FORMAÇÃO DE GELO POROSO EM SUPERFÍCIES PLANAS DE AÇO INOXIDÁVEL E COBRE: ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL

Felipe Mercês Biglia[1] (biglia@alunos.utfpr.edu.br),
Victor Vaurek Dimbarre[2] (victordimbarre@alunos.utfpr.edu.br),
Rogério de Oliveira Souza[2] (rogerio98@outlook.com),
Raquel Cunha Ribeiro da Silva[3] (raqueld@utfpr.edu.br),
Thiago Antonini Alves[2] (antonini@utfpr.edu.br)

[1] Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR); Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Curitiba, Brasil.
[2] Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR); Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Ponta Grossa, Brasil.
[3] Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR); Departamento Acadêmico de Mecânica, Guarapuava, Brasil.

RESUMO: *O presente trabalho consiste na análise numérica e experimental do processo de formação de gelo poroso em superfícies planas de aço inoxidável e cobre. Esse fenômeno ocorre quando a mistura de ar e vapor d'água entra em contato com superfícies cujas temperaturas estão abaixo de 0ºC, algo comum em diversas aplicações comerciais e industriais que envolvem baixas temperaturas. Nessa situação, o ar e o vapor d'água passam diretamente para o estado sólido por ressublimação, resultando em uma estrutura porosa de gelo. Esse acúmulo de gelo pode aumentar significativamente o consumo de energia e diminuir o desempenho de vários equipamentos utilizados no processo de resfriamento, reduzindo sua eficiência. Para estudar esse fenômeno, foi desenvolvido um aparato experimental de baixo custo. Por meio de medições e simulações numéricas, foram investigadas as variações na espessura da camada de gelo ao longo do tempo. Os resultados numéricos obtidos mostraram boa concordância com os resultados experimentais. Essa abordagem combinada entre análise numérica e experimental proporcionou uma compreensão mais completa do processo de formação de gelo poroso em chapas de aço inoxidável e cobre, fornecendo informações valiosas para a otimização e o aprimoramento de equipamentos e sistemas de resfriamento em ambientes de baixas temperaturas.*

PALAVRAS-CHAVE: *Gelo Poroso, Mudança de Fase, Minimização de Gelo Poroso.*

FROST FORMATION ON FLAT SURFACES OF STAINLESS STEEL AND COPPER: NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS

ABSTRACT: *The present work consists of the numerical and experimental analysis of the frost formation process on flat surfaces of stainless steel and copper. This phenomenon occurs when the mixture of air and water vapor comes into contact with surfaces whose temperatures are below 0ºC, which is common in various commercial and industrial applications involving low temperatures. In this situation, air and water vapor directly transition to the solid state through resublimation, resulting in a porous ice structure. This ice buildup can significantly increase energy consumption and reduce the performance of various equipment used in the cooling process, thereby decreasing their efficiency. To investigate this phenomenon, a low-cost experimental apparatus was developed. Through measurements and numerical simulations, variations in the ice layer thickness over time were investigated. The obtained numerical results showed good agreement with the experimental results. This combined numerical and experimental approach provided a comprehensive understanding of the process of porous ice formation on stainless steel and copper surfaces, offering valuable insights for the optimization and improvement of equipment and cooling systems operating in low-temperature environments.*

KEYWORDS: *Frost, Phase Change, Frost Minimization.*

1. INTRODUÇÃO

O fenômeno físico de formação de gelo poroso ocorre quando uma mistura de ar e vapor d'água entra em contato com superfícies que estão abaixo de 0°C. Esse fenômeno é comumente observado em diversas aplicações comerciais e industriais de baixa temperatura, como asas de aviões, rotores de compressores, evaporadores de sistemas de refrigeração, sistemas de purificação de gases, entre outros (Da Silva, 2014).

Inicialmente, a camada de gelo poroso atua como uma aleta, intensificando a troca de calor com o ambiente externo. No entanto, à medida que a camada de gelo poroso aumenta em espessura, a resistência térmica também aumenta, o que reduz a taxa de transferência de calor da superfície (Lee e Ro, 2001).

