

Investigação experimental da minimização da formação de *frost* em superfícies planas de aço inoxidável com revestimentos hidrofóbicos

Rogério de Oliveira Souza, Felipe Mercês Biglia, Raquel da Cunha Ribeiro da Silva, Thiago Antonini Alves

Resumo: Este trabalho apresenta um estudo experimental sobre a formação de *frost* em uma superfície plana de aço inoxidável envernizada e em uma lisa. A formação de *frost* ocorre através do escoamento de ar úmido sobre uma superfície abaixo de 0°C e está presente em diversas aplicações comerciais e industriais, onde o acúmulo de gelo afeta o desempenho de equipamentos de refrigeração, diminuindo sua eficiência e aumentando gastos energéticos. Os experimentos foram realizados em ambiente com umidade controlada em uma placa plana de aço inoxidável, revestida com uma camada de verniz e em uma sem revestimento. Os resultados apresentam a espessura e velocidade de deposição da camada de *frost*, mostrando o comportamento do fenômeno nas superfícies estudadas.

Palavras chave: *Frost*, Refrigeração, Minimização, Revestimento.

Experimental investigation of minimizing *frost* formation on flat stainless-steel surfaces with hydrophobic coatings

Abstract: This paper presents an experimental study about the formation of frost on a flat surface of varnished stainless steel and on a smooth surface. The formation of frost occurs through the humid air flow on a surface below 0°C and is present in various commercial and industrial applications, where the accumulation of ice affects the performance of cooling equipment, decreasing efficiency and increasing energy costs. The experiments were carried out in a controlled environment in a stainless-steel flat plate, coated with a varnish layer and an uncoated. The results show the thickness and speed of deposition of the frost layer, showing the behavior of phenomena on the studied surfaces.

Key-words: *Frost*, Refrigeration, Minimization, Coating.

1. Introdução

O *frost* (gelo poroso) é uma estrutura porosa formada por cristais de gelo e ar úmido, que é gerada através do escoamento de ar e vapor d'água sobre uma superfície com temperatura inferior a 0°C. A deposição de *frost* ocorre em diversas aplicações industriais e comerciais, como sistemas de refrigeração, asas de aviões, compressores e sistemas de armazenamento de líquidos criogênicos (DA SILVA, 2014).

A formação de *frost* ocorre por meio do fenômeno de ressublimação, onde o vapor d'água presente no ar passa diretamente para o estado sólido, ao entrar em contato com uma superfície fria, formando uma estrutura irregular de cristais de gelo (BIGLIA, 2018).

A camada de *frost* atua, a princípio, como uma aleta, intensificando a troca de calor com o meio externo, porém, com o aumento da espessura da camada de *frost* há também o aumento da resistência térmica, reduzindo a taxa de transferência de calor da superfície (LEE & RO, 2001). Sua deposição em superfícies frias altera o desempenho de equipamentos de refrigeração, diminuindo a eficiência e demandando um maior gasto energético para seu correto funcionamento (BIGLIA et al., 2019). Seu acúmulo (aumento de espessura) gera dois problemas, o primeiro é a redução da taxa de transferência de calor e o segundo é o aumento

da perda de carga devido ao acúmulo de gelo nos evaporadores, diminuindo a área de fluxo nos tubos (SCALON, 1993). Portanto, é essencial a redução da formação e acúmulo de *frost* em equipamentos de refrigeração para a obtenção de melhores desempenhos e do aumento da eficiência destes equipamentos (DELGADO, 2017).

De acordo com Da Silva (2014), o estudo da formação de *frost* é complexo devido aos fatores:

- A fronteira da interface gelo-ar permanece em movimento devido à formação de novas camadas de *frost*;
- A temperatura da superfície do gelo varia de acordo com a espessura da camada de *frost*;
- As características do escoamento de ar se alteram com o aumento da camada de *frost*, visto que a geometria da superfície se altera;
- O fenômeno envolve transferência de calor e massa simultaneamente.

Esses fatores são motivos de muitos trabalhos dessa área serem estudos experimentais (DA SILVA, 2014).

Neste contexto, este trabalho busca realizar uma análise experimental da formação de *frost* em uma superfície plana envernizada e em uma lisa, cujo material de base é o aço inoxidável, sob parâmetros ambientais controlados.

