

Estudio numérico y experimental de la formación de escarcha en placas planas de aluminio y cobre

Felipe M. Biglia¹, Victor V. Dimbarre², Guilherme A. Bartmeyer³, Raquel C.R. da Silva⁴, Thiago A. Alves⁵

¹ Universidad Tecnológica Federal de Paraná – Curitiba, Brasil. Email: biglia@alunos.utfpr.edu.br

² Universidad Tecnológica Federal de Paraná – Ponta Grossa, Brasil. Email: victordimbarre@alunos.utfpr.edu.br

³ Universidad Tecnológica Federal de Paraná – Ponta Grossa, Brasil. Email: gabartmeyer@hotmail.com

⁴ Universidad Tecnológica Federal de Paraná – Guarapuava, Brasil. Email: raqueld@utfpr.edu.br

⁵ Universidad Tecnológica Federal de Paraná – Ponta Grossa, Brasil. Email: antonini@utfpr.edu.br

Resumen

El presente trabajo comprende un análisis numérico-experimental del proceso de formación de escarcha en placas planas de aluminio y cobre. Este fenómeno ocurre cuando el flujo de la mezcla de aire y vapor de agua entra en contacto con superficies que tienen temperaturas por debajo de los 0°C, presente en varias aplicaciones comerciales e industriales que alcanzan bajas temperaturas, pasando directamente al estado sólido (cambio de fase por resublimación), dando lugar a una estructura porosa. Su acumulación implica un aumento de la demanda energética y una disminución del rendimiento de varios equipos que intervienen en el proceso de refrigeración, reduciendo su eficiencia y haciendo necesaria su retirada periódica. En este contexto, se desarrolló un aparato experimental de bajo costo que permitió un análisis experimental del fenómeno en estudio. El material de las superficies objeto de estudio son el aluminio y el cobre. El análisis numérico-experimental demuestra mediciones y simulaciones del espesor de la capa de escarcha en función del tiempo transcurrido. Los resultados numéricos muestran una buena concordancia con los resultados experimentales.

Palabras clave: escarcha; minimización del hielo poroso; cambio de fase.

Abstract

The present work includes a numerical-experimental analysis of the frost formation process in flat plates of aluminum and copper. This phenomenon occurs when the flow of the mixture of air and water vapor comes into contact with surfaces that have temperatures below 0°C, present in various commercial and industrial applications that reach low temperatures, passing directly to the solid state (phase change by resublimation), leading to a porous structure. Its accumulation implies an increase in energy demand and a decrease in the performance of various equipment involved in the cooling process, reducing its efficiency and making it necessary to periodically remove it. In this context, a low-cost experimental apparatus was developed that allowed an experimental analysis of the phenomenon under study. The material of the surfaces under study are aluminum and copper. Numerical-experimental analysis demonstrates measurements and simulations of frost layer thickness as a function of elapsed time. The numerical results show a good agreement with the experimental results.

Keywords: frost; minimization of porous ice; phase change.

1. Introducción

El fenómeno físico de la formación de escarcha ocurre cuando el flujo de la mezcla de aire y vapor de agua entra en contacto con superficies que tienen temperaturas inferiores a 0 °C, estando presente en varias aplicaciones comerciales e industriales de baja

temperatura, como alas de aviones, rotores de compresores, evaporadores de sistemas de refrigeración, sistemas de purificación de gases y muchos otros [1].

La capa de escarcha actúa, en un principio, como una aleta, intensificando el intercambio de calor con el medio exterior, sin embargo, con el aumento del

espesor de la capa de escarcha, también se produce un aumento de la resistencia térmica, reduciendo la tasa de transferencia de calor de la superficie de la capa de escarcha [2].

Su depósito en superficies frías altera el desempeño de los equipos de refrigeración, disminuyendo la eficiencia y exigiendo un mayor gasto energético para su correcto funcionamiento [3].