O acúmulo de gelo poroso em superfícies frias pode afetar negativamente o desempenho dos equipamentos de refrigeração, reduzindo sua eficiência e exigindo maior consumo de energia para o correto funcionamento (Biglia *et al.*, 2022).

O aumento da espessura da camada de gelo poroso causa dois problemas principais: em primeiro lugar, reduz a taxa de transferência de calor; em segundo lugar, aumenta a queda de pressão devido ao acúmulo de gelo nos evaporadores, o que reduz a área de escoamento nos tubos (Scalon, 1993).

Assim, a prevenção da formação e acúmulo de gelo poroso na superfície dos equipamentos utilizados em sistemas de refrigeração é essencial para obter um bom desempenho e garantir o funcionamento adequado do sistema como um todo (Delgado, 2017).

Neste contexto, o presente trabalho busca realizar uma análise numérico-experimental da formação de gelo poroso em superfícies planas de aço inoxidável e cobre, sob parâmetros ambientais controlados.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Modelagem Matemática

A formulação matemática da formação de gelo poroso em placas planas é fundamentada nos modelos propostos por Sedano (1996) e Tao *et al.* (1993), descritos em detalhes em Biglia (2018). Essa formulação pode ser dividida em três etapas distintas:

i) Período de crescimento dos cristais;

ii) Período de crescimento da camada de gelo poroso;

iii) Período de intenso crescimento da camada porosa.

Tao *et al.* (1993) subdividem o processo com base nas duas últimas etapas, sendo elas:

i) Crescimento unidimensional dos cristais;

ii) Ramificação dos cristais e formação da camada porosa.

A formulação matemática desse fenômeno emprega o uso do parâmetro denominado tempo de transição (t_{tr}), que determina o início e o fim de cada etapa e indica a transição entre elas. Esse tempo de transição pode ser subdividido em duas etapas distintas:

i) Formação dos núcleos de gelo;

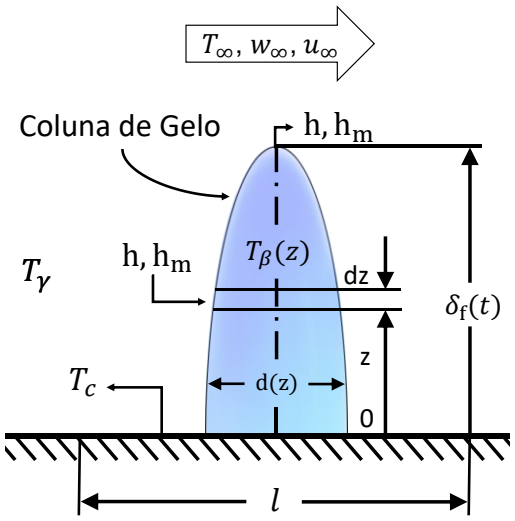
ii) Crescimento unidimensional.

Cada etapa possui uma modelagem matemática específica. Na segunda etapa, onde ocorre a ramificação dos cristais e o gelo torna-se poroso, a complexidade da modelagem aumenta. Para resolver as equações que regem essa etapa, utilizou-se a técnica de média volumétrica desenvolvida por Whitaker (1977), que foi originalmente concebida para modelar o processo de secagem em meios porosos.

2.1.1 Modelagem da primeira etapa do processo de formação de gelo poroso

No primeiro estágio de formação de gelo poroso, ocorre a nucleação, com crescimento unidimensional na direção perpendicular à superfície. Para obter as equações que governam esse fenômeno, são realizados os balanços de calor e massa no modelo unitário de crescimento de cristais de gelo, conforme ilustrado na Figura 1.

FIGURA 1. Modelo unitário de crescimento de cristais de gelo.



Fonte: adaptado de Tao *et al.* (1993).

As Equações (1) e (2) representam a modelagem matemática da primeira etapa do processo de formação de gelo poroso, para energia e difusão, respectivamente.

