



II CREEM
CONGRESSO
REGIONAL DE
ESTUDANTES DE
ENGENHARIA
MECÂNICA

**UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO DE JANEIRO**

**21 A 25 DE AGOSTO
1995**

DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA CÁLCULO E VISUALIZAÇÃO DE PLUMAS

Andrei Kuhnen da Silva
Édson Luiz Belido
SINMEC - Laboratório de Simulação Numérica em Mecânica dos Fluidos e
Tranferência de Calor
Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC
Campus Universitário - Trindade
CEP 88040 - 900 - Florianópolis - SC

Orientadores: Fernando Bóçon, Doutorando. (UFPR).
Axel Dihlmann, M.Sc.
Clovis Raimundo Maliska, Ph.D.
Departamento de Engenharia Mecânica - UFSC

SUMÁRIO

Neste trabalho é feita uma breve abordagem sobre a influência das condições atmosféricas no cálculo da velocidade do vento, nos coeficientes de dispersão de poluentes e na altura efetiva da chaminé e em seguida é mostrada a formulação das equações de concentração no modelo de pluma Gaussiana. Isolinhas de concentração são apresentadas para um problema simulado no software Pluma.

1. INTRODUÇÃO

Existem dois fatores fundamentais que governam a dispersão atmosférica de poluentes:

- as características da fonte emissora (condições físico-químicas do gás fluente, especificações da chaminé),
- as condições meteorológicas reinantes (este é o fator mais complexo).

A grande dificuldade consiste em tentar descrever uma situação complexa e dinâmica com uso de poucos parâmetros, pois só podemos trabalhar com dados disponíveis.

Dentro do tópico meteorológico, o fator possivelmente mais importante é o vento. Este determina que uma pluma de chaminé tenha dispersão vertical ou horizontal. A dispersão é comandada pelas variáveis fundamentais do fenômeno climático chamado vento, pois este imprime sua direção, sentido e velocidade ao poluente lançado na atmosfera.

Outro fator meteorológico importante é a variação da temperatura do ar em função da altura, que é chamado de "Gradiente Adiabático". Em condições de atmosfera neutra o gradiente adiabático seco é $-1^{\circ}\text{C} / 100 \text{ m}$. Devido a uma série de condições, o gradiente de temperatura de uma dada massa de ar em um determinado tempo pode ser diferente da condição adiabática seca. Em adição às noções de gradiente adiabático seco e de diminuição vertical de

temperatura com a altitude, pode-se definir três tipos de condições de estabilidade da atmosfera: indiferente ou neutra, instável e estável.

A dispersão de uma pluma depende basicamente da estabilidade da atmosfera. Existem maneiras de medir esta estabilidade, mas isto requer trabalho de pesquisa no local desejado. Com os dados meteorológicos normalmente existentes, pode-se inferir o estado das camadas atmosféricas. Para isto deve-se ter em mãos o perfil de temperatura da camada, a velocidade do vento e a insolação.

Pasquill [3] dividiu as condições possíveis em seis categorias ou classes de estabilidade. Estas classes são chamadas A, B, C, D, E, F.

Classe de estabilidade	Gradiente térmico
A - extremamente instável	menor que $-1,896^{\circ}\text{C} / 100 \text{ m}$
B - moderadamente instável	$-1,896$ até $-1,695^{\circ}\text{C} / 100 \text{ m}$
C - levemente instável	$-1,695$ até $-1,49^{\circ}\text{C} / 100 \text{ m}$
D - neutra	$-1,49$ até $-0,49^{\circ}\text{C} / 100 \text{ m}$
E - levemente estável	$-0,49$ até $1,49^{\circ}\text{C} / 100 \text{ m}$
F - moderadamente estável	maior que $1,49^{\circ}\text{C} / 100 \text{ m}$

Tabela 1.1 - Classes de estabilidade em função do gradiente térmico.

Pasquill também dividiu as condições de estabilidade dependendo da velocidade do vento e da radiação solar [1].

