

8 – Chamas pré-misturadas laminares

8a Aula

8.1 Introdução

- Reagente e oxidante já misturados
- Aplicações: fogões, bico de bunsen, indústria de vidro, turbina de gás
- Estudo - pré-requisito para chamas turbulentas

$$\left. \begin{array}{l} \text{Velocidade da chama} \\ \text{Espessura da chama} \end{array} \right\} \begin{array}{l} P, T, \\ \phi \\ F \end{array}$$

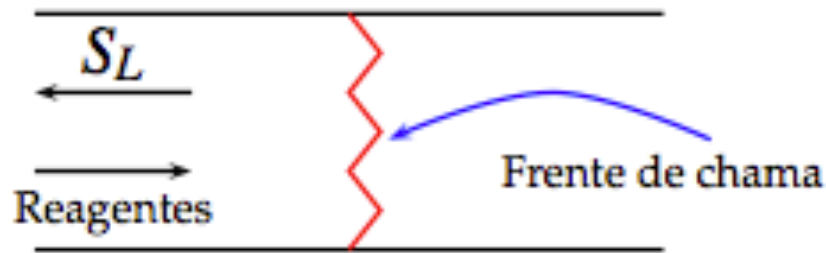
8.2 Descrição Física

chama: { Propagação, em velocidade
sub-sônica, auto-sustentável
de uma região de combustão
localizada

Localizada	×	reator homogêneo
Sub-sônica	×	super-sônica
↓	onda	↓
Deflagração		Detonação

8.2 Descrição Física

- Velocidade de chama - Tubo



Pela continuidade:

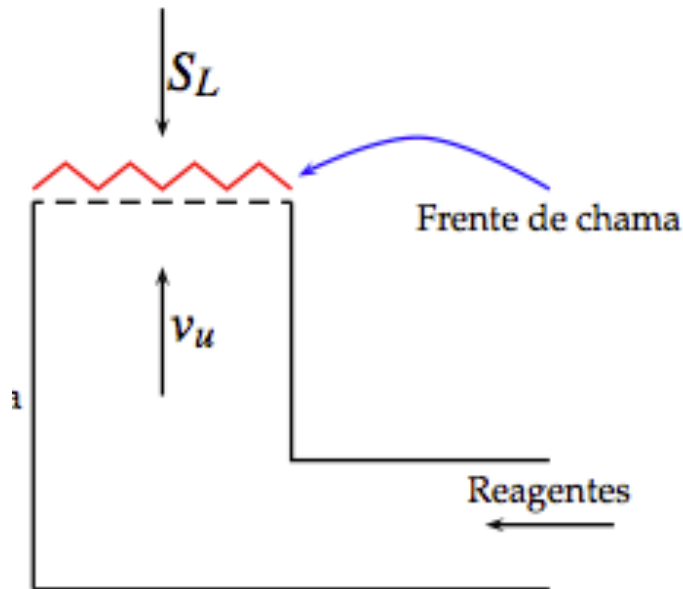
$$\rho_u S_L A \equiv \rho_u v_u A = \rho_b v_b A$$

$\rho_u \rightarrow$ Unburned

$\rho_b \rightarrow$ Burned

8.2 Descrição Física

- Velocidade de chama – Queimador plano



8.2 Descrição Física

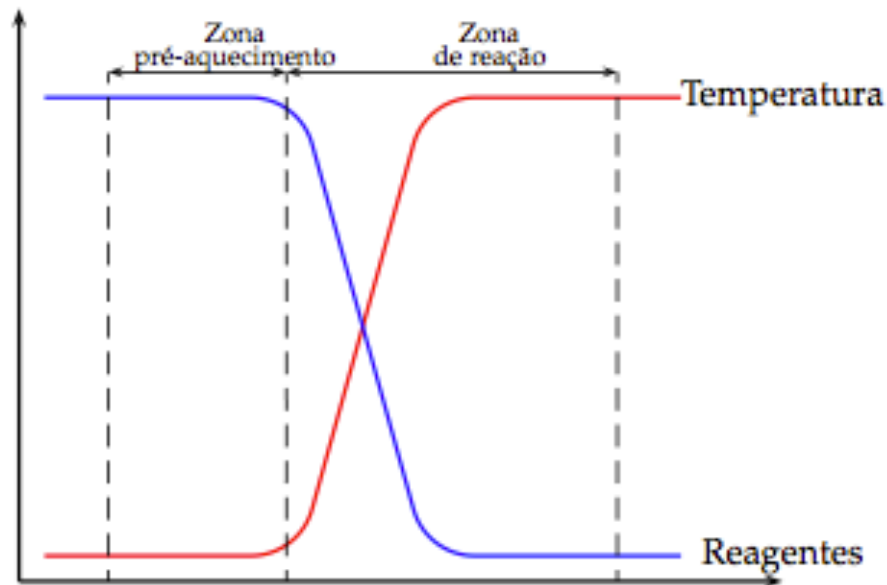
- Estrutura de chama laminar típica

No tubo: Observador "montado" na frente de chama (que separa queimado de não-queimado) vê a mistura não-queimada se aproximar com a velocidade S_L

No queimador plano: A frente de chama é estável pois a velocidade da chama (S_L) é igual e oposta à da mistura não-queimada (v_u)

