

-D Louitua complementar.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE SAÚDE PÚBLICA
DEPARTAMENTO DE SAÚDE AMBIENTAL

DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

ENG: JOÃO VICENTE DE ASSUNÇÃO

SÃO PAULO
1 987

Jadeu

DISPERSÃO ATMOSFÉRICA (+)

ENG. JOÃO VICENTE DE ASSUNÇÃO (++)

01. INTRODUÇÃO

Os poluentes lançados na atmosfera sofrem o efeito de um processo complexo, sujeito a vários fatores, e que determina a concentração do poluente no tempo e no espaço. Assim, a mesma emissão de uma fonte sob as mesmas condições de lançamento pode produzir concentrações diferentes num mesmo ponto do espaço em tempos diferentes dependendo das condições atmosféricas.

O movimento dos poluentes na atmosfera é determinado pelos seguintes fatores:

- a. turbulência mecânica provocada pelo vento na sua instabilidade direcional e de velocidade;
- b. turbulência térmica resultante de parcelas de ar superaquecido que ascendem da superfície terrestre sendo substituídas pelo ar mais frio em sentido descendente e,
- c. topografia da região

A concentração resultante na atmosfera varia de acordo com o ponto no espaço em consideração, quantidade e condições de emissão e nos fatores acima, somados aos fatores chuva e condições de inversão térmica. Resumindo, a concentração do poluente na atmosfera é função de:

(+) - Preparada para o Curso de Especialização em Saúde Pública - Áreas: Engenharia Ambiental e Engenharia em Saúde Pública (1988), do Departamento de Saúde Ambiental da Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo - USP;

(++) - Engenheiro da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB e Prof. do Departamento de Saúde Ambiental da Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo - USP.

- . quantidade e condições de emissão;
- . condições meteorológicas e,
- . topografia

02. TURBULÊNCIA DA ATMOSFÉRA

A turbulência da atmosfera é determinada pela velocidade do vento e pelo gradiente térmico na vertical.

PASQUILL, dividiu as condições de estabilidade em seis classes a saber:

<u>CLASSE</u>	<u>CONDIÇÃO DE ESTABILIDADE</u>
A	EXTREMAMENTE INSTÁVEL
B	INSTÁVEL
C	LIGEIRAMENTE INSTÁVEL
D	NEUTRA
E	LIGEIRAMENTE ESTÁVEL
F	ESTÁVEL

As condições para ocorrência de instabilidade são: Alta radiação solar e ventos de baixa velocidade.

A condição de estabilidade ocorre na ausência de radiação solar, ausência de nuvens e ventos leves.

Céu nublado ou ventos fortes caracterizam a condição neutra da atmosfera.

A tabela 1, a seguir mostra de forma simplificada a classe de estabilidade em função da velocidade do vento, insolação e condições do céu, de acordo com PASQUILL & TURNER. Vários outros métodos existem para determinar a classe de estabilidade. Dentre estes podemos citar o de JAWAD S. TOUMA que emprega medições de temperaturas em várias altitudes classificando a es

*chamado
velocidade do
vento e
radiação*

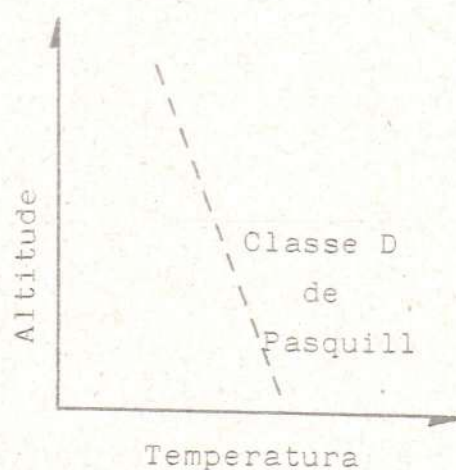
tabilidade pelo gradiente observado entre dois pontos da atmosfera.

TABELA 1 - DETERMINAÇÃO DA CATEGORIA DE ESTABILIDADE.