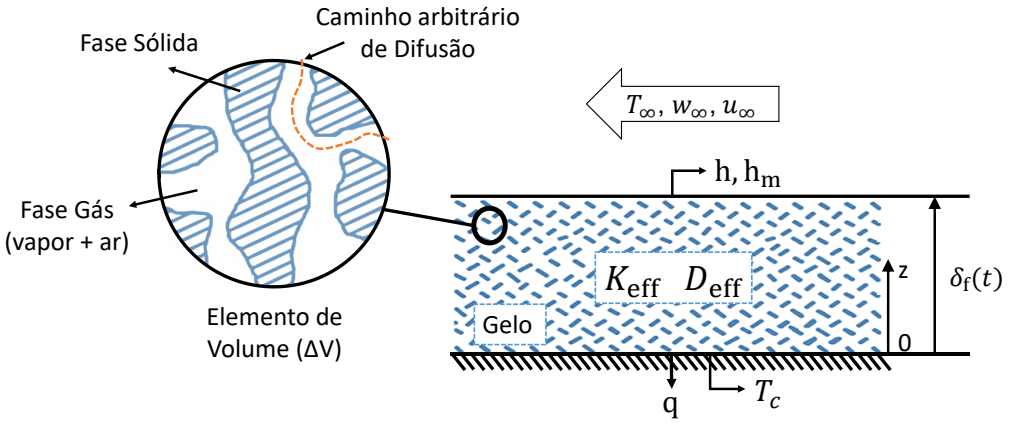
$$\rho_\beta c_{p\beta} d \frac{\partial T}{\partial t} = k_\beta d \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + 2k_\beta \frac{\partial T}{\partial z}\frac{\partial d}{\partial z} - 4h_c\left(T - T_\gamma\right) + 2\rho_\beta h_{sg} \frac{\partial d}{\partial t} \tag{1}$$

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

2.1.2 Modelagem da segunda etapa do processo de formação de gelo poroso

Na modelagem da segunda etapa, utiliza-se o modelo desenvolvido por Whitaker (1977) para meios porosos, o qual é baseado na média volumétrica local. As equações que regem as fases β e γ foram formuladas por Sedano (1996) por meio de um elemento de volume (ΔV) dentro do meio poroso, como ilustrado na Figura 2.

FIGURA 2. Elemento de volume usado no modelo.



Fonte: adaptado de Tao *et al.* (1993).

O balanço de energia é dado pela Equação (3).

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

Utilizando a hipótese da presença de ar saturado no meio poroso, obtemos a equação de continuidade da fase de gelo (β), dada pela Equação (4).

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

Novamente, assumindo a presença de ar saturado no meio poroso, obtém-se a equação de difusão em fase gasosa (γ), dada pela Equação (5).

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

2.2 Modelagem Numérica

O programa foi desenvolvido em linguagem *Python*, utilizando o ambiente do *Jupyter Notebook*, um aplicativo de código aberto (*licença BSD*) que permite a criação e execução de rotinas contendo códigos iterativos e equações, bem como a geração de gráficos usando a biblioteca *Matplotlib*.

