

Estudo experimental de formação de geada em placa plana sob convecção forçada – EVR2021 – 0038

Alex R. A. Colmanetti^{1*}, Rubens C. Toledo¹, José M. S. Jabardo¹, Cristiano B. Tibiriçá¹

¹ Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica,
Laboratório de Engenharia Térmica e Fluidos - LETEF
São Carlos, São Paulo, Brasil, 13566-590

* Alex R. A. Colmanetti, alex.colmanetti@usp.br

Resumo

A formação de geada é um fenômeno natural que ocorre em diversos campos da engenharia. No campo da refrigeração, esse fenômeno traz um impacto negativo no desempenho de sistemas de refrigeração, causando um maior consumo energético. No presente trabalho, foi realizado o projeto e construção de um túnel de vento com o objetivo de realizar uma investigação experimental desse fenômeno em uma placa plana horizontal sob condição de convecção forçada. Nesse estudo, é apresentado o túnel de vento, que possui controle de temperatura, umidade e velocidade do ar, além de apresentar a validação dos experimentos de formação de geada. Dados de espessura de geada, obtidos nesse aparato experimental, foram comparados com a correlação de Hermes et al. (2019) e uma concordância de 4,98% foi obtida.

Palavras-chave: Formação de geada, placa plana, espessura de geada, túnel de vento.

Introdução

O processo de formação de geada em superfícies resfriadas é um fenômeno indesejável que afeta diversos campos industriais, como a aeroespacial, aviação e sistemas AVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado) (Song e Dang, 2018). Entretanto, o processo de formação de geada é complexo e diversos aspectos desse fenômeno ainda não são totalmente compreendidos. Embora, significativos avanços no processo de nucleação de geada, na modelagem e adensamento de geada tenham sido alcançados nas últimas décadas, o estudo desse complexo fenômeno está ainda em andamento. O melhor entendimento dessas características da geada, como a densidade, espessura, condutividade e os mecanismos de transferência de calor e massa envolvidos na ocorrência desse fenômeno podem levar ao aumento da eficiência energética de sistemas AVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado), os quais representam uma parcela significativa do consumo energético global.

O fenômeno de formação de geada ocorre em condições específicas de temperatura e umidade do ar. Esse fenômeno acontece quando ar úmido encontra uma superfície fria e quando ambas as temperaturas da superfície e ponto de orvalho estejam abaixo de 0 °C. Nessa condição, ocorre dessublimação que consiste na mudança do estado físico de vapor de água para a fase sólida (geada). Além disso, a formação de geada pode ocorrer pelo congelamento de condensado sobre superfícies frias (Piuco et al., 2008).

O objetivo do presente estudo é desenvolver um túnel de vento que possibilite desenvolver pesquisas fundamentais e aplicadas no campo de refrigeração. No presente estudo, a pesquisa se ateve à área de formação de geada. No caso de pesquisas fundamentais de formação de geada, encontram-se diversos estudos realizados em placas planas, enquanto que pesquisas aplicadas estão geralmente associadas com a formação de geada em trocadores de calor (Song e Dong,

2018). Assim, no presente trabalho, são apresentados dados de crescimento de geada em uma placa plana sob condições de convecção forçada. Esses dados foram comparados com o recente modelo de espessura de geada proposto por Hermes et al. (2019).

Metodologia

O túnel de vento utilizado neste estudo é apresentado na Fig. 1, o qual foi projetado e construído neste trabalho. O fluxo de ar é fornecido por um ventilador centrífugo modelo ILS 400 da Projelmec®, o qual operou com velocidade do ar na faixa de 0 - 2,3 m/s na seção de teste. A medição da velocidade (v) é realizada por meio de tubo de Pitot e um transdutor de pressão diferencial Dwyer® com precisão de 0,25% da escala total. A velocidade do ar (v) é determinada segundo a Eq. (1), a qual é função da densidade do ar (ρ_{ar}) e da diferença entre a pressão de estagnação (p_o) e a pressão estática (p), a qual é medida pelo transdutor de pressão diferencial (Fox et al., 2000). A medição da temperatura (temperatura de bulbo seco) é realizada através de uma malha de termopares composta por cinco termopares do tipo T, localizados a montante da seção de teste, as quais foram utilizadas na determinação de uma temperatura média do ar (temperatura de bulbo seco do ar, T_{ar}) na seção. A medição da umidade relativa do ar é realizada por meio de um termômetro de bulbo úmido (T_{bu}), o qual foi instalado a montante da seção de teste. Esses termopares foram calibrados e têm uma incerteza de 0,06 °C.

