



## AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO PROCESSO DE DEPOSIÇÃO DE FROST EM PLACAS PLANAS DE ALUMÍNIO E DE LATÃO

Felipe Mercês Biglia, [felipebiglia@gmail.com](mailto:felipebiglia@gmail.com)<sup>1</sup>  
Rogério de Oliveira Souza, [rogerio98@outlook.com](mailto:rogerio98@outlook.com)<sup>2</sup>  
Raquel da Cunha Ribeiro da Silva, [raqueld@utfpr.edu.br](mailto:raqueld@utfpr.edu.br)<sup>3</sup>  
Thiago Antonini Alves, [antonini@utfpr.edu.br](mailto:antonini@utfpr.edu.br)<sup>4</sup>

<sup>1,2,4</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR/Câmpus Ponta Grossa, Departamento Acadêmico de Mecânica, Av. Monteiro Lobato, s/n, km 04, Jardim Carvalho, CEP 84.016-210, Ponta Grossa, PR, Brasil

<sup>3</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR/Câmpus Guarapuava, Departamento Acadêmico de Mecânica, Av. Professora Laura Pacheco Bastos, 800, Bairro Industrial, CEP 85.053-525, Guarapuava, PR, Brasil

**Resumo.** Este trabalho compreende uma análise experimental da formação e da deposição de frost (gelo poroso) em superfícies planas de alumínio e de latão. O fenômeno descrito ocorre por ressublimação, a partir do contato entre o escoamento de uma mistura de ar e de água com uma superfície com temperatura inferior a 0 °C, presente em diversas aplicações comerciais, onde o acúmulo de gelo resulta na diminuição do desempenho e da eficiência dos equipamentos, gerando gastos desnecessários. As condições ambientais avaliadas foram a temperatura da superfície fria, temperatura ambiente, velocidade e umidade do escoamento de ar. Os materiais de base das superfícies estudadas foram alumínio e latão. Os estudos apresentaram medições da espessura da camada de frost e da velocidade de deposição em função do tempo, mostrando a influência que o material de base exerce neste fenômeno e mostrando a importância da escolha do material em projetos que visam minimizar este processo.

**Palavras chave:** Frost. Gelo poroso. Placas planas. Deposição. Experimental.

### 1. INTRODUÇÃO

A formação de *frost* (gelo poroso) é um fenômeno físico que acontece a partir do contato entre o escoamento de uma mistura de ar e de água com uma superfície com temperatura inferior a 0 °C, presente em diversas aplicações comerciais e industriais de baixa temperatura, como em asas de aviões, evaporadores de sistemas de refrigeração, entre muitos outros (da Silva, 2014). Este fenômeno ocorre por meio do mecanismo de mudança fase por ressublimação, onde o vapor d'água passa diretamente para o estado sólido, formando uma estrutura porosa composta por cristais irregulares de gelo (Biglia, et al., 2018).

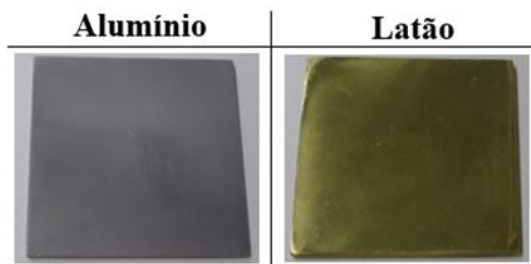
Lee e Ro (2001) afirmam que a camada de *frost* atua, inicialmente, como uma aleta, amplificando a condução de calor. Contudo, o aumento da espessura da camada de *frost* é acompanhado do aumento da resistência térmica, diminuindo a taxa de transferência de calor da superfície, o que resulta no aumento do consumo energético de sistemas de refrigeração. Desta forma, a deposição de *frost* em superfícies frias afeta o desempenho de diversos equipamentos de refrigeração, diminuindo a eficiência, gerando custos adicionais com o consumo de energia, reduzindo a vida útil do equipamento e acarretando grandes prejuízos devido às paradas para manutenção (Biglia, 2018). Com isso, torna-se fundamental a redução da formação e do acúmulo de *frost* na superfície de equipamentos utilizados em sistemas de refrigeração visando o aumento da eficiência destes equipamentos, resultando em melhores desempenhos (Delgado, 2017).

Neste contexto, o presente trabalho propõe uma análise experimental sobre a formação de *frost* em superfícies planas, cujos materiais de base são o alumínio e o latão, visando determinar qual material proporciona a maior redução do fenômeno em questão.