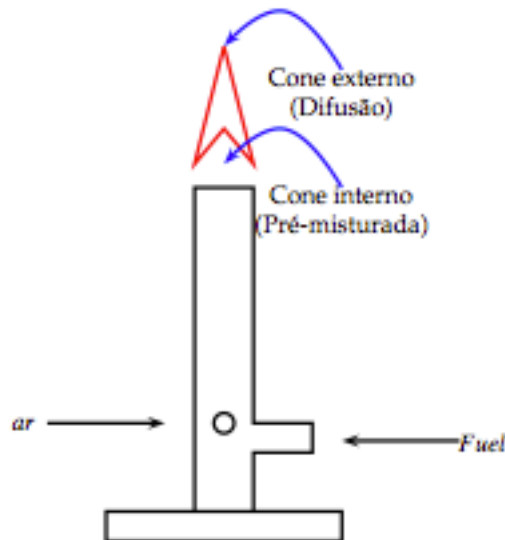
8.2 Descrição Física

- Estrutura de chama laminar típica

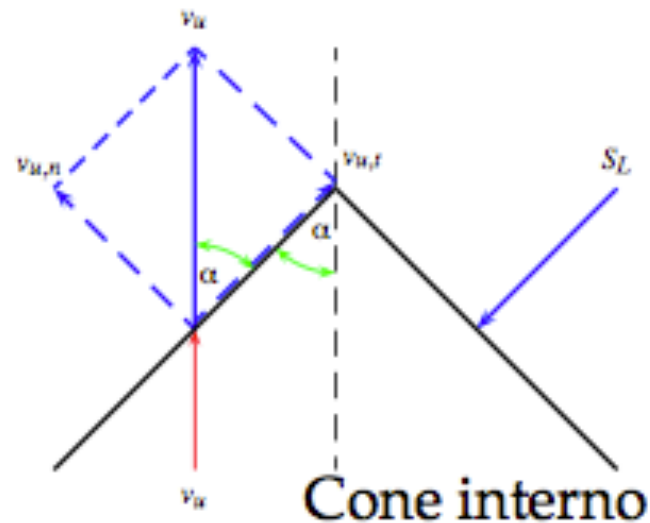


8.2 Descrição Física

- Bico de Bunsen



Cone interno: mistura rica
Cone externo: CO + ar



Para estabilizar é necessário:

$$S_L = v_u \sin \alpha$$

8.3 Análise Simplificada

Objetivo: Expressão analítica simples para velocidade laminar S_L

8.3 Análise Simplificada

Hipóteses:

1. Fluxo 1D, área constante, Regime permanente.

2. $\Delta E_c, \Delta E_p, W_\tau, \dot{q}_{RAD} = 0$

3. $P = cte$ na frente de chama

4. difusão da calor (Fourier) e massa (Fick binária)

5.

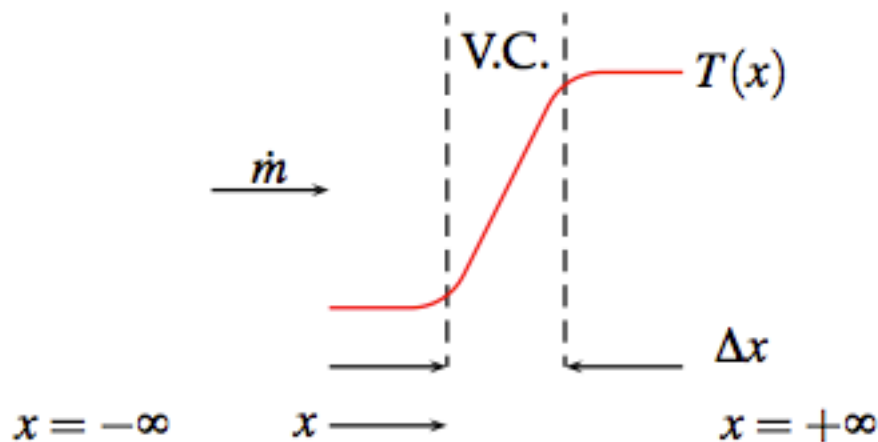
$$L_e \equiv \frac{\alpha}{D} = \frac{k}{\rho c_p D} = 1$$

6. $c_{p,mist} = cte$

7. 1 Reação global: $F + O_x \rightarrow \text{Produtos}$

8. $\phi \leq 1$ (esteq. ou pobre)(Todo F é consumido na frente de chama)

8.3 Análise Simplificada



- Conservação da massa:

$$\frac{d(\rho v_x)}{dx} = 0 \quad (245)$$

ou

$$\dot{m}'' = \rho v_x = cte \quad (246)$$

8.3 Análise Simplificada

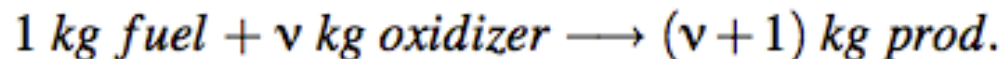
- Conservação das espécies:

$$\frac{d\dot{m}_i''}{dx} = \dot{m}_i''' \quad (247)$$

com a lei de Fick:

$$\frac{d \left[\dot{m}'' Y_i - \rho D \frac{dy_i}{dx} \right]}{dx} = \dot{m}_i''' \quad (248)$$

para a reação:



então:

$$\dot{m}_F''' = \frac{1}{\nu} \dot{m}_{O_x}''' = -\frac{1}{\nu + 1} \dot{m}_{Pr}''' \quad (249)$$

Aplicando (248) para combustível, oxidante e prod.

