

Estudo Experimental da Instabilidade de Chamas Difusivas

**ENIZETE A. GONÇALVES
GABRIELA S. MOURA
LUIZ E M. LIMA
FERNANDO F. FACHINI**

*Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 12630-000, Cachoeira
Paulista, São Paulo, Brasil.*

Sumário

Este trabalho apresenta a verificação experimental da multiplicidade dos regimes de queima e da estabilidade de chamas difusivas. Para isso utiliza-se da queima parcialmente confinada de uma vela. O confinamento é alcançado por meio de um duto de vidro. Através da variação na distância entre a base do pavio da vela e a saída do duto consegue-se variar a quantidade disponível de oxigênio à chama. Quando o pavio está completamente fora do duto, observa-se uma chama completamente estável. À medida que a vela entra no duto, nota-se um regime oscilatório de queima, visualmente a chama passa de um estado visível a um invisível e assim sucessivamente. Se a distância entre a posição da vela com relação à saída do duto aumentar, observa-se o regime instável de queima: e a extinção da chama.

Introdução

Em geral, chamas podem ser divididas em duas classes: Chamas pré-misturadas e chamas difusivas. A chama pré-misturada é caracterizada pela pré-mistura do combustível gasoso e ar antes que ocorra a ignição. Por outro lado, a chama difusiva é caracterizada pelo encontro do ar e combustível coincidentemente com a ocorrência da combustão. Como exemplo vela, fósforo, queimador tipo turbina a gás e outros. A queima da vela é um processo de combustão que é freqüentemente utilizada para a visualização imediata das mais diversas características fenomenológicas da chama difusiva. Tem sido utilizada por pesquisadores para estudar estrutura, efeitos de campos elétricos, oscilação espontânea, fenômeno de variação na luminosidade e extinção da chama [1]. Neste trabalho a multiplicidade do regime de queima e a estabilidade de chamas difusivas são analisadas experimentalmente com a utilização de uma vela parcialmente confinada num duto de vidro.

A multiplicidade do regime de queima e a estabilidade de chamas difusivas foram estudadas originalmente em meados da década de 60 [2]. A geometria é retangular porque o duto utilizado é retangular. A posição do duto é vertical e suas paredes consideradas adiabáticas. Neste sistema o combustível é injetado pela parte inferior do duto e o oxigênio é presente no ambiente fora deste. Com este modelo relativamente simples, pode-se analisar numericamente o regime instável de queima e a extinção da chama quando a condição de fronteiras adiabáticas é alterada ou o número de Lewis Le (razão das velocidades de condução de calor e de difusão de massa) excede a unidade.

O mesmo problema foi estudado analiticamente com o emprego de métodos assintóticos [3,4]. Os resultados confirmaram aqueles obtidos previamente e conseguiram determinar faixas de influência do número de Damköhler D (razão do tempo mecânico e o tempo químico). Foram identificados dois valores para o número de Damköhler, D_a e D_o . Para $D < D_a$, chama se extingue. Entretanto, para as condições tais que $D_a < D < D_o$, os resultados mostraram múltiplas soluções para o regime de queima. E para $D > D_o$, o regime de queima é estável. Expressando a taxa de queima em função do número de Damköhler obtém-se curvas em forma de S, na volta inferior do S corresponde a ignição e na volta superior do S corresponde a extinção.

