

- Combustion", Tome I, pp. 366-377, Edition Technip, Paris (1968).
- <sup>3</sup> R.M. Fristom and A.A. Westenberg – "Flame Structure" pp. 145-176 – McGraw Hill, Inc. (1965).
- <sup>4</sup> B. Lewis and G. Von Elbe – "Combustion, Flames and Explosions of Gases" pp. 620-638 – Academic Press, Inc. (1961).
- <sup>5</sup> A.G. Gaydon and H.G. Wolfhard – "Flames – Their Structure radiation and temperature" pp. 239-261 – Chapman and Hall, Ltd third edition (1970).
- <sup>6</sup> L.G. Dodge – "Optical Absorption and Emission Measurements in Flames" – Progress in Astronautics and Aeronautics 53, p. 155 (1976).
- <sup>7</sup> A. Van Tiggelen, J.C. Balaceau, J. Burger, G. de Soete, L. Sajus, B. Salé et P.J. Van Tiggelen, "Oxydation et Combustion", Tome I, pp. 500-519, Edition Technip, Paris (1968).
- <sup>8</sup> A. Van Tiggelen, J.C. Balaceanu, J. Burger, G. de Soete, L. Sajus, B. Salé et P.J. Van Tiggelen, "Oxydation et Combustion", Tome I, pp. 526-530, Edition Technip, Paris (1968).
- <sup>9</sup> R.M. Branco – "Estudo das Propriedades Físicas do Sistema C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> e Influência do Inibidor CF<sub>3</sub>Br" Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, (1985).

## ARTIGO

### VELOCIDADE FUNDAMENTAL DE PROPAGAÇÃO E ESPESSURA DA FRENTE DE CHAMA: CONCEITOS E MEDIDAS

H.Y.E. Safieh

*Departamento de Química, UFRN; 59.000 – Natal (RN)*

R.M. Branco

*Divisão de Química IAE/CTA; São José dos Campos (SP)*

(Cópia Revisada  
Recebida em 7/7/86)

A chama é uma reação de combustão viva, cineticamente heterogênea e, sendo assim, caracterizada por uma zona de reação bem delimitada no espaço de pequena espessura ( $10^{-4}$  a  $10^{-5}$  m à pressão atmosférica) que separa os gases reagentes dos gases queimados. Nesta estreita zona de transição contínua se desenvolvem todos os processos elementares, reações radicalares em cadeias ramificadas, que conduzem a uma transformação química mais ou menos completa e onde existe uma variação de temperatura desde um valor inicial ( $T_i$ ) até um valor final ( $T_f$ ). Portanto, nesta região existem dois gradientes importantes, um para a temperatura ( $\cong 10^5$  K/m) e outro para o consumo do material reagente ( $\cong 10^2$  kg/s).

A chama pode ser caracterizada globalmente, através de estudos macroscópicos, pela determinação de seus parâmetros físicos, tais como, a velocidade fundamental de propagação ( $V_O$ ), espessura da chama ( $e_O$ ) e temperatura global da chama ( $T_{ch}$ ), que são característicos de uma mistura inflamável de composição definida.

Este artigo tem por finalidade introduzir o conceito de velocidade fundamental de propagação e da espessura da frente de chama, bem como um método ótico utilizado para suas determinações experimentais.

## I – CONCEITOS

### I.1 – Velocidade Fundamental de Propagação ( $V_O$ )

Uma vez estabilizada a chama, com uma composição conveniente, ela se propaga com uma velocidade que pode ser denominada "velocidade de deslocamento da chama" ou "velocidade espacial" ( $\vec{V}_s$ ), definida em relação a um sistema de eixos fixos no espaço<sup>1</sup>. Todavia como a mistura gasosa pode estar em movimento, uma grandeza mais representativa é a "velocidade de propagação da chama" ( $\vec{V}_p$ ), definida em relação a um sistema de eixos ligado ao gás em escoamento. De uma maneira mais precisa e generalizada<sup>1</sup>, a velocidade de propagação em um ponto O de um elemento ds da frente de chama, é a diferença vetorial entre a velocidade espacial ( $\vec{V}_s$ ) e a velocidade de escoamento dos gases em O ( $\vec{V}_g$ ).

$$\vec{V}_p = \vec{V}_s - \vec{V}_g \quad (\text{eq. 1})$$

Quando a mistura inflamável está em repouso ( $\vec{V}_g=0$ ), a velocidade de propagação é igual à velocidade espacial sen-

do, em média, constante ao longo da frente da chama e igual à velocidade uniforme de deslocamento desta.