8.3 Análise Simplificada

- Combustível:

$$\dot{m}'' \frac{dY_F}{dx} - \frac{d \left(\rho D \frac{dY_F}{dx} \right)}{dx} = \dot{m}_F''' \quad (250)$$

- Oxidante:

$$\dot{m}'' \frac{dY_{Ox}}{dx} - \frac{d \left(\rho D \frac{dY_{Ox}}{dx} \right)}{dx} = \nu \dot{m}_F''' \quad (251)$$

- Produtos:

$$\dot{m}'' \frac{dY_{Pr}}{dx} - \frac{d \left(\rho D \frac{dY_{Pr}}{dx} \right)}{dx} = -(\nu + 1) \dot{m}_F'''$$

8.3 Análise Simplificada

Conservação da energia

Utilizando a eq. da energia de Zeldovich

$$\dot{m}'' \frac{d \int c_p dT}{dx} + \frac{d}{dx} \left[-\rho D \frac{d \int c_p dT}{dx} \right] = - \sum h_{f,i}^{\circ} \dot{m}_i'''$$

para $c_{p,mist} = cte$:

$$\dot{m}'' c_p \frac{dT}{dx} - \frac{d}{dx} \left[(\rho D c_p) \frac{dT}{dx} \right] = - \sum h_{f,i}^{\circ} \dot{m}_i''' \quad (252)$$

onde:

$$- \sum h_{f,i}^{\circ} \dot{m}_i''' = - \left[h_{f,F}^{\circ} \dot{m}_F''' + h_{f,Ox}^{\circ} \nu \dot{m}_F''' - h_{f,Pr}^{\circ} (\nu + 1) \dot{m}_F''' \right]$$

ou

$$- \sum h_{f,i}^{\circ} \dot{m}_i''' = - \dot{m}_F''' \Delta h_c = - \dot{m}_F''' \left(h_{f,F}^{\circ} + h_{f,Ox}^{\circ} \nu - h_{f,Pr}^{\circ} (\nu + 1) \right)$$

8.3 Análise Simplificada

mas como $L_e = \frac{k}{\rho c_p D} = 1$ (252) torna-se:

$$\dot{m}'' \frac{dT}{dx} - \frac{1}{c_p} \frac{d\left(k \frac{dT}{dx}\right)}{dx} = -\frac{\dot{m}_F''' \Delta h_c}{c_p} \quad (253)$$

e

$$\dot{m}'' = \rho_u S_L$$

Solução: Supor perfil linear de T e aplicar em (253)

8.3 Análise Simplificada

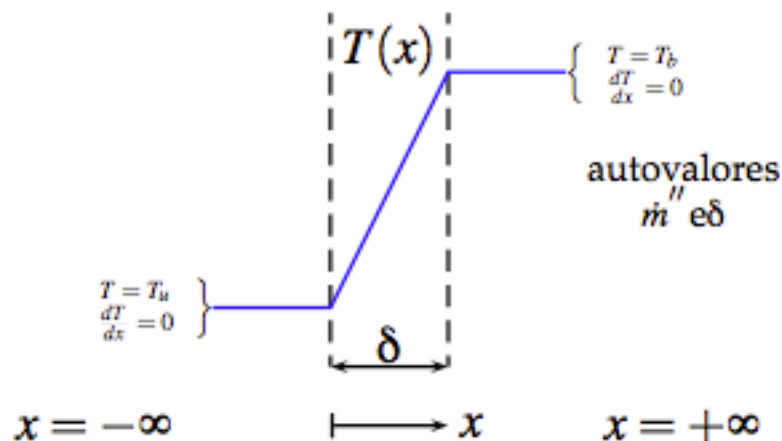
- Condições de contorno

$$T(x \rightarrow -\infty) = T_u \quad (254)$$

$$\frac{dT}{dx}(x \rightarrow -\infty) = 0 \quad (255)$$

$$T(x \rightarrow +\infty) = T_b \quad (256)$$

$$\frac{dT}{dx}(x \rightarrow +\infty) = 0 \quad (257)$$



8.3 Análise Simplificada

Integrando (253) de $x = -\infty$ até $x = +\infty$:

$$\dot{m}'' T \Big|_{T_u}^{T_b} - \frac{k}{c_p} \frac{dT}{dx} \Big|_{\frac{dT}{dx}=0}^{\frac{dT}{dx}=0} = \frac{-\Delta h_c}{c_p} \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{m}_F''' dx \quad (258)$$

então:

$$\dot{m}''(T_b - T_u) = -\frac{\Delta h_c}{c_p} \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{m}_F''' dx \quad (259)$$

mas $\dot{m}_F'''$ só é não nulo entre T_u e T_b na região δ , então:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_b - T_u}{\delta} \quad \text{ou} \quad dx = \frac{\delta}{T_b - T_u} dT \quad (260)$$

substituindo em (259):

$$\dot{m}''(T_b - T_u) = -\frac{\Delta h_c}{c_p} \frac{\delta}{(T_b - T_u)} \int_{T_u}^{T_b} \dot{m}_F''' dT \quad (261)$$

8.3 Análise Simplificada

definindo

$$\bar{\dot{m}}_F''' \equiv \frac{1}{(T_b - T_u)} \int_{T_u}^{T_b} \dot{m}_F''' dT \quad (262)$$

então (261) torna-se:

$$\dot{m}''(T_b - T_u) = -\frac{\Delta h_c}{c_p} \delta \bar{\dot{m}}_F''' \quad (263)$$

8.3 Análise Simplificada

a outra equação é obtida integrando-se (253) de $x = -\infty$ até $x = \delta/2$; $\dot{m}_F'''$ é nulo (assume-se) para $-\infty < x \leq \delta/2$

Notando que:
em $x = \delta/2$

$$T = \frac{T_b + T_u}{2} \quad (264)$$

e (260)

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_b - T_u}{\delta}$$

então (258) torna-se:

$$\begin{aligned} \dot{m}'' \left(\frac{T_b + T_u}{2} - T_u \right) - \frac{k}{c_p} \left(\frac{T_b - T_u}{\delta} \right) &= 0 \\ \dot{m}'' \frac{\delta}{2} - \frac{k}{c_p} &= 0 \end{aligned} \quad (265)$$

