

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA FORMAÇÃO DE GELO POROSO EM PLACAS PLANAS COM DIFERENTES ACABAMENTOS SUPERFICIAIS

Felipe Mercês Biglia, felipebiglia@gmail.com¹

Raquel Cunha Ribeiro Da Silva, raqueld@utfpr.edu.br²

Thiago Antonini Alves, thiagoaalves@utfpr.edu.br¹

¹Universidade 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

²Universidade 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: A formação de gelo poroso está presente em diversas aplicações comerciais e industriais que atingem baixas temperaturas, em equipamentos de refrigeração, este fenômeno é responsável pela queda de desempenho, devido ao aumento da densidade, tornando-se um isolante térmico e diminuindo a capacidade de refrigeração do evaporador. A formação e crescimento do gelo poroso em superfícies frias depende de condições ambientais e de operação, o que exige a intervenção do usuário para a sua remoção. Este trabalho propõe analisar experimentalmente o processo de formação de gelo poroso em uma placa plana com base nas condições de operação ambientais e nas características das superfícies das placas. Neste contexto, as condições ambientais avaliadas são a temperatura da superfície da placa, temperatura ambiente, umidade e velocidade do ar. O material das superfícies em estudo é o alumínio, com diferentes acabamentos superficiais, diferenciando assim a rugosidade da superfície. Os resultados demonstram medições experimentais da espessura de gelo poroso em superfícies planas, feitas de alumínio, com diferentes acabamentos superficiais, constatando que, dentre as amostras testadas, a denominada como “envernizada”, apresenta maior dificuldade em prover o fenômeno, devido à suas características hidrofóbicas.

Palavras-chave: gelo poroso, minimização de gelo poroso, acabamento superficial, superfície hidrofóbica, defrost

1. INTRODUÇÃO

O processo de mudança de fase por ressublimação é o mecanismo que promove a formação de gelo poroso, no qual, o vapor d'água passa diretamente para o estado sólido, dando origem a uma estrutura porosa, estruturada por cristais irregulares de gelo. O fenômeno físico de formação de gelo poroso (*frost*) ocorre quando o escoamento da mistura ar e vapor d'água entra em contato com superfícies que apresentam temperaturas inferiores a 0 °C, estando presente em diversas aplicações comerciais e industriais de baixa temperatura, como em asas de aviões, rotores de compressores, evaporadores de sistemas de refrigeração, sistemas de purificação de gases e muitos outros (Da Silva, 2005).

Em sistemas de refrigeração o acúmulo de gelo implica no aumento da demanda energética do sistema, tornando necessária sua retirada periódica, resultando em gastos com o processo de degelo ou *defrost* (Da Silva, 2014). No caso de superfícies planas em aplicações de refrigeração, inicialmente, a camada de gelo poroso atua como uma aleta, facilitando a transferência de calor por condução, porém, com o decorrer do tempo, a espessura da camada de gelo aumenta, dificultando o escoamento de ar, atuando como um isolante térmico, reduzindo drasticamente a taxa de transferência de calor no sistema de refrigeração (Lee & Ro, 2001). Ressalta-se ainda que o desenvolvimento da camada de gelo poroso em superfícies frias em contato com ar úmido, de acordo com Scalón (1993), provoca a diminuição do desempenho em muitos equipamentos de refrigeração, diminuindo sua eficiência de refrigeração, acarretando em gastos energéticos desnecessários, danos ao equipamento de refrigeração, e, em consequência, prejuízos com as pertinentes paradas destes equipamentos para manutenção.

Desta forma, evitar ou minimizar o acúmulo de gelo é essencial para o bom funcionamento do sistema. Portanto, o conhecimento sobre a formação de gelo poroso concomitantemente ao entendimento de como minimizar ou evitar esse fenômeno pode ajudar no aumento da eficiência de sistemas de refrigeração (Da Silva *et al.*, 2017). Nos últimos anos diversas investigações referentes a métodos de minimização para evitar a formação de gelo poroso, com base na aplicação de revestimentos sobre a superfície de deposição, feitas de substâncias hidrofóbicas (que não se dissolvem em água ou que a repelem) e hidrofílicas (que possuem afinidade com a água, sendo solúveis nela) foram realizados, como demonstrado por Kim & Lee (2011), Dyke & Betz (2014) e Kim *et al.* (2016). Entretanto, constata-se que os mecanismos de minimização ainda não são totalmente conhecidos e que, mais tentativas e hipóteses devem ser feitas.

