

BOLA DE FOGO (FIREBALL)

Origem:

Rompimento de um vaso

Formação de nuvem de vapor

Erupção de líquido em chamas

Explosão de explosivos

BOLA DE FOGO (FIREBALL)

Origem:

Caso de interesse,
predomina o momento
gerado pela ruptura.

BLEVE

Rompimento de um vaso

Formação de nuvem de vapor

Erupção de líquido em chamas

Explosão de explosivos

BOLA DE FOGO (FIREBALL)

Origem:

Rompimento de um vaso

Formação de nuvem de vapor

Erupção de líquido em chamas

Explosão de explosivos

Predominam fatores relacionados a flutuabilidade.

BOLA DE FOGO (FIREBALL)

Origem:

Rompimento de um vaso

Formação de nuvem de vapor

Erupção de líquido em chamas

Ocorre durante incêndios em tanques.

Explosão de explosivos

Fritando batata

Caso Petrogold

The other is an eruption in hot oil giving rise to a release of burning vapour. This is exemplified by the event that occurs when water is added to burning fat in a chip pan. Eruptions of burning vapour have occurred in some storage tank fires.

BOLA DE FOGO (FIREBALL)

Origem:

Rompimento de um vaso

Formação de nuvem de vapor

Erupção de líquido em chamas

Explosão de explosivos

BOLA DE FOGO

Fases de uma fireball envolvendo rompimento de um vaso com gás liquefeito:

Modelo de Crawley

Crescimento (1ª e 2ª fases)

Queima estacionária

Burnout



Primeira fase de crescimento (1 seg):

- temperatura de 1300°C ou mais
- chama brilhante amarelo/branca
- crescimento até metade do diâmetro final
- gotas menores que 5mm são vaporizadas
- boa mistura ar/combustível

Modelo de Crawley

Crescimento (1^a e 2^a)

Queima estacionária

Burnout

Primeira fase de crescimento (1 seg):

- temperatura de 1300°C ou mais
- chama brilhante amarelo/branca
- crescimento rápido
- gotas
- boa mistura

Segunda fase de crescimento (1 seg):

- a bola atinge seu tamanho final
- 10% fica escurecida, o restante amarelo claro ou vermelha clara.
- chamas com temperaturas entre 900 e 1300°C
- temperatura média entre 1100° e 1200°C

Modelo de Crawley

Crescimento (1^a e 2^a)

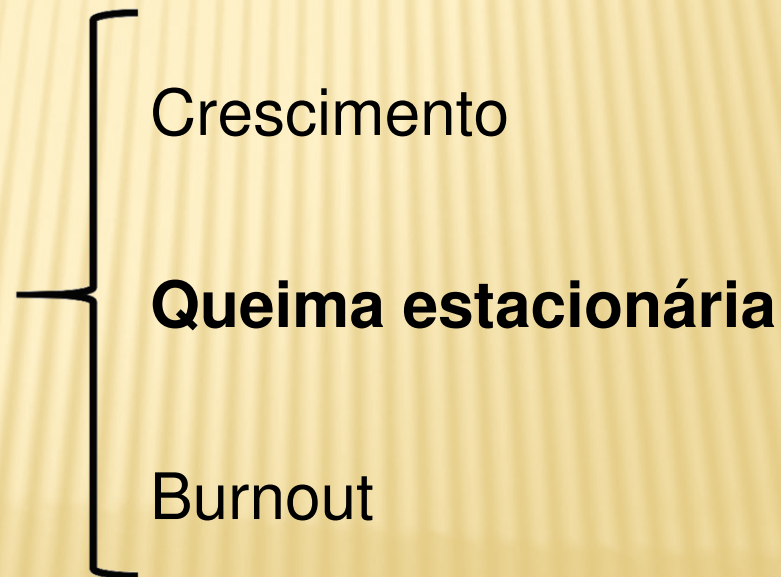
Queima estacionária

Burnout

Queima estacionária (10 seg):

- não cresce mais
- o começo dessa fase é **marcado pela sua ascensão**
- bola grosseiramente esférica
- forma o clássico “cogumelo”
- temperatura efetiva de chama na faixa de 1100 a 1200 °C

Modelo de Crawley

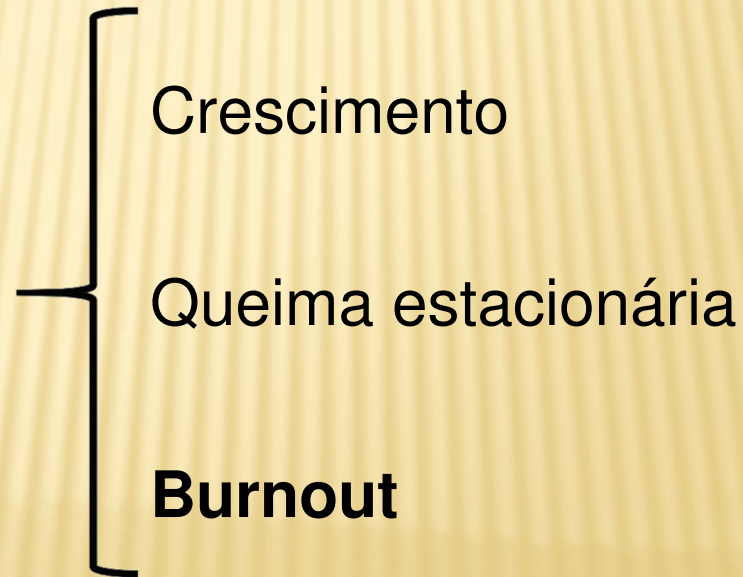


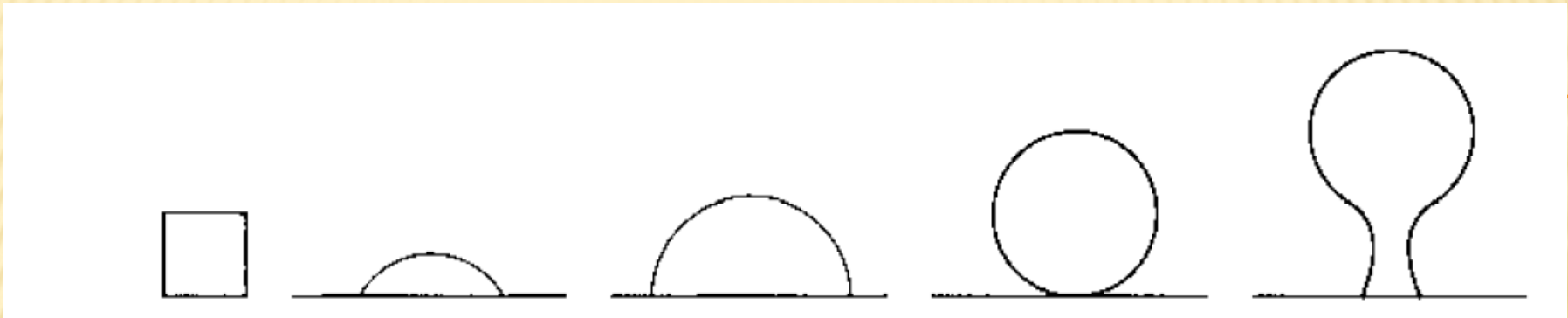
BOLA DE FOGO

Queima se completando (5 seg)