8.3 Análise Simplificada

Resolvendo (263) e (265) simultaneamente:

$$\dot{m}'' = \left[2 \frac{k}{c_p^2} \frac{(-\Delta h_c)}{(T_b - T_u)} \dot{m}_F''' \right]^{1/2} \quad (266)$$

e

$$\delta = \frac{2k}{(c_p \dot{m}'')} \quad (267)$$

Aplicando: $S_L \equiv \dot{m}''/\rho_u$; $\alpha \equiv k/\rho_u c_p$

e

$$\Delta h_c = (\nu + 1) c_p (T_b - T_u)$$

8.3 Análise Simplificada

Velocidade:

$$S_L = \left[-2\alpha(n+1) \frac{\dot{m}_F}{\rho_u} \right]^{1/2} \quad (268)$$

Espessura:

$$\delta = \left[\frac{-2\rho_u\alpha}{(n+1)\dot{m}_F} \right]^{1/2} \quad (269)$$

ou

$$\delta = 2\alpha/S_L \quad (270)$$

8.4 Fatores que influenciam S_L

Temperatura

Temperatura, das Eq. (268) e (269)

$$\alpha \propto \bar{T}^{1.75} P^{-1} \quad \alpha = \frac{k(\bar{T})}{\rho_u c_p(\bar{T})}$$

$$\frac{\dot{m}_F'''}{\rho_u} \propto \underbrace{T_u P^{n-1}}_{\rho_u} T_b^{-n} \exp\left(\frac{-E_A}{R_u T_b}\right)$$

n : ordem da reação global

$$\bar{T} \equiv 0.5(T_b + T_u)$$

combinando:

$$S_L \propto \bar{T}^{0.875} T_u^{0.5} T_b^{-n/2} \exp\left(\frac{-E_A}{2R_u T_b}\right) P^{(n-2)/2} \quad (271)$$

$$\delta \propto \bar{T}^{0.875} T_u^{-0.5} T_b^{n/2} \exp\left(\frac{+E_A}{2R_u T_b}\right) P^{-n/2} \quad (272)$$

8.4 Fatores que influenciam S_L

Temperatura

para hidrocarboneto $n \approx 2.0$, $E_A \approx 1.67 \cdot 10^8$

Caso	A	B	C
$T_u(K)$	300	600	300
$T_b(K)$	2000	2300	1700
S_L/S_{LA}	1	2.89	0.43
δ/δ_A	1	0.52	1.82

8.4 Fatores que influenciam S_L

Pressão

Pressão, da Eq. (272), para $n \approx 2.0$

$$S_L \propto P^{(n-2)/2} \equiv cte$$

Dados experimentais mostram, entretanto

$$P \propto P^{-0.5}$$

8.4 Fatores que influenciam S_L

Razão de Equivalência

→ afeta, basicamente, T_b (ver Cap.2)

S_L , máximo em Φ levemente rico

δ , mínimo em $\Phi \approx 1.0$

8.4 Fatores que influenciam S_L

Combustível

Tipo de combustível

Etileno C_2H_4 , acetileno $C_2H_2 > C_3-C_6 HC's$

Hidrogênio $H_2 \gg$ outros

- Difusão térmica e mássica
- Cinética H_2 muito mais rápida que $CO \rightarrow CO_2$

8.5 Correlações empíricas de S_L

Para CH_4 :

$$S_L(cm/s) = 10 + 3.71 \cdot 10^{-4} [T_u(K)]^2 \quad (273)$$

e outras

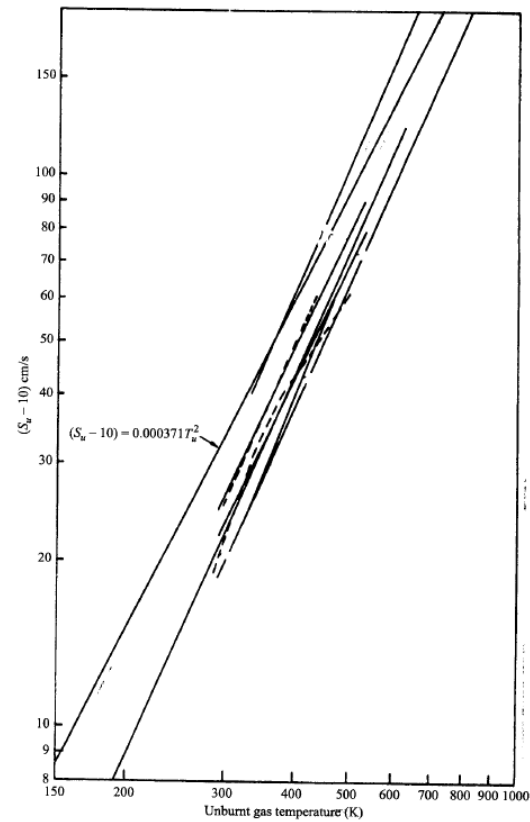


Figure 8.13 Effect of unburnt gas temperature on laminar flame speeds of stoichiometric methane-air mixtures at 1 atm. Various lines are data from various investigators.
 SOURCE: Reprinted with permission, Elsevier Science, Inc., from Ref. [19], © 1972, The Combustion Institute.

