

Escola de Engenharia de Lorena – EEL - USP

Poluição Ambiental II – Modelagem Matemática da Dispersão de Poluentes

Janaína F. B. Leal (baseado em vários autores)



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.
- Deste modo, os dados de entrada necessários para os modelos incluem os parâmetros meteorológicos, de fonte e de receptor.

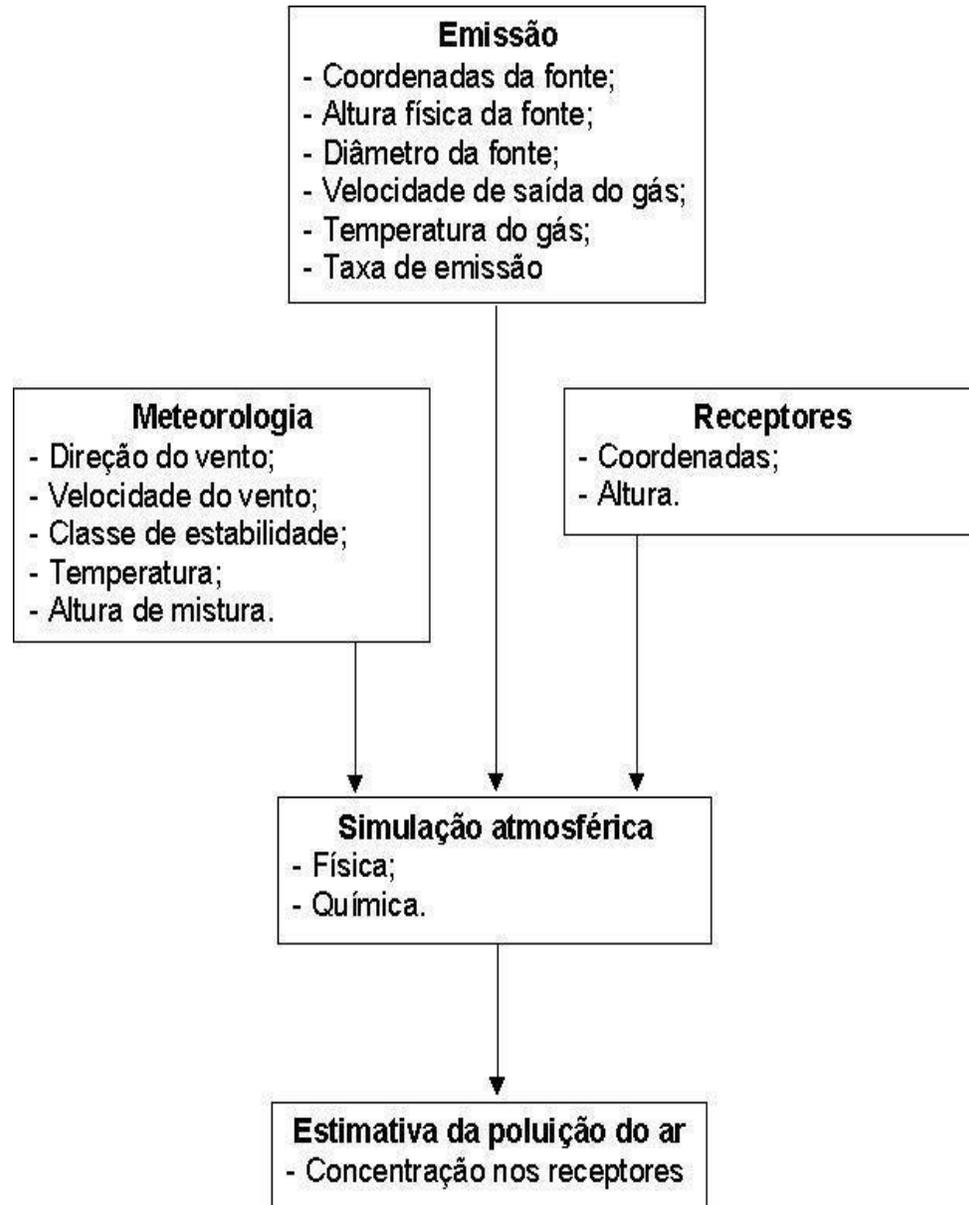
Principais condições meteorológicas que afetam a dispersão

- 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

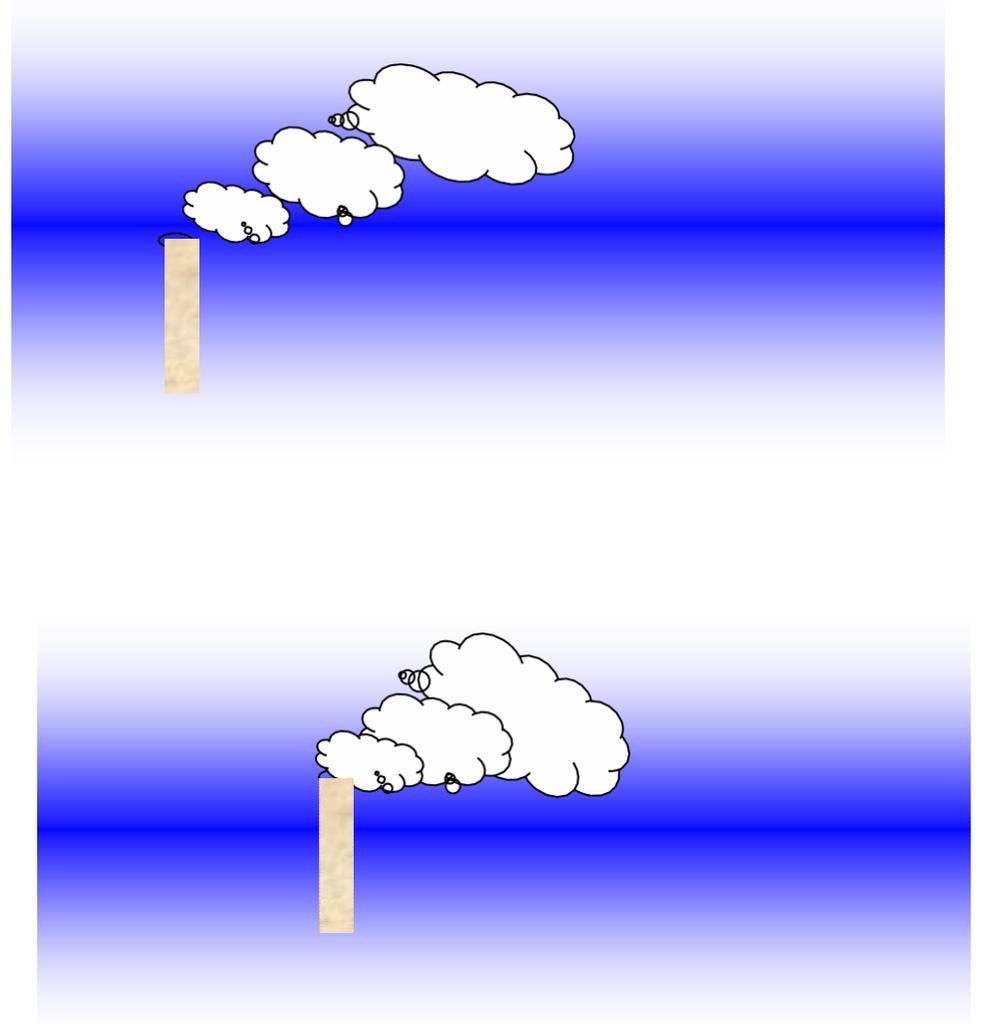


Objetivos do uso de modelos de dispersão atmosférica

- Avaliação das eficiências de técnicas e estratégias propostas para o controle das emissões
- Estudo de impactos ambientais para um novo empreendimento
- Determinação de responsabilidades frente aos níveis atuais de poluição
- Planejamento da ocupação territorial urbana

Emissão de Poluentes: 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.

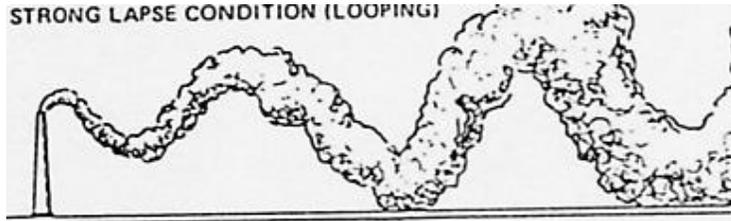


Plumas

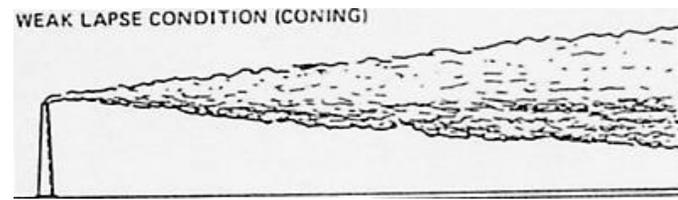
- O comportamento final de uma pluma ao sair de uma chaminé pode ser subdividido em duas componentes principais:
 - Ascensão da pluma
 - Difusão e transporte da pluma

- ***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.