VELOCIDADE DO VENTO m/s	DIA			NOITE	
	RADIAÇÕES SOLAR INCIDENTE			NUBLADO	POUCO NUBLADO
	FORTE	MODERADA	FRACA	> 4/8	< 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

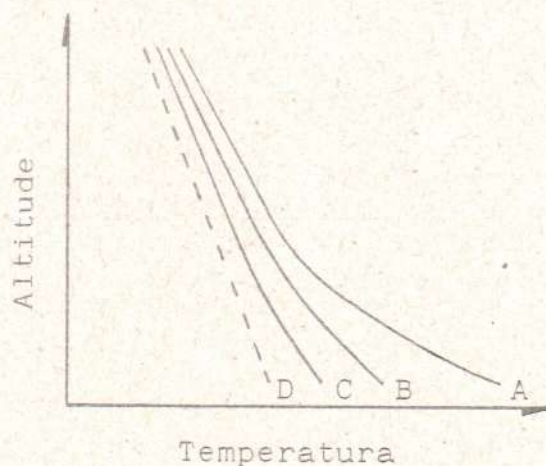
03. PERFIL VERTICAL DE TEMPERATURA

Uma atmosfera que está bem misturada por causa de ventos fortes, ou seja mistura mecânica vigorosa em termos meteorológicos, sob céu nublado é chamada neutra, conforme já exposto anteriormente. Nessas condições não há aquecimento superficial ou efeitos de resfriamento e a temperatura decresce verticalmente a uma taxa denominada "Taxa de Decréscimo Adiabática". Isso é ilustrado pela figura da página seguinte. A taxa de decréscimo neste caso é de 0,01°C/metro (. 5,4°F / 1000 pés) e é devida a turbulência mecânica somente.



A fonte primária de aquecimento da terra é o sol, ou mais exatamente a radiação solar. À medida que o sol sobe no horizonte, sob céu pouco nublado, uma grande quantidade de radiação atinge a superfície terrestre. Isso causa o aquecimento da camada de ar próxima à superfície e uma "porção" deste ar quente começa a ascender. A quantidade de radiação solar que atinge a superfície da terra depende da cobertura de nuvem e da inclinação do sol (insolação). Quanto mais direto o sol atinge a terra mais aquecimento causa na terra e maior a turbulência convectiva, induzida termicamente. À medida que a parcela de ar sobe, esta parcela é substituída por massa de ar mais fria descendente.

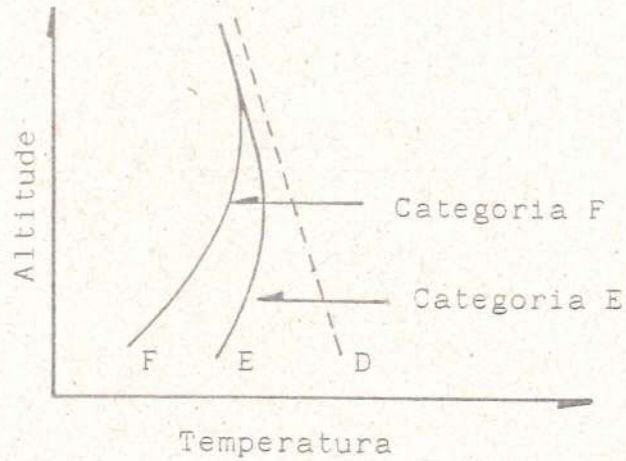
A condição instável foi subdividida em três categorias por PASQUILL, ou seja A, B e C. A figura da página seguinte, mostra os perfis de temperatura instáveis, em relação à condição neutra (D).



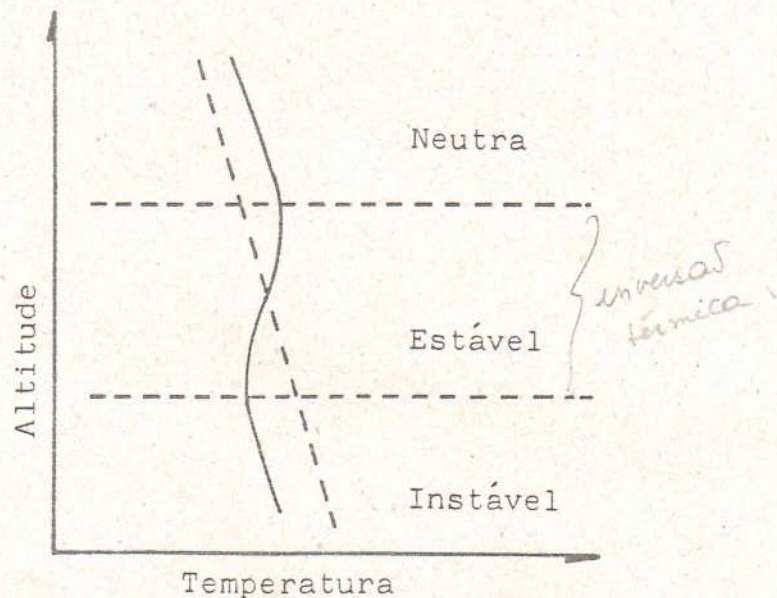
A categoria A ocorre quando a inclinação do sol é de 60° acima do horizonte e o céu está praticamente sem nuvens. A categoria B ocorre quando a elevação do sol é menor ou o céu está mais nublado. A categoria C é só levemente instável.