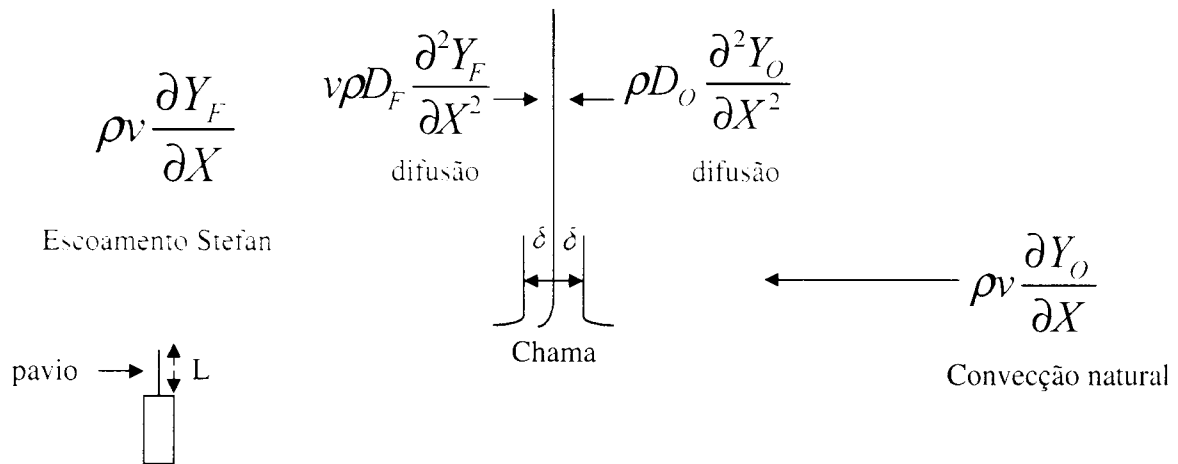
Com o emprego do método da continuação, apropriado para o estudo de soluções instáveis, todos os regimes de queima foram descritos completamente [5,6].

Até então, todas as análises trataram da estabilidade das soluções estacionárias. Entretanto, mais recentemente, o problema da chama difusiva confinada foi resolvido de forma a mostrar o regime oscilatório [7] e também o regime de chamas celulares [8].

Neste estudo experimental busca-se uma forma simplificada de observar os fenômenos anteriormente descritos. O queimador de Kirkbey e Schmitz [2] é substituído por uma vela dentro de um duto cilíndrico. Ao variar a posição da vela no interior do duto consegue-se variar a quantidade de oxigênio que chega a chama. Com isso pode-se estudar alguns regimes instáveis de queima: a queima no regime oscilatório e a extinção da chama.

Formulação do Modelo

Esquema do transporte de combustível e oxidante para a chama.



onde δ = espessura da chama

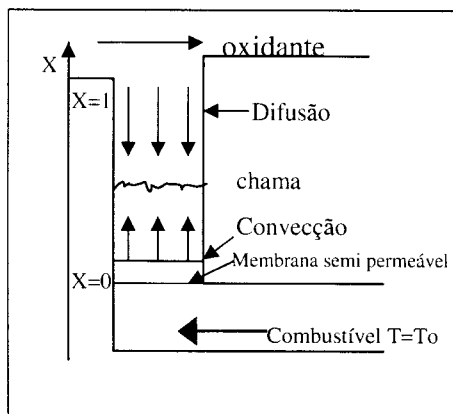


Figura 1: Configuração do modelo de Kirkbey e Schmitz

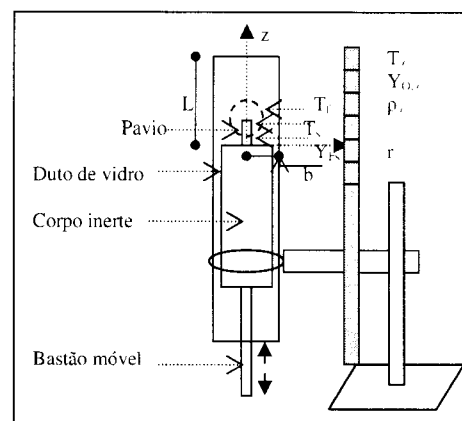


Figura 2: Configuração do modelo proposto neste presente trabalho

A configuração considerada no desenvolvimento do modelo de Kirkbey e Schmitz, mostrada na Figura 1, consiste em uma chama difusiva estruturada numa câmara de comprimento finito. O combustível é injetado pela parte inferior da câmara, por convecção, a uma taxa M constante. Temperatura e concentrações são assumidas constantes. Na parte superior da câmara, um

escoamento transversal de ar está cruzando a saída do duto permitindo um processo difusivo do oxidante na câmara. O modelo proposto neste trabalho como mostra a Figura 2, consiste em uma vela comum com um bastão móvel inseridos em um duto cilíndrico de vidro. O combustível entra pela parte inferior do duto por convecção e o oxidante, por difusão, pela parte superior do duto. O experimento foi realizado em condições atmosféricas.