- mantém seu tamanho
- torna-se menos recoberta por fuligem e mais translúcida

Modelo de Crawley





tempo

Modelo de Crawley

- Crescimento
- Queima estacionária
- Burnout

BOLA DE FOGO

Fases de uma fireball envolvendo rompimento de um vaso com gás liquefeito:

Modelo de A.F. Roberts

Estágio 1

Estágio 2

Estágio 3

BOLA DE FOGO

Rápida mistura ar/combustível e rápida combustão. Dominado pelo momento inicial da liberação.

A.F. Roberts

Estágio 1

Estágio 2

Estágio 3

BOLA DE FOGO

O combustível residual restante entra em contato com o ar já presente na bola, ou com o ar entrando, e sofre queima. Esse estágio é mais afetado pela flutuabilidade (embora ainda no solo) e pelos efeitos da combustão.

A.F. Roberts

Estágio 1

Estágio 2

Estágio 3

BOLA DE FOGO

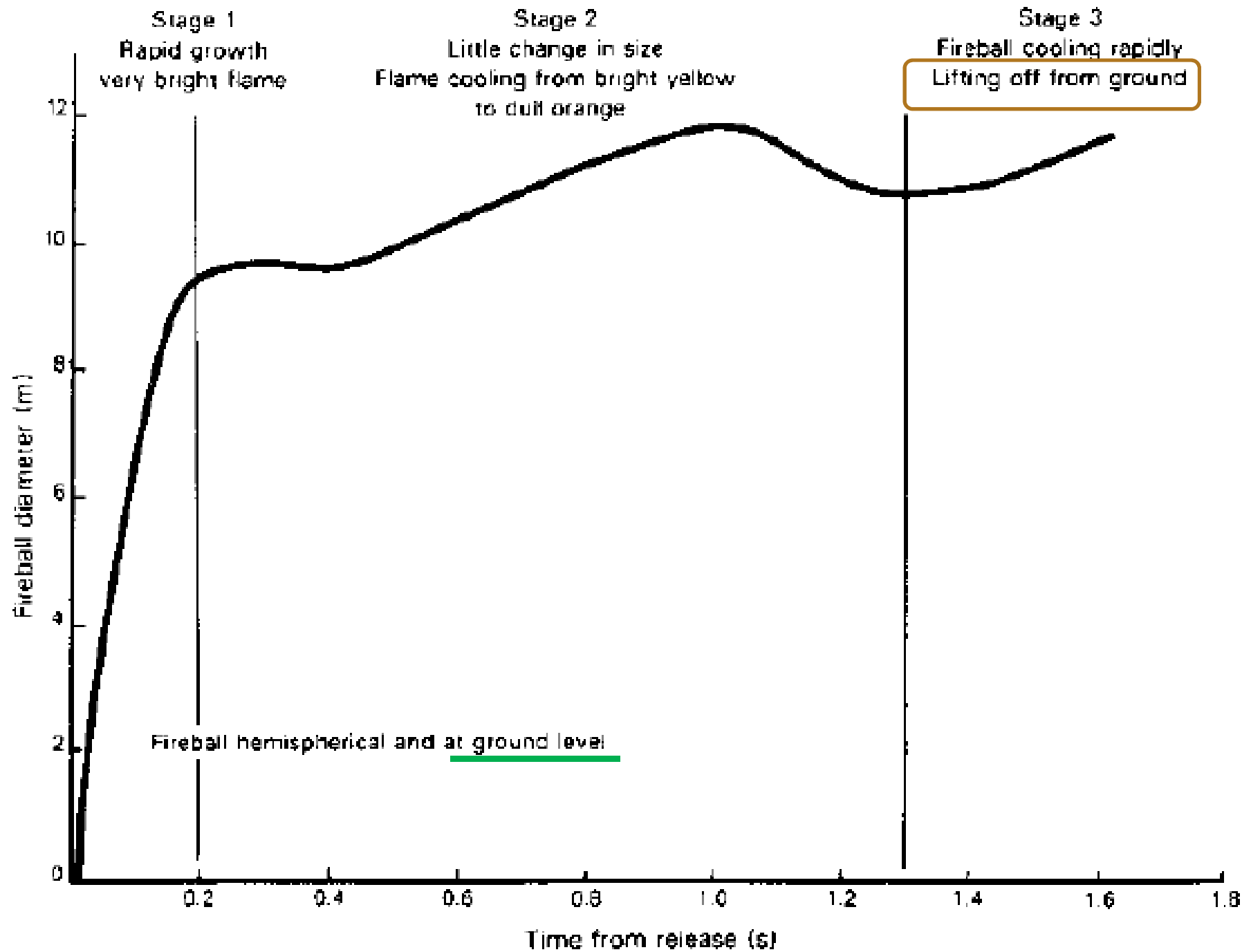
Com a combustão quase completa, a fireball **sobe** devido aos efeitos térmicos, entrando em contato com mais ar e também se resfriando. Segundo o autor, nessa etapa final a bola pode crescer ou diminuir.

