

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ROGÉRIO DE OLIVEIRA SOUZA

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DA FORMAÇÃO DE *FROST* EM PLACAS
PLANAS DE COBRE COM REVESTIMENTO SINTERIZADO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2022

ROGÉRIO DE OLIVEIRA SOUZA ✉

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DA FORMAÇÃO DE *FROST* EM PLACAS
PLANAS DE COBRE COM REVESTIMENTO SINTERIZADO**

**Experimental Research of Frost Formation on Copper Flat
Plates with Sinterized Coating**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento Acadêmico de Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador:

Prof. Dr. *Thiago Antonini Alves* ✉  

Coorientador:

Prof. Me. *Felipe Mercês Biglia* ✉  

PONTA GROSSA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

ROGÉRIO DE OLIVEIRA SOUZA

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DA FORMAÇÃO DE FROST EM PLACAS
PLANAS DE COBRE COM REVESTIMENTO SINTERIZADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Data de aprovação: 30 de junho de 2022

Thiago Antonini Alves

Doutor em Engenharia Mecânica

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – *Campus* Ponta Grossa

Raquel da Cunha Ribeiro da Silva

Doutora em Engenharia Mecânica

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – *Campus* Guarapuava

Tárik Linhares Tebchirani

Mestre em Engenharia Mecânica

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – *Campus* Ponta Grossa

PONTA GROSSA - PR

2022

Dedico este Trabalho de Conclusão de Curso aos meus pais *Jaime* e *Sandra* e a meu irmão *Leonardo*.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, o glorioso Pai de nosso Senhor Jesus Cristo, que em sua bondade nos concedeu a graça da vida, e me deu a paz, saúde e sabedoria para concluir este curso.

Aos meus pais, *Jaime Martins de Souza* e *Sandra Mara de Oliveira Souza*, que sempre me deram todo o amor, carinho e dedicação que formaram a pessoa que sou hoje, sempre me incentivaram e ensinaram a importância do estudo, participando e celebrando cada conquista em toda a minha trajetória.

Ao meu irmão *Leonardo de Oliveira Souza*, meu companheiro ao longo de toda a vida, inclusive em toda a trajetória acadêmica.

Agradeço imensamente ao meu orientador Prof. Dr. *Thiago Antonini Alves*, por toda a ajuda, confiança, paciência, ensinamentos que me concedeu durante nossas pesquisas e pelo incentivo à conclusão deste trabalho.

Ao meu Coorientador Prof. Me. *Felipe Mercês Biglia*, por todo o auxílio, paciência, confiança que tornaram possível a realização deste trabalho e pelo incentivo à conclusão desta pesquisa.

Agradeço à Profa. Dra. *Sani Rutz de Carvalho da Silva*, por todos os ensinamentos, amizade e confiança que desde cedo compartilhou comigo e por ter contribuído nas decisões de minha vida acadêmica.

A todos os companheiros de pesquisa do Laboratório de Controle Térmico (LabCT) que compartilharam experiências e ensinamentos sobre a área das Ciências Térmicas e pelo auxílio nesta pesquisa.

Ao Departamento Acadêmico de Engenharia Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – *Campus* Ponta Grossa pelos auxílios e oportunidades.

Muito Obrigado!

“Tudo posso naquele que me fortalece”.

Filipenses 4:13

RESUMO

Este trabalho consiste em uma análise experimental da formação de *frost* (gelo poroso) em superfícies frias de cobre com revestimentos liso, envernizado e poroso. A formação de *frost* ocorre quando um fluxo de ar úmido entra em contato com uma superfície fria abaixo de 0°C, transformando o vapor de água em uma estrutura porosa de gelo que atua como isolante térmico. No processo de refrigeração, o acúmulo de *frost* em evaporadores acarreta a perda de eficiência e aumento do consumo energético, tornando esse assunto alvo de diversas pesquisas que visam obter meios de diminuir a formação desse fenômeno. Nesse contexto, foi utilizado um aparato experimental com uma superfície fria de até -20°C, foi realizada uma análise experimental em 3 amostras fabricadas a partir de placas planas de cobre, uma amostra sem revestimento superficial, uma amostra com uma camada de verniz aplicada sobre sua superfície e uma amostra com um revestimento poroso feito através da sinterização de pó de cobre sobre sua superfície. Os testes experimentais foram realizados com parâmetros de temperatura ambiente e umidade relativa do ar estáveis e duraram 120 minutos, visando obter dados sobre a espessura da camada de *frost* formada sobre as amostras, a velocidade de deposição e a temperatura superficial das amostras. Os resultados obtidos têm comportamento semelhante com os encontrados na literatura e mostraram que as amostras com o revestimento sinterizado oferecem maior resistência à formação de *frost* e apresentam uma maior temperatura superficial.

Palavras-Chave: superfícies de cobre; gelo poroso; sinterização; minimização de *frost*.

ABSTRACT

This paper consists in an experimental analysis of the frost (porous ice) formation on cold copper surfaces with smooth, varnished and porous coating. Frost formation occurs when a moist airflow comes in contact with a cold surface below 0°C, transforming steam into a porous ice structure that acts as a thermal insulator. In equipment present in the refrigeration process, the frost accumulation in evaporators leads to a loss of efficiency and an increase in energy consumption, making this topic a subject of several researches that aim to obtain ways to reduce the formation of this phenomenon. In this context, an experimental apparatus with a -20°C cold surface was used, an experimental analysis was carried out on 3 samples manufactured from flat copper plates without surface coating, with a layer of varnish applied on the surface and with a porous coating made by sintering copper powder onto the sample surface. The experimental tests were carried out with stable ambient temperature and relative humidity parameters and lasted 120 minutes, aiming to obtain data on the thickness of the frost layer formed on the samples, the formation speed, and the surface temperature of the samples. The results obtained have a behavior similar to those found in the literature and showed that the samples with the sintered coating offer greater resistance to frost formation and present a higher surface temperature.

Keywords: copper surfaces; frost; sintering; frost minimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diferença entre gelo poroso (a) e gelo (b)	16
Figura 2 - Diagrama de fase da água.....	17
Figura 3 - Estágios de formação do <i>frost</i>	18
Figura 4 - Geometrias do cristal de gelo	19
Figura 5 - Amostra de cobre lisa durante o teste.....	33

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Aparato experimental	22
Fotografia 2 - Seção de testes	23
Fotografia 3 - Pastilha termoelétrica <i>Peltier</i>	24
Fotografia 4 - Sistema de Controle com dispositivo <i>Arduino</i> ®	24
Fotografia 5 - Superfícies estudadas.....	25
Fotografia 6 - Forno de sinterização.....	26
Fotografia 7 - Sistema de aquisição de dados	30
Fotografia 8 - Sensor de umidade DHT.....	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades do material sinterizado	28
Tabela 2 - Incertezas de medição	32
Tabela 3 - Parâmetros ambientais utilizados nos testes experimentais	34

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Distribuição granulométrica do pó de cobre	27
Gráfico 2 - Curva térmica do processo de sinterização	28
Gráfico 3 - Espessura da camada de <i>frost</i>	34
Gráfico 4 - Velocidade de formação da camada de <i>frost</i>	35
Gráfico 5 - Temperatura Superficial	36

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVA.....	13
1.2 OBJETIVOS.....	14
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	15
2 REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 FORMAÇÃO DE <i>FROST</i>	16
2.2 ESTUDOS SOBRE A MINIMIZAÇÃO DA CAMADA DE <i>FROST</i>	19
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
3.1 APARATO EXPERIMENTAL	22
3.2 SUPERFÍCIES ESTUDADAS	25
3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	28
3.4 ANÁLISE DE INCERTEZAS	31
4 RESULTADOS	33
4.1 ESPESSURA DA CAMADA DE <i>FROST</i>	34
4.2 VELOCIDADE DE DEPOSIÇÃO.....	35
4.3 TEMPERATURA SUPERFICIAL	36
5 CONCLUSÃO.....	38
REFERÊNCIAS.....	40

1 INTRODUÇÃO

No segmento de refrigeração são utilizados equipamentos, cuja temperatura de evaporação é próxima de -10°C , facilitando a formação e acúmulo de *frost* (gelo poroso) sobre a superfície dos dispositivos de resfriamento (SILVA, 2012).