Su acumulación (aumento de espesor) genera dos problemas, el primero es la reducción de la tasa de transferencia de calor y el segundo es el aumento de la caída de presión debido a la acumulación de hielo en los evaporadores, disminuyendo el área de flujo en los tubos [4].

Por lo tanto, prevenir la formación y acumulación de hielo en la superficie de los equipos utilizados en los sistemas de refrigeración es fundamental para obtener un buen desempeño, posibilitando así el buen funcionamiento del conjunto [5].

En este contexto, este trabajo busca realizar un análisis numérico-experimental de la formación de escarcha sobre superficies planas de aluminio y cobre, bajo parámetros ambientales controlados.

2. Metodología

2.1. Modelado matemático

La formulación matemática de la formación de hielo poroso en placas planas, basada en los modelos desarrollados por Sedano [6] y Tao et al. [7], presente en Biglia [3]. La formación de hielo poroso se puede dividir en tres etapas:

- i) periodo de crecimiento cristalino;
- ii) período de crecimiento de la capa de hielo poroso;
- iii) período de intenso crecimiento de la capa de hielo poroso.

Tao et al. [7] subdividen el proceso de formación en base a las dos últimas etapas como:

- i) crecimiento cristalino unidimensional;
- ii) ramificación de cristales y formación de la capa porosa.

Para realizar la formulación matemática de este fenómeno se utiliza el parámetro denominado tiempo de transición (t_{tr}), que establece el inicio y el final de cada etapa e indica la transición entre ellas. Se puede subdividir en dos etapas:

- i) formación de núcleos de hielo;
- ii) crecimiento unidimensional.

Cada etapa tiene un modelado matemático específico. En la segunda etapa, donde se produce la ramificación de los cristales, se considera que el hielo es poroso, lo que aumenta la complejidad del modelado. Para resolver las ecuaciones que rigen esta etapa se utilizó la técnica de promediación volumétrica desarrollada por Whitaker [8] para modelar el proceso de secado en medios porosos.

2.1.1 Modelado de la primera etapa del proceso de formación de escarcha

En la primera etapa de formación de hielo poroso, ocurre la formación de núcleos, con un crecimiento unidimensional en la dirección perpendicular a la superficie. Los balances de calor y masa se realizan en el modelo unitario de crecimiento de cristales de hielo, ilustrado en la Figura 1, para obtener las ecuaciones que gobiernan el fenómeno.

Las ecuaciones (1) y (2) representan el modelado matemático de la primera etapa del proceso de formación de hielo poroso, para energía y difusión, respectivamente.

$$\rho_{\beta} c_{p\beta} d \frac{\partial T}{\partial t} = k_{\beta} d \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + 2k_{\beta} \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial d}{\partial z} - 4h_c (T - T_{\gamma}) + 2\rho_{\beta} h_{sg} \frac{\partial d}{\partial t} \quad (1)$$

$$\rho_{\beta} \frac{\partial d}{\partial t} = 2h_m (w_{\gamma} - w_{\beta}) \quad (2)$$

2.1.2 Modelado de la segunda etapa del proceso de formación de escarcha

En el modelado de la segunda etapa se utiliza el modelo desarrollado por Whitaker [8] para medios porosos, basado en el promedio volumétrico local. Las ecuaciones de gobierno para las fases β y γ fueron formuladas por Sedano [6], a través de un elemento de volumen (ΔV), dentro del medio poroso, como se ilustra en la Figura 2.

