

CARACTERIZAÇÃO DO IMPACTO DE GOTAS SOBRE SUPERFÍCIES FRIAS USANDO SHADOWGRAPH

Murillo Augusto Corrêa Masculi

Álvaro Felipe Campos Araya

Arthur Vieira da Silva Oliveira

Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo

murillomasculi@usp.br

Objetivos

O objetivo deste projeto de pesquisa é estudar o congelamento de gotas em superfícies resfriadas usando a técnica óptica *Shadowgraph*. O congelamento de gotas está presente em diversas áreas da engenharia, como aeronáutica e turbinas eólicas, pois a formação de gelo representa riscos aos voos [1] (entupimento do Tubo de Pitot, congelamento das asas, entre outros riscos) e compromete a eficiência das turbinas [2]. Este estudo envolveu a variação da temperatura do substrato (T_s) e das velocidades de impacto das gotas (V) para permitir a comparação e análise dos diferentes casos e seus comportamentos.

Métodos e Procedimentos

Uma configuração experimental foi projetada para realizar os experimentos de congelamento de gotas. A Figura 1 mostra o esquema da configuração com os componentes necessários. A configuração experimental consiste em uma caixa de isopor fixada a uma estrutura de alumínio. Dentro desta caixa, ela contém um cilindro de alumínio, designado como alvo de impacto, que é resfriado a temperaturas negativas por um criocautério de nitrogênio. A configuração experimental inclui janelas de vidro de borossilicato e um mecanismo de ajuste de altura para liberação de gotas, que usa um tubo de aço e prensa-

cabos para permitir que diferentes velocidades de impacto de gotas sejam configuradas para o estudo. A gota é formada por uma bomba de seringa conectada ao tubo de aço, que tem uma agulha 34G (diâmetro interno de 0.051 mm) em sua extremidade. A técnica *Shadowgraph* requer uma fonte de luz e esta é posicionada em uma das janelas, enquanto uma câmera de alta velocidade é colocada na janela oposta para capturar imagens do impacto da gota. O tamanho do pixel das imagens foi de $18.16 \pm 0.06 \mu\text{m}$.

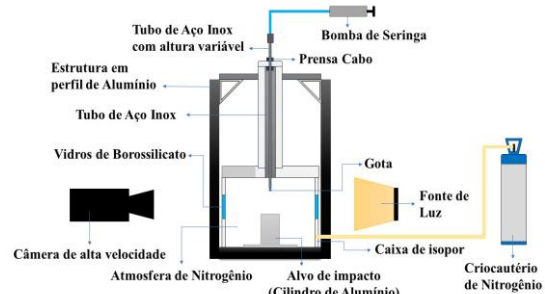


Figura 1: Esquema da bancada experimental.

Uma vez capturadas as imagens, elas são processadas usando o software Matlab. Este processo permite estimar parâmetros como o diâmetro da gota, a velocidade de impacto e o ângulo da ponta da gota nos casos em que este fenômeno ocorre, e o tempo de congelamento.

Resultados

Testes experimentais foram realizados em $T_s = -9^\circ\text{C}$, -14°C e -25°C para $V \approx 0.68$, 1.63 e 2.03 m/s. O teste conduzido em $T_s = -25^\circ\text{C}$, mostrado na Fig. 2, revelou a formação de uma ponta no topo da gota para $V \approx 0.68$ m/s e $t = 3,6155$ s, enquanto um efeito de achatamento foi observado para $V \approx 1.63$ e 2.03 m/s. Esta ponta está associada à duração do congelamento e à propagação do gelo. É comum observar a formação desta ponta em substratos com alta condutividade térmica. Uma película de gelo se forma antes do impacto, iniciando o congelamento instantâneo [3]. O processo de congelamento progride do centro para a borda da gota, de acordo com Stiti *et al.* [3], confirmado pelo experimento em $V \approx 0.68$ m/s. Além disso, o tempo de congelamento diminui com o aumento da velocidade de impacto.

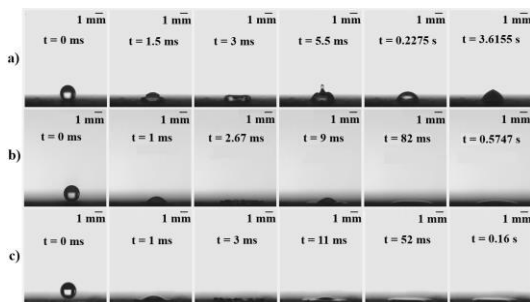


Figura 2: Comportamento da gota em -25°C . a) $V \approx 0.68$ m/s; b) $V \approx 1.63$ m/s; c) $V \approx 2.03$ m/s.

A Figura 3 mostra que, para a mesma temperatura, o ângulo da ponta da gota aumenta com a velocidade de impacto. Em $T_s = -9^\circ\text{C}$, o ângulo aumenta de $V \approx 0.68$ m/s para $V \approx 1.63$ m/s e se estabiliza entre $V \approx 1.63$ m/s e $V \approx 2.03$ m/s. Isso sugere que maiores velocidades de impacto e maior achatamento da gota inibem a formação da ponta. Em temperaturas mais baixas, como $T_s = -14^\circ\text{C}$ e $T_s = -25^\circ\text{C}$, ocorre um comportamento semelhante, mas a formação da ponta tende a cessar em velocidades de impacto mais baixas, devido ao congelamento mais rápido causado pela temperatura mais baixa.

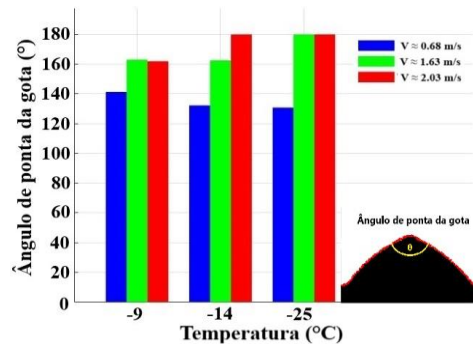


Figura 3: Ângulo de ponta da gota para temperaturas de superfície e velocidades de impacto diferentes.

Conclusões

O estudo analisou o congelamento de gotas durante o impacto em diferentes temperaturas de superfície e velocidades de impacto. Foi observado que o aumento da velocidade reduz o tempo de congelamento devido ao achatamento da gota, o que intensifica a solidificação. A redução da temperatura da superfície também reduz o tempo de congelamento ao aumentar a transferência de calor por condução. Em temperaturas mais baixas, há menos formação de pontas nas gotas, especialmente em velocidades mais baixas. Além disso, a visualização do avanço da frente de gelo era difícil em altas velocidades e baixas temperaturas, devido ao achatamento da gota.

Referências

- [1] T. Cebeci, F. Kafyeke, Aircraft icing, Annual Review of Fluid Mechanics 35 (2003) 11–23.
- [2] W. J. Jasinski, S. C. Noe, M. S. Selig, M. B. Bragg, Wind Turbine Performance Under Icing Conditions, Journal of Solar Energy Engineering 120 (1998) 60–65.
- [3] M. Stiti, G. Castanet, A. Labergue, F. Lemoine, Icing of a droplet deposited onto a subcooled surface, International Journal of Heat and Mass Transfer 159 (2020) 116–120.