### 2. PLACAS PLANAS ESTUDADAS

As superfícies planas utilizadas nos experimentos, vistas na Figura 1, consistem em placas quadradas de alumínio e de latão com 40 mm de aresta e com 2 mm de espessura, nas quais foi realizado o processo de lixamento, tendo como objetivo eliminar riscas, marcas mais profundas e impurezas presentes na superfície da amostra.

Figura 1. Amostras utilizadas (Autoria própria)



Após a obtenção das superfícies, elas foram inseridas no aparato experimental por meio da utilização de uma pasta térmica *Implastec™*, com temperaturas de trabalho entre  $-40\text{ °C}$  a  $200\text{ °C}$ , a qual promoveu um melhor contato entre as superfícies e uma melhor fixação.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Bancada experimental

A bancada experimental (Fig. 2) utilizado para realização dos testes foi composto por uma seção de testes, um *notebook Dell™*, um *nobreak NHS™*, uma fonte de alimentação *Keysight™ U8002A*, um sistema de aquisição de dados *Keysight™ 34970A* com um multiplexador *Keysight™ 34901A* com 20 canais, um dissipador de calor aletado com tubos de calor *Cooler Master™ Hyper T4*, uma Câmera Digital *Sony™ Cyber-Shot DSC-W530* e um tripé *Polaroid™*.

Figura 2. Aparato Experimental (Autoria própria)



A seção de testes (Fig. 3) consiste em um caixa de acrílico (invólucro), um ventilador axial *Multilaser™*, uma janela de inspeção termográfica *Fluke™*, uma pastilha termoelétrica *Peltier TEC1-12706* e uma base de sustentação de perfil estrutural de alumínio de 20 mm de aresta.

Figura 3. Aparato Experimental (Autoria própria)



### 3.2. Procedimento experimental

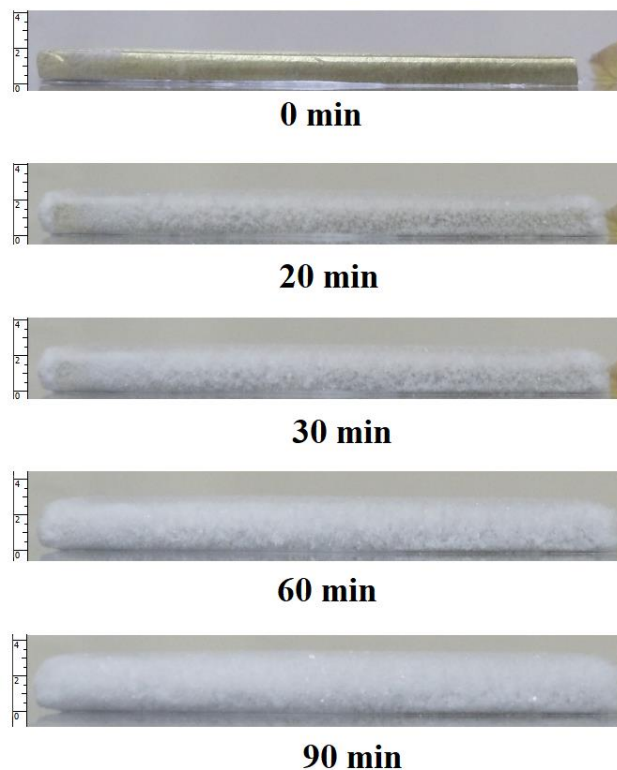
A metodologia adotada durante a execução dos testes experimentais, conforme Biglia (2018), divide-se em dez etapas, sendo elas:

- 1) Isolar o ambiente de testes (laboratório)
- 2) Ligar os sistemas de resfriamento, de controle e de aquisição de dados
- 3) Aguardar o intervalo de tempo necessário para que os parâmetros ambientais estejam em regime *quasi* permanente.
- 4) Fixar a placa a ser testada por meio da utilização da pasta térmica
- 5) Ligar os componentes elétricos do aparato experimental, fixando a velocidade de escoamento interno em 0,5 m/s, por meio do sistema de controle e de aquisição de dados
- 6) Preparar e conferir os sistemas de medição, como a câmera digital, o termômetro infravermelho, os termopares e os demais sensores
- 7) Efetuar a primeira medição, tempo 0 (zero)
- 8) Ativar a superfície fria por meio da fonte de alimentação na tensão de 11,90 V
- 9) Efetuar as medições a cada intervalo de tempo de 10 (dez) minutos durante o tempo total de 90 (noventa) minutos, coletando todos os valores em uma planilha digital
- 10) Salvar os dados obtidos para análise com as especificações da placa em teste, como material, acabamento superficial e data

Os testes experimentais foram executados no Laboratório de Meios Porosos e Eficiência Energética (LabMPEE) vinculado ao Programa de Pós-Graduação (Mestrado) em Engenharia Mecânica (PPGEM) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Câmpus* Ponta Grossa.