Note que quando a vela é acesa, o calor (vindo de um fósforo ou fonte de ignição) derrete a parafina, um hidrocarboneto pesado, na base do pavio. Devido o pavio ser um material poroso, a parafina líquida sobe por ação da capilaridade e então se vaporiza. Devido à mudança da fase da parafina, de fase líquida para fase gasosa, um escoamento do tipo Stefan é gerado e é por ele que a parafina gasosa é levada para a chama (transporte convectivo). Entretanto nas proximidades da chama o transporte difusivo é o principal responsável por levar o combustível ao encontro do oxigênio também trazido pelo transporte difusivo no lado do ambiente para a chama.

Foram assumidas as seguintes condições para o modelo matemático: escoamento laminar, estacionário e unidimensional. Paredes do duto adiabáticas com as variáveis consideradas, Y_o , Y_F e T (respectivamente fração mássica do oxidante fração mássica do combustível e temperatura) adimensionalizadas. Densidade, ρ , difusividade, D , viscosidade, μ , calor específico à pressão constante, c_p , e condutividade térmica, λ , são assumidos constantes, e pressão atmosférica.

Com as suposições acima, o estado estacionário é governado pelas seguintes equações diferenciais adimensionalizadas:

$$\begin{aligned} -Y_F'' + MY_F' &= -DY_oY_F e^{-\theta/T}, \\ -Le_oY_o'' + MY_o' &= -DY_oY_F e^{-\theta/T}, \quad x \in]0,1[\\ -Le_FT'' + MT' &= DY_oY_F e^{-\theta/T}, \end{aligned} \quad (1)$$

com condições de contorno:

$$MY_F(0) - Y_F'(0) = M, \quad MY_o(0) - Le_oY_o'(0) = 0, \quad MT(0) - Le_FT'(0) = MT_o \quad (2)$$

e

$$Y_F(1) = 0, \quad Y_o(1) = Y_{o1}, \quad T(1) = T_1, \quad (3)$$

onde T_0 e T_1 são temperaturas fornecidas na entrada e na saída do duto, Y_{O1} é a fração mássica do oxidante na parte superior, θ é a energia de ativação na reação. Le_F é o número de Lewis do combustível, enquanto Le_o é o do oxidante. Em vários casos observa-se geralmente $Le_o = Le_F = 1$. O problema (1) decresce de 3 para 1 equação, em termos da temperatura do problema temos:

$$-T'' - MT' = DY_O Y_F e^{-\frac{\theta}{T}}, \quad MT(0) - T'(0) = MT_0, \quad T(1) = T_1, \quad (4)$$

enquanto Y_O e Y_F podem ser expressadas em função da temperatura pela relação de Schvab-Zeldovich:

$$Y_O(x) = T_0 - T(x) + (Y_{O1} + T_1 - T_0)e^{M(x-1)}, \quad (5)$$

$$Y_F(x) = T_0 - T(x) + 1 - (1 + T_0 - T_1)e^{M(x-1)}.$$

Os dois parâmetros do problema são a taxa de injeção M do combustível, e o número de Damköhler D . O objetivo dessa análise é a resolução física R , taxa de combustível não queimado, em função destes dois parâmetros M e D .

R é definido por:

$$R = -Y_F'(1) / M. \quad (6)$$

Materiais e Métodos

Para a realização desse experimento foram utilizados uma vela comum de parafina, um duto de vidro, com diâmetro próximo ao da vela, um bastão de sustentação fixado na base da vela, um suporte para segurar o duto, fósforos, uma régua de metal, escala, e uma câmera digital.

A metodologia utilizada consistiu de observações na forma, cor, luminosidade da chama em diferentes distâncias L , entre a base do pavio e a saída do duto, bem como as oscilações nas bordas de chama e também a extinção da chama.