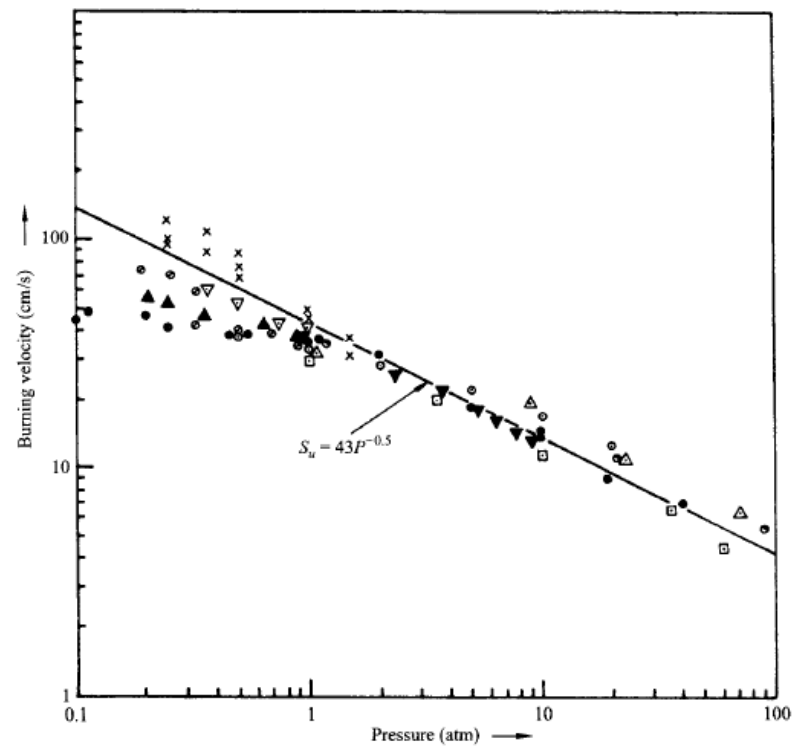


Figure 8.14 Effect of pressure on laminar flame speeds of stoichiometric methane-air mixtures for $T_u = 16\text{--}27^\circ\text{C}$.

SOURCE: Reprinted with permission, Elsevier Science, Inc., from Ref. [19], © 1972, The Combustion Institute.

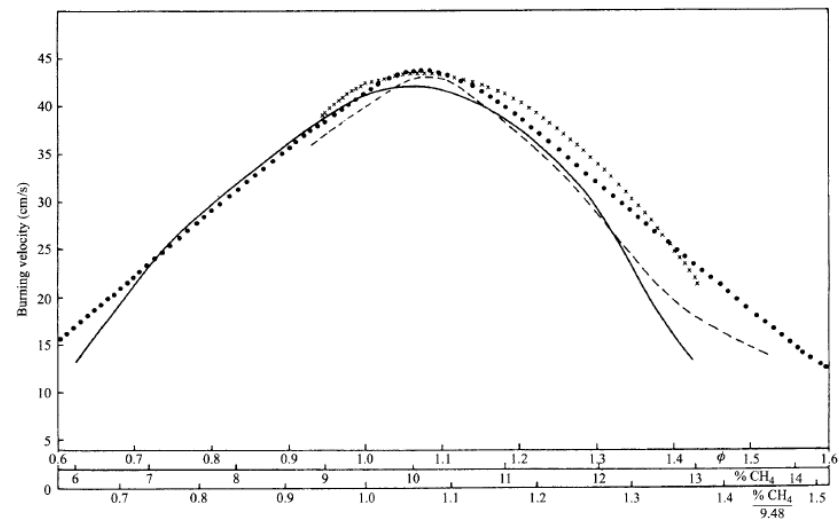


Figure 8.15 Effect of equivalence ratio on the laminar flame speed of methane-air mixtures at atmospheric pressure.
 | SOURCE: Reprinted with permission, Elsevier Science, Inc., from Ref. [19], © 1972, The Combustion Institute.

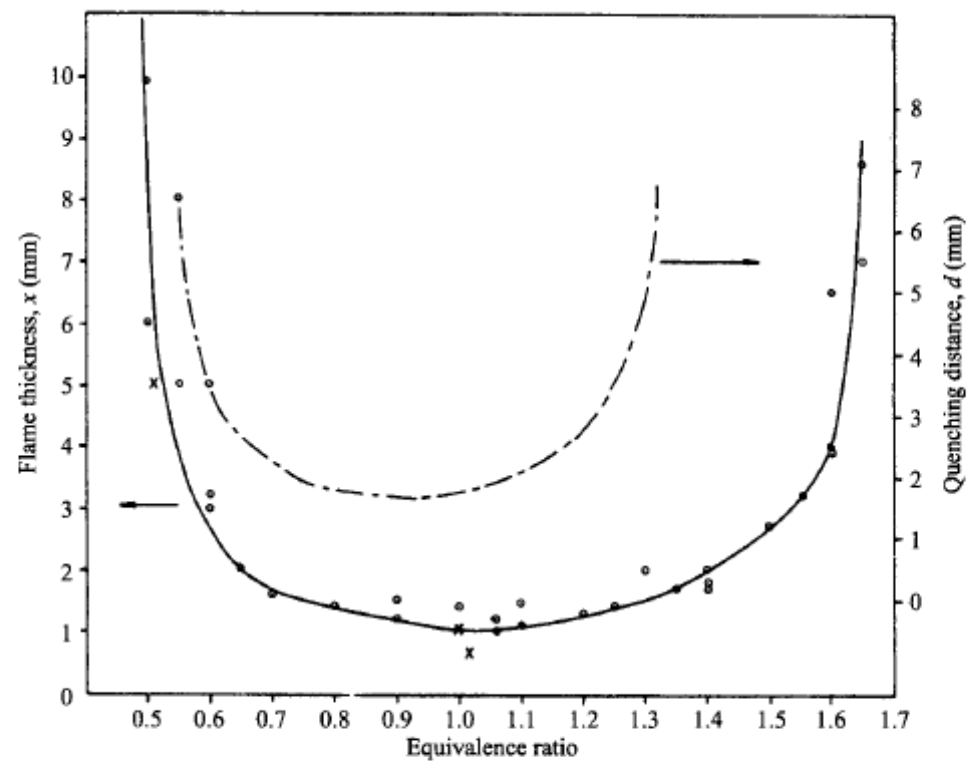


Figure 8.16 Flame thickness for laminar methane-air flames at atmospheric pressure. Also shown is the quenching distance.

SOURCE: Reprinted with permission, Elsevier Science, Inc., from Ref. [19], © 1972, The Combustion Institute.

