

## Estudo experimental das dimensões de chamas difusivas produzidas por velas

## Experimental study of the diffusion flames dimensions produced by candles

**Jessilene Coutinho da Silva**

[jessilene@utfpr.edu.br](mailto:jessilene@utfpr.edu.br)

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

**Luiz Eduardo Melo Lima**

[lelima@utfpr.edu.br](mailto:lelima@utfpr.edu.br)

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

### RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo realizar um estudo experimental das dimensões (altura e diâmetro) de chamas de vela. A metodologia adotada consistiu em realizar experimentos para avaliar as dimensões das chamas de vela em função da variação do comprimento do pavio. Para coleta de dados, foram tiradas pelo menos cinco fotografias de cada chama de vela, apoiada sobre uma base horizontal, durante o processo de queima. Os resultados obtidos experimentalmente foram comparados com resultados obtidos a partir de correlações da literatura, apresentando comportamentos semelhantes. As dimensões das chamas de vela aumentaram com o aumento do comprimento do pavio. Foi observado também que quanto menor o pavio, a chama apresenta um formato aproximadamente esférico e uma maior região de coloração predominantemente azulada. Por outro lado, quanto maior o pavio, a chama apresenta um formato mais elíptico e uma maior região de coloração predominantemente amarelada. A comparação dos resultados experimentais com as correlações da literatura apresentou uma satisfatória concordância.

**PALAVRAS-CHAVE:** Chamas difusivas. Dimensões. Velas.

### ABSTRACT

The present work has the objective of carrying out an experimental study of the candle flames dimensions (height and diameter). The methodology adopted was to perform experiments to evaluate the candle flames dimensions as a function of the wick length variation. For data collection, at least five photographs of each candle flame, supported on a horizontal base, were taken during the burning process. The results obtained experimentally were compared with results obtained from correlations in the literature, presenting similar behaviors. The candle flames dimensions increased with increasing wick length. It was also observed that the smaller the wick, the flame has an approximately spherical shape and a larger region of predominantly bluish coloration. On the other hand, the larger the wick, the flame has a more elliptical shape and a larger region of predominantly yellowish coloration. The comparison of the experimental results with the literature correlations presented a satisfactory agreement.

**KEYWORDS:** Diffusion flames. Dimensions. Candles.

**Recebido:** 29 ago. 2018.

**Aprovado:** 04 out. 2018.

#### Direito autoral:

Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO

A combustão tem sido uma das principais fontes de energia desde a Revolução Industrial, sendo a segunda maior fonte de energia do Brasil em 2017 (EPE, 2017), apesar das desvantagens ambientais conhecidas. As chamas geradas na combustão podem ser classificadas em pré-misturadas e não pré-misturadas. Na chama pré-misturada, o combustível e oxidante são misturados antes da combustão, um exemplo é a chama de um fogão. Nas chamas não pré-misturadas, também conhecidas como difusivas, o combustível e oxidante são misturados no instante da combustão, um exemplo deste tipo são as chamas de vela (TURNS, 2000).

O objetivo geral deste trabalho foi realizar um estudo experimental para determinar a altura e o diâmetro de chamas difusivas produzidas por velas de parafina. Para isso, foi realizado um levantamento bibliográfico sobre chamas difusivas e de velas, a montagem de um aparato experimental para a obtenção das dimensões das chamas de velas, considerando diferentes comprimentos de pavio, e uma comparação dos resultados obtidos experimentalmente com correlações da literatura.

## REVISÃO DA LITERATURA

A estrutura e as propriedades de chamas difusivas foram estudadas pela primeira vez por Burke e Schumann (1928), numa investigação teórica-experimental em placas paralelas e tubos circulares. Eles consideraram o campo de velocidades uniforme e paralelo ao eixo da chama no modelo. Eles obtiveram resultados bastante satisfatórios para as comparações entre as análises teórica e experimental.