2. COEFICIENTES DE DISPERSÃO

Os coeficientes de dispersão são difíceis de serem medidos diretamente. Entre 1961-1962, Pasquill, Guifford, Turner divulgaram coeficientes de dispersão obtidos em terreno plano rural. Estes coeficientes são usados até hoje para casos similares. Eles não podem ser aplicados em terrenos acidentados ou urbanos, pois a turbulência gerada por edificações ou ondulações modifica a dispersão.

Para as fontes contínuas (no tempo) a difusão na direção do vento é pequena comparada com a dispersão vertical e transversal, sendo desprezada no modelo de Pluma Gaussiana utilizado no software. Para o uso das equações analíticas de dispersão é conveniente uma expressão para os coeficientes de dispersão como função da distância da fonte.

A equação de Pasquill e Guifford é representada por [1]:

$$\sigma_y = R_y x^r \quad \sigma_z = R_z x^r \quad (2.1)$$

onde as constantes R e r dependem da classe de estabilidade.

Outra equação para cálculo dos coeficientes de dispersão é dada por Klug:

$$\sigma_y = \exp\left[I_y + J_y \ln x + K_y (\ln x)^2\right] \quad \sigma_z = \exp\left[I_z + J_z \ln x + K_z (\ln x)^2\right] \quad (2.2)$$

onde as constantes I, J, K também dependem da classe de estabilidade [1].

3. ALTURA EFETIVA

A altura efetiva é a altura a partir do solo onde a pluma se nivela. As equações obtidas para o cálculo da altura efetiva são semi-empíricas. Existem várias formulações, as usadas pelo software Pluma são as de Holland, de Briggs e da ASME (American Society of Mechanical Engineers), mas não é dito que sejam as melhores para todas as situações [1].

Um exemplo é a equação de Holland:

$$\Delta h = \frac{(V_s ds)}{u} \left(1,5 + 0,00268 p \frac{T_g - T_a}{T_g} ds \right) \quad (3.1)$$

onde:

Δh = elevação da pluma acima da chaminé, em m
 V_s = velocidade dos gases na boca da chaminé, em m/s
 u = velocidade do vento no topo da chaminé, em m/s
 ds = diâmetro interno da chaminé, em m
 T_g = temperatura dos gases na saída da chaminé, em K
 T_a = temperatura do ar ambiente, em K
 p = pressão atmosférica, em mb.

Holland indica ainda que Δh deve ser multiplicado por um fator, de acordo com as classes de estabilidade:

Classes	Fator
A, B	1,15
C	1,10
D	1,00
E, F	0,85

Em geral as outras equações, ver [1], dependem dos mesmos parâmetros que a equação de Holland.

4. VELOCIDADE DO VENTO

Uma simplificação usada para o cálculo da velocidade do vento é que esta contém apenas componente na direção de x.

São mostradas abaixo as equações para o cálculo do perfil de velocidade do vento:

$$\frac{u^*}{k u(h)} = \left[\ln\left(\frac{h}{z}\right) + \frac{4,7}{L}(h-z) \right]^{-1} \quad \text{estável} \quad (4.1)$$

$$\frac{u^*}{k u(h)} = \left[\ln\left(\frac{h}{z}\right) \right]^{-1} \quad \text{neutra} \quad (4.2)$$

$$\frac{u^*}{k u(h)} = \left\{ \ln\left(\frac{h}{z}\right) + \ln \left[\frac{(\eta_0^2 + 1)(\eta_0 + 1)^2}{(\eta_r^2 + 1)(\eta_r + 1)^2} \right] + 2 \left[\tan^{-1} \eta_r - \tan^{-1} \eta_0 \right] \right\}^{-1} \quad \text{instável} \quad (4.3)$$

$$\eta_r = \left[1 - 15 \frac{h}{L} \right]^{\frac{1}{4}} \quad \eta_0 = \left[1 - 15 \frac{z}{L} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (4.4)$$

onde:

u^* = velocidade de fricção, em m/s
 k = constante de Von Karman (= 0,4)
 u = velocidade do vento, em m/s
 z = fator de irregularidade do terreno, em m
 h = altura do cálculo da velocidade do vento, em m
 L = comprimento de Monin-Obukhov, em m

O comprimento de Monin-Obukhov, dada por $|L|$, é a altura a partir do solo na qual a produção de energia cinética turbulenta por efeitos mecânicos (cizalhamento do escoamento) e a sua produção (ou destruição) por efeitos de empuxo (diferença de densidade) são iguais.