À noite a radiação solar cessa, a terra resfria à medida que o seu calor é irradiado de volta. Na ausência de vento o ar esfria e diminui de volume tendendo à descida para a superfície terrestre. Isso resulta em ar frio tendendo a "drenar" morro abaixo.

PASQUILL dividiu a condição estável em duas categorias, E e F. A estabilidade E ocorre com noites claras e ventos moderados ou noites parcialmente nubladas e ventos leves. A estabilidade F ocorre em noites claras e calmas nas áreas rurais. A Agência de Proteção Ambiental Americana- EPA, usa a taxa $+ 0,02^\circ\text{C}/\text{m}$ para categoria E e $+ 0,03^\circ\text{C}/\text{m}$ para categoria F. A figura da página seguinte mostra a condição estável em comparação com a condição neutra.



A figura abaixo mostra a ocorrência de condições instável, estável e neutra ao mesmo tempo, típicas do período após nascer do sol, quando o mesmo começa a aquecer a superfície e a camada de inversão noturna começa a desaparecer.



04. FORMATO DA PLUMA VERSUS PERFIL DE TEMPERATURA.

É comum observar-se diferentes formatos de plumas para uma mesma fonte, em diferentes ocasiões. Isso se deve à variação nas condições meteorológicas.

Na figura 1 estão mostrados vários formatos de plumas para uma mesma fonte e o perfil de temperatura correspondente.

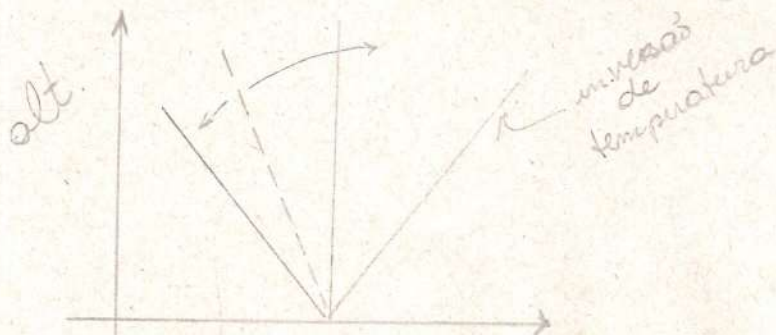
A pluma tipo "looping" ocorre em condições de instabilidade A, B ou C. Neste caso a turbulência térmica é grande fazendo com que haja grande distúrbio na vertical pela troca de calor entre as camadas da atmosfera.

No caso de pluma tipo "conning" o perfil correspondente é o de condições neutras, categoria D.

A pluma tipo "fanning" ocorre com atmosfera estável, categoria E e F, onde se tem presente a condição de inversão térmica no perfil atual de temperatura.

A existência de condição estável na camada mais próxima da terra, seguida de condição instável à partir do topo da chaminé determina o formato de pluma tipo "lofting".

A condição inversa, ou seja, instabilidade na primeira camada e estabilidade à partir do topo da chaminé ocasiona o tipo de pluma denominado "fumigation"