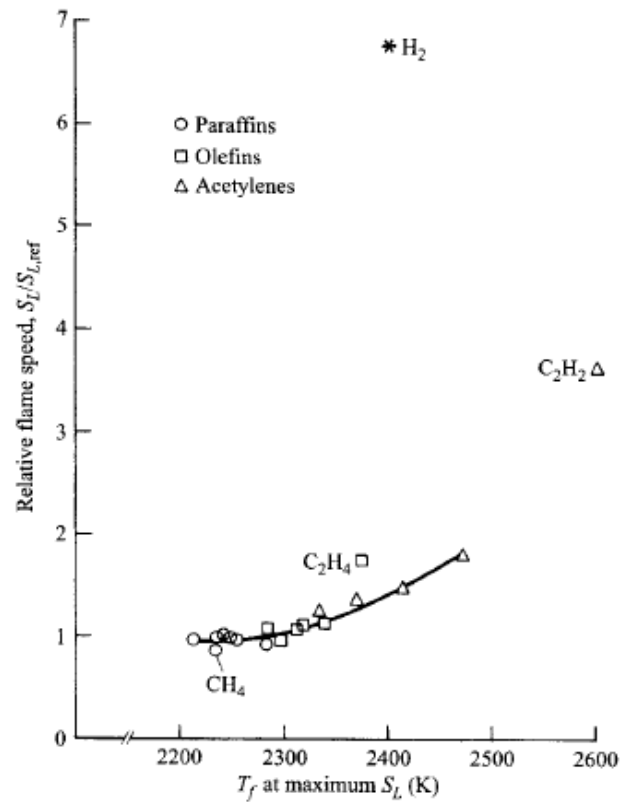


Figure 8.17 Relative flame speeds for C_1 – C_6 hydrocarbon fuels. The reference flame speed is based on propane using the tube method [21].

Table 8.2 Laminar flame speeds for various pure fuels burning in air for $\Phi = 1.0$ and at 1 atm ($T_u = \text{room temperature}$) from Ref. [20]

Fuel	Formula	Laminar Flame Speeds, S_L (cm/s)
Methane	CH_4	40
Acetylene	C_2H_2	136
Ethylene	C_2H_4	67
Ethane	C_2H_6	43
Propane	C_3H_8	44
Hydrogen	H_2	210

Table 8.3 Values for B_M , B_2 , and Φ_M used with Eqn. 8.33 [11]

Fuel	Φ_M	B_M (cm/s)	B_2 (cm/s)
Methanol	1.11	36.92	-140.51
Propane	1.08	34.22	-138.65
Isooctane	1.13	26.32	-84.72
RMFD-303	1.13	27.58	-78.34

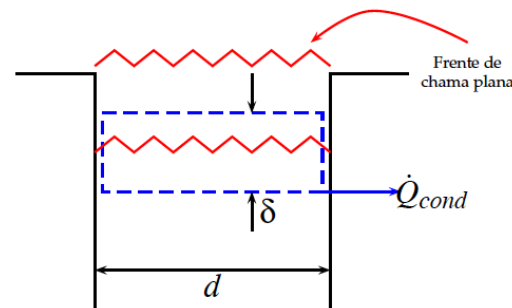
7.5 Extinção da chama (quenching)

→ Lâmpada de Sir Humphrey Davey

→ Válvula corta-chama

A chama ao passar por um canal estreito se extingue ao invés de propagar

- Análise



- Balanço de energia para o V.C. que contém a frente de chama:

$$\dot{Q}'''V = \dot{Q}_{cond} \quad (274)$$

A satisfação de (274) é o limite para que a chama ainda se mantenha e por conseguinte se propague para dentro do canal

$$\dot{Q}''' = -\bar{m}_F''' \Delta h_c \quad (275)$$

Objetivo: determinar d que satisfaça (274)
Calor de condução:

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \left. \frac{dT}{dx} \right|_{parede} \quad (276)$$

Área: $A = 2\delta L$ ("L" perpendicular ao papel)

Gradiente de temperatura:

Assumindo distribuição linear da parede (T_w) até o centro (T_b):

$$\left| \frac{dT}{dx} \right| \equiv \frac{T_b - T_w}{d/2} \equiv \frac{T_b - T_w}{d/b}$$

correção ($b > 2$)

então (274) torna-se:

$$\left(-\ddot{m}_F \Delta h_c \right) (\delta d L) = k(2\delta L) \frac{T_b - T_w}{d/b} \quad (277)$$

Assumindo $T_w = T_u$ e usando (265)

ainda $\Delta h_c = (v + 1)c_p(T_b - T_u)$

$$d = 2\sqrt{b}\alpha/S_L \quad (278)$$

$$d = \sqrt{b}\delta \quad (279)$$

7.6 Limites de flamabilidade

- Faixa de mistura comb/ar onde a propagação da chama se mantém

Experimento: Tubo extremidades abertas $\phi = 50mm$, $l = 1.2m$
Devido à transf. de calor, é dependente do aparato exp.

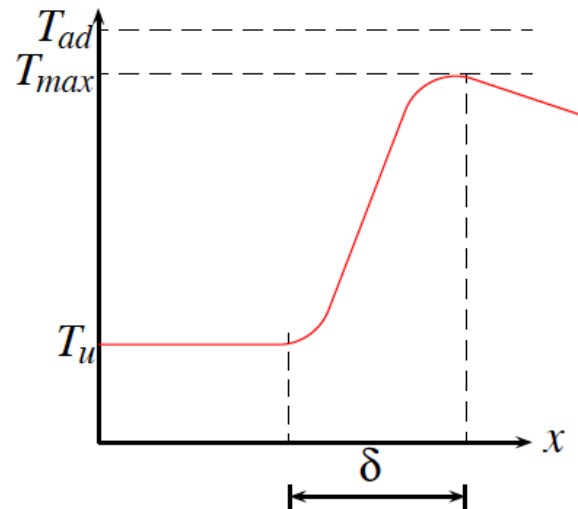


tabela (8.9)

