

# 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

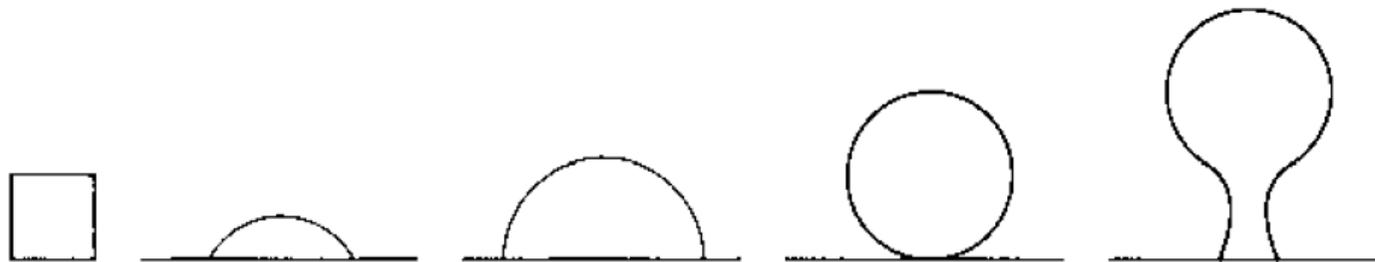
Fases de uma fireball envolvendo rompimento de um vaso com gás liquefeito:

Modelo de Crawley

Crescimento (1<sup>a</sup> e 2<sup>a</sup> 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<sup>a</sup> e 2<sup>a</sup>)**

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 (1ª e 2ª)

