

INCÊNDIO EM NUVEM DE VAPOR

Incêndio em Nuvem
(VCF: vapour cloud fire)
(flash fire)

<http://www.youtube.com/watch?v=nWReclW3qXY>

<http://www.youtube.com/watch?v=6IKUsUycBNA>

X

Explosão de Nuvem
(VCE: vapour cloud explosion)

<http://www.youtube.com/watch?v=1cFSL4-qW88>

INCÊNDIO EM NUVEM DE VAPOR

A vapour cloud fire, or flash fire, occurs when a vapour cloud forms from a leak and is ignited, but without creation of significant overpressure. If such overpressure occurs, the event is a vapour cloud explosion (VCE) rather than a vapour cloud fire (VCF).

Lees, Vol. 2

INCÊNDIO EM NUVEM DE VAPOR

Strictly, a vapour cloud combustion which generates overpressure has to be classed as a vapour cloud explosion. In practice, the latter term tends to be reserved for cases where the explosion causes significant destruction. For vapour cloud fires, the overpressures vary from the imperceptible up to those which may cause some window damage.

Lees, Vol. 2

Edição do dia 13/10/2011
13/10/2011 14h21 - Atualizado em 13/10/2011 14h21

Explosão em restaurante no RJ deixa três pessoas mortas e mais 17 feridas

Um dos mortos foi arremessado a 50 metros de distância. A explosão provocou a interdição de prédios vizinhos e isolou a movimentada Praça Tiradentes, que ficou cheia de escombros.

VCE

INCÊNDIO EM NUVEM DE VAPOR

VCF: vapour cloud fire

Release of flammable vapour from a process plant followed by ignition is a not uncommon occurrence. If the ignition is prompt, the cloud may be modest in size, but if the cloud has time to spread over an appreciable part of the site and is then ignited, a major vapour cloud fire may result. This occurs in only a very small proportion of ignited releases.

Lees, Vol. 2

The conditions favouring a vapour cloud fire are a prolonged release in conditions of poor dispersion.

Lees, Vol. 2

LFL

UFL

Substance	LFL*, % vol.	UFL*, % vol.	Flash temp.*, K	ΔH^{**} , kJ kg ⁻¹
Acetaldehyde	4	57	235.4	17344
Acetic acid	5.4	16	315.9	15422
Acetone	2.6	12.8	255.4	31360
Acetylene	2.5	82	255.4	49907
Acrolein	2.8	31	< 255.4	-
Acrylonitrile	3.1	17	272.0	33718
Allyl bromide	4.4	7.3	272.0	-
Allyl chloride	2.9	11.2	241.5	-
Aniline	1.3	-	343.1	37027
Benzene	1.4	8	262.0	42266
1,3 Butadiene	2	11.5	197.0	46966
Butanal	2.5	12.5	266.5	34841
Butane	1.9	8.5	213.1	49510
Butanol	1.4	11.2	308.1	36809
1-Butene	1.6	9.3	210.9	48419
n-Butyl acetate	1.3	7.5	265.4	30887
Butyl chloride	1.9	10.1	263.7	-
Carbone monoxide	12.5	74.2	-	-
Cyclohexane	1.3	8.4	256.1	46970
Cyclopropane	2.4	10.4	-	49698
Diethylamine	1.8	10.1	255.1	42033
Diisopropyl ether	1.4	7.9	245.4	39571

Fonte: [Annex 2 Flammability limits, flash temperature and heat of combustion \(higher value\) for different substances](#)
Industrial Safety Series, Volume 8, 2008, Pages 335-336

LFL

UFL

Dimethyl ether	3.4	27	232.0	31702
Dimethylamine	2.8	14.4	255.4	39239
Ethanol	3.3	19	286.3	30588
Ethyl acetate	2.2	11	268.7	25804
Ethylene	2.7	36	-	50310
Ethylene oxide	3	100	253.1	29687
Formaldehyde	7	73	358.1	19008
Furan	2.3	14.3	237.6	31006
Gasoline	1.3	7.1	227.6	-
Heptane	1.05	6.7	269.3	47711
Hexane	1.2	7.5	250.1	48671
Hydrocyanic acid	5.6	40	255.4	-
Hydrogen	4.1	74.2	-	-
Isoamyl alcohol	1.2	9	315.9	-
Isobutane	1.9	8.5	-	49363
Isopentane	1.4	7.6	< 222.0	48893
Isopropyl alcohol	2.5	12	284.8	34126
Isopropylamine	2.3	10.4	235.9	40315
Kerosene	0.7	5	338.7 - 358.1	-
Methane	5.3	15	50.6	55505
Methyl acetate	3.1	16	263.1	21978
Methyl acrylate	2.8	25	270.4	24377
Methyl alcohol	6	36.5	285.4	23845
Methyl chloride	8.1	17	< 273.1	-

Fonte: [Annex 2 Flammability limits, flash temperature and heat of combustion \(higher value\) for different substances](#)
Industrial Safety Series, Volume 8, 2008, Pages 335-336