Neste contexto, o presente trabalho propõe uma análise experimental sobre a formação de gelo poroso em superfícies planas, feitas de alumínio, com diferentes acabamentos superficiais, lisa, rugosa (hidrofílica) e envernizada (hidrofóbica), visando a obtenção da superfície a qual apresentará a melhor minimização deste fenômeno.

2. SUPERFÍCIES PLANAS ESTUDADAS

As superfícies planas utilizadas nos experimentos consistem de placas quadradas de alumínio com 40 mm de aresta e com 2 mm de espessura com acabamentos superficiais distintos: lisa, rugosa (hidrofílica) e envernizada (hidrofóbica).

A primeira amostra (I) é designada superfície “LISA”, na qual foi realizado o processo de lixamento, tendo como objetivo eliminar riscos e marcas mais profundas contidas na superfície da amostra. No processo de lixamento foram utilizadas lixas de granulometria sucessivamente menor, rotacionando a amostra em 90° em cada lixa subsequente. A sequência adotada para as lixas de carbeto de silício foi de 220, 400, 600 e 1200 *mesh*. As amostras foram lixadas durante 10 minutos, após esse tempo, verificou-se se os riscos gerados pela lixa anterior se extinguíram, para assim dar continuidade ao lixamento. Finalizado o lixamento, a amostra foi limpa com água e depois álcool etílico, visando deixar a superfície isenta de poeira e traços abrasivos. A segunda amostra (II) é considerada a superfície “RUGOSA”, na qual foram feitas ranhuras por meio de uma microrretífica *Dremel*TM 3000, utilizando uma fresa de ponta esférica de 1 mm, dando origem a uma superfície hidrofílica, que por meio da rugosidade possui afinidade com a água. Finalmente, na terceira amostra (III) foi aplicada uma camada de verniz (superfície “ENVERNIZADA”), da marca *Mundial Prime*TM, Tinta *Spray Verniz – Uso Geral*, que deu origem a uma superfície hidrofóbica, que repele a água.

Após a obtenção das superfícies “LISA”, “RUGOSA” e “ENVERNIZADA”, mostradas na Figura 1, elas foram inseridas no aparato experimental por meio da utilização de uma pasta térmica *Implastec*TM, com temperaturas de trabalho entre – 40 °C a 200 °C, a qual promoveu um melhor contato entre as superfícies e uma melhor fixação. Na Tabela 1 é apresentado um resumo das amostras de alumínio com os respectivos tratamentos superficiais.



Figura 1. Amostras de alumínio com diferentes acabamentos superficiais.

Tabela 1. Relação das amostras e respectivos tratamentos superficiais.

Amostra	#	Tratamento Superficial	Característica Superficial
I	LISA	Alumínio placa lisa	Neutra
II	RUGOSA	Alumínio com rugosidade	Hidrofílica
III	ENVERNIZADA	Alumínio com verniz	Hidrofóbica

3. MÉTODO EXPERIMENTAL

3.1. Aparato Experimental

Os testes experimentais foram executados no Laboratório de Meios Porosos e Eficiência Energética vinculado ao Programa de Pós-Graduação (Mestrado) em Engenharia Mecânica (PPGEM) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) do Câmpus Ponta Grossa. O aparato experimental (Fig. 2) foi composto por uma seção de testes, uma pastilha termoeletrica *Peltier* TEC1-12706, um dissipador de calor aletado com tubos de calor *Cooler Master*TM *Hyper T4*, um *becker* de vidro com capacidade de 1L, um relógio termohigrômetro *Minipa*TM MT-241, um sistema de aquisição de dados *Keysight*TM 34970A com um multiplexador *Keysight*TM 34901A com 20 canais, uma fonte de alimentação *Keysight*TM U8002A, um *notebook Dell*TM e um *nobreak NHS*TM 1200 VA. A seção de testes consiste em um caixa de acrílico (invólucro), uma base de sustentação feita de placas de MDF, um ventilador axial *Multilaser*TM e uma régua de aço inoxidável com escala milimétrica.