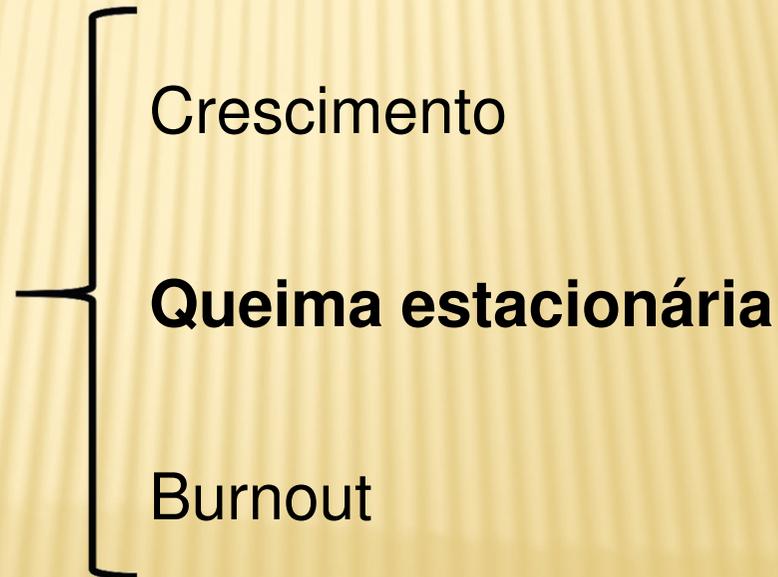
Queima estacionária

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

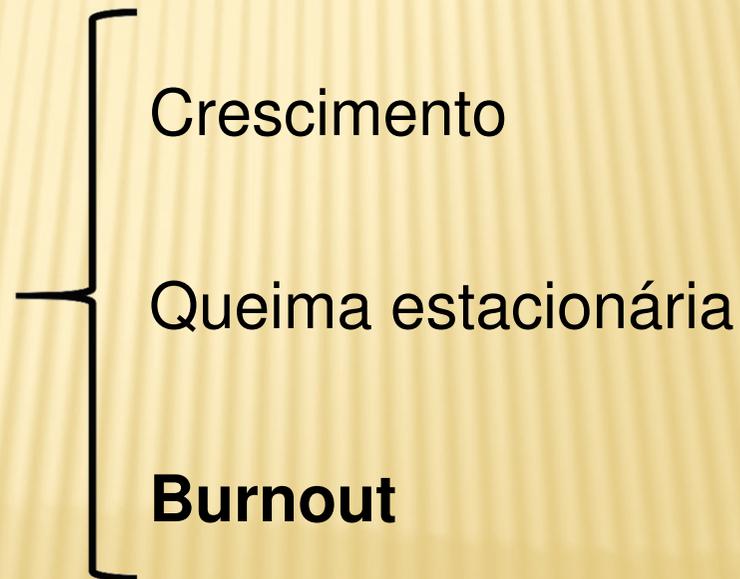


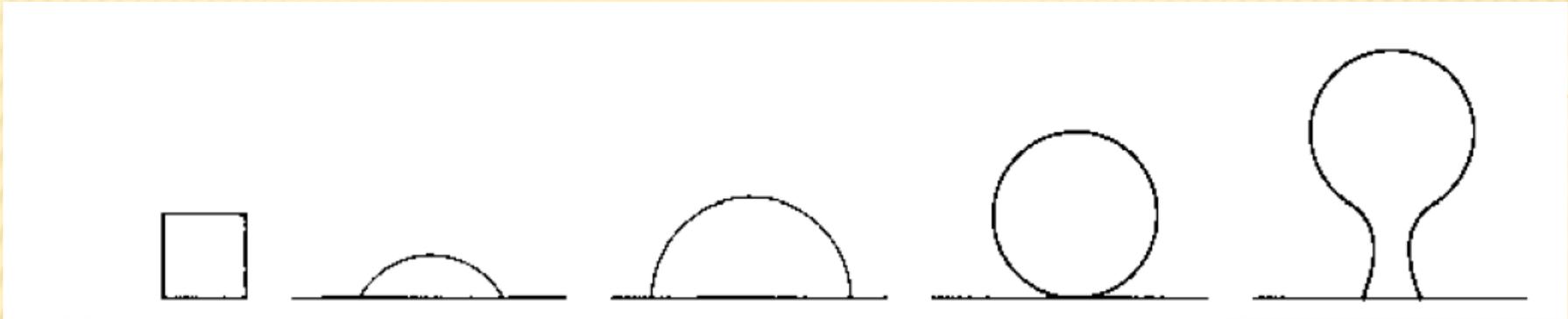
# BOLA DE FOGO

## Queima se completando (5 seg)

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

Modelo de Crawley





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

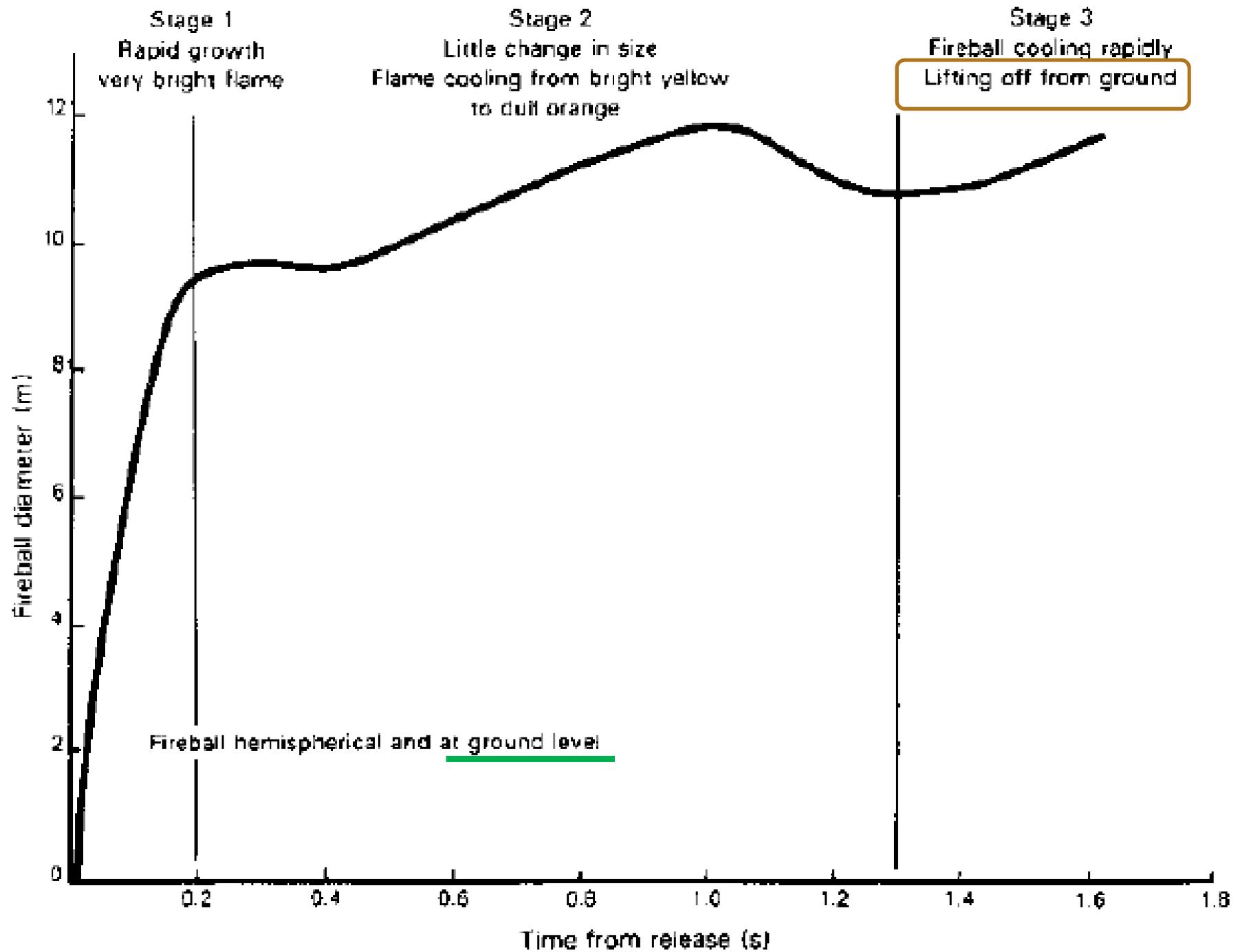
Com a combustão quase completa, a fireball **sobe** devido aos efeitos térmicos, entrando em contato com mais ar e também se resfriando. Segundo o autor, nessa etapa final a bola pode crescer ou diminuir.