El balance de energía viene dado por la Ecuación (3).

$$\rho_{\beta} c_{p\beta} \frac{\partial T}{\partial t} + \dot{m} h_{sg} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3)$$

Mediante la hipótesis de la presencia de aire saturado en el medio poroso, obtenemos la ecuación de continuidad de las fases del hielo (β), dada por la Ecuación (4).

$$\frac{\partial \varepsilon_{\beta}}{\partial t} = \dot{m} = w - w_{sat} \quad (4)$$

De nuevo, mediante la hipótesis de la presencia de aire saturado en el medio poroso, se obtiene la ecuación de difusión en fase gaseosa (γ), dada por la Ecuación (5).

$$\frac{\partial \varepsilon_{\gamma}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(D_{eff} \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (5)$$

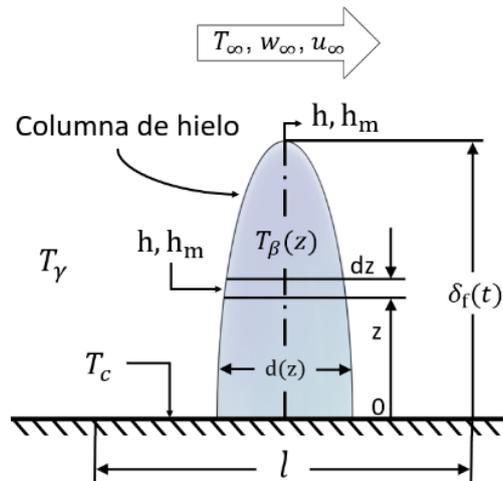


Figura 1. Modelo unitario de crecimiento de cristales de hielo. Fuente: adaptado de Tao et al. [7].

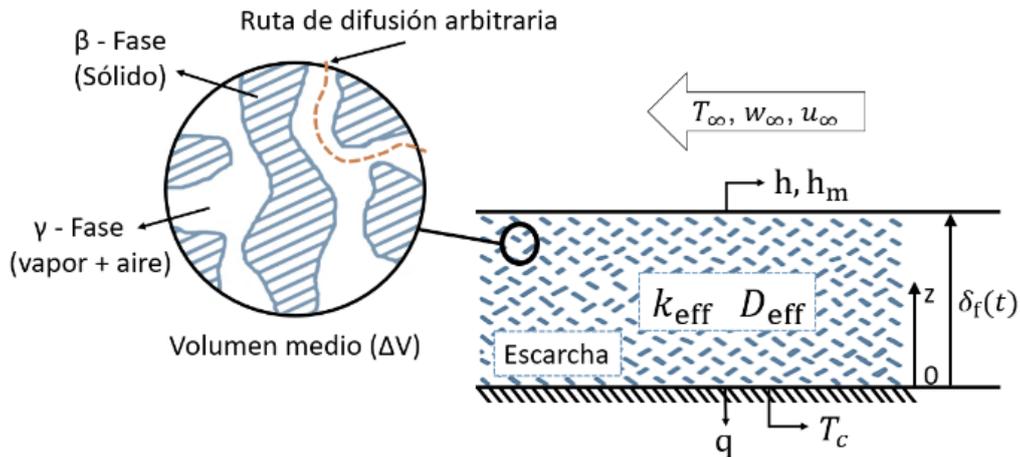


Figura 2. Elemento de volumen utilizado en el modelo. Fuente: adaptado de Tao et al. [7].

2.2. Modelado Numérico

El programa fue implementado en Python utilizando Jupyter Notebook Environment, el cual consiste en una aplicación de código abierto (licencia BSD) que permite la creación y resolución de rutinas que contienen códigos iterativos y ecuaciones, así como la obtención de gráficos (Matplotlib).

Las ecuaciones que modelan la primera etapa del crecimiento de la capa de hielo poroso se resuelven mediante diferencias finitas. Para desarrollar la discretización se utiliza el Método de las Diferencias Finitas centrado en la derivada en el espacio y puntos intermedios, y formulación implícita para el tiempo de transición. Aplicando una malla fija, se interpolan los valores de las propiedades a cada nueva posición de la frontera, mediante el Método Spline, que es una técnica de aproximación, mediante interpolación polinomial, donde el intervalo de interés se divide en varios

subintervalos, los cuales son interpolado con polinomios de menor grado.

Las ecuaciones diferenciales que modelan la segunda etapa se resuelven nuevamente usando el Método de Diferencias Finitas.