A formação de *frost* é um fenômeno que ocorre a partir do contato de um fluxo de ar úmido com uma superfície fria (abaixo de 0°C). Esse fenômeno ocorre em diversas aplicações, como em evaporadores de sistemas de refrigeração, asas de aviões, rotores de compressores e aplicações de líquidos criogênicos (SILVA, 2014).

Em evaporadores, o acúmulo de *frost* pode ser tão grande em algumas situações, ao ponto de impedir totalmente o fluxo de ar no sistema de refrigeração, acarretando gastos energéticos e perda de eficiência do equipamento. Portanto, evitar o acúmulo de gelo na superfície é essencial para o bom funcionamento do equipamento (LIU *et al.*, 2007).

A camada de *frost* formada em evaporadores, atua inicialmente como uma aleta aumentando a condução de calor, porém, simultaneamente o crescimento da camada de *frost* aumenta a resistência térmica da superfície, diminuindo a taxa de transferência de calor e aumentando o consumo de energia do sistema (BIGLIA *et al.*, 2020a).

1.1 JUSTIFICATIVA

A espessura da camada de *frost* formada em superfícies frias, cresce ao longo do tempo e é responsável pela queda de desempenho de sistemas de refrigeração, gerando gastos adicionais, assim torna-se necessário a realização do degelo do equipamento para o correto funcionamento do sistema (SILVA, 2014).

O processo de degelo aumenta a carga térmica imposta no equipamento, pois parte do calor é utilizado para a retirada da camada de gelo e, outra parte é transferida para o ambiente resfriado, acarretando mais esforços para o sistema de refrigeração. Os sistemas de degelo normalmente são instalados sobre os evaporadores, portanto também acarretam no aumento da perda de carga do evaporador, gerando mais custos para o funcionamento do equipamento (BIGLIA, 2018).

Durante a formação da camada de *frost* a perda de energia se dá por meio do desvio do calor usado para solidificar as gotículas de água sobre a superfície e pelo aumento da perda de carga, devido à diminuição na área do fluxo de vapor, acarretada pelo aumento da espessura da camada de gelo (SCALON, 1993).

De acordo com Silva (2014), o estudo do processo de formação de *frost* é complexo, fazendo com que a maioria das pesquisas realizadas na área sejam estudos experimentais.

Portanto, o acúmulo de *frost* em superfícies acarreta perdas de eficiência e aumento de gastos operacionais de sistemas de refrigeração, sendo necessário minimizar esse fenômeno para obter um melhor funcionamento e o aumento da eficiência dos equipamentos (MALDONADO *et al.*, 2022).

A minimização do acúmulo de *frost* em equipamentos de refrigeração é, então, uma alternativa para reduzir os gastos energéticos dos equipamentos e evitar problemas durante a operação dos dispositivos.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste Trabalho de Conclusão de Curso é executar uma análise experimental do uso de revestimentos porosos obtidos através do processo de sinterização de pó de cobre sobre superfície plana de cobre visando à minimização da formação de *frost* sobre ela.

Os objetivos específicos são:

- i) Obter uma superfície porosa para análise, por meio do processo de sinterização de pó de cobre sobre placa plana de cobre;
- ii) Investigar o processo de formação de *frost* em diferentes superfícies sob condições ambientais controladas;
- iii) Analisar qual revestimento superficial apresenta a menor formação de *frost* e comparar com os resultados presentes na literatura.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esse Trabalho de Conclusão de Curso está dividido em cinco capítulos. Nesse capítulo inicial, são apresentados a introdução, a justificativa e os objetivos. O Capítulo 2 contém o embasamento teórico sobre a formação de *frost* e os trabalhos desenvolvidos sobre o tema. O Capítulo 3 apresenta a descrição do aparato experimental, a obtenção das amostras estudadas e descreve as etapas dos experimentos e também apresenta as incertezas associadas as medições realizadas. Os resultados e discussões são mostrados no Capítulo 4, relativos à espessura e velocidade de deposição de *frost* e temperatura superficial da amostra. Os resultados são comparados com os encontrados na literatura. Finalmente, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões dessa pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção apresenta o embasamento teórico sobre a formação de *frost* e suas características, juntamente com uma revisão sobre as pesquisas já realizadas sobre a compreensão e minimização da deposição de *frost* em superfícies.

2.1 FORMAÇÃO DE FROST

O *frost* (gelo poroso) é uma substância com estrutura e propriedades físicas diferentes do gelo. A diferença entre os dois estados é percebida através da Figura 1, que mostra o aspecto do *frost* (a) e do gelo (b).

Figura 1 - Diferença entre gelo poroso (a) e gelo (b)



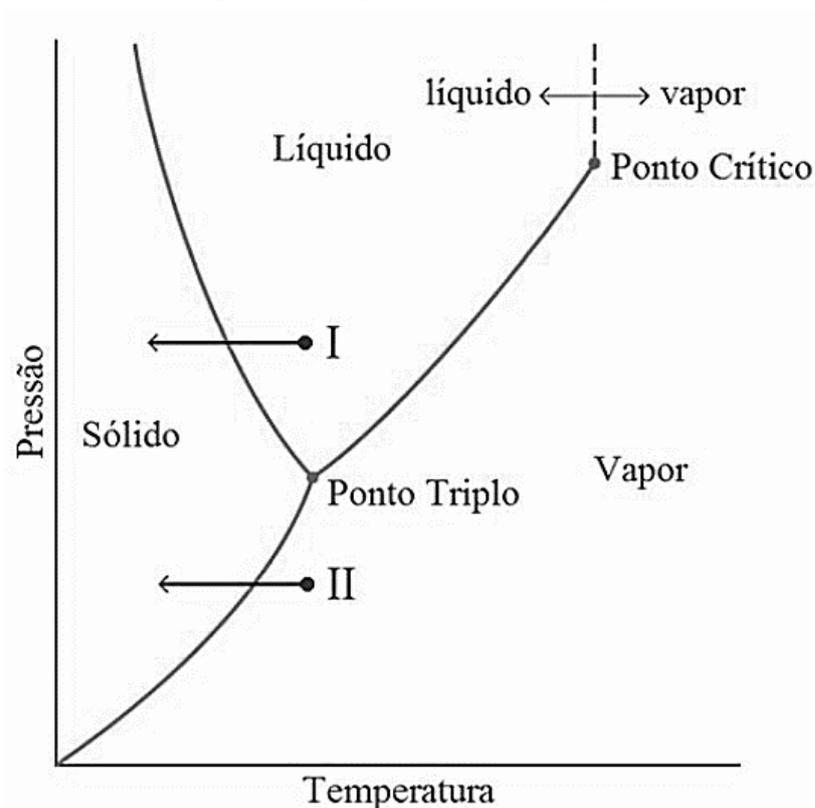
Fonte: (a) Adaptado de Pexels (2022); (b) Adaptado de Pexels (2022)

O gelo é entendido como a fase sólida que resulta do processo de solidificação, ou seja, ocorre a transição direta da água do estado líquido para o estado sólido. O *frost* é formado a partir do processo de ressublimação, onde o vapor de água passa para o estado sólido diretamente, gerando uma estrutura porosa formada por cristais irregulares de gelo (BIGLIA *et al.*, 2019).

O diagrama de mudança de fase da água, mostrado na Figura 2 permite um melhor entendimento desses fenômenos. A formação de gelo é indicada pelo

Processo I, onde a água passa do estado líquido para o sólido, enquanto a formação de *frost* é indicada pelo Processo II, no qual o vapor de água se transforma em sólido sem passar pelo estado líquido.