A.F. Roberts

Estágio 1

Estágio 2

**Estágio 3**

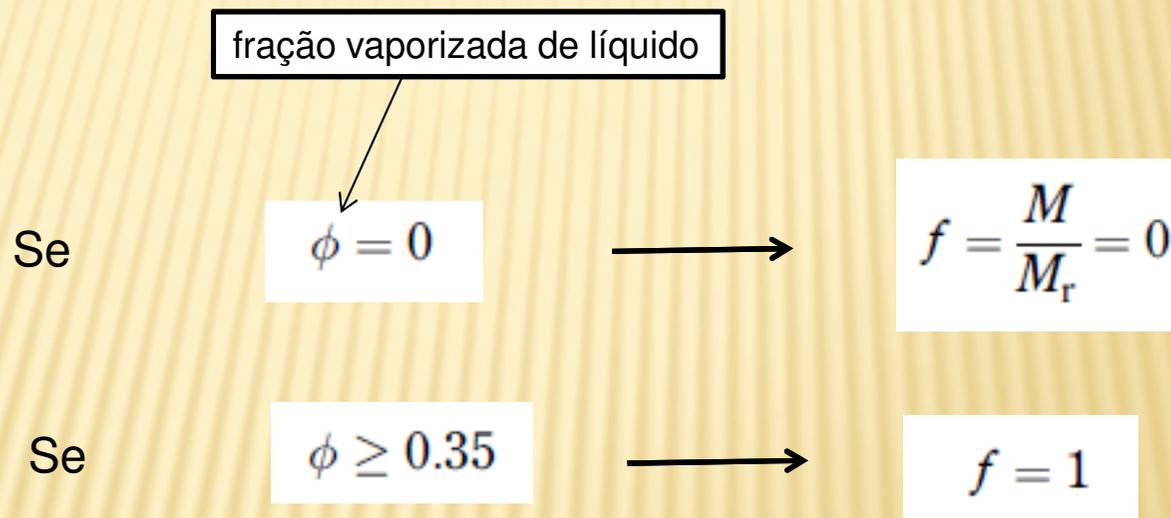


# BOLA DE FOGO

## 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<sup>a</sup>

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 <sup>b</sup> (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)

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

<sup>b</sup> 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:

td: tempo de duração (s)

W: massa de propelente (lb)

Roberts:

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

Onde:

td: 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<sup>a</sup>

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 <sup>b</sup> (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)

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

<sup>b</sup> 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<sub>rad</sub>: 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<sub>c</sub>: 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:

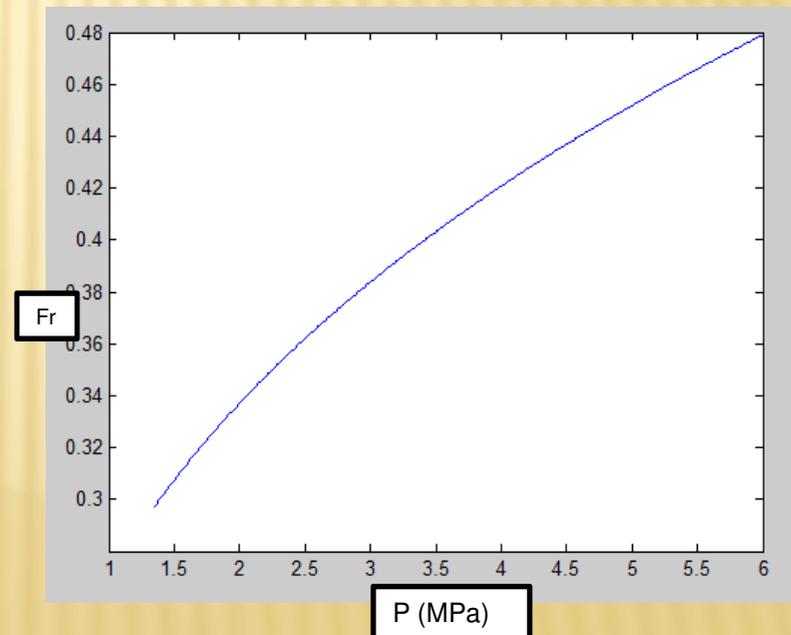
$$F_r = 0.27 P^{0.32} \quad 1.35 \leq P$$

