

FORMAÇÃO E DEPOSIÇÃO DE GELO POROSO SOBRE SUPERFÍCIES PLANAS DE COBRE E DE LATÃO

FELIPE MERCÊS BIGLIA¹, GUILHERME ANTONIO BARTMEYER², LUÍS VITÓRIO GULINELI FACHINI³, RAQUEL DA CUNHA RIBEIRO DA SILVA⁴ e THIAGO ANTONINI ALVES⁵

¹Mestre em Engenharia Mecânica, Pesquisador PPGEM, UTFPR, Ponta Grossa-PR, felipebiglia@gmail.com;

²Engenheiro Mecânico, Discente PPGEM, UTFPR, Ponta Grossa-PR, gabartmeyer@hotmail.com;

³Engenheiro Mecânico, Discente PPGEM, UTFPR, Ponta Grossa-PR, luisgulineli@gmail.com;

⁴Doutora em Engenharia Mecânica, Profa. Adjunta, UTFPR, Guarapuava-PR, raqueld@utfpr.edu.br;

⁵Doutor em Engenharia Mecânica, Prof. Associado, UTFPR, Ponta Grossa-PR, thiagoalves@utfpr.edu.br

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC
Palmas/TO – Brasil
17 a 19 de setembro de 2019

RESUMO: Este estudo compreende a avaliação experimental da formação e da deposição de gelo poroso em superfícies planas, tendo como material de base o cobre e o latão. Este fenômeno ocorre quando uma mistura de ar e vapor d'água em escoamento, entra em contato com superfícies que apresentam temperaturas inferiores a 0°C, presentes em aplicações que atingem baixas temperaturas, sejam estas industriais, comerciais ou até mesmo residenciais, como no caso de refrigeradores, trocadores de calor, evaporadores, bombas de calor ou compressores de rotores, resultando no aumento da demanda energética e diminuição de desempenho térmico. As condições ambientais avaliadas foram a temperatura da superfície fria, temperatura ambiente, velocidade e umidade do ar em escoamento. Os resultados demonstram medições da espessura e da velocidade de deposição da camada de gelo poroso em função do tempo, indicando que a escolha do material de base que constitui a superfície plana é de suma importância, devido à grande influência que ele provê ao fenômeno.

PALAVRAS-CHAVE: Gelo poroso, Placas planas, Formação, Deposição.

FORMATION AND DEPOSITION OF FROST ON FLAT SURFACES OF COPPER AND BRASS

ABSTRACT: This study comprises the experimental evaluation of the formation and deposition of frost in flat surfaces, in this case plates, having copper and brass as base material. This phenomenon occurs when a mixture of air and water vapor in flow, comes into contact with surfaces that have temperatures below 0°C, present in applications that reach low temperatures, whether industrial, commercial, or even residential, as in the case of refrigerators, heat exchangers, evaporators, heat pumps, or rotor compressors, resulting in increased energy demand and decreased thermal performance. The environmental conditions evaluated were cold surface temperature, ambient temperature, velocity, and humidity of the flowing air. The results demonstrate measurements of the thickness and velocity of deposition of the frost sheet as a function of time, indicating that the choice of the base material that constitutes the flat surface is of great importance, due to the great influence that it provides to the phenomenon.

KEYWORDS: Frost, Flat plates, Formation, Deposition.

INTRODUÇÃO

A formação de gelo poroso ocorre quando uma mistura de ar e vapor d'água em escoamento entra em contato com uma superfície fria (temperatura inferior a 0°C). Este fenômeno está presente em diversas aplicações comerciais e industriais de baixa temperatura, como em evaporadores de sistemas de refrigeração, rotores de compressores entre muitos outros (SILVA et al., 2017). Este fenômeno