Figura 2 - Diagrama de fase da água



Fonte: Adaptado de Moran *et al.* (2010)

A diferença entre os processos resulta em sólidos com propriedades distintas, onde o gelo apresenta uma estrutura muito mais densa que o *frost*, que possui uma estrutura porosa formada por cristais de gelo irregulares. Geralmente, a estrutura do *frost* é formada por uma geometria dendrítica ou fractal e possui pequenas bolsas de ar (PIUCCO, 2008).

As propriedades do *frost* diferem das propriedades do gelo devido à sua estrutura irregular com presença de bolsas de ar. A condutividade térmica do gelo é de cerca de 2,1 W/m.K enquanto a do *frost* é de aproximadamente 0,2 W/m.K. A densidade do *frost* possui valor igual a 211 kg/m³, o que equivale a aproximadamente um quinto da densidade do gelo que é de 917 kg/m³ (SILVA, 2014).

O processo de formação de *frost* pode ser dividido em estágios, de acordo com a estrutura formada em cada estágio. A Figura 3 ilustra esse processo. O primeiro

estágio, definido como nucleação (Fase #1) é caracterizado pela formação de um embrião através do super resfriamento de um aglomerado de moléculas de vapor de água (PIUCCO, 2008). Esse embrião cresce aderindo novas moléculas de vapor, aumentando seu volume e área superficial até formar uma fina camada de *frost* sobre sua superfície – Fase #2 (CHENG; SEKI, 1991).



Fonte: Adpatado de Wang *et al.* (2018)

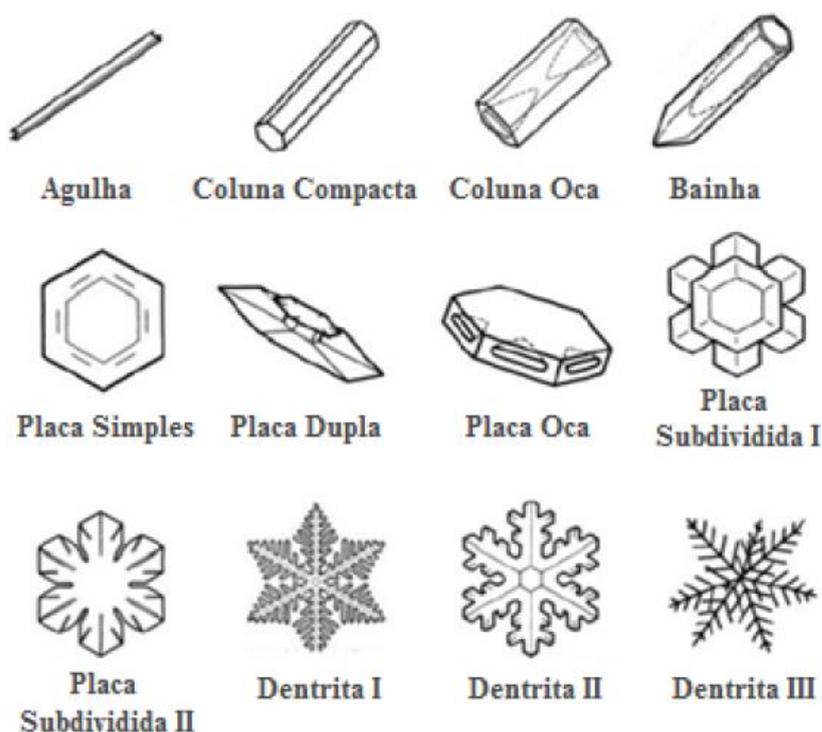
Após a formação do embrião, novas nucleações ocorrem sobre sua superfície gerando ramificações que aumentam seu volume e área superficial (Fases #3 e #4). Na superfície dessas ramificações ocorrem mais nucleações sucessivamente originando cristais ramificados que formam uma camada porosa e uniforme – Fases #5 e #6 (CHENG; SEKI, 1991).

Finalmente, quando a temperatura da superfície da camada porosa de gelo atinge o ponto triplo da água, o vapor de água não é solidificado diretamente e começa a se condensar e ser absorvido pela camada porosa existente (Fase #7). Com o tempo esse vapor de água absorvido se congela aumentando drasticamente a densidade da camada e diminuindo a resistência térmica (CHENG; SEKI, 1991). Ainda nesse último estágio há o crescimento acelerado da camada de *frost*.

Em uma análise microscópica, as etapas de formação de *frost* são relacionadas com os parâmetros ambientais presentes no processo. A geometria que os cristais de gelo podem assumir são diretamente dependentes da temperatura do ambiente, além disso a direção de crescimento dos cristais é determinada pela densidade do vapor de água presente no ambiente (KOBAYASHI, 1958).

Na Figura 4 podem ser observadas os principais formatos que os cristais de gelo podem assumir, de acordo com a temperatura da superfície (KOBAYASHI, 1958). Em ambientes com uma temperatura maior que -4°C , a nucleação ocorre preferencialmente na direção lateral e gera uma geometria em placa. Para temperaturas no intervalo entre -10°C e -4°C e -20°C e -10°C , a nucleação ocorre preferencialmente na direção vertical para ambos, porém, no primeiro intervalo, o cristal prefere a geometria em bainha, agulha ou colunas, e, no segundo intervalo, em placas subdividida ou dentrita. Para temperaturas menores que -20°C , a nucleação ocorre preferencialmente na direção lateral e, o cristal assume a forma de colunas ocas ou compactas.

Figura 4 - Geometrias do cristal de gelo



Fonte: Adaptado de Kobayashi (1958)

2.2 ESTUDOS SOBRE A MINIMIZAÇÃO DA CAMADA DE FROST

A minimização e o processo de formação da camada de *frost* é um assunto presente em diversas pesquisas que visam compreender esse fenômeno e buscar meios de aumentar a eficiência de equipamentos de refrigeração. A seguir é apresentada uma revisão de trabalhos que abordam essa temática.

Wang *et al.* (2004) estudaram como a polaridade de um campo elétrico gerado por uma corrente contínua afeta o crescimento de *frost*. Em seus estudos foi constatado que a polaridade do campo elétrico afeta significativamente a espessura da camada de *frost*. Para polaridades negativas houve um crescimento de 30% a 50% na espessura da camada de *frost* formada.

Zhang *et al.* (2016) investigaram a influência de campos elétricos perpendiculares a superfície no processo de nucleação dos cristais de gelo durante o crescimento da camada de *frost*. Foi verificado que para campos elétricos inferiores a 0,1MV/m, houve aumento na nucleação, independentemente da orientação do campo elétrico.

De acordo com Biglia *et al.* (2020b) a aplicação de revestimentos compostos por materiais hidrofóbicos (que repelem a água) ou hidrofílicos (que possuem afinidade com a água) é um dos métodos utilizados para tentar minimizar a formação de *frost* em superfícies e, portanto, é tema de diversas pesquisas científicas.

Liu *et al.* (2006) realizaram um estudo experimental da capacidade de minimizar o crescimento de *frost* de uma tinta composta por substâncias hidrofílicas e poliméricas. O crescimento da camada de *frost* foi acompanhado em uma superfície fria composta por uma placa metálica, cuja metade de sua superfície estava revestida pela tinta. Houve um atraso de 15 minutos no início da fase de nucleação e a espessura da camada de *frost* foi reduzida em cerca de 40%, comprovando a eficácia do revestimento estudado.

Kim *et al.* (2016) demonstram que o a aplicação de substâncias hidrofóbicas e super hidrofóbicas, usando polipropileno isotático, como revestimento em superfícies aletadas podem atrasar a deposição de *frost* sobre uma superfície fria. Seu estudo indica que o atraso ocorreu devido ao prolongamento do primeiro estágio de nucleação. Porém, os revestimentos tem seu resultado esperado somente em superfícies super-resfriadas (entre -20°C e -40°C).

Biglia (2018) investigou a formação de *frost* em superfícies metálicas de alumínio, cobre e latão com diferentes acabamentos superficiais e revestimentos. Seus resultados indicam que a aplicação de verniz (substância hidrofóbica) sobre a superfície fria implica em uma grande redução da camada de *frost*, principalmente em materiais que possuem alta condutividade térmica.