Como exemplo de irregularidade do terreno temos que para superfícies lisas, como neve, $z \approx 10^{-5}$ m e para centros urbanos z pode variar de 5 a 10 m.

Para o cálculo da velocidade do vento no topo da chaminé e na altura efetiva é preciso uma velocidade do vento experimental numa altura de

referência, que geralmente é 10 m, com esses dados calcula-se a velocidade de fricção, assim temos todos os parâmetros para o cálculo do perfil de velocidade.

5. EQUAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO NO MODELO DE PLUMA GAUSSIANA

Após esta exposição sobre as características meteorológicas, torna-se mais simples a compreensão do modelo matemático que procura descrever o fenômeno.

A descrição matemática teórica da difusão de plumas na atmosfera está baseada nas teorias clássicas de transporte da mecânica dos fluidos e nas teorias estatísticas de turbulência.

As equações adotadas pelo software Pluma que fornecem a concentração de um poluente em função de sua posição em relação à fonte são baseadas na distribuição Gaussiana dos perfis vertical e transversal da concentração.

Para a dedução das equações são feitas algumas hipóteses simplificativas como velocidade média do vento na direção x, turbulência homogênea, escoamento atmosférico em regime permanente, difusão molecular desprezível comparada com a difusão turbulenta e a fonte emissora pontual.

As equações podem ser divididas em fontes contínuas ou instantâneas. Estas formulações necessitam de condições de contorno específicas na direção vertical (z): $0 \leq z \leq \infty$ e $0 \leq z \leq H$ onde não existe difusão através da fronteira superior $z = H$ (camada de inversão).

As condições para $z = 0$, na superfície, podem ser de reflexão total, absorção total ou absorção parcial.

Na reflexão total em $z = 0$ assume-se que o solo não absorve o poluente. Neste caso a presença da superfície pode ser avaliada pela adição de concentração resultante de uma fonte hipotética em $z = -h$.

Na absorção total em $z = 0$ assume-se que o solo é um absorvedor perfeito, logo a concentração na superfície é igual a zero.

Na absorção parcial em $z = 0$ é necessário o conhecimento de um parâmetro que representa o grau de absorção da superfície em relação ao poluente. Este parâmetro é chamado de velocidade de deposição (v_d). Para reflexão total $v_d = 0$ e para absorção total $v_d = \infty$.

Para as equações que serão mostradas temos a seguinte simbologia:

$\langle c \rangle$ = concentração média do poluente na posição x,

y, z, em g/m³

q = taxa de emissão de poluente, em g/s (fontes contínuas)

S = emissão de poluente, em g (fontes instantâneas - "puff")

u = velocidade média do vento, em m/s

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ = coeficientes de dispersão, em m

h = altura efetiva da chaminé, em m

t = tempo, em s

Para fonte contínua e reflexão total em $z = 0$

$$\langle c(x, y, z) \rangle = \frac{q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (5.1)$$

Para fonte instantânea e absorção total em $z = 0$

$$\langle c(x, y, z) \rangle = \frac{S}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{(x-x'-u(t-t'))^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-y')^2}{2\sigma_y^2}\right] \cdot \left[\exp\left(-\frac{(z-z')^2}{2\sigma_z^2}\right) - \exp\left(-\frac{(z+z')^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (5.2)$$

O software Pluma utiliza mais cinco equações [1], para diferentes condições de contorno.