Em uma mistura bem homogeneizada, com escoamento de direção uniforme em cada ponto, as velocidades espaciais ( $\vec{V}_s$ ) e de propagação ( $\vec{V}_p$ ) terão sempre a mesma direção e, portanto, podemos tomar seus valores algébricos na equação 1.

$$V_p = V_s - V_g \quad (\text{eq. 2})$$

Uma grandeza ainda mais representativa é dada pela componente  $\vec{V}_n$  da velocidade de propagação sobre a perpendicular ao elemento de frente de chama considerado, denominada como "velocidade normal" ou "velocidade fundamental de propagação"<sup>1</sup>. Sabe-se que a combustão é realizada às custas dos gases reagentes, portanto, o vetor  $\vec{V}_n$  deve estar obrigatoriamente orientado na direção deles. Orientar a normal à frente de chama em direção aos gases reagentes, implica em que o valor algébrico da velocidade normal seja sempre positivo. A figura 1 apresenta um esquema da composição dos vetores mencionados.

O vetor velocidade normal ( $\vec{V}_n$ ) é definido matematicamente como sendo a diferença das projeções dos vetores velocidade espacial e de escoamento sobre a normal ao elemento de frente de chama considerado e representado pela expressão:

$$V_n = \vec{V}_s \cdot \vec{n} - \vec{V}_g \cdot \vec{n} \quad (\text{eq. 3})$$

onde,  $\vec{n}$  representa o vetor unitário normal ao elemento de frente de chama.

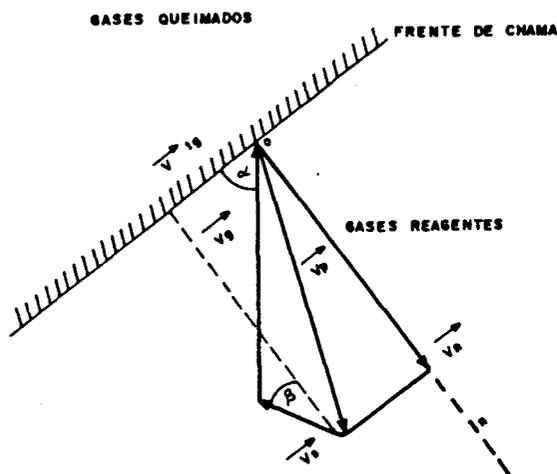


Fig. 1. Representação esquemática das velocidades para um elemento de frente de chama.

- $\vec{V}_g$ : vetor velocidade de escoamento dos gases reagentes.
- $\vec{V}_s$ : vetor velocidade espacial.
- $\vec{V}_p$ : vetor velocidade de propagação.
- $\vec{V}_n$ : vetor velocidade normal.
- $\vec{V}_{tg}$ : vetor velocidade tangencial.

Caso as velocidades fundamentais variassem de ponto para ponto, na frente de reação de uma chama de forma qualquer, poderia-se determinar o valor médio das velocidades fundamentais locais medindo o volume dos gases que atravessam a unidade de superfície da chama por unidade de tempo. No caso de uma chama estabilizada sobre um queimador de seção  $S_b$  com um escoamento unidimensional axial, a velocidade espacial é nula ( $V_s=0$ ) e a velocidade de propagação da chama, de mistura suposta perfeitamente homogênea, é igual à velocidade de escoamento dos gases. Considerando  $S_{ch}$  como sendo a superfície estável da chama ( $m^2$ ), pode-se escrever o valor médio das velocidades fundamentais como:

$$V_n = V_p (S_b/S_{ch}) = V_g (S_b/S_{ch}) \quad (\text{eq. 4})$$

Por outro lado tem-se que:  $F_t = V_g \cdot S_b$  onde,  $F_t$  é a vazão total dos gases reagentes ( $m^3/s$ ).