Para a análise da espessura de *frost* foi utilizado o aplicativo *open source software ImageJ*™ no tratamento das imagens, fixando uma mesma escala de medição de acordo com as especificações da câmera digital utilizada, como resolução e DPI (*dots per inch*), o qual fornece a largura e a altura do arquivo de imagem, de forma a possibilitar a conversão de um comprimento, neste caso a altura, em *pixels* em milímetros, e permitindo, posteriormente, a sobreposição de todas as imagens, tendo como referência o tempo inicial, como exemplificado pela Figura 4.

Figura 4. Espessura da camada de gelo poroso *versus* tempo (superfície de latão) (Autoria própria)



### 3.3 Análise de incertezas

As incertezas experimentais foram associadas às incertezas da espessura da camada de *frost*, das temperaturas, da umidade, da velocidade do ar e do tempo, resultando nos valores mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Incertezas de medição (Autoria própria)

Parâmetro	Ferramenta de medição	Unidade	Incerteza
Espessura da camada de <i>frost</i>	Tratamento de Imagens	[mm]	$\pm 0,265$
Temperatura ambiente	Termopar do Tipo T	[°C]	$\pm 0,5$
Temperatura da superfície de <i>frost</i>	Termômetro Infravermelho	[°C]	$\pm 2,05$
Temperatura da superfície fria	Termômetro Infravermelho	[°C]	$\pm 2,05$
Tempo	Cronômetro Digital	[s]	$\pm 0,01$
Umidade relativa do ar	Sensor <i>DHT22</i>	[%]	$\pm 5,0$
Velocidade do ar	Anemômetro Digital	[m/s]	$\pm 0,215$

#### 4. RESULTADOS

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

Tabela 2. Parâmetros ambientais (Autoria própria)

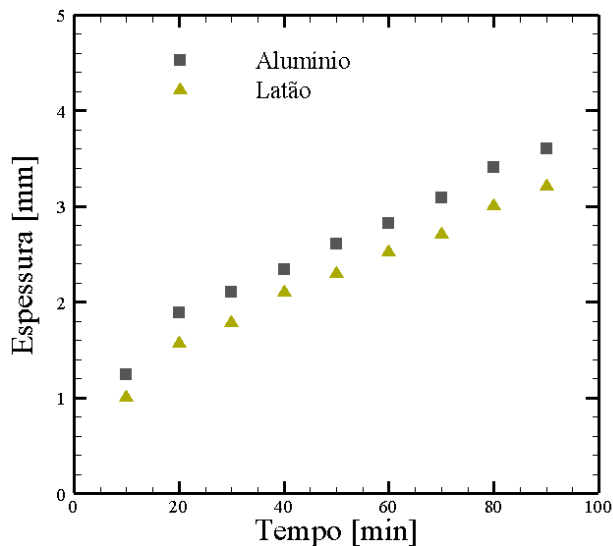
Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Temperatura ambiente	$T_{\infty}$	18,0	[°C]
Temperatura da superfície fria (Pastilha <i>Peltier</i> )	$T_c$	-20,0	[°C]
Umidade relativa do ar	$\theta$	50,0	[%]
Velocidade do ar	$v_{\infty}$	0,5	[m/s]

A Tabela 3 e a Figura 5 mostram os resultados experimentais obtidos nos testes, em relação à formação da camada de *frost*, através do registro e do monitorando periódico de suas espessuras no decorrer de 10 (dez) minutos.

Tabela 3. Espessura *versus* tempo (Autoria própria)

Tempo [min]	Espessura da Camada de <i>Frost</i> [mm]	
	Alumínio	Latão
0	0,000	0,000
10	1,246	0,998
20	1,896	1,561
30	2,104	1,783
40	2,347	2,095
50	2,612	2,295
60	2,823	2,516
70	3,092	2,699
80	3,409	2,997
90	3,606	3,201

Figura 5. Espessura da camada de *frost* (Autoria própria)



Pode ser observado que durante o processo de deposição e de aumento da espessura da camada de *frost*, o material que forma a superfície plana em contato com o escoamento influencia este fenômeno, aumentando a taxa de transferência de calor com o aumento da condutância térmica e com diminuição da resistência térmica, fatores que são determinados pela condutividade térmica de cada material (Incropera *et al.*, 2008). Nesta situação o alumínio apresenta maior condutividade térmica, intensificando o processo.