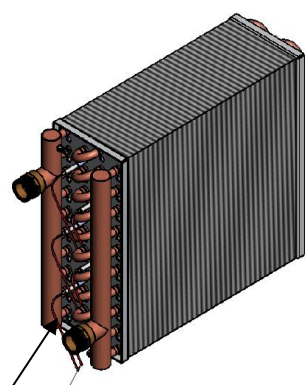
$$v = \sqrt{\frac{2(p_o - p)}{\rho_{ar}}} \quad (1)$$



Figura 1: Túnel de vento desenvolvido no presente estudo.

Um trocador de calor tubo-aleta da *Mipal*® (Fig. 2), três resistências elétricas com aletas e dois umidificadores ultrassônicos são usados para controlar a temperatura e a umidade do ar. O controle da velocidade do ar é auxiliado por um inversor de frequência *Danfoss*®, que atua na frequência do ventilador.

Um microcomputador equipado com um sistema da *National Instruments*® é utilizado para aquisição de dados de instrumentos, como temperatura, umidade, velocidade, pressão e controle de equipamentos. O hardware desse sistema é composto por placas de aquisição da *National Instruments*®. O software *Labview*® (acrônimo para *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) é uma plataforma que permite gerar programas através da linguagem gráfica G e fornecer um programa em interface *Labview*®, que permite gerenciar a aquisição de dados (temperatura, velocidade, umidade e etc) e controle de equipamentos de maneira simples e integrada. Assim, esse sistema de aquisição integra simultaneamente a aquisição de dados (entrada analógicas) e o controle de equipamentos (saídas digitais), a qual é realizada através da comunicação com inversor de frequência (no caso do ventilador) ou de relés de estado sólido (no caso das resistências do ar e umidificador ultrassônico).



Resistência HD 8,5X610 mm –

Figura 2: Trocador tubo-aleta (*Mipal*®-10x4x500P-P TB Ø5/8" 10C E/S Ø 1.1/2").

O controle da umidade e temperatura do ar no interior do túnel de vento é realizado pelo trocador de calor tubo-aleta, banco de resistências e umidificadores ultrassônicos, os quais foram instalados nessa ordem e operam de maneira integrada sob o gerenciamento de programa desenvolvido em

Labview®. Um controle PID foi implementado nesse programa de modo a manter parâmetros como temperatura, umidade e velocidade do ar em regime permanente e dentro de condição desejada para dada condição de teste.

O resfriamento do ar que ocorre no trocador de calor do tubo-aleta (Fig. 2) é realizado pela circulação interna de uma mistura de água e etilenoglicol que ocorre por um circuito secundário (*Chiller*), composto por um reservatório, duas bombas e um sistema de refrigeração (Fig. 3). O sistema de refrigeração (Fig. 4) é composto por uma unidade condensadora modelo *Ecostar LHV6-4EC-6F1* (*Bitzer*®), dispositivo de expansão e um trocador de calor a microplacas (modelo *D62-E-40*, *Danfoss*®). A unidade condensadora oferece um grande faixa de capacidade de refrigeração devido a compressor regulado por um inversor de frequência (*Inverter System*).