Se utilizan diferencias finitas centradas para las derivadas en el espacio y, para los puntos intermedios, se utiliza la Técnica Upwind para la derivada en el tiempo.

Se utiliza una malla fija, como antes, y se interpolan los valores de las variables y propiedades en estudio a cada una de las nuevas posiciones de frontera, se resuelven las ecuaciones diferenciales por iteraciones, hasta obtener una diferencia igual o menor a 10^{-5} entre los valores de las variables en dos iteraciones sucesivas.

Los diagramas de flujo de los algoritmos de solución para la primera y segunda etapa de formación de hielo poroso se ilustran de forma simplificada en las Figuras 3 y 4, respectivamente.

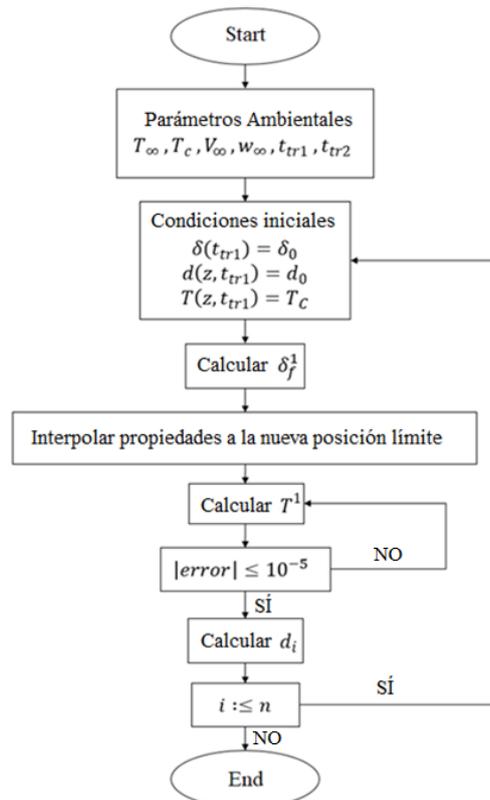


Figura 3. Algoritmo de solución de formación de escarcha: 1^{ra} etapa. Fuente: elaboración propia.

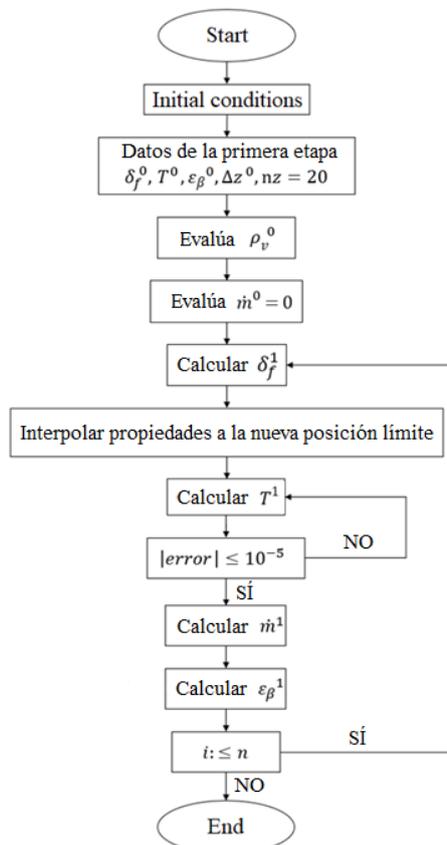


Figura 4. Algoritmo de solución de formación de escarcha: 2^{da} etapa. Fuente: elaboración propia.

2.3. Experimental

2.3.1. Aparato experimental

El aparato experimental según la Figura 5, consta de una sección de prueba, que contiene un chip termoeléctrico Peltier TEC1-12706, un disipador de calor con aletas con tubos de calor Cooler Master™ Hyper T4, un sistema de adquisición de datos Keysight™ 34970A con un multiplexor Keysight™ 34901A de 18 canales, una fuente de alimentación Keysight™ U8002A, una cámara digital Sony™ Cyber-Shot DSC-W530 con 14.1 MP y 90 DPI, un trípode Polaroid™, una computadora portátil Dell™ y un NHSTM UPS. La sección de prueba consta de una caja de acrílico (carcasa), una base de soporte de aluminio y un ventilador axial Multilaser™.