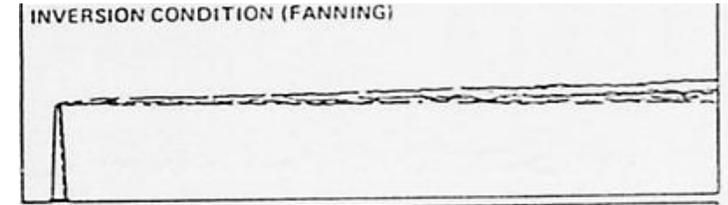
Tipos de Plumas



Looping



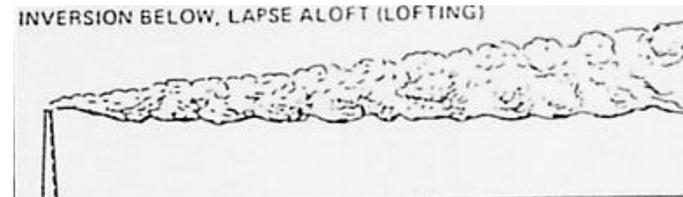
Coning



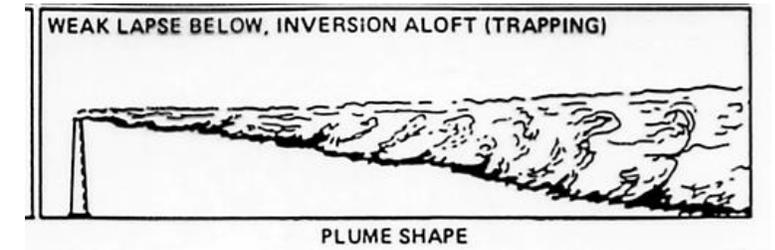
Fanning



Fumigation

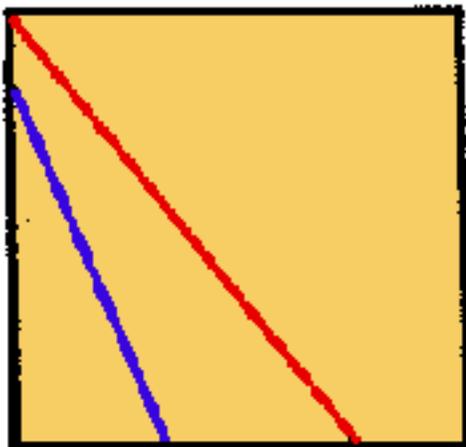


Lofting

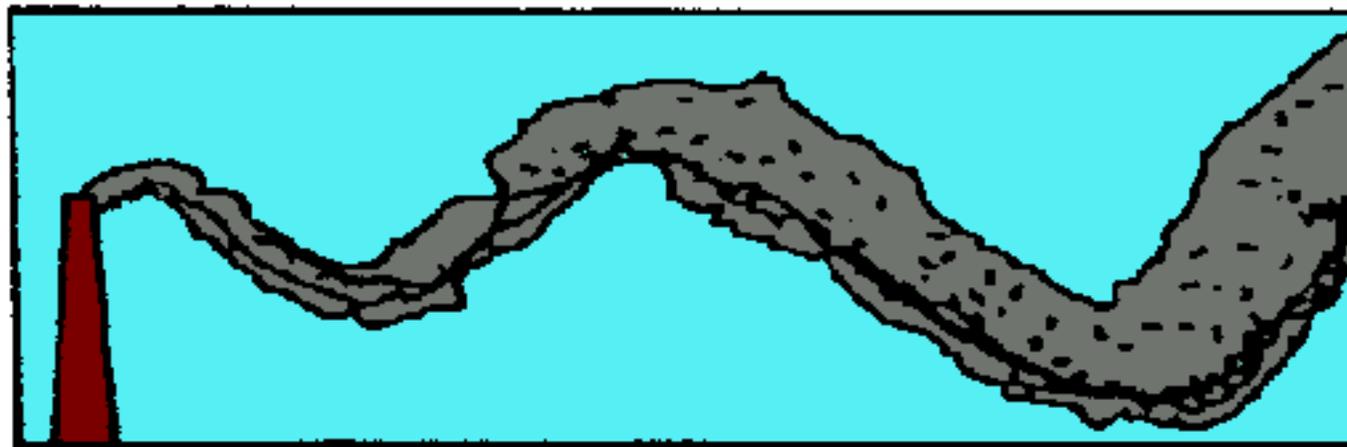


Trapping

Tipos de Plumas



X - Temperatura
Y - Altitude



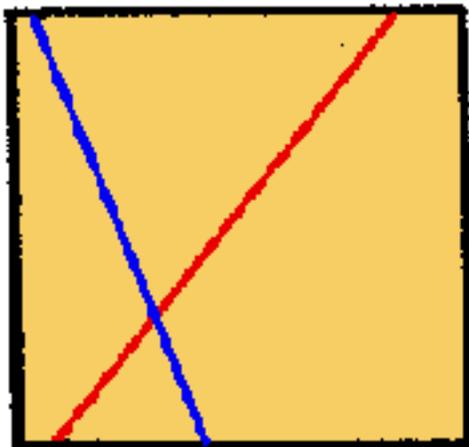
a) Looping - muito instável

TIPOS DE PLUMAS

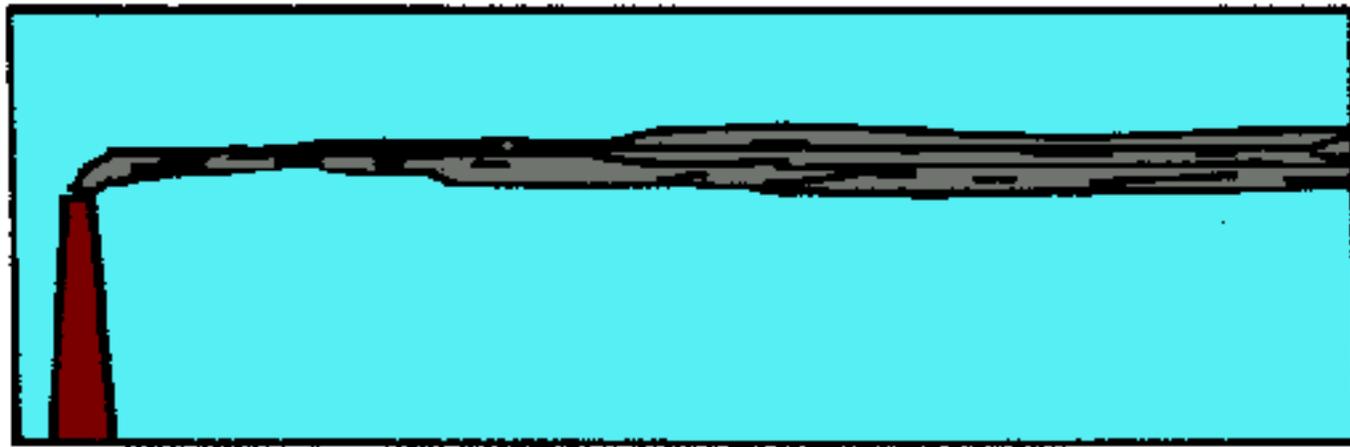
Looping



Tipos de Plumias



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, finalmente, 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.
- No tratamento clássico é assumido que a nuvem 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

- 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.

MODELOS 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 química 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.

Modelos de dispersão 1 -Modelo de Pluma Gaussiana:

- 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 são muito simples e necessitam de pouco tempo de máquina. 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.
- Limitados a situações com terreno plano sem obstáculos, gases com a mesma densidade do ar, etc. Suas limitações levaram à busca de modelagens mais realistas e precisas.

Modelos de dispersão

2-Modelos Numéricos a Três Dimensões:

- As equações físicas da dispersão são utilizadas sem modificações, nenhuma hipótese simplificadora é necessária.
- Esses modelos buscam simular o comportamento real e permitem tratar qualquer tipo de emissão ou escape (gases leves ou pesados), sobre qualquer tipo de terreno (com ou sem obstáculos).
- Esses modelos são extremamente complexos e necessitam de muito tempo para preparação dos dados de entrada e também para tempo de cálculo.
- Logicamente são modelos muito interessantes para tratar cenários muito próximos da fonte de liberação, onde a presença de obstáculos tem uma grande importância.

Exemplo Equacionamento Numérico 3D



Navier-Stokes Equations 3 - dimensional - unsteady

Glenn
Research
Center

Coordinates: (x,y,z)	Time: t	Pressure: p	Heat Flux: q
Velocity Components: (u,v,w)	Density: ρ	Stress: τ	Reynolds Number: Re
	Total Energy: Et		Prandtl Number: Pr

Continuity:
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

X - Momentum:
$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right]$$

Y - Momentum:
$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right]$$

Z - Momentum:
$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right]$$

Energy:
$$\frac{\partial(E_T)}{\partial t} + \frac{\partial(uE_T)}{\partial x} + \frac{\partial(vE_T)}{\partial y} + \frac{\partial(wE_T)}{\partial z} = -\frac{\partial(u p)}{\partial x} - \frac{\partial(v p)}{\partial y} - \frac{\partial(w p)}{\partial z} - \frac{1}{Re_r Pr_r} \left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial}{\partial x} (u \tau_{xx} + v \tau_{xy} + w \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (u \tau_{xy} + v \tau_{yy} + w \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (u \tau_{xz} + v \tau_{yz} + w \tau_{zz}) \right]$$

TEORIA DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA: ABORDAGENS DE EULER E LAGRANGE

- A dispersão do ar poluído pode ser numericamente simulada por várias abordagens, as quais são divididas em duas categorias (Zannetti, 1990):
 - Abordagem Euleriana
 - Abordagem Lagrangiana

TRANSPORTE E DISPERSÃO DE POLUENTES NA ATMOSFERA

- Abordagem Euleriana

A dispersão é estudada em termos de uma equação diferencial para conservação de massa a qual é resolvida em um domínio fixo no espaço-tempo.

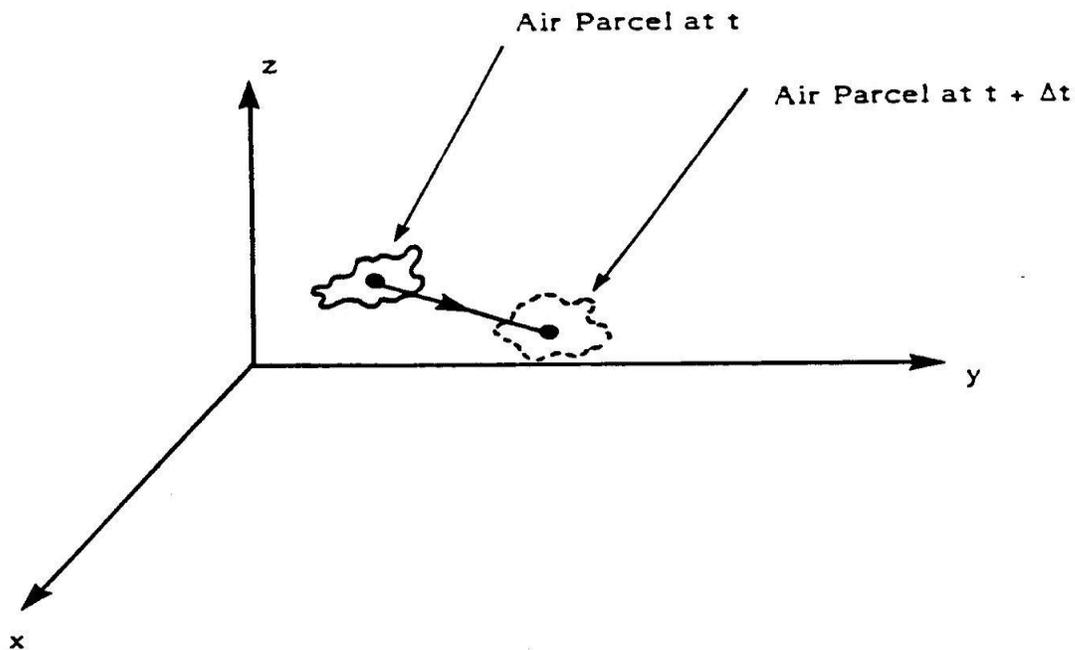
- Abordagem Lagrangeana

Nos modelos lagrangeanos a trajetória de cada partícula representa uma realização estatística em um campo turbulento caracterizado por certas condições iniciais e vínculos físicos. As variações de concentração são descritas com relação ao fluxo.