6. VISUALIZAÇÃO COM ISO-LINHAS

É mostrada abaixo um caso bidimensional simulado no software Pluma. Domínio: $1 \leq x \leq 1000$ m e $1 \leq z \leq 600$ m. Com uma fonte emissora de intensidade de 0.88 g/s. Sua altura efetiva é 372,6 m e a velocidade do vento na altura efetiva é de 0.65 m/s. Categoria de estabilidade A.

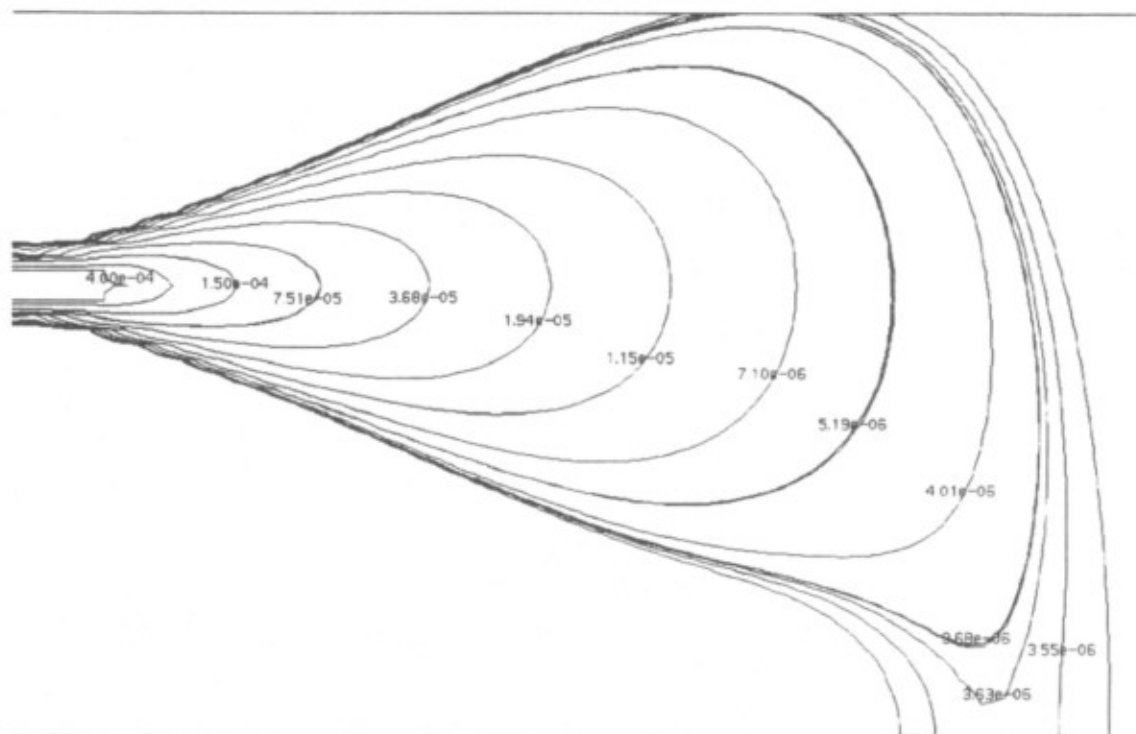


Figura 6.1: Campo de concentração para uma fonte contínua.

7. CONCLUSÃO

Como é apresentado neste trabalho, o software Pluma foi elaborado visando um cálculo rápido, feito por equações algébricas, do campo de concentração criado por uma fonte emissora. Tem-se conseguido bons resultados bidimensionais, como mostra a figura acima, e até resultados tridimensionais de ótima qualidade.

8. REFERÊNCIAS

- [1] Seinfeld, John H, Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution, John Wiley & Sons, Inc., 1986.
- [2] Ratnieks, Edvins & Zornitta, Sérgio, Dispersão Atmosférica de TRS Parte 1, Relatório técnico SPQ 140, Guaíba, RS, Outubro de 19985.
- [3] Pasquill, F. Atmospheric Diffusion. D. Van Nostrand Company Ltd. Princeton, New Jersey, 1962.

DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA CÁLCULO E VISUALIZAÇÃO DE PLUMAS

Andrei Kuhnen da Silva
Édson Luiz Belido
SINMEC - Laboratório de Simulação Numérica em Mecânica dos Fluidos e
Tranferência de Calor
Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC
Campus Universitário - Trindade
CEP 88040 - 900 - Florianópolis - SC

Orientadores: Fernando Bóçon, Doutorando. (UFPR).
Axel Dihlmann, M.Sc.
Clovis Raimundo Maliska, Ph.D.
Departamento de Engenharia Mecânica - UFSC

SUMÁRIO

Neste trabalho é feita uma breve abordagem sobre a influência das condições atmosféricas no cálculo da velocidade do vento, nos coeficientes de dispersão de poluentes e na altura efetiva da chaminé e em seguida é mostrada a formulação das equações de concentração no modelo de pluma Gaussiana. Isolinhas de concentração são apresentadas para um problema simulado no *software* Pluma.

1. INTRODUÇÃO

Existem dois fatores fundamentais que governam a dispersão atmosférica de poluentes:

- as características da fonte emissora (condições físico-químicas do gás fluente, especificações da chaminé),
- as condições meteorológicas reinantes (este é o fator mais complexo).

A grande dificuldade consiste em tentar descrever uma situação complexa e dinâmica com uso de poucos parâmetros, pois só podemos trabalhar com dados disponíveis.

Dentro do tópico meteorológico, o fator possivelmente mais importante é o vento. Este determina que uma pluma de chaminé tenha dispersão vertical ou horizontal. A dispersão é comandada pelas variáveis fundamentais do fenômeno climático chamado vento, pois este imprime sua direção, sentido e velocidade ao poluente lançado na atmosfera.

Outro fator meteorológico importante é a variação da temperatura do ar em função da altura, que é chamado de "Gradiente Adiabático". Em condições de atmosfera neutra o gradiente adiabático seco é $-1^{\circ}\text{C} / 100 \text{ m}$. Devido a uma série de condições, o gradiente de temperatura de uma dada massa de ar em um determinado tempo pode ser diferente da condição adiabática seca. Em adição às noções de gradiente adiabático seco e de diminuição vertical de

temperatura com a altitude, pode-se definir três tipos de condições de estabilidade da atmosfera: indiferente ou neutra, instável e estável.

A dispersão de uma pluma depende basicamente da estabilidade da atmosfera. Existem maneiras de medir esta estabilidade, mas isto requer trabalho de pesquisa no local desejado. Com os dados meteorológicos normalmente existentes, pode-se inferir o estado das camadas atmosféricas. Para isto deve-se ter em mãos o perfil de temperatura da camada, a velocidade do vento e a insolação.

Pasquill [3] dividiu as condições possíveis em seis categorias ou classes de estabilidade. Estas classes são chamadas A, B, C, D, E, F.

Classe de estabilidade	Gradiente térmico
A - extremamente instável	menor que $-1,896^{\circ}\text{C} / 100 \text{ m}$
B - moderadamente instável	$-1,896$ até $-1,695^{\circ}\text{C} / 100 \text{ m}$
C - levemente instável	$-1,695$ até $-1,49^{\circ}\text{C} / 100 \text{ m}$
D - neutra	$-1,49$ até $-0,49^{\circ}\text{C} / 100 \text{ m}$
E - levemente estável	$-0,49$ até $1,49^{\circ}\text{C} / 100 \text{ m}$
F - moderadamente estável	maior que $1,49^{\circ}\text{C} / 100 \text{ m}$

Tabela 1.1 - Classes de estabilidade em função do gradiente térmico.

Pasquill também dividiu as condições de estabilidade dependendo da velocidade do vento e da radiação solar [1].