LFL

UFL

Methyl chloride	8.1	17	< 273.1	-
Methyl cyclohexane	1.2	6.7	269.3	46855
Methyl ethyl ketone	1.8	11.5	267.6	34374
Methyl formate	5.9	20	254.1	16703
Methyl methacrylate	2.1	12.5	283.1	-
Monomethyl amine	4.95	20.75	273.1	34936
Octane	1	4.7	286.5	48250
Pentane	1.5	7.8	< 233.1	49017
Propane	2.3	9.5	168.7	50338
Propyl amine	2	10.4	235.9	40535
Propylene	2.4	10.1	165.4	48902
Propylene oxide	2.8	37	235.9	33459
Toluene	1.27	7	277.6	42847
Triethyl amine	1.2	8	266.5	40859
Trimethyl amine	2	11.6	266.5	41330
Vinyl acetate	2.6	13.4	265.4	24566
Vinyl chloride	4	22	265.1	-
m-Xylene	1.1	7	298.1	43276
o-Xylene	1	6	290.1	43292
p-Xylene	1.1	7	298.1	43282

Fonte: [Annex 2 Flammability limits, flash temperature and heat of combustion \(higher value\) for different substances](#)
Industrial Safety Series, Volume 8, 2008, Pages 335-336

NFPA Pocket Guide to Hazardous Materials

7.2.2 Equations to Predict Flammability Limits of a Mixture.

Equations 7.6(a) and (b) use Le Chatelier's Principles to reliably predict the flammability range of a mixture composed of two or more flammable gases. The equations are found in **NFPA 69**, *Standard on Explosion Prevention Systems* (Annex B.6, Equations B.1 and B.2) [29]. These equations are useful when **LFL** and UFL data on the individual components of a mixture are available, but not on the mixture, itself, which is often the case.

Equation 7.6(a): Estimation of **LFL** of a Mixture

$$\text{LFL}_{\text{mixture}} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{P_1/\text{LFL}_1 + P_2/\text{LFL}_2 + \dots + P_n/\text{LFL}_n}$$

Equation 7.6(b): Estimation of **UFL** of a Mixture

$$\text{UFL}_{\text{mixture}} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{P_1/\text{UFL}_1 + P_2/\text{UFL}_2 + \dots + P_n/\text{UFL}_n}$$

where:

$P_1 \dots P_n$ = volume fractions of components 1, 2, 3, ..., n of the mixture

LFL₁...**LFL**_n = lower flammable limits of components 1, 2, 3, ..., n of the mixture

UFL₁...**UFL**_n = upper flammable limits of components 1, 2, 3, ..., n of the mixture

INCÊNDIO EM NUVEM DE VAPOR

1. Modelo Geral de Nuvem
2. Modelo de Eisenberd, Lynch e Breeding
3. Modelo de Raj e Emmons
4. Modelo CCPS

INCÊNDIO EM NUVEM DE VAPOR

1. Modelo Geral de Nuvem:

Dimensões:

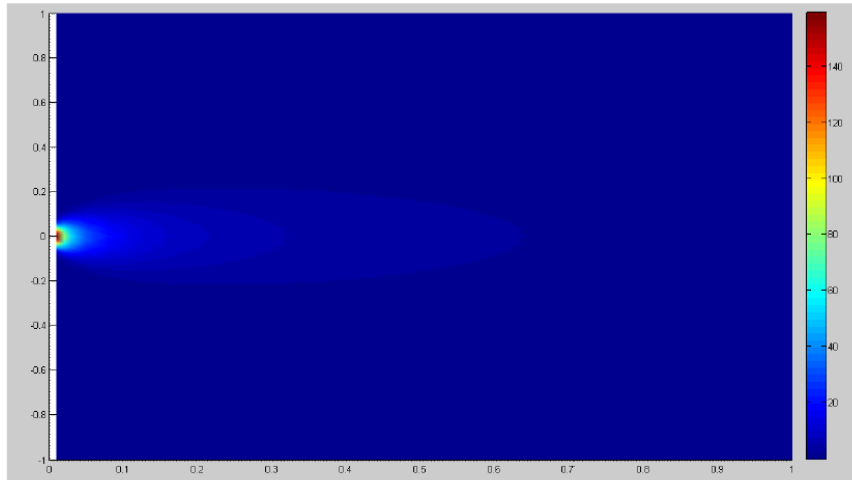
Muitos autores não apresentam modelos específicos para incêndios em nuvens. Apenas empregam os modelos de dispersão para definir as dimensões da nuvem (LII).