físico ocorre por meio do processo de mudança de fase por ressublimação, no qual, um fluido no estado gasoso passa diretamente para o sólido, originando um meio, que tem como principal característica uma estrutura porosa (BIGLIA et al., 2018). O acúmulo de gelo poroso se mostra diretamente proporcional a diminuição no desempenho térmico de inúmeros equipamentos envolvidos no processo de refrigeração, reduzindo sua eficiência energética e gerando gastos operacionais desnecessários, danificando os equipamentos de refrigeração, resultando em grandes prejuízos com as paradas dos equipamentos para manutenção (BIGLIA, 2018). Como o fenômeno não pode ser evitado, minimizar a formação e o acúmulo de gelo poroso na superfície dos equipamentos utilizados em sistemas de refrigeração é uma alternativa de suma importância para a obtenção de melhores desempenhos térmicos (DELGADO, 2017). Neste contexto, o presente trabalho propõe uma pesquisa científico-tecnológica de caráter experimental sobre a formação e a deposição de gelo poroso em superfícies planas, tendo como material de base o cobre e o latão.

MATERIAL E MÉTODOS

O aparato experimental (Figura 1) 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* com 14.1 MP e 90 de DPI e um tripé *Polaroid™*.

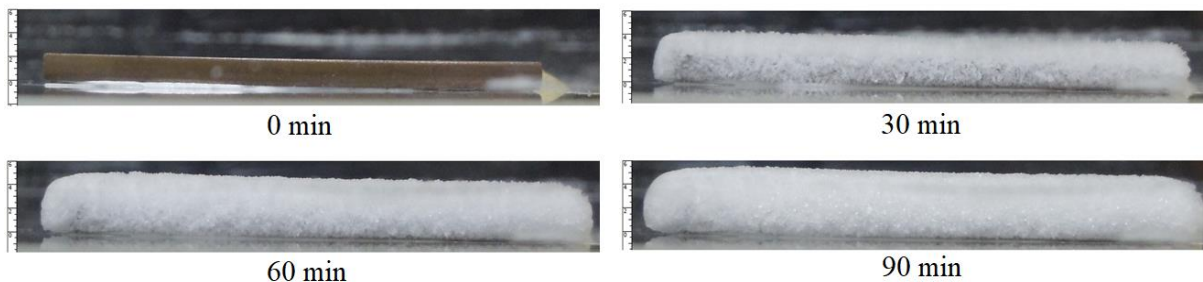
Figura 1. Aparato Experimental.



A seção de testes consiste em um caixa de acrílico (invólucro) com 4 mm de espessura, 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.

Os parâmetros ambientais mais importantes na análise desse fenômeno de formação e de deposição de gelo poroso em superfícies foram: temperatura da superfície fria, temperatura ambiente, umidade e velocidade do ar. A superfície fria foi obtida por meio da utilização de uma pastilha termoelétrica *Peltier TEC1-12706*, tendo 40 mm de aresta e 2 mm de espessura, acoplada a uma fonte de alimentação *Keysight™ U8002A*, sendo resfriada através do dissipador de calor com tubos de calor para processadores *Cooler Master™ Hyper T4*, modelo RR-T4-18PK-R1. A temperatura ambiente e a umidade foram controladas por meio de um sistema de condicionamento de ambiente *Carrier™* de 36.000 BTUs. A medição da temperatura ambiente e da temperatura da superfície da camada de gelo poroso, foram efetuadas por meios da utilização de um termômetro infravermelho *Minipa™ MT-330* e por termopares do Tipo T (cobre-constantan) da *Omega Engineering™*, respectivamente. A velocidade do ar úmido em escoamento na seção de testes foi efetuada através de um ventilador axial *Multilaser™*, cuja a medição na seção de teste foi feita utilizando um anemômetro digital portátil *ITAN™ 720*, fixado paralelamente ao escoamento de ar. No controle da velocidade do ar e na aquisição dos valores de umidade foi utilizado um sistema de controle e de aquisição de dados que consiste em um circuito de prototipagem eletrônica acoplado a um dispositivo *Arduino™*, utilizando o sensor de umidade DHT22 (AM2302) para as medições de umidade no ambiente de teste. A espessura da camada de gelo poroso (Figura 2) foi medida por meio do tratamento de imagens realizadas por meio do aplicativo *open-source software ImageJ™*.

Figura 2. Espessura da camada de gelo poroso *versus* tempo (superfície de cobre).