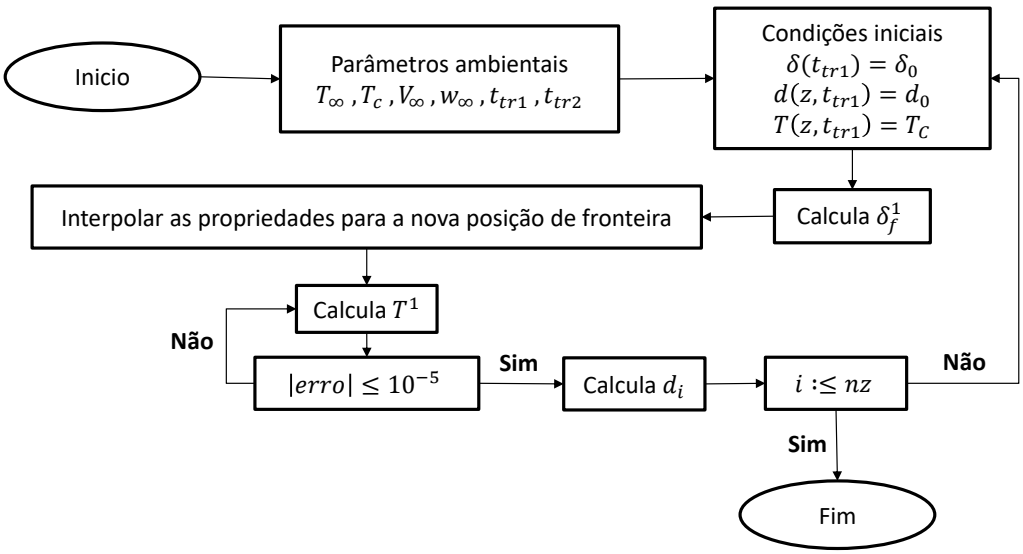
Para resolver as equações que modelam o primeiro estágio do crescimento da camada de gelo poroso, são aplicadas diferenças finitas. A discretização é feita utilizando o Método das Diferenças Finitas, com uma abordagem centrada na derivada no espaço e nos pontos intermediários, e uma formulação implícita para o tempo de transição. Uma malha fixa é utilizada, e os valores das propriedades são interpolados em cada nova posição da fronteira através do Método *Spline*, uma técnica de aproximação que utiliza interpolação polinomial para subdividir o intervalo de interesse em subintervalos e, em seguida, interpolá-los com polinômios de menor grau.

Para resolver as equações diferenciais que modelam o segundo estágio, também é utilizado o Método das Diferenças Finitas. Diferenças finitas centradas são empregadas para as derivadas no espaço, e para os pontos intermediários, a técnica *Upwind* é utilizada para a derivada no tempo.

A malha fixa é mantida, assim como na etapa anterior, e os valores das variáveis e propriedades são interpolados para cada nova posição da fronteira. As equações diferenciais são resolvidas por iterações, até que uma diferença igual ou menor que 10^{-5} seja obtida entre os valores das variáveis em duas iterações sucessivas.

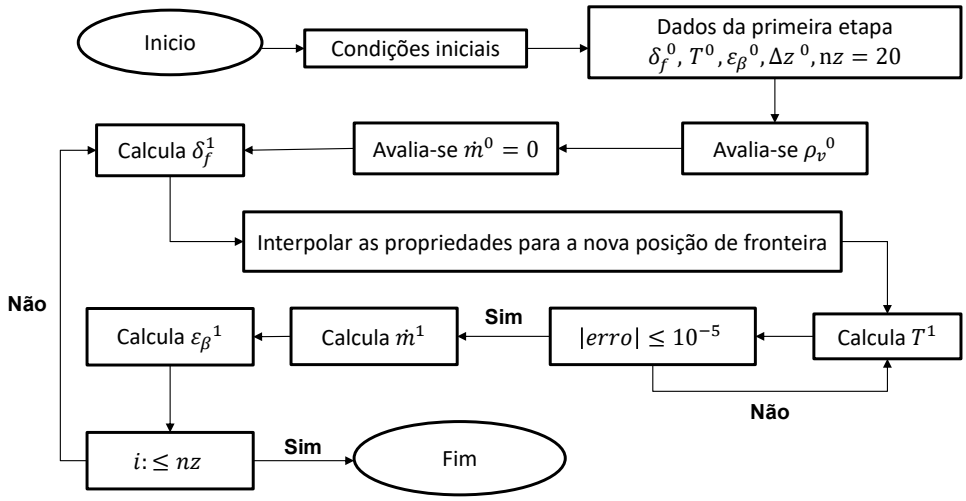
Os fluxogramas simplificados dos algoritmos de solução para o primeiro e segundo estágios de formação de gelo poroso são ilustrados nas Figuras 3 e 4, respectivamente.

