



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Vitor Alexandre Massochin

**Um estudo experimental dos efeitos da agitação e pressão no congelamento
unidirecional da água**

Florianópolis
2025

Vitor Alexandre Massochin

**Um estudo experimental dos efeitos da agitação e pressão no congelamento
unidirecional da água**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao
curso de Engenharia Mecânica do Centro
Tecnológico da Universidade Federal de Santa
Catarina como requisito parcial para a obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Joel Boeng, Dr. Eng.

Florianópolis

2025

Massochin, Vitor Alexandre

Um estudo experimental dos efeitos da agitação e pressão no congelamento unidirecional da água / Vitor Alexandre Massochin ; orientador, Joel Boeng, 2025.

94 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

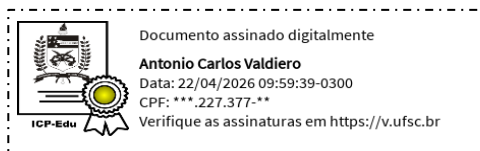
1. Engenharia Mecânica. 2. gelo transparente congelamento unidirecional; agitação magnética; vácuo. 3. congelamento unidirecional. 4. agitação magnética. 5. vácuo. I. Boeng, Joel. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Vitor Alexandre Massochin

Um estudo experimental dos efeitos da agitação e pressão no congelamento unidirecional da água

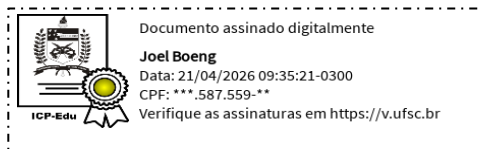
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Mecânico e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Mecânica

Florianópolis, 15 de julho de 2025



Prof. Antonio Carlos Valdiero, Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Banca examinadora



Prof. Joel Boeng, Dr. Eng.
Orientador

Prof. Saulo Güths, Dr. Eng.
UFSC

Marcus Vinícius Pedron Carneiro, Dr. Eng.
UFSC

Florianópolis, 2025

A meus pais, com amor e gratidão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família por todo o suporte e amor entregues a mim durante toda minha vida. Seu apoio foi fundamental para realização da minha graduação.

Ao meu orientador, Prof. Joel Boeng, pelo entusiasmo e engajamento durante sua orientação deste trabalho. Sou igualmente grato pelos conhecimentos transmitidos enquanto engenheiro pesquisador, durante o período em que tive a oportunidade trabalhar consigo como bolsista de iniciação científica.

Ao Me. Eng. Teo Balconi pela sua colaboração durante a execução do trabalho, cujo desenvolvimento foi fortemente beneficiado por seu apoio técnico. Também, pela boa convivência no laboratório durante o período em que ele foi realizado.

À minha namorada Gabriela, pela companhia nas idas ao laboratório nos finais de semana e pelas conversas inspiradoras.

Aos meus amigos de longa data, Augusto, Guilherme, Lucas e Mateus pelo companheirismo na Universidade e especialmente ao meu amigo Bruno, que me acompanhou em quase todos os períodos durante a graduação em Engenharia Mecânica em diversas atividades.

Ao Prof. Saulo Güths que disponibilizou a infraestrutura do Labtermo para a realização deste trabalho.

A todos que contribuíram de alguma forma para tornar esse trabalho possível, ainda que não os tenha citado diretamente.

RESUMO

Este trabalho apresenta o projeto e a construção de uma bancada experimental desenvolvida para a produção de gelo transparente, com o objetivo de investigar variáveis operacionais que influenciam sua transparência, sob condições de congelamento unidirecional. A motivação do estudo decorre do crescente interesse comercial por gelos com alta qualidade visual, especialmente em setores como a indústria de bebidas, o que demanda processos eficientes que conciliem produtividade e aspecto visual. A bancada experimental permite a medição e o controle precisos do (i) fluxo de calor entre 1000 W/m^2 e 400 W/m^2 , por meio de transdutores de fluxo de calor na base da forma de água/gelo, da (ii) pressão na superfície, via um sistema de redução de pressão, e da (iii) agitação mecânica da água, utilizando um sistema de agitação magnética. Uma metodologia experimental padronizada foi desenvolvida de forma a possibilitar a produção de gelo unidirecionalmente sob diferentes velocidades de congelamento, níveis de agitação inicial e pressões superficiais. Os resultados indicaram que uma melhor qualidade visual do gelo é atingida com a redução da taxa de solidificação e a manutenção de pressões superficiais mais baixas, em torno de 4 kPa. Além disso, observou-se uma diminuição no consumo energético do processo entre 17,9% e 30,5% quando os ensaios foram conduzidos sob condições de baixa pressão na superfície. Tais resultados podem contribuir para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes na produção comercial de gelo transparente.