Portanto, a equação para a determinação da velocidade fundamental de propagação será dada por:

$$V_n = F_t/S_{ch} \quad (\text{eq. 5})$$

Geralmente a vazão dos gases reagentes é determinada à temperatura ambiente, mas a propagação da chama é feita com as misturas mantidas a diferentes temperaturas iniciais, sendo que a vazão gasosa no queimador poderá estar a uma temperatura mais elevada ou mais baixa que aquela correspondente à medida da vazão. Pela diferença dada, a velocidade fundamental ( $V_{ni}$ ) está ligada à temperatura ( $T_i$ ); supondo que a mistura se comporte como um gás perfeito pode-se escrever que:

$$F_{ti} = F_{to} \cdot T_i/T_o \quad (\text{eq. 6})$$

onde:  $T_o$  = temperatura ambiente ( $\cong 298$  K).

$F_{to}$  = vazão total dos gases reagentes determinada à temperatura ambiente ( $m^3/s$ ).

$T_i$  = temperatura da mistura no queimador.

Portanto:

$$V_{ni} = (F_{to} \cdot T_i / S_{ch} \cdot T_o) \quad (\text{eq. 7})$$

Supondo que as chamas sejam mantidas à temperatura inicial ( $T_o$ ) a velocidade fundamental de propagação será designada então como " $V_o$ " e expressa como:

$$V_o = F_{to}/S_{ch} \quad (\text{eq. 8})$$

## 1.2 - Espessura da Frente de Chama

A espessura da frente de chama ou espessura da zona de combustão ( $e_o$ ) é o parâmetro característico de uma determinada chama, que varia de acordo com a composição da mistura nos limites de  $10^{-4}$  a  $10^{-5}$  m, quando determinada à pressão atmosférica. Esta espessura caracteriza uma região bem delimitada no espaço que separa os gases reagentes dos gases queimados.

## II – MÉTODOS EXPERIMENTAIS

A determinação da velocidade fundamental de propagação implica na medida de mais uma grandeza, a superfície da chama ( $S_{ch}$ ). No caso de chamas fixas no espaço, as vazões dos gases reagentes podem ser determinadas com muita precisão e constância utilizando a técnica do colo sônico<sup>2</sup>.

A medida da superfície da chama está ligada diretamente com a definição da frente de combustão, que é evidenciada pela sua luminosidade mais ou menos intensa no visível ou no ultravioleta e que permite uma observação visual ou fotográfica. Esta delimitação da frente de combustão pelo método do queimador, que consiste em observar uma chama estacionária mantida no topo de um queimador convencional de forma cilíndrica ou retangular, pode ser feita basicamente por três métodos<sup>3</sup>:

(i) Observação direta da parte luminosa de chama, utilizando o lado da frente da chama que está voltado na direção dos gases reagentes;

(ii) Utilizando uma imagem Schlieren da chama (método estrioscópico);

(iii) Utilizando uma imagem de sombra (shadow) da chama.

Somente em algumas exceções a chama não é suficientemente intensa para impressionar a retina ou uma emissão fotográfica, porém a observação visual ou fotográfica direta, normalmente não fornece dados confiáveis, devido ao fato que a emissão de luz por parte da frente de reação é sempre mais intensa que aquela proveniente dos gases queimados imediatamente acima da chama. Por outro lado, a presença de uma emissividade reduzida dos gases queimados pode causar um aumento ou uma diminuição do limite da zona real e, por isso, outros métodos óticos são utilizados para determinar e medir a frente de chama.<sup>4</sup>