redução de 1°C a cada 100 m que se

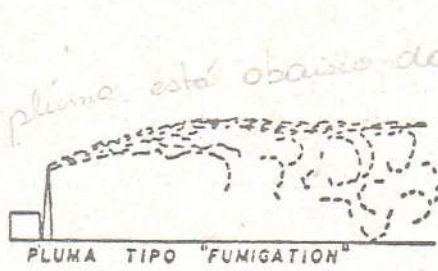
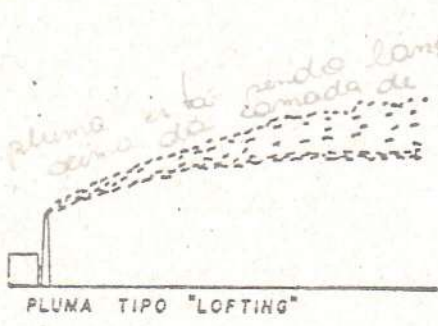
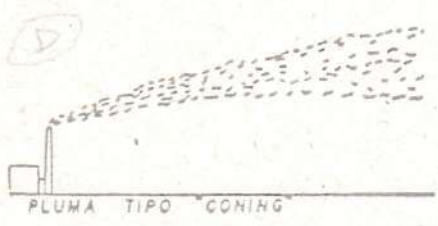
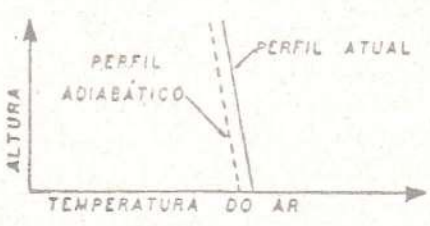
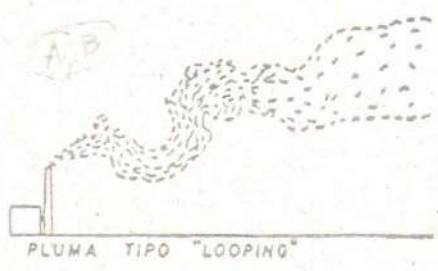
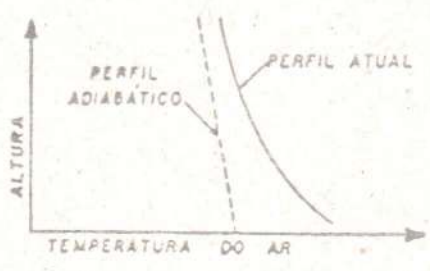
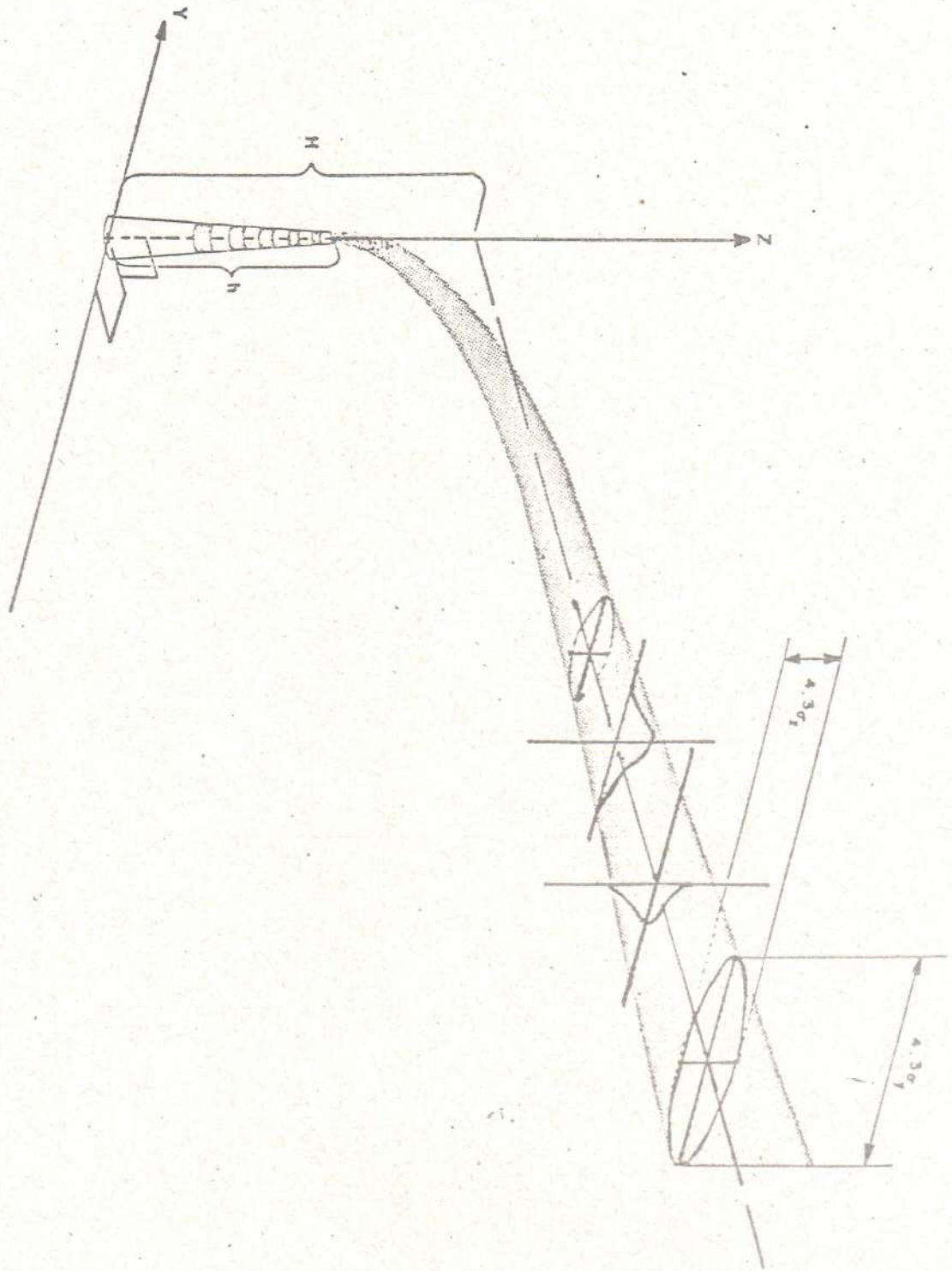


