



ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA – EEL/USP
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL
POLUIÇÃO AMBIENTAL II



MODELOS MATEMÁTICOS DE DISPERSÃO DOS POLUENTES NA ATMOSFERA

PROF. Paulo Ricardo Amador Mendes



MODELOS DE DISPERSÃO

Modelo de dispersão é a descrição matemática dos processos de difusão turbulenta e transporte que ocorrem na atmosfera.

A relação entre a emissão do poluente e a concentração medida em um ponto receptor específico é uma função das **condições meteorológicas e da relação espacial** entre a fonte e o receptor.

Os dados de entrada necessários para os modelos incluem os parâmetros meteorológicos, de fonte e de receptor.

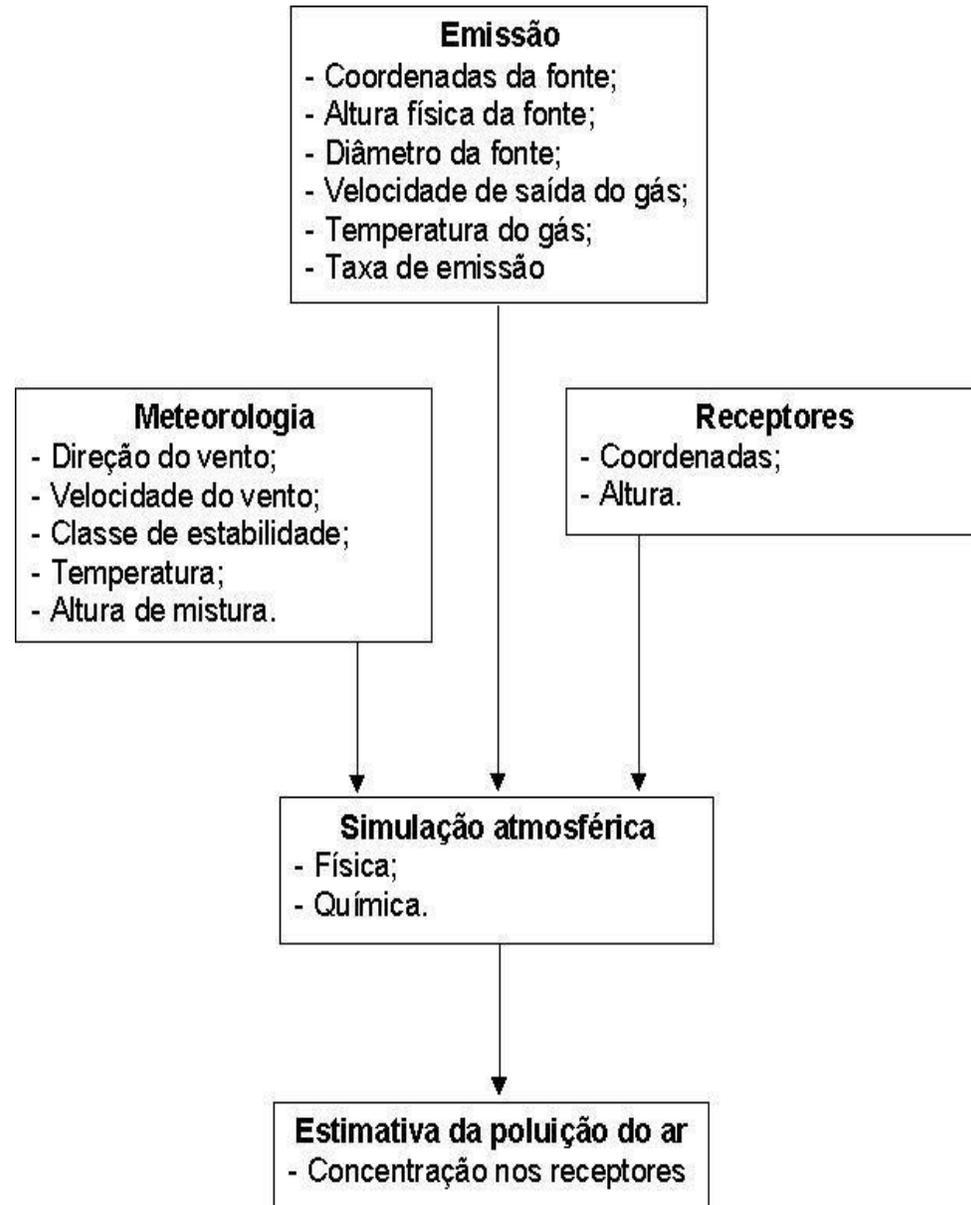
PRINCIPAIS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS QUE AFETAMA DISPERSÃO

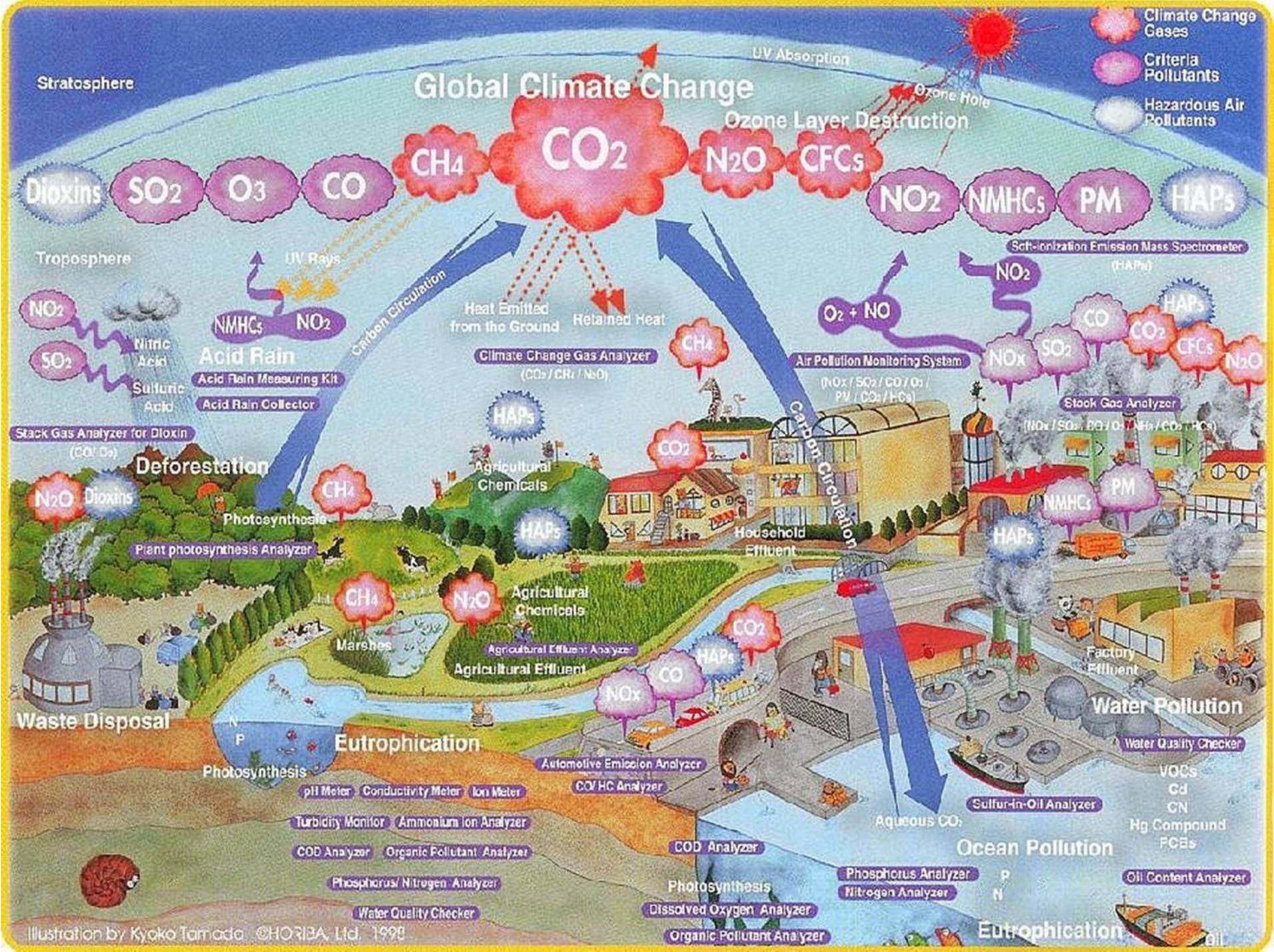
- **Direção e velocidade predominante dos ventos**
- **Temperatura e pressão atmosféricas**
- **Pluviosidade**
- **Nebulosidade**

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS FONTES EMISSORAS

- **Localização da fonte**
- **Quantidade de poluentes emitidos**
- **Temperatura e velocidade de saída dos gases**
- **Altura da chaminé**

ESTRUTURA DOS MODELOS DE DISPERSÃO

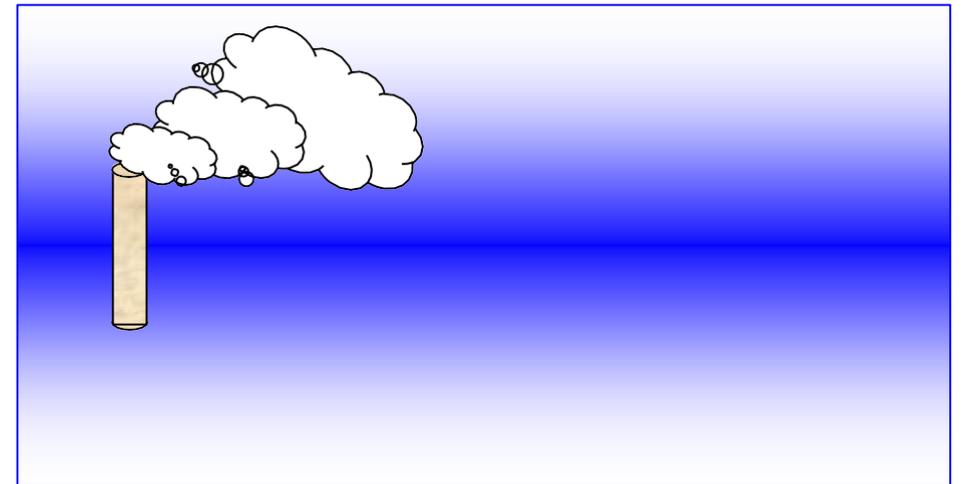
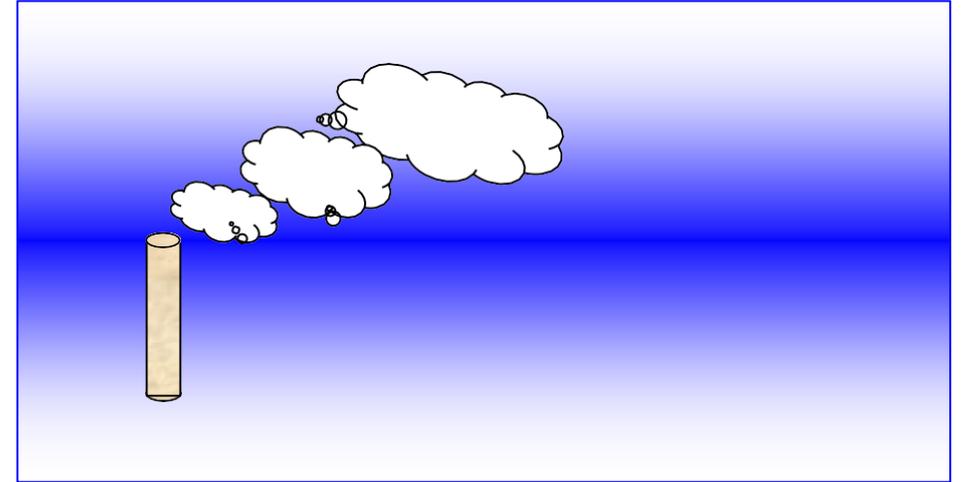




COMPORTAMENTO DA PLUMA

- A emissão de poluentes pode ser dividida em dois tipos básicos: podem ser liberações descontínuas conhecidas como “puff” ou liberações contínuas conhecidas como “plumas”.

- A concentração dos poluentes na atmosfera depende parcialmente da fonte, e em grande parte é influenciada pelas condições meteorológicas e a configuração do terreno.

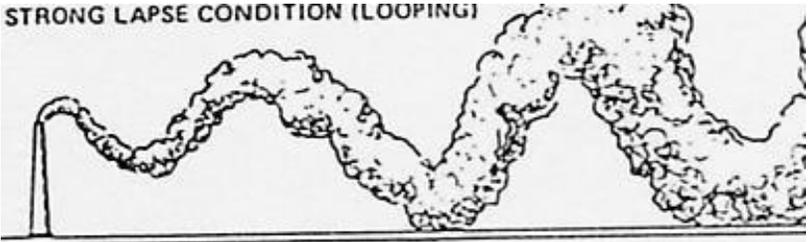


Plumas

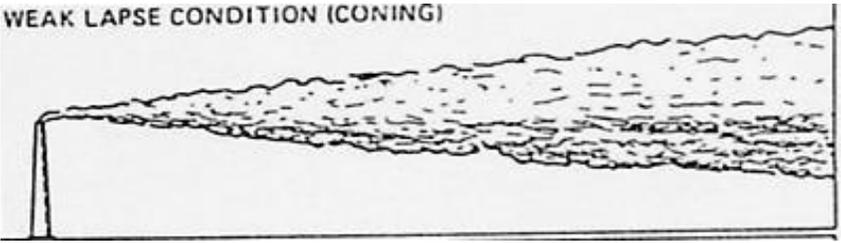
- O comportamento final de uma pluma ao sair de uma chaminé pode ser subdividido em duas componentes principais:
 - Ascensão da pluma
 - Difusão e transporte da pluma

- ***Pluma ideal:***
 - 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.