Como já descrito, a espessura da frente de chama é bastante pequena (da ordem de  $10^{-4}$  a  $10^{-5}$  m, à pressão atmosférica) e os gases queimados se encontram a uma temperatura na faixa de 2.000 a 3.000 K, o que implica que nesta zona exista um gradiente de temperatura da ordem de  $10^7$  a  $10^8$  K/m. O índice de refração dos gases sofre, na zona da combustão, uma variação resultante dos gradientes de temperatura e concentração que certos métodos óticos evidenciam. O principal método é o "Estrioscópio" criado por Toepler<sup>5</sup> e desenvolvido por Schardin<sup>6</sup> que se baseia no fato que os raios luminosos sofrem um desvio quando atravessam um meio ótico no qual existe um gradiente do índice de refração. Numa frente de chama este gradiente aparece essencialmente devido à evolução da temperatura<sup>7</sup>, pois o índice de refração é pouco influenciado pela modificação da natureza dos gases na zona de combustão.

Utilizando um sistema como o da figura 2 pode-se obter a imagem direta da chama (cone externo da fotografia 1) e através do método estrioscópico a imagem "Schlieren" (cone interno) resultante dos raios refratados devido ao gradiente do índice de refração. Estes dois cones delimitam a zona de reação. Para a determinação da superfície da chama considera-se uma superfície intermediária entre os dois cones.

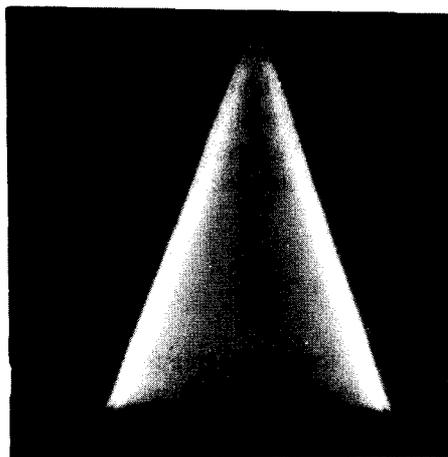


Foto 1.  $C_4H_6/O_2/N_2$ ;  $\mu = 1,00$ ;  $\alpha = 0,57$ . Butadieno e Oxigênio em quantidades estequiométricas; diluição 57% por nitrogênio.

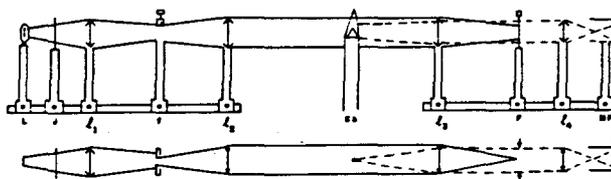


Fig. 2. Sistema utilizado para determinação da velocidade fundamental de propagação. Departamento de Química, UFRN.

- L: Lâmpada Philips 6513C/05-220V-750W
- J: Janela de vidro opaco
- $l_1$ : Lente convexa com distância focal de 0,10 m
- f: Fenda micrométrica
- $l_2$ : Fenda micrométrica
- $l_2$ : Lente convexa com distância focal de 0,25 m
- Ch: Chama estabilizada
- $l_3$ : Lente convexa com distância focal de 0,25 m
- F: Filamento estirado com espessura de  $10^{-3}$  m
- $l_4$ : Lente convexa com distância focal de 0,20 m
- MF: Máquina fotográfica tipo reflex

A luz proveniente da lâmpada (L) passa através da janela de vidro opaca (J), que tem por finalidade eliminar a imagem dos filamentos da lâmpada, passando em seguida na lente  $l_1$  que converge os raios sobre a fenda micrométrica (f) cuja função é fornecer um feixe paralelo e no mesmo sentido do queimador. Este feixe passa através da lente  $l_2$  de tal forma que ele seja perfeitamente paralelo ao passar através da chama estabilizada sobre o queimador. Na ausência da chama, o feixe paralelo deve ser convergido pela lente  $l_3$  exatamente sobre o filamento estirado (F). A largura da fenda deve ser regulada de modo que o feixe de raios paralelos ultrapasse, em alguns microns, a largura do filamento<sup>8</sup> de maneira que, na presença da chama, os raios refratados venham a formar a imagem "Schlieren". A lente  $l_4$  é utilizada somente para a focalização das imagens na máquina fotográfica (MF). A intensidade de luz proveniente da lâmpada e a abertura da fenda devem ser reguladas de tal modo que os cones interno e externo apresentem a mesma luminosidade.

