

## ANÁLISE EXPERIMENTAL DA FORMAÇÃO DE GELO POROSO EM PLACAS PLANAS DE COBRE COM REVESTIMENTO SINTERIZADO

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

<sup>1</sup>Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR/Câmpus Ponta Grossa, Departamento Acadêmico de Mecânica, Av. Doutor Washington Subtil Chueire, 330, Jardim Carvalho, CEP 84.017-220, Ponta Grossa, PR, Brasil

<sup>2</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 apresenta uma análise experimental da formação de gelo poroso em placas planas de cobre com revestimento sinterizado. O fenômeno em estudo ocorre por meio da ressublimação, a partir do contato entre uma mistura de ar e de água em escoamento 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 são a temperatura da superfície da placa, temperatura ambiente, umidade e velocidade do ar. Os resultados demonstram medições experimentais da espessura de gelo poroso e da velocidade de deposição em função do tempo, em superfícies planas, feitas de cobre, com diferentes acabamentos superficiais, constatando que, dentre as amostras testadas, a denominada como “sinterizada”, apresenta maior dificuldade em prover o fenômeno.

**Palavras chave:** Gelo poroso. Revestimento. Sinterização.

**Abstract.** This work presents an experimental analysis of porous ice formation in flat copper plates with sintered coating. The phenomenon under study occurs through resublimation, from the contact between a mixture of air and water in flow with a surface temperature below 0°C, present in several commercial applications, where the accumulation of frost results in decreased performance and efficiency of equipment, generating unnecessary expenses. The environmental conditions evaluated are plate surface temperature, ambient temperature, humidity, and air velocity. The results demonstrate experimental measurements of the frost thickness and deposition speed as a function of time, on flat surfaces, made of copper, with different surface finishes, noting that, among the samples tested, the so-called “sintered”, presents greater difficulty in providing the phenomenon.

**Keywords:** Frost. Coating. Sintering.

### 1. INTRODUÇÃO

A formação de gelo poroso é um fenômeno físico causado quando o escoamento de uma mistura de ar e vapor de água entra em contato com superfícies com temperaturas inferiores a 0°C, visto em aplicações comerciais e industriais, como em asas de aviões, evaporadores de sistemas de refrigeração, rotores de compressores, entre muitos outros (da Silva, 2014). O processo de mudança de fase por ressublimação é o mecanismo que promove a formação de gelo poroso, 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).

No caso de superfícies planas em aplicações de refrigeração, a camada de gelo poroso atua inicialmente como uma aleta, aumentando a condução de calor, mas com o tempo a espessura da camada de gelo aumenta, impedindo o fluxo de ar, atuando como um isolante térmico, reduzindo drasticamente a taxa de transferência de calor no sistema de refrigeração (Lee & Ro, 2001). Dessa forma, a deposição de gelo poroso em superfícies frias afeta o funcionamento de diversos equipamentos de refrigeração, diminuindo a eficiência, gerando custos adicionais relacionados ao consumo de energia, encurtando a vida útil do equipamento e causando grandes perdas devido a paradas para manutenção (Biglia, 2018).

Portanto, é importante reduzir a formação e o acúmulo de gelo na superfície dos dispositivos utilizados em sistemas de refrigeração, visando aumentar a eficiência desse equipamento, resultando em melhores desempenhos (Delgado, 2017).

Métodos de minimização para evitar a formação de gelo poroso foram apresentados em diversas investigações, com base na aplicação de revestimentos sobre a superfície de deposição, como demonstrado por Kim & Lee (2011), Dyke & Betz (2014), Kim *et al.* (2016) e Biglia (2018). No entanto, verifica-se que os mecanismos de minimização ainda não são totalmente conhecidos, e mais tentativas e suposições devem ser feitas.

Nesse contexto, o presente trabalho propõe uma análise experimental da formação de gelo poroso em placas planas de cobre, com diferentes acabamentos superficiais, lisa e com revestimento sinterizado, visando a minimização do fenômeno de ressublimação.