2. COEFICIENTES DE DISPERSÃO

Os coeficientes de dispersão são difíceis de serem medidos diretamente. Entre 1961-1962, Pasquill, Guifford, Turner divulgaram coeficientes de dispersão obtidos em terreno plano rural. Estes coeficientes são usados até hoje para casos similares. Eles não podem ser aplicados em terrenos acidentados ou urbanos, pois a turbulência gerada por edificações ou ondulações modifica a dispersão.

Para as fontes contínuas (no tempo) a difusão na direção do vento é pequena comparada com a dispersão vertical e transversal, sendo desprezada no modelo de Pluma Gaussiana utilizado no software. Para o uso das equações analíticas de dispersão é conveniente uma expressão para os coeficientes de dispersão como função da distância da fonte.

A equação de Pasquill e Guifford é representada por [1]:

$$\sigma_y = R_y x^r \quad \sigma_z = R_z x^r \quad (2.1)$$

onde as constantes R e r dependem da classe de estabilidade.

Outra equação para cálculo dos coeficientes de dispersão é dada por Klug:

$$\sigma_y = \exp\left[I_y + J_y \ln x + K_y (\ln x)^2\right] \quad \sigma_z = \exp\left[I_z + J_z \ln x + K_z (\ln x)^2\right] \quad (2.2)$$

onde as constantes I, J, K também dependem da classe de estabilidade [1].

3. ALTURA EFETIVA

A altura efetiva é a altura a partir do solo onde a pluma se nivela. As equações obtidas para o cálculo da altura efetiva são semi-empíricas. Existem várias formulações, as usadas pelo software Pluma são as de Holland, de Briggs e da ASME (American Society of Mechanical Engineers), mas não é dito que sejam as melhores para todas as situações [1].

Um exemplo é a equação de Holland:

$$\Delta h = \frac{(V_s ds)}{u} \left(1,5 + 0,00268 p \frac{T_g - T_a}{T_g} ds \right) \quad (3.1)$$

onde:

Δh = elevação da pluma acima da chaminé, em m
 V_s = velocidade dos gases na boca da chaminé, em m/s
 u = velocidade do vento no topo da chaminé, em m/s
 ds = diâmetro interno da chaminé, em m
 T_g = temperatura dos gases na saída da chaminé, em K
 T_a = temperatura do ar ambiente, em K
 p = pressão atmosférica, em mb.

Holland indica ainda que Δh deve ser multiplicado por um fator, de acordo com as classes de estabilidade:

Classes	Fator
A, B	1,15
C	1,10
D	1,00
E, F	0,85

Em geral as outras equações, ver [1], dependem dos mesmos parâmetros que a equação de Holland.

4. VELOCIDADE DO VENTO

Uma simplificação usada para o cálculo da velocidade do vento é que esta contém apenas componente na direção de x.

São mostradas abaixo as equações para o cálculo do perfil de velocidade do vento:

$$\frac{u^*}{k u(h)} = \left[\ln\left(\frac{h}{z}\right) + \frac{4,7}{L}(h-z) \right]^{-1} \quad \text{estável} \quad (4.1)$$

$$\frac{u^*}{k u(h)} = \left[\ln\left(\frac{h}{z}\right) \right]^{-1} \quad \text{neutra} \quad (4.2)$$

$$\frac{u^*}{k u(h)} = \left\{ \ln\left(\frac{h}{z}\right) + \ln \left[\frac{(\eta_0^2 + 1)(\eta_0 + 1)^2}{(\eta_r^2 + 1)(\eta_r + 1)^2} \right] + 2 \left[\tan^{-1} \eta_r - \tan^{-1} \eta_0 \right] \right\}^{-1} \quad \text{instável} \quad (4.3)$$

$$\eta_r = \left[1 - 15 \frac{h}{L} \right]^{\frac{1}{4}} \quad \eta_0 = \left[1 - 15 \frac{z}{L} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (4.4)$$

onde:

u^* = velocidade de fricção, em m/s
 k = constante de Von Karman (= 0,4)
 u = velocidade do vento, em m/s
 z = fator de irregularidade do terreno, em m
 h = altura do cálculo da velocidade do vento, em m
 L = comprimento de Monin-Obukhov, em m

O comprimento de Monin-Obukhov, dada por $|L|$, é a altura a partir do solo na qual a produção de energia cinética turbulenta por efeitos mecânicos (cizalhamento do escoamento) e a sua produção (ou destruição) por efeitos de empuxo (diferença de densidade) são iguais.