Para cada chama, de composição fixa, são feitas em média três fotografias, com abertura e velocidade de exposição da máquina fotográfica reguladas de acordo com a luminosidade da chama estudada.

Antes e depois dos ensaios, são feitas fotografias de um padrão, (por exemplo um papel milimetrado), que tem por finalidade a determinação precisa das alturas das chamas.

Os negativos obtidos, para cada chama, são então ampliados em um ampliador fotográfico, sendo a ampliação obtida da ordem de 10 a 20 vezes do tamanho original da chama. As alturas são determinadas a partir de uma média dos negativos, sendo estas referidas a um cone intermediário entre o cone interno e o cone externo.

A partir da altura da chama, determina-se a área da chama utilizando-se a equação da área superficial do cone dada por:

$$S_{ch} = \pi R (R^2 + h^2)^{1/2} \quad (\text{eq. 9})$$

onde (R) igual ao raio da base do cone (raio do queimador em metros) e (h) é a altura da chama em metros.

A utilização de queimadores cilíndricos implica em deformações na imagem da chama tais como arredondamento do vértice da chama, achatamento da base e ligeira convergência da superfície na direção dos gases reagentes, em relação a um cone ideal, devido a variações das velocidades de escoamento com a distância ao eixo do tubo (figura 3a). A fim de eliminar estes problemas, recomenda-se o uso de queimadores de forma convergente (perfilado) que tornam a distribuição de velocidade mais uniforme ao longo de toda a seção do tubo, salvo, bem entendido, nas vizinhanças imediatas da parede. A imagem obtida desta maneira aproxima-se muito do cone ideal (totalmente linear) embora o topo da chama possa possuir ainda uma forma ligeiramente arredondada (figura 3b)<sup>9</sup>.

A determinação direta da espessura da frente de chama ( $e_0$ ) é praticamente impossível devido ao fato da emissão da luz por parte da frente de reação ser sempre mais intensa que aquela proveniente dos gases queimados imediatamente acima da chama. Por outro lado a espessura estrioscópica ( $e_s$ ) definida como sendo a distância entre o cone externo (imagem direta das chamas) e o cone interno (cone Schlieren) pode ser facilmente obtida utilizando uma ampliação do negativo obtido quando da determinação da velocidade fundamental de propagação. Esta distância pode ser precisamente obtida pela utilização de um microdensitômetro ótico ou com precisão menor, mas ainda aceitável (da ordem de  $\pm 5,0\%$ ) pela medida direta com um paquímetro.

Van Tiggelen e colaboradores<sup>8, 10, 11</sup>, baseados em grande número de estudos, mostraram que a relação entre a velocidade fundamental de propagação e a espessura da frente de chama, comparada com a relação entre a velocidade fundamental de propagação e a espessura estrioscópica, fornece uma relação para as espessuras do tipo:

$$e_s = a e_0 \quad (\text{eq. 10})$$

onde  $a \cong 4,7$ .

