M.E. *Recommended Guide for the Prediction of the Dispersion of Airborne Effluents*. ASME, New York. 1973.

SNYDER, W.H., LAWSON, R. *Wind-Tunnel Simulation of Building Downwash from Electric-Power Generating Stations. Part II: Pulsed-Wire Measurements in Vicinity of Steam-Boiler Building*. U.S. Environmental Protection Agency: Research Triangle Park, NC, 1993.

SNYDER, W.H.; LAWSON, JR., R.E. *Eighth Joint Conference on Applications of Air Pollution Meteorology with A&WMA*; American Meteorological Society: Boston, MA, 1994; pp 244-250.

STULL, R. B. *An introduction to boundary layer meteorology*. Kluwer Academic Publishers. 7<sup>a</sup> ed., 1988.

TAYLOR, G. I. Diffusion by continuous movements. *Proc .London Math. Soc.*, p. 196-211, 1921.

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

TURNER, D. B. *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates: An Introduction to Dispersion Modeling*. Lewis Publishers, 2<sup>a</sup> ed., 1994.

VENKATRAM, A. Vertical dispersion of ground-level releases in the surface boundary layer. *Atmospheric Environment*, p. 947-949, 1992.

VENKATRAM, A., D. G. STRIMAITIS, AND D. DICRISTOFARO. A semiempirical model to estimate vertical dispersion of elevated releases in the stable boundary layer. *Atmospheric Environment*, n. 18, p. 923-928, 1984.

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

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, p.4663-4669, 2006.

WEIL, J. C, VENKATRAM, A. AND WYNGAARD, J. C. Plume rise. Lectures in Air Pollution Modeling. *American Meteorological Society*, p. 119-162, 1988.

WEIL, J. C. *Ninth Joint Conference on Applications of Air Pollution Meteorology with A&WMA*; American Meteorological Society: Boston, MA, p. 333-337, 1996.

WEIL, J. C., CORIO, L. A., BROWER, R. P. A PDF dispersion model for buoyant plumes in the convective boundary layer. *J.Appl.Meteor.*, n 36, p. 982-1003, 1997.

WILSON, D. J. *ASHRAE Transactions*, n. 85, p. 284-295, 1979.

WILSON, D. J.; BRITTER, R.E. *Atmospheric Environment*, n. 16, p. 2631-2646, 1982.

XING, Y., GUO, H., FEDDES, J., YU, Z., SHEWCHUCK, S., PREDICALA, B. Sensitivities of four air dispersion models to climatic parameters for swine odor dispersion, *Transactions of the ASABE*, p. 1007-1017, 2007.

YANG D.; CHEN G.; YU Y. Inter-comparison of AERMOD and ISCST-3. *Chinese Journal of Geochemistry*, v. 26 n. 2, p.182-185, 2007.

YU Z., GUO H., LAGUE C. Development of a livestock odor dispersion model based on fluctuating plume theory (2008). *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting*, n. 10, p. 5946-5960, 2008.

YU, Z.; GUO, H.; XING, Y.; LAGUË, C.. Setting acceptable odournext term criteria using steady-state and annual hourly weather data. *Biosystems Engineering*, v. 103 n. 3, p. 329-337, jul 2009.

ZHANG, X.; GHONIEM, A.F. *Atmospheric Environment*, v. 15, p. 2296-2311, 1993.

ZHANG, Y. Q.; ARYA, S. P.; SNYDER, W. H. A comparison of numerical and physical modeling of stable atmospheric flow and dispersion around a cubical building. *Atmospheric Environment*, v. 30, p. 1327-1345, 1996.

## APÊNDICE A

Tabela A - 1: Informação contidas no arquivo BPIP.out para as simulações do experimento Sada e Sato (2002).

Direção considerada em relação à fonte (graus)	Altura do prédio em relação à fonte (m)	Largura do prédio em relação à fonte (m)	Comprimento do prédio em relação à fonte (m)	XBADJ <sup>1</sup> (m)	YBADJ <sup>2</sup> (m)
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
40	50,00	70,44	70,44	12,99	-57,45
50	50,00	70,44	70,44	22,23	-48,21
60	50,00	68,30	68,30	30,80	-37,50
70	50,00	64,09	64,09	38,43	-25,65
80	50,00	57,92	57,92	44,90	-13,02
90	50,00	50,00	50,00	50,00	0,00
100	50,00	57,92	57,92	44,90	13,02
110	50,00	64,09	64,09	38,43	25,65
120	50,00	68,30	68,30	30,80	37,50
130	50,00	70,44	70,44	22,23	48,21
140	50,00	70,44	70,44	12,99	57,45
150	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
160	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
170	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
180	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
190	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
210	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
220	50,00	70,44	70,44	-83,43	57,45
230	50,00	70,44	70,44	-92,67	48,21
240	50,00	68,30	68,30	-99,10	37,50
250	50,00	64,09	64,09	-102,51	25,65
260	50,00	57,92	57,92	-102,82	13,02
270	50,00	50,00	50,00	-100,00	0,00
280	50,00	57,92	57,92	-102,82	-13,02
290	50,00	64,09	64,09	-102,51	-25,65
300	50,00	68,30	68,30	-99,10	-37,50
310	50,00	70,44	70,44	-92,67	-48,21
320	50,00	70,44	70,44	-83,43	-57,45
330	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
340	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
350	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
360	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

1- Distância entre a chaminé e o centro da face frontal do prédio projetado, na mesma direção do vento.

2- Distância entre a chaminé e o centro da face frontal do prédio projetado, na direção transversal ao vento.

Tabela A - 2: Informação contidas no arquivo BPIP.out para as simulações do experimento Aubrun e Leiti (2004), representando o vento na direção 40°.

Direção considerada em relação à fonte (graus)	Altura do prédio em relação à fonte (m)	Largura do prédio em relação à fonte (m)	Comprimento do prédio em relação à fonte (m)	XBADJ <sup>1</sup> (m)	YBADJ <sup>2</sup> (m)
10	7,65	53,15	36,09	-16,83	-8,68
20	7,65	56,22	43,35	-18,97	-8,34
30	7,65	57,58	49,29	-20,53	-7,74
40	7,65	57,19	53,73	-21,47	-6,91
50	7,65	55,06	56,54	-21,76	-5,87
60	7,65	51,26	57,63	-21,38	-4,65
70	7,65	45,90	56,97	-20,36	-3,28
80	7,65	39,14	54,58	-18,72	-1,82
90	7,65	31,20	50,53	-16,50	-0,31
100	7,65	36,09	53,15	-17,90	1,22
110	7,65	43,35	56,22	-19,77	2,71
120	7,65	49,29	57,58	-21,05	4,12
130	7,65	53,73	57,19	-21,69	5,40
140	7,65	56,54	55,06	-21,66	6,51
150	7,65	57,63	51,26	-20,98	7,43
160	7,65	56,97	45,90	-19,66	8,13
170	7,65	54,58	39,14	-17,75	8,57
180	7,65	50,53	31,20	-15,29	8,76
190	7,65	53,15	36,09	-19,27	8,68
200	7,65	56,22	43,35	-24,38	8,34
210	7,65	57,58	49,29	-28,76	7,74
220	7,65	57,19	53,73	-32,26	6,91
230	7,65	55,06	56,54	-34,78	5,87
240	7,65	51,26	57,63	-36,25	4,65
250	7,65	45,90	56,97	-36,61	3,28
260	10,6	32,46	20,91	-47,93	21,06
270	10,6	30,51	16,04	-48,58	14,23
280	10,6	31,80	19,03	-51,93	6,97
290	10,6	33,17	23,54	-54,75	-0,50
300	10,6	33,53	27,33	-55,91	-7,96
310	10,6	32,88	30,29	-55,36	-15,17
320	7,65	56,54	55,06	-33,39	-6,51
330	7,65	57,63	51,26	-30,27	-7,43
340	7,65	56,97	45,90	-26,23	-8,13
350	7,65	54,58	39,14	-21,39	-8,57
360	7,65	50,53	31,20	-15,91	-8,76

1- Distância entre a chaminé e o centro da face frontal do prédio projetado, na mesma direção do vento.

2- Distância entre a chaminé e o centro da face frontal do prédio projetado, na direção transversal ao vento.

Tabela A - 3: Informação contidas no arquivo BPIP.out para as simulações do experimento Aubrun e Leitl (2004), representando o vento na direção 130°.

Direção considerada em relação à fonte (graus)	Altura do prédio em relação à fonte (m)	Largura do prédio em relação à fonte (m)	Comprimento do prédio em relação à fonte (m)	XBADJ <sup>1</sup> (m)	YBADJ <sup>2</sup> (m)
10	7,65	36,09	53,15	-17,90	1,22
20	7,65	43,35	56,22	-19,77	2,71
30	7,65	49,29	57,58	-21,05	4,12
40	7,65	53,73	57,19	-21,69	5,40
50	7,65	56,54	55,06	-21,66	6,51
60	7,65	57,63	51,26	-20,98	7,43
70	7,65	56,97	45,90	-19,66	8,13
80	7,65	54,58	39,14	-17,75	8,57
90	7,65	50,53	31,20	-15,29	8,76
100	7,65	53,15	36,09	-19,27	8,68
110	7,65	56,22	43,35	-24,38	8,34
120	7,65	57,58	49,29	-28,76	7,74
130	7,65	57,19	53,73	-32,26	6,91
140	7,65	55,06	56,54	-34,78	5,87
150	7,65	51,26	57,63	-36,25	4,65
160	7,65	45,90	56,97	-36,61	3,28
170	10,60	32,46	20,91	-47,93	21,06
180	10,60	30,51	16,04	-48,58	14,23
190	10,60	31,80	19,03	-51,93	6,97
200	10,60	33,17	23,54	-54,75	-0,50
210	10,60	33,53	27,33	-55,91	-7,96
220	10,60	32,88	30,29	-55,36	-15,17
230	7,65	56,54	55,06	-33,39	-6,51
240	7,65	57,63	51,26	-30,27	-7,43
250	7,65	56,97	45,90	-26,23	-8,13
260	7,65	54,58	39,14	-21,39	-8,57
270	7,65	50,53	31,20	-15,91	-8,76
280	7,65	53,15	36,09	-16,83	-8,68
290	7,65	56,22	43,35	-18,97	-8,34
300	7,65	57,58	49,29	-20,53	-7,74
310	7,65	57,19	53,73	-21,47	-6,91
320	7,65	55,06	56,54	-21,76	-5,87
330	7,65	51,26	57,63	-21,38	-4,65
340	7,65	45,90	56,97	-20,36	-3,28
350	7,65	39,14	54,58	-18,72	-1,82
360	7,65	31,20	50,53	-16,50	-0,31

1- Distância entre a chaminé e o centro da face frontal do prédio projetado, na mesma direção do vento.

2- Distância entre a chaminé e o centro da face frontal do prédio projetado, na direção transversal ao vento.

Tabela A - 4: Informação contidas no arquivo BPIP.out para as simulações do experimento Aubrun e Leiti (2004), representando o vento na direção 220°.

Direção considerada em relação à fonte (graus)	Altura do prédio em relação à fonte (m)	Largura do prédio em relação à fonte (m)	Comprimento do prédio em relação à fonte (m)	XBADJ <sup>1</sup> (m)	YBADJ <sup>2</sup> (m)
10	7,65	53,15	36,09	-19,27	8,68
20	7,65	56,22	43,35	-24,38	8,34
30	7,65	57,58	49,29	-28,76	7,74
40	7,65	57,19	53,73	-32,26	6,91
50	7,65	55,06	56,54	-34,78	5,87
60	7,65	51,26	57,63	-36,25	4,65
70	7,65	45,90	56,97	-36,61	3,28
80	10,60	32,46	20,91	-47,93	21,06
90	10,60	30,51	16,04	-48,58	14,23
100	10,60	31,80	19,03	-51,93	6,97
110	10,60	33,17	23,54	-54,75	-0,50
120	10,60	33,53	27,33	-55,91	-7,96
130	10,60	32,88	30,29	-55,36	-15,17
140	7,65	56,54	55,06	-33,39	-6,51
150	7,65	57,63	51,26	-30,27	-7,43
160	7,65	56,97	45,90	-26,23	-8,13
170	7,65	54,58	39,14	-21,39	-8,57
180	7,65	50,53	31,20	-15,91	-8,76
190	7,65	53,15	36,09	-16,83	-8,68
200	7,65	56,22	43,35	-18,97	-8,34
210	7,65	57,58	49,29	-20,53	-7,74
220	7,65	57,19	53,73	-21,47	-6,91
230	7,65	55,06	56,54	-21,76	-5,87
240	7,65	51,26	57,63	-21,38	-4,65
250	7,65	45,90	56,97	-20,36	-3,28
260	7,65	39,14	54,58	-18,72	-1,82
270	7,65	31,20	50,53	-16,50	-0,31
280	7,65	36,09	53,15	-17,90	1,22
290	7,65	43,35	56,22	-19,77	2,71
300	7,65	49,29	57,58	-21,05	4,12
310	7,65	53,73	57,19	-21,69	5,40
320	7,65	56,54	55,06	-21,66	6,51
330	7,65	57,63	51,26	-20,98	7,43
340	7,65	56,97	45,90	-19,66	8,13
350	7,65	54,58	39,14	-17,75	8,57
360	7,65	50,53	31,20	-15,29	8,76