Table 8.4 Flammability limits, quenching distances, and minimum ignition energies for various fuels^a

Fuel	Flammability Limits			Quenching Distance		Minimum Ignition Energy	
	$\Phi_{\min}$ (Lean or Lower Limit)	$\Phi_{\max}$ (Rich or Upper Limit)	Stoichiometric Mass Air–Fuel Ratio	For $\Phi = 1$ (mm)	Absolute Minimum (mm)	For $\Phi = 1$ (10^{-5} J)	Absolute Minimum (10^{-5} J)
Acetylene, C_2H_2	0.19 ^b	∞^b	13.3	2.3	—	3	—
Carbon monoxide, CO	0.34	6.76	2.46	—	—	—	—
<i>n</i> -Decane, $C_{10}H_{22}$	0.36	3.92	15.0	2.1 ^c	—	—	—
Ethane, C_2H_6	0.50	2.72	16.0	2.3	1.8	42	24
Ethylene, C_2H_4	0.41	> 6.1	14.8	1.3	—	9.6	—
Hydrogen, H_2	0.14 ^b	2.54 ^b	34.5	0.64	0.61	2.0	1.8
Methane, CH_4	0.46	1.64	17.2	2.5	2.0	33	29
Methanol, CH_3OH	0.48	4.08	6.46	1.8	1.5	21.5	14
<i>n</i> -Octane, C_8H_{18}	0.51	4.25	15.1	—	—	—	—
Propane, C_3H_8	0.51	2.83	15.6	2.0	1.8	30.5	26

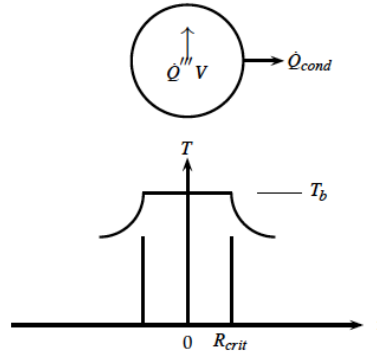
^aSOURCE: Data from Ref. [21] unless otherwise noted.^bZabetakis (U.S. Bureau of Mines, Bulletin 627, 1965).^cChomiak [25].

7.7 Ignição

- Aplicações em MCI, TG, queimadores
- É mais simples (equip.) que chama piloto

Análise simplificada

- Considere a massa de mistura contida numa esfera em torno do ponto de ignição
- Usando o critério (já usado para extinção) do balanço de calor gerado e transferido:



$$\dot{Q}'''V = \dot{Q}_{cond} \quad (280)$$

$$-\dot{m}_F''' \Delta h_c 4\pi R_{crit}^3 / 3 = -k 4\pi R_{crit}^2 \left. \frac{dT}{dr} \right|_{crit} \quad (281)$$

- Se o raio da esfera que contém a mistura for menor que R_{crit} , A perda de calor impede a sustentação da propagação.
- Gradiente de temperatura no gás "frio"

$$\left. \frac{dT}{dr} \right|_{R_{crit}} = -\frac{(T_b - T_u)}{R_{crit}} \quad (282)$$

subst. (281) em (282):

$$R_{crit}^2 = \frac{3k(T_b - T_u)}{-\dot{m}_F''' \Delta h_c} \quad (283)$$

ainda com S_L e δ :

$$R_{crit} = \sqrt{6} \frac{\alpha}{S_L} \quad (284)$$

$$R_{crit} = \sqrt{6} \frac{\delta}{2} \quad (285)$$

- Energia mínima de ignição Assume-se que o ignitor forneça a energia necessária para elevar a temperatura da mistura até T_b

$$E_{ign} = m_{crit} c_p (T_b - T_u) \quad (286)$$

onde

$$m_{crit} = \rho_b \frac{4}{3} \pi R_{crit}^3 \quad (287)$$

então:

$$E_{ign} = 61.6 \rho_b c_p (T_b - T_u) \left(\frac{\alpha}{S_L} \right)^3 \quad (288)$$

Para gás real: $R_b = R_u / W_b$

$$E_{ign} = 61.6 P \left(\frac{c_p}{R_b} \right) \left(\frac{T_b - T_u}{T_b} \right) \left(\frac{\alpha}{S_L} \right)^3 \quad (289)$$

Influência da pressão: direta em (289) e indireta em α , S_L (271)

$$E_{ign} \propto P^{-2}$$

influência da temperatura:

$$T_b, \quad S_L \rightarrow E_{ign}$$

8 Estabilização

- Evitar Flashback (Chama entra no tubo) e Liftoff (chama descola do tubo)
- Questão de segurança contra explosão e operação sem falhas
- Ambos os fenômenos são relacionados com S_L e v_u na saída do tubo

- Flashback

- Transiente devido à redução ou corte da mistura

$$S_L > v_u$$

- Se $\phi > d_{quenching}$ a chama se propaga para dentro do tubo
- Controle: Tipo de combustível, ϕ , v_u , geometria

- Liftoff

- Associado à T.C. junto à borda do tubo
- Como a chama "colada" a borda da chama fica bem próxima da borda do tubo.