2. Superfície estudada

As superfícies planas estudadas são formadas por duas amostras quadradas de 40 mm de aresta e 2 mm de espessura de aço inoxidável, como visto na Figura 1. Em uma das placas foi aplicada uma camada de verniz, da marca *Mundial Prime™*, Tinta Spray Verniz - Uso Geral.



Figura 1 – Superfície envernizada de Aço Inoxidável (Autoria própria)

As placas utilizadas como amostra foram inseridas no aparato experimental através da utilização de uma pasta térmica *Implastec™*, que proporciona um melhor contato entre o aparato e a amostra.

3. Materiais e métodos

O aparato experimental utilizado na realização dos testes, apresentado na Figura 2, é 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, Figura 3, 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.



Figura 3 – Seção de Testes (Autoria própria)

Os parâmetros ambientais mais importantes na análise desse fenômeno de formação e de deposição de *frost* em superfícies foram a 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*, vista na Figura 4, 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.

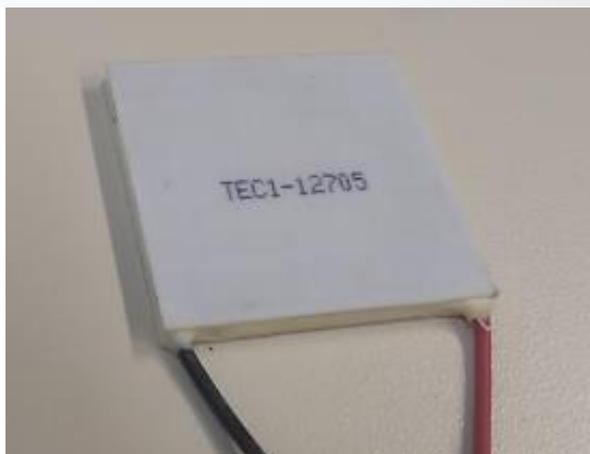


Figura 4 – Pastilha Peltier (Autoria própria)

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 *frost*, 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 foi medida por meio do tratamento de imagens realizadas por meio do aplicativo *open-source software ImageJ™*.

A metodologia dos experimentos foi realizada baseada em Biglia (2018) e consiste em:

- 1 - Isolar o laboratório onde são realizados 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 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 aquisição de dados;
- 6 - Preparar e conferir os sistemas de medição, como a câmera digital, o termômetro infravermelho, os termopares e demais sensores;
- 7 - Efetuar a primeira medição, tempo 0 (zero);

- 8 - Ativar a superfície fria por meio da fonte de alimentação na tensão de 11,00 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 Controle Térmico (LabCT) 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.

Como mencionado anteriormente, para a medição da espessura e da velocidade de deposição da camada de *frost* foi utilizado o *software open source ImageJ™*, onde, por meio da imagem retirada no início do teste, foi utilizada a espessura da chapa como referência para a definição de uma escala, que foi aplicada em todas as imagens obtidas para a medição da espessura da camada de gelo, como ilustrado pela Figura 5.