Figura 5. Aparato experimental. Fuente: elaboración propia.

2.3.2 Procedimiento experimental

La metodología utilizada en los procedimientos experimentales se puede dividir en 10 pasos, que son los siguientes:

- #1) aislar el entorno de prueba;
- #2) encender los sistemas de refrigeración, control y adquisición de datos;
- #3) esperar el intervalo de tiempo requerido para que los parámetros ambientales estén en condiciones estables;
- #4) fijación de la placa de muestra a probar mediante el uso de pasta térmica;
- #5) encender los componentes eléctricos del aparato experimental, fijando la velocidad del aire interior en 0,5 m/s a través de los sistemas de control y adquisición de datos;
- #6) preparar y verificar los sistemas de medición, como la cámara digital, el termómetro infrarrojo, los termopares y otros sensores;
- #7) realizando la primera medición, tiempo cero;
- #8) activación de la superficie fría a través de la fuente de alimentación en el voltaje de 11.9V;
- #9) realizar las mediciones en cada intervalo de tiempo de 10 minutos durante el tiempo total de 90 minutos, recolectando todos los datos en una hoja de cálculo digital;
- #10) guardando los datos obtenidos para el análisis con las especificaciones de la placa de muestra que se está probando.

Las superficies planas utilizadas en los experimentos consisten en placas cuadradas de aluminio y cobre, con

un borde de 40 mm y un espesor de 2 mm, como se muestra en la Figura 6.



Figura 6. Placas planas utilizadas. Fuente: elaboración propia.

El análisis de incertidumbres experimentales se asoció con las incertidumbres del espesor de la helada, temperaturas, humedad, velocidad del aire y tiempo. Los datos recogidos en las pruebas experimentales tienen las incertidumbres que se muestran en la Tab. 1.

Tabla 1. Incertidumbres de medida.

Parámetro	Incertidumbre
Espesor de escarcha	± 0.265 mm
Humedad	± 5.0 %
Temperatura ambiente	± 0.5 °C
Temperatura superficial fría	± 2.05 °C
Tiempo	± 0.01 s
Velocidad del aire	± 0.215 m/s

Fuente: elaboración propia.

2.4. Resultados

Los resultados experimentales presentados se refieren al espesor de la capa de hielo sobre placas planas de aluminio y cobre, en el intervalo de tiempo de 10 (diez) minutos durante 90 (noventa) minutos.

Para el análisis del espesor de la escarcha se utilizó el software ImageJ© en el tratamiento de las imágenes, configurando la misma escala de medición de acuerdo a las especificaciones de la cámara digital utilizada, como resolución y DPI (puntos por pulgada), lo que brinda la ancho y alto del archivo de la imagen, con el fin de posibilitar la conversión de la longitud, en este caso la altura, en píxeles a milímetros, y posteriormente permitir la superposición de todas las imágenes, teniendo como referencia el tiempo inicial, como se ejemplifica en la Figura 7.

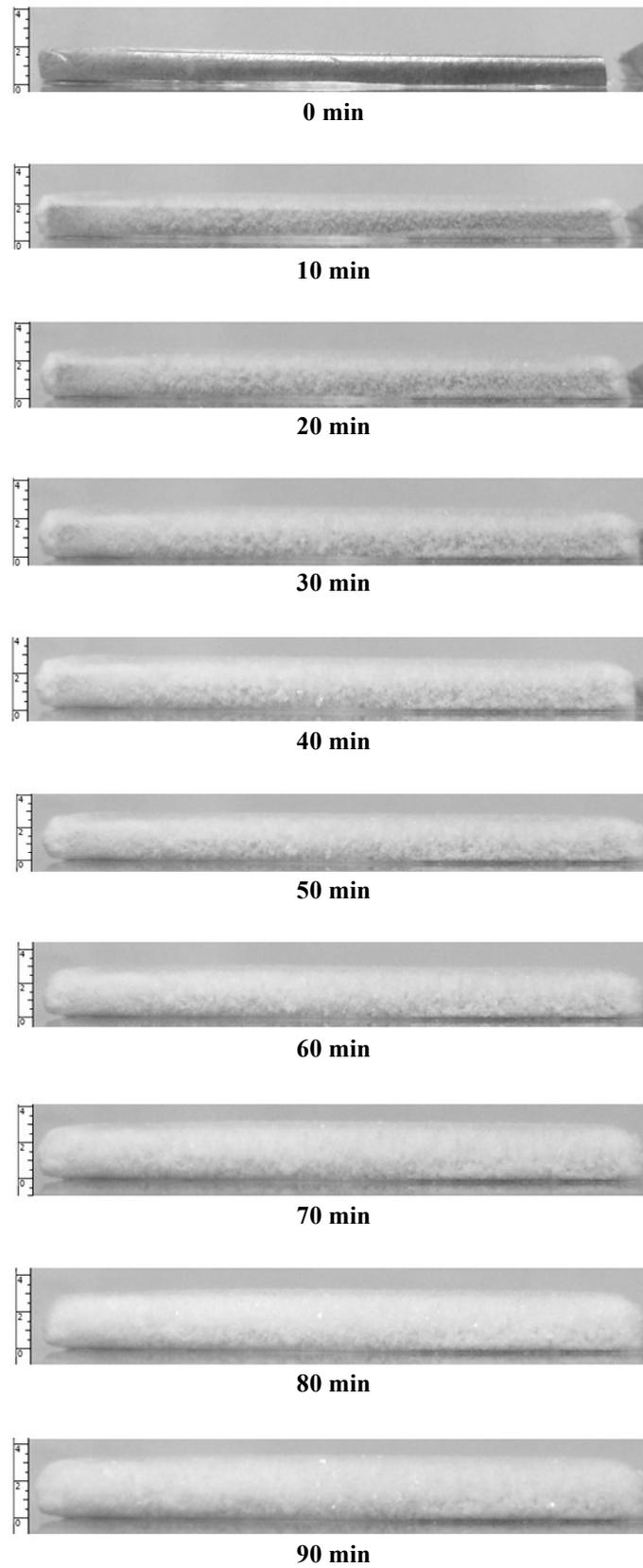


Figura 7. Formación de la capa de hielo poroso en el tiempo. Fuente: elaboración propia.

Durante la obtención de los resultados experimentales se mantuvieron constantes los parámetros ambientales según Tab. 2.

Tabla 2. Incertidumbres de medida.

Parámetro	Valor
Humedad	50 %
Temperatura ambiente	18°C
Temperatura superficial fría	- 20°C
Velocidad del aire	0.5 m/s

Fuente: elaboración propia.

Las Figuras 8 y 9 muestra los resultados experimentales obtenidos comparando las muestras de aluminio y cobre, respectivamente, con los parámetros ambientales presentados en la Tabla 2.

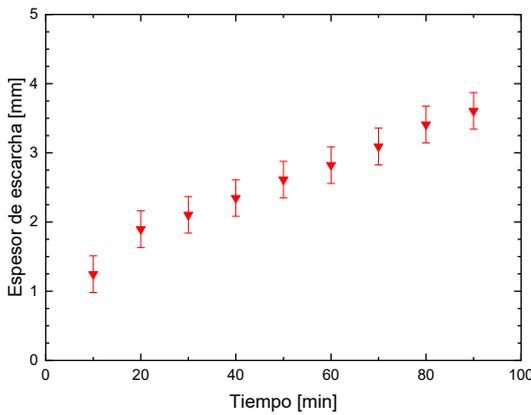


Figura 8. Formación de escarcha en el tiempo - Aluminio. Fuente: elaboración propia.