Resultados e Discussão

O processo de transporte do oxidante depende das escalas características espaciais consideradas. Para a maior escala, muitas vezes a espessura da chama, a convecção é a responsável por trazer oxidante para a proximidade da chama. Nesta região, numa escala espacial da ordem da espessura da chama, a difusão se encarrega de transportar o oxidante para a chama. A convecção é gerada pelo empuxo dos gases quentes: produtos da combustão e o inerte diluente. Quando a vela é introduzida no duto, o confinamento limita o processo de transporte por convecção. A partir de uma posição da vela no duto, a convecção cessa e o oxidante é levado somente pela difusão. Entretanto, este processo de transporte é rápido somente na condição encontrada apenas na proximidade da chama de grande gradiente da concentração. A grande distância, o transporte por difusão é muito lento.

Portanto, a gradual introdução da vela no duto reduz o transporte convectivo e o transporte difusivo não consegue suprir todo o oxidante para a combustão. Ao mesmo tempo que o transporte convectivo de oxidante diminui com a introdução da vela no duto, o número de Damkohler D diminui também. A combinação da redução do transporte de oxidante à chama e do número de Damkohler D faz o problema apresentar múltiplas soluções. Um indicador da multiplicidade das soluções é o regime oscilatório da chama e a extinção da combustão. Esse processo descrito acima, da oscilação do regime de combustão, pode ser observado pela seqüência de figuras 3(a) a 3(i). Nestas figuras, pode-se notar também a distorção da chama. Isto se deve a interação do campo fluido (vórtices) externo a saída do duto com o topo da chama.

A luminosidade da chama é gerada pelas partículas de fuligem emitindo na banda da radiação térmica.