## 2. SUPERFÍCIES PLANAS ESTUDADAS

As superfícies planas utilizadas nos experimentos, apresentadas na Figura 1, consistem de placas quadradas de cobre com 40 mm de aresta e 2 mm de espessura. As placas possuem acabamentos superficiais distintos, sendo uma lisa (Figura 1(a)) e uma com acabamento poroso, sinterizada (Figura 1(b)), formado pela sinterização de uma camada de pó de cobre em sua superfície.

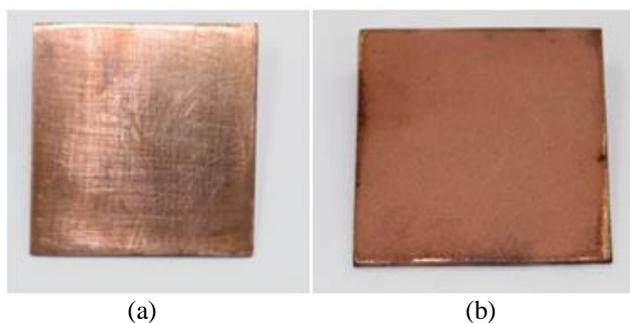


Figura 1. Amostras utilizadas (Autoria própria)

O processo de sinterização ocorreu no Laboratório de Caracterização de Materiais (LabMat) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da UTFPR, utilizando um forno tubular horizontal *Inti™*, mostrado na Figura 2. Foi utilizado um gás composto por uma mistura de 95% de Argônio e 5% de Hidrogênio para o controle de atmosfera do forno.



Figura 2. Forno de sinterização (Autoria própria)

A sinterização seguiu a metodologia apresentada por Krambeck (2018), utilizando uma taxa de aquecimento de 20°C/min, acompanhada por 15 minutos de permanência na temperatura de 800°C. Após essa etapa, o resfriamento ocorreu naturalmente até cerca de 450°C, quando o forno foi aberto e foi utilizada a convecção forçada para acelerar o resfriamento do forno e da amostra.

Após a obtenção das superfícies, as mesmas foram inseridas no aparato experimental por meio da utilização de uma pasta térmica *Implastec™*, com temperaturas de trabalho entre -40°C a 200°C, promovendo melhor contato e fixação entre as superfícies.

### 3. MATERIAL & MÉTODOS

Os experimentos foram realizados seguindo a metodologia experimental proposta por Biglia (2018) e executados no Laboratório de Controle Térmico (LabCT) vinculado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Câmpus* Ponta Grossa.

#### 3.1. Bancada experimental

A bancada experimental utilizada para realização dos testes experimentais, mostrada na Figura 3, é composta por uma 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 fotográfica *Canon™* EOS Rebel T6 e um tripé *Polaroid™*.



Figura 3. Aparato Experimental (Autoria própria)

A seção de testes (Figura 4) consiste em um caixa de acrílico (invólucro), um ventilador axial *Multilaser™*, uma pastilha termoelétrica *Peltier* TEC1-12706 e uma base de sustentação de perfil estrutural de alumínio de 20 mm de aresta.



Figura 4. Aparato Experimental (Autoria própria)

### 3.2. Procedimento experimental

O procedimento experimental, baseado em Biglia (2018), divide-se em dez etapas, sendo elas:

1. Isolar o laboratório onde são executados os testes experimentais;
2. Ligar os sistemas de resfriamento, de controle e 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 no aparato experimental utilizando a pasta térmica;
5. Ligar os componentes elétricos do aparato experimental, fixando a velocidade de escoamento interno em 0,5m/s, por meio do sistema de controle *Arduino*<sup>TM</sup> e aquisição de dados;
6. Preparar e conferir os sistemas de medição, como a câmera fotográfica, o termômetro infravermelho, os termopares e demais sensores;
7. Efetuar a primeira medição, tempo 0 (zero);
8. Ativar a superfície fria através da fonte de alimentação na tensão de 11,00V;
9. Efetuar as medições a cada intervalo de tempo de 10 (dez) minutos durante o tempo total de 120 (cento e vinte) 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.

Para a medição da espessura e da velocidade de formação da camada de gelo poroso foi utilizado o *software Open Source ImageJ*<sup>TM</sup>, onde, por meio da imagem retirada no início do teste, foi utilizada a espessura da chapa como referência para a definição de uma escala, aplicada em todas as imagens obtidas para a medição da espessura da camada de gelo.