Consequências:

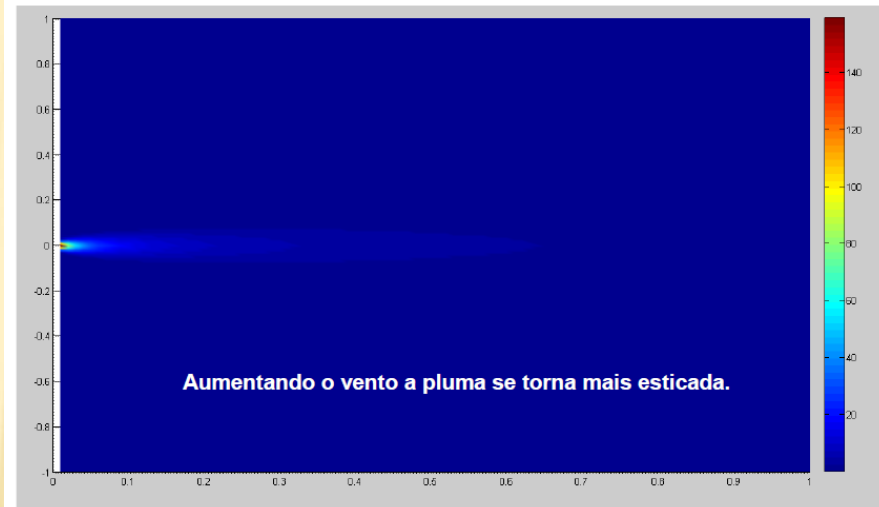
- a. Pessoas no interior da nuvem: sofrem ferimentos, em geral fatais
- b. Pessoas no exterior da nuvem: sofrem ferimentos em função da radiação térmica emitida. Esses autores assumem que a emissão está ocorrendo na superfície externa (fronteira) da nuvem. O cálculo pode considerar, por exemplo, o parâmetro Surface Emissive Power.

Modelos de dispersão:

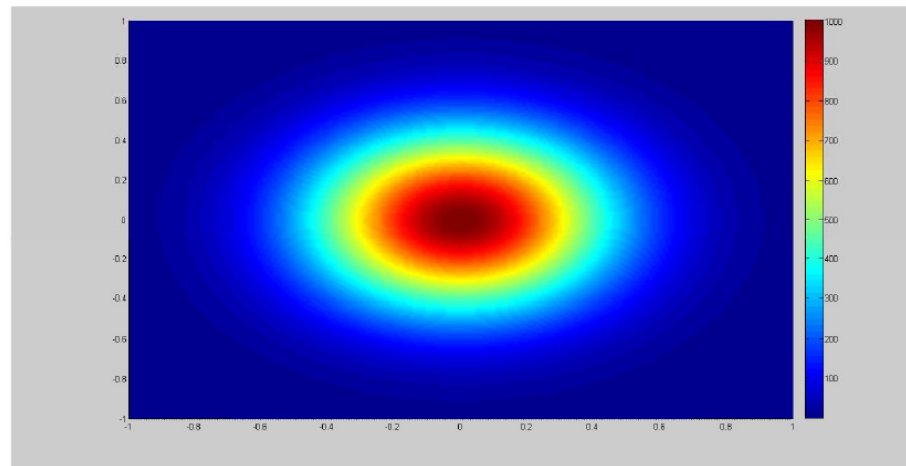
$Q_m=1; K=0.05; t=0.1; u=1;$



$Q_m=1; K=0.05; t=1; u=8;$



$Q_m=500; K=0.5; t=0.1;$



Modelos de dispersão:

Pasquill Gifford:

PUFF, fonte pontual localizada no chão, sistema de coordenadas na fonte, vento constante na direção X

$$\langle C \rangle(x, y, z, t) = \frac{Q_m^*}{\sqrt{2\pi}^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{x - ut}{\sigma_x} \right)^2 + \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right] \right\}.$$

Pluma, fonte continua, avaliação no estado estacionário, fonte localizada no chão, sistema de coordenadas na fonte, vento constante na direção X

$$\langle C \rangle(x, y, z) = \frac{Q_m}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right) \right].$$

Coeficiente de dispersão para **PUFF**:

Table 5-3 Recommended Equations for Pasquill-Gifford Dispersion Coefficients for Puff Dispersion^{1,2} (the downwind distance x has units of meters)

Pasquill-Gifford stability class	σ_y (m) or σ_x (m)	σ_z (m)
A	$0.18x^{0.92}$	$0.60x^{0.75}$
B	$0.14x^{0.92}$	$0.53x^{0.73}$
C	$0.10x^{0.92}$	$0.34x^{0.71}$
D	$0.06x^{0.92}$	$0.15x^{0.70}$
E	$0.04x^{0.92}$	$0.10x^{0.65}$
F	$0.02x^{0.89}$	$0.05x^{0.61}$

A–F are defined in Table 5-1.

¹R. F. Griffiths. "Errors in the Use of the Briggs Parameterization for Atmospheric Dispersion Coefficients." *Atmospheric Environment* (1994), 28(17): 2861–2865.

²G. A. Briggs. *Diffusion Estimation for Small Emissions*. Report ATDL-106 (Washington, DC: Air Resources, Atmospheric Turbulence, and Diffusion Laboratory, Environmental Research Laboratories, 1974).