Figura 2. Aparato Experimental.

A superfície fria foi obtida por meio da utilização da pastilha termoeétrica *Peltier* e o sistema de resfriamento consistiu do dissipador de calor aletado com tubos de calor – Figura 3.

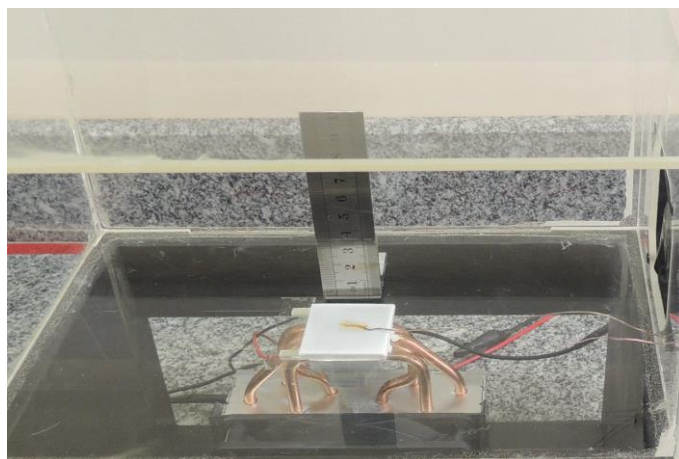


Figura 3. Seção de testes.

Para obtenção dos dados experimentais de temperatura foram utilizados termopares *Omega Engineering*TM do Tipo T, com fios de 0,254 mm de diâmetro cobertos por *Teflon*TM e que foram fixados através de uma fita adesiva termosensível *Kapton*TM. O sistema de aquisição de dados foi configurado para obtenção de temperaturas em cada um dos pontos monitorados, na escala Celsius [°C], a cada 5 segundos, a partir do início das medições experimentais. Os dados foram gravados através do *software Agilent*TM *Benchlink Data Logger* 3. Para determinação da umidade foi utilizado o relógio termohigrômetro. Um paquímetro *Mitutoyo*TM foi utilizado para auxiliar na precisão das medições. A qualidade e a precisão necessárias para avaliação das temperaturas foram garantidas por meio da calibração de todos os termopares através do Calibrador *Einstruments*TM *MultiCal* 2500.

3.2. Procedimento Experimental

Os ensaios experimentais foram planejados com o objetivo de analisar os efeitos do acabamento das superfícies das placas, da temperatura da superfície e da umidade, na formação de gelo poroso. As medidas realizadas durante os experimentos foram:

- i) Medição da espessura da camada de gelo poroso na superfície fria (com o auxílio do paquímetro);
- ii) Medição da temperatura na superfície de deposição da camada de gelo poroso (com o auxílio do sistema de aquisição de dados).

3.3. Análise de Incertezas

As incertezas experimentais presentes nessa pesquisa estão associadas às incertezas do tempo, da espessura da camada de gelo poroso (equipamentos de medição) e dos sensores de temperatura (termopares do Tipo T). Os testes experimentais foram repetidos cinco vezes para cada superfície e os erros comparados levando em consideração que as diferenças entre as médias dos valores fossem menores que 0,5 °C. A temperatura ambiente foi mantida em $18 \pm 0,5$ °C por um sistema de condicionamento de ambiente *Carrier*TM. Cada teste teve duração de aproximadamente 40 (quarenta) minutos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante a obtenção dos resultados experimentais os parâmetros ambientais foram mantidos constantes e seus respectivos valores estão apresentados na Tab. 2.

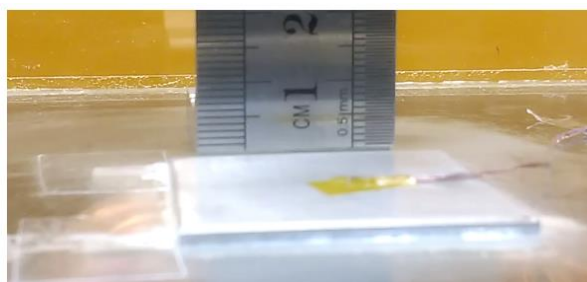
Tabela 2. Parâmetros Ambientais.