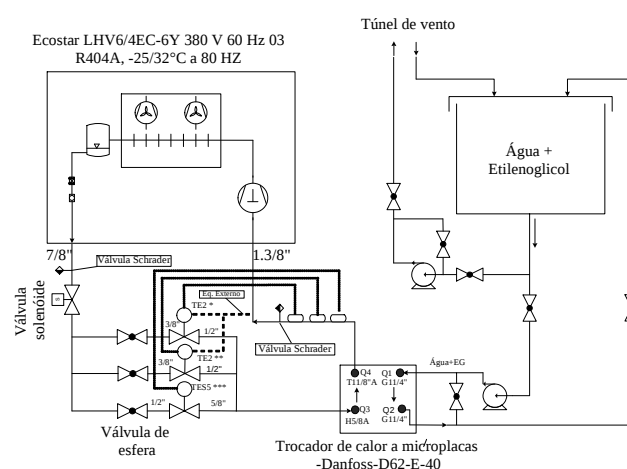


Figura 3: Diagrama do circuito secundário (*Chiller*).



Figura 4: Unidade condensadora *Bitzer*®, modelo *Ecostar LHV6-4EC-6F1*.

A seção de teste (Fig. 5) foi desenvolvida com as mesmas dimensões (100 x 100 mm) da placa plana estudada por *Hermes et al. (2009)*. O objetivo é realizar experimentos equivalentes, porém, a placa do presente trabalho tem a peculiaridade de estar localizada no meio da seção retangular do túnel de vento (275 x 275 mm), enquanto o estudo desenvolvido por *Hermes et al. (2009)*, a placa se situava na parte inferior do túnel. Além disso, a seção de teste do presente estudo possui uma borda de ataque (40 mm),

utilizada para minimizar o efeito de borda (Fig. 5). O resfriamento da superfície de alumínio é realizado por meio banho termostático modelo G50 da *Thermo Scientific®* (circulador *Glacier Refrigerated Bath*), o qual realizava a circulação externa de uma mistura de água e etanol hidratado 96 °GL (93,8 ° INPM).

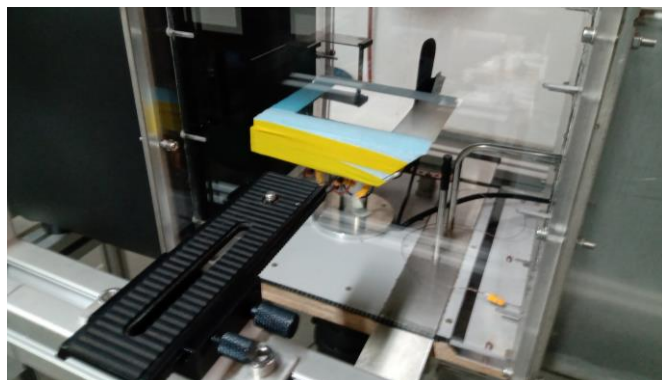


Figura 5: Placa plana de alumínio (100 x 100 mm) utilizada para a realização dos experimentos.

A medição de espessura de geada média (δ_f) foi realizada através de uma câmera NIKON D5100, a qual foi instalada em uma estrutura acoplada ao túnel de vento (Fig. 5). Uma luz LED e um *softbox* foram utilizados para fornecer um contraste nas imagens, a qual foi necessária para facilitar a binarização das imagens. Um programa desenvolvido em *Matlab®* foi desenvolvido para tratar as imagens e fornecer a espessura média da geada. O modelo de Hermes et al. (2019), apresentado na Eq. (2), foi utilizado para validar os resultados obtidos nos experimentos.

$$\delta(t) = c_1 \Delta T^n \sqrt{t} + \frac{(c_3 + c_2 \Delta T)}{\sqrt{t}} \quad (2)$$

Resultados

Os dados de um experimento de crescimento de geada obtido em uma placa horizontal (100 x 100 mm) são apresentados na Tabela 1. O experimento foi realizado para a condição de velocidade do ar de 2 m/s, temperatura do ar (T_{ar}) de 22°C, 80% de umidade relativa e temperatura na superfície de -15°C. Essa condição experimental é semelhante (ponto D1) a realizada por Hermes et al. (2009). Dados de velocidade (v), temperatura do ar (T_{ar}), temperatura da superfície (T_w), umidade relativa (ϕ), temperatura de bulbo úmido (T_{BU}) e espessura de geada (δ_f) foram obtidos a cada 600 s durante o experimento que teve a duração de 120 min (Tab. 1).