A metodologia adotada durante a execução dos testes experimentais, descrita em detalhes em Biglia (2018), pode ser resumida como: 1) isolar o ambiente de testes; 2) ligar os sistemas responsáveis pelo resfriamento, controle e aquisição de dados; 3) aguardar a estabilização dos parâmetros ambientais; 4) fixar a placa a ser testada; 5) ligar os componentes elétricos do aparato experimental; 6) preparar e conferir os sistemas de medição; 7) efetuar a medição inicial no tempo zero; 8) ativar a superfície fria por meio da fonte de alimentação; 9) efetuar as medições a cada intervalo de tempo de dez minutos durante o tempo total de noventa minutos, coletando todos os valores em uma planilha digital; 10) salvar os dados obtidos para avaliação.

As superfícies planas utilizadas nos experimentos consistem de placas quadradas de cobre e latão, com 40 mm de aresta e com 2 mm de espessura, nas quais foi realizado o processo de lixamento, tendo como objetivo eliminar riscos, marcas mais profundas e impurezas presentes na superfície da amostra. Finalizado o lixamento, as amostras foram limpas com água e depois álcool etílico, visando deixar a superfície isenta de poeira e traços abrasivos. Após a obtenção das superfícies, mostradas na Figura 3, elas foram inseridas no aparato experimental para a análise (Figura 4) por meio da utilização de uma pasta térmica *ImplastecTM*, com temperaturas de trabalho entre -40°C a 200°C .

Figura 3. Amostras utilizadas.

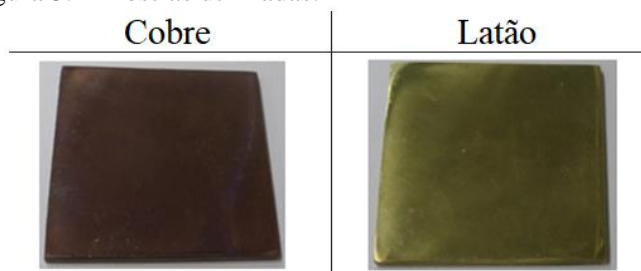


Figura 4. Processo de medição da espessura da camada de gelo poroso (superfície de latão).



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.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante a obtenção dos resultados experimentais os parâmetros ambientais foram mantidos constantes de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros ambientais

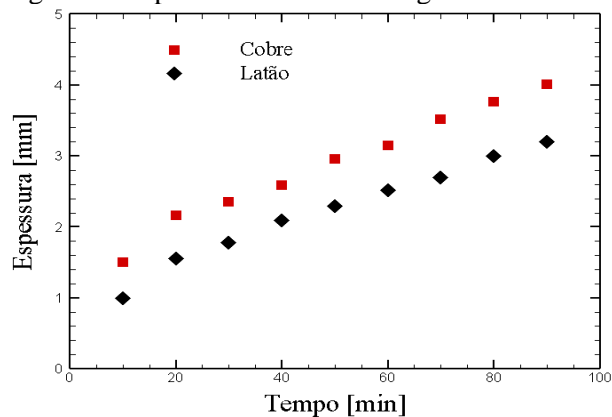
Parâmetro	Símbolo	Valor	Incerteza	Unidade
Temperatura ambiente	T_{∞}	18,0	$\pm 0,5$	[°C]
Temperatura da superfície fria (Pastilha <i>Peltier</i>)	T_c	-20,0	$\pm 2,05$	[°C]
Umidade relativa do ar	θ	50,0	$\pm 5,0$	[%]
Velocidade do ar	v_{∞}	0,5	$\pm 0,215$	[m/s]

A Tabela 2 e a Figura 5 mostram os resultados experimentais obtidos nos testes, em relação à formação da camada de gelo poroso, através do registro e monitorando periódico de suas espessuras no decorrer de 10 (dez) minutos.

Tabela 2. Espessura *versus* tempo.

Tempo [min]	Espessura da Camada de Gelo Poroso [mm]	
	Cobre	Latão
0	0,000	0,000
10	1,499	0,998
20	2,158	1,561
30	2,353	1,783
40	2,589	2,095
50	2,955	2,295
60	3,150	2,516
70	3,520	2,699
80	3,765	2,997
90	4,009	3,201

Figura 5. Espessura da camada de gelo.