Nos estudos teórico e experimental realizados por Roper (1977) e Roper, Smith e Cunningham (1977), foram propostas correlações para previsão da altura e do diâmetro de chamas em dutos circulares e não circulares, considerando a velocidade do fluxo de combustível não uniforme, de modo a satisfazer a equação da continuidade. Para validação destes estudos, os resultados obtidos por eles foram comparados com os obtidos por Burke e Schumann (1928). Eles obtiveram resultados satisfatórios tanto para dutos circulares quanto para dutos não circulares.

Na sequência, outros estudos também foram realizados para investigação de chamas difusivas (PAGNI, 1981; CRISTALDO, 2008) e, mais especificamente, de chamas difusivas de velas (DIETRICH et al., 2000; HAMINS; BUNDY; DILLON, 2005; TABAKA, 2008).

O primeiro estudo sistemático realizado para a previsão das dimensões das chamas de velas foi desenvolvido por Sunderland et al. (2011), para dois tipos de cera de vela, n-tetracosano e parafina, considerando diferentes comprimentos e diâmetros de pavio. Eles demonstram que a altura da chama aumenta com o comprimento do pavio e, quanto maior o diâmetro do pavio, a chama aumenta sua altura e se extingue mais rapidamente devido ao empuxo, que altera o ponto de ancoragem entre pavio e chama, de forma semelhante a outros trabalhos da literatura (DIETRICH et al., 2000; MOURA et al., 2006). Eles desenvolveram correlações para a previsão da altura ( $L_f$ ) e do diâmetro ( $W_f$ ) das chamas de velas, ambos adimensionalizados pelo diâmetro do pavio ( $D$ ), sendo definidas pelas Equações (1) e (2), respectivamente:

$$\frac{L_f}{D} = C(Ra^{1/4} L/D - 2)^n \quad (1)$$

$$\frac{W_f}{D} = 2,71^{0,7/\lambda} \quad (2)$$

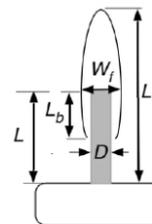
Sendo  $C$  e  $n$  constantes empíricas,  $Ra$  o número de Rayleigh,  $L$  o comprimento do pavio e  $\lambda$  um parâmetro adimensional de ajuste (SUNDERLAND et al., 2011).

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento consiste em posicionar uma vela de parafina, com pavio de comprimento  $L$  e diâmetro  $D$  em uma base plana para reduzir a interferência nas medições das dimensões da chama. Cada vela analisada foi posicionada em uma base de ferro, contendo uma haste cilíndrica de alumínio de 45 cm de comprimento, para suporte de uma garra, utilizada para sustentar ao lado da vela uma régua de 30 cm de comprimento, necessária para a determinação das dimensões das chamas das velas. Durante o experimento para a queima de cada vela analisada neste estudo, foram tiradas no mínimo cinco fotografias variando o comprimento do pavio  $L$  durante o processo de queima. As velas utilizadas no experimento possuem diâmetro de pavio  $D = 1,5$  mm (caso 1 e caso 2) e  $D = 1,7$  mm (caso 3), com uma incerteza de  $\pm 0,1$  mm.

A Figura 1 apresenta as dimensões características obtidas no experimento: comprimento do pavio,  $L$ ; diâmetro do pavio,  $D$ ; distância de ancoragem (do topo do pavio até a base da chama),  $L_b$ ; altura da chama (acima da cera derretida),  $L_f$ ; diâmetro da chama (no topo do pavio),  $W_f$ . Estas dimensões foram determinadas a partir das fotografias, utilizando o programa de domínio público para análise e processamento de imagens “ImageJ” versão 2.

Figura 1 – Dimensões características de uma chama de vela.