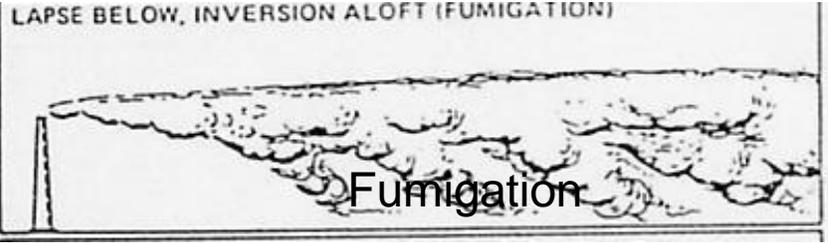
Tipos de Plumas



Looping



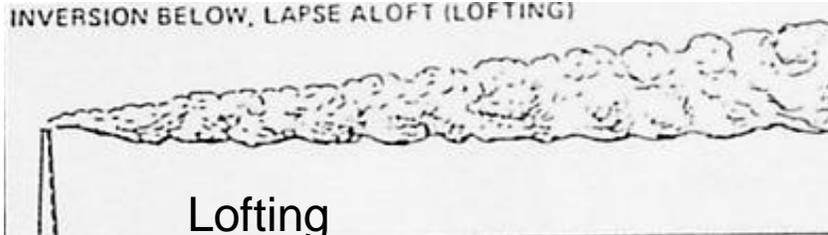
Coning



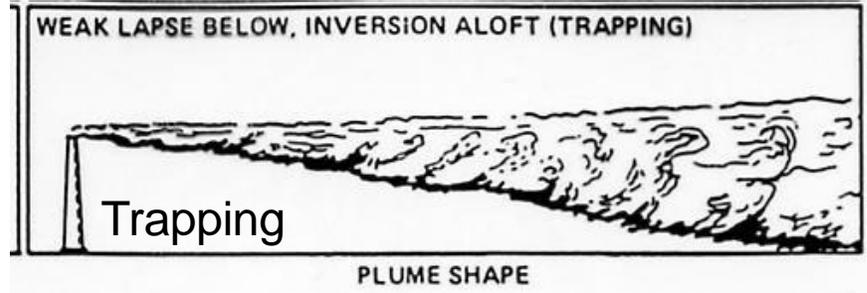
Fumigation



Fanning



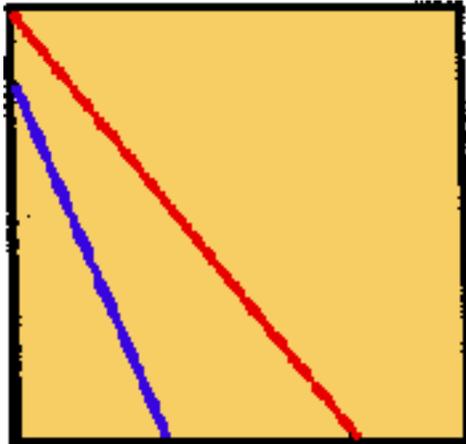
Lofting



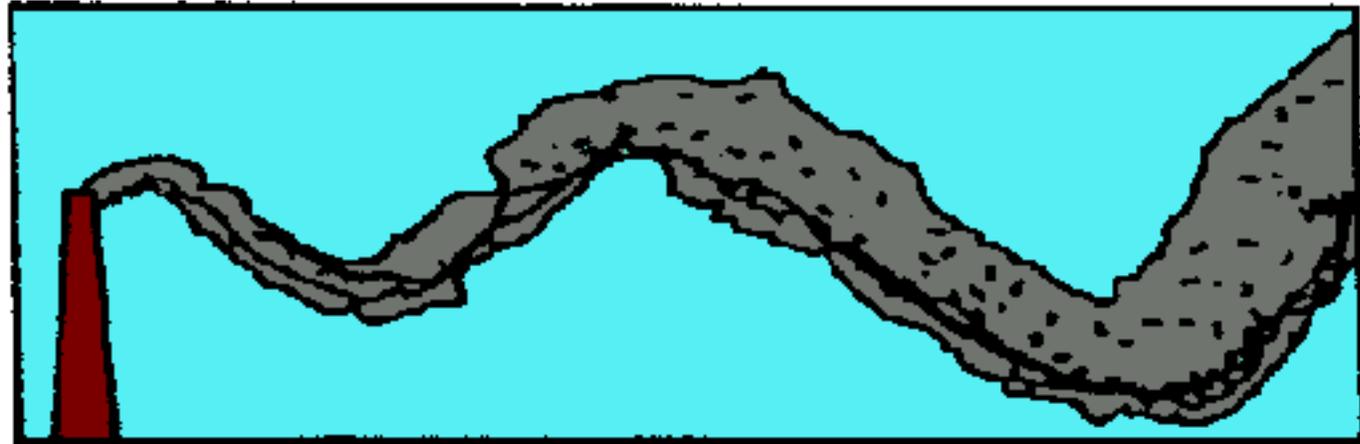
Trapping

PLUME SHAPE

TIPOS DE PLUMAS



X - Temperatura
Y - Altitude



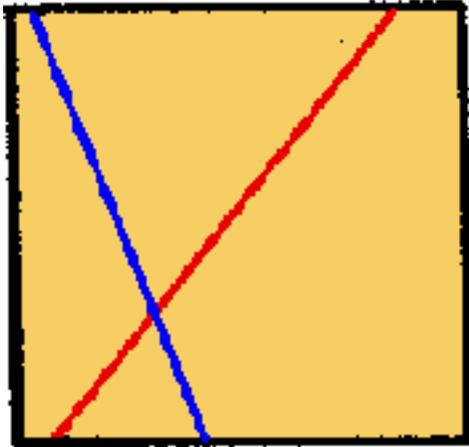
a) Looping - muito instável

TIPOS DE PLUMAS

Looping



TIPOS DE PLUMAS



X - Temperatura
Y - Altitude



c) Fanning - condição de inversão

TIPOS DE PLUMAS - FANNING



AVALIAÇÃO DA PLUMA

O **impacto das emissões atmosféricas** não depende somente da fonte e das concentrações de poluentes, mas também da forma como é lançada e se dispersa no ar, e das condições em que atingem as pessoas, geralmente ao nível do solo.

Este fenômeno de transporte tanto ocorre durante a operação normal da instalação quanto em situações não-rotineiras, de emergência ou em acidentes, mas a sua abordagem teórica é basicamente a mesma.

É assumido que a pluma se move na direção do vento, vai se misturando e diluindo com o ar devido à turbulência;

O gás ou vapor é suposto como tendo densidade próxima a do ar, de modo que não existiria a influência da força gravitacional.

MODELOS MATEMÁTICOS DE DISPERSÃO

- Para a realização de Estudos de Impacto Ambiental para novas fontes a serem instaladas, bem como conhecer a real contribuição de fontes antigas na degradação da qualidade do ar em sua área de influencia, utiliza-se o recurso da modelagem matemática, que simula concentrações de poluentes num ponto qualquer sobre o terreno
- Os modelos matemáticos , por serem simplificações dos processo reais ocorridos na atmosfera sempre possuem limites;
- O comportamento de uma pluma na atmosfera é um processo complexo que varia com as condições de emissão, ventos, turbulência, topografia e elementos de aerodinâmica.

MODELOS MATEMÁTICOS DE DISPERSÃO

Uma aproximação matemática bem sucedida da dispersão da pluma é acompanhada de hipóteses simplificativas:

1. Podemos artificialmente dividir o processo de dispersão em segmentos onde certo fatores são claramente dominantes;
2. Dentro desses segmentos deve-se assumir que certas variáveis são constantes ou insignificantes de forma a tornar viável o tratamento matemático;

MODELOS MATEMÁTICOS DE DISPERSÃO

- A elaboração teórica de modelos matemáticos foi iniciada em 1932 por P. Sutton na Inglaterra, e completada até 1950 por seus dados experimentais com fontes reais, servindo de base ainda hoje para desenvolvimentos modernos.
- Pasquill (1968) idealizou um tratamento modificado que é um dos mais utilizados na prática.
- Turner (1994) desenvolveu novas aplicações e apresentou gráficos muito úteis para a solução de problemas específicos.
- Outros gráficos são fornecidos nas publicações do U.S. Weather Bureau e pela EPA americana.

CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

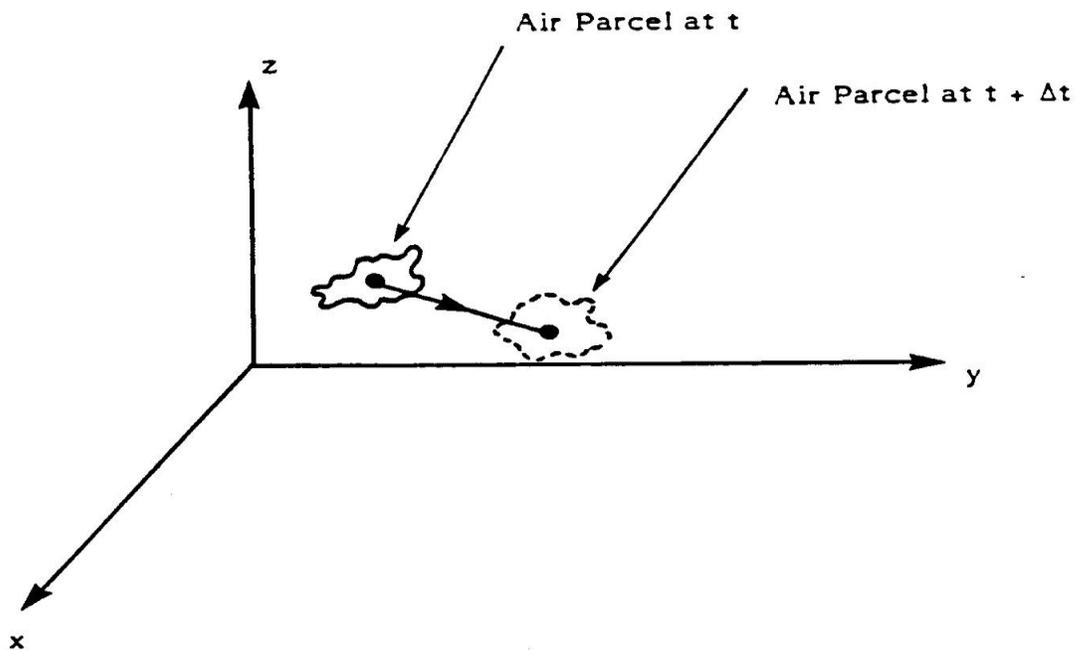
A dispersão do ar poluído pode ser numericamente simulado por várias técnicas, as quais são divididas em duas categorias:

- **Modelos Eulerianos:** A dispersão é estudada em termos de uma equação diferencial (E.D.A) para conservação de massa a qual é resolvida em um domínio fixo no espaço-tempo.
- **Modelos Lagrangeano:** A utilização de uma determinada classe de modelo depende da complexidade do problema. Nos modelos lagrangeanos a trajetória de cada partícula representa uma realização estatística em um campo turbulento caracterizado por certas condições iniciais e vínculos físicos.

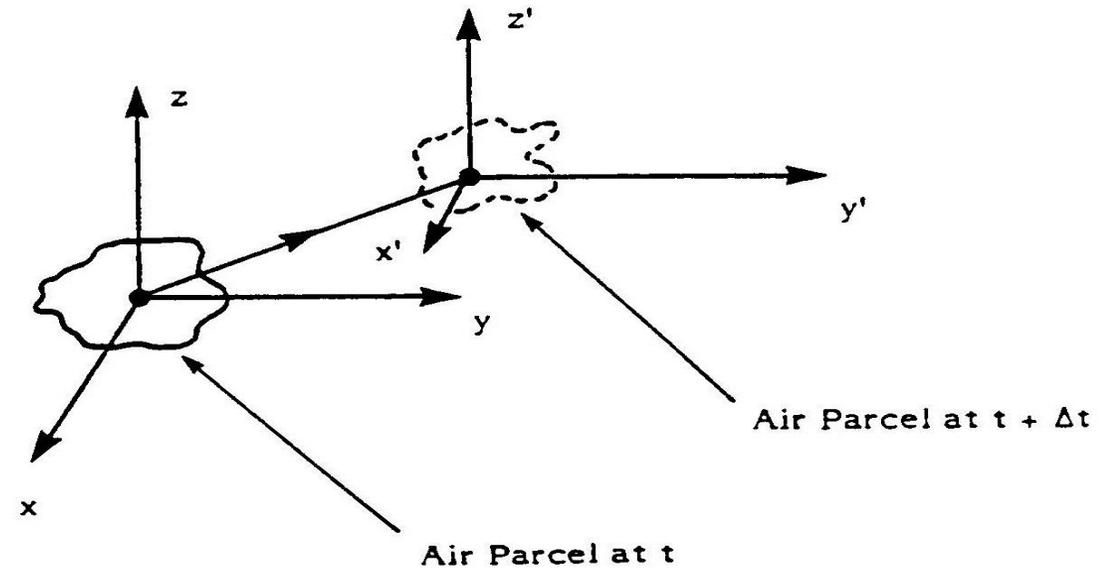
CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

➤ A diferença básica entre os modelos, é que no sistema Euleriano é fixo em relação à Terra, enquanto no sistema Lagrangiano segue o movimento atmosférico médio do fluido, no caso, a atmosfera

(a)



(b)



CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

➤ **Modelos Euleriano:** a aproximação Euleriano é baseada no princípio da conservação da massa de um poluente de concentração $C(x, y, z, t)$.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -V \cdot \nabla c + D \nabla^2 c + S$$

✓ Onde,

- V = vetor velocidade do vento (u,v,w)
- ∇ = operador gradiente
- S = representam os termos de criação e decaimento
- $D\nabla^2 C$ = termo de difusão molecular, onde
- D = é o coeficiente de difusibilidade molecular
- ∇^2 = é o operador Laplaciano

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

✓ A velocidade V é representada como a soma da velocidade média com os componentes de flutuação: $V = u + u'$

CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

- **Modelos Lagrangianos:** a equação fundamental para a dispersão atmosférica de um poluente determinado é:

$$\langle c(r, t) \rangle = \int_{-\infty}^t \int p(r, t | r', t') S(r', t') dr' dt'$$

- ✓ Onde, a integração no espaço é feita sobre a totalidade do domínio atmosférico e o primeiro termo representa a concentração média em r para o tempo t ; $S(r', t')$ é o termo fonte; e $p(r, t | r', t')$ é a função densidade de probabilidade que uma parcela de ar move-se de r' no tempo t' para r no tempo t .

CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

➤ Classes dos modelos:

- ✓ **Gaussianos:** são os mais utilizados para estimativas de impacto de fontes de poluentes primários;
- ✓ **Numéricos:** são normalmente mais apropriados que os modelos gaussianos para áreas urbanas que envolvem reações químicas na atmosfera.
- ✓ **Estatísticos:** são normalmente empregados em situações em que não há um completo entendimento dos processos físicos e químicos envolvidos.
- ✓ **Físicos:** envolvem o uso de réplicas reduzidas de áreas urbanas ou de túneis de vento.

CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

➤ Modelos Gaussianos

- ✓ 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 tridimensional, gerado por uma fonte pontual sobre condições de emissão e meteorológicas estacionárias;**
- ✓ Este modelo é a solução da equação de Difusão - Advecção, a qual descreve matematicamente os processos de transporte e difusão turbulenta que ocorrem na atmosfera.

MODELOS DE DISPERSÃO

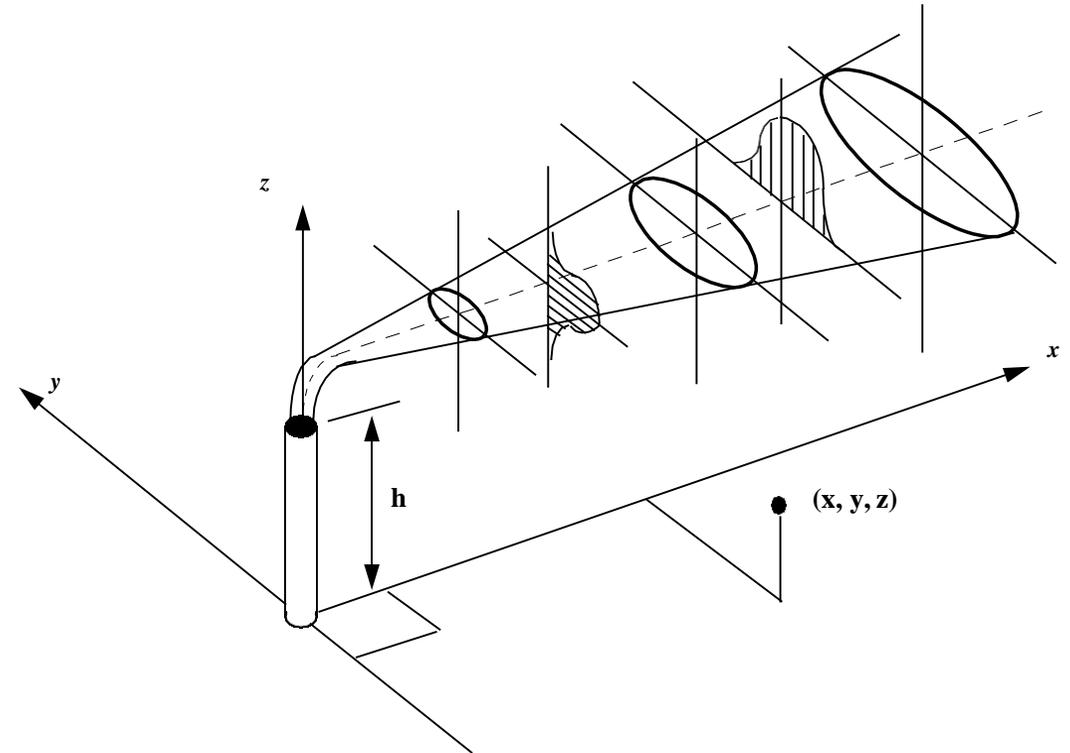
- Os modelos Gaussianos permitem calcular, em qualquer ponto do espaço tridimensional, o valor da concentração de poluente em função da quantidade de produto emitido (instantaneamente ou vazão contínua), da altura da liberação, da velocidade do vento e da estabilidade atmosférica.
- Esses modelos expressam a concentração média em qualquer ponto na direção do vento, a partir de uma fonte de emissão contínua estacionária.
- São bem adequados para avaliações preliminares, e nos casos de emissões tóxicas de pequena quantidade.
- Limitado a situações com terreno plano sem obstáculos, gases com a mesma densidade do ar.

MODELO GAUSSIANO

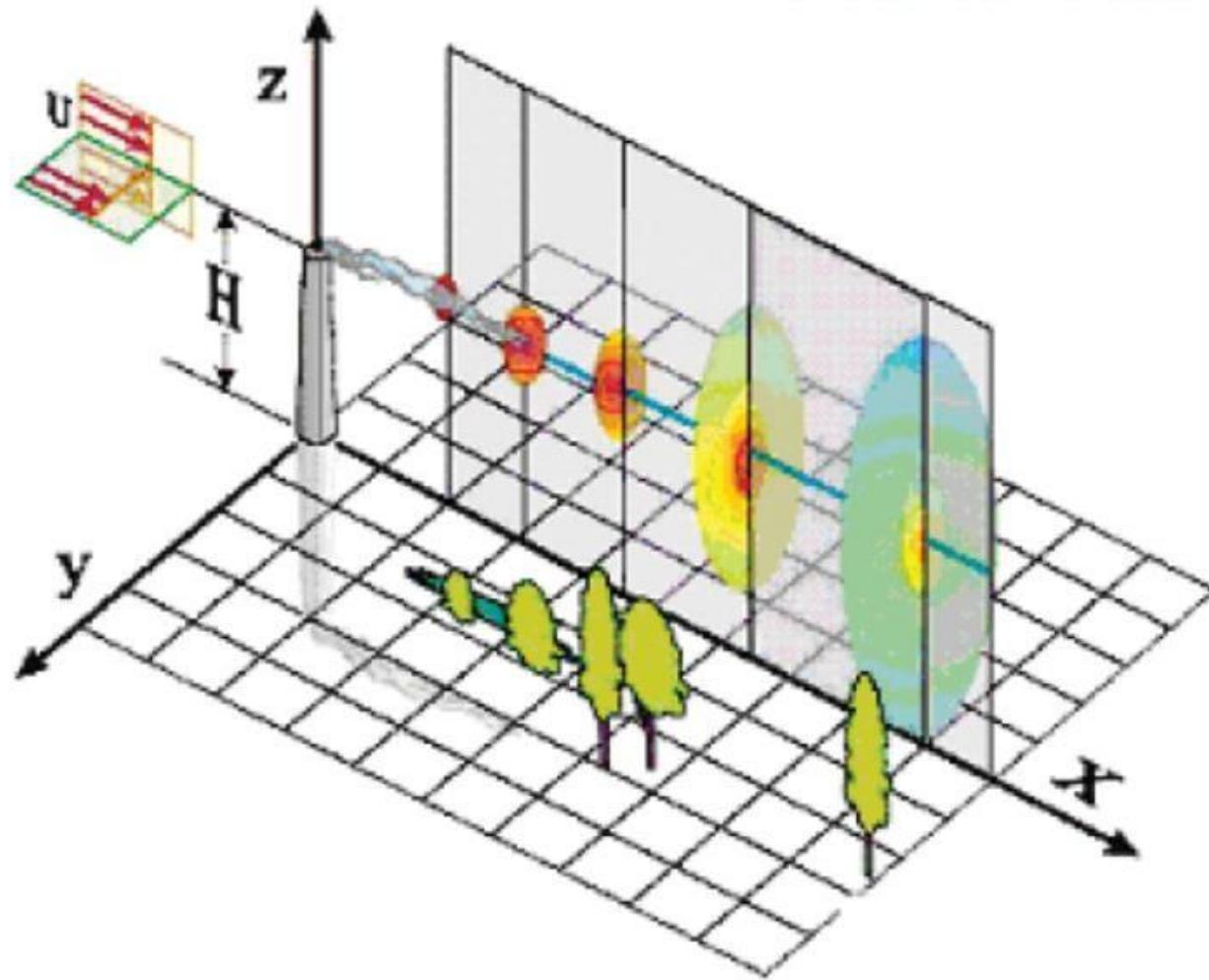
A dispersão de uma pluma lançada na atmosfera se dá de tal modo que a concentração dos poluentes da pluma em função da posição relativa à fonte exibe um comportamento Gaussiano.

A distribuição da concentração da pluma ao redor do eixo central **pode ser considerada uma Gaussiana**, com os valores de distribuição sendo considerados afastamentos do eixo da pluma.

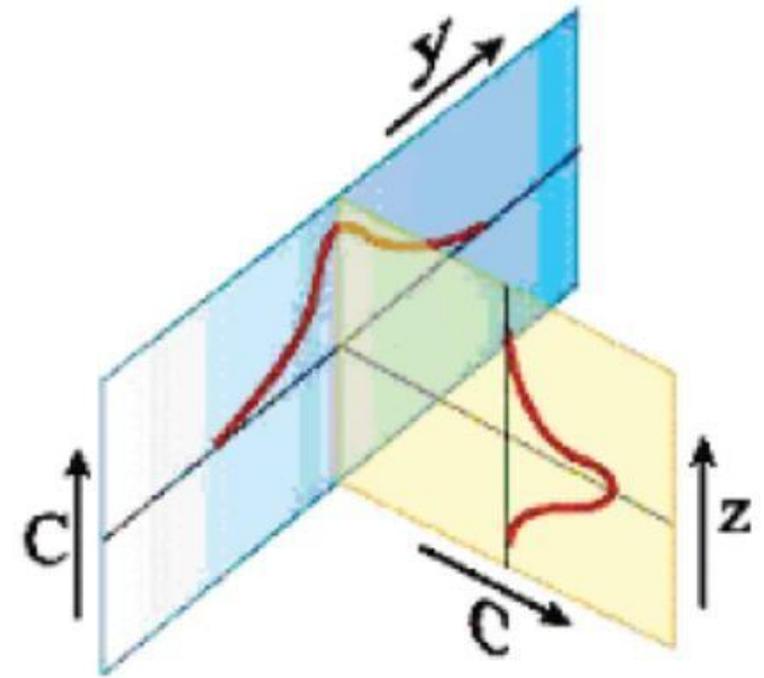
A figura abaixo apresenta uma representação esquemática da dispersão de uma pluma segundo uma distribuição Gaussiana