Coeficiente de dispersão para **PLUMA**:

Table 5-2 Recommended Equations for Pasquill-Gifford Dispersion Coefficients for Plume Dispersion^{1,2} (the downwind distance x has units of meters)

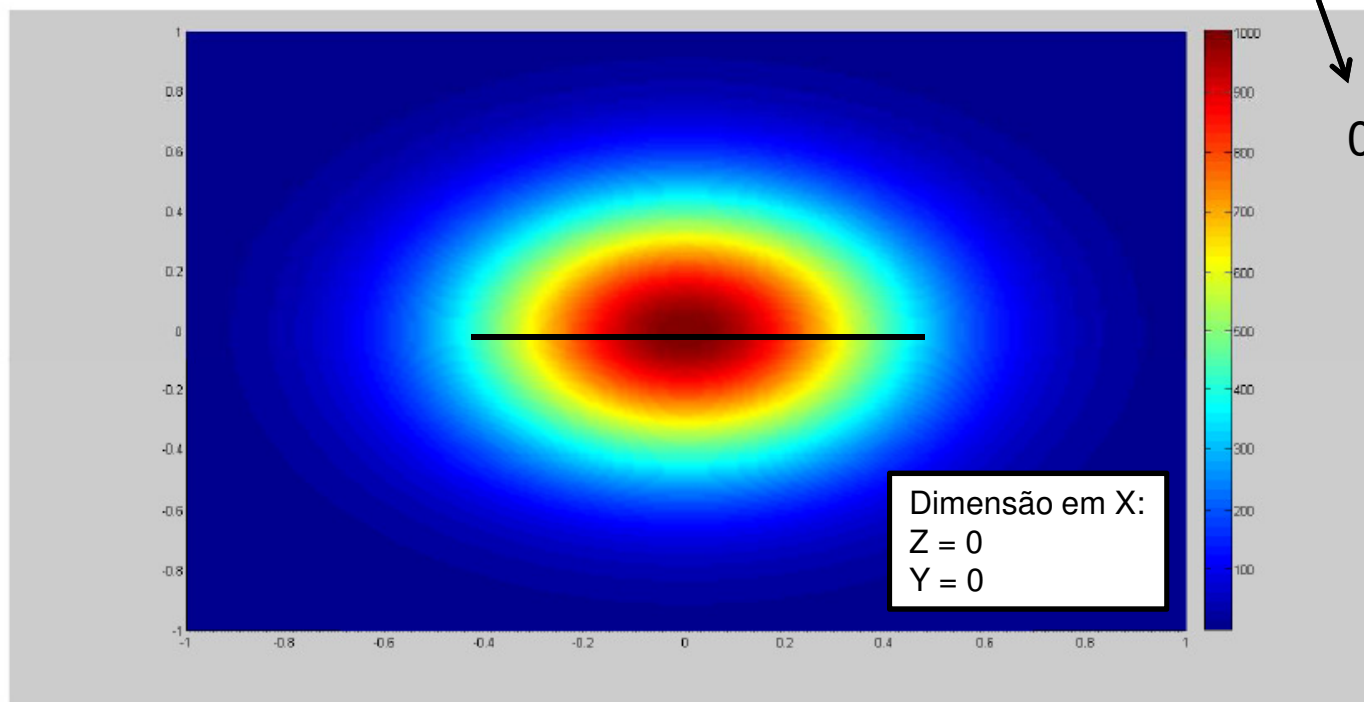
Pasquill-Gifford stability class	σ_y (m)	σ_z (m)
Rural conditions		
A	$0.22x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.20x$
B	$0.16x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.12x$
C	$0.11x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.08x(1 + 0.0002x)^{-1/2}$
D	$0.08x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.06x(1 + 0.0015x)^{-1/2}$
E	$0.06x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.03x(1 + 0.0003x)^{-1}$
F	$0.04x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.016x(1 + 0.0003x)^{-1}$
Urban conditions		
A-B	$0.32x(1 + 0.0004x)^{-1/2}$	$0.24x(1 + 0.0001x)^{+1/2}$
D	$0.22x(1 + 0.0004x)^{-1/2}$	$0.20x$
D	$0.16x(1 + 0.0004x)^{-1/2}$	$0.14x(1 + 0.0003x)^{-1/2}$
E-F	$0.11x(1 + 0.0004x)^{-1/2}$	$0.08x(1 + 0.0015x)^{-1/2}$

Atenção: assumo o coeficiente de X igual ao de Y

Exemplo:

PUFF, fonte pontual localizada no chão, sistema de coordenadas na fonte, vento constante na direção X

$$\langle C \rangle(x, y, z, t) = \frac{Q_m^*}{\sqrt{2\pi}^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{x - ut}{\sigma_x} \right)^2 + \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right] \right\}$$