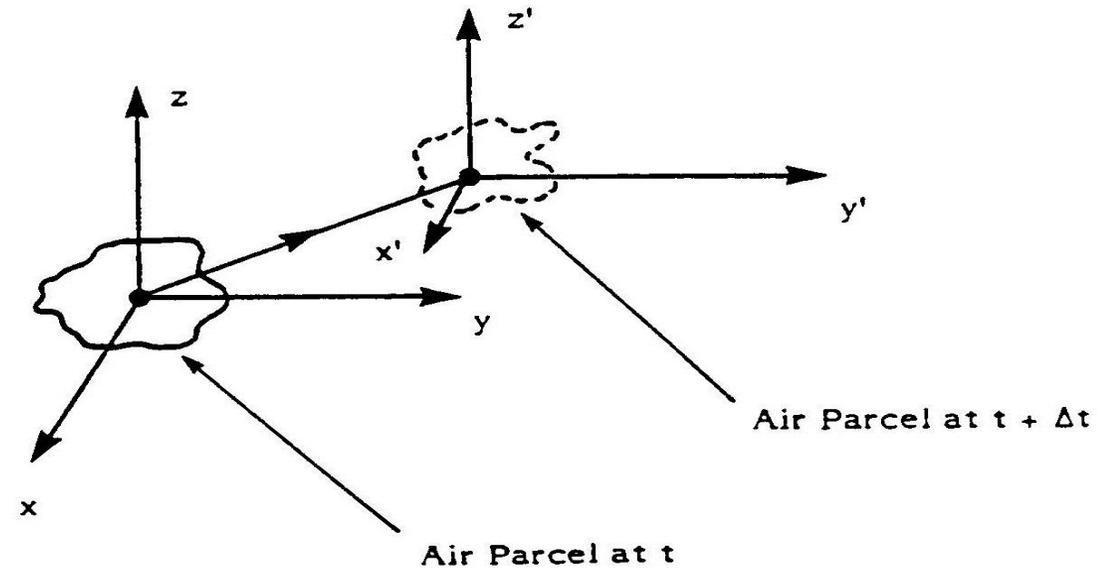
Abordagem Euleriana e Lagrangiana

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

(a)



(b)



- **Abordagem Euleriana:** A aproximação Euleriana 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

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

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

➤ **Abordagem Lagrangiana:** a equação fundamental para a dispersão atmosférica de um poluente determinado é:

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

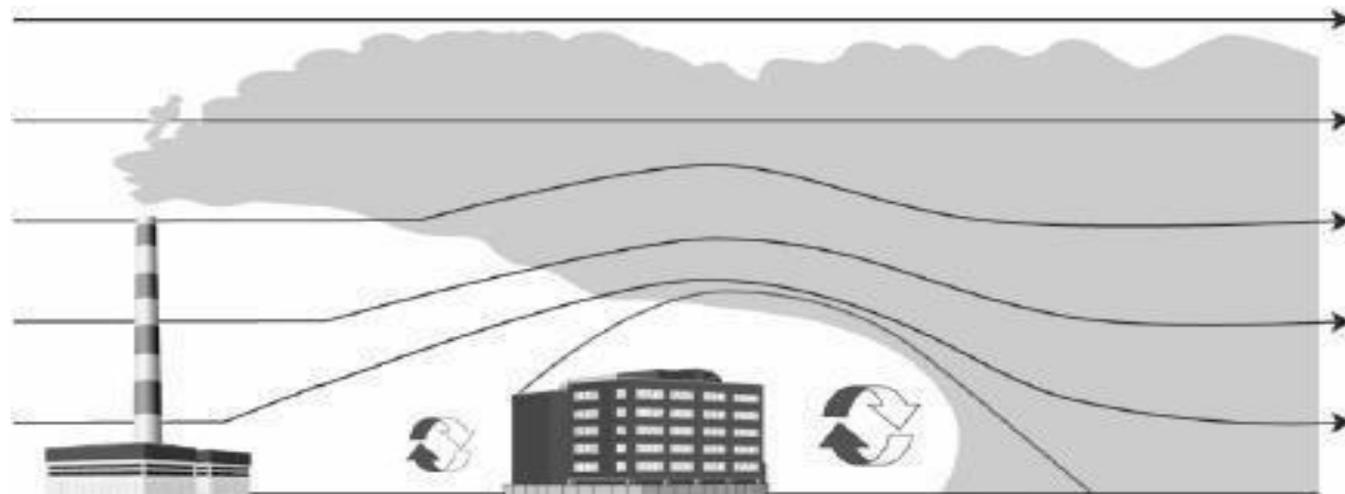
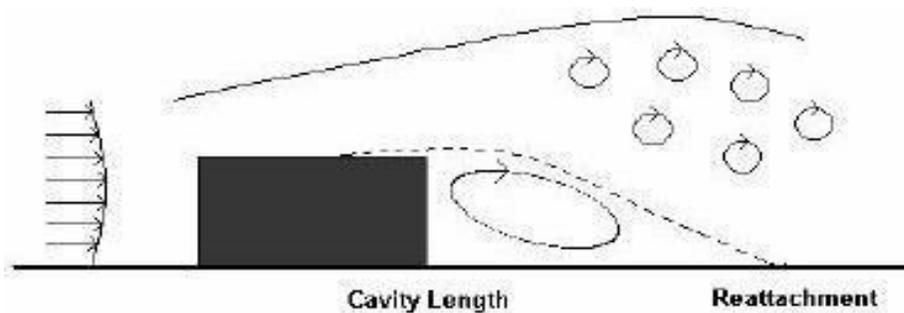
✓ Onde, a integração no espaço é feita sobre a totalidade do domínio atmosférico e o primeiro termo representa a concentração média em r para o tempo t; S(r',t') é o termo fonte; e p(r, t|r', t') é a função densidade de probabilidade que uma parcela de ar move-se de r' no tempo t' para r no tempo t.

Formulações do Modelo Gaussiano – Programas Computacionais

- 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.

CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

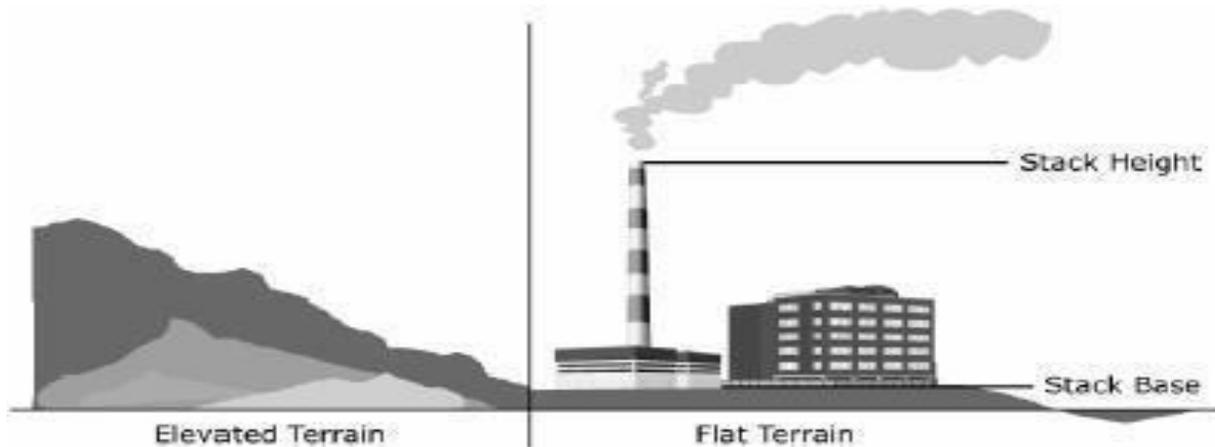
- Modificações nos modelos gaussianos
- ✓ Building Downwash