Onde:

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

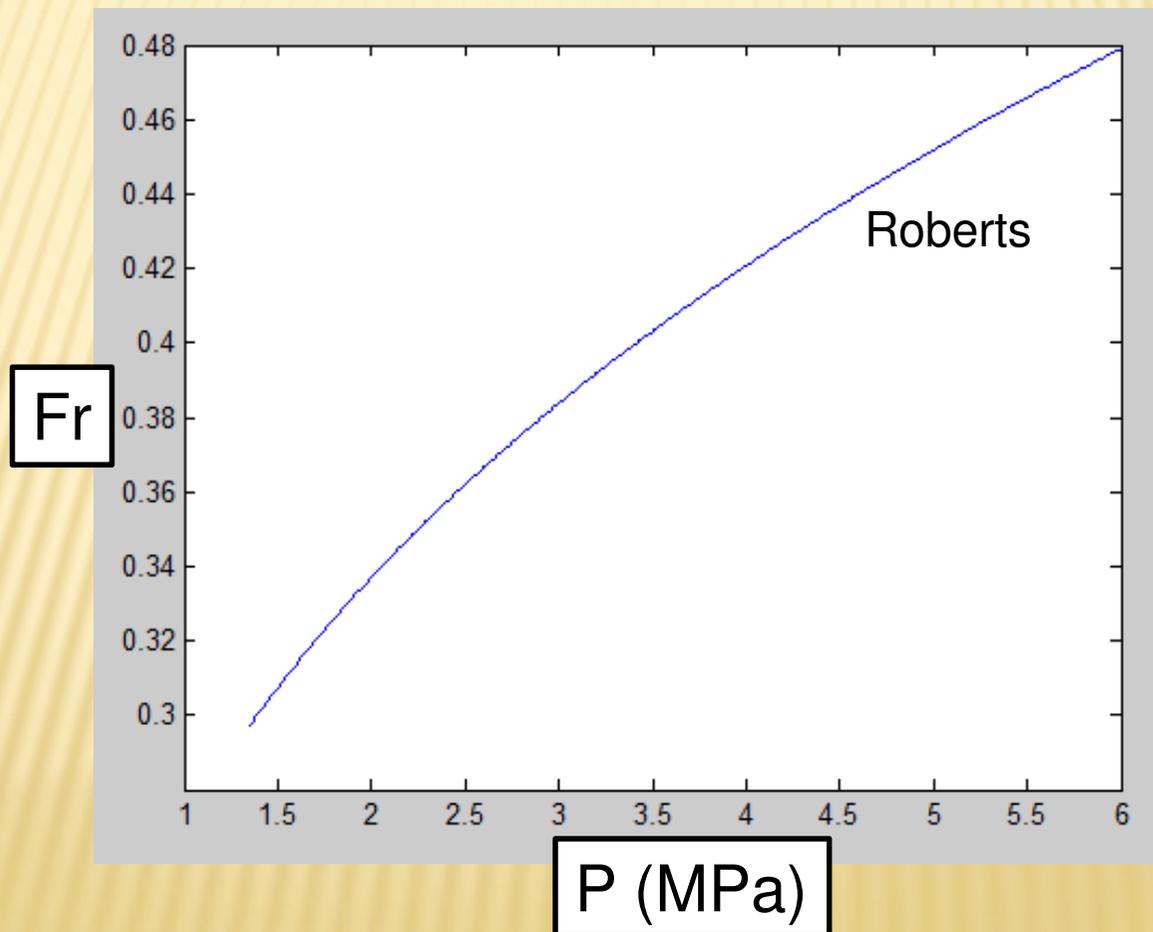
Fr: fração radiada

*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 / m<sup>2</sup>

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/m<sup>2</sup>

Máximo: 450 kW/m<sup>2</sup>

Moorhouse e Pritchard:

Faixa de 150 a 300 kW/m<sup>2</sup>

# BOLA DE FOGO

---

## 4.2 Surface Emissive Power:

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

Faixa de 250 a 350 kW/m<sup>2</sup>

Considine, Grint e Holden:

Valor geral: 350 kW/m<sup>2</sup>

# BOLA DE FOGO

## 4.2 Surface Emissive Power:

MHAP:

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

Onde:

E: emissive power (kW/m<sup>2</sup>)

P: pressão (MPa)

Valor máximo recomendado pelo MHAP:

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

# BOLA DE FOGO

## 4.2 Surface Emissive Power:

MHAP:

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

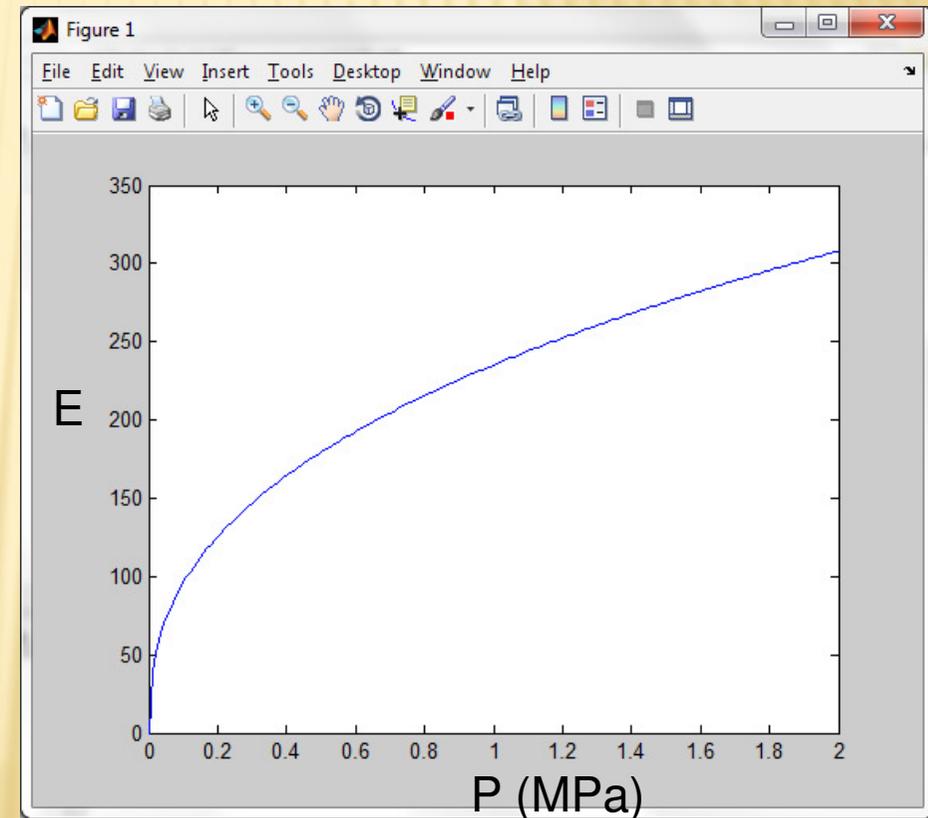
Onde:

E: emissive power (kW/m<sup>2</sup>)

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/m<sup>2</sup>

**Note:**

Para piscina o Emissive Power recomendado pela NIST é na faixa de 50 a 100 kW/m<sup>2</sup>, 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

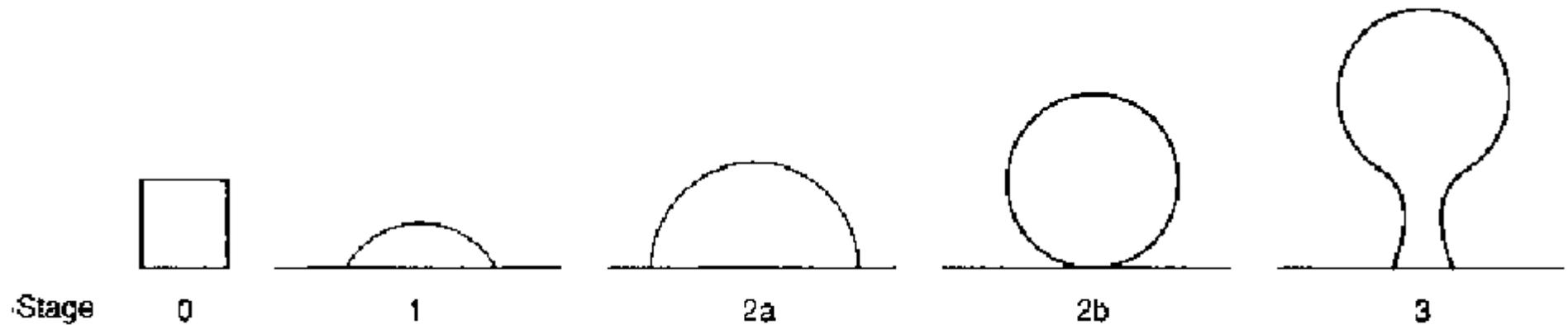
Crawley: 1100 a 1200 °C

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:

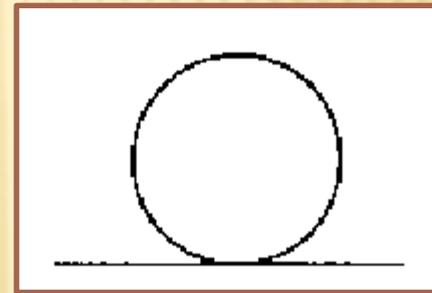
### 5.1 Cenário para engolfamento:

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

# BOLA DE FOGO

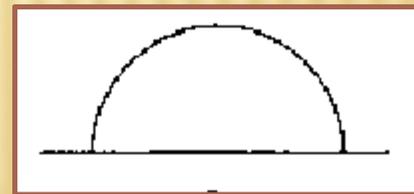
## 5.1 Cenário para engolfamento:

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

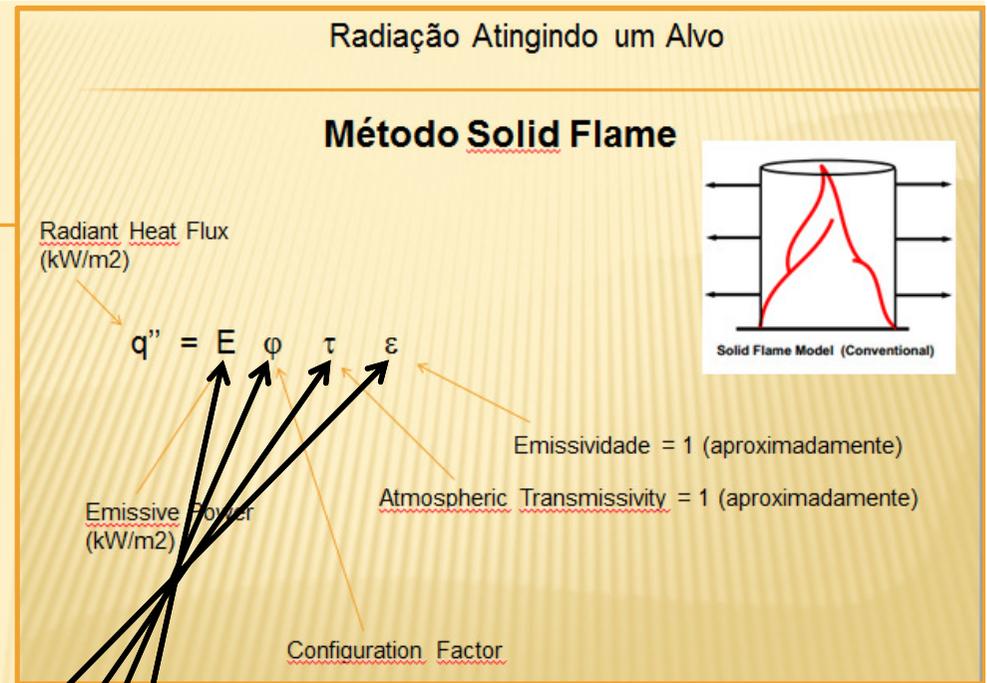
Calor radiado que atinge o alvo

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

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

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

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

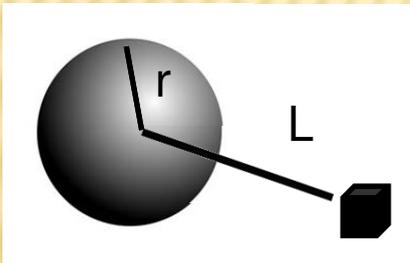


# BOLA DE FOGO

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...

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

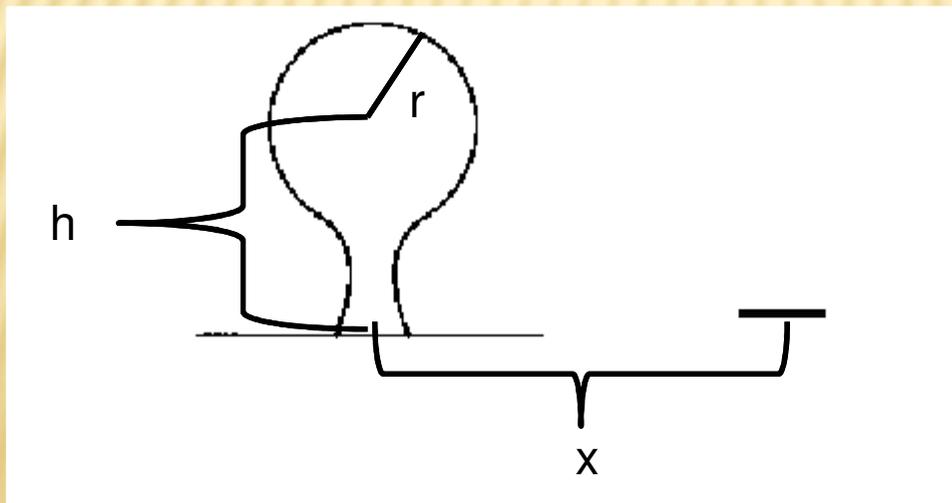
Fator de Forma:  
-alvo situado a distância  $L$   
do CENTRO da bola.  
-bola de fogo de raio  $r$