FIGURA 3. Fluxograma do algoritmo de solução: 1º estágio.



Fonte: adaptado de Biglia (2018).

FIGURA 4. Fluxograma do algoritmo de solução: 2º estágio.



Fonte: adaptado de Biglia (2018).

2.3 Experimental

2.3.1 Aparato experimental

O aparato experimental de acordo com a Figura 5 consiste em uma seção de teste, contendo um pastilha termoelétrica *Peltier* TEC1-12706, um dissipador de calor aletado com tubos de calor *Cooler Master*^{TM} *Hyper* T4, um sistema de aquisição de dados *Keysight*^{TM} 34970A com um multiplexador de 18 canais *Keysight*^{TM} 34901A, uma fonte de alimentação *Keysight*^{TM} U8002A, uma câmera fotográfica *Canon*^{TM} EOS-Rebel-T6 com 18 MP, um tripé *Polaroid*^{TM}, um *notebook Dell*^{TM} e um *nobreak NHS*^{TM}. A seção de teste consiste em uma caixa de acrílico (invólucro), uma base de suporte de alumínio e um ventilador axial *Multilaser*^{TM}.

FIGURA 5. Aparato experimental.



2.3.2 Procedimento experimental

A metodologia utilizada nos procedimentos experimentais pode ser dividida em 10 etapas, que são as seguintes (Biglia *et al.*, 2020):

#1) isolar o ambiente de teste;

#2) ligar os sistemas de refrigeração, controle e aquisição de dados;

#3) aguardar o intervalo de tempo necessário para estabilização dos parâmetros ambientais;

#4) fixação da placa a ser testada com a pasta térmica;

#5) ligar os componentes elétricos do aparato experimental;

#6) preparar e verificar os sistemas de medição;

#7) fazer a primeira medição (tempo zero);

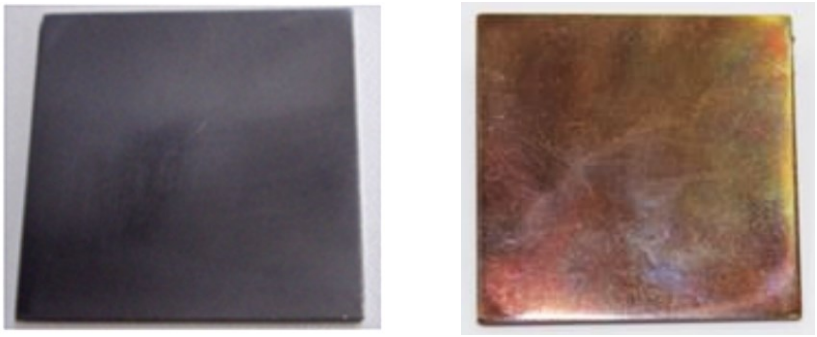
#8) ativação da superfície fria através da fonte de alimentação na tensão de 11.9V;

#9) realizar as medições a cada intervalo de tempo de 10 minutos;

#10) salvar os dados obtidos para análise com as especificações da placa testada.

As superfícies planas utilizadas nos experimentos consistem em placas quadradas de aço inoxidável e cobre, com aresta de 40 mm e espessura de 2 mm, conforme mostra a Figura 6.

FIGURA 6. Placas planas utilizadas.



Aço inoxidável Cobre

A análise das incertezas experimentais foi associada às incertezas da espessura da camada de gelo poroso, temperaturas, tempo, umidade e velocidade do ar. Os dados coletados nos testes experimentais têm as incertezas mostradas na Tabela 1.

TABELA 1. Incertezas de medição.