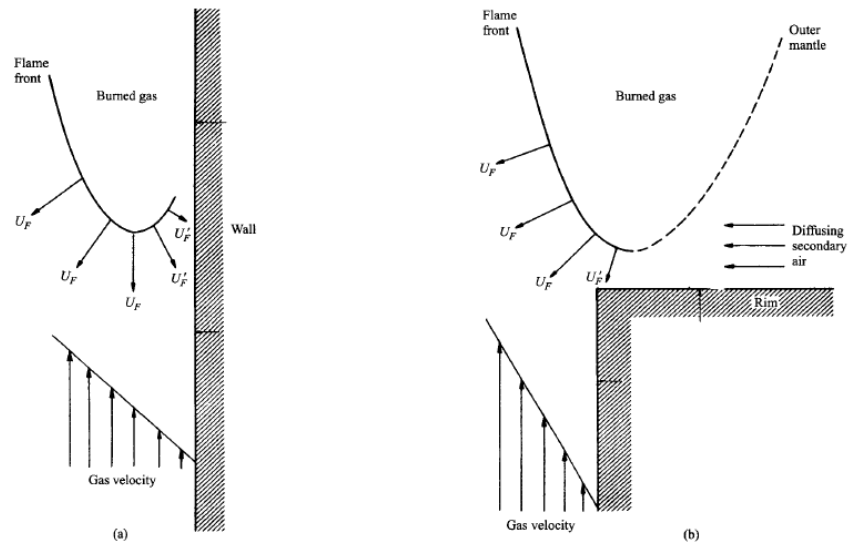


Figure 8.22 Velocity vectors showing flow velocities and local flame velocity for (a) flashback and (b) liftoff.
 | SOURCE: Reprinted with permission from Ref. [33]. © 1955, American Chemical Society.

- Como aumento da velocidade (v_u), o cone diminui

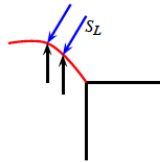
$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{S_L}{v_u} \right)$$

e a borda da chama se afasta da borda do tubo.

- Se a velocidade aumenta mais ainda, a chama "pula" para uma posição longe da borda do tubo. Esta velocidade é $v_{liftoff}$
- Para $v_u > v_{liftoff}$ a chama não se mantém mais (blowout).

Liftoff e Blowout:

Efeitos de T.C. e radicais junto à borda do tubo.



1. Chama estabilizada. Junto à parede:

$$v_u \approx 0 \quad e \quad S_L \approx 0$$

devido à T.C. e radicais para a parede

2. $v_u \uparrow$ (aumento do fluxo)
 $S_L \uparrow$ devido à diminuição de perda de calor e radicais para parede.
Novo ponto estável (próximo)
3. $v_u \uparrow \rightarrow$ diluição com ar fresco passa a dominar ($> \dot{Q} \downarrow$)
 $\rightarrow$ a chama se "estabiliza" longe do tubo
4. $v_u \uparrow (> v_{liftoff}) \rightarrow$ em nenhum ponto do jato, ocorre aumento de S_L
para satisfazer

$$v_u \approx S_L$$

e a chama apaga.

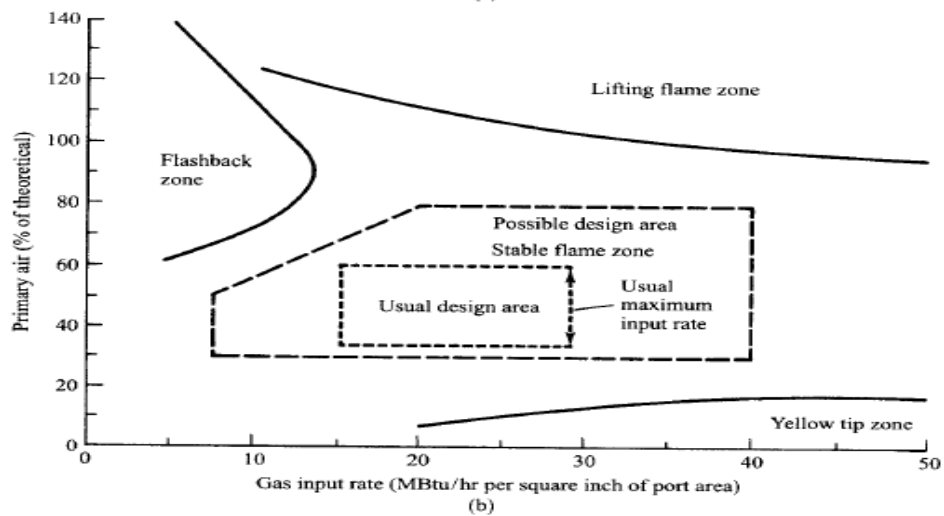
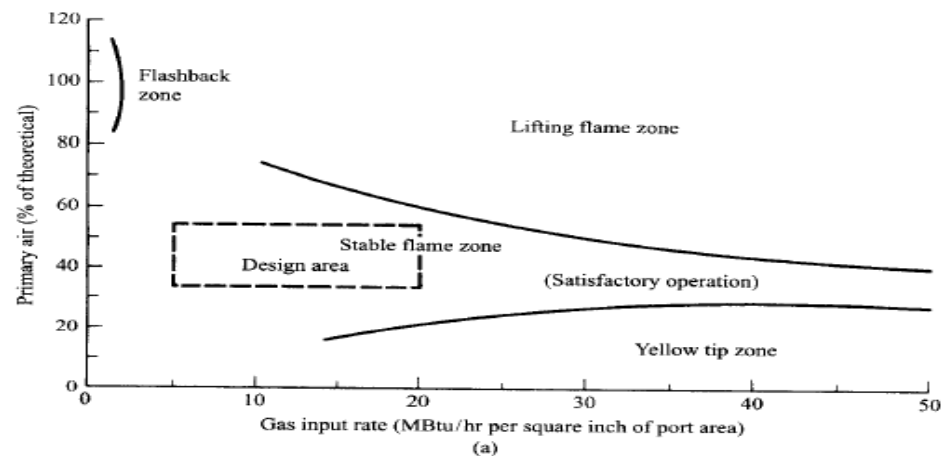


Figure 8.23 Stability diagrams for flashback, liftoff, and yellow-tipping for (a) natural gas and (b) manufactured gas for a burner with a single row of 2.7-mm-diameter ports with 6.35-mm spacing. Yellow-tipping indicates soot formation within the flame.
 | SOURCE: From Ref. [32]. Reprinted with permission of Industrial Press.