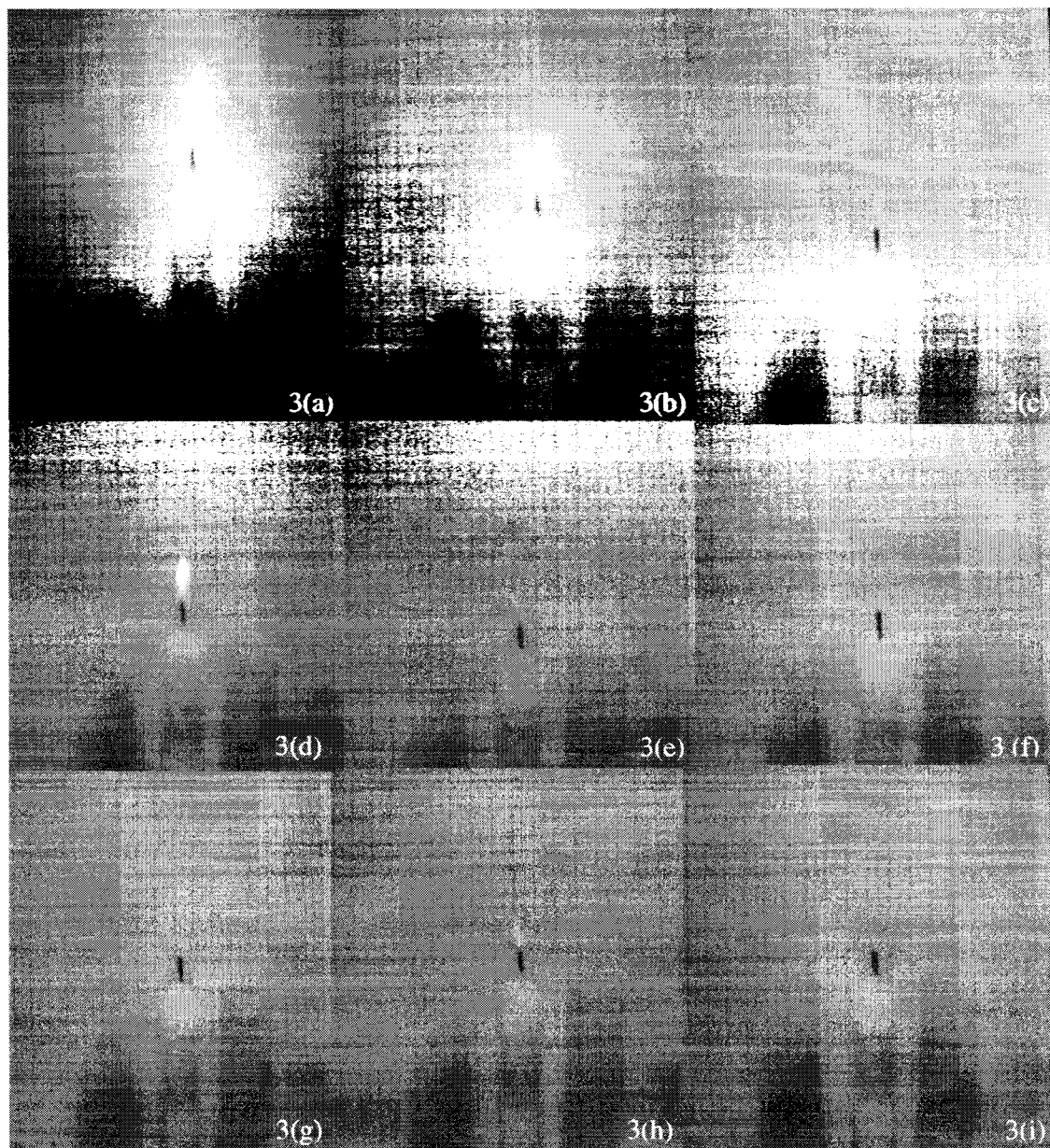


Fig. 3. Oscilação e Extinção da chama da vela devido à variação da distância entre a base do pavio e a saída do duto.

Na próxima figura, fotos 4(a) a 4(e), pode-se apreciar a seqüência do regime de combustão sem oscilação periódica. Neste caso, a introdução sucessiva do vela no duto causa a redução na combustão até a extinção da chama. Notar que o ambiente tem oxidante suficiente para consumir toda a parafina da vela, porem o exinticao ocorre porque o processo de transporte difusivo não é rápido o suficiente em escalas espaciais grandes.

Importante observar o comportamento da fuligem. Com a diminuição da taxa de reação, a temperatura da chama diminui e nestas condições a formação de fuligem é reduzida. A cor azulada da chama é um indicativo de chama limpa.