Palavras-chave: gelo transparente; congelamento unidirecional; agitação magnética; vácuo.

ABSTRACT

This work presents the design and construction of an experimental bench developed to produce clear ice, aiming to investigate operational variables that influence its transparency under unidirectional freezing conditions. The motivation for the study arises from the growing commercial interest in high visual quality ice, especially in sectors such as the beverage industry, which demands efficient processes that balance productivity and visual appeal. The experimental setup enables precise measurement and control of (i) heat flux between 1000 W/m² and 400 W/m², using heat flux sensors at the base of the water/ice mold, (ii) surface pressure, through a pressure reduction system, and (iii) mechanical agitation of the water, using a magnetic stirring system. A standardized experimental methodology was developed to allow the unidirectional freezing of ice under different freezing rates, initial agitation levels, and surface pressures. The results indicated that better visual quality of the ice is achieved by reducing the solidification rate and maintaining lower surface pressures, around 4 kPa. Furthermore, a reduction in energy consumption between 17.9% and 30.5% was observed when the tests were conducted under low surface pressure conditions. These results may contribute to the development of more efficient technologies for the commercial production of clear ice.

Keywords: clear ice; unidirectional freezing; magnetic stirring; vacuum.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Yakhchal na província de Yazd.	19
Figura 1.2 - Colheita de gelo no Spy Pond, Arlington, Massachusetts, 1852.	20
Figura 1.3 - Visão geral dos compressores e tubulações da Champion Ice Manufacturing and Cold Storage Company, em Covington.	21
Figura 1.4 - Aparato para produção de gelo transparente	22
Figura 1.5 - Recurso de produção automática de gelo esférico da marca LG	23
Figura 1.6 - Processo produtivo do gelo na empresa Hundred Weight Ice	23
Figura 1.7 - Solubilidade do ar na água em função da temperatura para diferentes níveis de pressão	24
Figura 2.1 - Modelo de congelamento unidirecional	26
Figura 2.2 - Representação gráfica do circuito térmico	27
Figura 2.3 - Temperaturas na base do sistema em dois instantes do tempo	28
Figura 2.4 - Diagrama de fases da água	29
Figura 2.5 - Energia livre em função do raio do núcleo	31
Figura 2.6 - Nucleação heterogênea de um sólido a partir de um líquido	32
Figura 2.7 - Supersaturação de ar calculada para velocidades de congelamento	34
Figura 2.8 - Esquemático da bolha aderida a superfície do gelo	35
Figura 3.1 - Aparato utilizado para produzir folhas de gelo	36
Figura 3.2 - Formação de bolhas de ar ao longo do arranhão	37
Figura 3.3 - Metamorfismo das bolhas de ar sob condição isotérmica a -10°C	38
Figura 3.4 - Gráfico associando taxas de congelamento e morfologia das bolhas de ar, evidenciadas numa foto de um corte vertical do gelo, com partes ampliadas.	39
Figura 3.5 - Influência de taxa de congelamento na concentração de bolhas no gelo sob diferentes condições de particulado, saturação de ar e prévia cavitação. F	40
Figura 3.6 - Bolhas com diâmetro maior sob condição de baixa pressão	41
Figura 3.7 - Aparato experimental de congelamento e perfil de temperatura computado a uma velocidade de $54\text{ }\mu\text{m/s}$ e gradiente de temperatura de 17°C/mm	41
Figura 3.8 - Fases de crescimento da bolha nucleada na interface sólido-líquido	42
Figura 3.9 - Esquemático do aparato experimental	43
Figura 3.10 - Aspecto visual dos gelos feitos com água: (a) saturada de ar, (b) degaseificada e (c) supersaturada de ar	44