# BOLA DE FOGO

## Note:

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

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



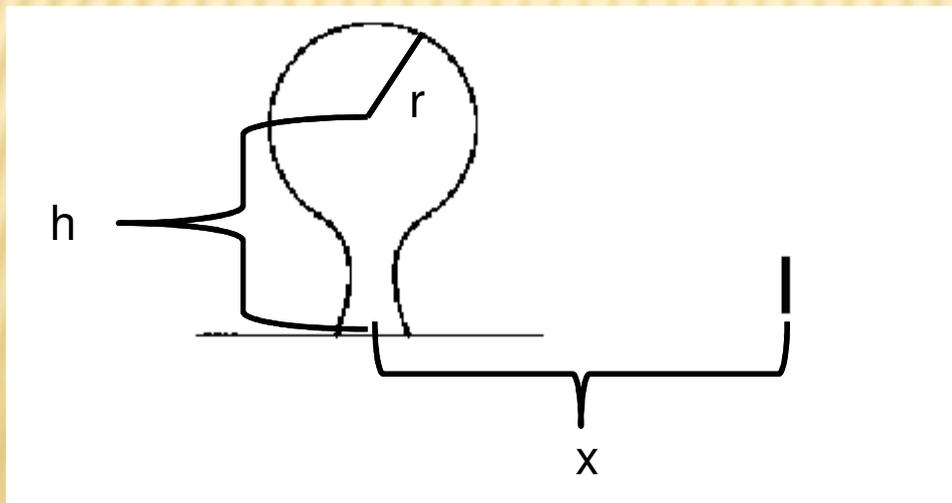
*Alvo horizontal, no solo.*

# 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

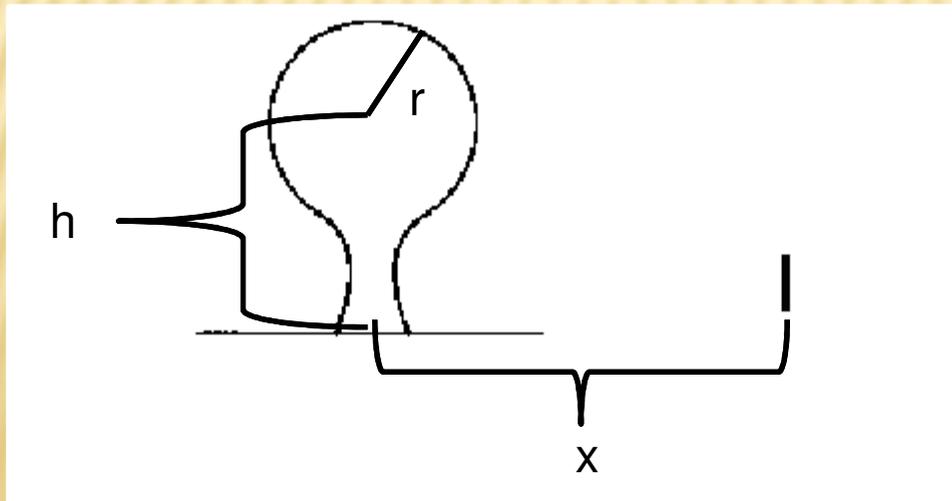
*Essa equação pode ser simplificada para achar a equação inicial (mais simples)*