Figura 1 - Perfis de temperatura da atmosfera e respectivos formatos da pluma emitida por uma chaminé.

FIGURA 2 - Sistema de coordenadas mostrando a distribuição gaussiana de uma pluma, na horizontal e na vertical



05. MODELO MATEMÁTICO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA.

A dispersão de plumas é um problema que envolve turbulência do fluido. Até o momento o problema de turbulência de fluidos tem resistido a uma solução geral e efetiva. As soluções atuais contêm elementos teóricos e empíricos, em geral comparados com a situação real. Os erros envolvidos são da ordem de um fator 2 para mais e para menos.

O modelo GAUSSIANO é o de uso mais geral e, apesar das variações envolvidas o mesmo provê estimativas razoáveis para terrenos planos ou pouco acidentados. Pode-se definir terreno pouco acidentado como aquele cujos acidentes geográficos não superam em altura o limite de 20% da altura efetiva da pluma.

A Equação Básica de Dispersão segundo o modelo GAUSSIANO é a seguinte:

$$C(x,y,z,H) = \frac{Q}{2\pi \sigma_y \sigma_z u} \text{Exp} \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \left\{ \text{Exp} \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z+H}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \text{Exp} \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} \quad (1)$$

Onde: C = concentração do poluente no ponto x,y,z,H em g/m³.

x,y,z = coordenadas utilizadas, conforme figura 2, expressas em metros.

H = altura efetiva da chaminé (m)

Q = emissão do poluente considerado (g/s)

σ_y = coeficiente de dispersão horizontal (m)

σ_z = Coeficiente de dispersão vertical (m)

u = velocidade do vento (m/s)

OBS: O termo $\text{Exp} - \frac{a}{b} = e^{-a/b}$

A equação acima deve ser utilizada para emissão contínua e para poluentes que não reagem facilmente na atmosfera. A concentração obtida é válida para período curto de tempo, usualmente considerada como concentração de 10 minutos.

Para concentrações ao nível do solo ($z=0$) a equação se torna:

$$C(x, y, 0, H) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \text{Exp} \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \text{Exp} \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \quad (2)$$

Para a determinação de concentrações ao nível do solo no centro da pluma ($y=0$ e $z=0$), tem-se:

$$C(x, 0, 0, H) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \text{Exp} \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \quad (3)$$

Para emissão ao nível do solo ($H=0$) tem-se:

$$C(x, 0, 0, 0) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \quad (4)$$

06. ALTURA EFETIVA DA CHAMINÉ (H)

A altura efetiva da chaminé corresponde à soma da altura física mais a elevação da pluma acima da chaminé. Assim,

$$H = h + \Delta h \quad (5)$$

Onde: H = altura efetiva (m)
h = altura física da chaminé (m)
 Δh = elevação da pluma (m)

Vários modelos matemáticos tem sido propostos para determinação da elevação da pluma. dentre estes os mais utilizados são o de HOLLAND e o de BRIGGS.

6.1. Elevação da Pluma Segundo Holland.

$$\Delta h = \frac{V_s \cdot D}{u} (1,5 + 2,68 \times 10^{-3} p \times \frac{T_s - T_a}{T_s} \times D) \times K \quad (6)$$

Onde: V_s = velocidade dos gases na saída da chaminé (m/s)
D = diâmetro da chaminé (m)
u = velocidade do vento (m/s)
p = pressão barométrica (mb)
 T_s = temperatura dos gases na saída da chaminé ($^{\circ}K$)
 T_a = temperatura ambiente ($^{\circ}K$)
K = fator de correção para condição de estabilidade (K = 1 para condição neutra
K = 1,1 a 1,2 para condição instável e
K = 0,8 a 0,9 para condição estável).