A.F. Roberts

Estágio 1

Estágio 2

Estágio 3

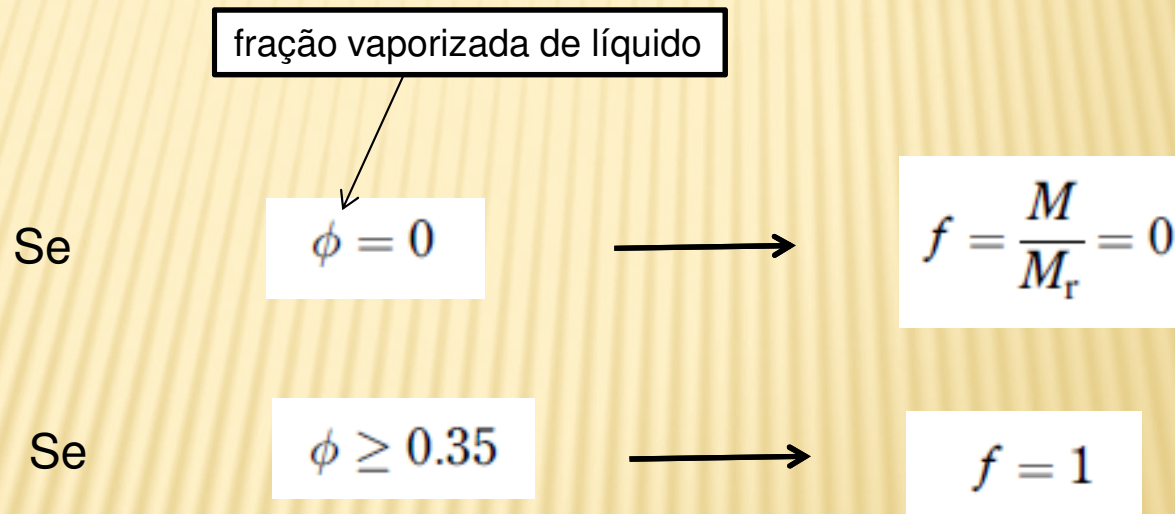


BOLA DE FOGO

1. Massa de Combustível envolvida:

A.F. Roberts:

Hipótese:



Onde:

f: fração envolvida na queima via fireball

M: massa de combustível na fireball

Mr: massa liberada

BOLA DE FOGO

1. Massa de Combustível envolvida:

A.F. Roberts:

Hipótese:

fração vaporizada de líquido

Se

$$\phi = 0$$



$$f = \frac{M}{M_r} = 0$$

Se

$$\phi \geq 0.35$$



$$f = 1$$

Generalizando:

$$f = \frac{\phi}{0.35} \quad 0 < \phi < 0.35$$

BOLA DE FOGO

1. Massa de Combustível envolvida:

Hasegawa e Sato:

Quando a fração teórica é 35% ou maior, suponha que todo o líquido liberado irá queimar na forma de bola de fogo.

BOLA DE FOGO

1. Massa de Combustível envolvida:

CCPS:

A fração de combustível liberado que efetivamente participa da bola de fogo é três vezes a fração que sofre flash.

Abordagem Conservativa:

Todo o combustível liberado participa da fireball.

BOLA DE FOGO

2. Diâmetro de bola de fogo:

As correlações apresentadas aqui são baseadas na forma geral:

$$D = k_1 M^{n_1}$$

Onde:

D: diâmetro

K1: constante

n1: índice

M (ou W): massa

BOLA DE FOGO

2. Diâmetro de bola de fogo:

R.W. High:

$$D = 9.82 W^{0.320}$$

Onde:

D: diâmetro (ft)

W: massa de **propelente** (lb)

Propelente: combustível + oxigênio.

Roberts:

$$D = 2.95 W^{0.320}$$



Observe as unidades!

Onde:

D: diâmetro (m)

W: massa de propelente (kg)

BOLA DE FOGO

2. Diâmetro de bola de fogo:

Hasegawa e Sato:

$$D = 5.25 M^{0.314}$$

n-pentano

Onde:

D: diâmetro (m)

M: massa de combustível (kg)

A.F. Roberts (para hidrocarbonetos):

$$D = 5.8 M^{\frac{1}{3}}$$

hidrocarbonetos

Onde:

D: diâmetro (m)

M: massa de combustível (kg)

É uma das mais usadas.

BOLA DE FOGO

2. Diâmetro de bola de fogo:

Pietersen (para GLP):

$$D = 6.48 M^{0.333}$$

GLP

Onde:

D: diâmetro (m)

M: massa de combustível (kg)

BOLA DE FOGO

2. Diâmetro de bola de fogo:

Resumo das correlações mais utilizadas:

Table 16.62 Some correlations of fireball diameter and duration time for hydrocarbons^a

Diameter D (m)	Duration time, t_d (s)	Material	Reference
$5.55 M^{0.333}$	–	Propane	Hardee and Lee (1973)
$6.36 M^{0.325}$	$2.57 M^{0.167}$	Hydrocarbons	Fay and Lewis (1977); Hardee, Lee and Benedick (1978)
$5.25 M^{0.314}$	$1.07 M^{0.181}$	<i>n</i> -Pentane	Hasegawa and Sato ^b (1978)
$5.8 M^{0.333}$	$0.45 M^{0.333}$	Hydrocarbons	A.F. Roberts (1981/82, 1982)
$5.88 M^{0.333}$	$1.09 M^{0.167}$	Propane	Williamson and Mann (1981)
$5.72 M^{0.333}$	$0.45 M^{0.333}$	Butane	Lihou and Maund (1982)
$5.33 M^{0.327}$	$0.923 M^{0.303}$	Hydrocarbons	Moorhouse and Pritchard (1982)
$6.48 M^{0.325}$	$0.852 M^{0.26}$	LPG	Pietersen (1985)
$5.5 M^{0.333}$	$0.38 M^{0.333}$	Hydrocarbons	V.C. Marshall (1987)

^a Sources: Lihou and Maund (1982); Bagster and Pitblado (1989); Satyanarayana, Borah and Rao (1991); and original papers.

^b These authors' earlier correlation (1977) was $D = 5.28 M^{0.277}$.

(apresentadas aqui)

BOLA DE FOGO

3. Tempo de duração:

Correlações baseadas na forma geral:

$$t_d = k_2 M^{n_2}$$

Onde:

td: tempo de duração

k2: constante

M (ou W): massa

n2: índice

BOLA DE FOGO

3. Tempo de duração:

R.W. High:

$$t_d = 0.232 W^{0.320}$$

Onde:

t_d : tempo de duração (s)

W : massa de propelente (lb)

Roberts:

$$t_d = 0.49 M^{0.320}$$

Onde:

t_d : tempo de duração (s)

M : massa de combustível (kg)



Observe as unidades!

BOLA DE FOGO

3. Tempo de duração:

Hasegawa e Sato:

Geral:

$$t_d = 1.07 M^{0.181}$$

n-pentano

Onde:

t_d : tempo de duração (s)

M: massa de combustível (kg)

M < 6.1 kg:

Usar índice 0.097 e não 0.181.

BOLA DE FOGO

3. Tempo de duração:

A.F. Roberts (pouca massa, domínio do momento inicial causado pelo BLEVE):

$$t_d = 0.45 M^{\frac{1}{3}}$$

hidrocarbonetos

Onde:

td: tempo de duração (s)

M: massa de combustível (kg)

BOLA DE FOGO

3. Tempo de duração:

MHAP (Major Hazards Assessment Panel):

Pouca massa, domínio do momento inicial

$$t_d = 0.45 M^{\frac{1}{3}} \quad M < 30\,000$$

$$t_d = 2.6 M^{\frac{1}{6}} \quad M > 30\,000$$

Grande quantidade de massa, domínio da flutuabilidade.