Na Figura 6 são apresentados os dados experimentais de espessura de geada (δ_f) em função do tempo (t). Esses dados foram comparados com as previsões de espessura de geada fornecidas pelo modelo de Hermes et al. (2019) (Eq. 2). Um erro relativo médio de 4,98 % foi obtido para essa condição. Na Figura 6, é possível observar a previsão do modelo de Hermes et al. (2019) e se observa que o modelo subestima os resultados experimentais em menos de 10 % (em azul).

Tabela 1: Dados de crescimento de geada em função do tempo.

t (s)	v (m/s)	T_{ar} (°C)	T_w (°C)	ϕ	T_{BU} (°C)	δ_f (mm)
600	2,00	22,02	-14,75	0,79	19,38	1,534
1200	2,00	21,95	-15,01	0,79	19,37	1,956
1800	2,00	21,95	-14,98	0,80	19,39	2,410
2400	2,00	21,96	-15,00	0,80	19,40	2,771
3000	2,00	21,98	-14,97	0,80	19,42	3,052
3600	2,00	22,02	-14,98	0,79	19,42	3,388
4200	2,00	22,05	-14,98	0,79	19,43	3,617
4800	2,00	22,07	-14,96	0,80	19,53	3,739
5400	2,00	22,00	-15,01	0,80	19,51	3,994
6000	2,00	21,82	-15,01	0,80	19,35	4,197
6600	2,00	22,04	-14,94	0,80	19,46	4,443
7200	2,00	22,13	-15,00	0,79	19,47	4,771

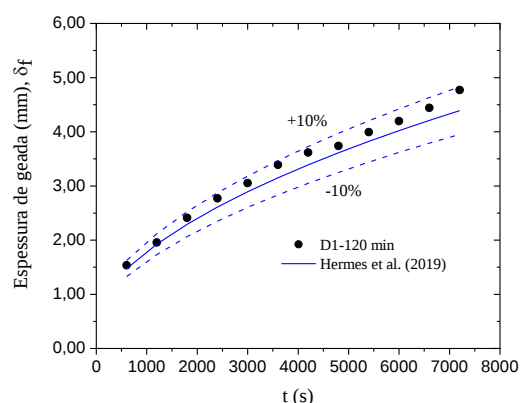


Figura 6: Espessura de geada (δ_f) em função do tempo (s).

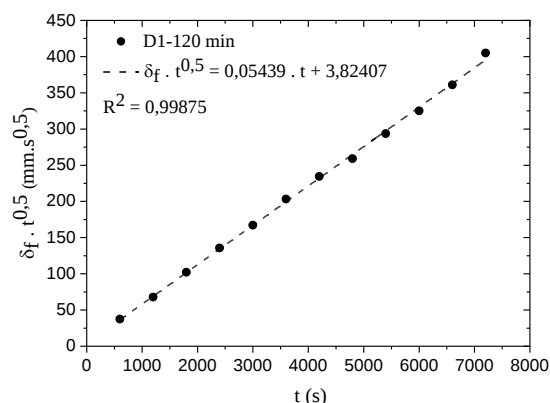


Figura 7: Evolução do crescimento de geada em função do tempo.

No estudo desenvolvido por Hermes et al. (2019) observa-se uma relação linear entre o produto da espessura de geada pela raiz quadrada do tempo ($\delta_f \sqrt{t}$) em função do tempo (t), ($\delta_f \sqrt{t}$) x t . Os dados obtidos no presente estudo possuem um comportamento similar ao reportado por

Hermes et al. (2019), conforme apresentado na Fig. 7. Na Fig. 8, é apresentada uma foto térmica da superfície da placa durante o instante 7200 s, na qual se observa que a superfície da geada depositada sobre a placa possui um comportamento homogêneo. Esse resultado qualitativo está de acordo com observado com Hermes et al. (2009). Na Figura 9 é apresentada uma imagem da camada de geada no instante 5400 s, onde se observa que a camada de geada possui boa homogeneidade.