CÁLCULO DE DISPERSÃO DE PLUMAS ATMOSFÉRICAS

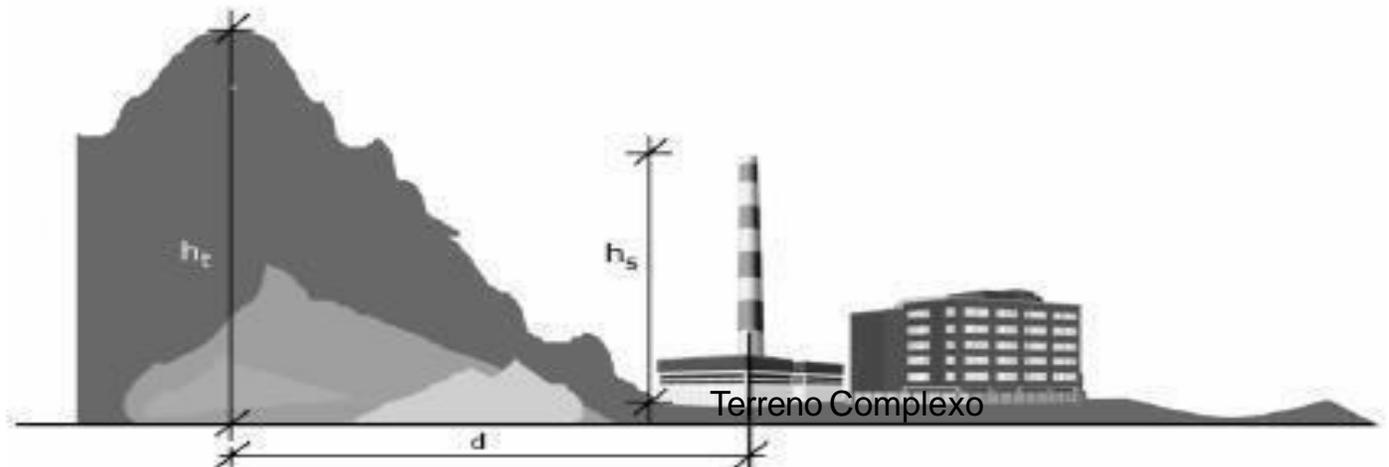
➤ Modificações nos modelos gaussianos

✓ Topografia



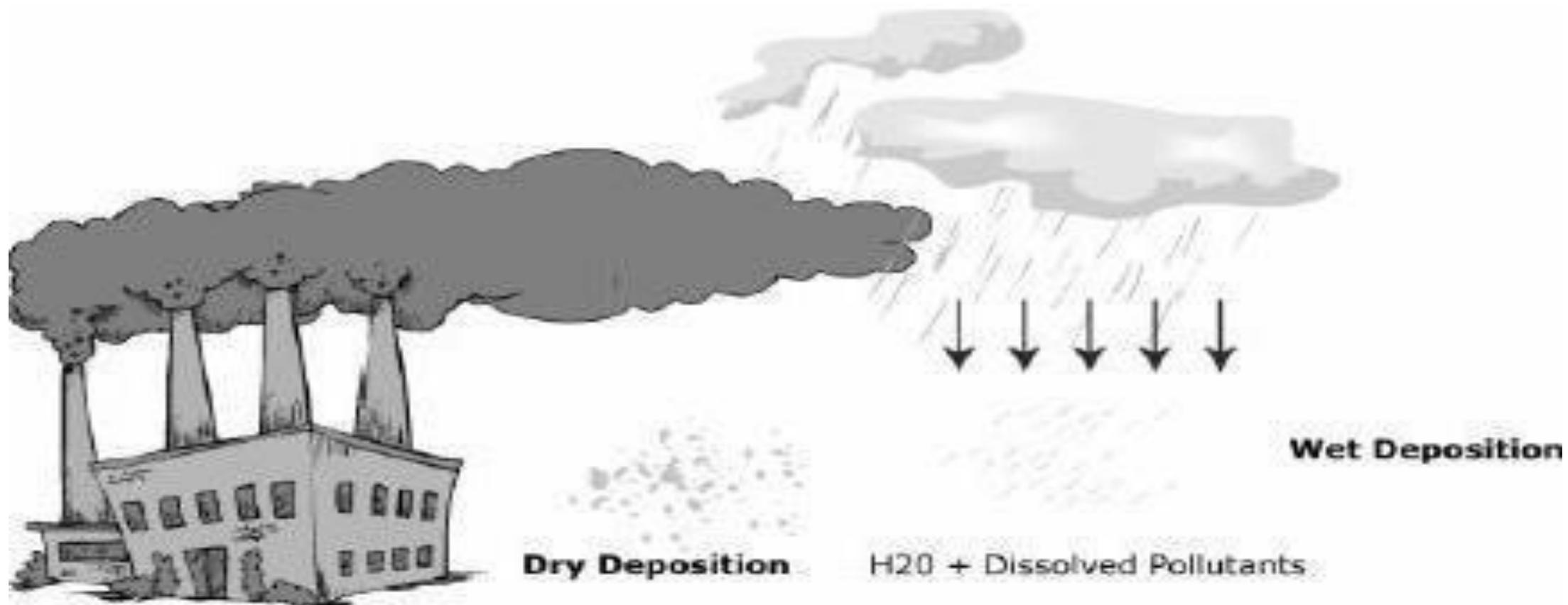
Terreno Simples

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



Formulações do Modelo Gaussiano – Programas Computacionais

- Modelo Gaussiano ISCST3 (Industrial Source Complex Short Term)

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.

- AERMOD-ISC3:

Modelo Gaussiano que pode ser usado para determinar a concentração de poluentes associadas à diversas fontes em complexos industriais. Este modelo inclui: deposição seca e úmida, fontes pontuais, de linha, área e volume, incorpora os efeitos de elevação da pluma e um limitado ajuste ao relevo do terreno. Este é o principal modelo utilizado para Estudos de Impacto Ambiental da EPA.

Formulações do Modelo Gaussiano – Programas Computacionais

- 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 – Programas Computacionais

- 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;

Modelo tipo Pluma Gaussiana - Analítico

É normalmente aplicado, quando se deseja estimar as distribuições de concentrações a partir de determinada emissão industrial, estabelecendo-se condições de contorno para a movimentação do ar em torno dessa emissão.

Modelo tipo Pluma Gaussiana

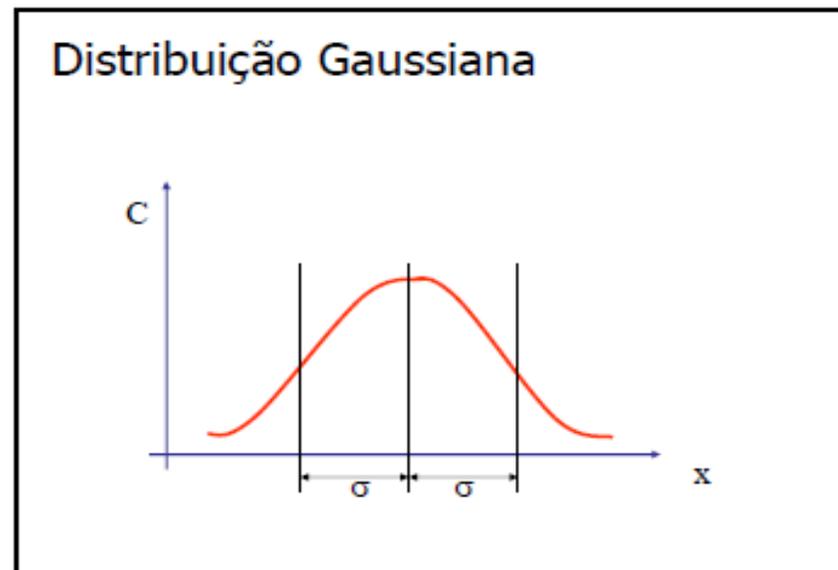
Este modelo é a solução analítica simplificada da equação de Difusão - Advecção, a qual descreve matematicamente os processos de transporte e difusão turbulenta que ocorrem na atmosfera.

Equação da Difusão - Advecção

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

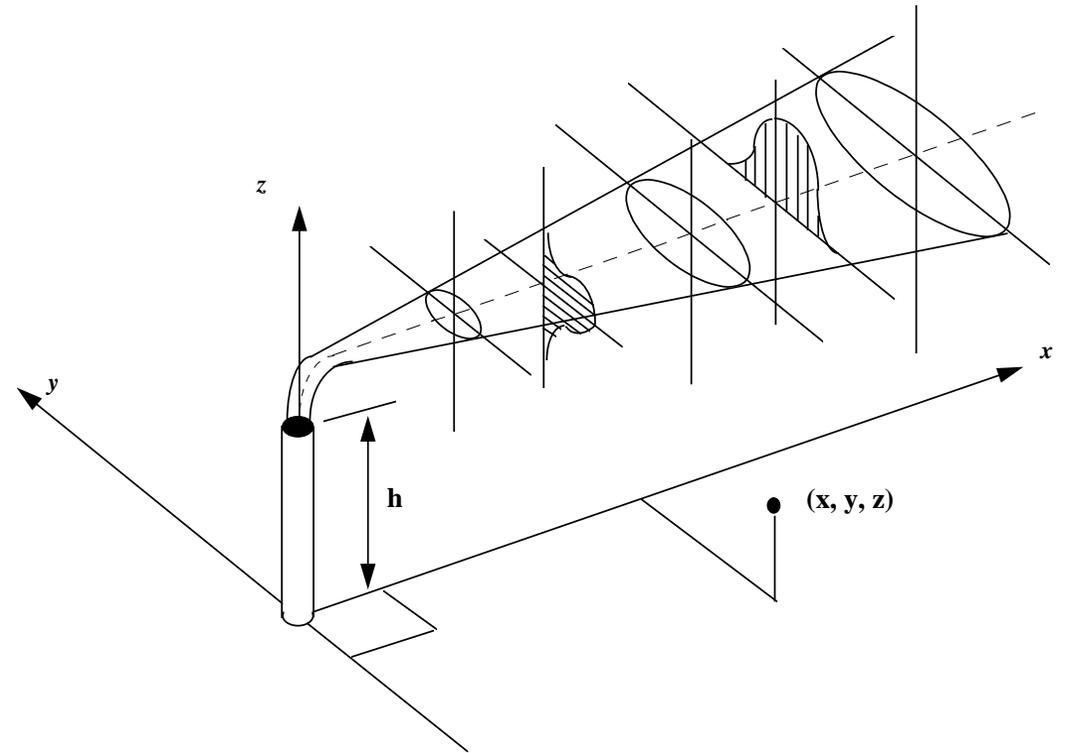
Modelo tipo Pluma Gaussiana

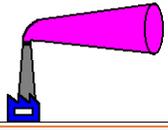
A dispersão de uma pluma lançada na atmosfera se dá de tal modo que a concentração dos poluentes da pluma em função da posição relativa à fonte exhibe um comportamento Gaussiano.