Parâmetro	Símbolo	Valor	Incerteza	Unidade
Velocidade do ar	v_{∞}	0,5	$\pm 0,1$	[m/s]
Temperatura da superfície fria (pastilha Peltier)	T_c	-12	$\pm 0,5$	[°C]
Temperatura ambiente	T_{∞}	18	$\pm 0,5$	[°C]
Umidade relativa do ar	w_{∞}	64	$\pm 5,0$	[%]

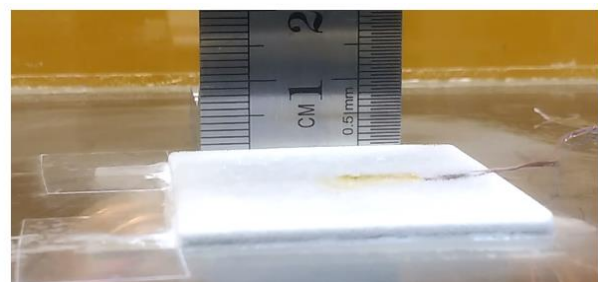
Na Tabela 3 e na Fig. 5 são mostrados os resultados experimentais obtidos por cada amostra, referentes à formação da camada de gelo poroso, por meio do registro e acompanhamento periódico de suas espessuras (Fig. 4), ao decorrer de 5 (cinco) minutos.

Tabela 3. Comportamento da espessura versus tempo.

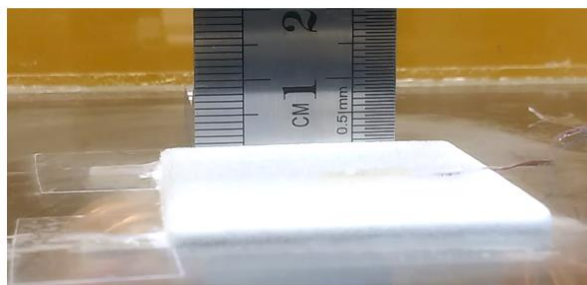
Tempo [min]	Espessura da camada de gelo [mm]		
	“LISA”	“RUGOSA”	“ENVERNIZADA”
0	0,00	0,00	0,00
5	0,48	0,25	0,42
10	0,93	0,50	0,68
15	1,20	0,92	0,95
20	1,48	1,13	1,17
25	1,68	1,47	1,32
30	1,85	1,57	1,40
35	1,98	1,65	1,43
40	2,03	1,68	1,45



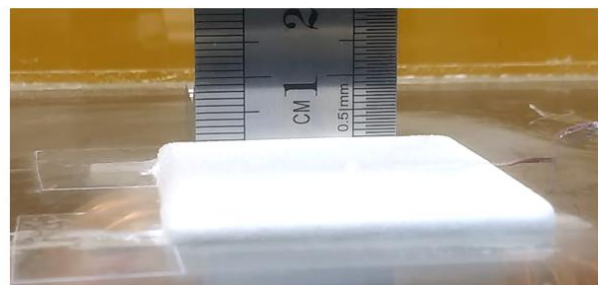
0 min



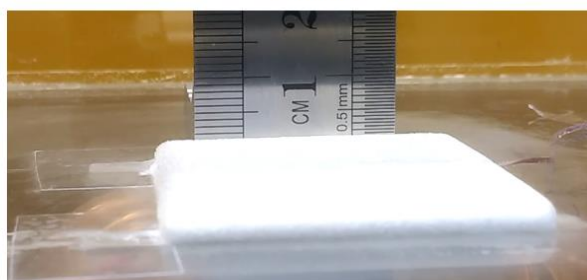
5 min



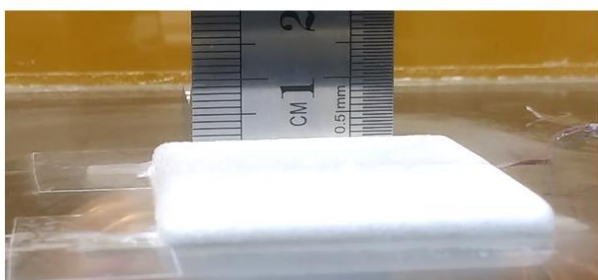
10 min



15 min



20 min



25 min

Figura 4. Registros da formação da camada de gelo sobre a superfície de deposição “LISA”.