Pluma Gaussiana

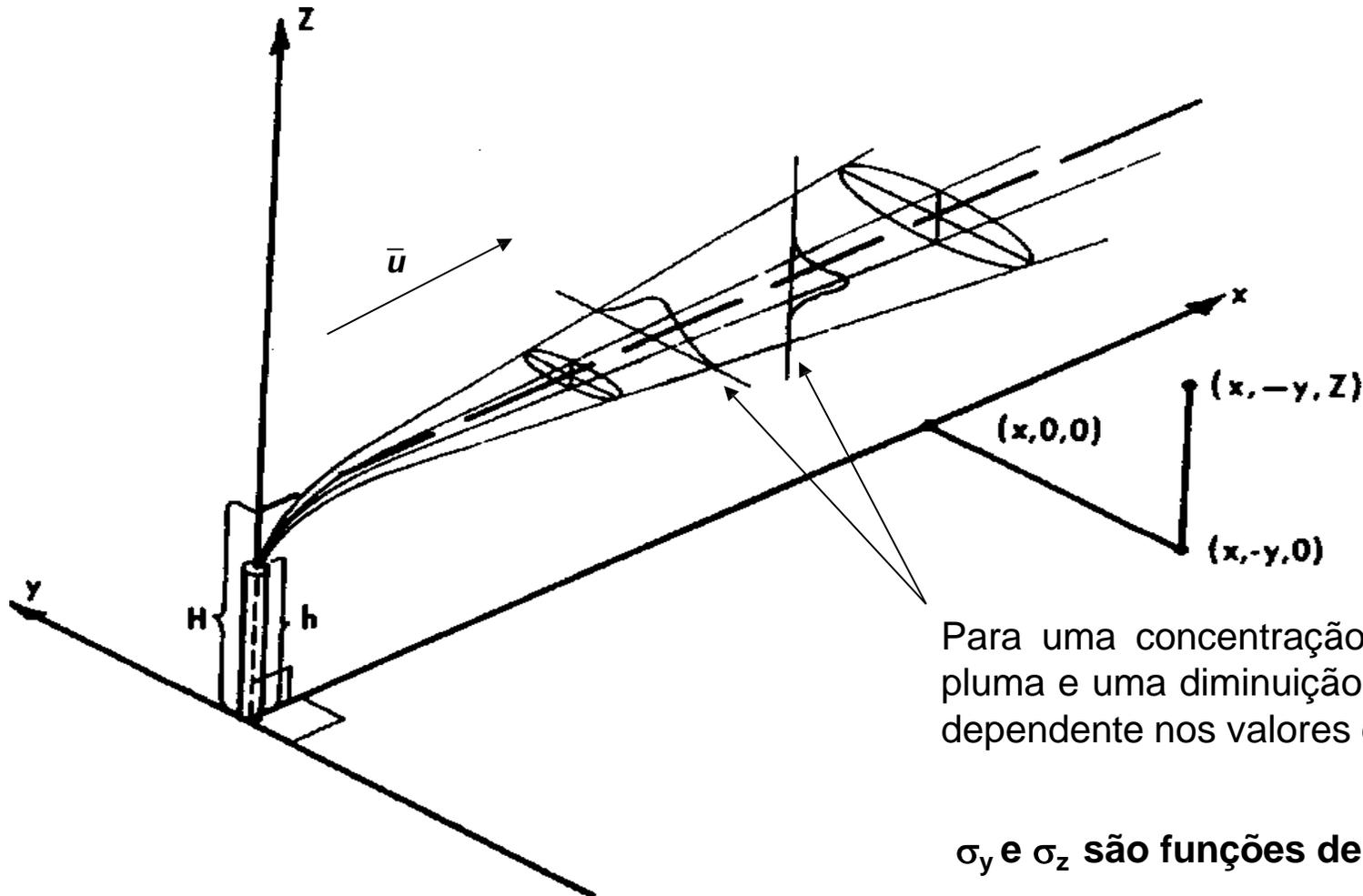


Concentração



CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

- Sistema de coordenadas gaussiana, distribuição horizontal e vertical



CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

➤ **Modificações nos modelos gaussianos**

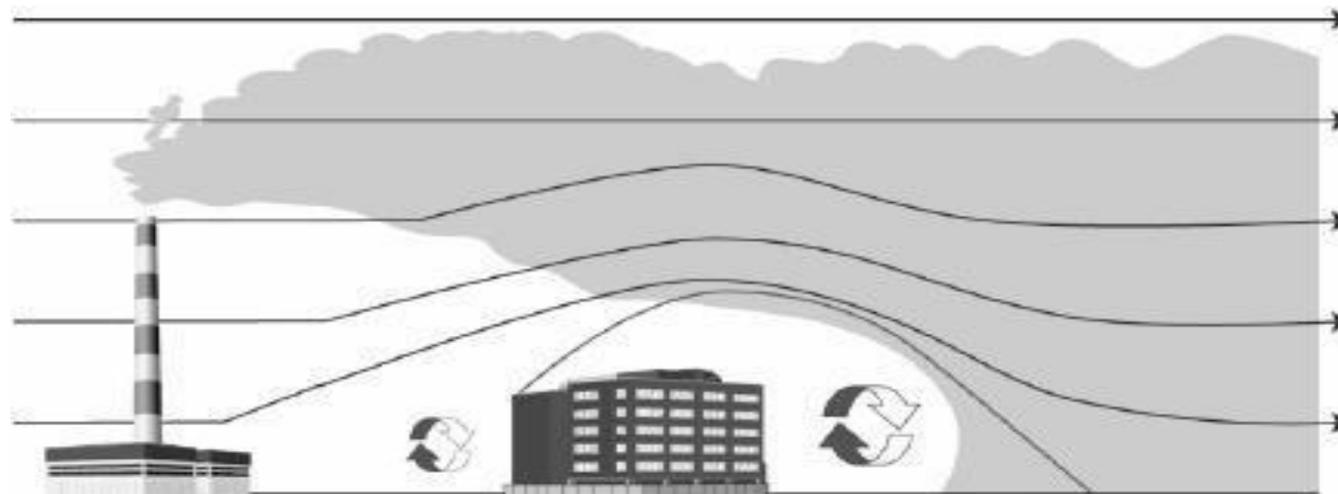
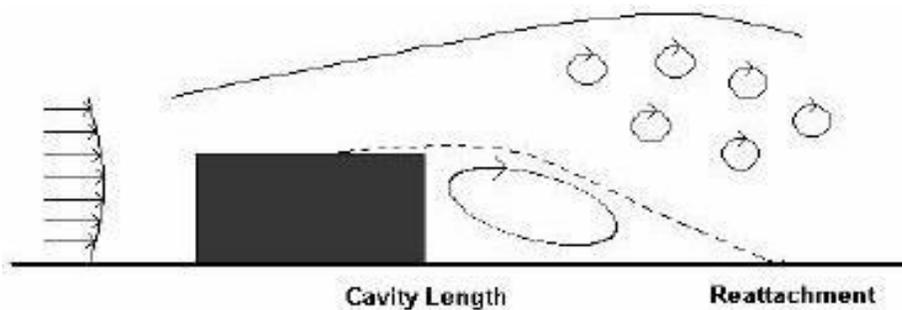
✓ **Com objetivo de simular concentrações:**

- **de fontes linhas, área e volume;**
- **sob efeito de edificações (building downwash);**
- **em que a pluma é desviada de seu eixo horizontal;**
- **que sofrem influência das variações oceano-terra, em regiões litorâneas.**
- **em modelos climatológicos;**
- **em situações de meteorologia e emissão não constantes, por meio da técnica de segmentação da pluma.**

CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

➤ Modificações nos modelos gaussianos

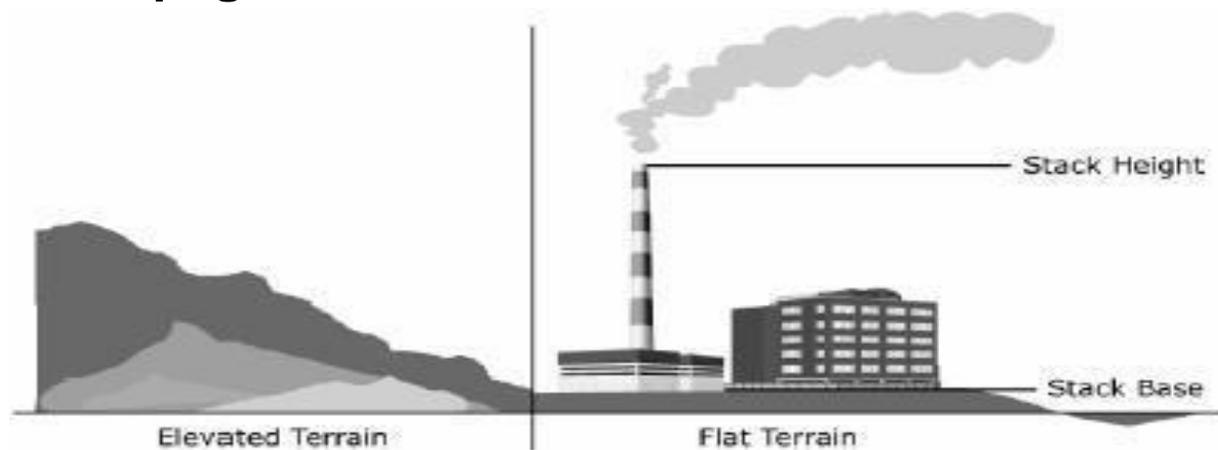
✓ Building Downwash



CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

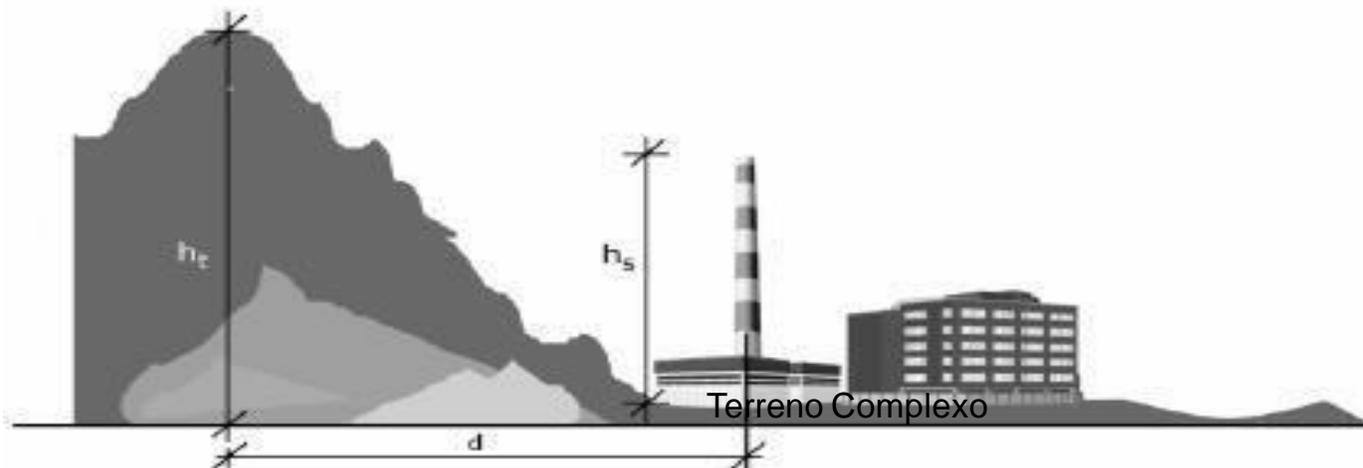
➤ Modificações nos modelos gaussianos

✓ Topografia



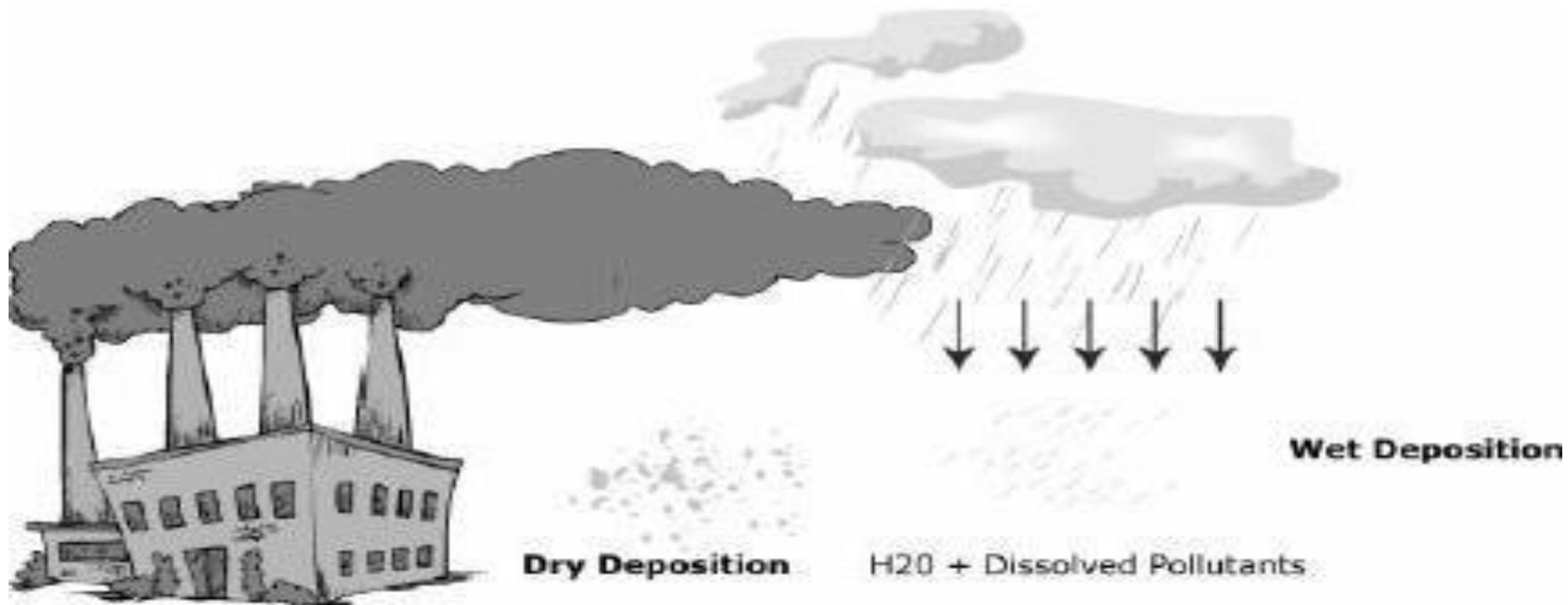
Terreno Simples

h_s = stack height
 h_t = terrain height above stack base
 d = distance to terrain



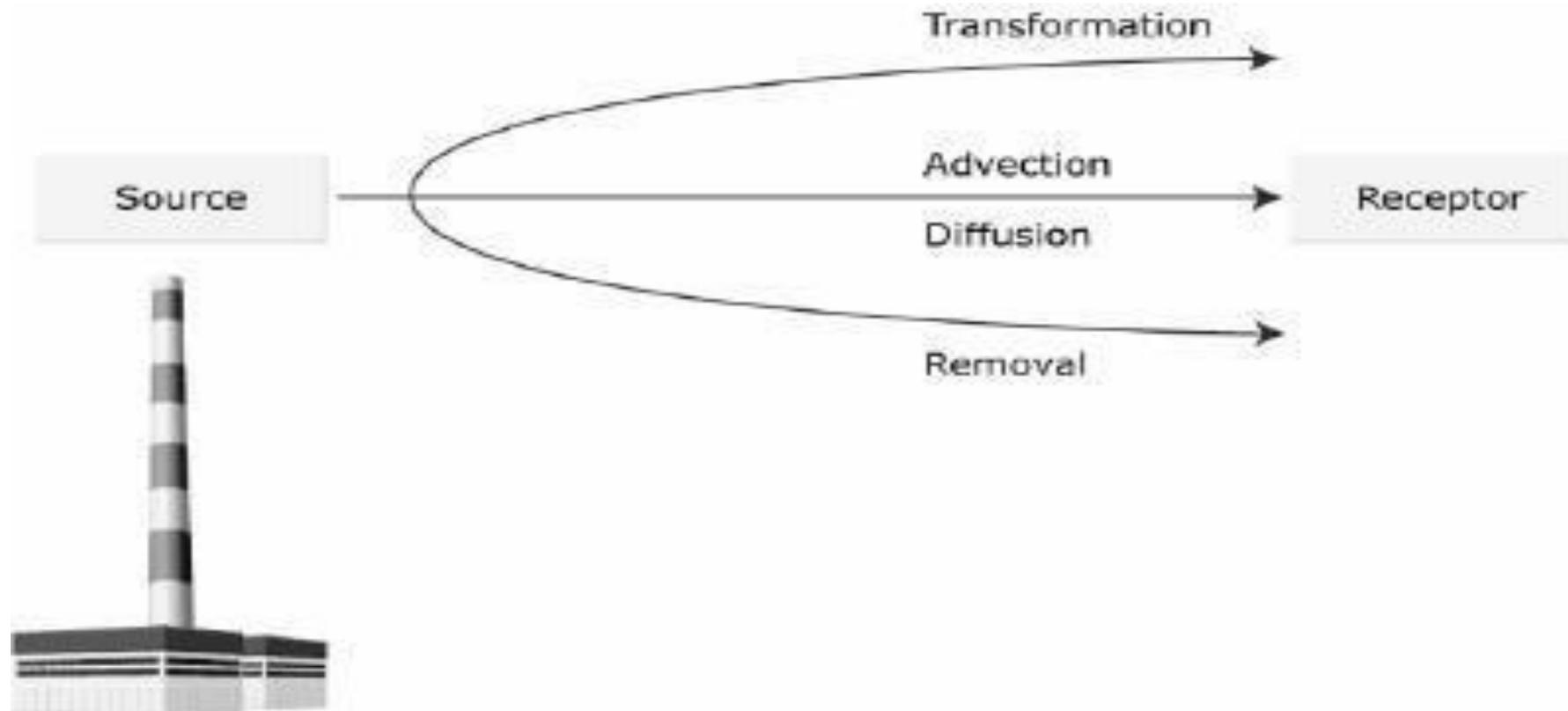
CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