Onde:

t_d : tempo de duração (s)

M : massa de combustível (kg)

BOLA DE FOGO

3. Tempo de duração:

Pietersen (para GLP):

$$t_d = 0.852 M^{0.26}$$

GLP

BOLA DE FOGO

3. Tempo de duração:

Resumo das correlações mais utilizadas:

Table 16.62 Some correlations of fireball diameter and duration time for hydrocarbons^a

Diameter D (m)	Duration time, t_d (s)	Material	Reference
5.55 $M^{0.333}$	–	Propane	Hardee and Lee (1973)
6.36 $M^{0.325}$	2.57 $M^{0.167}$	Hydrocarbons	Fay and Lewis (1977); Hardee, Lee and Benedick (1978)
5.25 $M^{0.314}$	1.07 $M^{0.181}$	<i>n</i> -Pentane	Hasegawa and Sato ^b (1978)
5.8 $M^{0.333}$	0.45 $M^{0.333}$	Hydrocarbons	A.F. Roberts (1981/82, 1982)
5.88 $M^{0.333}$	1.09 $M^{0.167}$	Propane	Williamson and Mann (1981)
5.72 $M^{0.333}$	0.45 $M^{0.333}$	Butane	Lihou and Maund (1982)
5.33 $M^{0.327}$	0.923 $M^{0.303}$	Hydrocarbons	Moorhouse and Pritchard (1982)
6.48 $M^{0.325}$	0.852 $M^{0.26}$	LPG	Pietersen (1985)
5.5 $M^{0.333}$	0.38 $M^{0.333}$	Hydrocarbons	V.C. Marshall (1987)

^a Sources: Lihou and Maund (1982); Bagster and Pitblado (1989); Satyanarayana, Borah and Rao (1991); and original papers.

^b These authors' earlier correlation (1977) was $D = 5.28 M^{0.277}$.

(apresentadas aqui)

BOLA DE FOGO

4. Calor emitido:

Métodos possíveis:

4.1 Calor gerado e radiado pela massa envolvida

4.2 Surface Emissive Power

4.3 Temperatura de Chama

BOLA DE FOGO

4. Calor emitido:

Métodos possíveis:

4.1 **Calor gerado e radiado pela massa envolvida**

4.2 Surface Emissive Power

4.3 Temperatura de Chama

BOLA DE FOGO

4.1 Calor gerado e radiado pela massa envolvida

Método via Q teórico (Q) ou Calor de Combustão (Hc)

$$Q_r = X_{rad} Q = X_{rad} M H_c$$

Onde:

X_{rad}: fração emitida como radiação (tabela A2)

Q: **theoretical** heat release rate (kW) (tabela A3 ou equação $Q = M H_c$)

M: mass burn rate (g/s) (tabela A4 ou A5)

H_c: theoretical heat of combustion (kJ / g) (tabela A2 ou A4 ou A5)

BOLA DE FOGO

4.1 Calor gerado e radiado pela massa envolvida

Hasegawa e Sato:

$$\text{Fração radiada} = 0.25$$

BOLA DE FOGO

4.1 Calor gerado e radiado pela massa envolvida

Roberts:

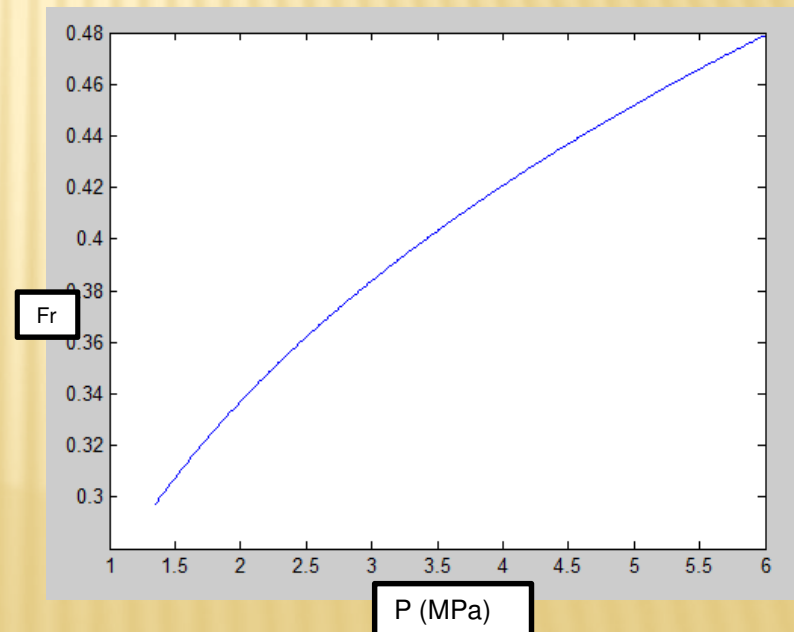
$$F_r = 0.27 P^{0.32} \quad 1.35 \leq P$$

Onde:

P: pressão de vapor no momento da liberação (MPa)