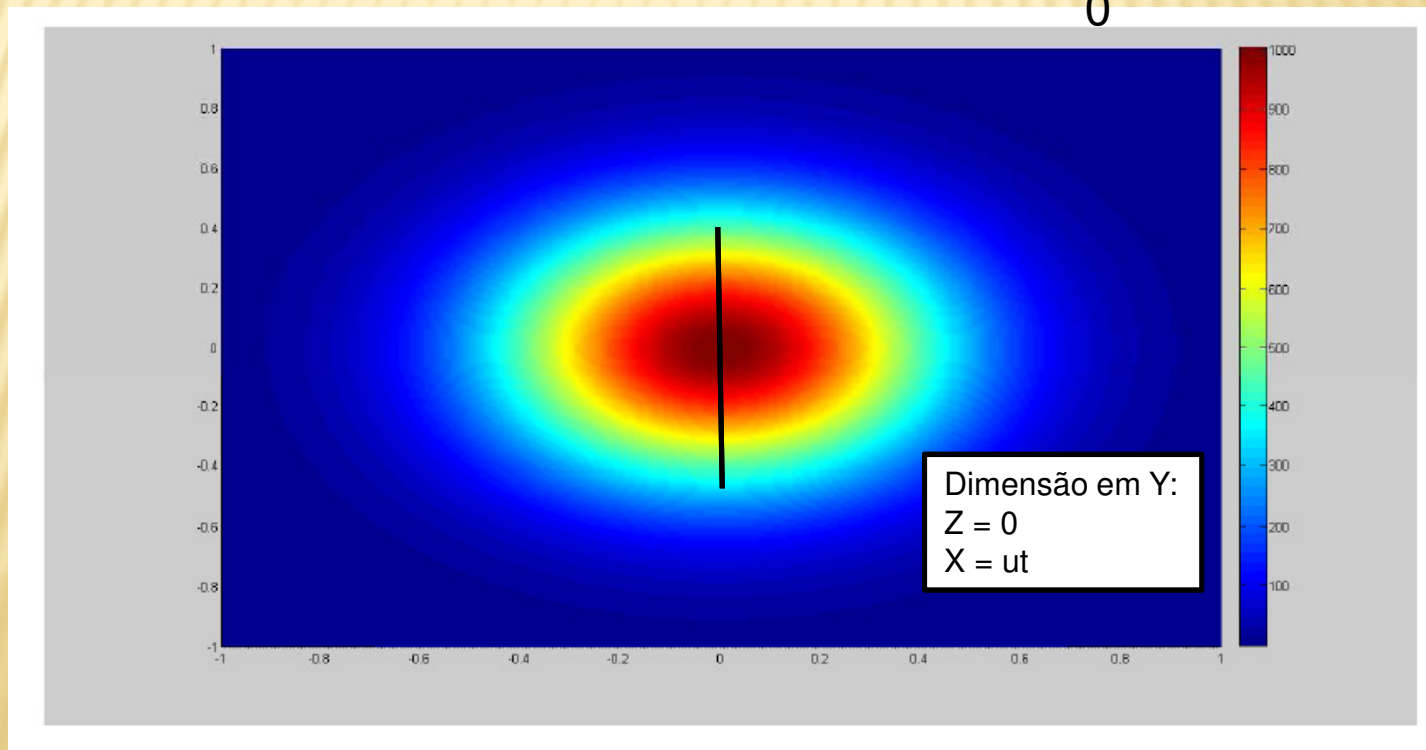
0

0

Exemplo:

PUFF, fonte pontual localizada no chão, sistema de coordenadas na fonte, vento constante na direção X