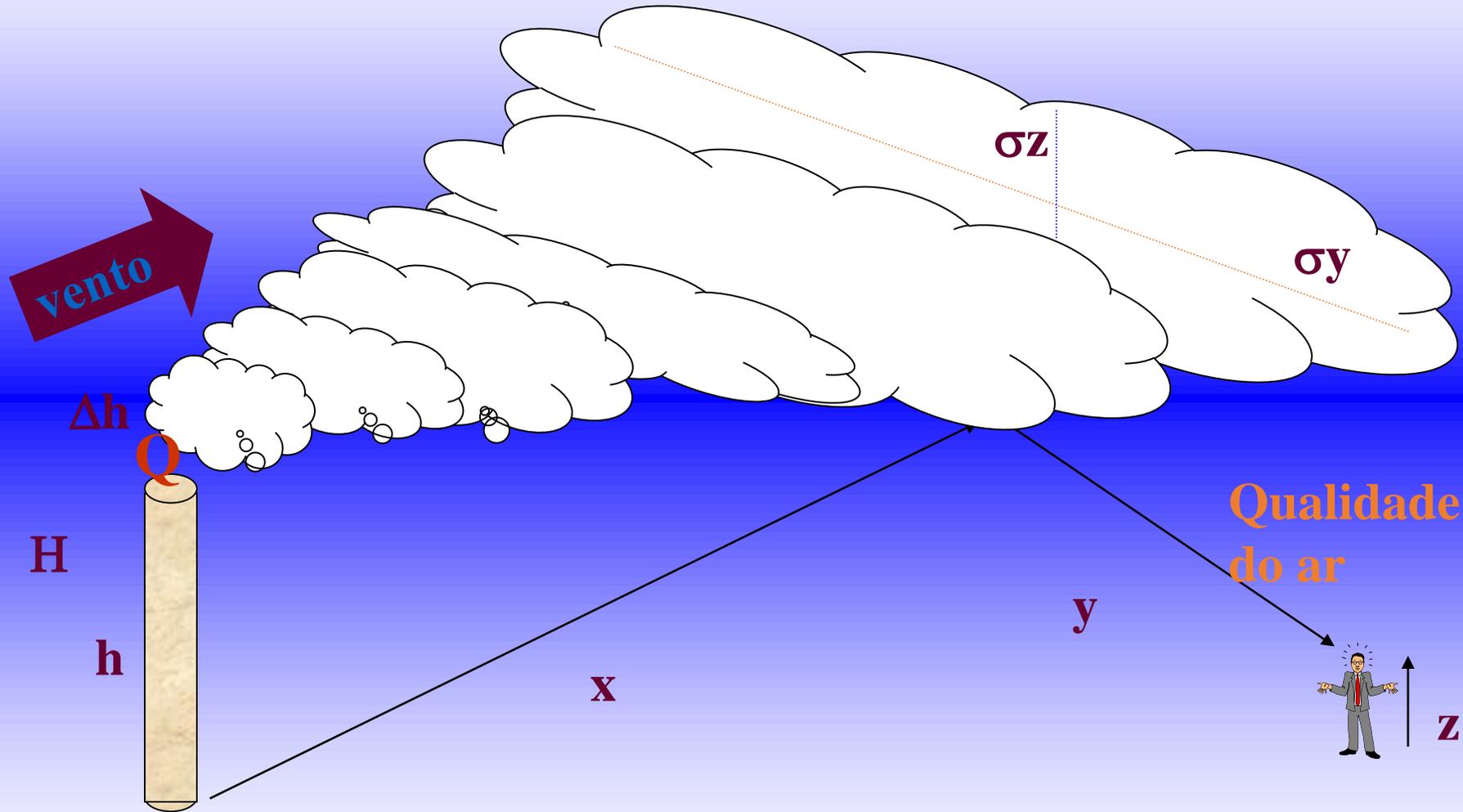
Modelo tipo Pluma Gaussiana

- 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

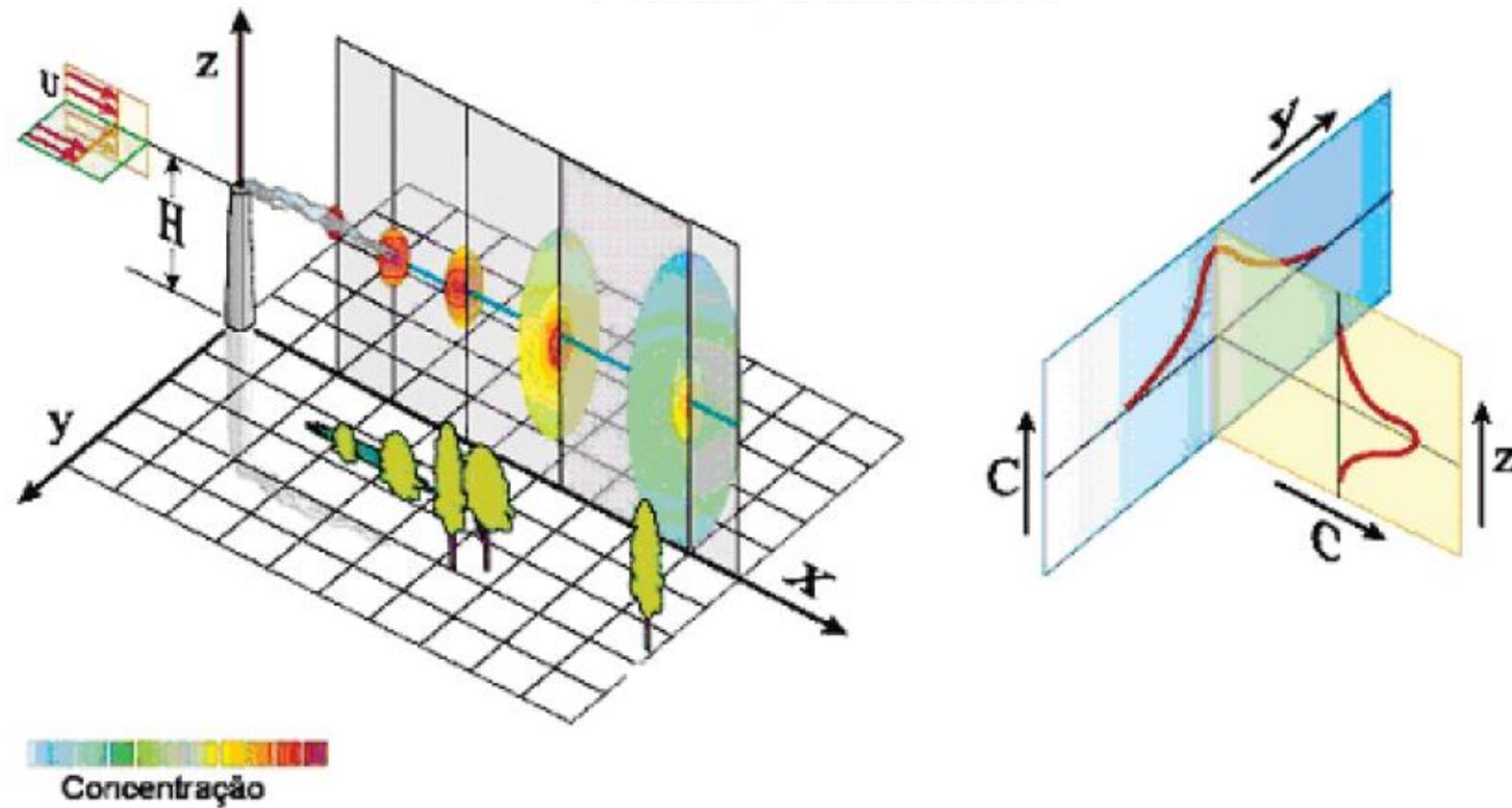




MODELO MATEMÁTICO GAUSSIANO DE DISPERSÃO DE POLUENTES NA ATMOSFERA

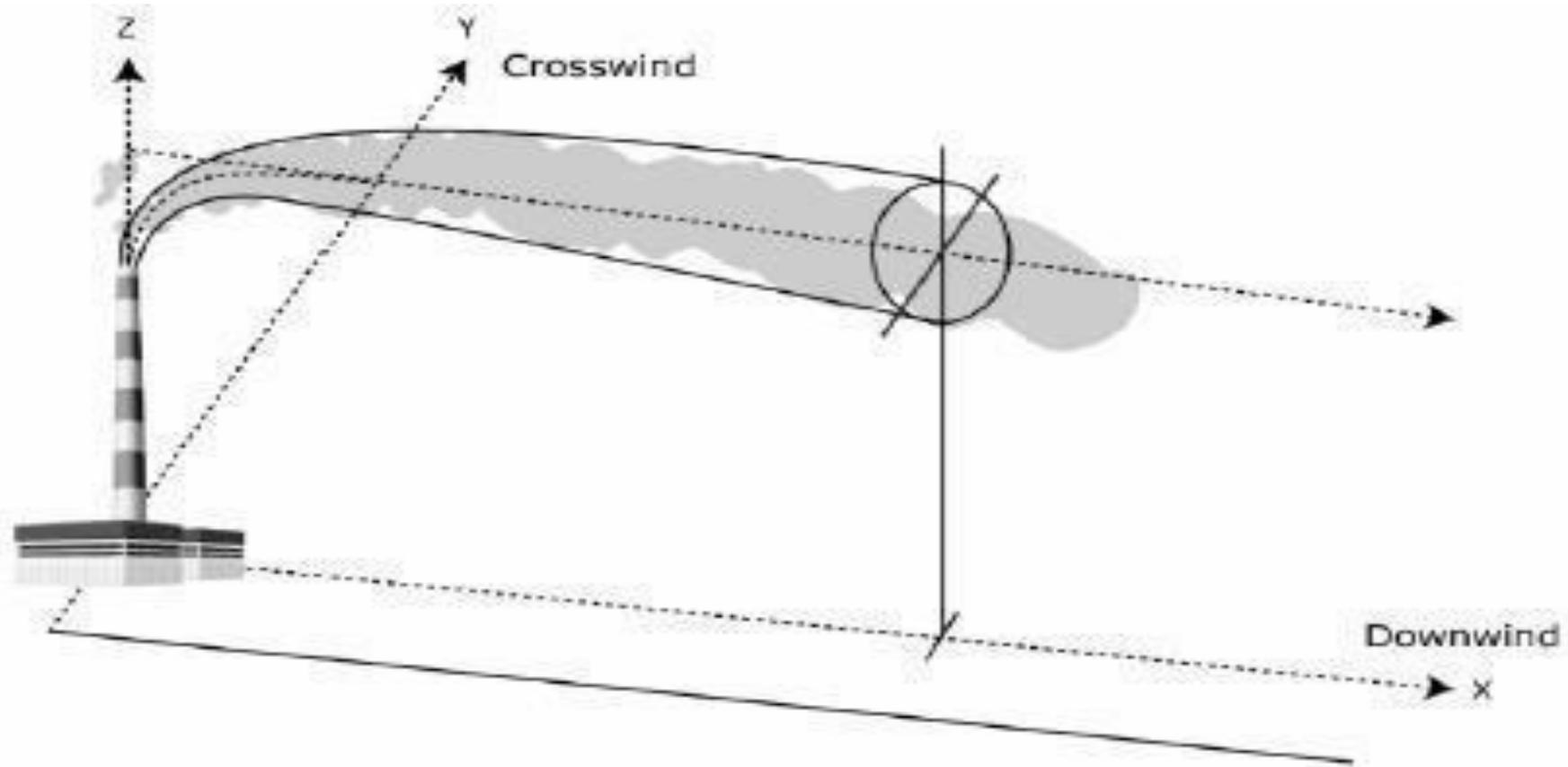


Modelo tipo Pluma Gaussiana



Modelo tipo Pluma Gaussiana

➤ Crosswind x Downwind



Equação emissão pontual contínua ou clássica utilizada para o cálculo das concentrações

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 modelos 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)

Equação emissão pontual contínua ou clássica utilizada para o cálculo das concentrações

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

onde:

C (x,y,z)	: concentração média do poluente	(g/m ³)
x	: dist. da fonte	(m)
y	: dist. horizontal do eixo central da pluma	(m)
z	: dist. acima do solo	(m)
Q	: Vazão mássica de emissão (vazão de lançamento do gás)	(g/s)
\bar{u}	: Velocidade média do vento	(ms ⁻¹)
H	: Altura efetiva da chaminé	(m)
α	: coeficiente de reflexão [sem dimensão]	
$\sigma_y \sigma_z$: coeficientes de dispersão (desvios padrões da distribuição gaussiana das concentrações) horizontal e vertical	(m)

OBS: $\exp.- a/b = e^{-a/b}$

sendo e = 2,7 1

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;
- 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;

Hipóteses simplificativas :

- 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.