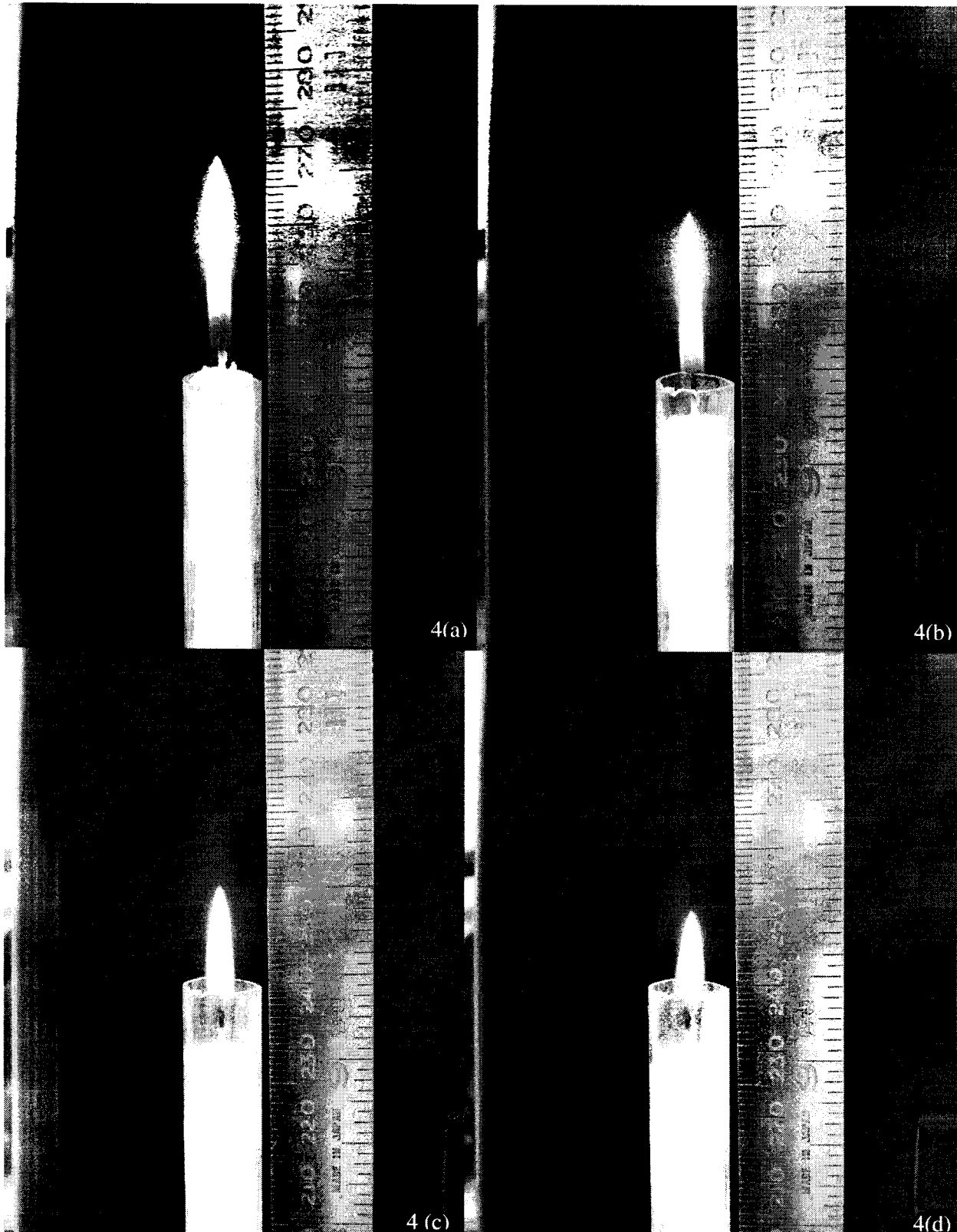


Fig. 4. Oscilação na cor e luminosidade da chama da vela devido à variação da distância entre a base do pavio e a saída do duto.