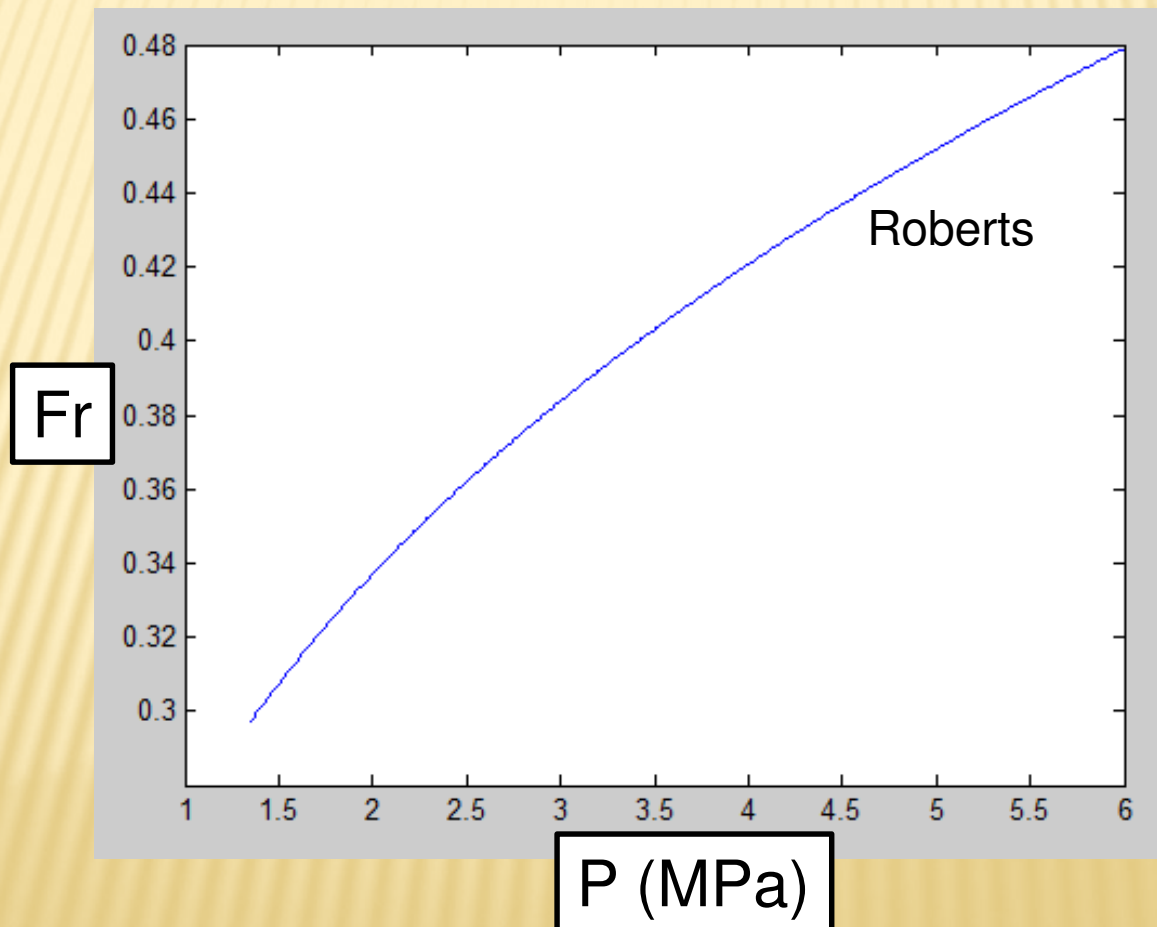
Fr: fração radiada

O valor máximo assumido por P seria de 6MPa.



BOLA DE FOGO

4.1 Calor gerado e radiado pela massa envolvida



BOLA DE FOGO

4.1 Calor gerado e radiado pela massa envolvida

Regra Geral (Lees):

$$\text{Fração radiada} = 0,3$$

BOLA DE FOGO

Métodos possíveis:

4.1 Calor gerado e radiado pela massa envolvida

4.2 Surface Emissive Power

4.3 Temperatura de Chama

BOLA DE FOGO

4.2 Surface Emissive Power:

Emissive Power: kW / m²

Calor radiado por unidade
de área superficial de chama

BOLA DE FOGO

4.2 Surface Emissive Power:

Hasegawa e Sato:

Faixa de 141 a 196 kW/m²

Máximo: 450 kW/m²

Moorhouse e Pritchard:

Faixa de 150 a 300 kW/m²

BOLA DE FOGO

4.2 Surface Emissive Power:

D.M. Johnson e Pritchard (BLEVEs de grande porte):

Faixa de 250 a 350 kW/m²

Considine, Grint e Holden:

Valor geral: 350 kW/m²

BOLA DE FOGO

4.2 Surface Emissive Power:

MHAP:

$$E = 235 P^{0.39} \quad P \leq 2$$

Onde:

E: emissive power (kW/m²)

P: pressão (MPa)

Valor máximo recomendado pelo MHAP:

$$E = 308 \text{ kW/m}^2$$

BOLA DE FOGO

4.2 Surface Emissive Power:

MHAP:

$$E = 235 P^{0.39} \quad P \leq 2$$

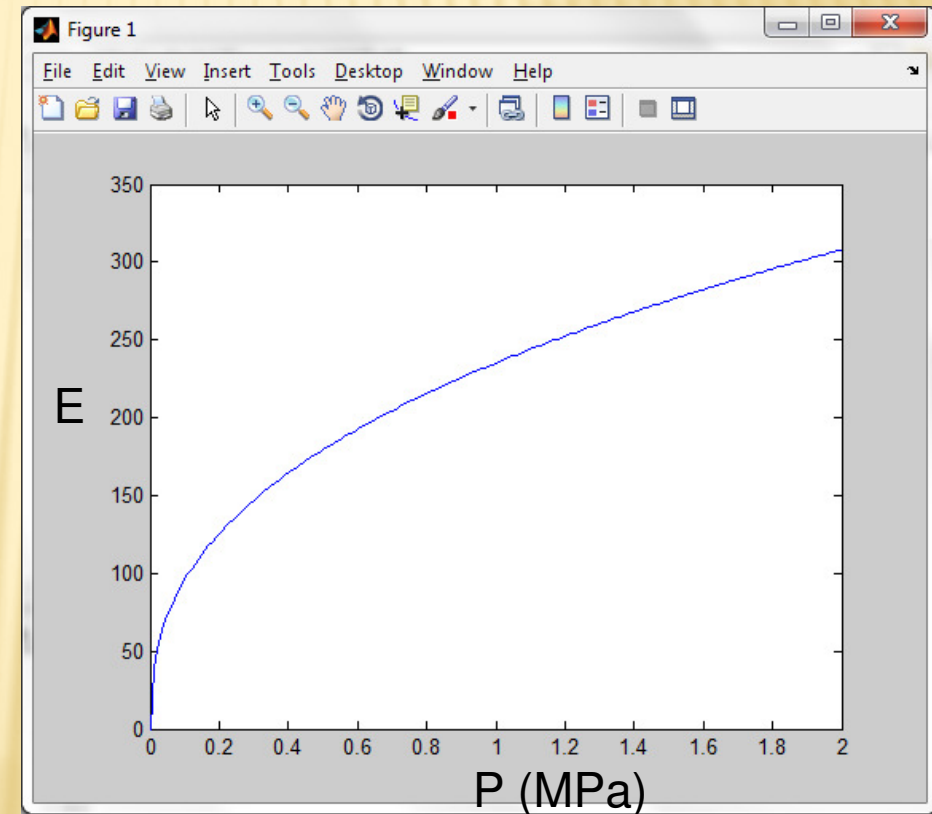
Onde:

E: emissive power (kW/m²)

P: pressão (MPa)

Valor máximo recomendado pelo MHAP:

$$E = 308 \text{ kW/m}^2$$



BOLA DE FOGO

4.2 Surface Emissive Power:

Valor comumente usado (Lees):

350 kW/m²

Note:

Para piscina o Emissive Power recomendado pela NIST é na faixa de 50 a 100 kW/m², muito inferior ao de bola de fogo.