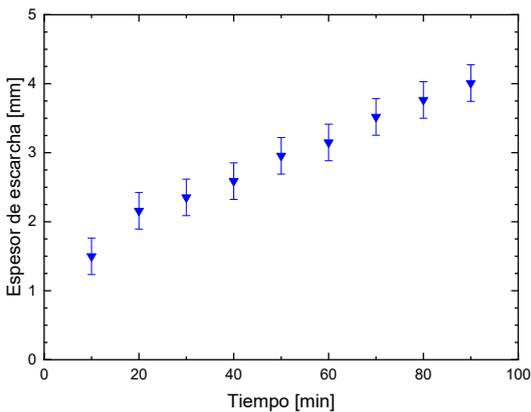


Figura 9. Formación de escarcha en el tiempo - Cobre. Fuente: elaboración propia.

Los resultados presentados en las Figuras 6 y 5 muestran buena concordancia, en relación al comportamiento del aumento del espesor de la capa de hielo poroso en función del tiempo, con los resultados publicados en la literatura, por Liu et al. [9], Piucco [10] y Sommers et al. [11].

La Figura 7 presenta el resultado del análisis numérico de la segunda etapa de formación de escarcha, con el objetivo de la formación y crecimiento de la capa de hielo poroso, cuya conductividad térmica, según lo indicado por Incropera et. al [12], se ajustó a 237 W/mK (Al) y 401 W/mK (Cu) y los parámetros ambientales según Tab. 2.

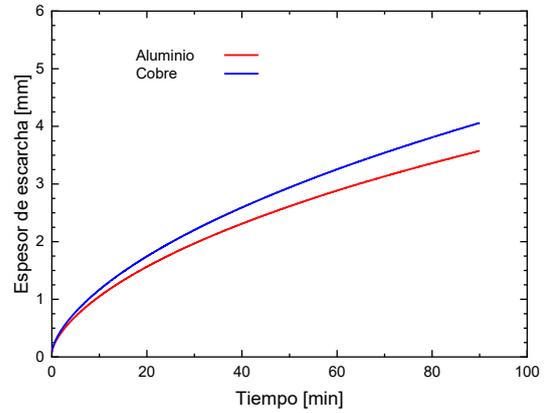


Figura 10. Análisis numérico de la Formación de escarcha en el tiempo. Fuente: elaboración propia.

Las Figuras 11 y 12 permiten comparar los resultados experimentales con los obtenidos numéricamente.

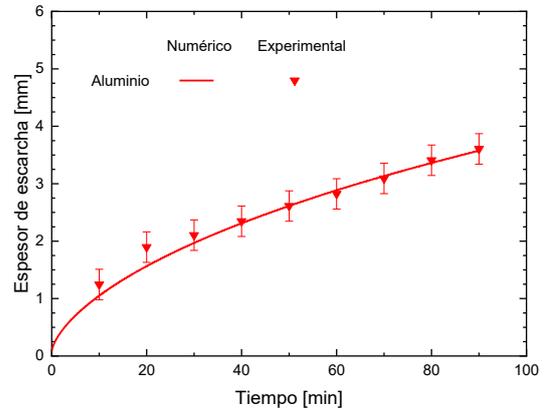


Figura 11. Formación de escarcha - Numérico y Experimental - Aluminio. Fuente: elaboración propia.

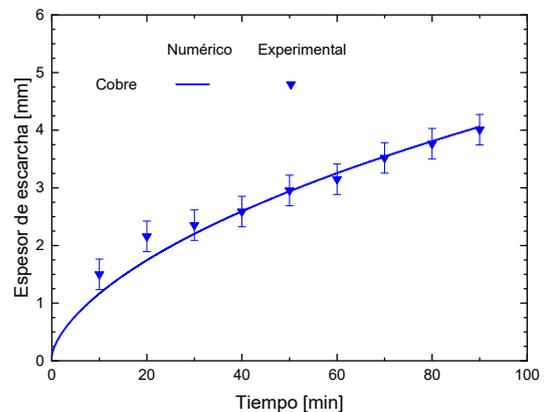


Figura 12. Formación de escarcha - Numérico y Experimental - Cobre. Fuente: elaboración propia.