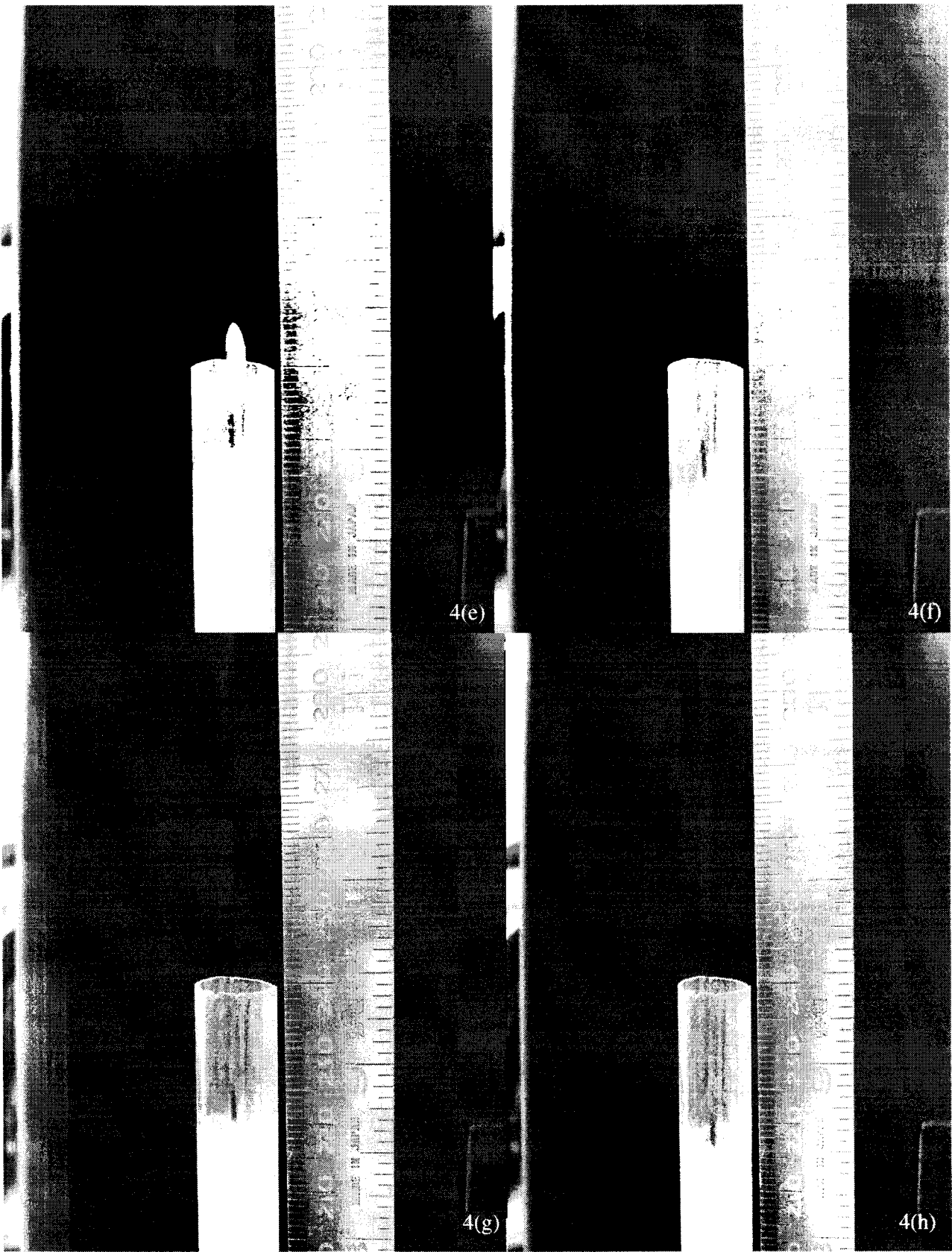


Fig. 4. Oscilação na cor e luminosidade da chama da vela devido à variação da distância entre a base do pavio e a saída do duto.

Conclusão

Devido a introdução da vela no duto, o número de Damkohler e a concentração de oxigênio diminuíram. Oscilações, mudanças na cor e luminosidade, bem como a extinção da chama puderam ser observadas. Neste modelo o principal transporte de oxidante para a chama é realizado pelo processo de difusão. O resultado experimental concordou com a teoria.

Referências Bibliográficas

1. Burke. S.P. e Schumann. T. E. W. *Diffusion Flames. Combustion Utilities Corporation.*
2. Kirkbey, L.L., Schmitz, R.A., (1966) An analytical Study of the Stability of a Laminar Diffusion Flame, *Combustion and Flame*, 10:205-220.
3. Alsairafi, A., Lee, S., T'ien, J. S., (2004), Modeling Gravity effect on diffusion flames stabilized around a cylindrical wick saturated with liquid fuel. *Combust. Sci. and Tech.* 176:2165-2191.
4. Mansurov, Z. A. (2005) Soot formation in combustion processes. 41:727-744.
5. Heitor, M.V, Taylor, A.M.K.P e Whitelaw, J.H.(1984). Influence of confinement on combustion instabilities of premixed flames stabilized on axisymmetric baffles.
6. Mitchell, R. E. (1980) Experimental and numerical investigation of confined laminar diffusion flames. *Combustion and Flame*.37:227-244.
7. NASA SP-8113 (1974). *Liquid rocket engine combustion stabilization devices.*
8. Zinn, B.T. (1992) Pulse combustion: recent applications on research issues. *Proc. int. symposium on combustion.* 24.
9. Buckmaster, J. (2002) Edge-flames. *Progress in Energy and Combustion Science* 28:435-475.
10. Buckmaster, J. (1996) Edge-flames and their stability. *Combust. Sci. and Tech.* 115: 41-68.
11. Jiang, X, Luo, K. H. (2003) Dynamics and structure of transitional buoyant jet diffusion flames with side-wall effects. *Combustion and Flame.* 133:29-45.
12. Williams, F. A. (1985) *Combustion Theory.* 2nd ed. Addison-Wesley, Menlo Park, CA, 1985. Pp. 46.