BOLA DE FOGO

Surface Emissive Power



Calor gerado e radiado
pela massa envolvida

Embora apresentadas separadamente, ambas as técnicas devem convergir.

Ou seja, dada a massa estimo o calor radiado (via H_c e fração radiada)

A massa define também o diâmetro da bola de fogo – logo sua área superficial.

O valor de Emissive Power (calor radiado por unidade de área superficial) deve ser coerente.

BOLA DE FOGO

Métodos possíveis:

4.1 Calor gerado e radiado pela massa envolvida

4.2 Surface Emissive Power

4.3 Temperatura de Chama

BOLA DE FOGO

4.3 Temperatura de Chama:

A partir dos valores de E informados por Hasegawa e Sato, Lees estima temperaturas na faixa de 1000 a 1400 °C

Crawley: 1100 a 1200 °C

A partir da temperatura de chama é possível aplicar o princípio desenvolvido por Stefan Boltzman.

BOLA DE FOGO

5. Cenários acidentais:

Cada instante (fase) configura um cenário acidental distinto

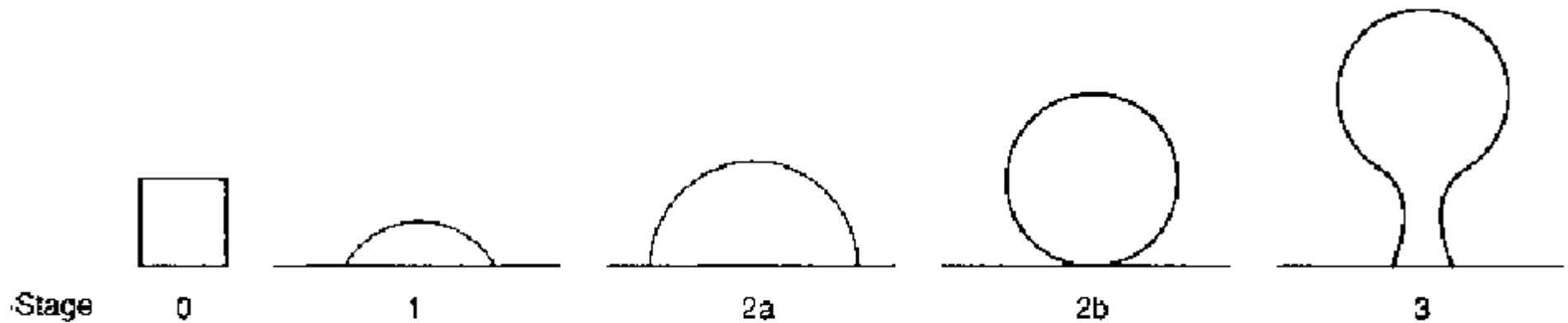


Figure 16.84 *Development of a typical fireball from a source at ground level*

BOLA DE FOGO

5. Cenários acidentais:

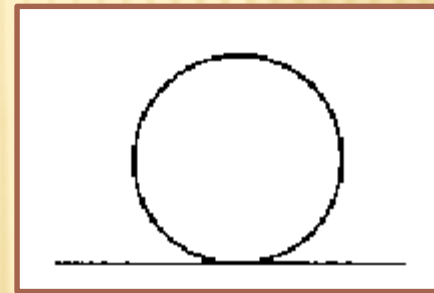
5.1 Cenário para engolfamento:

Avaliar se um alvo muito perto será engolfado pela bola de fogo. Neste caso existem duas possibilidades.

BOLA DE FOGO

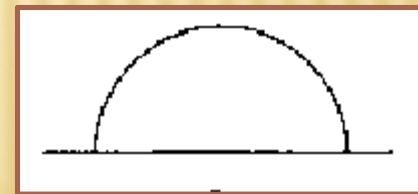
5.1 Cenário para engolfamento:

1. Considerar que a bola de fogo é esférica e apenas tangencia o solo. Assumir a distância de engolfamento como sendo o diâmetro obtido anteriormente.



2. Considerar que a bola de fogo ainda encontra-se em formação junto ao solo. Nesse caso, adotar $D = 1,25 \cdot D$

Nesse caso o engolfamento é muito rápido.



BOLA DE FOGO

6. Quanto de calor atinge o alvo?

Modelo de Chama Sólida

Equação Geral

$$I = \alpha \tau F E$$

Calor emitido por toda a superfície da esfera (calor total radiado dividido pela área superficial da esfera)

$$E = \frac{Q_r}{4\pi r^2}$$

$$I = \frac{\alpha \tau F Q_r}{4\pi r^2}$$

BOLA DE FOGO

6. Quanto de calor atinge o alvo?

Modelo de Chama Sólida

Equação Geral

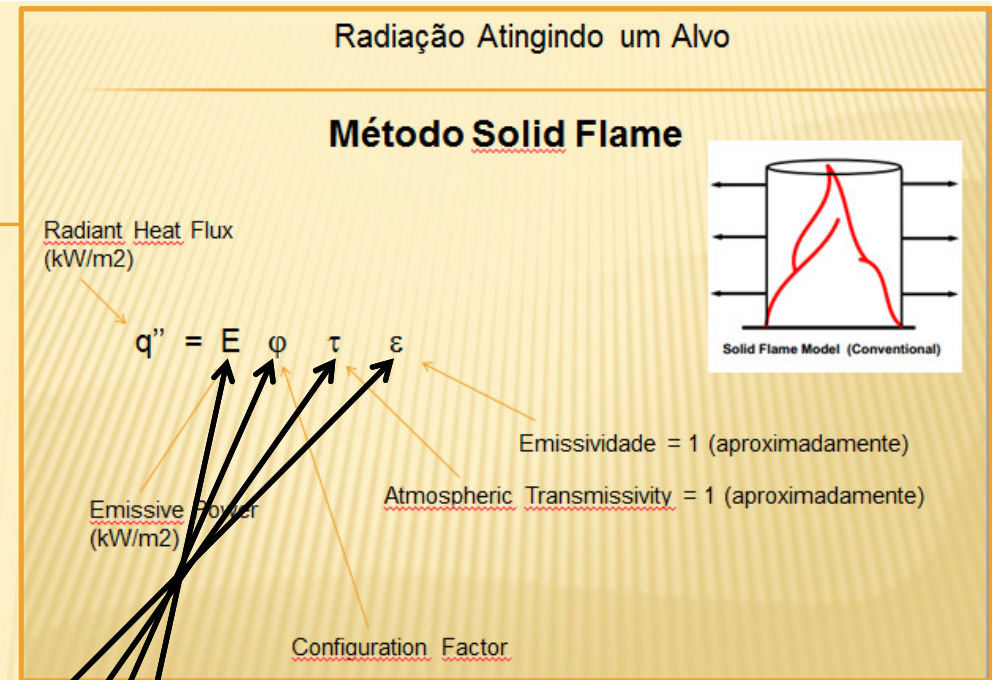
Calor radiado que atinge o alvo

$$I = \alpha \tau F E$$

Calor emitido por toda a superfície da esfera (calor total radiado dividido pela área superficial da esfera)