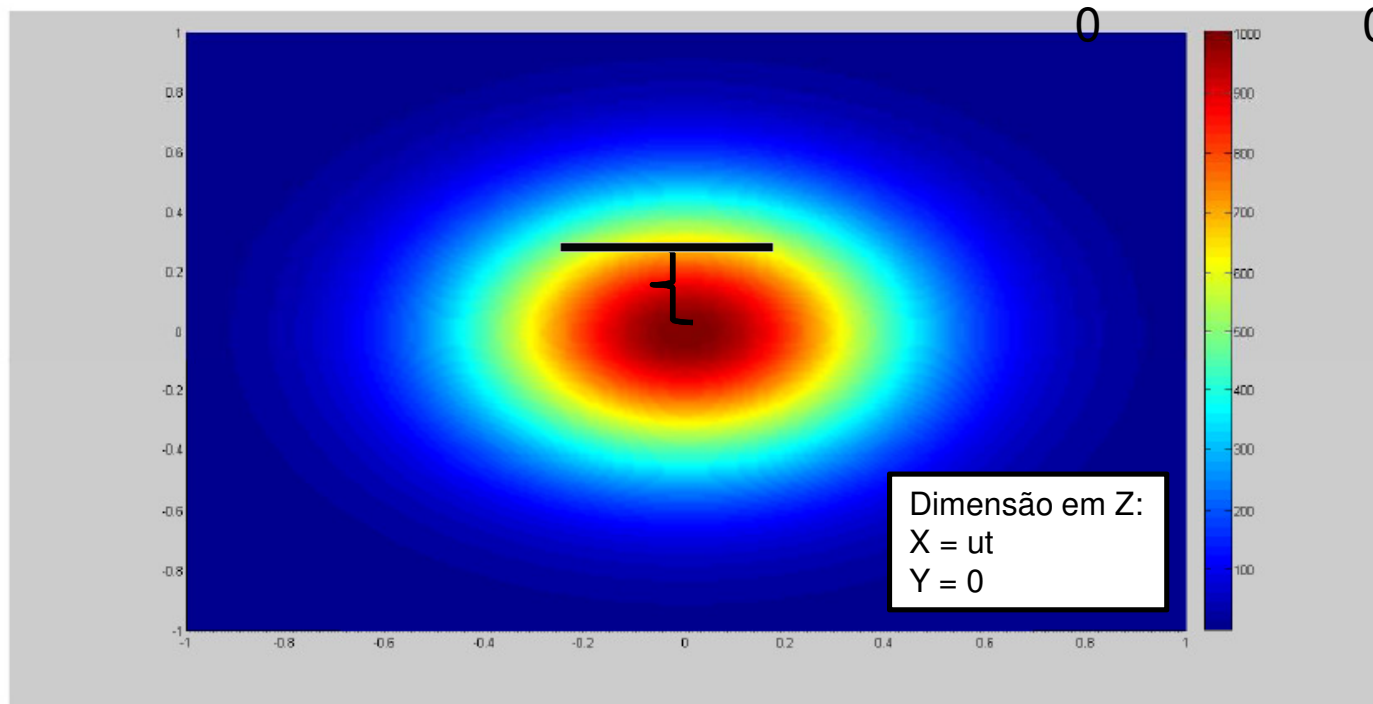
$$\langle C \rangle(x, y, z, t) = \frac{Q_m^*}{\sqrt{2\pi}^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{x - ut}{\sigma_x} \right)^2 + \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right] \right\}.$$



Exemplo:

PUFF, fonte pontual localizada no chão, sistema de coordenadas na fonte, vento constante na direção X

$$\langle C \rangle(x, y, z, t) = \frac{Q_m^*}{\sqrt{2\pi}^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{x - ut}{\sigma_x} \right)^2 + \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right] \right\}.$$



INCÊNDIO EM NUVEM DE VAPOR

2. Modelo de Eisenberd, Lynch e Breeding:

Dimensões:

Volume da nuvem (metade de um elipsoide) (m³):

$$V_r = \frac{2\pi}{3} \sigma_x \sigma_y \sigma_z (r_l^3 - r_u^3)$$

Definido no próximo slide.
adimensional

Área superficial da nuvem (que emite radiação) (m²):

$$A_r = \frac{2\pi}{3} (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2) (r_l^2 + r_u^2)$$

INCÊNDIO EM NUVEM DE VAPOR

2. Modelo de Eisenberd, Lynch e Breeding:

Massa total de gás liberado

$$r_l = 2 \ln \left[\frac{2m}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z k_l} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Conc. do LII
(kg/m³)

$$r_u = 2 \ln \left[\frac{2m}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z k_u} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Conc. do LSI
(kg/m³)

Atenção: as tabelas de LII e LSI em geral estão em % volumétrica.

INCÊNDIO EM NUVEM DE VAPOR

2. Modelo de Eisenberd, Lynch e Breeding:

Unidades:

$$r_1 = 2 \ln \left[\frac{2m}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z k_1} \right]^{\frac{1}{2}}$$

adimensional

$\frac{\text{Kg}}{\text{m m m} \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}}$

INCÊNDIO EM NUVEM DE VAPOR

2. Modelo de Eisenberd, Lynch e Breeding:

Avaliação:

massa liberada aumenta: r aumenta
conc de LII aumenta: r diminui



$$r_1 = 2 \ln \left[\frac{2m}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z k_1} \right]^{\frac{1}{2}}$$

INCÊNDIO EM NUVEM DE VAPOR

2. Modelo de Eisenberd, Lynch e Breeding:

Praticamente todo o calor liberado pelo incêndio em nuvem está na forma de radiação. É possível aproxima-lo em função da temperatura de queima (adaptado da Equação de Stefan Boltzmann) e da área total da superfície de queima:

$$q \approx A_r \sigma (T_g^4 - T_a^4)$$

Taxa de Calor liberado (W) ←

← Área Superficial

← Cte de Stefan Boltzmann

← Temperatura do gás quente (K)

← Temperatura do ambiente (K)

Equação básica:

$$E = \sigma T^4$$

INCÊNDIO EM NUVEM DE VAPOR

2. Modelo de Eisenberd, Lynch e Breeding:

O calor liberado também pode ser estimado por Cp:

$$q = -c_p \rho V_r \frac{dT_g}{dt}$$

T_g é a temperatura do gás ao longo da queima. Vai de T_{gi}, no instante inicial, até T_a (ambiente) no final.