Mediante el análisis numérico-experimental realizado a partir de la comparación con datos experimentales, se observa que el modelo matemático utilizado presenta buena concordancia con los resultados experimentales. También se observa que los mayores errores se presentan en los primeros intervalos de tiempo, presentando, en general, mayores desviaciones en los primeros treinta minutos, probablemente debido a las condiciones iniciales del fenómeno utilizado.

2.5. Conclusiones

En esta investigación se realizó un estudio numérico-experimental de la formación de hielo poroso sobre superficies planas de cobre.

Los resultados experimentales obtenidos indican una buena concordancia con la literatura, en cuanto al comportamiento de la formación de hielo poroso.

Del análisis numérico se puede concluir que el modelo matemático y el código numérico utilizado son capaces de predecir el aumento del espesor de la capa de hielo poroso en superficies planas.

Esta investigación refuerza resultados presentes en la literatura, y puede ayudar a la comunidad científica y servir de apoyo para trabajos futuros.

2.6. Agradecimientos

Se entregan reconocimientos al Decano de Investigación y Posgrado (PROPPG) de la Universidad Tecnológica Federal de Paraná (UTFPR), a la Dirección de Investigación y Posgrado (DIRPPG), al Programa de Posgrado en Ingeniería Mecánica (PPGEM) y al Departamento Académico de Mecánica (DAMEC) de la Universidad Tecnológica Federal de Paraná, UTFPR/Campus Ponta Grossa.

3. Referencias

- [1] Da Silva, R.C.R. Estudo Experimental e Numérico da Formação de Frost em torno de três Cilindros com Arranjo Triangular. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.
- [2] Lee, Y. B.; Ro, S. T. “An Experimental Study of Frost Formation on a Horizontal Cylinder Under Cross Flow”. *International Journal of Refrigeration*, 2001.
- [3] Biglia, F. M. et al. “Improving the Thermal Efficiency and Performance of Refrigeration Systems: Numerical-Experimental Analysis of Minimization of Frost Formation”. *Energy Engineering, Tech Science Press*, 2022.
- [4] Scalón, V. L. Formação de Gelo em Torno de Cilindros Verticais. 101f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993.
- [5] Delgado, P. A. M. Estudo experimental e numérico da formação de frost com convecção natural em arranjo triangular de tubos esbeltos verticais. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual de Campinas, 2017.
- [6] Sedano, C. T. S. Formação de Gelo em Placa Plana. 106f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.
- [7] Tao, Y. X. et al. “A mathematical model for predicting the densification and growth of frost on a flat plate”. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Saskatoon, Canada, v. 36, n. 2, p. 353-363, 1993.
- [8] Whitaker, S. Simultaneous heat, mass, and momentum transfer in porous media: A theory of drying. *Advances in Heat Transfer*, 13, 119–203, 1977.
- [9] Liu, Z. et al. “Frost formation on a super-hydrophobic surface under natural convection conditions”. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 51, n. 25-26, p. 5975- 5982, 2008.
- [10] Piucco, R. O. Análise Teórico-experimental Da Formação De Geadas Em Refrigeradores Domésticos. 124f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2008.
- [11] Sommers, A. D. et al. “The Role of Surface Wettability on Natural Convection Frosting: Frost Growth Data and a New Correlation for Hydrophilic and Hydrophobic Surfaces”. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 122, pp. 78-88, 2018.
- [12] Incropera, F.P. et al. Fundamentos de transferência de calor e de massa. 6 ed. Editora LTC, Rio de Janeiro, RJ, 2008.