Como exemplo de irregularidade do terreno temos que para superfícies lisas, como neve, $z \approx 10^{-5}$ m e para centros urbanos z pode variar de 5 a 10 m.

Para o cálculo da velocidade do vento no topo da chaminé e na altura efetiva é preciso uma velocidade do vento experimental numa altura de

referência, que geralmente é 10 m, com esses dados calcula-se a velocidade de fricção, assim temos todos os parâmetros para o cálculo do perfil de velocidade.

5. EQUAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO NO MODELO DE PLUMA GAUSSIANA

Após esta exposição sobre as características meteorológicas, torna-se mais simples a compreensão do modelo matemático que procura descrever o fenômeno.

A descrição matemática teórica da difusão de plumas na atmosfera está baseada nas teorias clássicas de transporte da mecânica dos fluidos e nas teorias estatísticas de turbulência.

As equações adotadas pelo software Pluma que fornecem a concentração de um poluente em função de sua posição em relação à fonte são baseadas na distribuição Gaussiana dos perfis vertical e transversal da concentração.

Para a dedução das equações são feitas algumas hipóteses simplificativas como velocidade média do vento na direção x, turbulência homogênea, escoamento atmosférico em regime permanente, difusão molecular desprezível comparada com a difusão turbulenta e a fonte emissora pontual.

As equações podem ser divididas em fontes contínuas ou instantâneas. Estas formulações necessitam de condições de contorno específicas na direção vertical (z):

$$0 \leq z \leq \infty$$

$0 \leq z \leq H$ onde não existe difusão através da fronteira superior $z = H$ (camada de inversão).

As condições para $z = 0$, na superfície, podem ser de reflexão total, absorção total ou absorção parcial.

Na reflexão total em $z = 0$ assume-se que o solo não absorve o poluente. Neste caso a presença da superfície pode ser avaliada pela adição de concentração resultante de uma fonte hipotética em $z = -h$.

Na absorção total em $z = 0$ assume-se que o solo é um absorvedor perfeito, logo a concentração na superfície é igual a zero.

Na absorção parcial em $z = 0$ é necessário o conhecimento de um parâmetro que representa o grau de absorção da superfície em relação ao poluente. Este parâmetro é chamado de velocidade de deposição (v_d). Para reflexão total $v_d = 0$ e para absorção total $v_d = \infty$.

Para as equações que serão mostradas temos a seguinte simbologia:

$\langle c \rangle$ = concentração média do poluente na posição x,

y, z, em g/m³

q = taxa de emissão de poluente, em g/s (fontes contínuas)

S = emissão de poluente, em g (fontes instantâneas - "puff")

u = velocidade média do vento, em m/s

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ = coeficientes de dispersão, em m

h = altura efetiva da chaminé, em m

t = tempo, em s

Para fonte contínua e reflexão total em $z = 0$

$$\langle c(x, y, z) \rangle = \frac{q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (5.1)$$

Para fonte instantânea e absorção total em $z = 0$

$$\langle c(x, y, z) \rangle = \frac{S}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{(x-x'-u(t-t'))^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-y')^2}{2\sigma_y^2}\right] \times \left[\exp\left(-\frac{(z-z')^2}{2\sigma_z^2}\right) - \exp\left(-\frac{(z+z')^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (5.2)$$

O software Pluma utiliza mais cinco equações [1], para diferentes condições de contorno.