6.2. Elevação da Pluma Segundo Briggs.

a) Para condições neutras e instáveis (A, B, C e D)

$$\Delta h = 1,6 F^{0,333} (X)^{0,667} \quad (7)$$

A pluma final é atingida a uma distância $X = 3,5 X^*$

b) Para condições estáveis (E e F)

$$\Delta h = 2,4 \left(\frac{F}{u \cdot s} \right)^{0,333}$$

Onde: $F = \frac{g Qg}{u^3} \left(1 - \frac{T_a}{T_s}\right)$

$X^* = 14F^{0,625}$ para $F < 55$

$X^* = 34F^{0,4}$ para $F > 55$

$S = \frac{g}{T_a} \left(\frac{\delta\theta}{\delta z}\right)$

$\frac{\delta\theta}{\delta z}$ = gradiente de temperatura vertical (K/m)
para categoria E = 0,02 K/m e para categoria F = 0,035 K/m

F = fluxo do empuxo (m^4/s^3)

g = constante gravitacional

Qg = vazão de gases (m^3/s)

Ta = temperatura ambiente (K)

Ts = temperatura dos gases na saída da chaminé (K)

u = velocidade dos ventos ao nível do topo da chaminé (m /s)

x = distância horizontal do ponto considerado (m)

X^* = distância na horizontal à partir da chaminé na qual a turbulência atmosférica começa a dominar o "Entrainment" (m)

3,5 X^* = distância onde ocorre a elevação máxima da pluma (m)

6.3. Comparação entre as fórmulas de Holland e de Briggs

A elevação da pluma obtida com uma fórmula e a outra pode diferir bastante. Um trabalho feito por MOSES & KRAIMER, onde foram estudadas plumas de 17 chaminés concluiu que o Modelo de HOLLAND é melhor para grandes fontes (termo-elétricas por exemplo) sendo pouco recomendada para pequenas chaminés. A análise feita pelo próprio BRIGGS indica que, para fontes que emitem gases com conteúdo energético de 800MW, a fórmula de HOLLAND produz um valor maior para a subida da pluma que a do Modelo de BRIGGS. Para fontes me

nores que essa, a de BRIGGS resulta em maior elevação da pluma. A partir de 1972 a Agência de Proteção Ambiental Americana - EPA, adotou a fórmula de BRIGGS em substituição à de HOLLAND.

6.4. O Fenômeno do "Downwash".

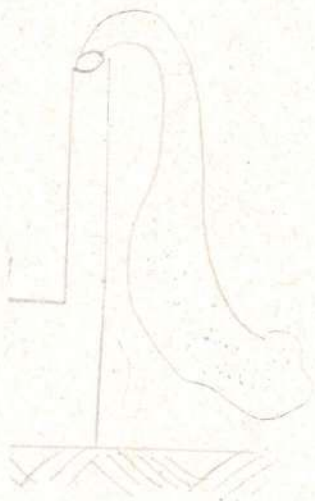
A velocidade baixa de saída dos gases da chaminé e a presença de estruturas nas suas proximidades pode ocasionar o efeito denominado "DOWNWASH", ou seja ocorre uma redução na subida da pluma podendo resultar inclusive numa altura efetiva menor que a altura física da chaminé.

Este efeito deve ser corrigido antes da aplicação dos Modêlos de Elevação da Pluma, o que pode ser conseguido por:

- a) aumento da velocidade de saída dos gases. A velocidade de saída deve ser de no mínimo 1,5 vezes a velocidade do vento. Para evitar este efeito tem sido sugeridas velocidades superiores a 21 m/s.
- b) utilizar chaminés suficientemente altas. A boa prática de engenharia para altura de chaminé recomenda altura mínima de uma vez a altura do prédio mais uma vez e meia a menor dimensão entre a altura do prédio e a dimensão do prédio perpendicular ao vento e sugerida a altura mínima de 30 metros para fontes significativas.

07. COEFICIENTES DE DISPERSÃO.

A dispersão da pluma na horizontal (ei



fontes de
Baixas
PRECISAO

xo y) e na vertical (eixo z) é função da turbulência da atmosfera e da distância à jusante do ponto considerado.

Entre os diversos modelos para cálculo dos coeficientes de dispersão (σ_y e σ_z) o modelo de PASQUILL & GIFFORD é utilizada com frequência e é utilizado pela U.S.EPA.