$$E = \frac{Q_r}{4\pi r^2}$$

$$I = \frac{\alpha \tau F Q_r}{4\pi r^2}$$

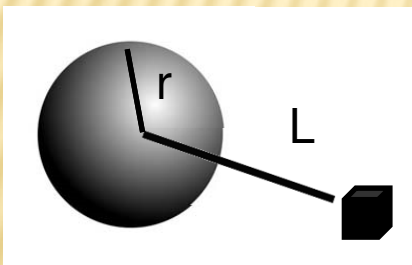


BOLA DE FOGO

6. Quanto de calor atinge o alvo?

Modelo de Chama Sólida

$$I = \frac{\alpha \tau F Q_r}{4\pi r^2}$$



$$F = \frac{r^2}{l^2}$$

Assim...

$$I = \frac{\alpha \tau Q_r}{4\pi l^2}$$

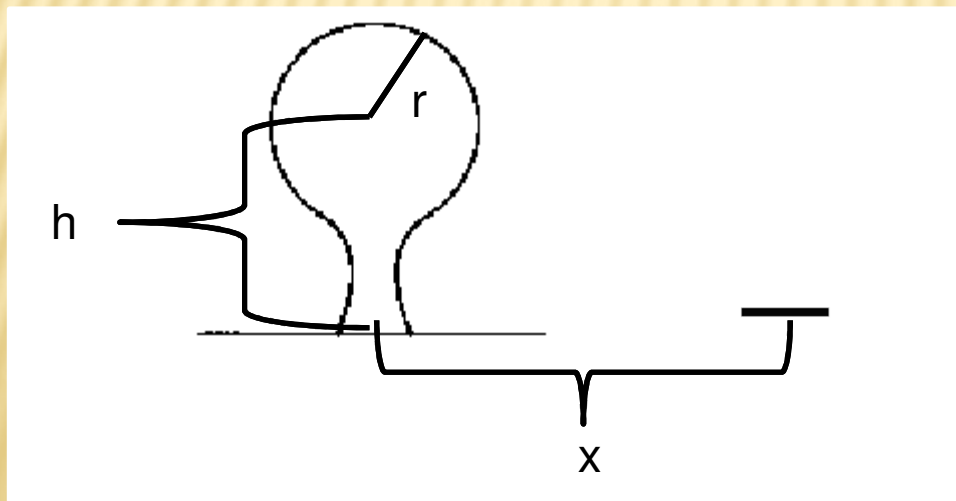
Fator de Forma:
-alvo situado a distância L
do CENTRO da bola.
-bola de fogo de raio r

BOLA DE FOGO

Note:

Outras opções de fatores de forma para cenários de bola de fogo:

$$F = \frac{r^2 h}{(x^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}}$$



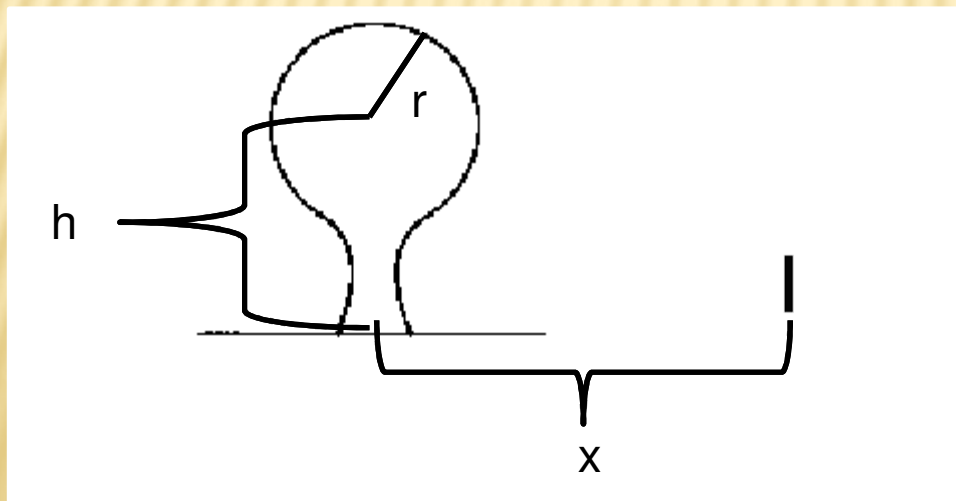
Alvo horizontal, no solo.

BOLA DE FOGO

Note:

Outras opções de fatores de forma para cenários de bola de fogo:

$$F = \frac{r^2 x}{(x^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}} \quad x > r$$



Alvo vertical, no solo.

BOLA DE FOGO

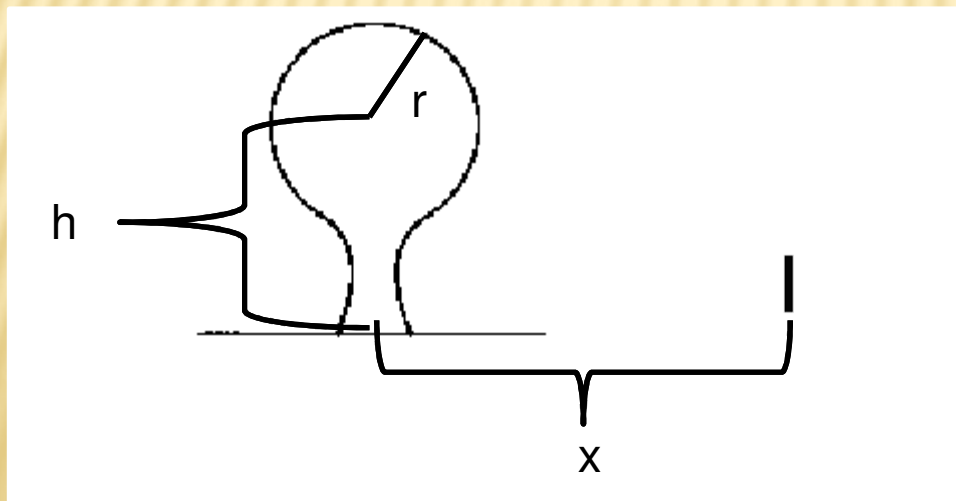
Essa equação pode ser simplificada para achar a equação inicial (mais simples)