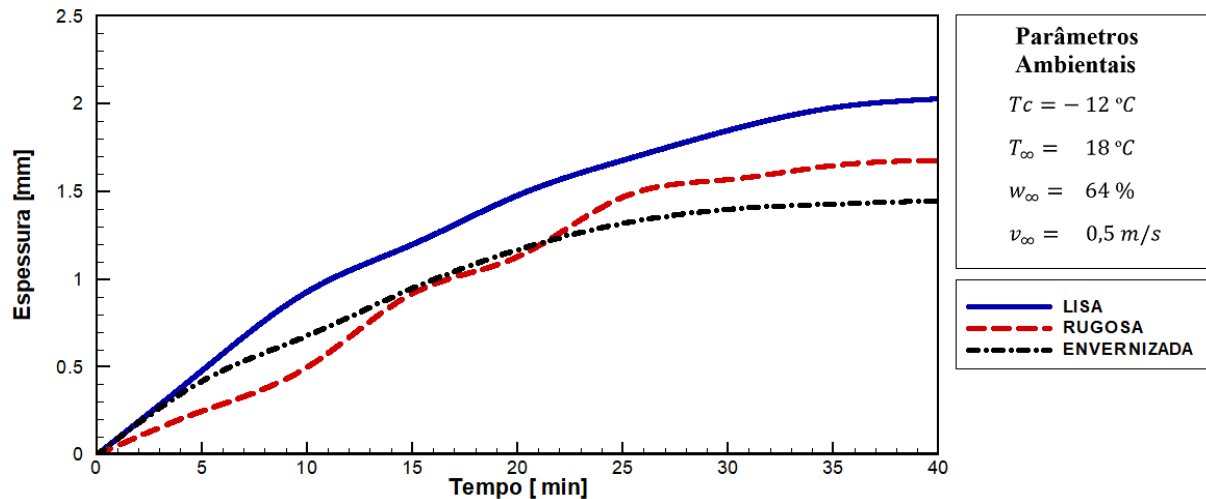


Figura 5. Espessura da camada de gelo para cada superfície.

Dos resultados experimentais, pode ser constatado que até os 10 (dez) minutos todas as amostras demonstram comportamento semelhante no aumento da espessura da camada de gelo poroso, sendo maior para a amostra I (“LISA”), seguida pela amostra III (“ENVERNIZADA”) e amostra II (“RUGOSA”), respectivamente. A partir dos 10 minutos a espessura da camada de gelo sobre a amostra II sofre um aumento abrupto, retornando ao comportamento apresentado pelas outras amostras após os 25 (vinte e cinco) minutos.

Em relação ao aumento da espessura da camada de gelo poroso durante o intervalo de 40 (quarenta) minutos, presume-se que, para os parâmetros ambientais analisados, a amostra III “ENVERNIZADA” (hidrofóbica) apresenta a menor propriedade ao fenômeno de formação e acúmulo de gelo poroso, resultando em uma menor espessura.

Os resultados apresentados na Fig. 6 foram verificados em relação aos resultados publicados na Literatura, como, por exemplo, os resultados apresentados em estudos realizados por Liu *et al.* (2008) e Sommers, Gebhart & Hermes (2018), possuindo boa concordância, em relação ao comportamento do aumento da espessura da camada de gelo poroso em razão do tempo transcorrido.

A Tabela 4 e a Fig. 6 apresentam os resultados experimentais, por cada amostra, da temperatura na superfície de deposição, por meio da média dos valores de temperatura coletados nos cinco testes no intervalo de tempo de 5 minutos.

Tabela 4. Comportamento da temperatura da superfície de deposição vs. tempo.