Calor específico
(J/kg K)

Volume
(m³)

Densidade
(kg/m³)

Massa (kg)

J	Kg	m ³	K	=	J
Kg K	m ³		s		s

INCÊNDIO EM NUVEM DE VAPOR

2. Modelo de Eisenberd, Lynch e Breeding:

Assim, juntando as duas equações:

$$q = -c_p \rho V_r \frac{dT_g}{dt}$$

$$q \approx A_r \sigma (T_g^4 - T_a^4)$$

$$\frac{dT_g}{dt} = -k(T_g^4 - T_a^4)$$

Onde,

$$k = \frac{A_r \sigma}{c_p \rho V_r}$$

INCÊNDIO EM NUVEM DE VAPOR

2. Modelo de Eisenberd, Lynch e Breeding:

Resolvendo a equação diferencial:

Temperatura do gás (K)
no instante t (s)

$$t = \frac{1}{2kT_a^3} \left\{ \left[\tan^{-1} \left(\frac{T_g}{T_a} \right) - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{T_g - T_a}{T_g + T_a} \right) \right] - \left[\tan^{-1} \left(\frac{T_{gi}}{T_a} \right) - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{T_{gi} - T_a}{T_{gi} + T_a} \right) \right] \right\}$$

$$k = \frac{A_r \sigma}{c_p \rho V_r}$$

Equação que informa o tempo que a nuvem leva de T_{gi} (temperatura inicial) até T_g (temperatura no instante t).

INCÊNDIO EM NUVEM DE VAPOR

2. Modelo de Eisenberd, Lynch e Breeding:

Resolvendo a equação diferencial:

$$t = \frac{1}{2kT_a^3} \left\{ \left[\tan^{-1} \left(\frac{T_g}{T_a} \right) - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{T_g - T_a}{T_g + T_a} \right) \right] - \left[\tan^{-1} \left(\frac{T_{gi}}{T_a} \right) - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{T_{gi} - T_a}{T_{gi} + T_a} \right) \right] \right\}$$

$$k = \frac{A_r \sigma}{c_p \rho V_r}$$

Note: Quanto maior a área superficial, mais rápida é a queima da nuvem, pois a queima é um fenômeno de superfície.

INCÊNDIO EM NUVEM DE VAPOR

2. Modelo de Eisenberd, Lynch e Breeding:

A “meia-vida” do incêndio em nuvem é dado pelo tempo ($t^{1/2}$) para a temperatura cair pela metade:

$$T_g = \frac{T_{gi} + T_a}{2}$$

O tempo de meia-vida ($t^{1/2}$) é obtido a partir da equação do slide anterior.

INCÊNDIO EM NUVEM DE VAPOR

2. Modelo de Eisenberd, Lynch e Breeding:

Tempo total da nuvem ou tempo efetivo (s):

$$t_{\text{eff}} = 3t_{\frac{1}{2}}$$

INCÊNDIO EM NUVEM DE VAPOR

3. Modelo de Raj e Emmons:

Hipóteses

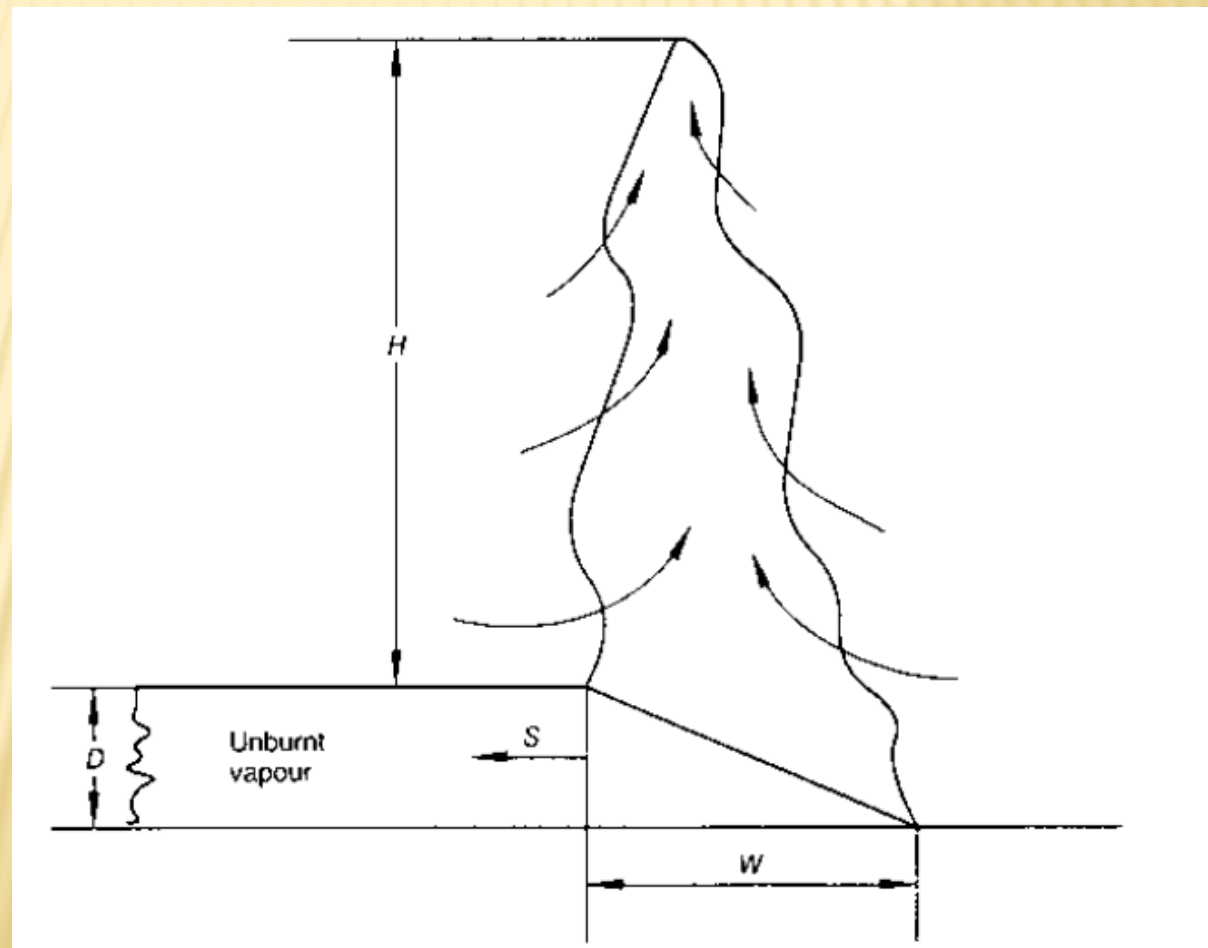
Assume que a chama se propaga a uma certa velocidade S ao longo da nuvem.