Nesse contexto, observa-se que existem diversos trabalhos na literatura consultada sobre o estudo da formação e minimização do acúmulo de *frost* em superfícies frias, porém ainda há lacunas no conhecimento sobre os métodos de minimização desse fenômeno, que devem ser preenchidas por meio de novos estudos que avaliem a eficiência de revestimentos sobre superfície frias.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados em um aparato experimental desenvolvido em Biglia (2018) e foram executados no Laboratório de Controle Térmico vinculado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Campus* Ponta Grossa.

3.1 APARATO EXPERIMENTAL

O aparato experimental utilizado para realização dos testes experimentais, mostrado na Fotografia 1, 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 Fotográfica *Canon™ EOS Rebel T6* e um tripé *Polaroid™*.

Fotografia 1 - Aparato experimental



Fonte: Autoria Própria

O aparato experimental permitiu que fossem realizados experimentos em diferentes materiais, com diferentes acabamentos superficiais ou revestimentos e tem como objetivo analisar a formação e o crescimento da camada de *frost* nas superfícies estudadas.

A seção de testes foi composta por uma caixa de acrílico de 4mm de espessura, um ventilador axial *Multilaser™*, uma pastilha termoelétrica *Peltier* TEC1-12706 e uma base de sustentação feita a partir de perfis estruturais de alumínio com 20mm de aresta.

Fotografia 2 - Seção de testes



Fonte: Autoria própria

Os parâmetros ambientais foram fundamentais para a realização dos experimentos. Nesse estudo experimental foram considerados a temperatura da superfície fria, temperatura ambiente, umidade relativa do ar e velocidade do fluxo de ar sobre a superfície fria.

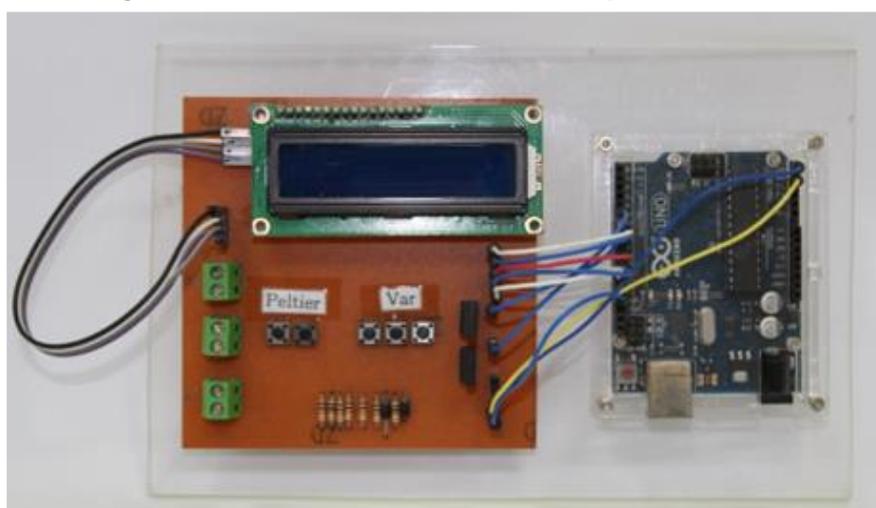
A superfície fria foi obtida através da utilização da pastilha termoelétrica *Peltier*, exibida na Fotografia 3, possuindo 40mm de aresta e 2mm de espessura, acoplada a fonte de alimentação *Keysight™* U8002A e sendo resfriada através do dissipador de calor aletado com tubos de calor.

A umidade relativa do ar e a temperatura ambiente foram controladas por meio de um aparelho de ar condicionado *Rheem™*, que não permite o controle de umidade. Assim a temperatura de 16° C foi definida no aparelho como, sendo a menor temperatura que pode ser definida no dispositivo, obrigando o funcionamento pleno do sistema de resfriamento durante toda a execução dos experimentos, o que permitiu que os parâmetros permanecessem estáveis, sem alterações significativas.

Fotografia 3 - Pastilha termoelétrica Peltier

Fonte: Autoria própria

A velocidade do fluxo de ar úmido na seção de teste foi controlada por meio de um ventilador axial e validada através da medição com um *Anemômetro Digital Portátil ITAN™ 720* posicionado sobre o local de formação da superfície fria. Devido ao custo elevado de sistemas de controle e aquisição de dados e a popularização de plataformas de código aberto (*open-source*), foi utilizado um circuito de prototipagem eletrônica integrado com um dispositivo *Arduino®*, exibido na Fotografia 4, licenciado sob a *Creative Commons Atribuição-Compartilhual 4.0 Internacional* para realizar a medição dos valores de umidade e o controle da velocidade do ar.

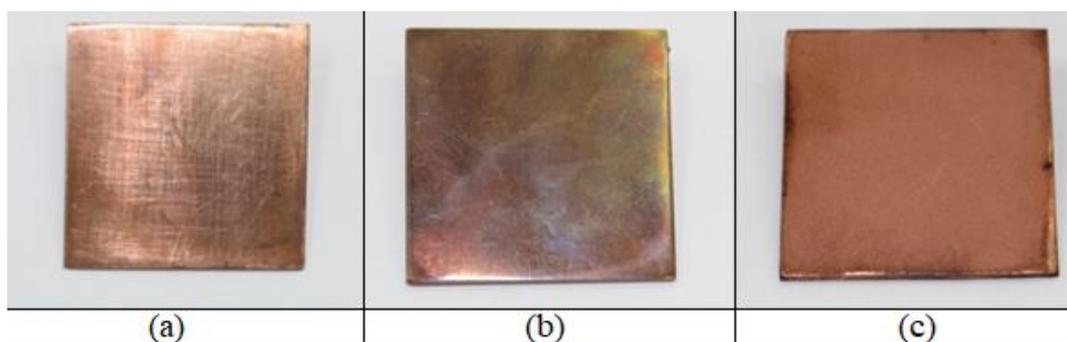
Fotografia 4 - Sistema de Controle com dispositivo *Arduino®*

Fonte: Autoria própria

3.2 SUPERFÍCIES ESTUDADAS

As superfícies planas estudadas consistem em placas quadradas de cobre com 40mm de aresta e 2mm de espessura. As placas têm acabamentos superficiais distintos, sendo uma *lisa* (Fotografia 5a), uma *envernizada* (Fotografia 5b) e uma *sinterizada* com acabamento poroso formado pela sinterização de uma camada de pó de cobre em sua superfície (Fotografia 5c).

Fotografia 5 - Superfícies estudadas



Fonte: Autoria própria

Essas amostras foram obtidas a partir de uma chapa de cobre de 2mm de espessura e foram cortadas nas respectivas dimensões por meio de uma guilhotina hidráulica *Clark™* modelo TG256 AS no Laboratório de Conformação do DAMEC/UTFPR/Ponta Grossa.

Após o corte das amostras, no Laboratório de Caracterização dos Materiais do DAMEC/UTFPR/Ponta Grossa foi realizado o lixamento, utilizando uma dupla politriz lixadeira metalográfica *Arotec™*, tendo como objetivo eliminar riscos e marcas presentes na superfície das amostras após sua fabricação.

As superfícies foram lixadas com lixas de carbeto de silício com granulometrias gradativamente menores, rotacionando-as em 90° a cada lixa utilizada. A sequência adotada foi 180, 220, 320, 400 e 600 *mesh*, utilizando a rotação máxima disponível no equipamento durante o tempo necessário para identificar que os riscos gerados pela lixa anterior se extinguíram. Finalizado o lixamento, as amostras foram limpas com água e depois álcool etílico, visando deixar a superfície isenta de poeira e traços abrasivos. Essa configuração da amostra foi denominada de *lisa*.

Após realizado esse tratamento foi aplicado em uma das amostras uma camada de verniz *Mundial Prime™*, Tinta Spray Verniz - Uso Geral, gerando uma superfície hidrofóbica. Essa amostra foi denominada de *envernizada*.