Parâmetro	Incerteza
Espessura de gelo poroso	±0.265 mm
Temperatura ambiente	±0.5°C
Temperatura da superfície fria	±2.05°C
Tempo	±0.01 s
Umidade	±5.0 %
Velocidade do ar	±0.215 m/s

3. RESULTADOS

Os resultados experimentais apresentados referem-se à medição da espessura da camada de gelo poroso sobre placas planas de aço inoxidável e cobre, durante um intervalo de tempo de 10 (dez) minutos a 90 (noventa) minutos. Para realizar a análise da espessura da camada de gelo poroso, foi utilizado o software *ImageJ©* para o processamento das imagens. A escala de medição foi configurada de acordo com as especificações da câmera digital utilizada, para obter a largura e altura do arquivo de imagem. Isso possibilitou a conversão de uma medida de comprimento, neste caso, a altura, em pixels para milímetros, permitindo assim a sobreposição de todas as imagens, tendo como referência o tempo inicial, como exemplificado na Figura 7.

FIGURA 7. Espessura da camada de gelo poroso ao longo do tempo.

AÇO INOXIDÁVEL	**COBRE**
	
0 min	0 min
	
30 min	30 min
	
60 min	60 min
	
90 min	90 min

Durante a obtenção dos resultados experimentais, os parâmetros ambientais foram mantidos constantes de acordo com a Tabela 2.

TABELA 2. Parâmetros ambientais.

Parâmetro	Valor
Temperatura ambiente	18°C
Temperatura da superfície fria	- 20°C
Umidade	50 %
Velocidade do ar	0.5 m/s

As Figuras 8 e 9 mostram os resultados experimentais obtidos com os parâmetros ambientais apresentados na Tabela 2, para as amostras de aço inoxidável e cobre, respectivamente.

FIGURA 8. Análise experimental da formação de gelo poroso – Aço inoxidável.

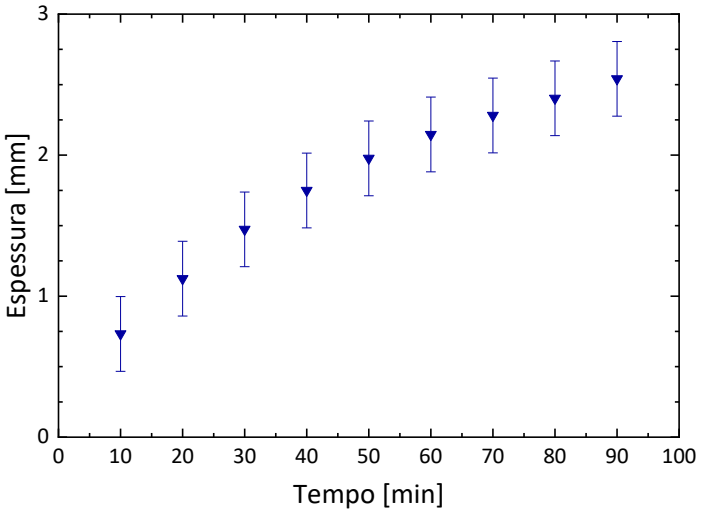
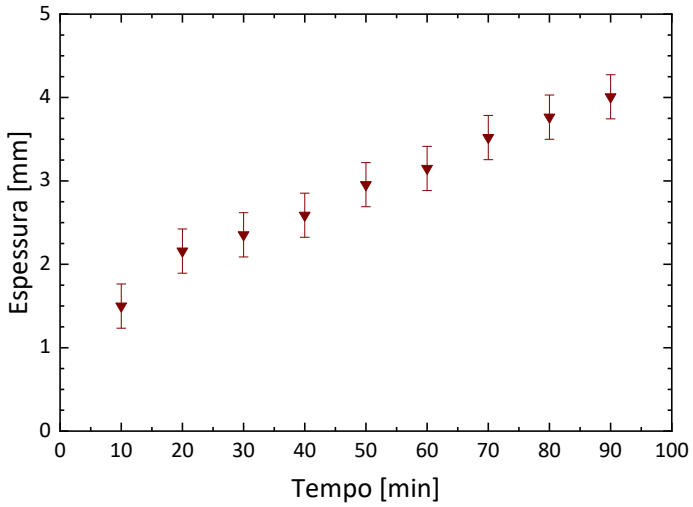


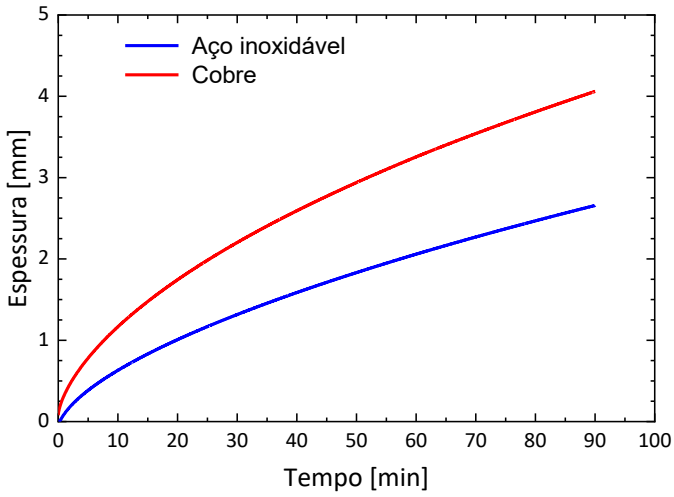
FIGURA 9. Análise experimental da formação de gelo poroso – Cobre.



Os resultados apresentados nas Figuras 8 e 9 demonstram boa concordância com os dados publicados na literatura por Liu *et al.* (2008), Piucco (2008) e Sommers *et al.* (2018) em relação ao comportamento do aumento da espessura da camada de gelo poroso em função do tempo.

A Figura 10 apresenta o resultado da análise numérica do segundo estágio de formação de gelo poroso, enfocando a formação e o crescimento da camada de gelo poroso. Para essa etapa, a condutividade térmica, foram ajustadas para 15 W/mK e 237 W/mK, conforme indicado por Bergman e Lavine (2019), para as amostras de aço inoxidável e cobre, respectivamente e os parâmetros ambientais foram definidos de acordo com a Tabela 2.

FIGURA 10. Análise numérica da formação de gelo poroso.



As Figuras 11 e 12 permitem comparar os resultados experimentais com os obtidos numericamente.

FIGURA 11. Formação de gelo poroso - Numérico-Experimental – Aço inoxidável.

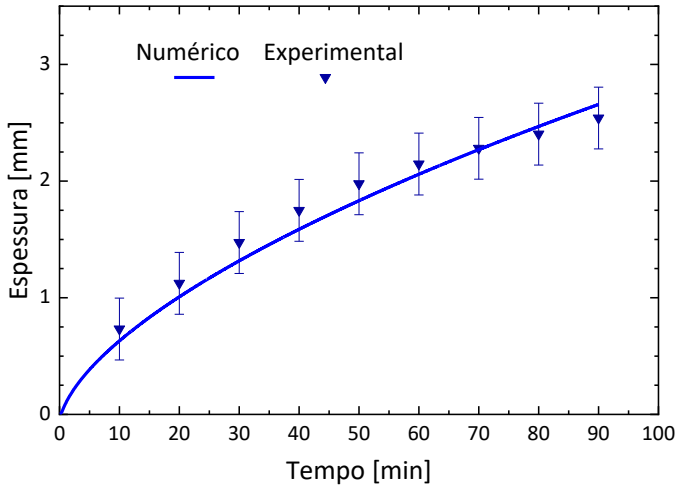
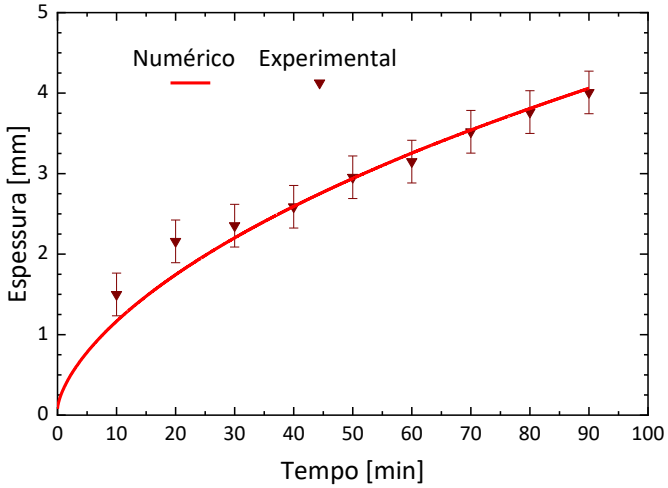


FIGURA 12. Formação de gelo poroso - Numérico-Experimental – Cobre.