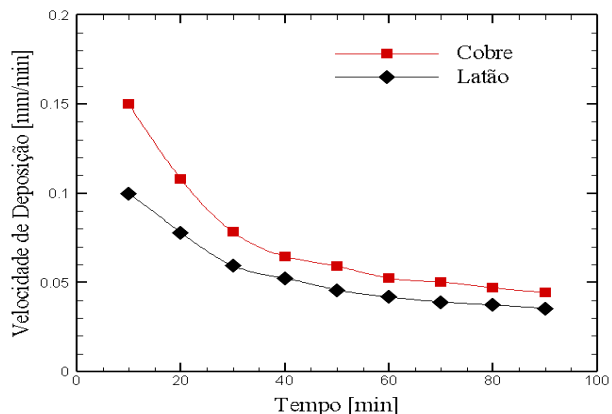
Pode ser constatado que durante a formação e o aumento da espessura da camada de gelo poroso, a condutividade térmica do material de base da superfície plana exerce grande influência sobre o processo de transferência de calor por convecção que ocorre entre a superfície fria e o fluido em escoamento, intensificando a troca térmica, por meio do aumento da condutância térmica e diminuição da resistência térmica, neste caso sendo maior para o cobre (BERGMAN et al., 2014). Os resultados experimentais apresentados na Figura 5 mostram boa concordância, em relação ao comportamento do aumento da espessura da camada de gelo poroso em razão do tempo, com os resultados publicados na literatura, por Biglia (2018), Piucco (2008) e Sommers et al. (2018).

Além disso, através do registro periódico das espessuras da camada de gelo poroso, pode ser encontrada a razão entre a posição da interface com o tempo, que possibilita a determinação da velocidade de deposição da camada de gelo poroso, mostrado na Tabela 3 e na Figura 6, o qual permite o estudo experimental do comportamento da velocidade ao longo do processo.

Tabela 3. Velocidade deposição *vs* tempo.

Tempo [min]	Velocidade de deposição de gelo poroso [mm/min]	
	Cobre	Latão
10	0,108	0,078
20	0,078	0,059
30	0,065	0,052
40	0,059	0,046
50	0,053	0,042
60	0,050	0,039
70	0,047	0,038
80	0,045	0,036
90	0,150	0,100

Figura 6. Velocidade de deposição de gelo.



CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizada uma investigação experimental da formação e da deposição de gelo poroso em superfícies planas de cobre e de latão. Os resultados experimentais obtidos, de acordo com os parâmetros ambientais utilizados, indicam uma boa concordância com a literatura, no que se refere ao comportamento da formação de gelo poroso e a velocidade de deposição. Finalmente, pode ser concluído que dentre os materiais de base testados a superfície composta de latão possui a menor deposição de gelo poroso, devido a influência da condutividade térmica e das características superficiais. Desta forma, fica evidenciado que a escolha do material de base durante a etapa de projeto é de suma importância, podendo minimizar o fenômeno, contribuindo significativamente para melhoria da eficiência energética do sistema.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos são prestados à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PROPPG) da UTFPR, à Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação (DIRPPG), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) e ao Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da UTFPR/Câmpus Ponta Grossa.

REFERÊNCIAS

- Bergman, T. L. et al. Fundamentos de transferência de calor e de massa. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, 672 p., 2014.
- Biglia, F. M. Análise numérico-experimental da minimização da formação de gelo poroso em placas planas. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2018.
- Biglia, F. M.; Fachini, L. V. G.; Bartmeyer, G. A.; Silva, R. C. R. da; Alves, T. A. Investigação Experimental da Deposição de Gelo Poroso em Placas Planas de Distintos Materiais de Base. In: XVIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica e Industrial, 2018, Joinville, SC. Anais do CONEMI 2018, #95390, 2018.
- 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.
- 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.
- Silva, R. C. R. da; Maldonado, P. A. D.; Alves, T. A.; Biglia, F. M. A Numerical Study on Minimizing Frost Deposition on a Cold Surface. Proceedings of the 9th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Iguazu Falls, Brazil, 2017.
- 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, Vol. 122, pp. 78-88, 2018.