### 3.3 Análise de incertezas

As incertezas experimentais foram associadas às incertezas da espessura da camada de gelo poroso, 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 gelo poroso	Tratamento de Imagens	[mm]	$\pm 0,265$
Temperatura ambiente	Termopar do Tipo K	[° C]	$\pm 0,5$
Temperatura da superfície de gelo poroso	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 de acordo com os parâmetros da Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros ambientais (Autoria própria)

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Temperatura ambiente	$T_{\infty}$	20,00	[°C]
Temperatura da superfície fria (Pastilha <i>Peltier</i> )	$T_c$	-15,0	[°C]
Umidade relativa do ar	$\theta$	50,0	[%]
Velocidade do ar	$v_{\infty}$	0,500	[m/s]

A Tabela 3 e a Figura 5 mostram os resultados experimentais obtidos nos testes, em relação à formação da camada de gelo poroso, através do registro e do monitorando periódico de suas espessuras no decorrer de 10 (dez) minutos. Esses resultados mostram o aumento da espessura da camada de gelo poroso em razão do tempo, semelhante aos resultados disponíveis na literatura em Piucco (2008), Sommers *et al.* (2018) e Biglia (2018).

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

Tempo [min]	Espessura da Camada de Gelo Poroso [mm]	
	Lisa	Sinterizada
0	0,000	0,000
10	0,837	0,607
20	1,270	0,988
30	1,612	1,248
40	1,770	1,439
50	2,013	1,642
60	2,174	1,789
70	2,302	1,914
80	2,397	2,047
90	2,529	2,172
100	2,625	2,283
110	2,714	2,384
120	2,839	2,513

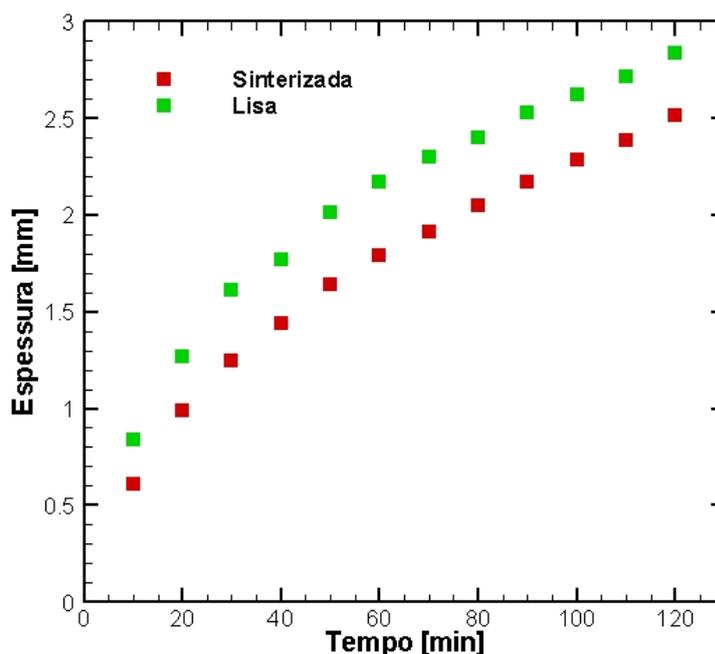


Figura 5. Espessura da camada de gelo poroso (Autoria própria)

O registro periódico da espessura da camada de gelo porosa também permite determinar a velocidade com que ocorre a formação da camada de gelo poroso, por meio da razão entre a variação de espessura e o intervalo de tempo correspondente, conforme mostrado na Tabela 4 e Figura 6. Pode ser observado que no início da análise, a taxa de formação de gelo atinge seu pico, diminuindo gradativamente com o passar do tempo. À medida que o processo avança, a camada de gelo poroso atua como um isolante, aumentando a resistência térmica e reduzindo a velocidade até tendem a zero.

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

Tempo [min]	Velocidade de deposição de Gelo Poroso [mm/min]	
	Lisa	Sinterizada
10	0,0837	0,0607
20	0,0433	0,0381
30	0,0342	0,0260
40	0,0158	0,0190
50	0,0243	0,0203
60	0,0160	0,0147
70	0,0128	0,0126
80	0,0095	0,0132
90	0,0131	0,0125
100	0,0096	0,0112
110	0,0089	0,0100
120	0,0125	0,0130

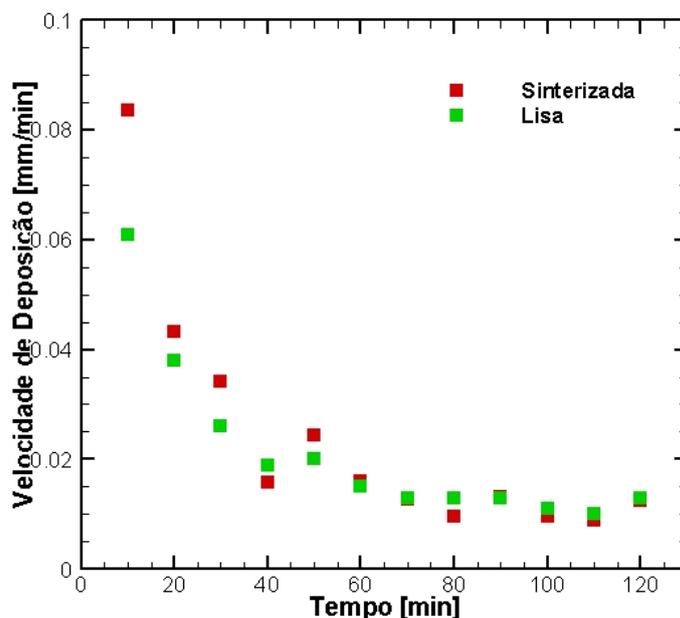


Figura 6. Velocidade de deposição de gelo poroso (Autoria própria)

## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi executada uma análise experimental da formação de gelo poroso em placas planas de cobre, com diferentes acabamentos superficiais: lisa e sinterizada. Essa busca por novas concepções de revestimentos, tais como os providos por meio da metalurgia do pó (processo de sinterização), resulta em novas formas de minimizar o fenômeno em estudo, contribuindo para a comunidade científica por meio de testes experimentais, reforçando resultados presentes na literatura, podendo servir como suporte para novas investigações. Finalmente, pode ser notado, de acordo com os resultados experimentais obtidos, de acordo com os parâmetros ambientais utilizados, mostraram que dentre as superfícies testadas experimentalmente, a denominada “sinterizada” apresentou maior dificuldade para formação dos cristais de gelo, provendo uma redução da espessura de gelo poroso em aproximadamente 13%.

## 6. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos são prestados à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PROPPG) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), à Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação (DIRPPG), ao Programa de Pós-Graduação (Mestrado) em Engenharia Mecânica (PPGEM) e ao Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR/Câmpus Ponta Grossa.

## 7. 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. & Antonini Alves, T., 2018. “Análise Experimental da Formação de Gelo Poroso em Placas Planas com Diferentes Acabamentos Superficiais”. In X Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM2018. Salvador, Brasil.
- 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.
- 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.
- Dyke, A. & Betz, A., 2014. “Frost Formation and Growth on Hydrophilic, Hydrophobic, and Biphilic surfaces”, Proceedings of the 15th International Heat Transfer Conference, Kyoto, Japan.
- Kim, H., Kim, D., Jang, H., Kim, D.R. & Lee, K., 2016. “Microscopic Observation of Frost Behaviors at the Early Stage of Frost Formation on Hydrophobic Surfaces”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 97, pp. 861-867.
- Kim, K. & Lee, K., 2011. “Frosting and Defrosting Characteristics of a Fin According to Surface Contact Angle”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 54, No. 13-14, pp. 2758-2764.
- Krambeck, L., 2018. Estudo Experimental do Desempenho Térmico de Estruturas Capilares de Pó de Cobre Sinterizado em Tubos de Calor. Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa.
- Lee, Y.B. & Ro, S.T., 2001. “An Experimental Study of *Frost* Formation on 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 Geada Em Refrigeradores Domésticos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Sommers, A.D., Gebhart, C.W. & 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.

## 8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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