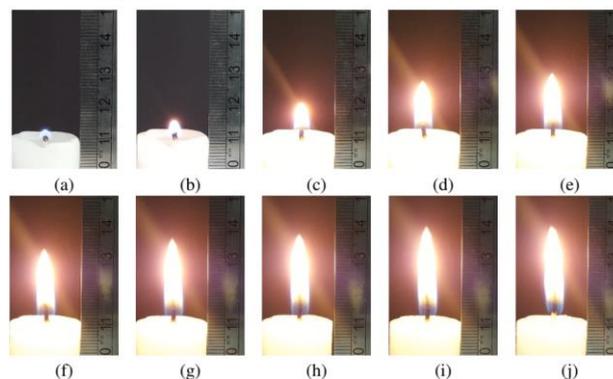
Fonte: Adaptada de Sunderland et al. (2011).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta as fotografias tiradas durante o experimento realizado, nas quais se observam as dimensões das chamas da vela para cada comprimento de pavio analisado. É possível observar que quanto maior o comprimento do pavio  $L$ , maior é a altura da chama  $L_f$ , concordando com os resultados da literatura (HAMINS; BUNDY; DILLON, 2005; MOURA et al., 2006; SUNDERLAND et al., 2011).

Figura 2 – Fotografias das chamas da vela em função do comprimento do pavio  $L$  em mm:

(a)  $(2,8 \pm 0,1)$ ; (b)  $(2,9 \pm 0,2)$ ; (c)  $(3,6 \pm 0,2)$ ; (d)  $(4,4 \pm 0,3)$ ; (e)  $(4,7 \pm 0,2)$ ;  
(f)  $(5,8 \pm 0,2)$ ; (g)  $(7,2 \pm 0,5)$ ; (h)  $(8,1 \pm 0,3)$ ; (i)  $(8,5 \pm 0,4)$ ; (j)  $(8,8 \pm 0,5)$ .



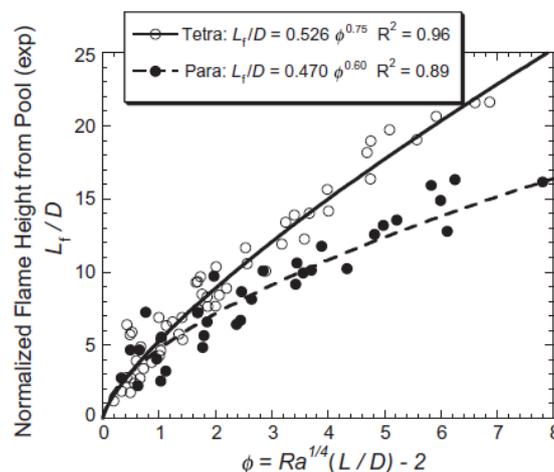
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 2a, a chama se apresenta quase totalmente azulada e com um formato aproximadamente esférico, sendo o menor comprimento de pavio analisado. À medida que o comprimento do pavio aumenta, as chamas apresentam um formato elíptico e uma maior região de coloração amarelada. Isso se deve ao fato de quanto menor o pavio, menos combustível é suprido à chama, gerando uma superfície mais rica em oxidante do que em combustível, por isso a região azulada é predominante e a região amarelada é menor. Por outro lado, a Figura 2j apresenta uma chama com maior suprimento de combustível, fornecendo mais carbono que é queimado gerando uma região amarelada predominante sobre a região azulada na base da chama.

A chama da vela gera uma corrente de convecção ao aquecer o ar ao seu redor, tal que, o ar quente sobe enquanto que o ar mais frio fica na base da chama, gerando um formato mais alongado da chama elíptica. Por isso, as primeiras chamas na Figura 2 tem um formato mais arredondado, devido uma menor quantidade de combustível ser queimado, quase que anulando esta corrente de convecção. As maiores chamas tem o efeito acentuado desta corrente de convecção, comprovada pelo seu formato.

Percebeu-se uma incoerência na constante empírica  $C$ , com o auxílio da ferramenta online “WebPlotDigitizer” foi mapeado os pontos da Figura 3 e então com auxílio do Excel, feita uma nova correlação com bases nesses pontos, então foi encontrado um erro de fator 10 na constante empírica  $C$ . Após a correção devidamente realizada, seguiu-se com a análise de resultados.

Figura 3 – Altura de chama adimensionalizada,  $L_f/D$ , em função da razão entre comprimento e diâmetro do pavio,  $L/D$ , obtida por Sunderland et al (2011).

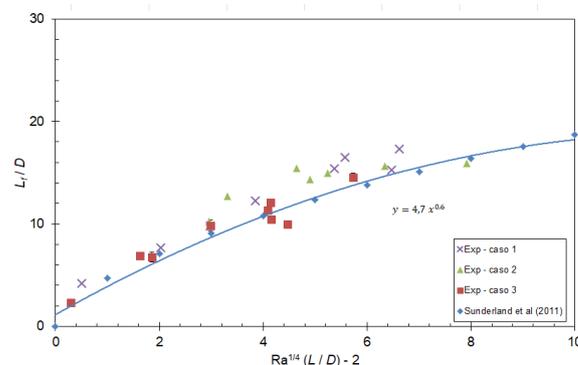


Fonte: Sunderland et al (2011).

### COMPRIMENTO DA CHAMA DE VELA

Na Figura 4, é apresentado uma comparação dos resultados calculados, com as correlações de Sunderland et al. (2011), e experimentais, em termos de valores médios. Observa-se que o comprimento da chama da vela  $L_f$  aumenta de acordo com o aumento do comprimento do pavio  $L$ , semelhante às observações de Sunderland et al. (2011).

Figura 4 – Altura adimensional da chama de vela  $L_f/D$  em função do número de Rayleigh Ra e do diâmetro  $D$  e comprimento do pavio  $L$ .



Fonte: Autoria própria.

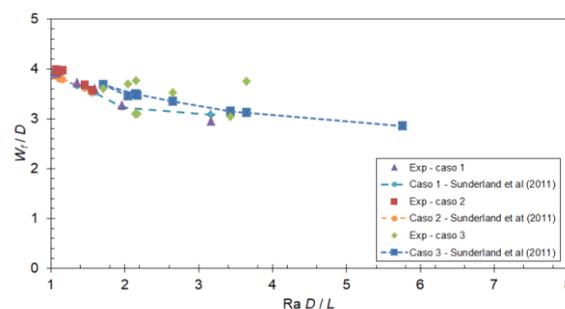
Os resultados experimentais encontrados apresentam uma dispersão semelhante à encontrada por Sunderland et al (2011), seguindo uma lei de potência, conforme correlação. A influência do diâmetro teve pouco impacto nos resultados.

Algumas possíveis fontes de erros podem ser composição química da vela, a camada limite considerada para o desenvolvimento das correlações era de geometria cilíndrica, que não representa com fidelidade um formato de uma chama de vela, mas que foi utilizada para simplificação do modelo matemático e por fim, erros na hora de tirar as medidas das fotografias devido a não nitidez das bordas das chamas.

### DIÂMETRO DA CHAMA DE VELA

O diâmetro da chama da vela  $W_f$  consiste na maior medida horizontal da chama no topo do pavio visível. A comparação dos resultados calculados e experimentais obtidos para  $W_f/D$  é apresentada na Figura 4.

Figura 5 – Diâmetro adimensional da chama de vela  $W_f/D$  em função do número de Rayleigh Ra e do diâmetro  $D$  e comprimento do pavio  $L$ .



Fonte: Autoria própria.

É possível observar na Figura 5 que os resultados calculados e experimentais para o diâmetro da chama da vela  $W_f$  concordam entre si apresentando desvios relativamente pequenos. Semelhante à Sunderland et al. (2011), os resultados para  $W_f$  foram um pouco mais consistentes que os resultados para a  $L_f$ , devido à camada limite cilíndrica considerada no modelo matemático se ajustar de forma mais coerente com  $W_f$ .

## CONCLUSÕES

No presente trabalho, uma análise experimental foi realizada utilizando velas de parafina com diâmetro de pavio de 1,5 e 1,7 mm, variando o comprimento de pavio, com a finalidade de se obter as dimensões das chamas de velas. Os resultados experimentais foram comparados com os valores calculados através das correlações propostas por Sunderland et al. (2011).

Foi observado neste estudo que o comprimento da chama da vela aumenta de acordo com o aumento do comprimento do pavio. Por outro lado, o diâmetro da chama da vela aumenta inicialmente, mas depois se estabiliza, como resultado dos efeitos de empuxo, de correntes de convecção e de suprimento de combustível.

Para trabalhos futuros podem ser realizados novos estudos avaliando o efeito do diâmetro do pavio, do tipo de cera da vela, entre outros parâmetros que afetam as dimensões e os formatos de uma chama de vela. Além disto, torna-se necessário aperfeiçoar o procedimento experimental para obtenção de resultados mais precisos.

## REFERÊNCIAS

BURKE, S. P.; SCHUMANN, T. E. W. Diffusion flames. **Industrial & Engineering Chemistry**, ACS Publications, v. 20, n. 10, p. 998–1004, 1928. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S106228886580003X>>.

CRISTALDO, C. F. C. **Solução numérica de uma chama difusiva e sua validação**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Matemática Aplicada, Porto Alegre, RS, Brasil, dez. 2008. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/16298>>.

DIETRICH, D. L. et al. Candle flames in non-buoyant atmospheres. **Combustion science and technology**, Taylor & Francis, v. 156, n. 1, p. 1–24, 2000. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00102200008947294>>.

EPE. **Balanco Energético Nacional 2017: Ano Base 2016**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2017. Empresa de Pesquisa Energética – EPE, Ministério de Minas e Energia – MME. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioFinal.aspx?anoColeta=2017&anoFimColeta=2016>>.

HAMINS, A.; BUNDY, M.; DILLON, S. E. Characterization of candle flames. **Journal of Fire Protection Engineering**, Sage Publications, Thousand Oaks, CA, USA, v. 15, n. 4, p. 265–285, 2005. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1042391505053163>>.

MOURA, G. S. et al. Um estudo experimental do efeito do número de Grashof em chamas difusivas. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS MECÂNICAS – ABCM. **Anais do XIII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – CREEM**. Teresina, PI, Brasil, 2006.



ROPER, F. G. The prediction of laminar jet diffusion flame sizes: Part I. Theoretical model. **Combustion and Flame**, Elsevier, v. 29, p. 219–226, 1977. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0010218077901122>>.

ROPER, F. G.; SMITH, C.; CUNNINGHAM, A. C. The prediction of laminar jet diffusion flame sizes: Part II. Experimental verification. **Combustion and Flame**, Elsevier, v. 29, p. 227–234, 1977. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0010218077901134>>.

SUNDERLAND, P. B. et al. Analysis and measurement of candle flame shapes. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 33, n. 2, p. 2489–2496, 2011. ISSN 1540-7489. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1540748910001665>>.

PAGNI, P. J. Diffusion flame analyses. **Fire Safety Journal**, Elsevier, v. 3, n. 4, p. 273–285, 1981. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0379711281900497>>.

TABAKA, G. A. **Analysis and measurement of candle flame shapes**. 82 p. Dissertação (Mestrado) — University of Maryland, College Park, MD, USA, dez. 2008. Disponível em: <<https://drum.lib.umd.edu/handle/1903/8230>>.

TURNS, S. R. **An introduction to combustion: concepts and applications**. 2nd. ed. Boston, MA, USA: McGraw-Hill, 2000. (McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering). Chapter 8, p. 170–178.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela participação da acadêmica Jessilene Coutinho da Silva no Programa de Voluntariado em Iniciação Científica e Tecnológica através do Edital PROPPG 06-2017 (PVICT). Agradecimentos também são prestados à Fumiaki Takahashi, pela cessão de materiais que contribuíram no desenvolvimento da revisão da literatura.