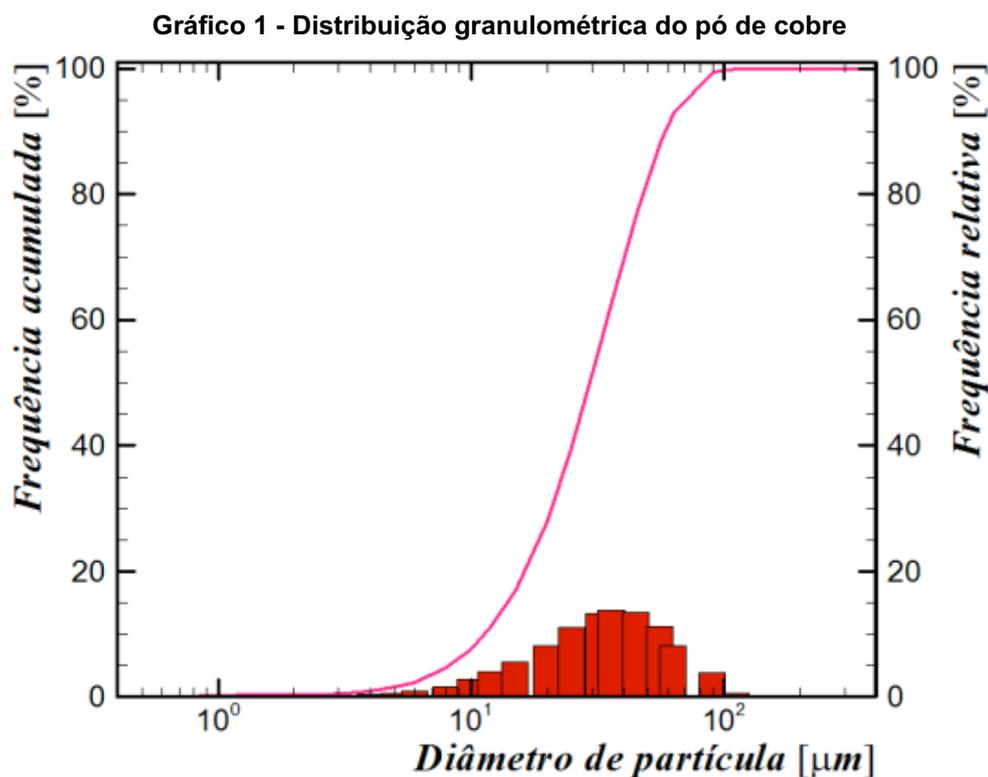
Uma terceira amostra, denominada de *sinterizada*, recebeu uma camada sinterizada de pó de cobre em sua superfície, para a obtenção de uma superfície porosa. O processo de sinterização ocorreu no Laboratório de Caracterização de Materiais utilizando um forno tubular horizontal *Inti™ FT-1200*, Fotografia 6. Nesse processo foi utilizado como gás inerte um gás composto por uma mistura de 95% de Argônio e 5% de Hidrogênio para o controle de atmosfera do forno.

Fotografia 6 - Forno de sinterização



Fonte: Autoria própria

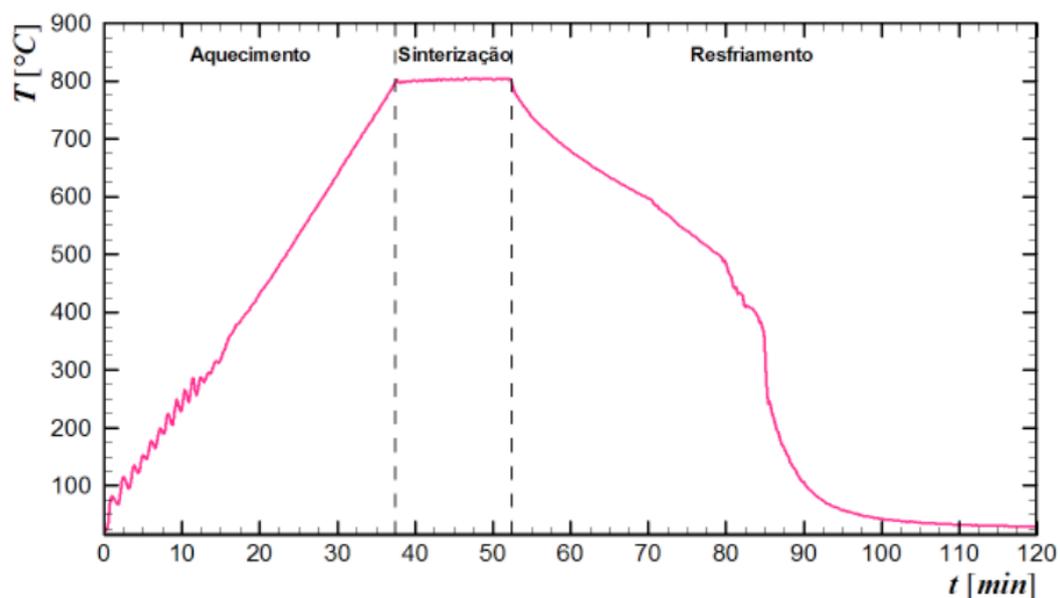
A caracterização do pó de cobre utilizado no processo de sinterização foi realizada por Krambeck (2018). O pó obtido pelo processo de atomização a gás, foi submetido ao processo de distribuição granulométrica a laser, para obter a distribuição do tamanho médio de partícula. A distribuição granulométrica obtida é apresentada no Gráfico 1.



Fonte: Adaptado de Krambeck (2018)

A sinterização de pó de cobre sobre a superfície da amostra foi executada conforme a metodologia descrita em Krambeck (2018), utilizando uma taxa de aquecimento de $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$, seguida de 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 se utilizou de convecção forçada para acelerar o resfriamento do forno e da amostra sinterizada. As temperaturas do processo de sinterização foram obtidas a partir da curva térmica mostrada por Krambeck (2018) e apresentada no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Curva térmica do processo de sinterização



Fonte: Adaptado de Krambeck (2018)

A metodologia do processo de sinterização foi selecionada buscando conferir à camada porosa da amostra, características semelhantes às obtidas por Krambeck (2018), que obteve através de métodos experimentais a porosidade, a permeabilidade, a medida de raio crítico e o valor da condutividade térmica das amostras estudadas e obteve para cada propriedade, os valores apresentados na tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades do material sinterizado

Propriedade	Unidades	Valor
Porosidade média	%	55,03
Permeabilidade Média	m^2	$7,81 \cdot 10^{-13} \pm 0,38 \cdot 10^{-13}$
Raio crítico médio	μm	$6,57 \pm 0,22$
Condutividade térmica média	W/mK	15,13

Fonte: Adaptado de Krambeck (2018)

3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental, baseado em Biglia (2018), foi realizado de acordo com as etapas a seguir:

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 quase-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 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 11V;
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 *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 *frost*.

A temperatura do ambiente foi medida por meio de termopares do tipo K (cobre-constantan, *Omega Engineering*TM), com fios de 0,254mm de diâmetro cobertos por *Teflon*TM (*Omega Engineering*TM), fixados através de uma fita adesiva termosensível (*Kapton*TM). As pontas dos fios dos termopares foram soldadas no Laboratório de Controle Térmico. A temperatura da superfície fria e da superfície da camada de *frost* foi medida através de um termômetro infravermelho *Minipa*TM MT-330.

Para obtenção dos dados (valores de temperatura) foi utilizado o sistema de aquisição de dados com 20 canais e um *notebook*, exibidos na Fotografia 7. Os dados foram gravados através do *software Keysight*TM *Benchlink Data Logger 3*.

Fotografia 7 - Sistema de aquisição de dados

Fonte: Autoria própria

A umidade relativa do ar foi medida por meio do Sensor de Umidade *DHT22* (*AM2302*), possuindo saída digital calibrada e encapsulamento simples com quatro terminais, como visto na Fotografia 8. Esse sensor possui resolução de 0,1%.