- Modificações nos modelos gaussianos
- ✓ Mecanismo de deposição



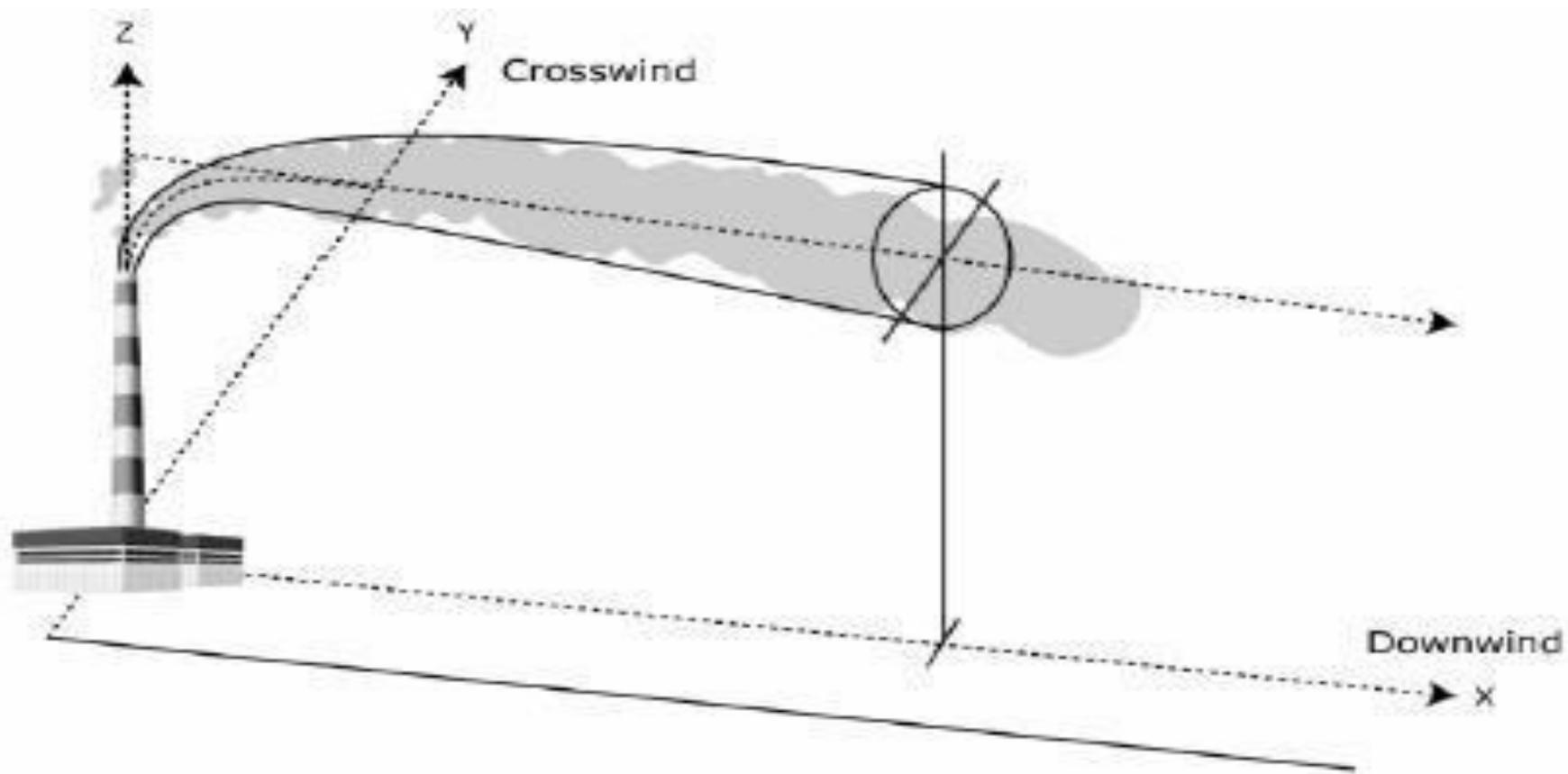
CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

- Liberação do poluente na atmosfera
- Quando um poluente é liberado para atmosfera, será exposto aos principais processos:



CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

➤ Crosswind x Downwind



CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

Conc. do Poluente como uma função de posição (x, y, z)

Taxa de emissão

Distribuição de massa em dimensão de cross-wind (y) a uma determinada distância de downwind, x

Altura efetiva da fonte, incluindo a elevação da pluma junto a fonte

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\bar{u}\sigma_y\sigma_z} \exp\left\{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right\} \times \left[\exp\left\{-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right\} + \alpha \cdot \exp\left\{-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right\} \right]$$

Velocidade efetiva do vento na altura da liberação

Corresponde à área do círculo em modelo simples. (valores dependem da distância de downwind)

Distribuição de massa em dimensão vertical (z) a uma determinada distância de downwind, x (inclui o efeito de reflexão de superfície)

CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\bar{u}\sigma_y\sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \alpha \cdot \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

x, y, z - coord. cart. do ponto onde se deseja estimar a conc. do contaminante [m];

C(x,y,z) - concentração esperada do contaminante na coordenada (x,y,z) [g/m³];

Qs - taxa de emissão [g/s];

H - altura efetiva de lançamento;

\bar{u} - v.m.v. na direção do escoamento (x) e medida no topo da chaminé [m/s];

α - coeficiente de reflexão [sem dimensão];

σ_y e σ_z - desvios médios da distribuição de concentração nas direções y e z [m];

Obs.: exp.- a/b = e^{-a/b}, sendo e = 2,71.

CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

➤ Velocidade do vento na altura do topo da chaminé

$$u = u_0 \left(\frac{h}{h_0} \right)^e$$

h - altura da chaminé [m]

***h*₀** - altura de medição da velocidade do vento (usualmente 10m) [m]

e - expoente empírico cujo valor depende a estabilidade atmosférica

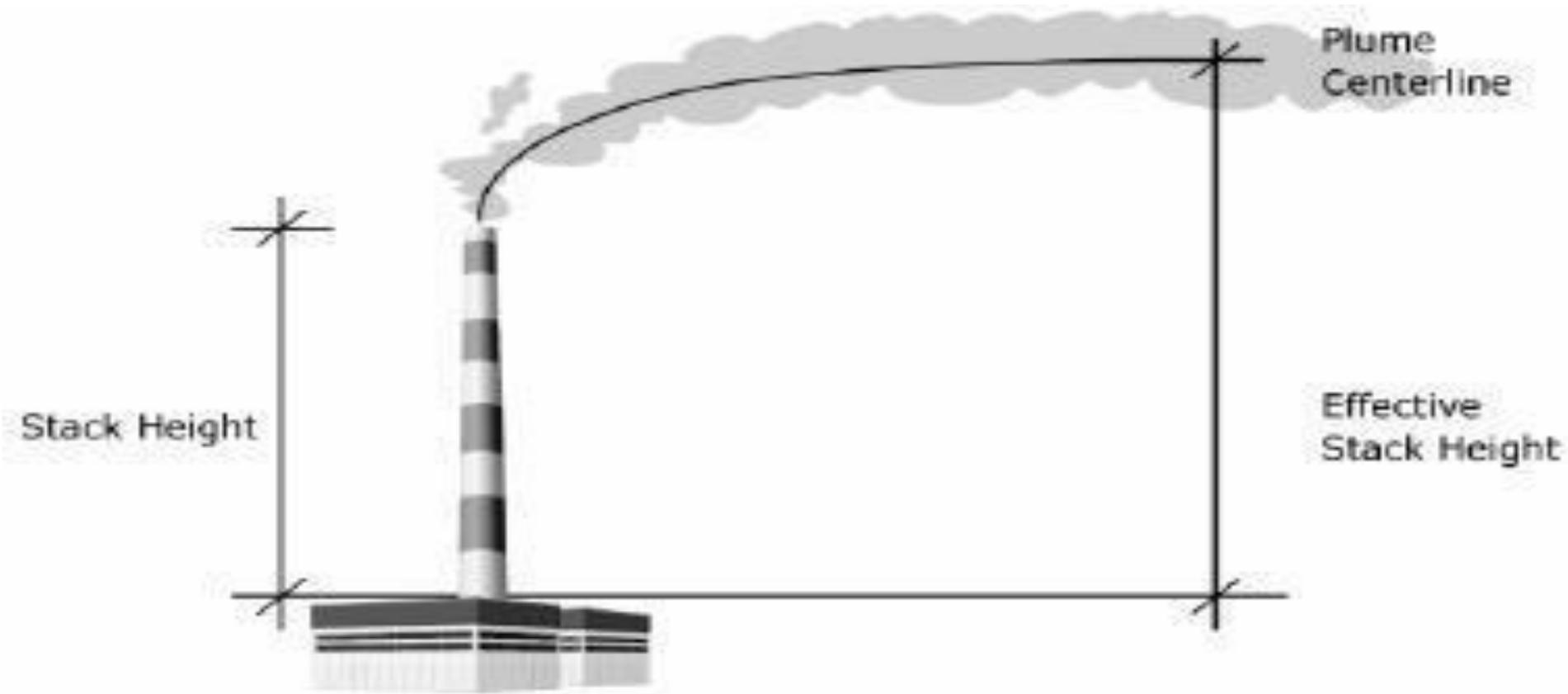
***u*₀** - velocidade média do vento medida na altura *h*₀ [m/s]

u - velocidade média do vento no topo da chaminé [m/s]

Classe de Estabilidade	Constante Empírica, <i>e</i>
A	0,10
B	0,15
C	0,20
D	0,25
E	0,30
F	0,35

CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

➤ Altura efetiva de lançamento

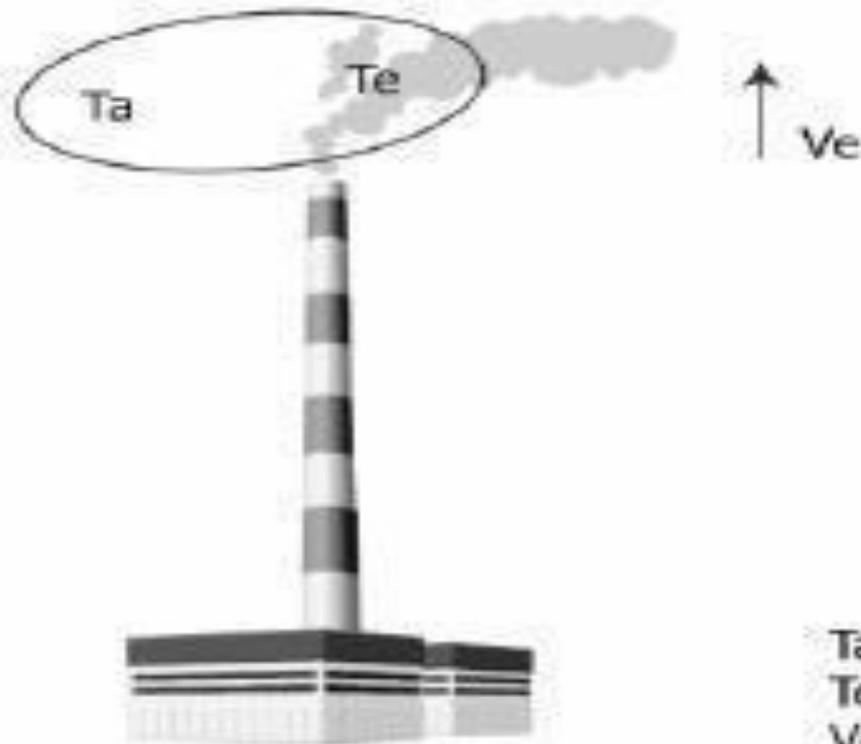


$$H = h + \Delta h$$

CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

- **Altura efetiva de lançamento**
- ✓ Flutuação

Temperature difference
causes buoyancy



T_a = Ambient Temperature
 T_e = Release Temperature
 V_e = Exit Velocity

CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

➤ Altura de elevação da pluma

$$\Delta h = d \cdot \left(\frac{V_s}{\bar{u}} \right)^{1.4} \cdot \left[1 + \left(\frac{T_s - T_{ar}}{T_s} \right) \right]$$

h - variação da altura de lançamento, baseada na quantidade de movimento da emissão e do empuxo térmico [m]

d - diâmetro da chaminé [m]

V_s - velocidade de saída dos gases no topo da chaminé [m/s]

u - v.m.v. na direção do escoamento (x) e medida no topo da chaminé [m/s]

T_s - temperatura dos gases na saída da chaminé [K]

T_{ar} - temperatura do ar atmosférico nas imediações da chaminé [K]

CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

➤ Classes de estabilidade de Pasquill

Velocidade Vento (m/s)	Insolação Durante o Dia			Nebulosidade Noturna	
	Forte > 700 W/m ²	Média 350 - 700 W/m ²	Fraca < 350 W/m ²	Nebulosidade ≥ 4/8	Nebulosidade ≤ 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