Tempo [min]	Temperatura da Superfície de Deposição [°C]		
	“LISA”	“RUGOSA”	“ENVERNIZADA”
0	-7,6	-1,5	-7,8
5	-9,0	-2,3	-9,7
10	-9,6	-3,0	-11,0
15	-10,1	-4,0	-11,4
20	-10,6	-4,7	-12,3
25	-11,0	-6,1	-12,6
30	-11,2	-6,4	-13,4
35	-11,3	-7,1	-13,8
40	-11,4	-7,8	-14,1

Pode ser notado que todas as amostras demonstram comportamentos semelhantes, visto que, a temperatura da superfície de deposição diminuiu com o transcorrer do tempo, assim como mostrado por Sommers *et al.* (2016). Contudo, elas apresentam diferentes características. A amostra I (“LISA”) tende a estabilizar-se a partir dos 30 (trinta) minutos, enquanto a temperatura superficial das outras continuam a apresentar significativas quedas. Outro fator relevante foi o diferencial de temperatura obtido durante os 40 (quarenta) minutos, sendo cerca de $-3,79\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-6,29\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $-6,34\text{ }^{\circ}\text{C}$, para as amostras I (“LISA”), II (“RUGOSA”) e III (“ENVERNIZADA”), respectivamente.

Pode ser observado ainda, que a temperatura inicial da amostra II (“RUGOSA”) foi superior à das demais em cerca de $6\text{ }^{\circ}\text{C}$, devido à sua característica superficial de afinidade com a água, facilitando sua deposição e acúmulo. Tais diferenças nas características de cada amostra provocam alterações na fase inicial de crescimento de gelo poroso, resultando em diferentes respostas para cada caso (Cai *et al.*, 2010).

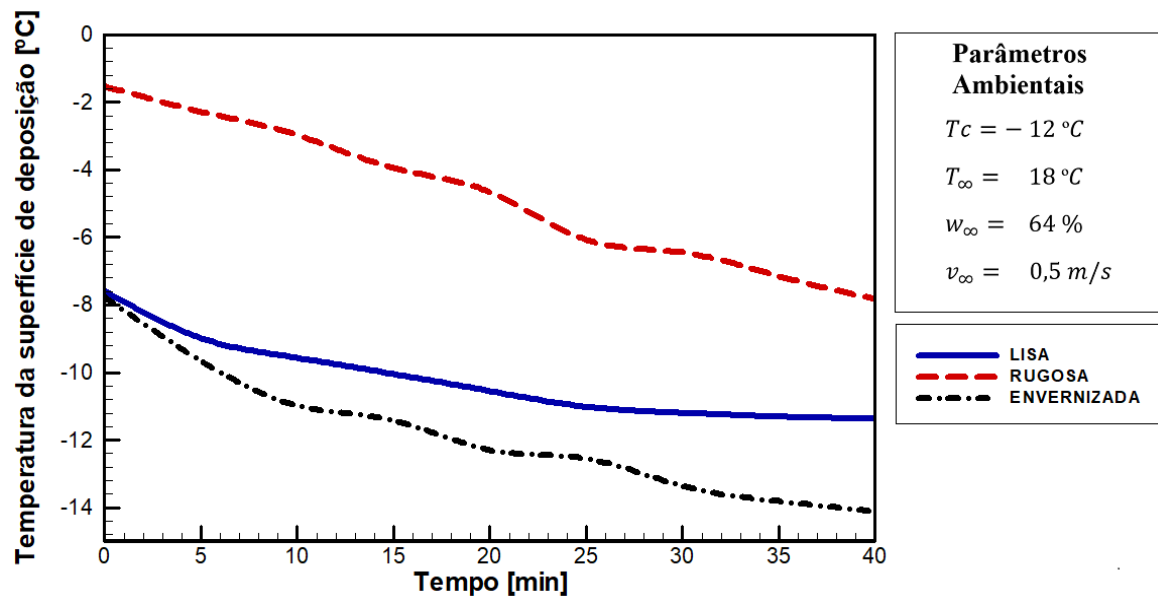


Figura 6. Temperatura da superfície de deposição para cada superfície.