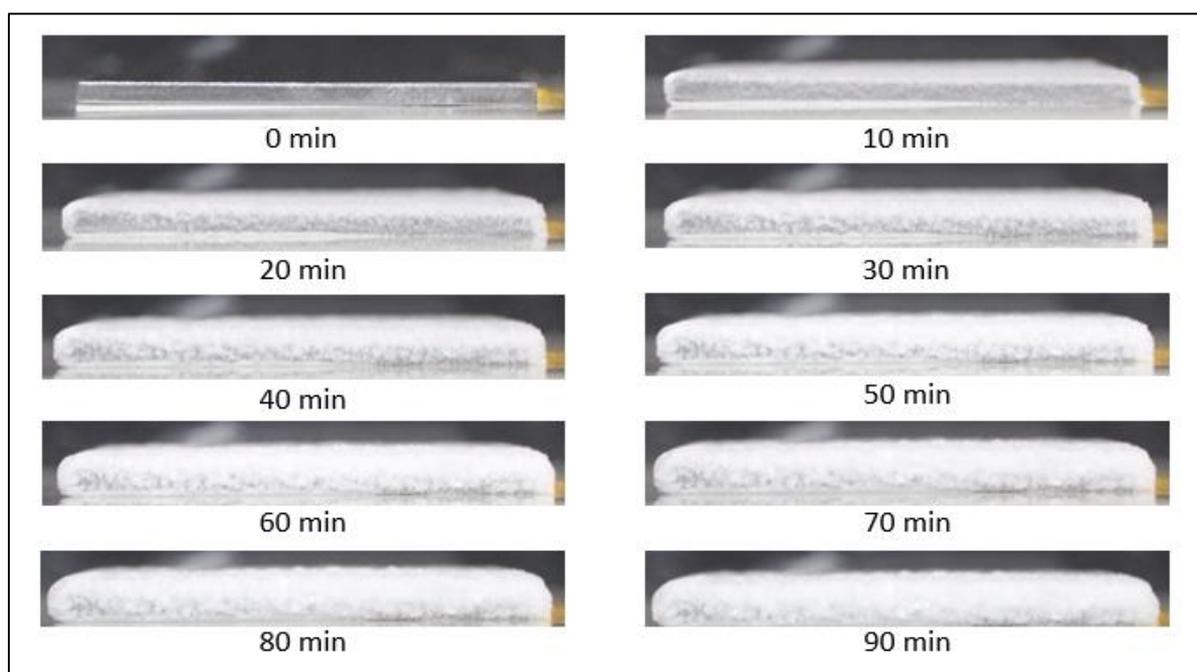


Figura 5 – Espessura vs. tempo

4. Resultados

Os testes experimentais foram realizados sob parâmetros ambientais controlados, que foram mantidos constantes de acordo com a Tabela 1.

Parâmetro	Valor
Temperatura Ambiente [°C]	18,0
Temperatura da Superfície Fria [°C]	-20,0
Umidade Relativa do Ar [%]	50
Velocidade de Escoamento do ar [m/s]	0,5

Fonte: Autoria própria

Tabela 1 – Parâmetros Ambientais utilizados

Os resultados obtidos para a espessura da camada de *frost* formada em ambas as placas são apresentados nas Tabelas 2 e 3 e na Figura 6.

Tempo [min]	Espessura [mm]
0	0,000
10	0,825
20	1,290
30	1,566
40	1,838
50	2,049
60	2,205
70	2,344
80	2,492
90	2,659

Fonte: Autoria própria

Tabela 2 – Espessura da camada de *frost* na placa envernizada

Tempo [min]	Espessura [mm]
0	0,000
10	1,607
20	1,863
30	2,068
40	2,261
50	2,395
60	2,529
70	2,675
80	2,839
90	3,015

Fonte: Autoria própria

Tabela 3 – Espessura da camada de *frost* na placa lisa

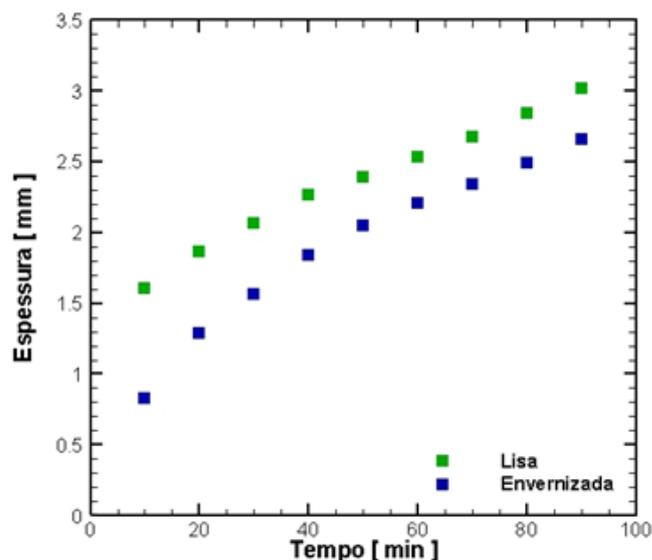


Figura 6 – Espessura da camada de *frost* (Autoria própria)

A placa com a superfície envernizada apresenta uma camada menos espessa que a placa com superfície lisa. O verniz garante a placa uma superfície hidrofóbica que minimiza a formação de *frost*.

O comportamento da camada de *frost* vai de acordo com os resultados de Biglia (2018), sendo semelhante a superfícies envernizadas que utilizam outros materiais de base.

O registro da espessura foi realizado em períodos de 10 minutos, possibilitando a determinação da velocidade de deposição de *frost* na superfície, que é apresentada nas Tabelas 4 e 5 e na Figura 7.