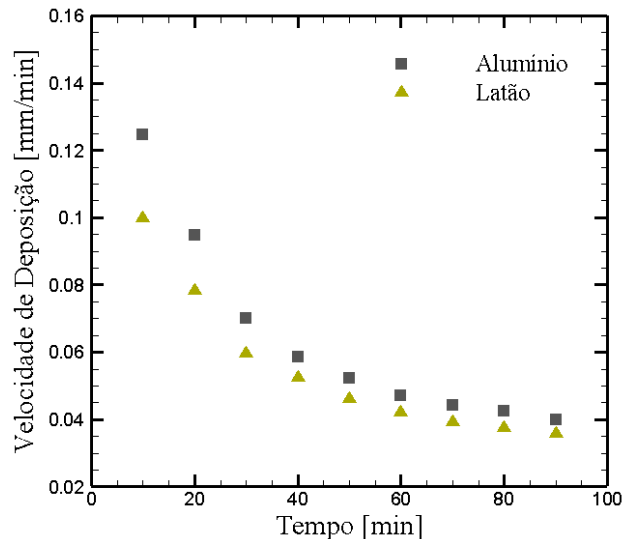
Os resultados mostrados na Figura 5 apresentam um comportamento do aumento da espessura da camada de *frost* em razão do tempo que é similar a resultados disponíveis na literatura como em Biglia (2018), Piucco (2008) e Sommers *et al.* (2018).

O registro periódico das espessuras da camada de *frost* permite também a determinação da velocidade com que ocorre a formação da camada de *frost*, mostrado na Tabela 4 e na Figura 6. Pode ser observado que durante o início da análise a velocidade de formação da camada de *frost* atinge seu ápice, diminuindo gradativamente com o passar do tempo. Conforme o processo ocorre, a camada de *frost* se comporta como isolante, aumentando a resistência térmica e diminuindo a velocidade até que esta tenda a zero.

Tabela 4. Velocidade deposição *versus* tempo (Autoria própria)

Tempo [min]	Velocidade de deposição de Frost [mm/min]	
	Alumínio	Latão
10	0,125	0,099
20	0,095	0,078
30	0,070	0,059
40	0,059	0,052
50	0,052	0,046
60	0,047	0,042
70	0,044	0,039
80	0,043	0,037
90	0,040	0,036

Figura 6. Velocidade de deposição de *frost* (Autoria própria)



## 5. CONCLUSÃO

No presente trabalho foi realizada uma análise experimental da deposição e do crescimento de *frost* (gelo poroso) em superfícies planas de alumínio e de latão. Os resultados experimentais apresentados, utilizando os parâmetros ambientais descritos, apresentam concordância com os resultados presentes na literatura, em relação ao comportamento e à velocidade da formação da camada de *frost*, podendo servir de apoio para trabalhos futuros. Finalmente, pode ser notado que dentre os materiais analisados, o latão possui a menor deposição de *frost* em sua superfície, bem como a menor velocidade de deposição durante todo o processo, para uma superfície plana.

## 6. REFERÊNCIAS

- Biglia, F. M., 2018. Análise numérico-experimental da minimização da formação de gelo poroso em placas planas. Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa.
- Biglia, F. M., da Silva, R. C. R., Alves, T. A. “Análise Experimental da Formação de Gelo Poroso em Placas Planas com Diferentes Acabamentos Superficiais”. In X Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM2018. Salvador, Brasil.
- Delgado, P. A. M., 2017. Estudo experimental e numérico da formação de *frost* com convecção natural em arranjo triangular de tubos esbeltos verticais. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Incropera, F. P. et al., 2008. Fundamentos de transferência de calor e de massa. Editora LTC, Rio de Janeiro, 6ª edição.
- Lee, Y. B., Ro, S. T., 2001. “An Experimental Study of *Frost* Formation an a Horizontal Cylinder Under Cross Flow”. In International Journal of Refrigeration (IJR), Vol. 24, p. 468-474.
- Piucco, R. O., 2008. Análise Teórico-experimental Da Formação De Geadas Em Refrigeradores Domésticos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- da Silva, R. C. R., 2014. Estudo Experimental e Numérico da Formação de *Frost* em torno de três Cilindros com Arranjo Triangular. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Sommers, A. D., Gebhart, C. W. e Hermes, C. J. L., 2018. “The Role of Surface Wettability on Natural Convection *Frosting*: *Frost* Growth Data and a New Correlation for Hydrophilic and Hydrophobic Surfaces”. In International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 122, p. 78-88.

## 7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.