Coeficientes de Dispersão

Consideração: 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** ou o **modelo de Briggs** (1974).

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

Coeficientes 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-Gifford) 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

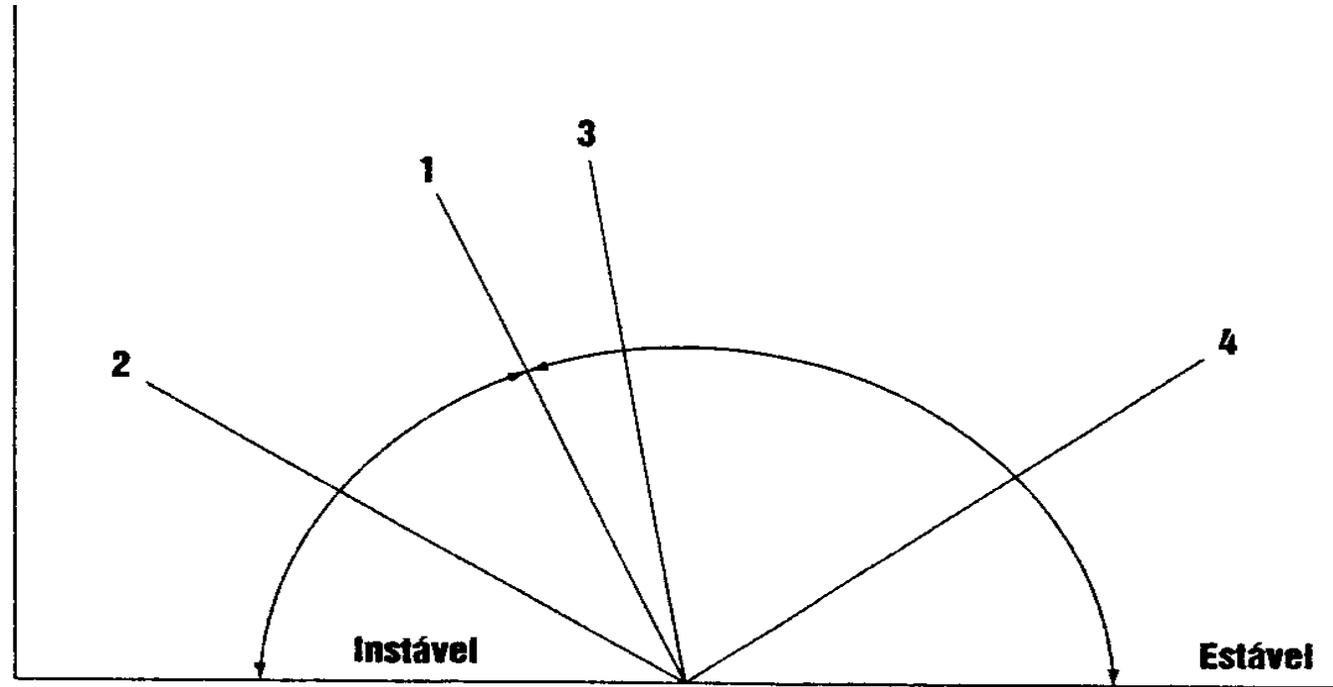
Velocidade superficial do vento (a 10 m) m/s	Dia			Noite*	
	Radiação Solar Incidente			≥ 4/8 de nuvens baixas (nublado)	≤ 3/8 de nuvens (claro)
	Forte	Moderada	Fraca		
<2	A	A – B	B	-	-
2 - 3	A – B	B	C	E	E
3 - 5	B	B – C	C	D	E
5 - 6	C	C – D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

* 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.

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);

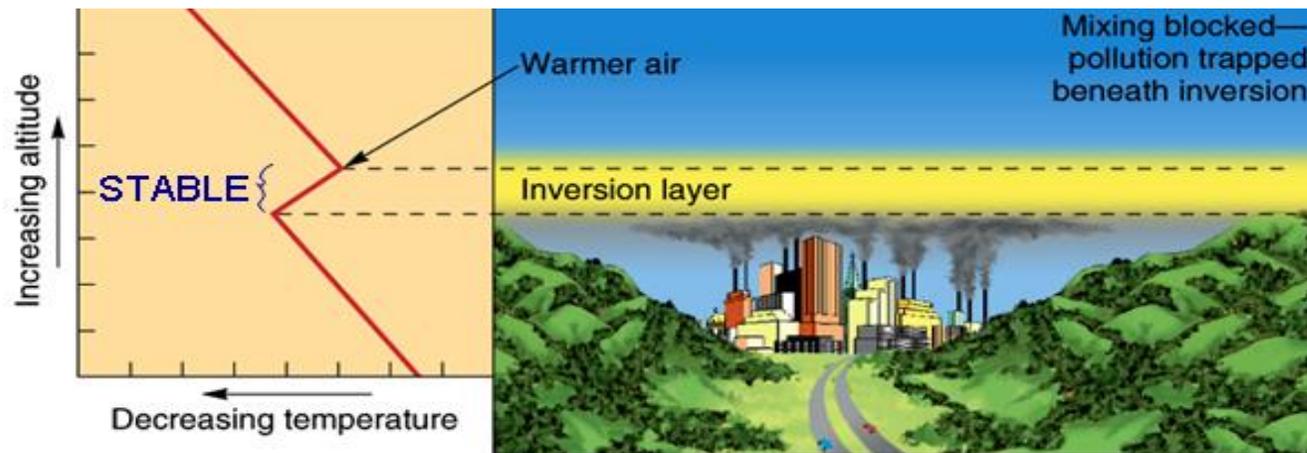
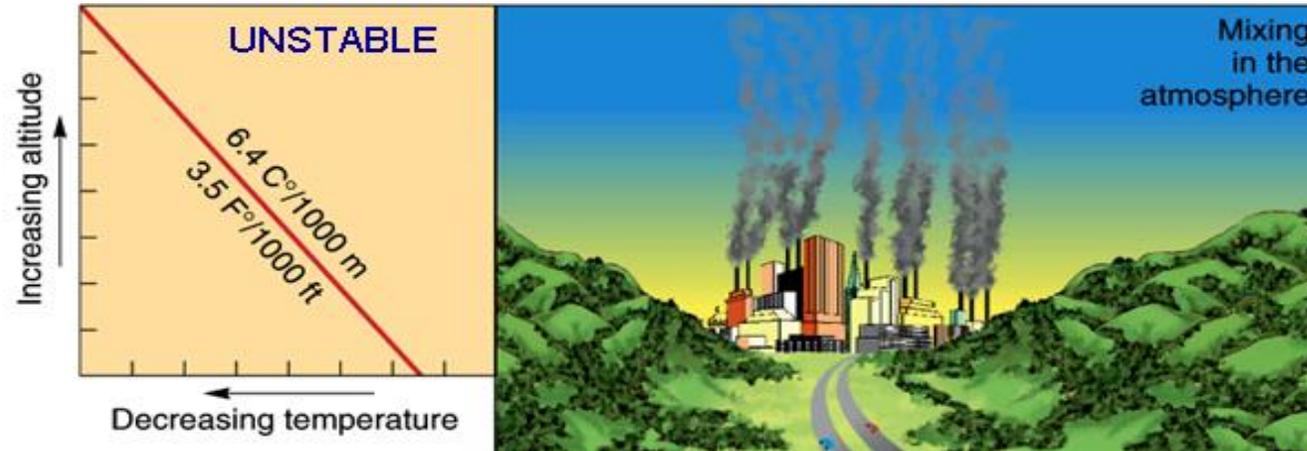
4 perfil de inversão térmica (atmosfera extremamente estável).

- O estado neutro ocorre quando o gradiente de temperatura é igual ao adiabático seco e a variação da temperatura com a altitude é de aproximadamente $1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. De acordo com a NBR-8969 (1995) esta taxa de decréscimo é conhecida como Gradiente Térmico Adiabático Seco.

- O estado instável ocorre quando o gradiente de temperatura excede ao adiabático seco e a variação da temperatura com a altitude é maior que $1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$.

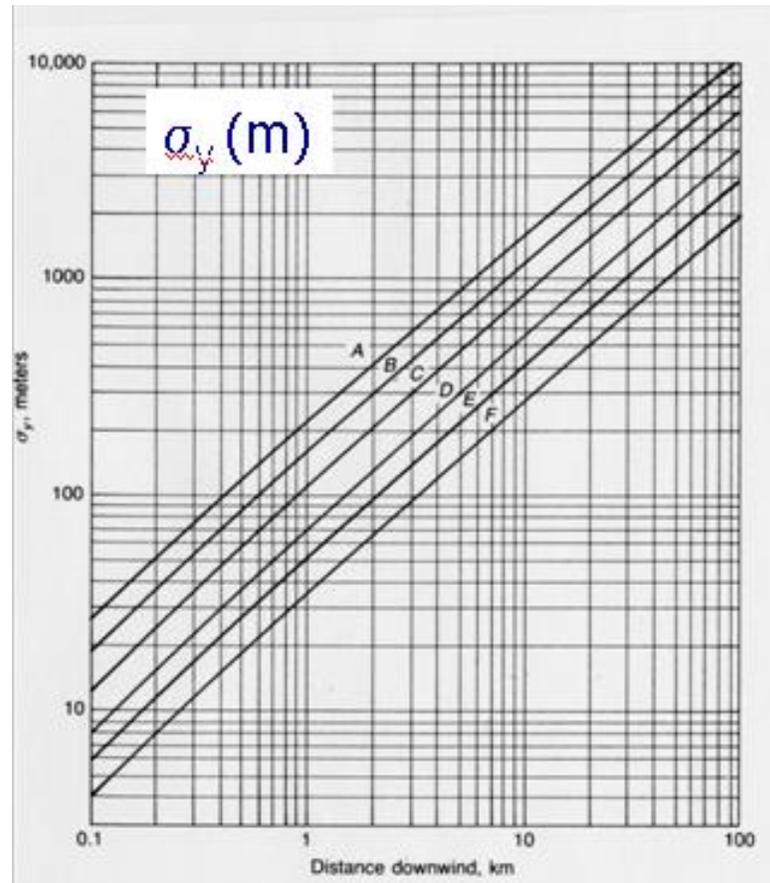
- O estado estável ocorre quando o gradiente de temperatura é menor que o adiabático seco e a variação da temperatura com a altitude é menor que $1^{\circ}\text{C}/100$.