Tempo [min]	Velocidade [mm/min]
10	0,0825
20	0,0464
30	0,0276
40	0,0272
50	0,0211
60	0,0156
70	0,0139
80	0,0148
90	0,0167

Fonte: Autoria própria

Tabela 4 – Velocidade de deposição na placa envernizada

Tempo [min]	Velocidade [mm/min]
10	0,1607
20	0,0256
30	0,0205
40	0,0193
50	0,0133
60	0,0135
70	0,0145
80	0,0164
90	0,0176

Fonte: Autoria própria

Tabela 5 – Velocidade de deposição na placa lisa

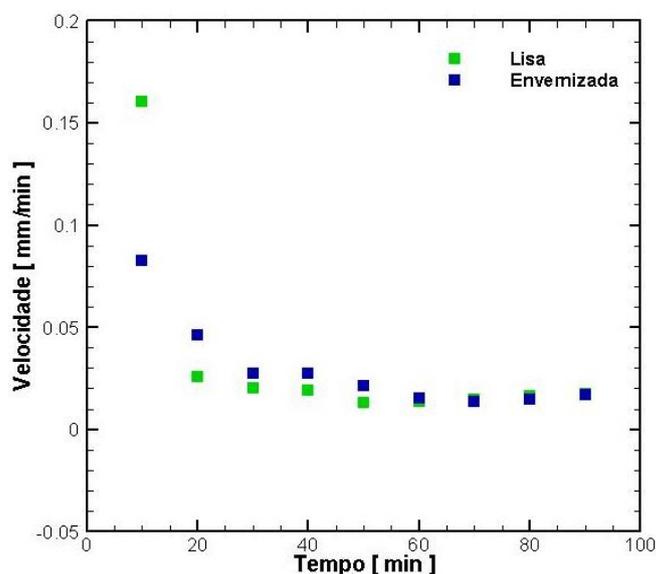


Figura 7 – Velocidade de deposição (Autoria própria)

A velocidade de deposição também é afetada pela superfície envernizada, percebe-se que na placa envernizada a velocidade é menor durante o início do estudo. Com o decorrer do tempo as velocidades se aproximam e tendem a se estabilizar em um valor próximo de 0. Os resultados obtidos seguem o comportamento de resultados presentes na literatura para outras superfícies envernizadas e lisas (BIGLIA, 2018).

No geral, a superfície envernizada apresenta espessura e velocidade menores que a superfície lisa de aço inoxidável, podendo ser uma alternativa para se minimizar a formação de *frost* em equipamentos de refrigeração.

5. Conclusão

Este trabalho aborda uma investigação experimental sobre a formação de *frost* superfícies de aço inoxidável, com diferentes revestimentos. Os experimentos foram realizados em ambiente com temperatura e umidade controladas e se obteve resultados de espessura e velocidade de formação da camada de *frost*.

A superfície que possui o revestimento com uma camada de verniz apresentou valores menores de espessura de *frost* depositado e foi capaz de retardar o processo de deposição, apresentando velocidades menores de formação da camada. Assim, o revestimento com verniz pode ser uma alternativa para minimizar a formação de *frost* em equipamentos comerciais, buscando aumentar a eficiência destes.

Os resultados obtidos apresentam concordância com os resultados presentes na literatura e mostram o comportamento das superfícies de aço inoxidável sob as condições especificadas, podendo servir de apoio para trabalhos futuros.

Referências

BIGLIA, F. M. **Análise numérico-experimental da minimização da formação de gelo poroso em placas planas**. Ponta Grossa, 111 p., 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

BIGLIA, F. M.; DA SILVA, R. C. R.; ANTONINI ALVES, T. Análise experimental da formação de gelo poroso em placas planas com diferentes acabamentos superficiais. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA (CONEM 2018), 10., Salvador. **Anais...** Salvador: Faculdade de Tecnologia do SENAI CIMATEC, 2018.

BIGLIA, F. M.; FACHINI, L. V. G.; BARTMEYER, G. A.; DA SILVA, R. C. R.; ALVES ANTONINI, T. Investigação experimental da deposição de gelo poroso em placas planas de distintos materiais de base. **Engenharia no Século XXI, Volume 9**. Belo Horizonte: Editora Poisson, 2019. p. 115-122.

DA SILVA, R. C. R. **Estudo experimental e numérico da formação de *frost* em torno de três cilindros com arranjo triangular**. Campinas, 112 p., 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas.

DELGADO, P. A. M. **Estudo experimental e numérico da formação de *frost* com convecção natural em arranjo triangular de tubos esbeltos verticais**. Campinas, 85 p. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas.

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

SCALON, V. L. **Formação de gelo em torno de cilindros verticais**. Campinas, 101 p., 1993. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas.