

Um Estudo Experimental do Efeito do Número de Grashof em Chamas Difusivas

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

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

Sumário

Este trabalho tem por objetivo estudar a influência do número de Grashof em chamas difusivas através da observação experimental da queima de uma vela. Também será analisada a ordem de magnitude dos termos das equações de conservação. É apresentado que a diminuição gradativa do comprimento do pavio da vela resulta na diminuição da altura da chama e do efeito do número de Grashof. Como consequência, a uma certa altura do pavio (4 mm) o efeito da flutuabilidade é desprezado, tendo-se a mudança da forma de chama elíptica para quase esférica, quase não apresentando formação de fuligem, simulando-se assim as condições de microgravidade. Portanto, foi concluído que o conhecimento da influência da razão entre forças de empuxo e forças viscosas, representadas pelo número de Grashof, é de grande importância e útil no processo da combustão.

Introdução

As chamas podem ser divididas em duas classes: chamas pré-misturadas, nas quais combustível e oxidante são pré-misturados antes que a ignição ocorra, e em chamas nas quais combustível e oxidante encontram-se na zona de reação. Para essa segunda classe de chamas é aplicado o termo "chamas difusivas". A chama de um fósforo, de lâmpadas a óleo, do queimador tipo turbina a gás e de uma vela exemplificam essa classe de chama. ^[1]

No processo de formação da chama difusiva em uma vela apresentam-se como combustível e oxidante a parafina e o oxigênio respectivamente. Quando a vela é acesa, o calor vindo (**DA CHAMA OU**) de uma fonte de ignição (um fósforo, por exemplo), derrete a parafina, um hidrocarboneto pesado, (**EMPREGADA NO PAVIO OU**) na base do pavio. Como o pavio é um material poroso, a cera líquida sobe por ação da capilaridade em torno do volume deste e, então, vaporiza-se (**NUMA TAXA PROPORCIONAL AO FLUXO DE CALOR PROVENIENTE DA CHAMA**) [*por ação do calor cedido pela chama*]. Esse calor liberado aumenta a temperatura dos gases e reduz sua densidade, surgindo então **UMA CONVECCAO NATURAL** [*flutuabilidade*] (tendência ascensional dos gases quentes que decorre, principalmente, da menor densidade destes em relação à densidade do ar circulante). A (**CONVECCAO NATURAL**) [*flutuabilidade*] estabelece **UM ESCOAMENTO** [*correntes de convecção*] **ASCENDENTE QUE DA A FORMA DA CHAMA E UM NA DIRECAO RADIAL** que arrastam oxigênio para as vizinhanças da chama. Esse oxigênio é (**TRANSPORTADO PRINCIPALMENTE pelo PROCESSO DA difusão**) [*arrastado posteriormente*] até a chama (**ONDE REAGE COM A PARAFINA**) . [*resultando em sua combustão com a parafina*]. [*A força de*] (**A CONVECCAO NATURAL, PRODUZIDA PELA DIFERENCA DE DENSIDADES E FORCA DA GRAVIDADE**) [*escoamento flutuante depende do nível gravitacional e é esperado que*] (**DETERMINA**) a forma, o tamanho e a taxa de queima da chama [*irão variar com a gravidade*]. O processo de vaporização esfria o pavio exposto protegendo-o do superaquecimento. [A chama, por sua vez, fornece a realimentação do calor para completar o ciclo.] ^[2]

Durante a queima da vela também pode ser observada a formação das chamadas "bordas de chama". As bordas de chama são características comuns de combustão difusiva. Por exemplo, uma chama propagando sobre um leito combustível (**APRESENTA UMA BORDA NA FRENTE DA CHAMA**) [*terá conduzido a borda a uma posição em algum lugar acima do leito*] (Fig.1 a). (**NO CASO DE UMA**) [*Uma*] vela queimando em microgravidade, (**A CHAMA**) terá uma forma esférica com uma borda circular bem definida (Fig. 1 b) ^[3]. (**JÁ**) (já) que, nessas condições, a única convecção presente é o escoamento Stefan, gerado pelo processo de mudança de fase e expansão térmica do combustível, (**QUE TEM SIMETRIA ESFERICA**). O oxigênio chega à zona de reação por difusão molecular. Esse processo lento muda a forma, cor, temperatura e o limite de extinção da chama. ^[2] [PQ O PROCESSO DE DIFUSAO FAZ TUDO ISSO?]

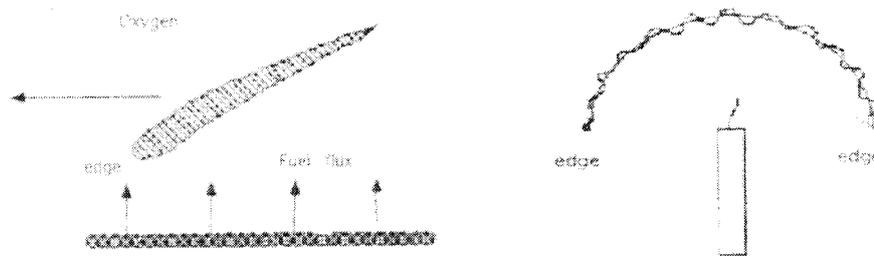


Figura 1. (a) Chama estendida sob um leito combustível; (b) chama esférica de uma vela em condições de microgravidade.

Na queima entre a parafina e o oxigênio do ar, a quantidade de oxigênio é aproximadamente 20% e por isso a combustão é incompleta. Nesse caso, devido à falta de oxigênio [VC ACHA QUE O OXIGÊNIO CONTIDO NA ATMOSFERA É INSUFICIENTE PARA QUEIMAR A PARAFINA CONTIDA NUMA VELA? SE TUA RESPOSTA FOR AFIRMATIVA, A FRASE ANTERIOR ESTÁ CORRETA. SE FOR NEGATIVA, TUA RESPOSTA ESTÁ ERRADA], parte do carbono não é transformada em CO_2 , havendo, portanto, a formação de carbono (grafite). Os produtos da combustão incompleta são frequentemente C, CO, CO_2 e H_2O . Assim, a formação de fuligem pode ser interpretada como combustível não queimado liberado da chama para a atmosfera, frequentemente observada na combustão de hidrocarbonetos. O processo da formação de fuligem consiste da pirólise do combustível e reações de oxidação, formação do primeiro anel de benzeno e posterior formação de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, aparecimento da primeira partícula, crescimento das partículas de fuligem devido às reações das espécies da fase gasosa, coalescência da partícula, aglomeração e oxidação. [MELHORE A EXPLICAÇÃO DOS MECANISMOS DE FORMAÇÃO DE FULIGEM] Quando essas partículas passam através da chama, elas irradiam como corpos negros. Isso é responsável não só pela característica luminosa como também pela transferência de energia radiante. [4]

Como na queima de uma vela tem-se uma convecção natural, isto é, o fluido movimenta-se por si próprio [COMO O FLUIDO SE MOVIMENTA POR SI PRÓPRIO?] influenciado por efeitos gravitacionais associados às diferenças de densidade, as forças de inércia não são importantes [PQ? JUSTIFIQUE]. Portanto, esse regime de escoamento é caracterizado pelo número de Grashof que estabelece a razão entre as forças de empuxo e forças viscosas:

$$\text{Gr} = \rho^2 L^3 g / \mu^2,$$

onde g é a aceleração da gravidade, ρ a densidade, μ a viscosidade cinemática do gás, L é o comprimento característico da geometria em estudo. [5]

Em estudo anterior de chama difusiva adjacente a um pavio, Alsairafi, Lee e T'ien [2] [ATE ESTE PONTO DO TEXTO VC NÃO USOU O NOME DOS AUTORES DOS ARTIGOS, PQ FAZ ISSO AGORA? VC PRECISA MANTER A COERÊNCIA NA CITACÃO DAS REFERÊNCIAS] apresentaram um modelo em que as equações de momento de Navier-Stokes completas, com termos de forças de corpo, estão incluídas, permitindo o estudo do efeito da gravidade na chama estabilizada no pavio (com gravidade zero é o caso limitante). [PQ VC USOU O PORTANTO, SE VC NÃO ESTÁ CONCLUÍDO NADA ANTERIORMENTE CITADO?] Portanto, o calor detalhado [O QUE CALOR DETALHADO?] e o fenômeno de transferência de massa dentro do pavio poroso não são tratados. Ao invés disto, é assumido que uma camada fina de combustível líquido cobre toda a superfície do pavio durante o processo de queima. [NÃO ENTENDI A LIGACÃO COM A FRASE ANTERIOR] Esse é o caso limitante no qual o processo de transferência de massa no pavio é muito mais rápido que o processo de evaporação na superfície do pavio. [2]

O objetivo deste trabalho é estudar o efeito do número de Grashof em chamas difusivas, tendo em vista a relação da variação no comprimento do pavio com a combustão, utilizando-se a queima de uma vela comum.

Formulação do Modelo

A configuração considerada no desenvolvimento do modelo é mostrada na Figura 2. O modelo consiste de um pavio cilíndrico poroso apoiado sobre o topo de um corpo cilíndrico inerte. O experimento foi realizado em condições atmosféricas (ar ilimitado e gravidade no sentido negativo da direção z).

$$\left(U \frac{\partial V}{\partial R} + V \frac{\partial V}{\partial Z} \right) = \frac{1}{\text{Re}} \left[\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial V}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 V}{\partial Z^2} \right] \quad (7)$$

Onde: $\text{Gr} = \rho^2 L^3 g / \mu^2$ (número de Grashof)
 $\text{Re} = \rho L u_r / \mu$ (número de Reynolds)

As equações de conservação das espécies e energia adimensionalizadas podem ser escritas como:

$$\left(U \frac{\partial Y_o}{\partial R} + V \frac{\partial Y_o}{\partial Z} \right) = \frac{1}{\text{Pe}} \left[\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial (Y_o / L_o)}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 (Y_o / L_o)}{\partial Z^2} \right] - S \overline{w} \quad (8)$$

$$\left(U \frac{\partial Y_f}{\partial R} + V \frac{\partial Y_f}{\partial Z} \right) = \frac{1}{\text{Pe}} \left[\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial (Y_f / L_f)}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 (Y_f / L_f)}{\partial Z^2} \right] - S \overline{w} \quad (9)$$

$$\left(U \frac{\partial \theta}{\partial R} + V \frac{\partial \theta}{\partial Z} \right) = \frac{1}{\text{Pe}} \left[\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} \right] - S \overline{w} \quad (10)$$

Onde: $\text{Pe} = \text{Lu} / D\lambda$ (número de Peclet)

$$\overline{w} = \frac{wL}{\rho u} \quad (11)$$

As condições de contorno do problema, que estão relacionadas com o conjunto de equações adimensionalizadas logo acima, são as seguintes:

- Na direção radial

$$\text{em } R = 1 \quad \rightarrow \quad y_o = 0, y_f = Y_{Fs} \quad \text{e } \theta = 1; \quad (13)$$

$$\text{em } R = R_{\text{máx}}, \quad \rightarrow \quad y_o = Y_{O_{\infty}}, y_f = 0, \theta = T_{\infty} / T_b, U = 0 \text{ e } \partial V / \partial R = 0 \quad (14)$$

- Na direção axial

$$\text{em } Z = 1, \quad \rightarrow \quad y_o = 0, y_f = Y_{Fs} \quad \text{e } \theta = 1 \quad (15)$$

$$\text{em } Z = Z_{\text{máx}}, \quad \rightarrow \quad y_o = Y_{O_{\infty}}, y_f = 0, \theta = T_{\infty} / T_b, V = 0 \text{ e } \partial U / \partial Z = 0 \quad (16)$$

Materiais e Métodos

Para a realização desse experimento foram utilizados: vela comum de parafina, suporte para a vela, tesoura para cortar o pavio da vela nos diferentes comprimentos, escala metálica para medir a altura do pavio, fósforos e câmera digital para registrar as etapas do presente estudo.

A metodologia utilizada consistiu de observações na forma, cor, luminosidade da chama em diferentes comprimentos de pavio.

Resultados e Discussão

Durante as etapas da reação, a parafina é submetida à pirólise, formando moléculas menores e radicais constituídos de carbono e hidrogênio. Os átomos de hidrogênio são mais leves, portanto reagem com o oxigênio mais rapidamente. Os átomos de carbono, além de estarem em excesso, são mais pesados e lentos. Portanto, devido à deficiência de oxigênio, parte do carbono não é transformada em CO_2 , transformando-se em outras partículas que recebem o nome de fuligem. Essas partículas ficam incandescentes em contato com a chama, caracterizando sua cor amarelada.

Qualquer que seja a posição da vela, o fogo sempre se mantém no sentido horizontal. Os gases quentes da combustão, por serem menos densos que o ar, sofrem menor ação da força da gravidade, portanto sobem e provocam o alongamento da chama, arrastando também as partículas originadas (dióxido de carbono, fuligem e vapor de água). O ar frio é atraído para a chama devido às correntes de convecção, realimentando o processo de combustão. Portanto, a convecção do ar ocorre graças ao efeito da gravidade. Sem ela, não há o movimento constante do ar frio, carregando oxigênio para a chama.

As cores na chama fornecem muitas informações sobre o que está acontecendo no processo e pode ser observada na Figura 3. A combustão ocorre na estreita faixa que circula a superfície da chama e é a região mais quente. A parte amarela e branca no topo da chama indica a presença do carbono incandescente. O interior escuro denota temperaturas mais frias e carência de oxigênio. A parte invisível no centro da chama contém uma nuvem de gases que vaporizaram, mas ainda não queimaram.

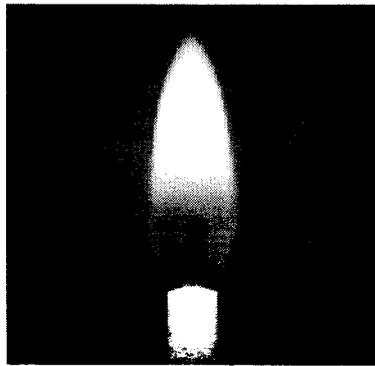


Figura 3: Coloração da chama de uma vela. Amarelo claro (1200°C); Branco (1400°C); Vermelho escuro (1000°C); Laranja (800°C).

Conforme figura 4, durante o experimento pode-se observar que a diminuição do comprimento do pavio, L , acarretou diminuição do comprimento da chama e, conseqüentemente, diminuição do valor do número de Grashof. Os resultados são apresentados pelo gráfico 1, tomando-se como valores $\rho = 2,75 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-3}$, $g = 9,81 \text{ cm s}^{-2}$, $\mu = 4,10 \times 10^{-4} \text{ g (cm.s)}$. Valores iniciais: $L = 15 \text{ mm}$, $Gr_{ref} = 14895$.

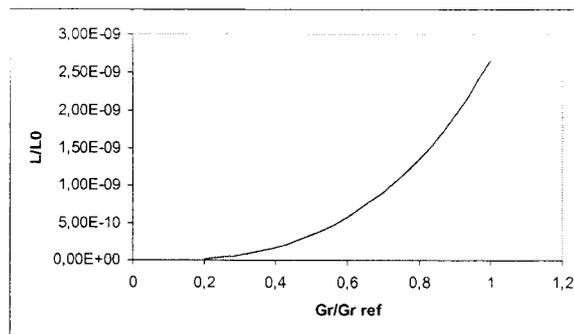


Gráfico 1: Comportamento da diminuição do comprimento do pavio.

Para um comprimento do pavio de 4 mm, número de Grashof pequeno, o vapor da parafina permanece ao redor do mesmo e o formato da chama não é mais alongado. Nestas condições, o gás não é mais leve que o ar frio e, portanto, não sobe. A convecção deixa de existir e o transporte dos produtos de combustão e dos gases é efetuado por um processo muito mais lento, que é a difusão molecular. O resultado é uma chama pequena, quase invisível, em forma globular, quase uma esfera, uma vez que a difusão ocorre igualmente em todas as direções. A verdadeira combustão ocorre unicamente na superfície da esfera, onde a parafina combustível da vela pode se misturar com o oxigênio do ar exterior. Como rapidamente a chama gera calor, conseqüentemente, a temperatura da chama é abaixada a tal extensão que quase nenhuma fuligem é formada, o que é evidenciado por uma chama azulada. Explicar melhor. Assim, verificou-se que uma redução de até 1/3 no comprimento do pavio acarreta uma redução de 1/27 no número de Grashof. Uma redução ainda maior no tamanho do pavio deixaria o termo de forças de gravidade tão pequeno que permitiria a desconsideração de sua influência no processo de combustão, desprezando-se o efeito da flutuabilidade.

Figura 4: Queima da vela em diferentes comprimentos de pavio

Portanto, uma vela com pavio curto em gravidade normal é interpretada como sendo um decréscimo na taxa de alimentação do combustível pelo pavio devido à limitação de transferência de massa para dentro do mesmo. A transferência de massa no pavio poroso afeta o comprimento da chama. Assumindo que o mesmo esteja saturado, num certo limite, a transferência de líquido é muito mais rápida que a transferência de calor da fase gasosa, o que corresponde à queima de uma vela em gravidade reduzida.

Conclusão

O número de Grashof é diretamente proporcional à aceleração da gravidade e ao comprimento do pavio. Para uma considerável diminuição no valor de um desses parâmetros, o número de Grashof pode se tornar tão insignificante que o termo de força de gravidade na equação de conservação de momento passa a ter uma influência muito pequena no processo de combustão. Como resultado desta observação, podemos obter uma chama aproximadamente esférica.

A redução no comprimento do pavio tem um efeito semelhante à realização de experimentos em microgravidade, sendo que em microgravidade ($g \sim 10^{-6}$), a ordem de magnitude do efeito é muito menor que a observada no experimento realizado. Estendendo-se os resultados experimentais às condições em gravidade reduzida, fica compreendido o comportamento das chamas difusivas em condições de microgravidade a partir deste trabalho.

Referências Bibliográficas

1. Burke, S.P., Schumann, T. E. W.: *Diffusion flames*. Proceedings of the first and second symposium on combustion, The Combustion Institute, 1965, pp. 2-11.
2. Alsairafi, A., Lee, S., T'ien, J. S. *Modeling gravity effect on diffusion flames stabilized around a cylindrical wick saturated with liquid fuel*. Combust. Sci. and Tech, Vol. 176, 2004, pp. 2165-2191.
3. Buckmaster, J.: *Edge-flames and their stability*. Combust. Sci. and Tech, 1996, pp. 115: 41-68.
4. Mansurov, Z. A.: *Soot formation in combustion processes. . Combustion, Explosion and Shock Waves*, Vol. 41 (6), 2005, pp. 727-744 (18).
5. Willians, F. A. *Combustion theory*, 2nd ed., Addison-Wesley, Menlo Park, C.A. 1985, pp. 52-69.