Através da análise numérico-experimental e da comparação com os dados experimentais, constata-se que o modelo matemático utilizado apresenta uma boa concordância com os resultados experimentais.

Observa-se também que os maiores erros ocorrem nos primeiros intervalos de tempo, apresentando, em geral, maiores desvios nos primeiros trinta minutos, provavelmente devido às condições iniciais do fenômeno em estudo.

4. CONCLUSÃO

Os resultados experimentais obtidos possuem boa concordância com os dados encontrados na literatura, confirmando o comportamento esperado da formação de gelo poroso.

A análise numérica permitiu concluir que o modelo matemático e o código numérico empregados são eficazes na previsão do aumento da espessura da camada de gelo poroso em superfícies planas.

Essa pesquisa reforça os resultados já presentes na literatura e pode ser de grande valia para a comunidade científica em futuros trabalhos relacionados ao tema.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. Fundamentos de transferência de calor e de massa. Editora LTC, Rio de Janeiro, BRA, 648p., 2019.

BIGLIA, F. M. Análise numérico-experimental da minimização da formação de gelo poroso em placas planas. Dissertação-Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.

BIGLIA, F. M.; DA SILVA, R. C. R.; LINO, F. M.; ISMAIL, K. A. R.; ALVES, T. A. Improving the thermal efficiency and performance of refrigeration systems: numerical-experimental analysis of minimization of frost formation. *Energy Engineering - Tech Science Press,* v. 119, pp. 1771-1788, 2022.

BIGLIA, F. M.; SOUZA, R. O.; DA SILVA, R. C. R.; ALVES, T. A. Investigação experimental da minimização da formação de frost em superfícies planas de aço inoxidável com revestimentos hidrofóbicos. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 12, pp. 42-49, 2020.

DA SILVA, R. C. R. Estudo experimental e numérico da formação de frost em torno de três cilindros com arranjo triangular. Tese em Engenharia Mecânica - Universidade Estadual de Campinas, 2014.

DELGADO, P. A. M. Estudo experimental e numérico da formação de frost com convecção natural em arranjo triangular de tubos esbeltos verticais. Dissertação em Engenharia Mecânica - Universidade Estadual de Campinas, 2017.

LEE, Y. B.; RO, S. T. An experimental study of frost formation on a horizontal cylinder under cross flow. *International Journal of Refrigeration*, v. 24, pp. 468-474, 2001.

LIU, Z.; Gou, Y.; Wang, J.; Cheng S. Frost formation on a super-hydrophobic surface under natural convection conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 51, n. 25-26, pp. 5975-5982, 2008.

PIUCCO, R. O. Análise teórico-experimental da formação de geada em refrigeradores domésticos. Dissertação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

SCALON, V. L. Formação de gelo em torno de cilindros verticais. Dissertação em Engenharia Mecânica - Universidade Estadual de Campinas, 1993.

SEDANO, C. T. S. Formação de gelo em placa plana. Dissertação em Engenharia Mecânica - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

SOMMERS, A. D.; Gebhart, C. W.; Hermes, C.J.L. 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*, v. 122, pp. 78-88, 2018.

TAO, Y. X.; BESANT, R. W.; REZKALLAH, K. S. A mathematical model for predicting the densification and growth of frost on a flat plate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 36, n. 2, pp. 353-363, 1993.

WHITAKER, S. Simultaneous heat, mass, and momentum transfer in porous media: a theory of drying. *Advances in Heat Transfer*, v. 13, pp. 119-203, 1977.