Fotografia 8 - Sensor de umidade DHT

Fonte: Autoria própria

O sensor de umidade e os termopares para aquisição da temperatura ambiente foram posicionados próximos à admissão de ar da sessão de testes para a aquisição dos parâmetros do ar que escoam sobre a superfície estudada.

A medição da espessura da camada de *frost* foi realizada por meio de uma câmera fotográfica *Canon™ EOS Rebel T6*, apoiada com o auxílio de um tripé *Polaroid™* e posicionada de modo a se obter uma fotografia da espessura das amostras.

Como mencionado anteriormente, após a obtenção das imagens digitais, a espessura de *frost* foi obtida por meio do tratamento dessas imagens no *software ImageJ*®, obtendo-se uma escala a partir da foto no tempo 0, tendo como referência a chapa com 2mm de espessura e utilizando essa mesma escala nas demais imagens.

3.4 ANÁLISE DE INCERTEZAS

As incertezas de medição estão associadas aos instrumentos e métodos de medição utilizados para cada grandeza medida (ISMAIL, 2000).

A espessura da camada de *frost* foi calculada através do tratamento das imagens obtidas pela câmera *Canon™ EOS Rebel T6*, utilizando o *software ImageJ*®. As imagens digitais obtidas têm resolução de 18MP, possuindo 3.456 pixels de altura. Através da imagem digital da amostra no início dos testes foi criada uma escala utilizando a espessura de 2mm como referência e a incerteza de medição é diretamente relacionada a essa escala. Nesse caso, a incerteza foi de $\pm 0,168\text{mm}$.

A temperatura da superfície da camada de *frost* e da superfície fria foi medida através do termômetro *Minipa™ MT-330*. De acordo com o fabricante, para a temperatura da superfície fria o equipamento possui uma precisão de $\pm 3,0^\circ\text{C}$. Para as temperaturas da superfície da camada de *frost*, o equipamento possui uma precisão média de $\pm 2,5^\circ\text{C}$. A temperatura do ambiente foi medida através de termopares do tipo K (cobre-constantan, *Omega Engineering™*) que tiveram a incerteza calculada através da calibração com o *Calibrador Multical™ 2500* obtendo a precisão de $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

A velocidade do ar foi controlada através do aparato experimental e validada com medições realizada com um *Anemômetro Digital Portátil ITAN™ 720*, cuja precisão informada pelo fabricante é de $\pm 0,2\text{m/s}$ acrescentados de 3% do valor medido pelo equipamento, portanto a incerteza da medição realizada foi de $\pm 0,215\text{m/s}$.

A incerteza do sensor de Umidade *DHT22 (AM2302)*, utilizado para o controle de umidade do ambiente durante os testes, é de $\pm 0,5\%$ de acordo com as informações fornecidas pelo fabricante.

Todas as medições experimentais foram realizadas utilizando os métodos e instrumentos descritos, portanto as incertezas experimentais apresentadas na Tabela 2 são aplicadas a todos os valores de medição presentes nesse Trabalho de Conclusão de Curso.

Tabela 2 - Incertezas de medição

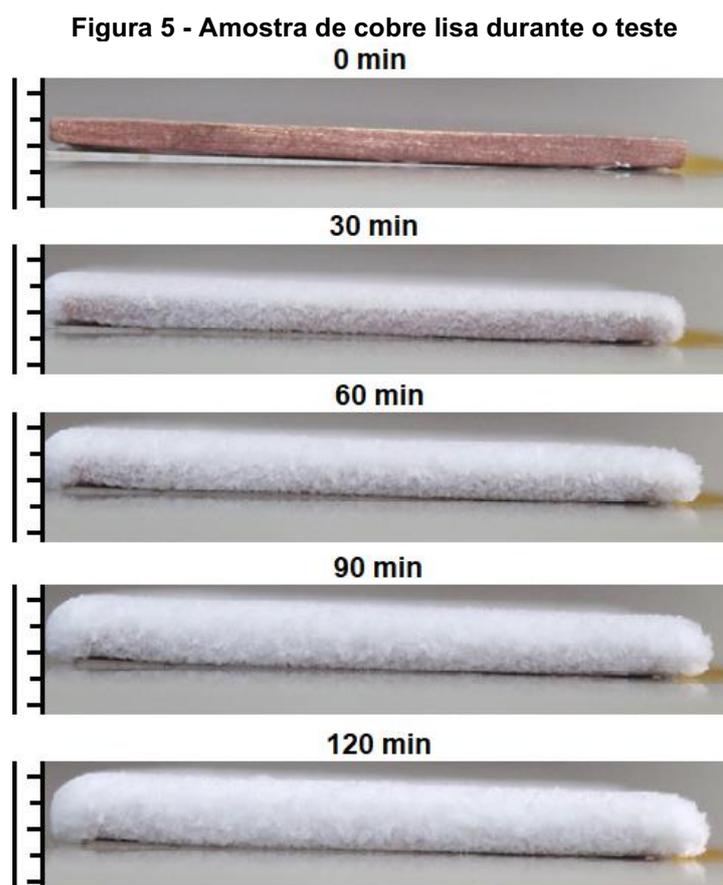
Parâmetros	Unidades	Incerteza
Espessura da camada de <i>frost</i>	mm	$\pm 0,168$
Temperatura ambiente	°C	$\pm 0,5$
Temperatura da superfície fria	°C	$\pm 3,0$
Temperatura da superfície de <i>frost</i>	°C	$\pm 2,5$
Umidade relativa do ar	%	$\pm 0,5$
Velocidade do ar	m/s	$\pm 0,215$

Fonte: Aatoria Própria

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos durante os testes experimentais de formação de *frost* nas três amostras estudadas, placa plana com superfície *lisa*, placa plana com superfície *envernizada* e placa plana com superfície porosa *sinterizada* obtida por meio da sinterização de pó de cobre. Os dados experimentais foram medidos a cada 10 minutos, em testes que tiveram duração de 120 minutos cada.

A Figura 5 mostra as imagens obtidas para o crescimento da camada *frost* sobre a placa plana sem revestimento (superfície lisa), no início do teste e a cada 30 minutos após o início do teste.



Fonte: Autoria Própria

A temperatura e umidade do ambiente foram mantidas estáveis através da utilização de um sistema de ar condicionado *Rheem™* de 36.000 BTU/h mantido em

pleno funcionamento durante a realização dos testes. Foram selecionados os resultados dos testes que apresentaram maior semelhança entre os parâmetros ambientais obtidos cujos valores são apresentados na Tabela 3. Buscou-se utilizar parâmetros ambientais semelhantes entre os testes, de forma que os resultados fossem influenciados apenas pela diferença do revestimento superficial de cada amostra.

