



DEMONSTRAÇÃO EXPERIMENTAL DO EFEITO DA TEMPERATURA NA MUDANÇA DE FASE

George Santos Marinho, Robson Fernandes de Farias.

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Cx. Postal 1524, 59078-970, Natal-RN-Brasil. gmarinho@ct.ufrn.br

Resumo

Muito do trabalho do Técnico ou do Engenheiro Térmico diz respeito aos processos industriais onde os fluidos passam por mudança de fase. Além da teoria, deve ser proporcionada ao Aluno a oportunidade de vivenciar experiências práticas sobre o tema. No presente trabalho, propõe-se um procedimento experimental baseado em uma situação cotidiana – vaporização de água, onde o Professor pode desafiar o Aluno a estimar o tempo de mudança de fase da água em duas situações: aquecimento gradual e aquecimento instantâneo. De fácil execução, rápido e barato, o procedimento pode ser executado inclusive fora do laboratório.

Palavras-chave: Transferência de calor, Vaporização, Efeito Leidenfrost.

Abstract

Most of the work of the Thermal Technician or Engineer relates to industrial processes where fluids undergo phase change. In addition to the theory, the practical experience about this subject may be useful to the student. In the present work, we propose an experimental procedure based on a day-to-day activity, where the Professor can challenge the student to estimate the phase change time of the water in two situations: gradual heating and instantaneous heating. Easy to execute, fast and inexpensive, the procedure can be performed even outside the laboratory.

Keywords: Heat transfer, Vaporization, Leidenfrost effect.

INTRODUÇÃO

O aprendizado por meio do erro pode ser estratégico na formação do Aluno, pois, ao preparar o caminho ao conhecimento, resulta em vantagens didáticas (MARINHO, FARIAS e SOUZA, 2018). Acrescentar a prática ao procedimento pode aumentar a eficiência do processo. Isso é particularmente viável no estudo dos fenômenos de transferência de calor, onde as experiências vivenciadas no cotidiano do Aluno propiciam valiosa oportunidade para que o Professor realize número expressivo de demonstrações.

O gerador de vapor (ou caldeira) é considerado o “coração” da indústria, razão pela qual o tema *geração e distribuição de vapor* é tratado com cuidadosa atenção em cursos para formação de Técnico ou Engenheiro Mecânico. O mesmo não pode ser afirmado com certeza sobre a realização de aulas práticas atinentes ao tema.

Visando tornar o estudo da transferência de calor com mudança de fase mais interessante, propõe-se um procedimento lúdico, baseado em um experimento que demanda recursos materiais de baixo custo, montagem simples e poucas habilidades, mas que, sem dúvida, desperta a atenção do Aluno para o fato de que, às vezes, o bom senso pode conduzir a erros.

Com a devida segurança, o Professor pode executar a prática sugerida em ambientes como laboratórios, salas de aulas, auditórios ou áreas de recreação, atendendo a Alunos de cursos dos níveis médio, técnico ou das engenharias.

TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA MUDANÇA DE FASE

A mudança de fase é o meio mais eficaz de transferência de calor, sendo assunto de interesse de áreas que vão da medicina esportiva à engenharia aeroespacial. Contudo, as complexidades intrínsecas à condensação e à vaporização dificultam o avanço no conhecimento. O pouco que se sabe até hoje é resultado de estudos experimentais, cujos custos são elevados. Por conseguinte, mesmo com todo empenho dos pesquisadores, o progresso tem sido lento.

De acordo com Kreith, Manglik e Bohn (2014, p. 533): “Devido ao grande número de variáveis envolvidas, nem equações gerais que descrevem o processo de ebulição ou as correlações gerais de dados de transferência de calor em ebulição estão disponíveis”.

Holman (2010, p.506) cita que quando uma gotícula de líquido colide com uma superfície aquecida onde a diferença de temperatura entre líquido e superfície excede cerca de 165 °C, para todos os fluidos, o fluxo de calor atingirá um valor máximo, que pode ser expresso, entre outras relações, por:

$$Q_{máx} = 0,00183 \left[\left(h_{v(f)} + c_{p(vs)} \right) \left(\frac{T_{sup} - T_{sat}}{2} \right) \right] \rho_L \cdot d^3 \left(\frac{\rho_L^2 \cdot V^2 \cdot d}{\rho_{vs(f)} \cdot \sigma} \right)^{0,341} \quad (1)$$

Sendo:

Q_{max} – máximo fluxo de calor por gota

$h_{v(f)}$ – coeficiente convectivo do vapor na temperatura de filme

$c_{p(vs)}$ – calor específico do vapor saturado

T_{sup} – temperatura da superfície

T_{sat} – temperatura de saturação do líquido

ρ_L – densidade da gota de líquido

d – diâmetro da gota de líquido

V – velocidade de impacto da gota de líquido

$\rho_{vs(f)}$ – densidade do vapor saturado na temperatura de filme.