Finalmente, através do registro periódico das espessuras da camada de gelo poroso, pode ser encontrada a razão entre a posição da interface com o tempo, possibilitando a determinação da velocidade de deposição (frente de solidificação) da camada porosa, mostrado na Tab. 5 e na Fig. 7. Este parâmetro permite o estudo experimental do comportamento da velocidade ao longo do processo. Percebe-se que nos instantes iniciais (5 minutos), o movimento da frente da interface foi acelerado, diminuindo com o decorrer do tempo, uma vez que, à medida que o processo transcorre, a camada de gelo formada se comporta como isolante, oferecendo uma resistência térmica para retirada de calor da fase líquida. Com o passar do tempo, a velocidade tende a diminuir cada vez mais, tendendo a zero.

Tabela 5. Comportamento da velocidade de deposição versus tempo.

Tempo [min]	Velocidade de Deposição de Gelo [mm/min]		
	“LISA”	“RUGOSA”	“ENVERNIZADA”
5	0,096	0,050	0,084
10	0,045	0,025	0,026
15	0,018	0,028	0,018
20	0,014	0,011	0,011
25	0,008	0,014	0,006
30	0,006	0,003	0,003
35	0,004	0,002	0,001
40	0,001	0,001	0,001

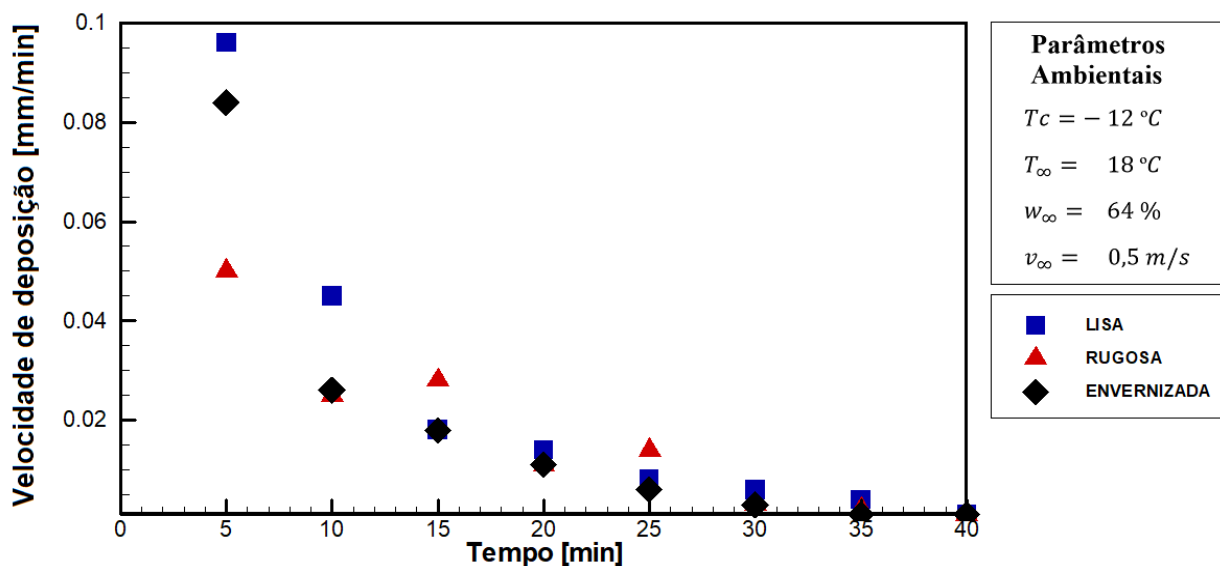


Figura 7. Velocidade de deposição de gelo para cada superfície.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi executada uma análise experimental da formação e do crescimento de gelo poroso em superfícies planas de alumínio, com diferentes acabamentos superficiais: lisa, rugosa (hidrofílica) e envernizada (hidrofóbica). Esta pesquisa tem a pretensão de auxiliar a comunidade científica por meio de testes experimentais, reforçando resultados presentes na Literatura, podendo servir como suporte para futuras investigações.

Os resultados experimentais obtidos, de acordo com os parâmetros ambientais utilizados, mostraram que dentre as superfícies testadas, a denominada “ENVERNIZADA” (amostra III, hidrofóbica) apresentou maior dificuldade para formação dos cristais de gelo, atingindo também as menores temperaturas na superfície de deposição, sendo ela, considerada a mais propícia para aplicações referentes à refrigeração, uma vez que minimizará o fenômeno.