Tabela 3 - Parâmetros ambientais utilizados nos testes experimentais

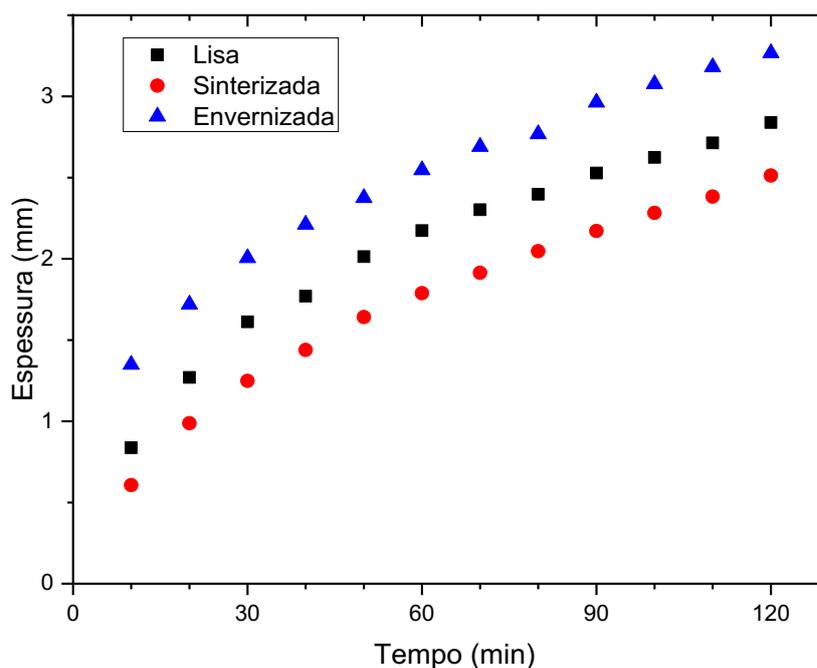
Parâmetros	Unidade	Valores		
		Lisa	Envernizada	Sinterizada
Temperatura ambiente	°C	18,6	17,3	19,5
Temperatura da superfície fria	°C	-20	-20	-20
Umidade relativa do ar	%	50,46	48,10	50,4
Velocidade do ar	m/s	0,5	0,5	0,5

Fonte: Autoria Própria

4.1 ESPESSURA DA CAMADA DE FROST

O Gráfico 3 apresenta os resultados experimentais obtidos em cada amostra estudada para a espessura da camada de *frost* em função do tempo.

Gráfico 3 - Espessura da camada de *frost*



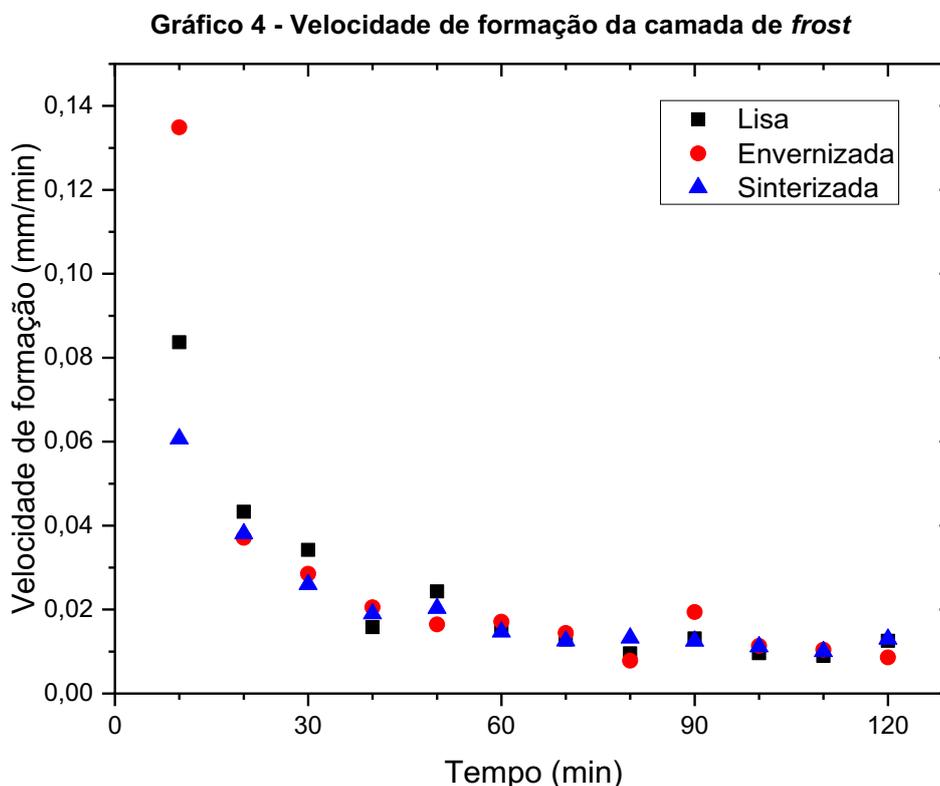
Fonte: Autoria Própria

O crescimento da espessura da camada de *frost* sobre as amostras apresentou comportamentos semelhantes para todas as amostras, porém a placa com superfície envernizada obteve os maiores valores absolutos para a medição da espessura de gelo. O comportamento da espessura formada sobre as placas plana lisa e sinterizada se mostrou condizente com os resultados encontrados na literatura, a curva formada pelos dados possui o mesmo formato dos resultados encontrados por Biglia (2018).

A espessura da camada de *frost* formada sobre a placa com superfície sinterizada se manteve a menor durante toda a realização dos testes experimentais, sendo que, nos 10 minutos iniciais a espessura da camada de *frost* formada sobre a placa sinterizada corresponde a menos de 50% da espessura da camada de *frost* formada sobre a amostra com superfície envernizada.

4.2 VELOCIDADE DE DEPOSIÇÃO

Os resultados da análise da velocidade de formação da camada de *frost*, sobre a superfície das amostras, velocidade de deposição em função do tempo, são apresentados no Gráfico 4, para as três amostras estudadas.

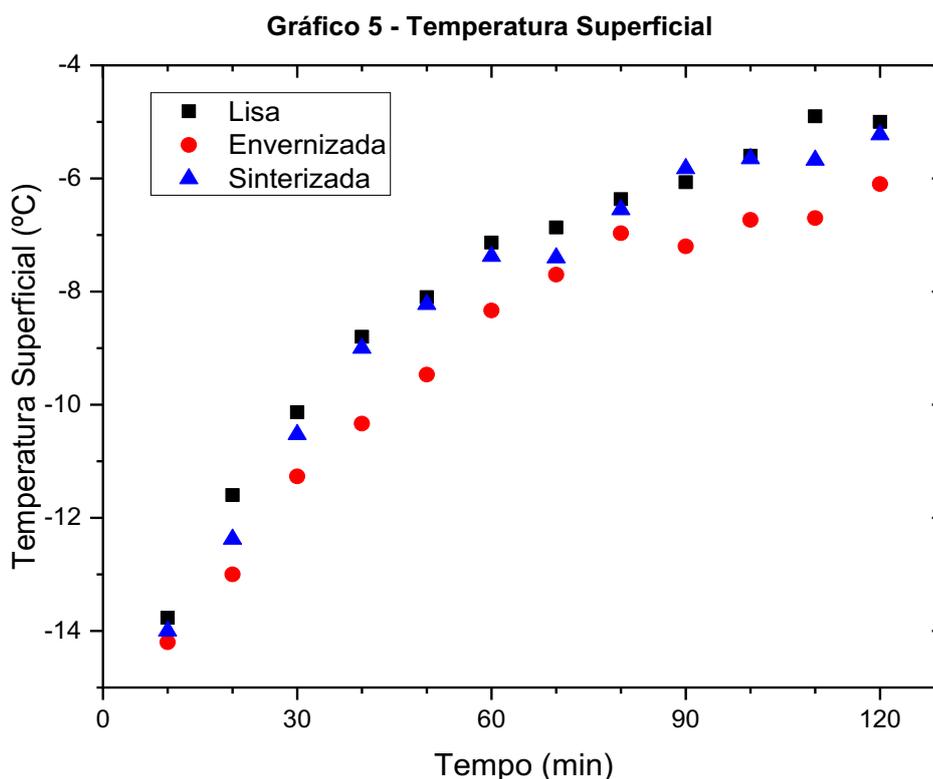


Fonte: Autoria Própria

A amostra envernizada apresentou inicialmente a maior velocidade de formação de *frost* sobre sua superfície. Após os 10 minutos iniciais as amostras apresentaram valores de velocidade de deposição de *frost* muito próximos e com tendência a se aproximar de zero. Esse comportamento da velocidade de formação de *frost* condiz com o apresentado nas amostras de cobre, latão e alumínio encontrado por Biglia (2018).

4.3 TEMPERATURA SUPERFICIAL

A temperatura superficial das amostras foi medida a cada intervalo de 10 minutos após o início do teste. O comportamento dessa temperatura em função do tempo para as amostras em questão está apresentado no Gráfico 5.



Fonte: Autoria Própria

As três amostras estudadas apresentaram comportamentos semelhantes aos resultados obtidos por Biglia (2018). As amostras sem tratamento de superfície e com a superfície envernizada apresentaram resultados semelhantes, enquanto a amostra com a superfície porosa obtida por meio da sinterização de uma camada de pó de

cobre sobre a placa plana apresentou uma temperatura superficial maior que as demais amostras desse estudo experimental.

Neste contexto, pode ser notado que o acabamento superficial poroso sinterizado, confere à terceira amostra estudada diferentes características, reduzindo a espessura da camada de *frost* e a sua velocidade de deposição sobre sua superfície, enquanto mantém um comportamento semelhante às demais amostras estudadas. Por outro lado, a temperatura da superfície da amostra com o revestimento sinterizado se manteve maior que a temperatura da superfície das demais amostras, em todos os intervalos de coleta de dados dos testes experimentais realizados.

5 CONCLUSÃO

Esse Trabalho de Conclusão de Curso apresenta uma análise experimental da formação de *frost* em superfícies frias com diferentes revestimentos. A formação de *frost* em superfícies de equipamentos pode reduzir a eficiência de equipamentos de refrigeração, trocadores de calor e outros equipamentos industriais.

Diversos estudos analisam meios de se reduzir a formação de *frost* em superfícies frias. Wang *et al.* (2004), Tudor e Ohadi (2006) e Zhang *et al.* (2016) analisam a influência de campos elétricos na velocidade de formação de *frost* sobre as superfícies frias. Liu *et al.* (2006), Kim *et al.* (2016) e Biglia *et al.* (2022) estudaram como o revestimento da superfície fria com diferentes materiais afetam o desenvolvimento da camada de *frost* sobre a superfície.

Utilizando o aparato experimental e metodologia baseados em Biglia (2018), nesse trabalho foi executada uma análise experimental da formação de *frost* em uma placa plana de cobre sem tratamento superficial (lisa), em uma placa plana de cobre com sua superfície envernizada e em uma placa plana de cobre com superfície porosa, obtida por meio da sinterização de uma camada de pó de cobre em sua superfície.

Os resultados experimentais obtidos para a espessura da camada de *frost*, velocidade de formação da camada de *frost* e temperatura superficial da amostra, apresentam comportamentos semelhantes aos encontrados na literatura.

Dentre as amostras estudadas, a amostra com a superfície porosa, obtida por meio da sinterização de uma camada de pó de cobre apresentou a menor espessura da camada de *frost* formada em sua superfície reduzindo em aproximadamente 23,1% a espessura final da camada de *frost* em relação à placa com a superfície envernizada.

A velocidade de deposição de *frost* sobre a superfície da amostra com superfície sinterizada foi a menor obtida no estudo e se mostrou equivalente a cerca de 45% da velocidade de formação da camada de *frost* sobre a placa com superfície envernizada.

A placa plana com revestimento de pó de cobre sinterizado também apresentou a maior temperatura superficial, dentre as amostras estudadas, demonstrando ser uma alternativa para a redução da formação de *frost* sobre uma superfície fria.

Os resultados da amostra com superfície porosa complementam os presentes na literatura, podendo auxiliar em novas pesquisas sobre o tema e abrindo espaço para novas pesquisas como a avaliação da formação de *frost* em superfícies porosas obtidas através da sinterização de pó de cobre com diferentes granulometrias.

REFERÊNCIAS

BIGLIA, F. M. **Análise Numérico-experimental da Minimização da Formação de Gelo Poroso em Placas Planas**. 2018, 111 f., Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

BIGLIA, F. M. *et al.* Formação de gelo poroso em placas planas com diferentes acabamentos superficiais. **Engenharia no Século XXI - Volume 14**, 1ed. Belo Horizonte, MG: Editora Poisson, v. 14, p. 99-107, 2020a.

BIGLIA, F. M. *et al.* Improving the Thermal Efficiency and Performance of Refrigeration Systems: Numerical-Experimental Analysis of Minimization of Frost Formation. **Energy Engineering**, Tech Science Press, DOI: 10.32604/ee.2022.019625, 2022.

BIGLIA, F. M. *et al.* Investigação experimental da deposição de gelo poroso em placas planas de distintos materiais de base. **Engenharia no Século XXI - Volume 9**, 1ed. Belo Horizonte, MG: Editora Poisson, v. 9, p. 115-122, 2019.

BIGLIA, F. M. *et al.* Investigação Experimental da Minimização da Formação de *Frost* em Superfícies Planas de Aço Inoxidável com Revestimentos Hidrofóbicos. **REVISTA DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA**, v. 12, p. 42-49, 2020b.

CHENG, C.; SEKI, N. **Freezing and Melting Heat Transfer in Engineering: Selected topics on Ice-Water Systems and Welding and Casting Processes**. 1 ed. New York: CRC Press, 815 f., 1991.

ISMAIL, K. ISMAIL, K. A. R. **Técnicas Experimentais em Fenômenos de Transferência**. 1 ed. Campinas, SP, 2000.

KIM, H. *et al.* Microscopic observation of frost behaviors at the early stage of frost formation on hydrophobic surfaces. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, South Korea, n. 97, p. 861-867, 2016.

KOBAYASHI, T. On the habit of snow crystals artificially produced at low pressures. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, Japan, v. 36, p. 193-208, 1958.

KRAMBECK, L. **Estudo Experimental do Desempenho Térmico de Estruturas Capilares de Pó de Cobre Sinterizado em Tubos de Calor**. 2018, 163 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

LIU, Z. *et al.* An experimental study on minimizing frost deposition on a cold surface under natural convection conditions by use of a novel anti-frosting paint. part I. anti-frosting performance and comparison with the uncoated metallic surface. **International Journal of Refrigeration**, Beijing, China, n. 29, p. 229-236, 2006.

LIU, Z. *et al.* Influences of surface hydrophilicity on frost formation on a vertical cold plate under natural convection conditions. **Experimental Thermal and Fluid Science**, Beijing, China, n. 31, p. 789-794, 2007.

MALDONADO, P. A. D. *et al.* Experimental and numerical study of frost formation with natural convection in a triangular arrangement of slender vertical tubes. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 27, p. 101138, 2022.

MORAN, M. J. *et al.* **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. 7 th. Edition. Chichester: John Wiley, 2010.

PIUCCO, R. O. **Análise Teórico-experimental Da Formação De Geada Em Refrigeradores Domésticos**. 124f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2008.

PIXABAY. Licença CC0 Public Domain. Disponível em <<https://www.pexels.com/pt-br/foto/abstrato-resumo-abstrair-artico-326240/>>. Acesso em 02 de julho de 2022.

SCALON, V. L. **Formação de Gelo em Torno de Cilindros Verticais**. 101f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993.

SILVA, D. L. **Análise da formação de gelo e geada e seu efeito no desempenho termo hidráulico de evaporadores do tipo tubo**. 198f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, SC, 2012.

SILVA, R. C. R. **Estudo Experimental e Numérico da Formação de Frost em torno de três Cilindros com Arranjo Triangular**. 112f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

TUDOR, V.; OHADI, M. The effect of stationary and sweeping frequency ac electric fields on frost crystal removal on a cold plate. **International Journal of Refrigeration**, USA, n. 29, p. 669-667, 2006.

WANG, C. *et al.* Some observations of the frost formation in free convection: with and without the presence of electric field. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Taiwan, v. 47, p. 3491-3505, 2004.

WANG, F. *et al.* Research of anti-frosting technology in refrigeration and air conditioning fields: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 81, p. 707-722, 2018.

ZAFRA E. **Dois cubos de gelo**. Licença CC0 Public Domain. Disponível em: <<https://www.pexels.com/pt-br/foto/dois-cubos-de-gelo-3675620/>>. Acesso em 01 de Julho de 2022.

ZHANG, X.; LI, X.; CHEN, M. Role of the electric double layer in the ice nucleation of water droplets under an electric field. **Atmospheric Research**, China, n. 178, p. 150-154, 2016.