$$h = 0, L = x$$

$$F = \frac{r^2 x}{(x^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}} \quad x > r$$



$$F = \frac{r^2}{l^2}$$

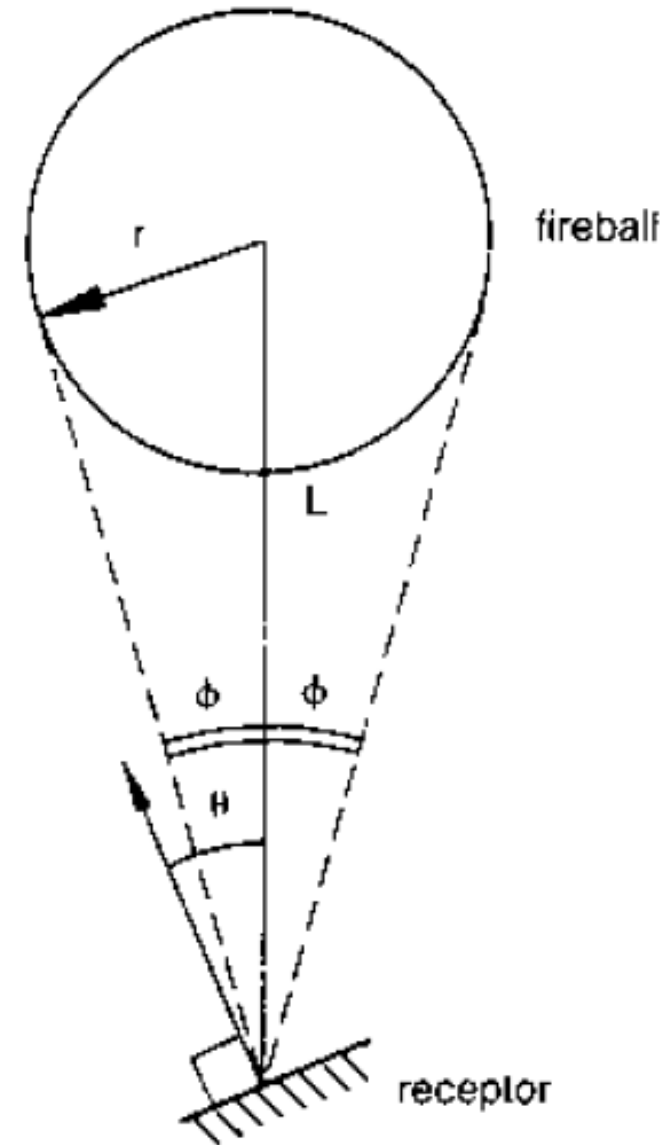


BOLA DE FOGO

Note:

Outras opções de fatores de forma para cenários de bola de fogo:

$$F = \frac{r^2}{l^2} \cos \theta \quad \theta \leq \frac{\pi}{2} - \phi$$

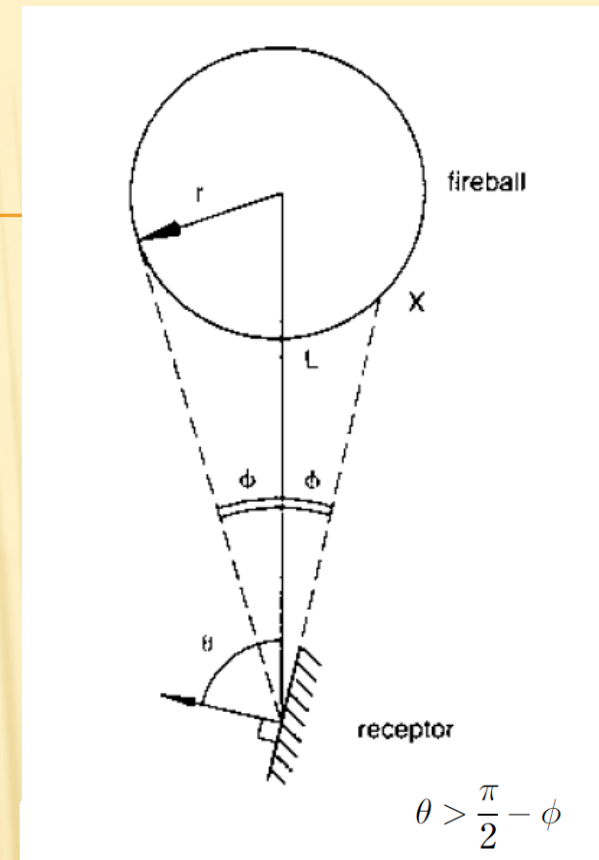


$$\theta < \pi/2 - \phi$$

BOLA DE FOGO

Note:

Outras opções de fatores de forma para cenários de bola de fogo:



$$F = \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \sin^{-1} \left[\frac{(l^2 - r^2)^{\frac{1}{2}}}{l \sin \theta} \right] + \frac{r^2}{\pi l^2} \cos \theta$$

$$\cos^{-1} \left[-\frac{(l^2 - r^2)^{\frac{1}{2}}}{r} \cos \theta \right] - \frac{1}{\pi l^2} (l^2 - r^2)^{\frac{1}{2}} (r^2 - l^2 \cos^2 \theta)^{\frac{1}{2}}$$

$$\theta > \frac{\pi}{2} - \phi$$

BOLA DE FOGO

Quanto de calor atinge o alvo?

Modelo de Fonte Pontual

Hymes:

Calor de combustão (kJ/kg)

$$I = \frac{2.2\alpha\tau F_r \Delta H_c M^{0.67}}{4\pi l^2}$$

Onde F_r é a fração radiada

BOLA DE FOGO

Quanto de calor atinge o alvo?

Modelo de Fonte

Radiação Atingindo um Alvo

Método Point Source

$$q'' = (X_{rad} Q) / (4 \pi r^2)$$

Ou,

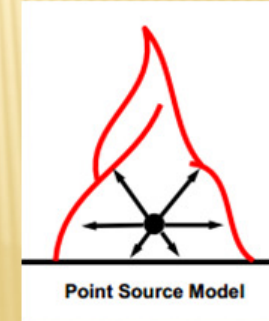
$$q'' = Q_{rad} / (4 \pi r^2)$$

Onde:

r : distância do centro da chama até o alvo



Atenção: distância em relação ao centro da chama, não em relação a borda.



Hymes:

Calor de combustão (kJ/kg)

$$I = \frac{2.2 \alpha \tau F_r \Delta H_c M^{0.67}}{4 \pi l^2}$$

Onde F_r é a fração radiada