$$h = 0, L = x$$

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



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

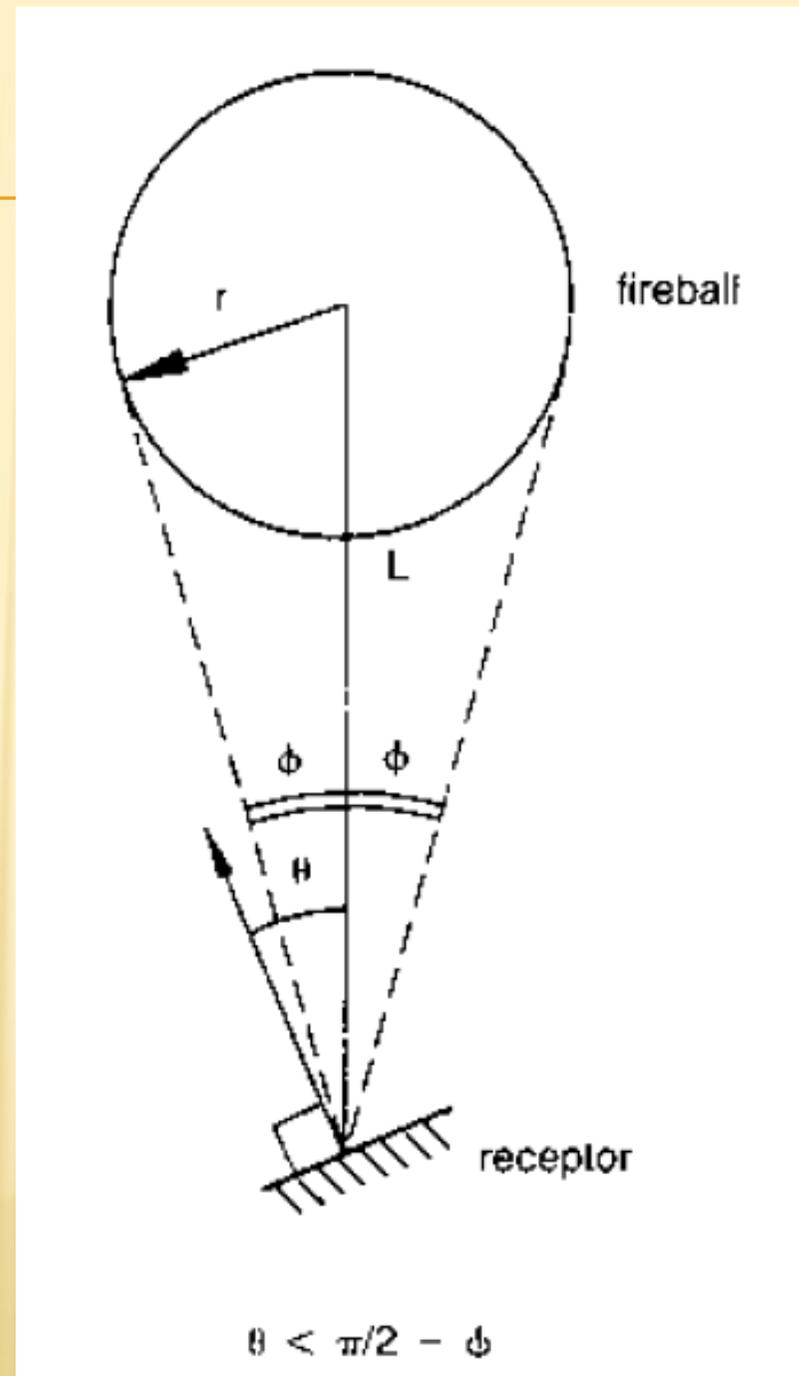


# BOLA DE FOGO

## Note:

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

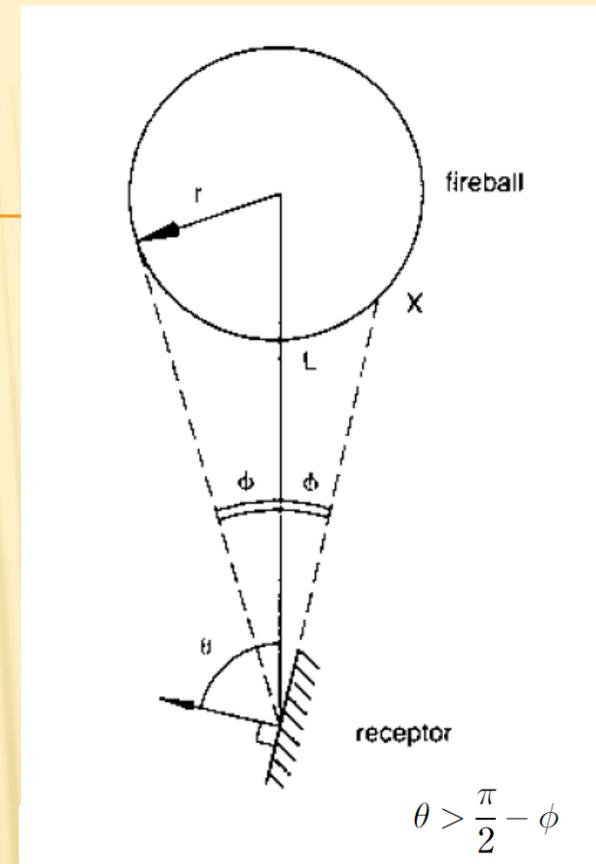
$$F = \frac{r^2}{l^2} \cos \theta \quad \theta \leq \frac{\pi}{2} - \phi$$



# 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

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

Ou,

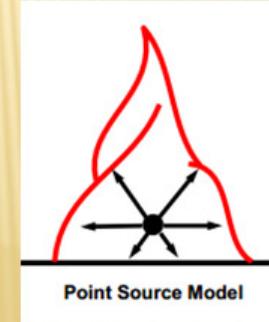
$$q'' = Q_{\text{rad}} / ( 4 \pi r^2 )$$

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