Finalmente, conclui-se esse projeto ressaltando a importância da escolha do intervalo de tempo fixado para realização dos testes, neste caso, 40 (quarenta) minutos, sendo recomendado intervalos maiores, assim como os presentes nos trabalhos citados ao decorrer do artigo, facilitando a verificação da concordância dos dados e resultados obtidos.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos são prestados à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela concessão de bolsas de mestrado ao acadêmico *Felipe Mercês Biglia*, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro no desenvolvimento deste projeto de desenvolvimento tecnológico e de inovação. Agradecimentos também são externados 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

- Cai, L., Hou, P., Wang, R. and Zhang, X., 2010, “Effects of Different Characteristic Surfaces at Initial Stage of Frost Growth”, *Journal of Central South University of Technology*, Vol. 17, No. 2, pp. 413-418.
- Da Silva, M.N., 2005, “Eficiência Energética em Sistemas de Refrigeração Industrial e Comercial”, EletroBrás - Centrais Elétricas Brasileiras, Rio de Janeiro.
- 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, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.
- Da Silva, R.C.R., Maldonado, P.A.D, Antonini Alves, T. and Biglia, F.M., 2017, “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.
- Dyke, A. and Betz, A., 2014, “Frost Formation and Growth on Hydrophilic, Hydrophobic, and Bipilic surfaces”, *Proceedings of the 15th International Heat Transfer Conference*, Kyoto, Japan.
- Kim, H., Kim, D., Jang, H., Kim, D.R. and 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. and 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.
- Lee, Y.B. and Ro, S.T., 2001, “An Experimental Study of Frost Formation on a Horizontal Cylinder under Cross Flow”, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 24, No. 6, pp. 468-474.
- Liu, Z., Gou, Y., Wang, J. and Cheng, S., 2008, “Frost Formation on a Super-Hydrophobic Surface under Natural Convection Conditions”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, No. 25-26, pp. 5975-5982.
- Scalon, V.L., 1993, “Formação de gelo em torno de cilindros verticais”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.
- Sommers, A.D., Truster, N.L., Napora, A.C., Riechman, A.C. and Caraballo, E.J., 2016, “Densification of Frost on Hydrophilic and Hydrophobic Substrates – Examining the Effect of Surface Wettability”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 75, pp. 25-34.
- Sommers, A.D., Gebhart, C.W. and 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”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 122, pp. 78-88.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF FROST FORMATION ON FLAT PLATES WITH DIFFERENT SURFACE FINISHES

Felipe Mercês Biglia, felipebiglia@gmail.com¹

Raquel Cunha Ribeiro Da Silva, raqueld@utfpr.edu.br²

Thiago Antonini Alves, thiagoaalves@utfpr.edu.br¹

¹Federal University of Technology – Paraná, UTFPR/Ponta Grossa, CEP 84.016-210, Ponta Grossa/PR, Brazil

²Federal University of Technology – Paraná, UTFPR/Guarapuava, CEP 85.053-525, Guarapuava/PR, Brazil

Abstract. *The frost formation is present in several commercial and industrial applications that reach low temperatures, this phenomenon present in refrigeration equipment is responsible for the fall in performance, by consequence to the increase in density, becoming a thermal insulation and reducing the cooling capacity of the evaporator. The frost formation and growth on cold surfaces depends on ambient and operating conditions, which requires user intervention for removal. This paper proposes to analyze experimentally the process of frost formation on a flat plate based on the environmental operating conditions and the characteristics of the surfaces of the plates. In this context, the environmental conditions evaluated are the plate surface temperature, ambient temperature, humidity and air velocity. The material of the surfaces under study is aluminum with different surface finishes, thus differentiating the roughness of the surface. The results demonstrate experimental measurements of the frost thickness on flat surfaces made of aluminum with different surface finishes, showing that, among the samples tested, to denominate as "Envernizada", presents greater difficulty in providing the phenomenon, due to its characteristics hydrophobic.*

Keywords: *frost, frost minimization, surface finish, hydrophobic surface, defrost*