Modelos de Dispersão de Poluentes



Ábaco de Pasquill-Gifford

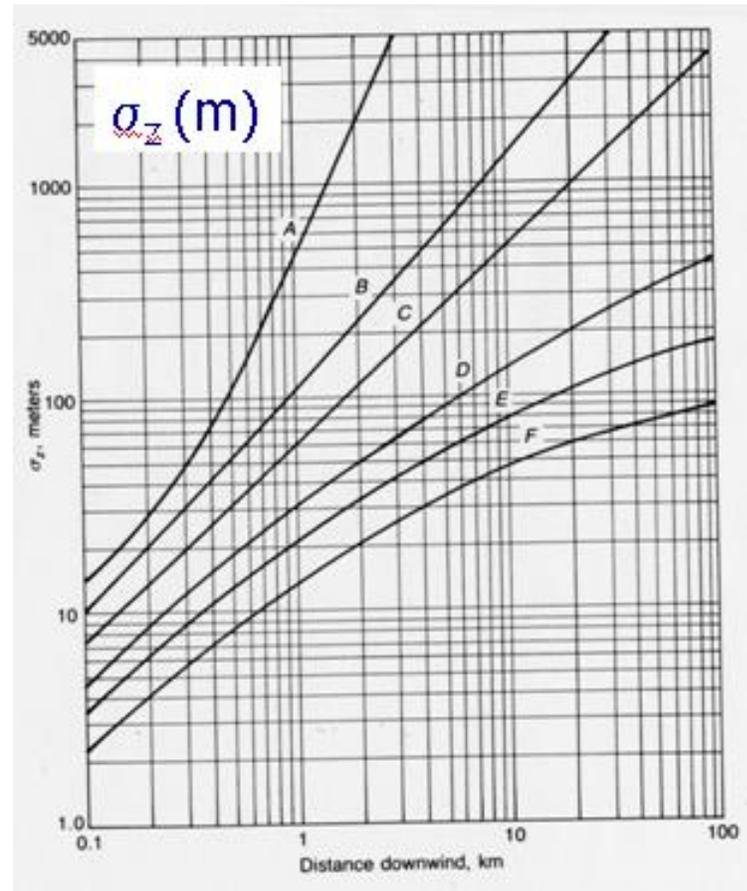
Modelo gaussiano - Avaliação dos desvios-padrão



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

Ábaco de Pasquill-Gifford

Modelo gaussiano - Avaliação dos desvios-padrão



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

Modelo de Briggs

Modelo gaussiano

Parâmetros de dispersão urbana por Briggs (para distâncias entre 100 e 10.000 M) - Média de 10 minutos

Categoria	σ_y	σ_z
A - B	$0,32 \times (1 + 0,0004x)^{-0,5}$	$0,24 \times (1 + 0,001x)^{-0,5}$
C	$0,22 \times (1 + 0,0004x)^{-0,5}$	$0,20 \times$
D	$0,16 \times (1 + 0,0004x)^{-0,5}$	$0,14 \times (1 + 0,0003x)^{-0,5}$
E - F	$0,11 \times (1 + 0,0004x)^{-0,5}$	$0,08 \times (1 + 0,0015x)^{-0,5}$

Modelo de Briggs

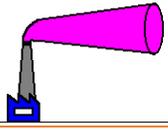
Modelo gaussiano

Parâmetros de dispersão para condições de campo aberto, por Briggs (para distâncias entre 100 e 10.000 m) - Média de 10 minutos

Categoria	σ_y	σ_z
A	$0,22 \times (1 + 0,0001x)^{-0,5}$	$0,20 \times$
B	$0,16 \times (1 + 0,0001x)^{-0,5}$	$0,12 \times$
C	$0,11 \times (1 + 0,0001x)^{-0,5}$	$0,08 \times (1 + 0,0002x)^{-0,5}$
D	$0,08 \times (1 + 0,0001x)^{-0,5}$	$0,06 \times (1 + 0,0015x)^{-0,5}$
E	$0,06 \times (1 + 0,0001x)^{-0,5}$	$0,03 \times (1 + 0,0003x)^{-1}$
F	$0,04 \times (1 + 0,0001x)^{-0,5}$	$0,16 \times (1 + 0,0003x)^{-1}$

Variação do cálculo da concentração com o tempo da amostragem

- Os coeficientes de dispersão empregados nos modelos matemáticos foram obtidos experimentalmente, dependem do tempo de amostragem e dos períodos de emissão contínua utilizados nos experimentos.**
- As concentrações calculadas com esses parâmetros devem ser corrigidas para os intervalos de tempo de interesse para o estudo.**
- A fim de confrontar os valores calculados com os padrões de qualidade do ar os valores devem ser corrigidos para 24 horas.**



Modelo tipo Pluma Gaussiana - Simplificações

Ponto de amostragem ao nível do solo ($z=0$).

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot v} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{H}{\sigma_z} \right)^2} \rightarrow \boxed{z=0}$$

Nível do solo ($z=0$) e o deslocamento horizontal da linha central da pluma é igual a zero ($y=0$).

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot v} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{H}{\sigma_z} \right)^2} \rightarrow \boxed{\begin{matrix} z=0 \\ y=0 \end{matrix}}$$

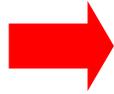
Nível do solo ($z=0$) e o deslocamento horizontal ($y=0$) e a emissão ao nível do solo ($H=0$).

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot v} \rightarrow \boxed{\begin{matrix} z=0 \\ y=0 \\ H=0 \end{matrix}}$$

Modelo tipo Pluma Gaussiana

Máxima concentração do poluente ao nível do solo:

$$\sigma_z = \frac{H}{\sqrt{2}}$$



$$C_{(x,0,0)\max} = \frac{0,117 Q}{u \sigma_y \sigma_z}$$

Com o valor de σ_z entra-se no ábaco e retira-se x_{\max} .

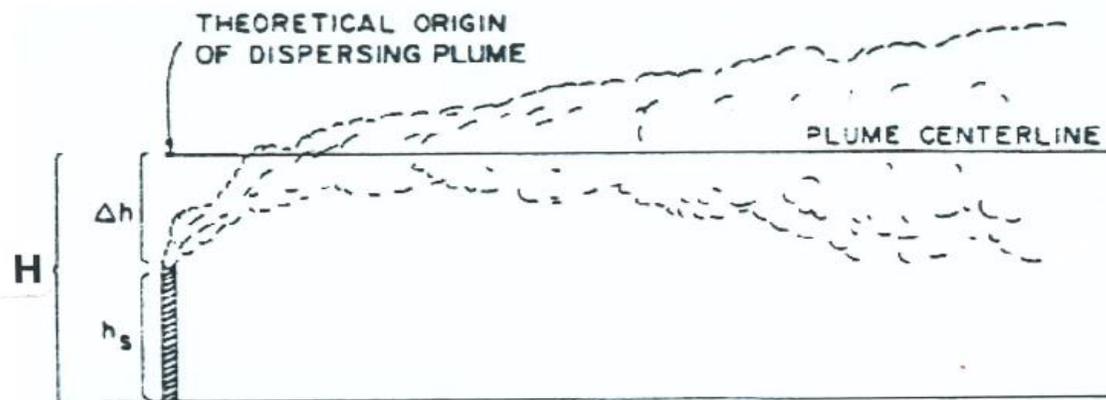
Com x_{\max} calcula-se σ_y .

Altura efetiva da chaminé

Para simplificar o tratamento da dispersão, é conveniente impor que esta começa a uma altura fictícia acima da fonte real, em vez de subir e dispersar simultaneamente → “altura efetiva da chaminé”:

$$H = h_s + \Delta h$$

$$\left\{ \begin{array}{l} h_s: \text{altura da chaminé} \\ \Delta h: \text{elevação da pluma} \end{array} \right.$$



- Segundo Wark et al., a primeira consideração a fazer é determinar a tendência da pluma a ser dirigida em direção ao solo junto a chaminé, o chamado “downwashes”.
- Portanto, se a velocidade dos gases que saem de uma chaminé é maior ou igual a 1,5 vezes a velocidade do vento, o “downwashes” é considerado negligível. Neste caso a altura da chaminé h é a mesma.
- Nas condições em que a velocidade dos gases que saem de uma chaminé é menor do que 1,5 vezes a velocidade do vento, uma altura de chaminé reduzida pode ser calculada, como sendo:

$$h = h + 2d \left(\frac{v_s}{u} - 1,5 \right)$$

onde,

h = altura da chaminé (m)

d = diâmetro interno da chaminé (m)

v_s = velocidade do efluente na saída da chaminé (m/s)

u = velocidade média do vento na altura da chaminé (m/s)

Altura efetiva da chaminé

- 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

Altura efetiva da chaminé

- Diferentes modelos – tentativas de reproduzir dados experimentais
- Origem virtual da chaminé

$$H = h_s + \Delta h$$

Parâmetros que influenciam a elevação da pluma:

- Geometria da chaminé
- Meteorologia (vento e estabilidade)
- Natureza físico-química do efluente

Altura efetiva da chaminé

Fórmula empírica de Holland (1953)

$$\Delta h_{(MAX)} = \frac{V_s d}{v} \left(1,5 + 2,68 \cdot 10^{-3} p \frac{\Delta t}{T_s} d \right) \quad \text{ou}$$

Onde:

- v_s = velocidade de saída dos gases da chaminé (m/s);
- d = diâmetro da chaminé;
- v = velocidade do vento (m/s);
- P = pressão (mbar)
- T_s = Temperatura de saída dos gases da chaminé (K);
- T_a = Temperatura do ar ambiente (K).

$$\Delta h = \frac{V_s d}{v} \left(1,5 + 0,0096 \frac{Q_h}{V_s d} \right)$$

Q_h = taxa de emissão
de calor kJ/s

Altura efetiva da chaminé : **MODELO DE BRIGGS**

Um gás, ao sair de uma chaminé, é submetido a forças de empuxo de Arquimedes. Briggs (1969) define o parâmetro de flutuabilidade (buoyance) como sendo


$$F_o = \frac{g}{\pi} Q_o \left(1 - \frac{T}{T_s}\right)$$

onde:

g - aceleração da gravidade (9,8 m/s²)

T - temperatura do ar ambiente (K)

T_s - temperatura dos gases de saída na chaminé (K)

Q_o - vazão volumétrica de gases (m³/s), definida por:

$$Q_o = \pi \cdot r_c^2 \cdot v_s$$

Onde, **r_c** - raio da chaminé (m) **

v_s - velocidade de emissão dos gases (m/s)

Esta equação é válida para emissões com um peso molecular e calor específico próximos daqueles do ar

O cálculo do fluxo de momento F_m é realizado mediante a seguinte fórmula:

$$F_m = v_s^2 d^2 \frac{T_a}{4T_s}$$

Onde F_m = fluxo de momento [$m^4 s^{-2}$]

d = diâmetro da chaminé

Inicialmente, deve-se verificar se a sobre-elevação da pluma é determinada pelo momento ou empuxo. Para isto faz-se necessário calcular a diferença de temperatura cruzada (crossover) $(\Delta T)_c$.

Para condições instáveis ou neutras a diferença de temperatura cruzada (crossover) $(\Delta T)_c$ é dependente do fluxo de empuxo. Para $F_b < 55 \text{ m}^4 \cdot \text{s}^{-3}$ utiliza-se a expressão (Wark et al.):

$$(\Delta T)_c = 0,0297 T_s \frac{V_s^{1/3}}{d^{2/3}}$$

Para $F_b \geq 55 \text{ m}^4 \cdot \text{s}^{-3}$ utiliza-se a expressão (Wark et al.)

$$(\Delta T)_c = 0,00575 T_s \frac{V_s^{2/3}}{d^{1/3}}$$

Se a diferença entre a temperatura do gás na saída da chaminé e a do ar ambiente (ΔT) é maior ou igual a $(\Delta T)_c$ a sobre-elevação é dominada pelo empuxo, caso contrário, o momento é que predomina.

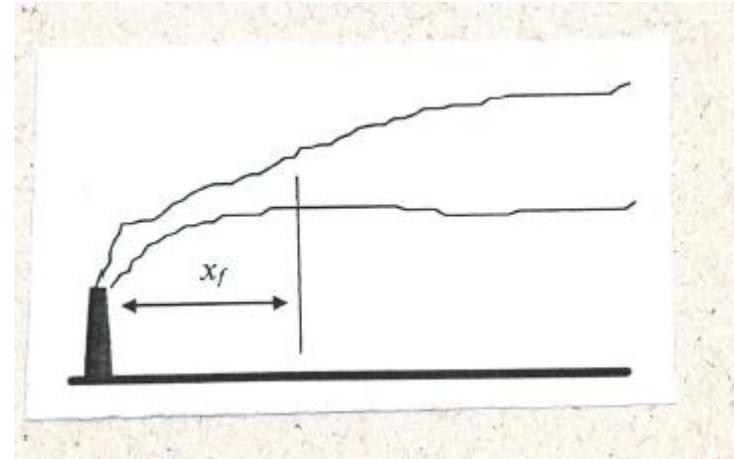
Briggs define a distância crítica x_f a partir da chaminé (distância onde a subida de uma pluma Δh (m) está plenamente desenvolvida) . A partir desta distância, a turbulência atmosférica ambiente torna-se dominante em relação a turbulência gerada pelo gás saindo da chaminé, e portanto:

→ Para **condições instáveis ou neutras**, onde o empuxo é dominante (onde ΔT excede $(\Delta T)_c$, x_f é determinado como segue (WARK et al.):

$$\text{Para } F_0 < 55 \text{ m}^4/\text{s}^3 \rightarrow x_f = 49 F_0^{5/8}$$

E a altura efetiva H (m) é calculada pela expressão:

$$H = h + 21,425 \frac{F_0^{3/4}}{u}$$

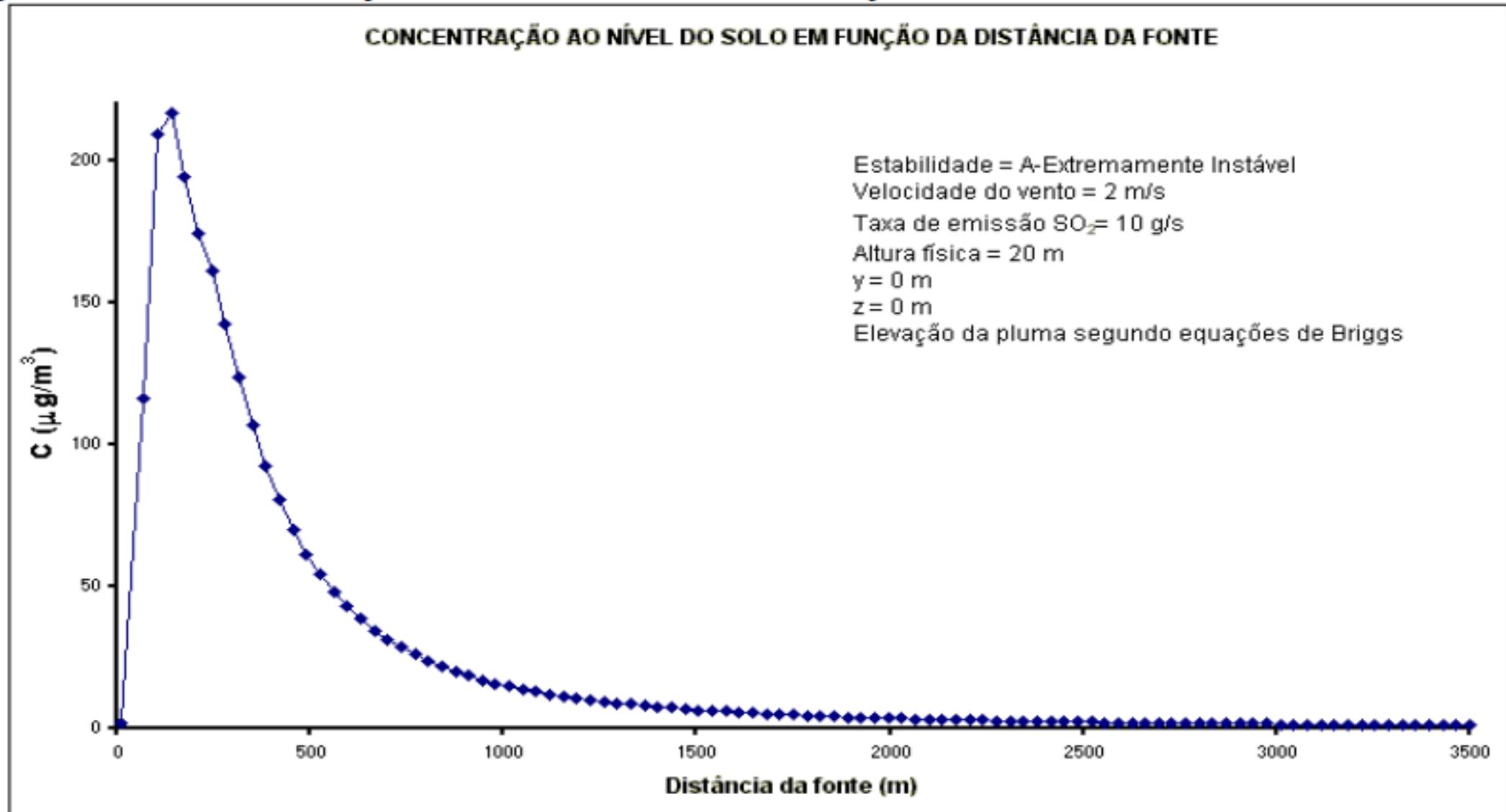


Quadro 8. 12 - Equações de Briggs para cálculo da sobre-elevação. Fonte: WARK et al., p.166.

Atmosfera instável ou neutra				Atmosfera estável	
Para $F_b < 55 \text{ m}^4 \cdot \text{s}^{-3}$		Para $F_b \geq 55 \text{ m}^4 \cdot \text{s}^{-3}$		$(\Delta T)_c = 0,019582 T_s V_s \sqrt{s}$	
$(\Delta T)_c = 0,0297 T_s \frac{V_s^{1/3}}{d^{2/3}}$		$(\Delta T)_c = 0,00575 T_s \frac{V_s^{2/3}}{d^{1/3}}$			
Se $\Delta T < (\Delta T)_c$ Momento domina	Se $\Delta T \geq (\Delta T)_c$ Empuxo domina	Se $\Delta T < (\Delta T)_c$ Momento domina	Se $\Delta T \geq (\Delta T)_c$ Empuxo domina	Se $\Delta T < (\Delta T)_c$ Momento domina	Se $\Delta T \geq (\Delta T)_c$ Empuxo domina
$\Delta h = 3d \frac{V_s}{\bar{u}}$	$\Delta h = 21,425 \frac{F_b^{3/4}}{\bar{u}}$	$\Delta h = 3d \frac{V_s}{\bar{u}}$	$\Delta h = 38,71 \frac{F_b^{3/4}}{\bar{u}}$	$\Delta h = 1,5 \left(\frac{F_b}{\bar{u} \sqrt{s}} \right)^{1/3}$ ou $\Delta h = 3d \frac{V_s}{\bar{u}}$ Adota-se o menor	$\Delta h = 2,6 \left(\frac{F_b}{\bar{u} s} \right)^{1/3}$

Exemplo Cálculo Concentração fonte MAURICY KAWANO

Figura 24 – Concentração ao nível do solo em função da distância da fonte - Modelo AID



Exemplo Cálculo Concentração fonte (Professor: Neyval Costa Reis Jr.)