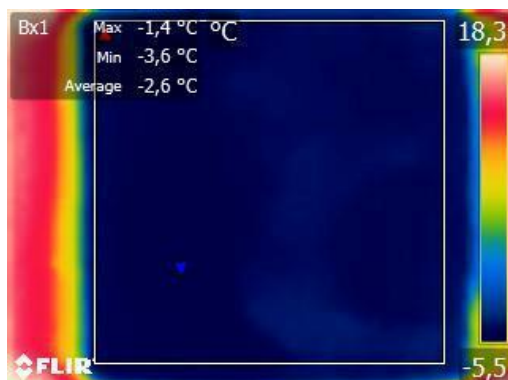


Figura 8: Avaliação qualitativa da temperatura da superfície da geada.

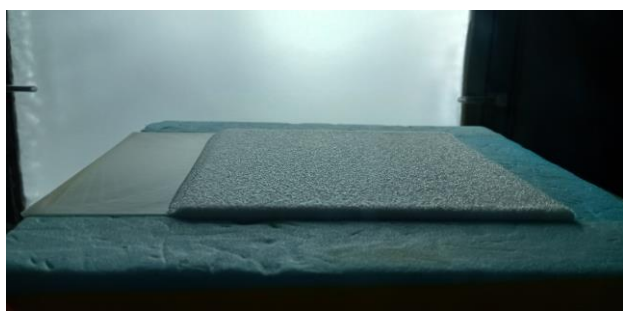


Figura 9: Experimento de crescimento de geada no instante 5400 s.

Conclusões

Um túnel de vento foi projetado e construído nas dependências da Escola de Engenharia de São Carlos. Estudos fundamentais e preliminares de crescimento de geada, desenvolvidos em placa plana, demonstraram que os resultados experimentais são promissores, conforme demonstrado pela comparação com a correlação de Hermes et al. (2019). Uma concordância de 4,98 % foi obtida. Além disso, o túnel de vento possui a capacidade de operar ensaios com as seguintes faixas de operação: $0 < v < 2,3$ m/s, $5 < T_{ar} < 30$ °C, $10 < \phi < 100$ %.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio financeiro das agências de fomento brasileiras, a saber, CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e FAPESP. Os autores também agradecem ao suporte fornecido da Bitzer®, Projelmec®, Danfoss® e Mipal® por apoiarem nossa pesquisa através de doações de

equipamentos. Ainda agradecemos ao Universidade de São Paulo e ao corpo técnico da Laboratório de Engenharia Térmica e Fluidos – LETEF-EESC-USP: Hélio José Donisetti Trebi, Jorge Nicolau dos Santos, Roberto Carlos Pratavieira, José Roberto Bogini, Theodomiro Fernando Luchesi e Roberto Ap. Lourenço. que contribuíram na construção do presente aparato experimental. Alex R. A. Colmanetti agradece ao Prof. Gherhardt Ribatski por fornecer a câmera Nikon® D5100.

Referências

- FOX, Robert W., PRITCHARD, Philip J. & MCDONALD, Alan T. Introdução À Mecânica Dos Fluidos. Grupo Gen-LTC, 2000.
- Piucco, R.O., Hermes, C.J., Melo, C. & Barbosa, J.R. 2008. A study of frost nucleation on flat surfaces. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 3, pp. 1710-1715.
- Hermes, C. J. L., Piucco, R. O., Barbosa Jr. , J. R. & Melo, C. (2009). A study of frost growth and densification on flat surfaces. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33, 371-379.
- Song, M. & Dang, C. (2018). Review on the measurement and calculation of frost characteristics. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 124, 586-614.
- Hermes, C. J. L., Nascimento, V. S., Loyola, F. R., Cardoso, R. P. & Sommers, A. D.(2019). A study of frost build-up on hydrophilic and hydrophobic surfaces under forced convection conditions. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 100, 76-88.

Aviso de responsabilidade

Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído neste documento.