σ – tensão superficial

A complexidade do fenômeno é maior que aquela que se pode inferir a partir da análise da Eq. (1). Isso porque o

coeficiente convectivo “h” é estimado por relações semi-empíricas (KREITH, MANGLIK e BOHN, 2014, p. 557), como por exemplo a relação de Forster – Zuber, definida por:

$$h = 0,00122 \cdot \left(\frac{k_L^{0,79} \cdot c_{p,L}^{0,45} \cdot \rho_L^{0,49}}{\sigma^{*0,5} \cdot \mu_L^{0,29} \cdot h_{fg}^{0,24} \cdot \rho_V^{0,24}} \right) \Delta T_{sat}^{0,24} \cdot \Delta P_{sat}^{0,75} \cdot S \quad (2)$$

Sendo:

k_L – condutividade térmica do líquido

$c_{p,L}$ – calor específico do líquido

μ_L – viscosidade do líquido

h_{fg} – coeficiente convectivo estimado para o fluido gasoso

ΔP_{sat} – diferença de pressão entre o fluido na saturação líquido – vapor

S – área da superfície de contato entre a gota do líquido e a placa aquecida sobre a qual o líquido foi depositado.

Quando a velocidade de impacto é nula, tem-se o fenômeno denominado *Efeito Leidenfrost*, assim batizado em homenagem ao seu descobridor – Johann Gottlob Leidenfrost (1715 – 1794), que em 1756 publicou suas observações em *De Aquae Communis Nonnullis Qualitatibus Tractatus*.

O resultado desse efeito singular é especialmente interessante nos casos em que a temperatura da superfície se encontra muito acima da temperatura de saturação do fluido, quando ambas, ebulição nuclear e ebulição pelicular ocorrem simultaneamente.

MATERIAL E PROCEDIMENTOS

Os procedimentos aqui sugeridos aplicam-se à apresentações que podem ser realizadas tanto no laboratório quanto em sala de aula, auditório ou anfiteatro.

A segurança deve constituir prioridade em todas as etapas deste experimento. Portanto, obrigatoriamente, uma balde com capacidade para 10 L, preenchido com areia fina, deve ser mantido no local de realização da prática. Se disponível, também pode ser mantido no local um extintor de incêndio classe B (específico contra líquidos e gases inflamáveis). Recomenda-se que os espectadores mantenham-se afastados a pelo menos 1 m de distância da mesa ou bancada na qual o dispositivo experimental está montado.

Montagem do Experimento

Uma placa de alumínio polido, com dimensões 100 mm de lado e 2 mm de espessura deve ser submetida a esforços de compressão nas extremidades, de modo a adquirir uma pequena curvatura, conforme se ilustra na Fig. 1.



Fig. 1. Placa de alumínio com curvatura.

Para curvar a placa, pode ser utilizada uma morsa de bancada. Evitar o uso de martelo ou semelhante, para não formar sulcos na superfície da placa, fato que prejudicaria a demonstração do fenômeno.

Utilizar uma base rígida para sustentar uma haste metálica na posição vertical. Por meio de garras, fixar a placa de alumínio na posição horizontal, determinada por meio de régua com nível de bolha, do tipo empregado em carpintaria ou na construção civil. Montar a placa com a parte côncava voltada para cima. Colocar uma bandeja de alumínio ou forma para bolos sobre a bancada ou mesa. Depositar um recipiente queimador de álcool no centro da bandeja. Utilizar um funil para despejar álcool (70° GL ou superior) no frasco do queimador de álcool (ver Fig. 2).



Fig. 2. Abastecimento do frasco do queimador de álcool.

Ajustar a emissividade (ϵ) do pirômetro óptico no valor correspondente à emissividade do alumínio polido – estimada em 0,25 (MARINHO et al., 2010). Ativar a mira a

laser do pirômetro e realizar testes, verificando a temperatura da placa sob diferentes ângulos. Zerar o cronômetro.

Ensaio do Experimento

O experimento deve ser dividido em duas etapas, em função do tipo de aquecimento da gota d'água: gradual ou instantâneo.

No aquecimento gradual, deposita-se sobre a placa uma gota d'água, com diâmetro aproximado de 5 mm, estando ambas, placa e gota, à temperatura ambiente (ver Fig. 3).



Fig. 3. Gota d'água sobre placa.

Realizar novos testes de medição de temperatura, mirando a luz laser do pirômetro, sob diferentes ângulos, no ponto da placa em que se encontra a gota d'água.