Esses coeficientes podem ser apresentados na forma de equações ou graficamente.

O coeficiente de dispersão na horizontal (σ_y) é, segundo PASQUILL & GIFFORD, dado pela seguinte fórmula:

$$\sigma_y = 465,12 \cdot x \cdot t \cdot g \cdot e \quad (\text{m})$$

Onde: x = distância do ponto considerado à chaminé (Km).

O valor de e é dado em função da classe de estabilidade e da distância x.

Graficamente σ_y é apresentado na figura 3 em função da distância x e da classe de estabilidade.

O coeficiente de dispersão na vertical (σ_z) também pode ser expresso matematicamente pela fórmula:

$$\sigma_z = a \cdot x^b$$

Os coeficientes a e b são função da distância x e da classe de estabilidade.

Graficamente o coeficiente é apresentado na figura 4.

08. BIBLIOGRAFIA.

01. PASQUILL, F & SMITH, F.B., "Atmospheric Diffusion", Ellis Horwood Limited, 3ª Edição, 1 983.
02. STERN, ARTHUR C. et alli, "Fundamentals of Air Pollution", Academic Press, Inc. 1 973.
03. TURNER, D.B., "Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates", Publicação nº AP-26, U.S. Environmental Protection Agency, 1 970.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Consideremos uma caldeira de produção de vapor que queima 48t/dia de óleo BPF, com 5% de enxofre em peso. A chaminé da caldeira possui 1,20m de diâmetro e altura de 20m. A temperatura dos gases no topo da chaminé é de 130°C. calcular a concentração de dióxido de enxofre resultante dessa fonte, ao nível do solo e no centro da pluma.

Outros dados: emissão de SO₂ = 53,83 g/s
vazão dos gases = 10,78 m³/s a 130°C
velocidade dos gases = 9,53 m/s

RESOLUÇÃO

de enxofre

- a) determinação da altura efetiva da pluma (H) utilizando-se a fórmula de HOLLAND ou seja :

$$\Delta h = \frac{Vs \cdot D}{u} (1,5 + 2,68 \cdot 10^{-3} \cdot p \cdot \frac{Ts - Ta}{Ts} \cdot D) \times K$$

Onde: p = 930 mb
Ta = 25+273 = 298°K
D = 1,20 m.

$$V_s = 9,53 \text{ m/s}$$

$$K = 1 \text{ (condição neutra - categoria D)}$$

$$K = 1,2 \text{ (condição instável - categoria A)}$$

$$u = 1 \text{ m/s (categoria A)}$$

$$u = 3 \text{ m/s (categoria D)}$$

$$T_s = 130 + 273 = 403^\circ\text{K}$$

Assim:

$$\Delta h = \frac{9,53 \times 1,20}{u} (1,5 + 2,68 \cdot 10^{-3} \cdot 930 \cdot \frac{403 - 298}{403} \cdot 1,20) \times K$$

Para categoria A e $u = 1 \text{ m/s}$ tem-se:

$$\Delta h = \frac{9,53 \times 1,20}{1} (1,5 + 0,7793) \times 1,2 = 26\text{m}$$

Portanto $H = h + \Delta h = 20 + 26 = 46\text{m}$

$$H_1 = 46\text{m}$$

Para categoria D e $u = 3\text{m/s}$ tem-se:

$$\Delta h = \frac{9,53 \times 1,20}{3} (1,5 + 0,7793) \times 1 = 9\text{m}$$

Portanto $H = 20 + 9 = 29\text{m}$

$$H_2 = 29\text{m}$$

b) determinação da concentração ao longo do Eixo X e ao nível do solo, categoria D., de acordo com o Modelo GAUSSIANO tem-se:

$$c = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \text{Exp} \left[- \frac{1}{2} \left(\frac{H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \times 10^6 \text{ (}\mu\text{g/m}^3\text{)}$$

Substituindo os valores tem-se:

$$c = \frac{53,83}{\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot 3} \text{Exp} \left[- \frac{1}{2} \left(\frac{29}{\sigma_z} \right)^2 \right] \times 10^6$$

OBS: A tabela (página seguinte), fornece a concentração pa ra vários valores de x.

