

DISPERSÃO DE POLUENTES NA ATMOSFERA

G4

João Paulo

Vanessa

Tiago

Lars

INTRODUÇÃO

A concentração de uma determinada substância na atmosfera varia no tempo e no espaço em função de reações químicas e/ou fotoquímicas, dos fenômenos de transporte, de fatores meteorológicos (ventos, turbulências e inversões térmicas) e da topografia da região. Para isso, as condições meteorológicas têm um papel determinante na descrição físico-química do transporte de poluentes entre a fonte e o receptor.

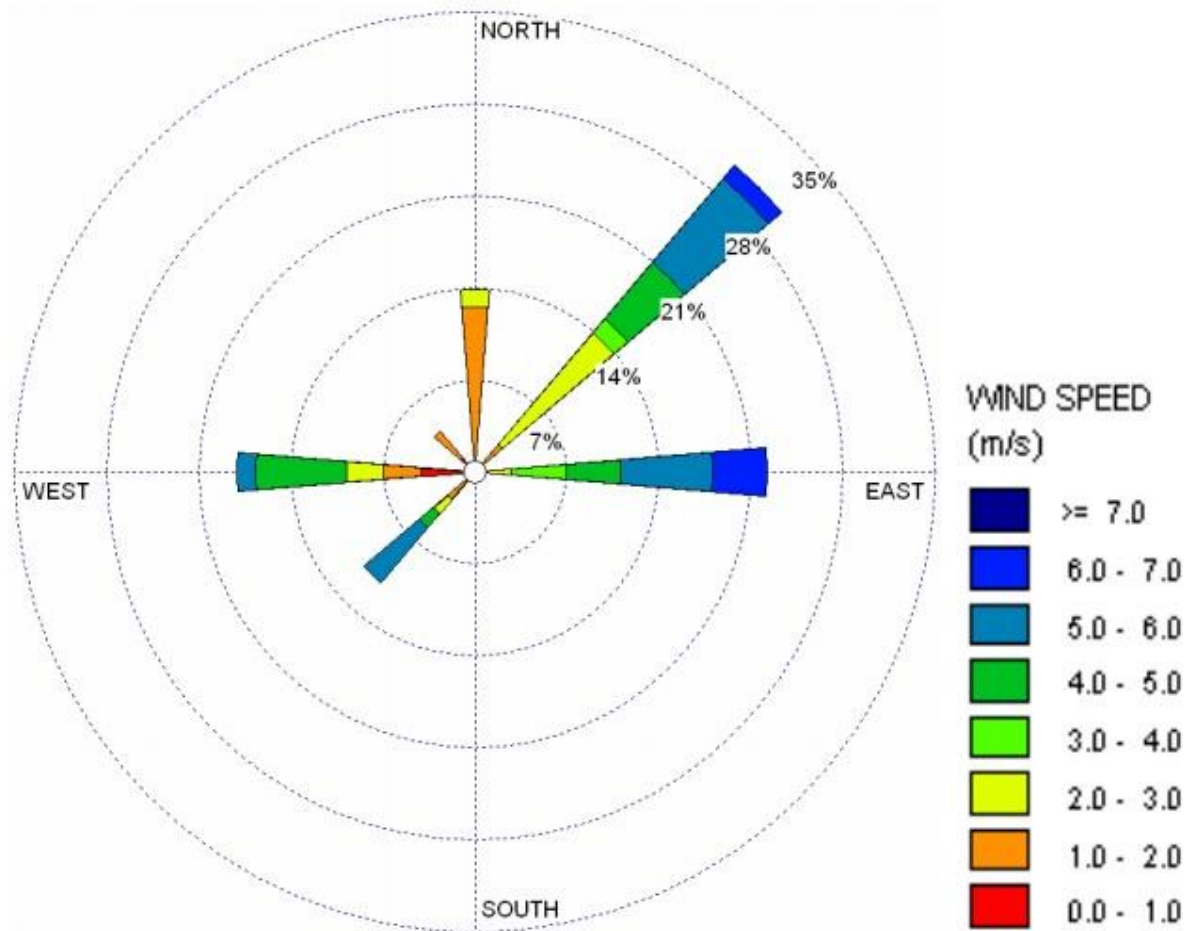
ESCALAS DE MOVIMENTO

- a) **Escala sinótica** - A essa escala estão associados os movimentos do ar resultantes da circulação geral da atmosfera, interagindo com as massas de ar, tendo extensão horizontal que varia entre 100 e 3.000 km.
- b) **Mesoescala** - São os movimentos que incluem as brisas marítimas e terrestres, circulação dentro de vales e os fenômenos do efeito de ilhas de calor. A extensão horizontal dessa escala é da ordem de 100 km.
- c) **Microescala** - Incluem os movimentos resultantes dos efeitos aerodinâmicos das edificações das cidades e dos parques industriais, rugosidades da superfície e cobertura vegetal. Esses movimentos são responsáveis pelo transporte e difusão dos poluentes em um raio horizontal inferior a 10 km.

VENTO

O vento é a deslocação de gases atmosféricos em grande escala causada por diferenças na pressão atmosférica. Quando uma região da Terra aquece, a pressão atmosférica nessa região diminui e o ar eleva-se. Isto cria uma diferença na pressão atmosférica, fazendo com que o ar envolvente, mais frio, se desloque da área de maior pressão para a área de menor pressão.





Rosa dos Ventos de 29/08/06, em Tubarão, SC.

TRANSFORMAÇÕES ADIABÁTICAS

Um gás realiza uma transformação adiabática quando a passagem do estado inicial ao final é determinada apenas pela criação de sua energia interna, sem receber ou ceder calor.

A temperatura na atmosfera

A variação vertical de temperatura é muito mais violenta que a variação horizontal. O estudo dos gradientes verticais de temperatura apresenta grande interesse, pois eles condicionam a possibilidade de ocorrência e o sentido dos movimentos verticais de ar na atmosfera. Quando o ar experimenta um processo de ascensão ou de descenso, sua temperatura é determinada pelo gradiente adiabático.

GRADIENTE VERTICAL DA ADIABÁTICA SECA

É o fenômeno da expansão ou compressão do ar seco ou úmido. Se um volume de ar seco ou não saturado for elevado, sua pressão diminui e sua temperatura baixará devido a expansão. Se o processo for adiabático a variação de temperatura será de cerca de $1^{\circ}\text{C} / 100\text{m}$. Se assumirmos que não existe troca de calor entre o meio e esse pequeno volume, podemos definir a taxa na qual o resfriamento ocorre durante a ascensão como **gradiente vertical da adiabática seca** ou **Adiabatic Lapse Rate**.

Gradiente vertical da adiabática seca

$$\frac{\Delta T}{\Delta z} = 1,0^{\circ}C / 100m$$

Gradiente vertical da adiabática saturada

$$\frac{\Delta T}{\Delta z} = 0,6^{\circ}C / 100m$$

Gradiente vertical de temperatura

$$\frac{\Delta T}{\Delta z} = X^{\circ}C / 100m$$

A distribuição atual da temperatura na vertical é conhecida como “gradiente vertical de temperatura”. Consiste no decréscimo da temperatura com a altura que tem lugar dentro de uma atmosfera em repouso.

CAMADA LIMITE PLANETÁRIA / DE MISTURA

A maioria dos fenômenos de poluição do ar ocorrem na parte mais baixa da atmosfera, ou CAMADA LIMITE PLANETÁRIA (ou boundary layer ou PBL). Esta camada (que pode ser chamada tb de camada de atrito - friction layer) é definida com a "região na qual a atmosfera sofre os efeitos oriundos da superfície através de trocas verticais de momento, calor e mistura de massas de ar" (Zannetti, 1990). A difusão e o transporte dos poluentes à escala micrometeorológica e mesmo mesoescala se produzem ao nível desta camada limite (DE MELO LISBOA, 1996).

Ela pode ser dividida em três subcamadas principais:

- A camada próxima ao chão (z_0) . Esta camada é conhecida como "camada de rugosidade". Nesta camada a viscosidade molecular e os fluxos turbulentos são importantes.
- A camada de superfície, de z_0 até h_s , onde h_s varia de cerca de 10 a 200 m. Nesta camada os fluxos de momento, calor e mistura são assumidos independente da altura e o efeito de Coriolis é geralmente desprezível
- A camada de transição, ou de Ekman, de h_s até z_i , onde z_i varia de cerca de 100 a 20000 metros.

ESTABILIDADE E INSTABILIDADE DA ATMOSFERA

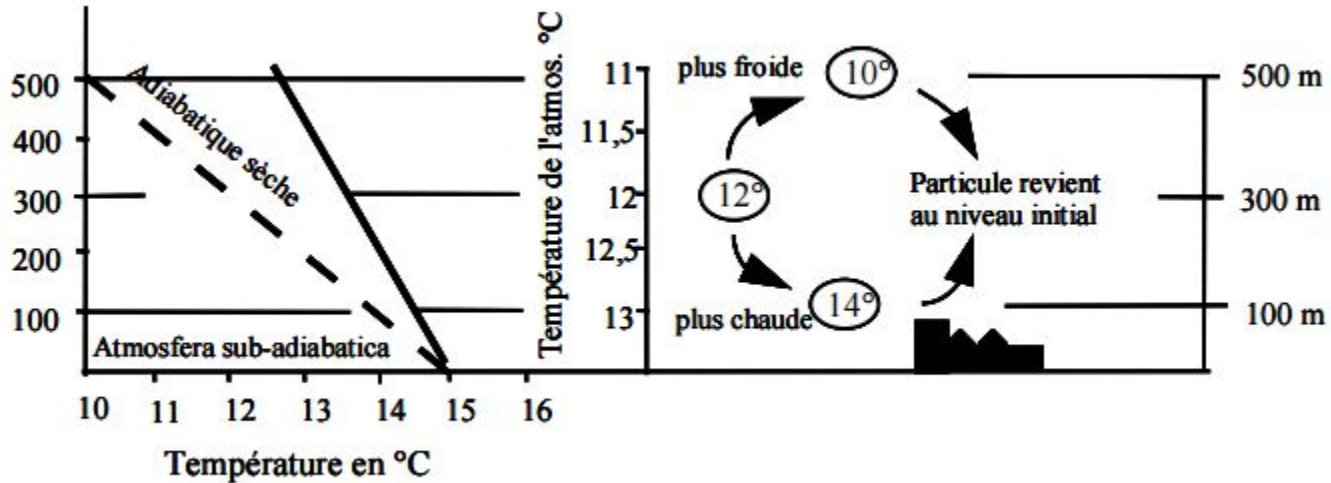
De um modo geral, a estabilidade da atmosfera é a sua tendência a resistir ou intensificar o movimento vertical, e a turbulência existente.

Uma camada de ar pode ser considerada:

- Estável
- Instável
- Neutra

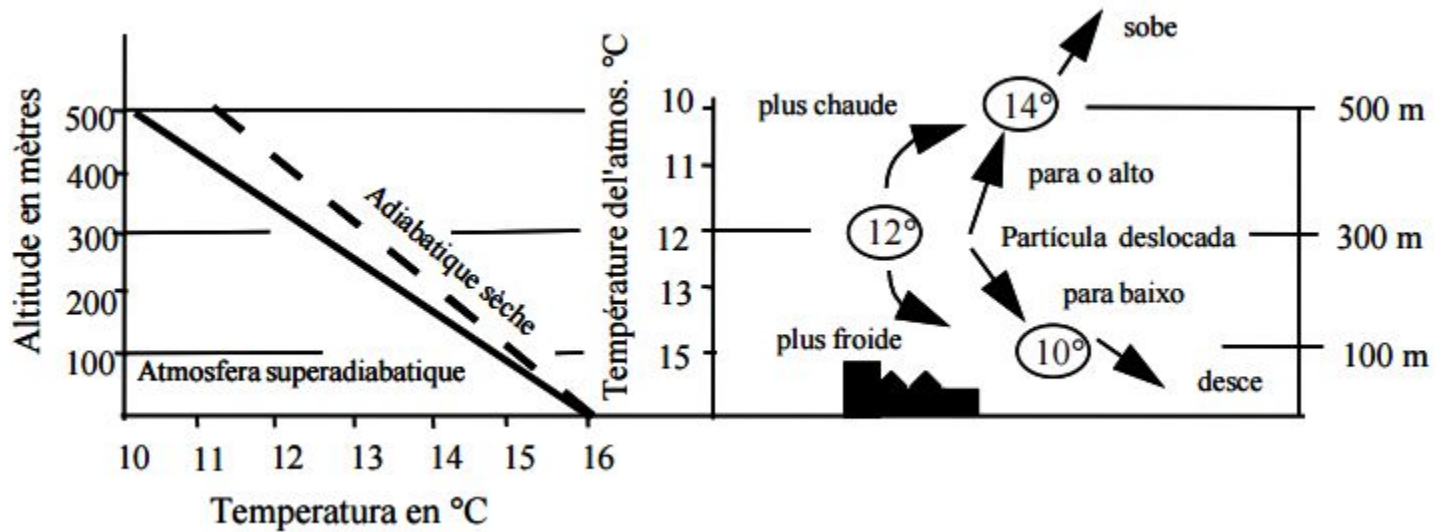
ESTABILIDADE

Uma camada de ar não saturado é dita estável quando quando seu gradiente térmico vertical é inferior ao gradiente da adiábata seca.



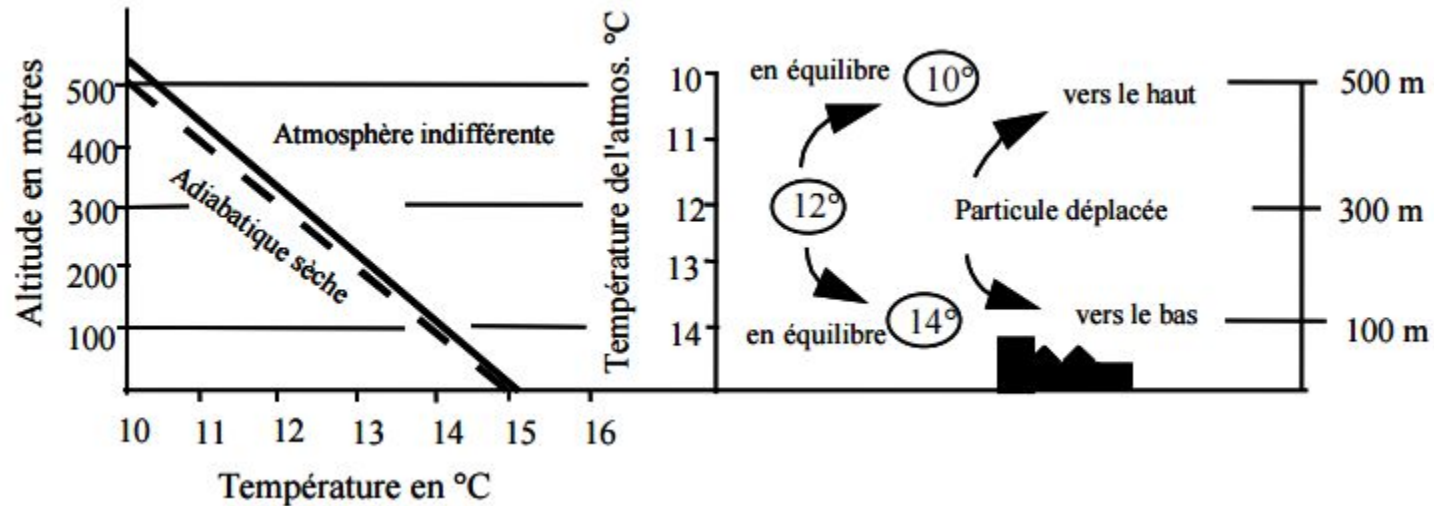
INSTABILIDADE

Uma camada de ar não saturado é dita instável quando quando seu gradiente térmico vertical for maior que o gradiente da adiábática seca.



ATMOSFERA NEUTRA

Quando o decréscimo da temperatura vertical é muito próximo do gradiente adiabático seco, diz-se que a atmosfera é neutra.



INVERSÃO TÉRMICA

O movimento vertical do ar está governado pelo perfil de temperaturas da troposfera. Normalmente, a temperatura diminui com a altura. O ar mais próximo da superfície terrestre é aquecido por esta, se expande e torna-se menos denso que o ar mais frio que está acima. O ar aquecido e menos denso acende através do ar mais frio, que o renova. Este ar novo também se aquece em contato com o solo, expande e acende. Deste modo criam as correntes de ar e os contaminantes se dispersam.

As condições meteorológicas podem causar uma inversão no esquema normal de variação da temperatura na troposfera. O resultado é a formação de uma “capa de inversão”. O efeito resultante é a colocação de uma massa de ar frio por baixo de outra de ar mais quente. A presença de uma capa de inversão impede a circulação atmosférica vertical, já que o ar mais frio não pode acender através da capa quente de inversão - Figura 8. 10. Os contaminantes lançados no ar são confinados na capa inferior da inversão. Estas situações podem permanecer invariáveis durante dias, até que as condições atmosféricas mudem e a capa de inversão se destrua.

INVERSÃO TÉRMICA

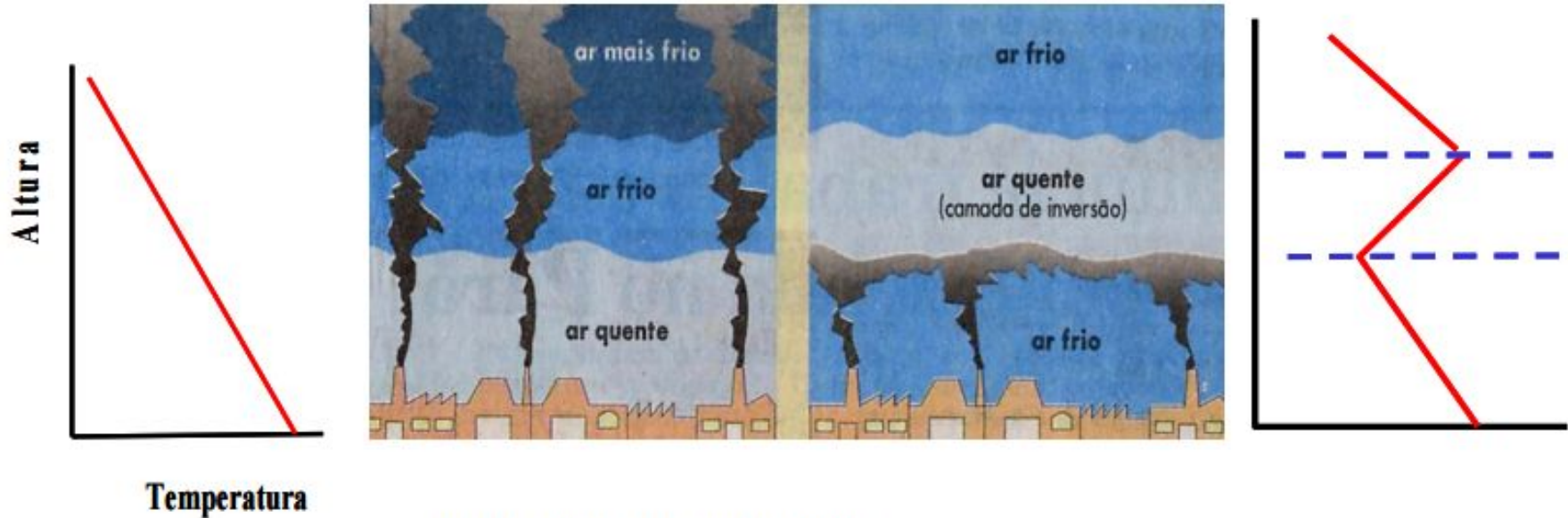
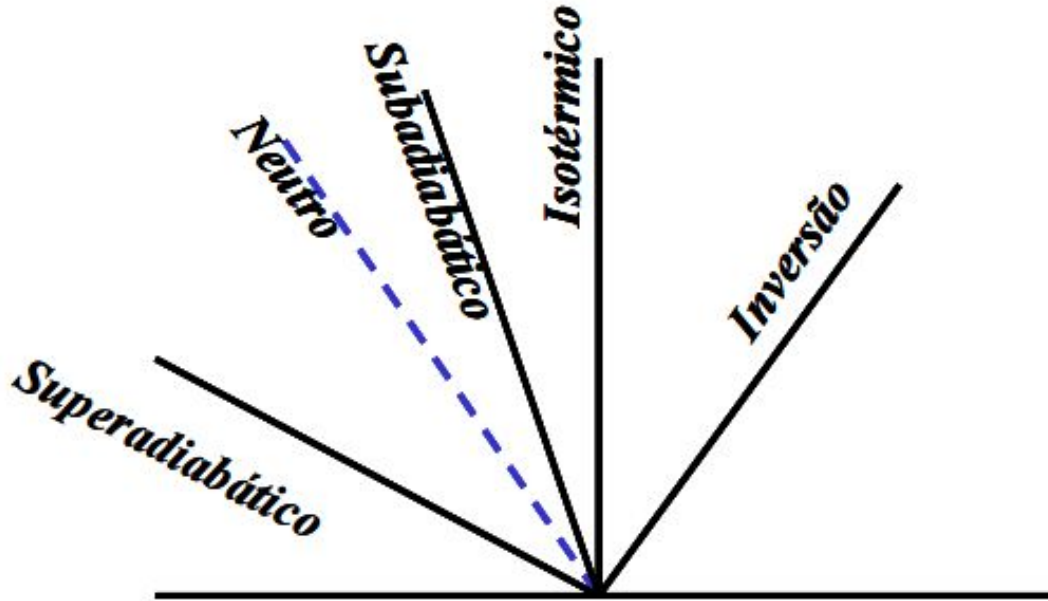


Figura 8. 9 - Inversão térmica.

EXEMPLOS TÍPICOS DE GRADIENTES VERTICAIS DE TEMPERATURA



Quadro 8. 2 - Categorias de estabilidade atmosférica.

Muito Instável	A
Moderamente Instável	B
Levemente Instável	C
Neutra	D
Levemente Estável	E
Moderadamente Estável	F

Quadro 8. 3 - Características das condições atmosféricas (TURNER, 1994).

Condição atmosférica	Condições típicas	Fluxo de calor	Estrutura térmica	Natureza da turbulência
Instável	Meio dia Céu Limpo Ventos leves	Para cima	Super adiabático	Horizontal e vertical
Neutro	Ventos ou nublado ou transição	Zero	Próximo ao Adiabático seco	Meio alcance
Estável	Noite Céu limpo Ventos leves	Para baixo	Próximo ao isotérmico ou Inversão	Vertical

DISPERSÃO DE POLUENTES NA ATMOSFERA

Plumas

O comportamento final de uma pluma ao sair de uma chaminé pode ser subdividido em duas componentes principais (LORA, 2000):

- Ascensão da pluma
- Difusão e transporte da pluma

Ao ser emitida a pluma \Rightarrow tendência ascensional ditadas por parâmetros do próprio efluente, por dimensões da chaminé e pela influência dos parâmetros meteorológicos no instante da emissão.

Logo a seguir, adquirirá um movimento transversal, acompanhado de difusão em torno de sua linha de centro, que caracteriza a componente de difusão e transporte - Figura 8. 21. Portanto, estuda-se essas duas componentes separadamente.

Pluma ideal \Rightarrow • partículas de maior peso começam a cair sobre o solo;

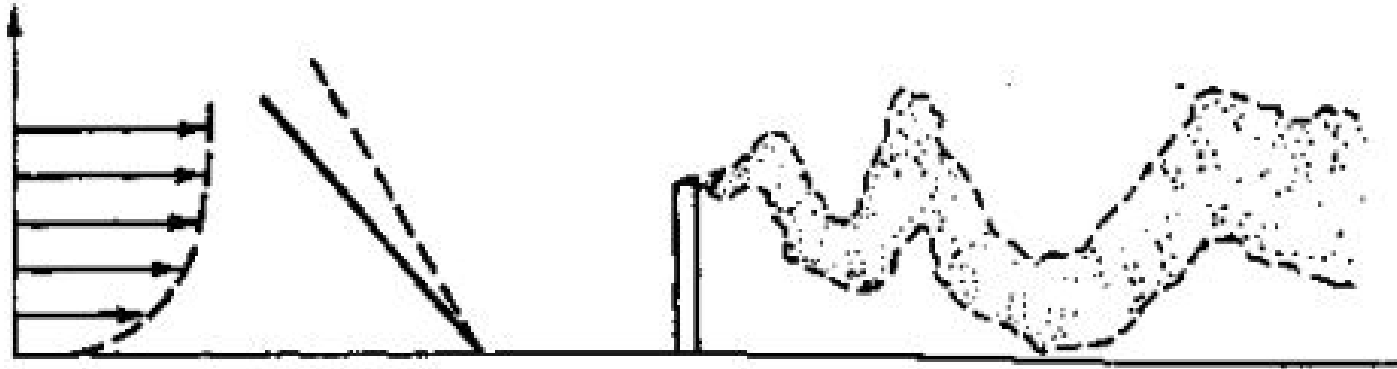
- partículas mais finas continuam a subir até perder sua energia cinética e cair ao solo;
- restam as partículas que se comportam como gás e se adaptam ao processo de dispersão deste.



Figura 8. 21 - Tendência ascensional de uma pluma.

TIPOS DE PLUMA

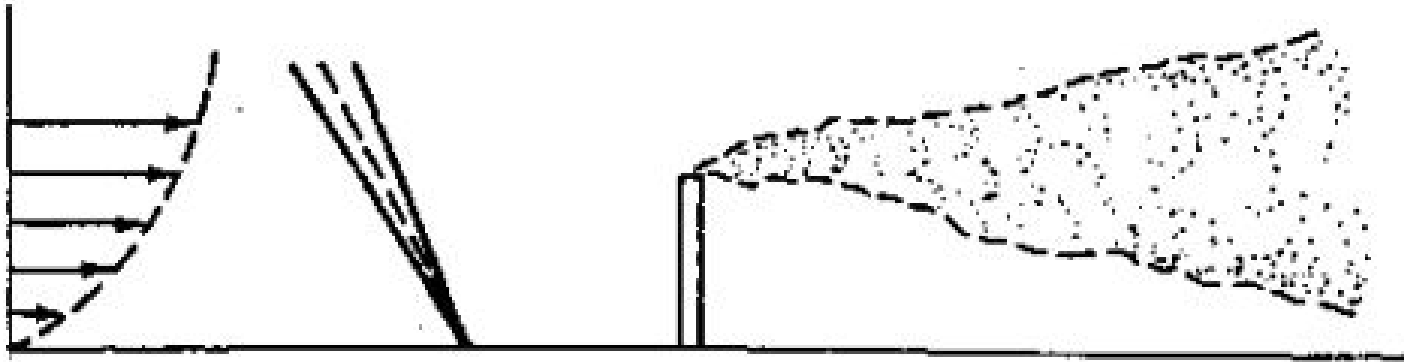
Serpenteante - atmosfera instável



**Serpenteante
(looping)**

TIPOS DE PLUMA

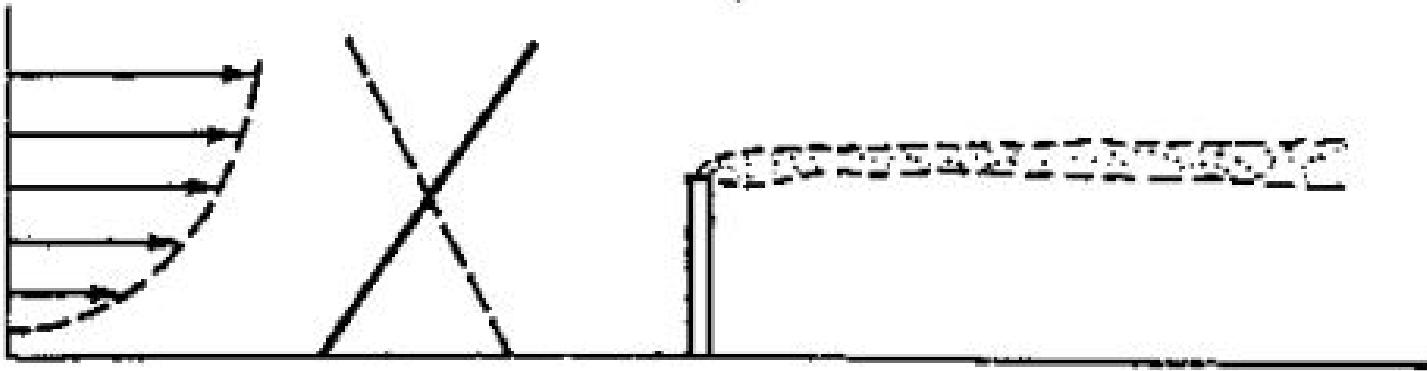
Cônico - atmosfera neutra



**Cônico
(Coning)**

TIPOS DE PLUMA

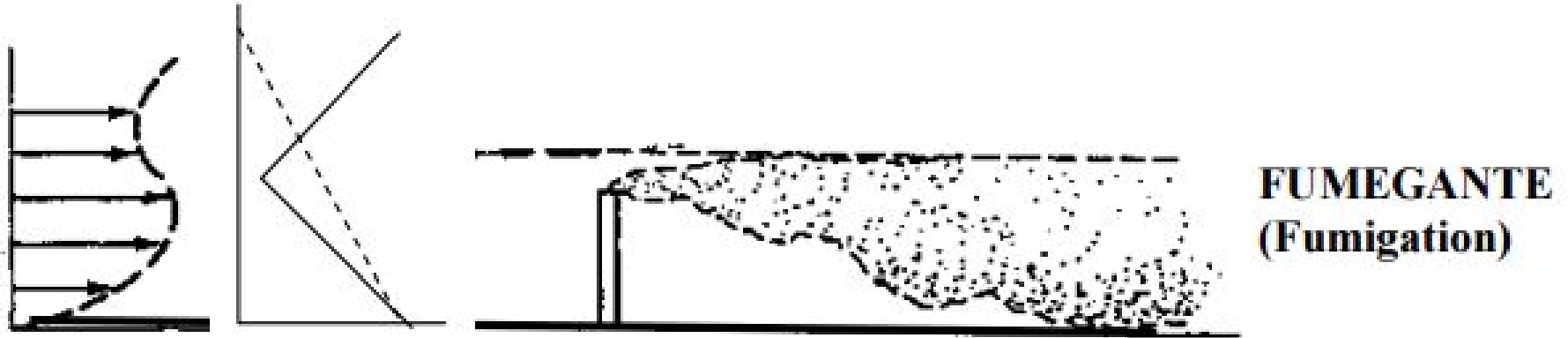
Tubular - grande estabilidade atmosférica



**Tubular
(Fanning)**

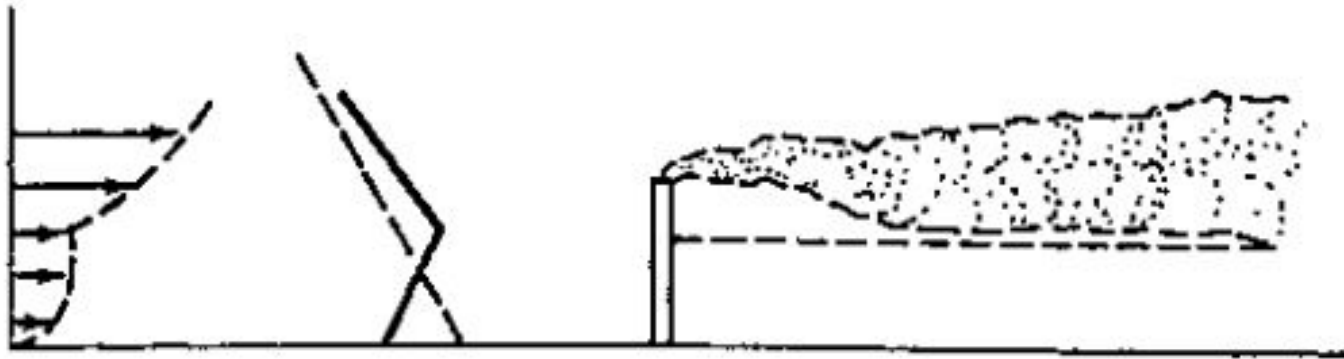
TIPOS DE PLUMA

Fumegante - Base da camada de inversão acima do topo da chaminé



TIPOS DE PLUMA

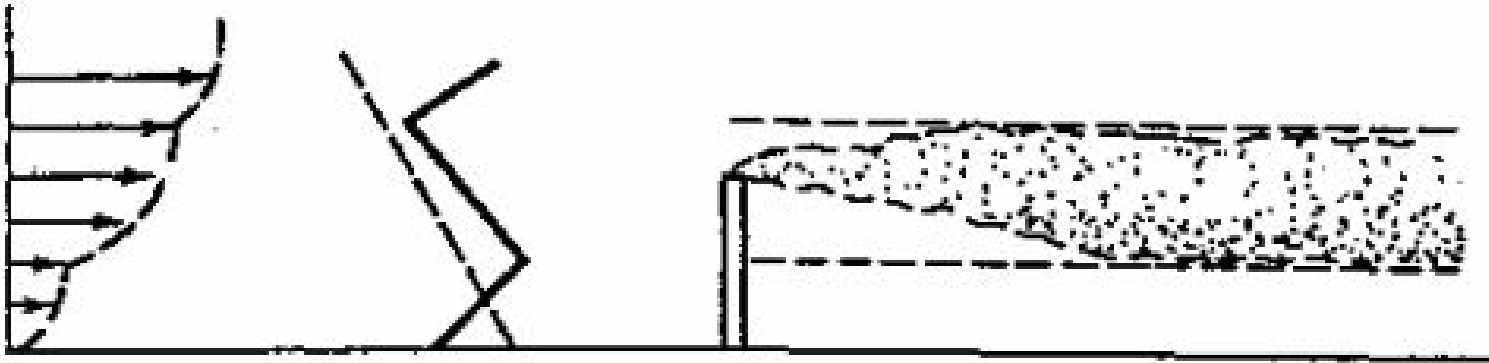
Antifumegante - Base da camada de inversão abaixo do topo da chaminé



**ANTIFUMEGANTE
(Lofting)**

TIPOS DE PLUMA

Trapping - pluma presa entre duas camadas de inversão



Trapping

Quadro 8. 7 - Condições para dispersão dos poluentes atmosféricos.

	Favorável	Desfavorável
Chaminé alta	✓	
Topografia acidentada (vale)		✓
Topografia plana	✓	
Ventos	✓	
Concentração de fontes		✓
Concentração de edificações		✓
Gradiente de temperatura estável (Inversão térmica)		✓
Gradiente de temperatura instável	✓	

Há três fatores que influenciam o comportamento de uma pluma:

- Os dependentes da chaminé (Características da fonte emissora)

⇒ **Características da fonte emissora**

- Altura física da fonte emissora: representa a altura real da fonte emissora (ou altura geométrica);
- Altura de elevação da pluma: corresponde à altura até à qual se verifica a elevação da pluma a partir da fonte emissora (ou sobre-elevação);
- Altura efetiva da fonte emissora: é dada pela soma das duas características anteriores (ou altura efetiva da chaminé);
- Diâmetro da fonte emissora;
- Forma da chaminé;

- Os dependentes das condições meteorológicas e do meio

⇒ **Condições meteorológicas e do meio**

As informações meteorológica e do meio são necessárias para prever o transporte, a dispersão e a depleção dos poluentes. Dentro desta categoria destacam-se os seguintes fatores:

- Temperatura atmosférica: quanto maior a temperatura atmosférica, maior será a taxa de evaporação do poluente da sua fonte emissora para o ar circundante;
- Velocidade do vento: quanto maior a velocidade do vento, maior a taxa de dispersão da pluma. A extensão da área geográfica coberta pela pluma encontra-se diretamente relacionada com este fator;
- Direção do vento: determina quais as áreas geográficas que serão afetadas pela pluma de poluentes emitida;
- Estabilidade da atmosfera (gradiente vertical temperatura): interfere com o grau de diluição dos poluentes;
- Tipo do terreno e edifícios próximos ao foco de emissão susceptíveis de criar turbulências mecânicas;
- rugosidade do terreno;
- Focos locais de calor.

- Os dependentes exclusivamente do poluente (propriedades físicas e químicas)

⇒ **Características dos poluentes**

Ao implementar-se um modelo de dispersão devem ser levadas em contas as seguintes características dos poluentes:

- Taxa de emissão: deve ser conhecida a quantidade de poluente que está a ser emitida num dado período de tempo;
- Temperatura a que o poluente está a ser emitido (Temperatura dos gases);
- Velocidade a que o poluente está a ser emitido (velocidade de emissão dos gases);
- Composição do efluente

CÁLCULO DE ASCENSÃO DA PLUMA

Para simplificar o tratamento da dispersão, é conveniente assumir que a dispersão inicia em uma altura fictícia acima da fonte, em vez de subir e dispersar como realmente ocorre. Esta altura fictícia é chamada de “altura efetiva da chaminé”.

A tendência ascensional da pluma ao sair de uma chaminé, cria aquilo que chamamos de altura de pluma efetiva – Figura 8. 31: H_{ef}

$$H_{ef} = h_g + \Delta h$$

onde, h_g \Rightarrow altura geométrica da chaminé (altura física da chaminé)
 Δh \Rightarrow ascensão da pluma (altura de elevação da pluma em relação ao topo da chaminé)

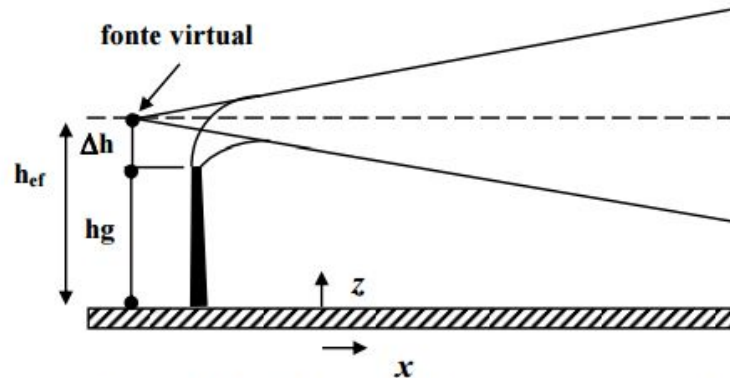


Figura 8. 31 – Altura efetiva de emissão (Δh) e fonte virtual.

A altura efetiva da chaminé é definida como a altura na qual a pluma tornar-se passiva e passa a seguir o movimento do ar atmosférico.

Correção da velocidade do vento no Topo da Chaminé:

A velocidade do vento no topo da chaminé pode ser estimada por :

$$V_{\text{chaminé}} / V_{\text{medida}} = (h_{\text{chaminé}} / h_{\text{anemômetro}})^p$$

onde, v_{medida} é a velocidade do vento medida na altura $h_{\text{anemômetro}}$ do anemômetro e $h_{\text{chaminé}}$ é altura física da chaminé. O valor do expoente “p” depende do estado atmosférico presente, os valores utilizados nos cálculos são apresentados no Quadro 5. Como a altura padrão para medida do vento é 10 metros acima do nível do solo, a equação anterior pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$V_{z_1} = \left(\frac{z_1}{10}\right)^p \cdot V_{z_2}$$

Tabela 8.1 - Expoente “p” X Classes de Estabilidade Atmosférica.

Classe de Estabilidade Atmosférica	Expoente “p”
A (muito instável)	0.10
B (mod. instável)	0.15
C (lev. Instável)	0.20
D (neutro)	0.25
E (mod. Estável)	0.25
F (muito estável)	0.30

Há algumas fórmulas mais comuns para estimar a elevação da pluma, que consideram os principais fatores que influenciam o processo

Quadro 8. 8 - Fatores que influenciam na elevação da pluma.

Os fatores de emissão	Os fatores meteorológicos
• a vazão do gás efluente	• velocidade do vento
• sua temperatura no topo da chaminé	• temperatura do ar
• diâmetro da chaminé	• pressão atmosférica
• pressão do gás na chaminé	• estabilidade atmosférica

FÓRMULA DE DAVIDSON-BRYANT

FÓRMULA DE DAVIDSON-BRYANT:

$$\Delta h = d \left(\frac{V_s}{\bar{u}} \right)^{1,4} \times \left(1 + \frac{\Delta t}{T_s} \right)$$

onde, $d \Rightarrow$ diâmetro interno da chaminé (m);

$V_s \Rightarrow$ velocidade do efluente na saída da chaminé ($m.s^{-1}$);

$\bar{u} \Rightarrow$ velocidade média do vento medida a 10 metros ($m.s^{-1}$);

$\Delta t \Rightarrow$ temperatura do gás na chaminé menos a temperatura ambiente ($K = ^\circ C + 273$);

$T_s \Rightarrow$ temperatura do gás na saída da chaminé (K).

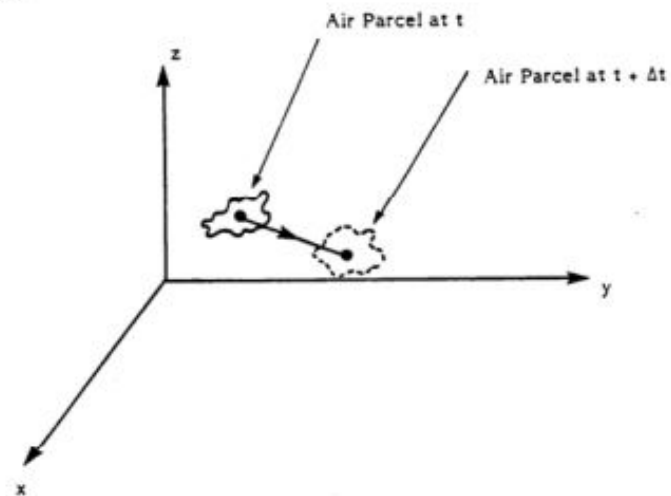
DISPERSÃO HORIZONTAL

A dispersão do ar poluído pode ser numericamente simulada por várias técnicas, as quais são divididas em duas categorias:

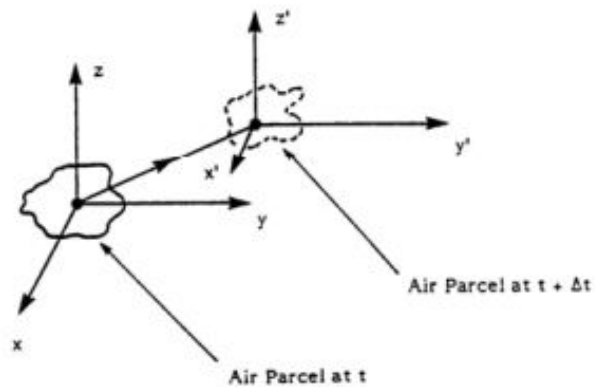
- Modelos Eulerianos
- Modelos Lagrangianos

A diferença básica entre as duas resoluções é que o sistema de referência Euleriano é fixo com respeito à Terra, enquanto que o sistema de referência Lagrangiano segue o movimento atmosférico médio.

(a)



(b)



Sistemas de referências
Euleriano e lagrangiano.
ZANETTI (1990)

O MODELO GAUSSIANO

O modelo gaussiano: os modelos de dispersão gaussianos podem ser vistos como Eulerianos e Lagrangianos. Constituem a maioria dos modelos de poluição atmosférica e são baseados numa equação simples que descreve um campo de concentração tri-dimensional, gerado por uma fonte puntual sobre condições de emissão e meteorológicas estacionárias (Zannetti, 1990).

O modelo de dispersão gaussiano é a abordagem mais aceita para explicar o comportamento da pluma em períodos de tempo relativamente pequenos. Esta aceitação deve-se essencialmente ao fato de se afirmar que a variação da concentração de poluentes ao nível do solo, à medida que nos afastamos da fonte emissora, pode ser expressa por uma curva gaussiana.

O procedimento de cálculo da modelação da dispersão de poluentes atmosféricos é baseado nos princípios gaussianos de dispersão, em que a pluma sofre dispersão em planos horizontais e verticais tomando a forma de uma curva de Gauss, com um máximo no centro da pluma (KAWANO, 2000).

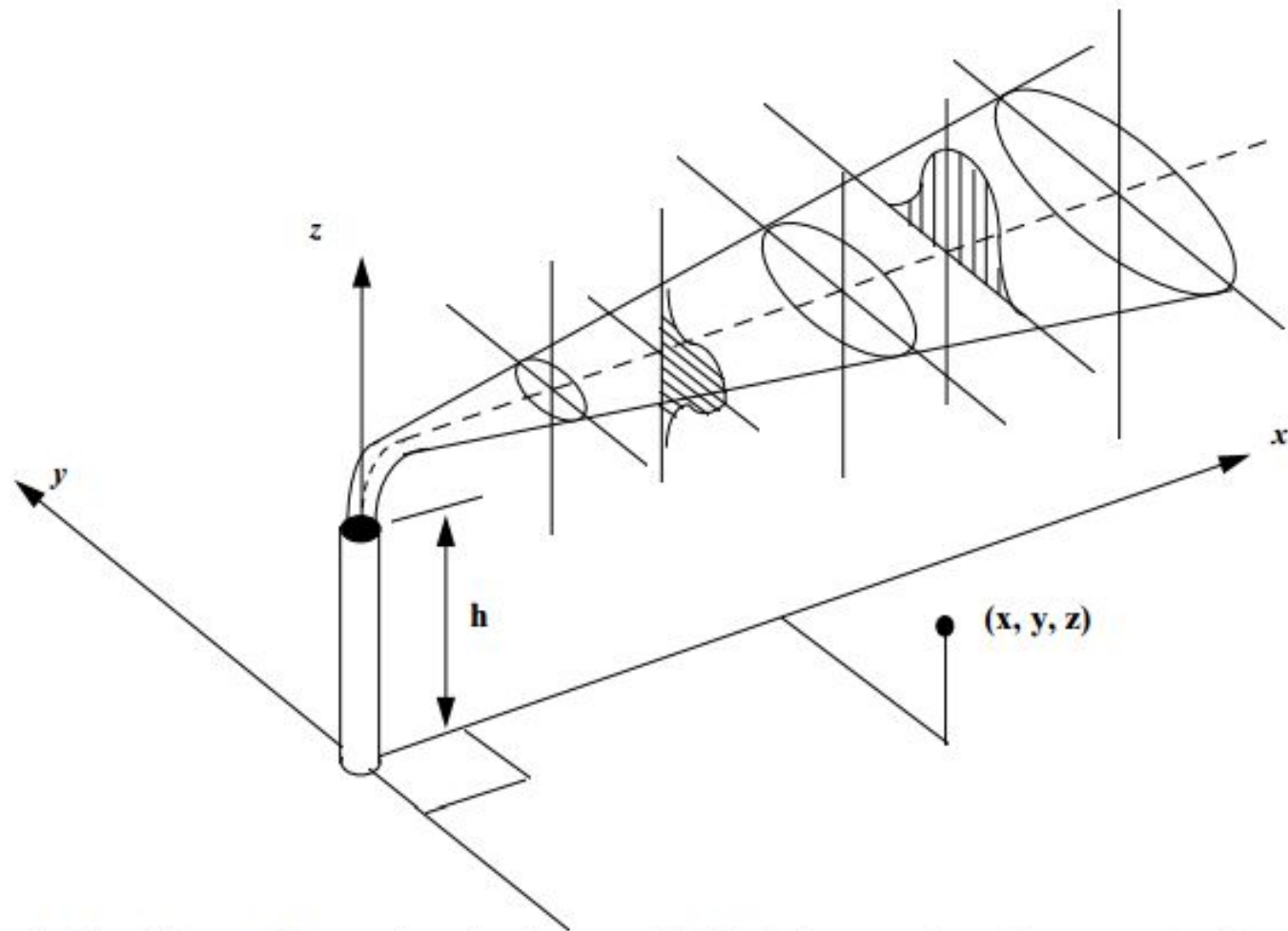


Figura 8. 34 - Sistema de coordenadas de uma distribuição gaussiana de concentrações.