6. VISUALIZAÇÃO COM ISO-LINHAS

É mostrada abaixo um caso bidimensional simulado no software Pluma. Domínio: $1 \leq x \leq 1000$ m e $1 \leq z \leq 600$ m. Com uma fonte emissora de intensidade de 0.88 g/s. Sua altura efetiva é 372,6 m e a velocidade do vento na altura efetiva é de 0.65 m/s. Categoria de estabilidade A.

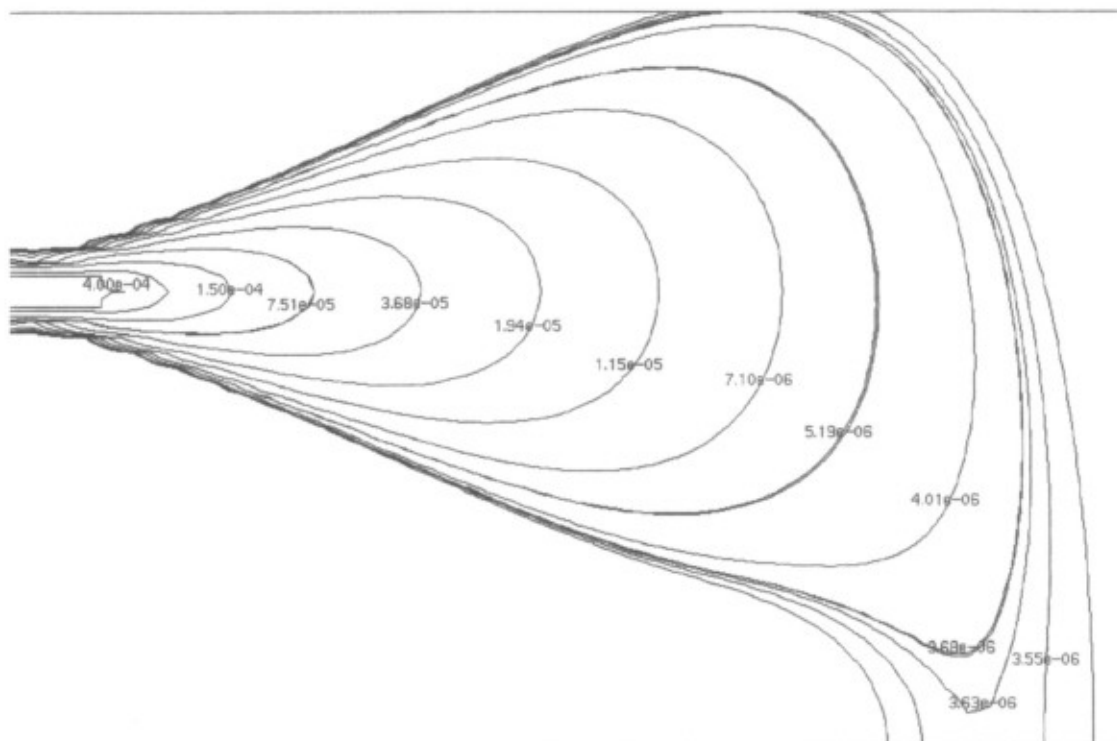


Figura 6.1: Campo de concentração para uma fonte contínua.

7. CONCLUSÃO

Como é apresentado neste trabalho, o software Pluma foi elaborado visando um cálculo rápido, feito por equações algébricas, do campo de concentração criado por uma fonte emissora. Tem-se conseguido bons resultados bidimensionais, como mostra a figura acima, e até resultados tridimensionais de ótima qualidade.

8. REFERÊNCIAS

- [1]Seinfeld, John H, Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution, John Wiley & Sons, Inc., 1986.
- [2]Ratnieks, Edvins & Zornitta, Sérgio, Dispersão Atmosférica de TRS Parte 1, Relatório técnico SPQ 140, Guaíba, RS, Outubro de 19985.
- [3]Pasquill, F. Atmospheric Diffusion. D. Van Nostrand Company Ltd. Princeton, New Jersey, 1962.