Assume que a velocidade da chama é função da velocidade do vento.

Assume que em altas concentrações de gás a chama formada na frente de queima cria uma pluma de altura H .

INCÊNDIO EM NUVEM DE VAPOR

3. Modelo de Raj e Emmons:



INCÊNDIO EM NUVEM DE VAPOR

3. Modelo de Raj e Emmons:

Veloc. do vento (m/s)

Densidade da mistura ar-combustível (kg/m³)

Relação mássica estequiométrica ar / combustível

$$H = 20D \left[\frac{S^2}{gD} \left(\frac{\rho_o}{\rho_a} \right)^2 \frac{wr^2}{(1-w)^3} \right]^{\frac{1}{3}}$$

Aceleração da gravidade (m/s²)

Densidade do ar (kg/m³)

Parâmetro (próximo slide)

$S = 2.3U_w$

INCÊNDIO EM NUVEM DE VAPOR

3. Modelo de Raj e Emmons:

massa de ar / massa de
combustível

ou

moles de ar / moles de
combustível

Relação mássica
estequiométrica ar / combustível

$$H = 20D \left[\frac{S^2}{gD} \left(\frac{\rho_o}{\rho_a} \right)^2 \frac{wr^2}{(1-w)^3} \right]^{\frac{1}{3}}$$

INCÊNDIO EM NUVEM DE VAPOR

3. Modelo de Raj e Emmons:

W

Para nuvens com elevada concentração de hidrocarbonetos os autores recomendam **empregar 1/9**.

Para nuvens com concentração de combustível estequiométrica ou inferior, **adotar 0**.

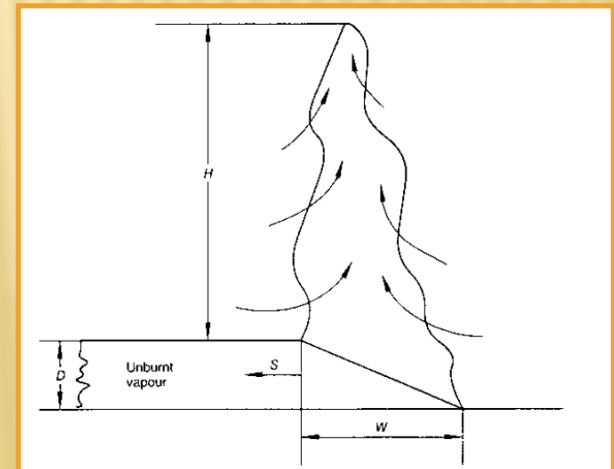
O que na verdade elimina o parâmetro H (só existe para nuvens concentradas).

INCÊNDIO EM NUVEM DE VAPOR

3. Modelo de Raj e Emmons:

Para calcular a radiação sobre o alvo usar o modelo de chama sólida. **Adotar o mesmo princípio usado, por exemplo, em incêndio em poça:** cálculo do fluxo de radiação térmico que atinge o alvo.

Aplicar a geometria da figura:



INCÊNDIO EM NUVEM DE VAPOR

4. Modelo CCPS:

É o Modelo de Raj e Emmons usando outro cálculo de w .