1- Distância entre a chaminé e o centro da face frontal do prédio projetado, na mesma direção do vento.

2- Distância entre a chaminé e o centro da face frontal do prédio projetado, na direção transversal ao vento.

Tabela A - 5: Informação contidas no arquivo BPIP.out para as simulações do experimento Aubrun e Leiti (2004), representando o vento na direção 310°.

Direção considerada em relação à fonte (graus)	Altura do prédio em relação à fonte (m)	Largura do prédio em relação à fonte (m)	Comprimento do prédio em relação à fonte (m)	XBADJ <sup>1</sup> (m)	YBADJ <sup>2</sup> (m)
10	10,60	31,80	19,03	-51,93	6,97
20	10,60	33,17	23,54	-54,75	-0,50
30	10,60	33,53	27,33	-55,91	-7,96
40	10,60	32,88	30,29	-55,36	-15,17
50	7,65	56,54	55,06	-33,39	-6,51
60	7,65	57,63	51,26	-30,27	-7,43
70	7,65	56,97	45,90	-26,23	-8,13
80	7,65	54,58	39,14	-21,39	-8,57
90	7,65	50,53	31,20	-15,91	-8,76
100	7,65	53,15	36,09	-16,83	-8,68
110	7,65	56,22	43,35	-18,97	-8,34
120	7,65	57,58	49,29	-20,53	-7,74
130	7,65	57,19	53,73	-21,47	-6,91
140	7,65	55,06	56,54	-21,76	-5,87
150	7,65	51,26	57,63	-21,38	-4,65
160	7,65	45,90	56,97	-20,36	-3,28
170	7,65	39,14	54,58	-18,72	-1,82
180	7,65	31,20	50,53	-16,50	-0,31
190	7,65	36,09	53,15	-17,90	1,22
200	7,65	43,35	56,22	-19,77	2,71
210	7,65	49,29	57,58	-21,05	4,12
220	7,65	53,73	57,19	-21,69	5,40
230	7,65	56,54	55,06	-21,66	6,51
240	7,65	57,63	51,26	-20,98	7,43
250	7,65	56,97	45,90	-19,66	8,13
260	7,65	54,58	39,14	-17,75	8,57
270	7,65	50,53	31,20	-15,29	8,76
280	7,65	53,15	36,09	-19,27	8,68
290	7,65	56,22	43,35	-24,38	8,34
300	7,65	57,58	49,29	-28,76	7,74
310	7,65	57,19	53,73	-32,26	6,91
320	7,65	55,06	56,54	-34,78	5,87
330	7,65	51,26	57,63	-36,25	4,65
340	7,65	45,90	56,97	-36,61	3,28
350	10,60	32,46	20,91	-47,93	21,06
360	10,60	30,51	16,04	-48,58	14,23

1- Distância entre a chaminé e o centro da face frontal do prédio projetado, na mesma direção do vento.

2- Distância entre a chaminé e o centro da face frontal do prédio projetado, na direção transversal ao vento.