Onde: A: muito instável

D: neutra

B: moderadamente instável

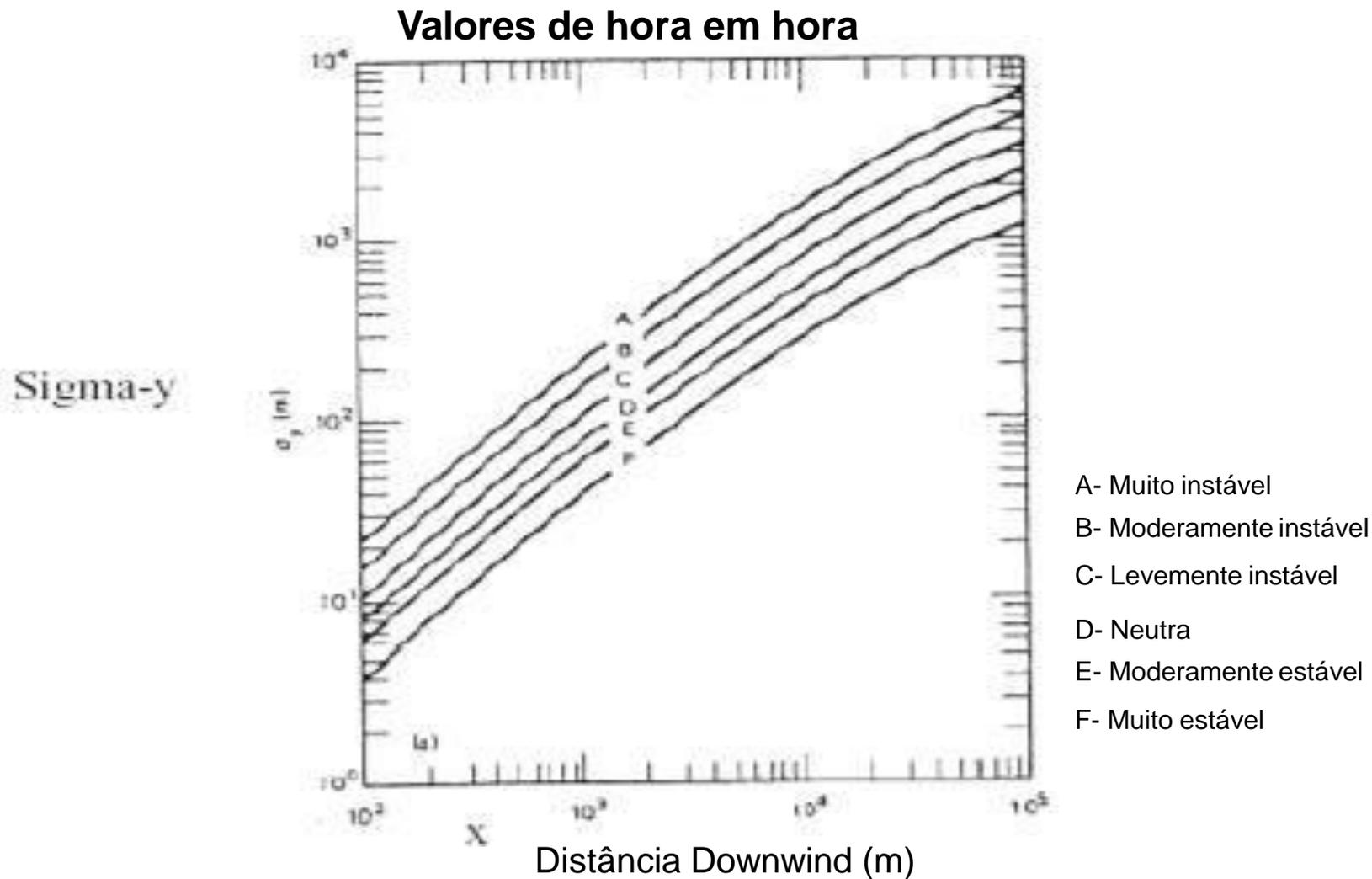
E: moderadamente estável

C: levemente instável

F: muito estável

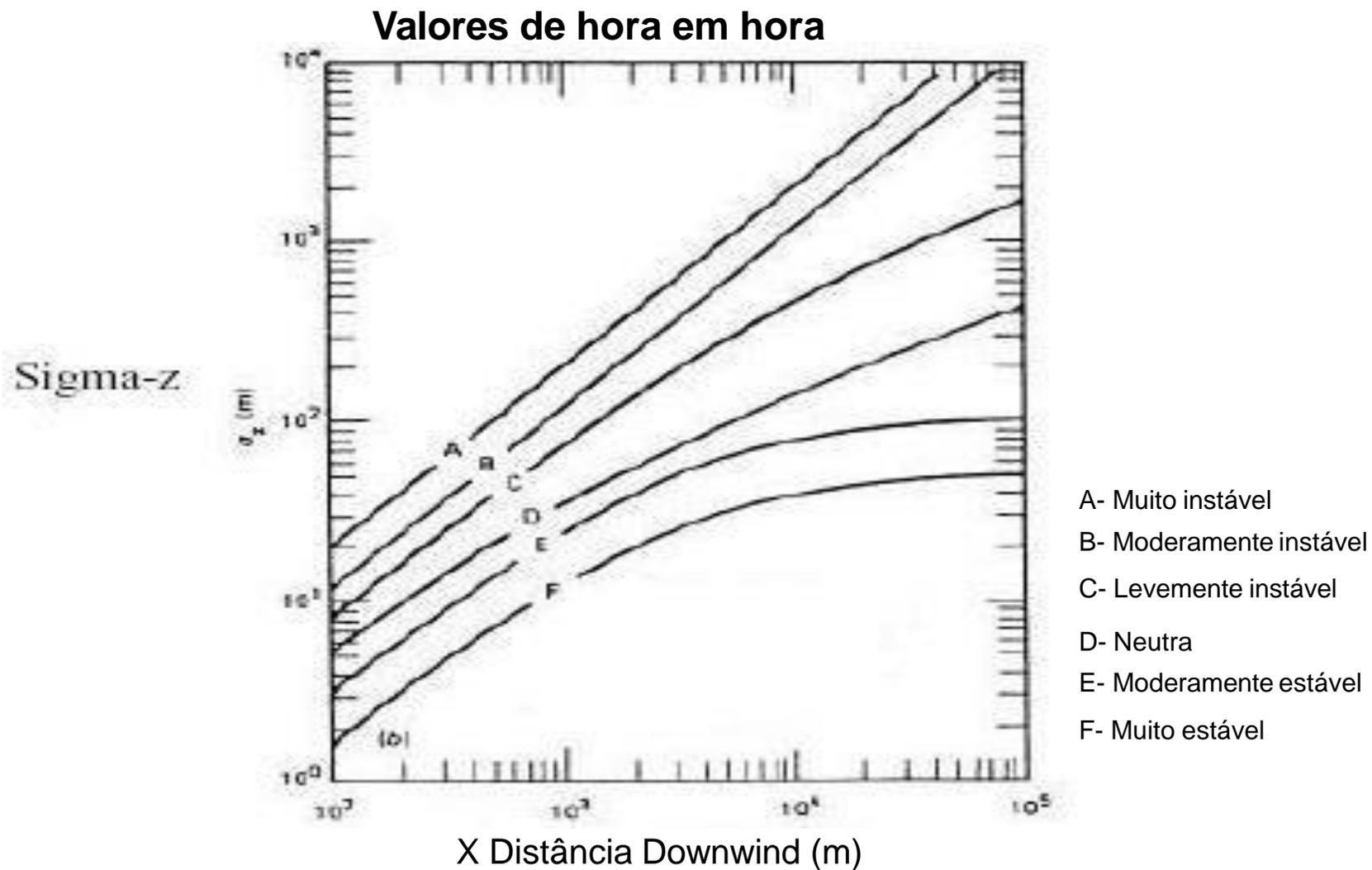
CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

➤ Coeficiente de dispersão horizontal (σ_y)



CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

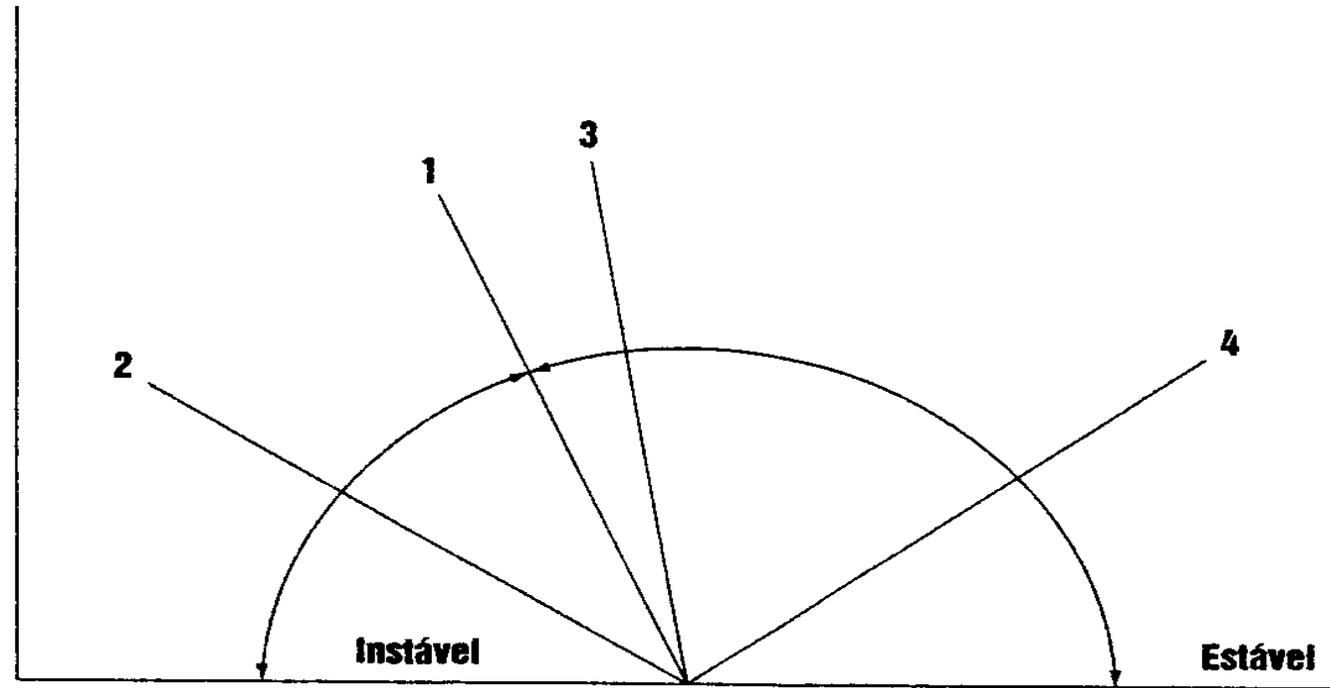
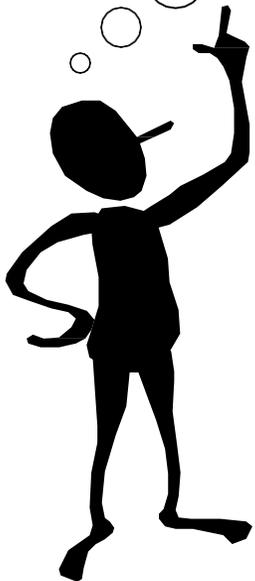
➤ Coeficiente de dispersão vertical (σ_z)



CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

➤ Estabilidade atmosférica

Quanto mais instável for a atmosfera, maior a dispersão dos poluentes.



1 perfil adiabático (atmosfera neutra, -1°C por 100 m);

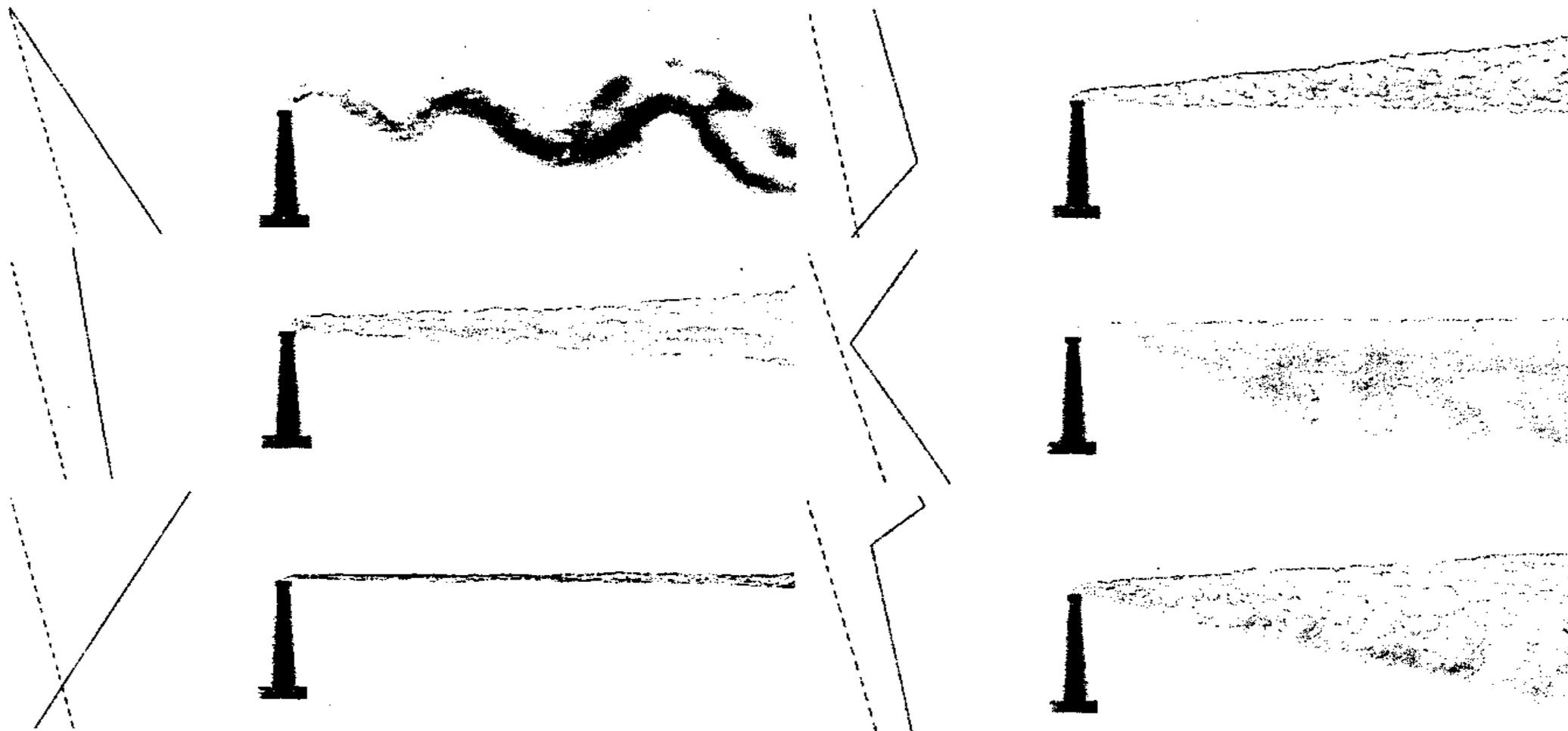
2 perfil superadiabático (atmosfera instável);

3- perfil subadiabático (atmosfera estável);

4- perfil de inversão térmica (atmosfera extremamente estável).

CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

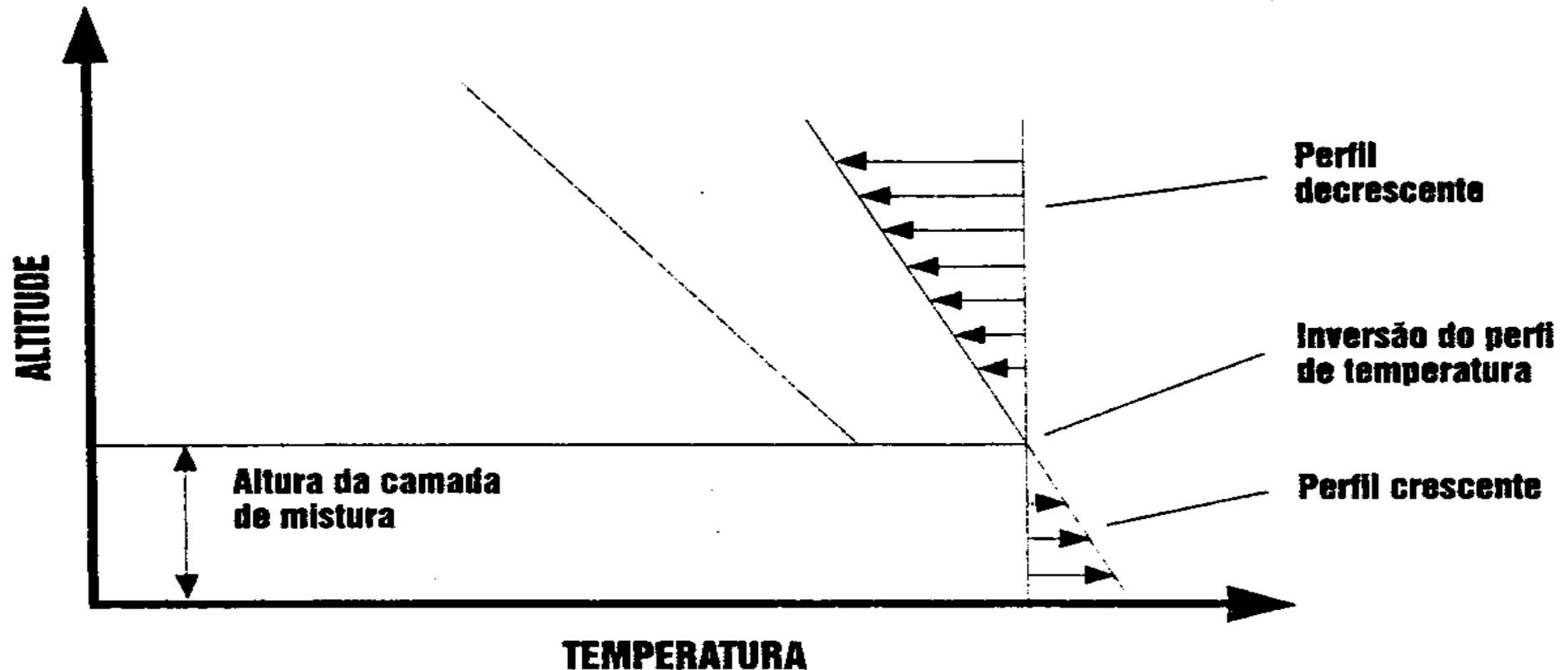
- Expansão vertical da pluma em função da variação vertical da temperatura



CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

➤ Esquema de uma inversão térmica

✓ A qualidade do ar pode mudar em função das condições meteorológicas adversas, que determinam maior ou menor diluição dos poluentes.



CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

- O modelo gaussiano é a técnica mais amplamente utilizada para estimar o impacto de poluentes não reativos.

- Pressupostos quanto ao uso da equação gaussiana:
 - ✓ Emissão contínua;
 - ✓ Conservação de massa;
 - ✓ Condições estacionárias;
 - ✓ Distribuição gaussiana da concentração no sentido vertical e horizontal.

FORMULAÇÕES DO MODELO GAUSSIANO

- **Muitos programas de computador têm sido desenvolvidos** incorporando extensões do Modelo Gaussiano básico.
- **Entre os aperfeiçoamentos** alcançados destacam-se **formulações específicas para fontes instantâneas, de área, de volume ou linha** (que podem ser combinadas para adaptar-se à fontes de geometria complexa), **fontes múltiplas, reflexão em camada de inversão elevada, plumas com empuxo negativo**, entre outras.

MODELO TIPO PLUMA GAUSSIANA

Modelo Gaussiano ISCST3

Este modelo de dispersão é recomendado pela EPA (Environmental Protection Agency) para tratamento da dispersão de poluentes emitidos por fontes industriais como: refinarias, termelétricas, etc.

FORMULAÇÕES DO MODELO GAUSSIANO

BLP: Modelo Gaussiano desenhado para lidar com os problemas associados à plantas de produção de alumínio onde os efeitos da elevação da pluma são bastante importantes;

CALINE3: Modelo Gaussiano desenvolvido para avaliar o impacto de estradas (fontes móveis) em relevo relativamente não complexo;

FORMULAÇÕES DO MODELO GAUSSIANO

CALPUFF: Modelo não-estacionário (regime transiente) do tipo puff, recomendado para simular dispersão em relevos relativamente complexos onde a variação espacial e temporal dos dados meteorológicos se torna importante, incluindo transformação e remoção de poluentes. Esse modelo também é indicado para estudos de dispersão em grande distâncias (dezenas a centenas de quilômetros);

CTDMPLUS: Modelo Gaussiano usado para fontes pontuais e em quaisquer condições de estabilidade em relevos de topografia complexa;

HIPÓTESES SIMPLIFICATIVAS :

A pluma apresenta distribuição Gaussiana;

=> Não considera a deposição de material e reações de superfície;

=> A emissão dos poluentes é considerada uniforme no tempo;

=>A direção e velocidade do vento são constantes no período de tempo considerado;

=> Não são consideradas as reações químicas na atmosfera;

=> A classe de estabilidade atmosférica é constante no período de tempo considerado;

HIPÓTESES SIMPLIFICATIVAS :

=> Quando a pluma penetra na atmosfera, se eleva até alcançar uma altura de equilíbrio horizontal. Com isso, a altura do centro da pluma permanece constante na direção predominante do vento, adotada como fixa durante a trajetória da pluma;

=> Para qualquer distância a concentração máxima sempre ocorre no centro da pluma;

=> O perfil horizontal da concentração, descrito pela equação gaussiana, não se refere a plumas instantâneas e, sim, representam concentrações médias sobre períodos de 10 minutos a 1 hora – depende dos coeficientes de dispersão adotados;

=> Quando é assumido que todo material que sai da pluma se conserva, o coeficiente α é igual a 1, isto é, o contaminante analisado não se perde por desintegração, reação química ou decomposição

=> A equação gaussiana traduz situações atmosféricas estacionárias, isto é, a emissão de poluentes é constante e todos os parâmetros meteorológicos são constantes.

O modelo gaussiano...

A primeira consideração a ser feita é que as hipóteses apresentadas são razoáveis para cálculos de concentração sobre períodos variando de 10 minutos a uma (01) hora.

Os coeficientes de dispersão horizontal (σ_y) e vertical (σ_z) podem ser estimados utilizando-se o modelo de Pasquill-Gifford (ver ábacos e equações na sequência)

O tempo de amostragem varia de 15 minutos a 1 hora e os resultados são válidos para distâncias de no máximo 10 km.

COEFICIENTE DE DISPERSÃO

- Os coeficientes de dispersão σ_y e σ_z determinam respectivamente a expansão horizontal e vertical da pluma
- Foram publicados por Pasquill em 1953 (curvas de Pasquill-Grifford) sendo classificados quanto as categorias de estabilidade atmosférica:
 - A – Extremamente instável;
 - B – Moderadamente instável;
 - C – Ligeiramente instável;
 - D – Neutro
 - E – Ligeiramente estável;
 - F – Moderadamente estável

Obtenção da Classe de Estabilidade

Velocidade superficial do vento (a 10 m) m/s	Dia			Noite*	
	Radiação Solar Incidente			≥ 4/8 de nuvens baixas (nublado)	≤ 3/8 de nuvens (claro)
	Forte	Moderada	Fraca		
<2	A	A – B	B	-	-
2 - 3	A – B	B	C	E	E
3 - 5	B	B – C	C	D	E
5 - 6	C	C – D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

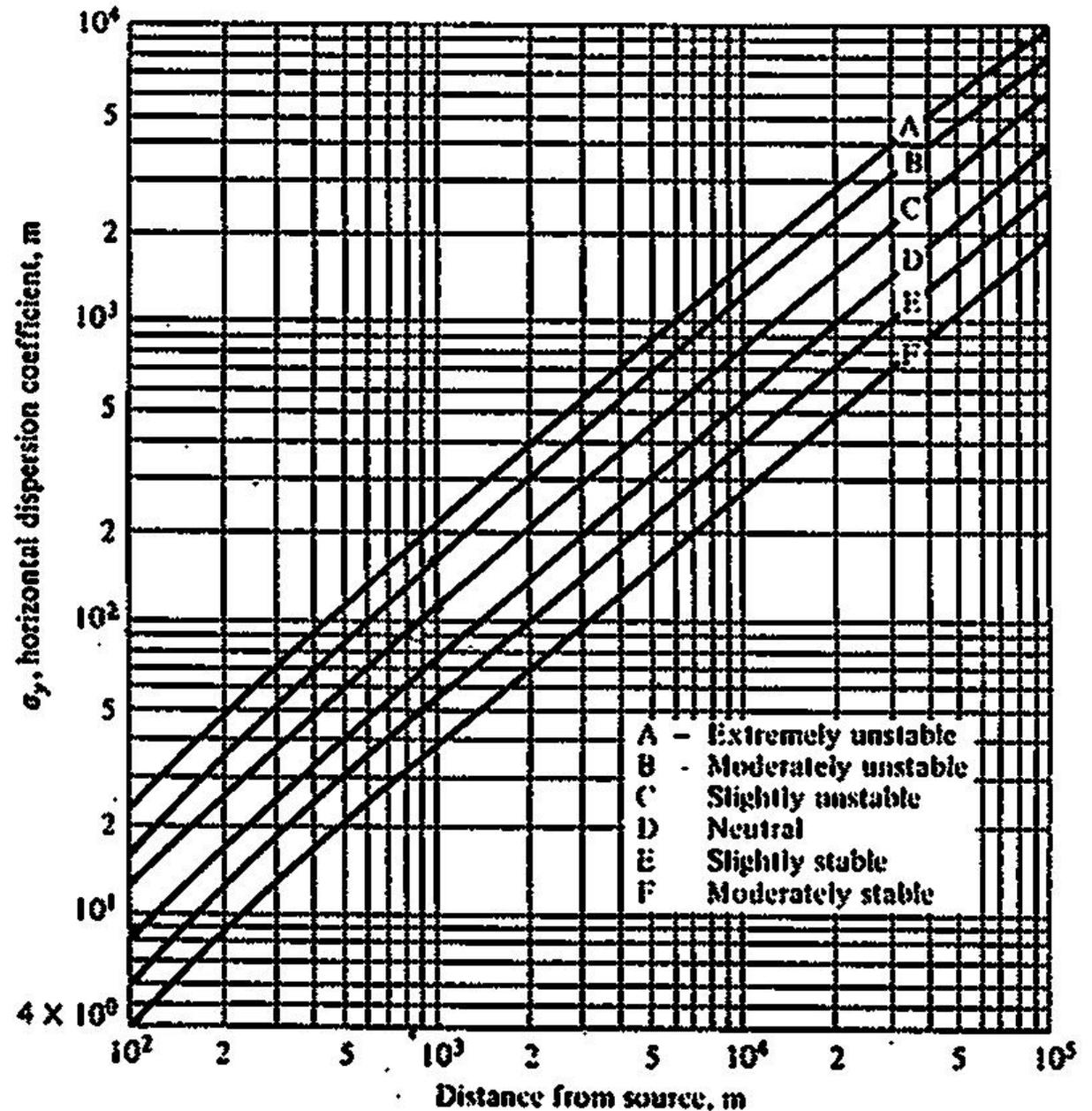
* Os meteorologistas dividem o céu em 8 seções a fim de avaliar o grau de cobertura por nuvens. Se 4 ou seções tem nuvens, considera-se o céu nublado, se são 3 ou menos considera-se claro.

O modelo gaussiano...

Ábaco de Pasquill-Gifford

Ábaco para determinação do coeficiente de dispersão horizontal (σ_y) segundo Pasquill-Gifford

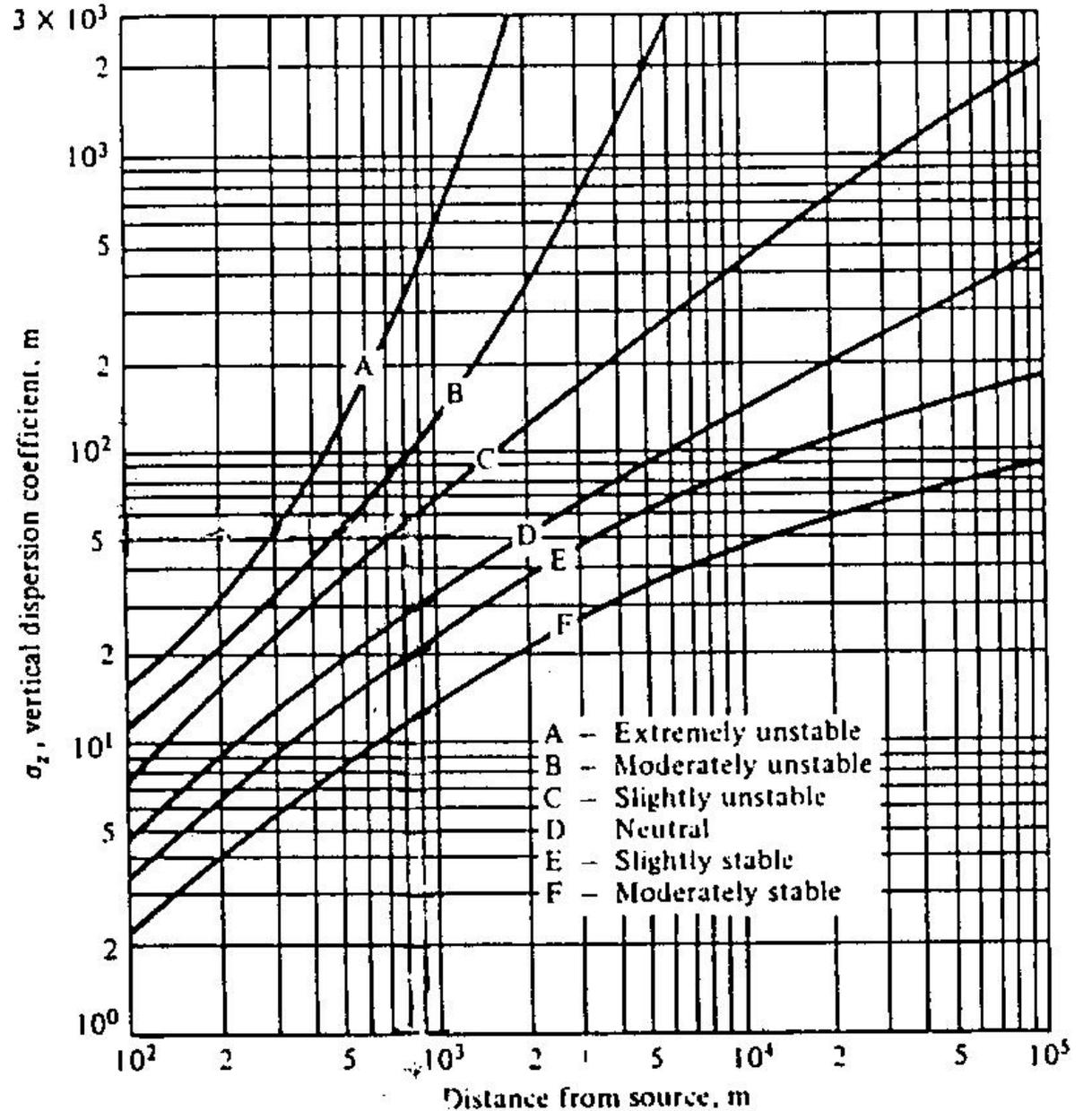
- A – Extremamente instável;
- B – Moderadamente instável;
- C – Ligeiramente instável;
- D – Neutro
- E – Ligeiramente estável;
- F – Moderadamente estável



Ábaco de Pasquill-Gifford

O modelo gaussiano...

Ábaco para determinação do coeficiente de dispersão vertical (σ_z) segundo Pasquill-Gifford



CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

➤ Exercício

✓ Uma usina termoeétrica a carvão emite 1,0 g de SO_2 por segundo. Calcular a concentração que o SO_2 emitido atinge a população, localizada a 500m, 1,0 Km, 1,5km e 5 Km e 10Km da distância da chaminé, na hora mais fria do dia?

✓ **Resposta em $\mu\text{g}/\text{m}^3$**

✓ **Represente graficamente**

✓ **Dados:**

- Taxa de emissão: 1 g/s
- Altura da chaminé: 20 m;
- Diâmetro da chaminé: 1,6 m;
- Velocidade de saída dos gases da chaminé: 10 m/s;
- Velocidade do vento: 5,5 m/s a 10 metros de altura;
- Temperatura de saída dos gases: $100^\circ \text{C} = 373 \text{ K}$
- Temperatura ambiente: $20^\circ \text{C} = 293 \text{ K}$

CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

➤ Cálculos necessários

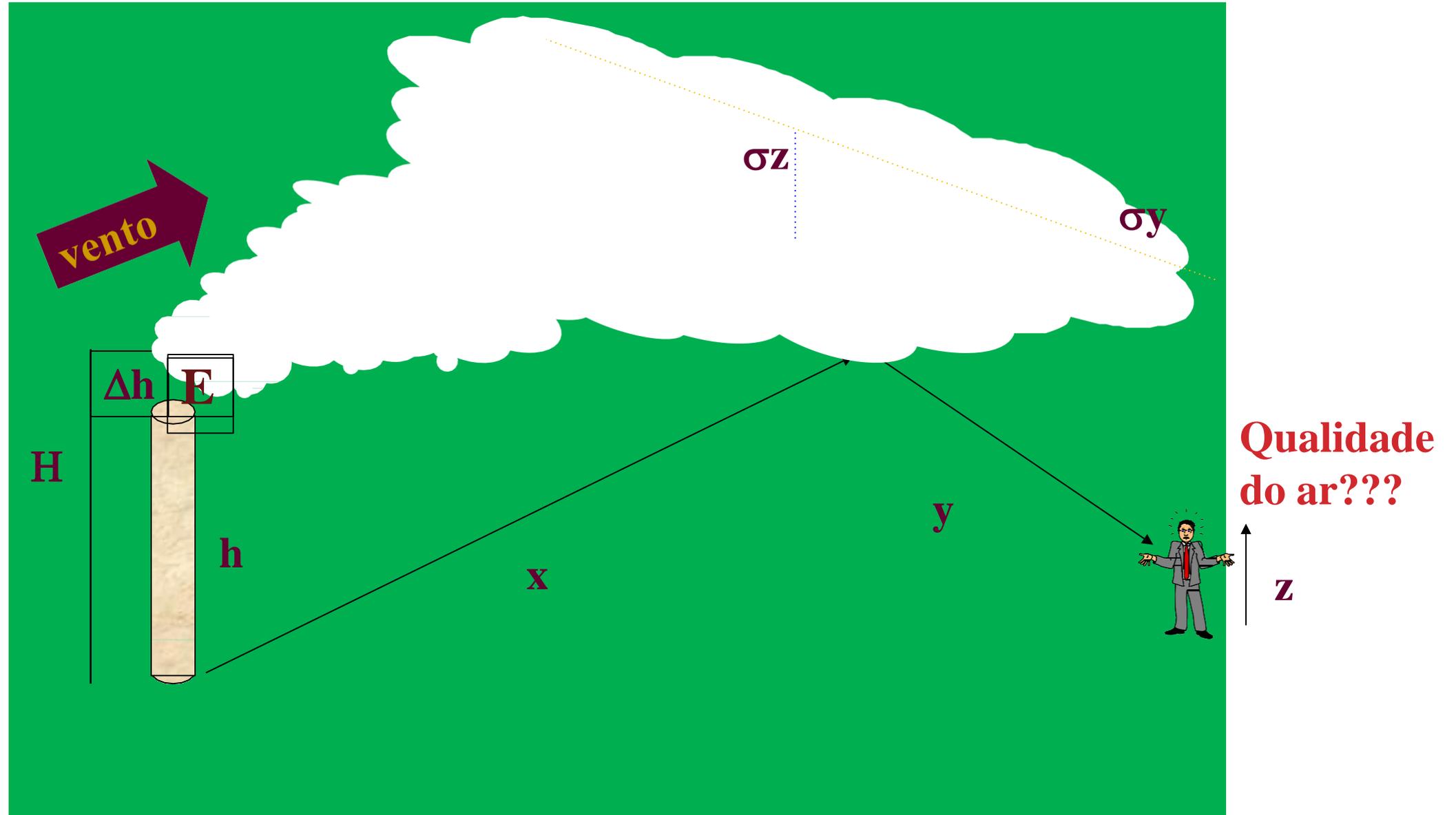
➤ Três diferentes tipos de cálculos são necessários para estimar a concentração ao longo do tempo:

- ✓ A elevação da pluma acima da chaminé;
- ✓ A dispersão dos poluentes;
- ✓ A concentração ao longo do tempo.

➤ Fatores que afetam os cálculos:

- ✓ Uso do solo;
- ✓ Topografia;
- ✓ Propriedades dos poluentes;
- ✓ Configuração da fonte;
- ✓ Múltiplas fontes;
- ✓ Tempo de exposição.

MODELO MATEMÁTICO GAUSSIANO DE DISPERSÃO DE POLUENTES NA ATMOSFERA



CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

➤ 1ª Etapa - cálculo de elevação da pluma e altura efetiva

$$\Delta h = d \cdot \left(\frac{V_s}{\bar{u}} \right)^{1.4} \cdot \left[1 + \left(\frac{T_s - T_{ar}}{T_s} \right) \right] \quad H = h + \Delta h$$

onde:

d: diâmetro da chaminé (m)

V_s: Velocidade de saída dos gases da chaminé (ms⁻¹)

T_s: Temperatura de saída(K)

T_{ar} : Temperatura ambiente (K)

μ : Velocidade média do vento (ms⁻¹)

H: Altura efetiva da chaminé (m)

Δh: Elevação da pluma (m)

CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

➤ 2ª Etapa - Cálculo da estabilidade atmosférica

Velocidade Vento (m/s)	Insolação Durante o Dia			Nebulosidade Noturna	
	Forte > 700 W/m ²	Média 350 - 700 W/m ²	Fraca < 350 W/m ²	Nebulosidade ≥ 4/8	Nebulosidade ≤ 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

Onde: A: muito instável

D: neutra

B: moderadamente instável

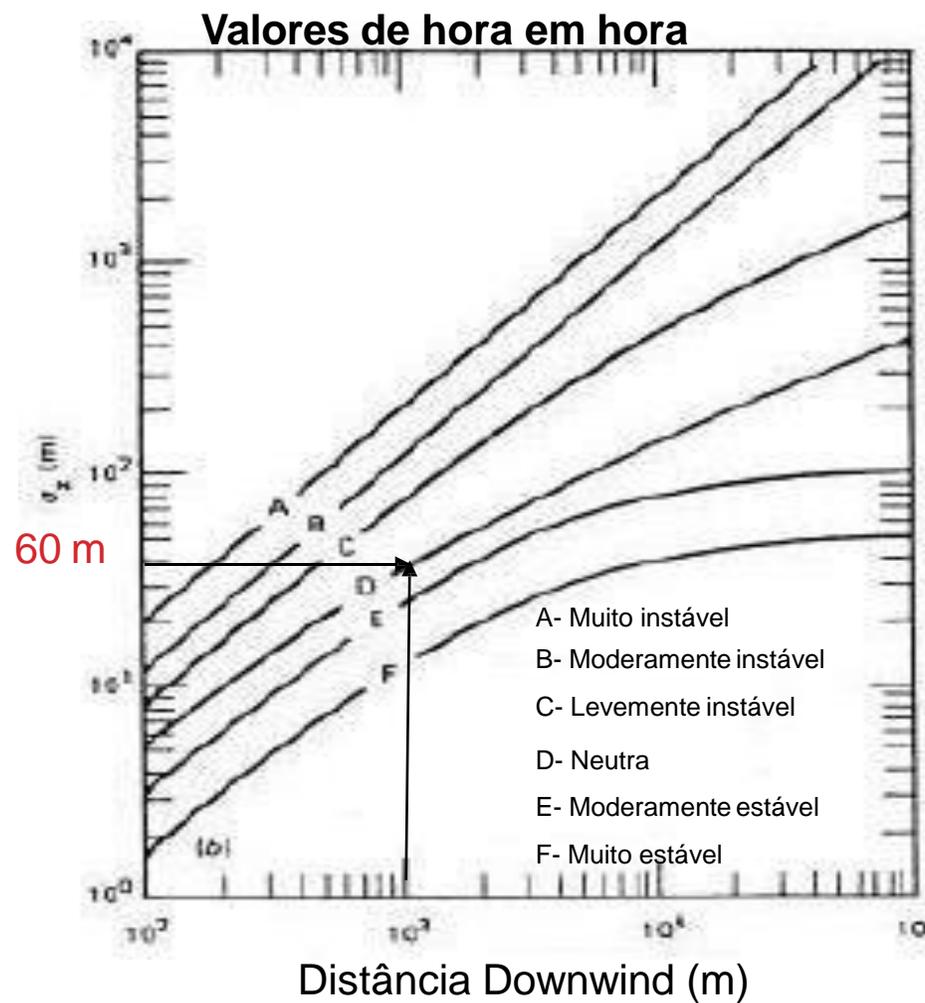
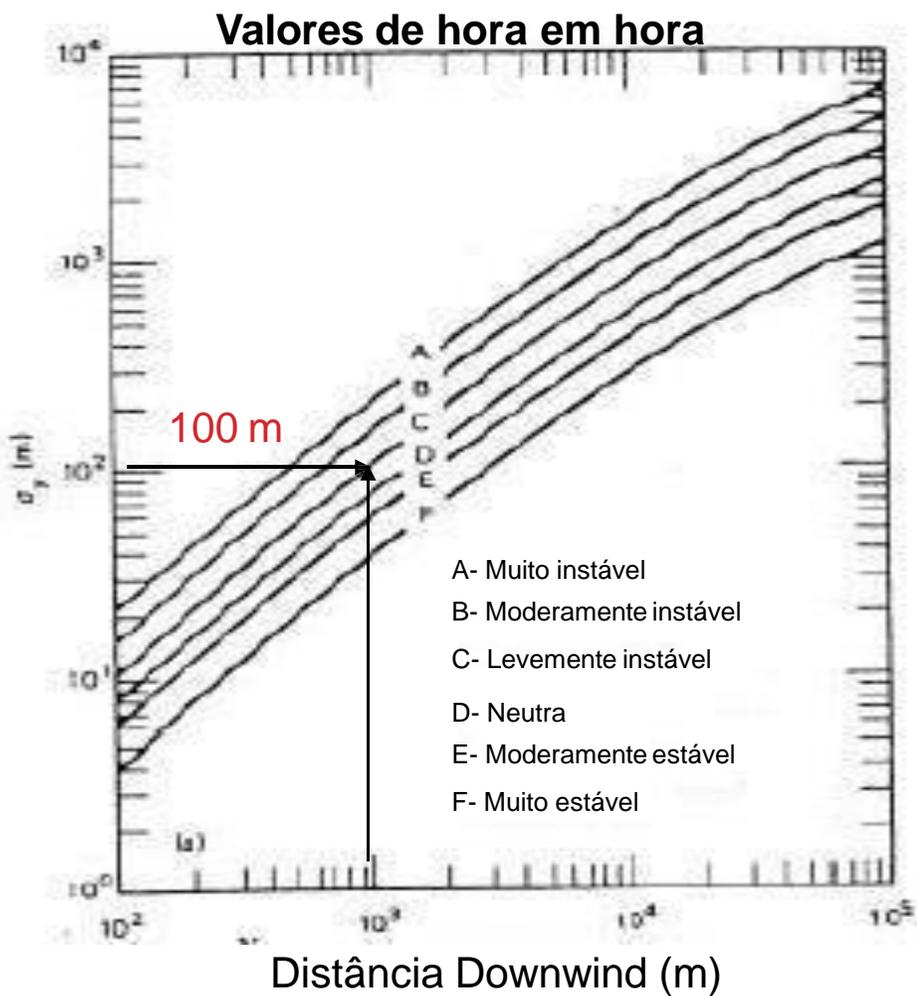
E: moderadamente estável

C: levemente instável

F: muito estável

CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

➤ 3ª Etapa - Cálculo da dispersão horizontal e vertical



CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

➤ 4ª Etapa - Cálculo de concentração do SO₂

$$C = \frac{E}{\pi \cdot S_y \cdot S_z \cdot \mu} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{S_y}\right)^2\right] \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{H}{S_z}\right)^2\right]$$

onde:

- C (x,y,z) : concentração média do poluente (g/m³)
x : dist. da fonte (m)
S_y : dist. horizontal do eixo central da pluma (m)
S_z : dist. acima do solo (m)
E : Vazão mássica de emissão (vazão de lançamento do gás) (g/s)
μ : Velocidade média do vento (ms⁻¹)
H : Altura efetiva da chaminé (m)
α : coeficiente de reflexão [sem dimensão]

CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

➤ 4ª Etapa - Cálculo de concentração do SO₂

$$C = \frac{E}{\pi \cdot S_y \cdot S_z \cdot u} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{S_y}\right)^2\right] \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{H}{S_z}\right)^2\right]$$

CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

➤ Etapa - Cálculo de concentração do SO_2 , utilizando o modelo Screen