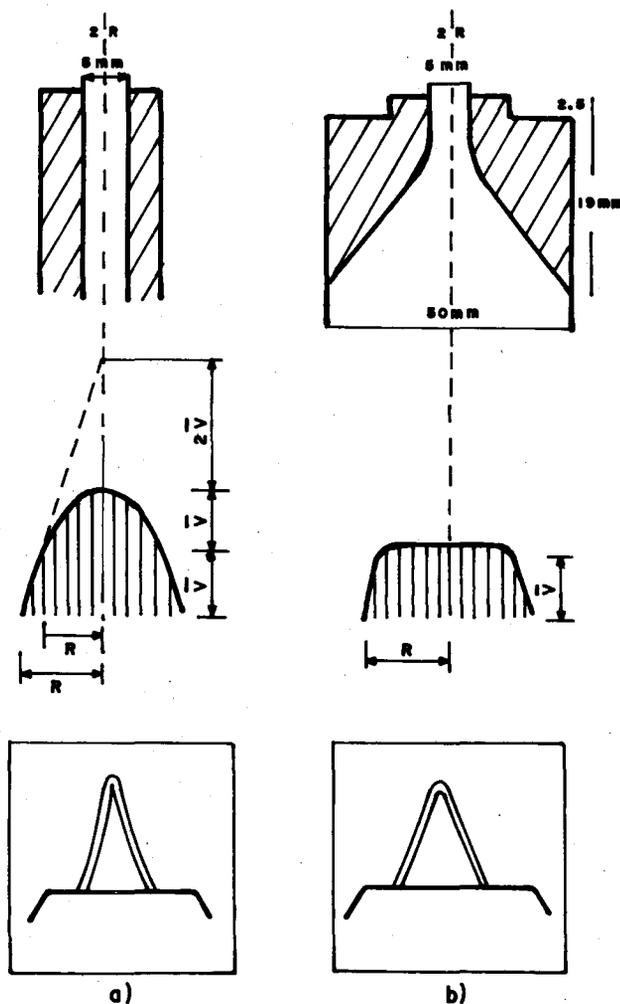


Fig. 3. Esquema representativo do queimador, perfil de velocidades e da chama para um queimador cilíndrico convencional (a) e para um queimador perfilado (b).

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o auxílio prestado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq e o Instituto de Atividades Espaciais do Centro Técnico Aeroespacial.

## BIBLIOGRAFIA:

1. A. Van Tiggelen, J.C. Balaceanu, J. Burger, G. de Soete, L. Sajus, B. Salé et P.J. Van Tiggelen; "Oxydation et Combustion" Tome I, p. 335, Edition Technip, Paris (1968).
2. H.Y.E. Safieh e F.N. Cruz, "Obtenção e Controle de Fluxos Gasosos Permanentes e Constantes – Uma aplicação de Nozzle Theory" Química Nova, 7, 131 (1984).
3. J.W. Linnett; Fourth Symposium (International) on Combustion; The Combustion Institute, p. 20 (1953).

- <sup>4</sup> A. Van Tiggelen, J.C. Balaceanu, J. Burger, G. de Soete, L. Sajus, B. Salé et P.J. Van Tiggelen; "Oxydation et Combustion" Tome I, p. 339; Edition Technip, Paris (1968).
- <sup>5</sup> A. Toepler; Pogg. Ann. Phys. U. Chem. 127, 556 (1866), *ibid*, 131, pp. 33 e 180, (1867).
- <sup>6</sup> H. Schardin; *Ergebn. Exakt. Naturwissendch*, 20, 303, (1942).
- <sup>7</sup> A. Van. Tiggelen, J.C. Balaceanu, J. Burger, G. de Soete, L. Sajus, B. Salé et P.J. Van Tiggelen; "Oxydation et Combustion" Tome I, p. 340, Edition Technip, Paris (1968).
- <sup>8</sup> A. Van Tiggelen et J. Van Wonterghem; *Bulletin des Sociétés Chimiques Belges*, 63, 235, (1954).
- <sup>9</sup> A. Van Tiggelen, J.C. Balaceanu, J. Burger, G. de Soete, L. Sajus, B. Salé et P.J. Van Tiggelen; "Oxydation et Combustion" Tome I p. 343; Edition Technip, Paris (1968).
- <sup>10</sup> J. Van Wonterghem, P.H. Sloommaekers et A. Van Tiggelen; *Bulletin des Sociétés Chimiques Belges*, 65, 899 (1956).
- <sup>11</sup> A. Van Tiggelen, J.C. Balaceanu, J. Burger, G. de Soete, L. Sajus, B. Salé et P.J. Van Tiggelen; "Oxydation et Combustion" Tome I, p. 518, Edition Technip, Paris (1968).