Utilizar um isqueiro com dispositivo de empunhadura para acender o pavio embebido em álcool, situado no interior do queimador (ver Fig. 4).



Fig. 4. Ignição do pavio do queimador de álcool.

Posicionar o suporte do conjunto placa / gota d'água sobre a chama, com o centro da base da placa (lado convexo) exatamente sobre o pavio do queimador (ver Fig. 5) e disparar o cronômetro.



Fig. 5. Aquecimento gradual de gota d'água sobre placa.

Ativar a mira a laser do pirômetro óptico (ver Fig. 6) e efetuar medições da temperatura da placa em intervalos de tempo de cinco segundos. Escolher o ponto da placa onde a gota se encontra depositada, fazendo a luz laser atravessar a gota até incidir sobre a placa.



Fig. 6. Estimativa da temperatura da placa.

Determinar o tempo desde o início do aquecimento até o complete desaparecimento da gota d'água da superfície da placa. Anotar o valor e zerar o cronômetro. Não apagar a chama ou retirar a placa de sua posição, mesmo após a evaporação da gota d'água.

Continuar o aquecimento da placa durante mais dois ou três minutos, monitorando a temperatura da superfície por meio do pirômetro. Quando a temperatura da placa passar de cerca de 120 °C, depositar sobre sua superfície uma gota d'água com cerca de 5 mm de diâmetro e, ao mesmo tempo, disparar o cronômetro.

Utilizar o pirômetro para estimar a temperatura da placa em intervalos de tempo de cinco segundos. Anotar o tempo até o total desaparecimento da gota d'água. Comparar os resultados obtidos.

Realização do Experimento

Os procedimentos aqui descritos foram testados tanto em laboratório quanto em sala de aula e auditório. Inicia-se a aula solicitando aos Alunos para anotar respostas para as seguintes questões:

(1) se uma gota d'água a 25 °C é colocada sobre uma placa metálica a 25 °C que, em seguida, é lentamente aquecida até 100 °C, qual será o tempo até sua total vaporização?

(2) se uma gota d'água a 25 °C é colocada sobre uma placa metálica a 120 °C, qual será o tempo até sua total vaporização?

Os Alunos poderão discutir opiniões antes de responder às questões. Um Aluno preencherá uma tabela com nomes dos colegas e os respectivos tempos estimados.

Antes do experimento, o Professor alertará os Alunos sobre os cuidados necessários às atividades, que envolvem substâncias inflamáveis, fogo e superfícies aquecidas. Obrigatoriamente, o experimento deve ser realizado com água. Portanto, nunca utilizar produtos como acetona, álcool ou outro líquido inflamável.

Um Aluno poderá ser convidado a utilizar o conta-gotas para depositar uma gota d'água sobre a superfície da placa. Outro Aluno poderá ativar a mira a laser do pirômetro óptico para efetuar as medições da temperatura da superfície da placa, cujos valores deverão ser anotados por outro colega.

Um Aluno poderá colaborar acendendo o pavio do queimador e, depois, um colega poderá posicionar a placa com a gota d'água sobre a chama do queimador. Os demais Alunos deverão disparar os respectivos cronômetros de seus aparelhos de telefonia celular ou relógios. O operador do pirômetro se posicionará próximo ao dispositivo e efetuará medições da temperatura da placa, anunciando os valores em voz alta. O experimento poderá ser filmado por alguns Alunos, desde que respeitados os campos de visão dos demais colegas. Após a completa evaporação da gota d'água, um Aluno anotar os valores registrados pelos colegas e entregará a tabela ao Professor, que fará a comparação entre os valores anotados nas duas tabelas, anunciando o(s) nome(s) do(s) Aluno(s) com melhor(es) estimativa(s).

Enquanto a placa continua a ser aquecida pela chama, um Aluno determinará a média dos valores registrados no caso do tempo de vida da gota com aquecimento gradativo.

Antes de realizar a segunda etapa do experimento, o Professor consultará os Alunos sobre o tempo de vida sugerido para gota d'água sujeita a aquecimento instantâneo, confrontando-os com o valor determinado no experimento de aquecimento gradativo e dando-lhes a chance de refazer a previsão. Não é necessário anotar as novas previsões. Além disso, o Professor desafiará os Alunos a tentar registrar o menor intervalo de tempo possível (por meio do procedimento "dispara e trava") de seus cronômetros.

Iniciar a segunda etapa do experimento solicitando ao encarregado do pirômetro para medir e anunciar em voz alta a temperatura da placa.

Um Aluno utilizará um conta-gotas para depositar a gota na placa. No mesmo instante, os colegas dispararão seus respectivos cronômetros. Os valores assim obtidos serão anotados e um Aluno determinará o valor médio do tempo de vida da gota d'água.