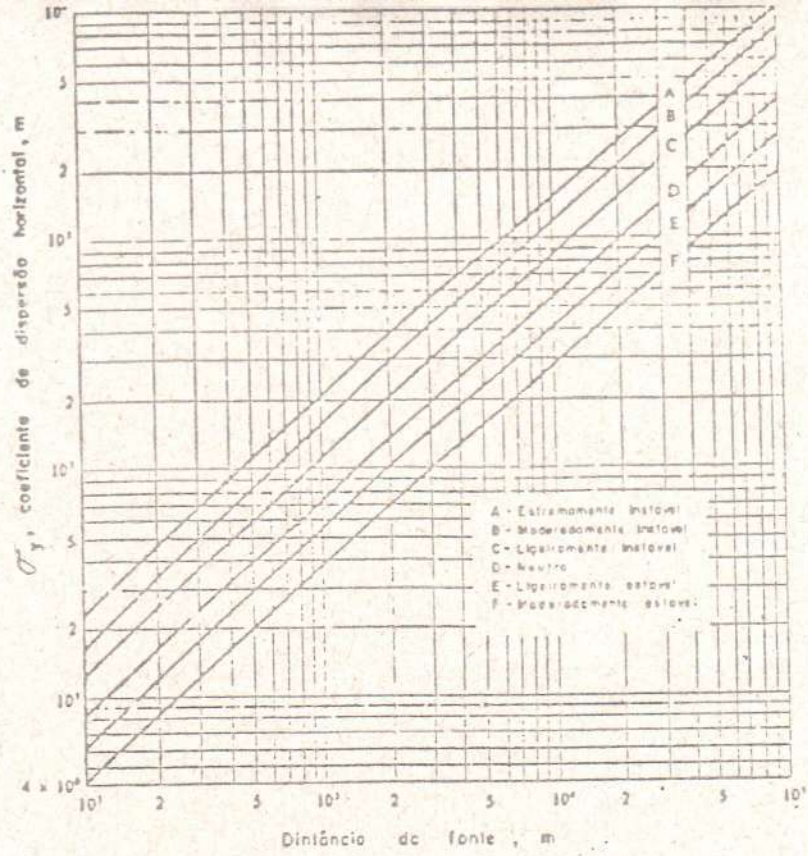


FIGURA 3 - Coeficiente de dispersão horizontal

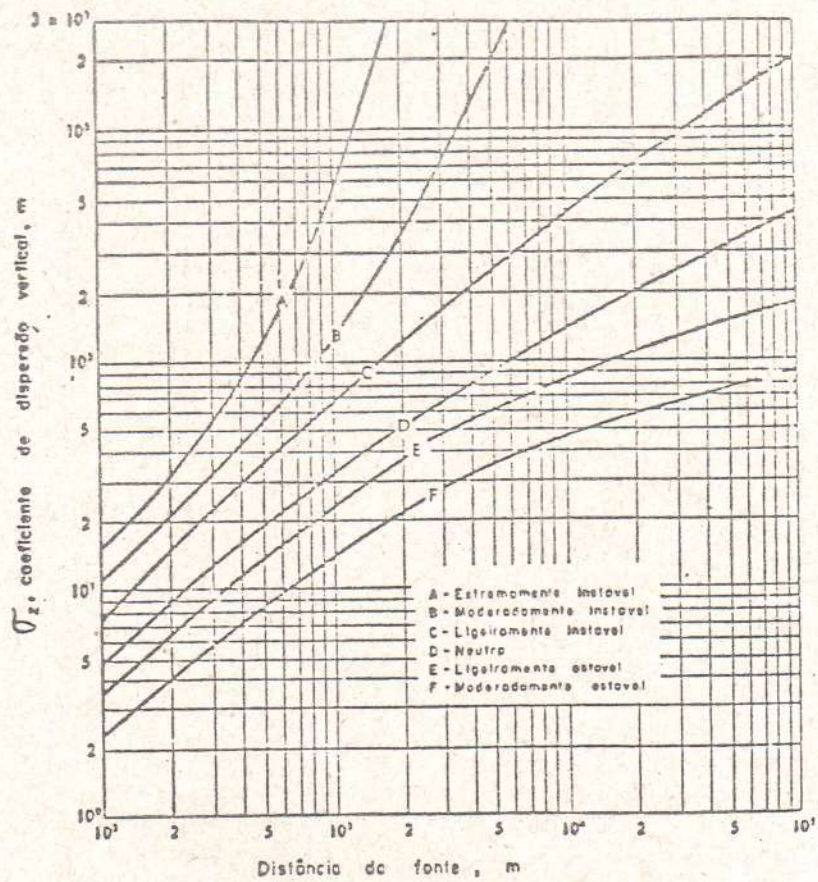


FIGURA 4 - Coeficiente de dispersão vertical