Após concluir o experimento, o Professor discorrerá sobre a teoria que trata do *Efeito Leidenfrost*, destacando consequências de sua consideração nos processos de transferência de calor com mudança de fase.

Como forma de complementar o assunto, casos extremos de situações nas quais o *Efeito Leidenfrost* se manifesta (e. g., *fire walking*) podem ser apresentados aos Alunos. Para tanto, o Professor poderá recorrer às informações

apresentadas por Halliday e Resnick (1991, pp.199 a 203) ou Walker (2008, pp. 184 – 186 e p. 238).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estratégia de solicitar que os Alunos ensaiem (procedimento “dispara e trava”), para tentar registrar o menor intervalo de tempo em seus cronômetros, aumenta o impacto do resultado obtido no aquecimento instantâneo da gota d’água, contrariando o “senso comum” de que uma diferença de temperatura maior estaria associada a um maior fluxo de calor e, supostamente, a um menor tempo de vida da gota d’água. Na verdade, observa-se o oposto, i. e., a gota sobreviverá mais tempo quanto maior for a temperatura da superfície aquecida (ver Fig. 7).



Fig. 7. Gota d’água após 1 min e 30 seg sobre superfície da placa na situação em que $T_{placa} > 120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Apesar de ser apenas um dos fatores que interferem na transferência de calor entre a placa aquecida e a gota d’água, do ponto de vista didático, a condutividade térmica (κ) pode ajudar na explicação do fenômeno.

Na Tabela 1, apresentam-se os valores de κ da água nas fases líquida e vapor. É fácil associar o menor valor de κ_v da fase vapor (27 vezes inferior ao κ_L da fase líquida) ao efeito isolante da camada de gás (vapor d’água superaquecido) que se forma sob a gota submetida ao aquecimento instantâneo. Consequentemente, o menor valor de κ_v implicará em maior tempo de existência experimentado pela gota d’água depositada sobre a placa aquecida a mais de $120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tabela 1 – Condutividade térmica da água.

| T ($^{\circ}\text{F}$) | Fase | κ (Btu/h ft. $^{\circ}\text{F}$) |
|-----------------------------|---------|---|
| 212 | Líquida | $\kappa_L = 0,3930$ |
| 212 | Vapor | $\kappa_v = 0,0145$ |

(Fonte: WELTY et al., 2008, p. 680 e p. 685)

Nas vezes em que o experimento foi realizado após as explicações sobre a teoria do *Efeito Leidenfrost*, constatou-se que os Alunos apresentaram-se menos atentos ao experimento em contraste com a situação inversa, i. e., quando o experimento foi realizado antes da apresentação da teoria. Possivelmente, o estímulo do desafio despertou a curiosidade, demandando maior atenção ao experimento.

CONCLUSÃO

Ainda que seja apenas introdutório ao tema, o experimento serve para ilustrar a importância dos mecanismos de transferência de calor por condução e convecção no estudo dos processos de mudança de fase.

O experimento foi pensado para ser apresentado a Alunos das graduações das Engenharias, nas disciplinas de Física Básica ou de Transferência de Calor. Contudo, nada impede que a prática seja adaptada para apresentação a Alunos do ensino médio, por exemplo, em aulas sobre calorimetria.

AGRADECIMENTOS

Aos Alunos que participaram dos experimentos realizados sobre transferência de calor durante aulas de graduação em Engenharia Mecânica.

Ao Departamento de Material e Patrimônio da Universidade Federal do Rio Grande do Norte pela disponibilização de material descartado para uso na realização deste e de outros trabalhos.

REFERÊNCIAS

- MARINHO, G. S.; FARIAS, R. F.; SOUSA, R. S. *Dois princípios, um experimento*. Mens Agitat, vol. 13 (2018) 46-51.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R. MERRILL, J. *Fundamentos de Física*. Rio de Janeiro, LTC – Livros Técnicos e Científicos Ltda., v.2, 1991, 280 p.
- HOLMAN, J. P. *Heat Transfer*. New York, McGraw-Hill, 10th. Ed., 2010, 725 p.
- KREITH, F.; MANGLIK, R. M.; BOHN, M. S. *Princípios de Transferência de Calor*. São Paulo, Cengage Learning, 2014.
- MARINHO, G. S.; HILDEBRAND JR, L.; ROCHA, A. C. B.; CARVALHO, R. A. *Método para Estimar a Emissividade de Superfícies*. Mens Agitat, v. 5, p. 47-52, 2010.
- WALKER, J. *O Circo Voador da Física*. Rio de Janeiro, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2008, 338 p.
- WELTY, J. R.; WICKS, C. E.; WILSON, R. E.; RORRER, G. L. *Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer*. New Jersey, John Wiley & Sons Inc., 2008, 5th Ed., 711 p.