Figura 3.11 - Morfologia das bolhas em função do nível de saturação e velocidade de congelamento.	45
Figura 3.12 - Efeito da aplicação de pressão no crescimento de bolhas colunares.	45
Figura 3.13 - Diâmetro médio das bolhas cilíndricas em função da pressão e da velocidade de crescimento do gelo.	46
Figura 3.14 - Grau de transparência em função da taxa de produção diária para ensaios diferentes ensaios: (NRB) sem agitação, água fervida; (WRB) com agitação; água fervida; (NRT) sem agitação, água da torneira; (WRT) com agitação, água da torneira.	47
Figura 3.15 - Variação do oxigênio dissolvido em função da irradiação ultrassônica ou agitação mecânica num regime de baixa pressão	48
Figura 4.1 - Bancada para produção de gelo	49
Figura 4.2 - Modelagem 3D da seção de testes	50
Figura 4.3 – Modelo 3D da montagem da forma de gelo	51
Figura 4.4 - Forma de gelo montada	52
Figura 4.5 - Conjunto com trocador de calor, unidade termoelétrica e placa de alumínio (com instrumentação).	53
Figura 4.6 - Banho ultratermostático Quimis Q214M2	53
Figura 4.7 - Compressor Embraco FFU80HAK	54
Figura 4.8 - Vista superior do agitador magnético	55
Figura 4.9 - Esquemático da instrumentação	56
Figura 4.10 - Funcionamento do transdutor de fluxo calor a gradiente tangencial	57
Figura 4.11 - Tela principal do programa em LabVIEW	57
Figura 4.12 - Método de determinação do fim do teste	61
Figura 5.1 - Dinâmica de congelamento da bancada construída	62
Figura 5.2 - Tela principal do software Tracker.	63
Figura 5.3 - Velocidade média de congelamento em função da altura da interface sólido-líquido	64
Figura 5.4 - Gráfico de temperatura e fluxo de calor do teste de 400 W/m ² na condição NV	66
Figura 5.5 - Gráfico de temperatura e fluxo de calor do teste de 1000 W/m ² na condição TV	66
Figura 5.6 – Faces laterais dos gelos produzidos nos testes principais..	67
Figura 5.7 - Faces laterais dos testes NV 1000 W/m ²	68

Figura 5.8 - Faces laterais dos testes extras	69
Figura A.1 - Faces do primeiro teste com 1000 W/m ² na condição NV	77
Figura A.2 - Faces do segundo teste com 1000 W/m ² na condição NV	78
Figura A.3 - Faces do terceiro teste com 1000 W/m ² na condição NV	79
Figura A.4 - Faces do teste com 1000 W/m ² na condição PV	80
Figura A.5 - Faces do teste com 1000 W/m ² na condição TV	81
Figura A.6- Faces do teste com 1000 W/m ² com água fervida	82
Figura A.7 - Faces do teste com 700 W/m ² na condição NV	83
Figura A.8 - Faces do teste com 700 W/m ² na condição TV	84
Figura A.9 - Faces do teste com 400 W/m ² na condição NV	85
Figura A.10 - Faces do teste com 400 W/m ² na condição TV	86
Figura B.1 - Gráfico de temperatura e fluxo de calor do primeiro teste de 1000 W/m ² na condição NV	87
Figura B.2 - Gráfico de temperatura e fluxo de calor do segundo teste de 1000 W/m ² na condição NV	87
Figura B.3 - Gráfico de temperatura e fluxo de calor do terceiro teste de 1000 W/m ² na condição NV	88
Figura B.4 - Gráfico de temperatura e fluxo de calor do teste de 1000 W/m ² na condição PV	88
Figura B.5 - Gráfico de temperatura e fluxo de calor do teste de 1000 W/m ² na condição TV	89
Figura B.6 - Gráfico de temperatura e fluxo de calor do teste de 1000 W/m ² com água fervida	89
Figura B.7 - Gráfico de temperatura e fluxo de calor do teste de 700 W/m ² na condição NV	90
Figura B.8 - Gráfico de temperatura e fluxo de calor do teste de 700 W/m ² na condição TV	90
Figura B.9 - Gráfico de temperatura e fluxo de calor do teste de 400 W/m ² na condição NV	91
Figura B.10 - Gráfico de temperatura e fluxo de calor do teste de 400 W/m ² na condição TV	91
Figura C.1 - Gráfico de pressão do teste de 1000 W/m ² na condição PV	92
Figura C.2 - Gráfico de pressão do teste de 1000 W/m ² na condição TV	92
Figura C.3 - Gráfico de pressão do teste de 700 W/m ² na condição TV	93

Figura C.4 - Gráfico de pressão do teste de 400 W/m^2 na condição TV	93
Figura D.1 – Imagem do vídeo do teste NV 1900 W/m^2	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Plano de testes	59
Tabela 5.1 - Tempo de congelamento em horas	64
Tabela 5.2 - Energia total removida em kJ	65
Tabela 5.3 - Análise de repetibilidade de tempo e energia total	69
Tabela 5.4 - Resultados de tempo e temperatura dos testes extras	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

NV	Sem vácuo
PV	Vácuo parcial
PWM	Pulse width modulation
TV	Vácuo total

LISTA DE SÍMBOLOS

T_i	Temperatura do líquido
T_f	Temperatura de solidificação
T_c	Temperatura da base
q''	Fluxo de calor na base
z_{sl}	Posição da interface sólido-líquido
ρ_s	Densidade do sólido
h_{sl}	Calor latente de solidificação
v_{zsl}	Velocidade de avanço da frente de gelo
R''_s	Resistência térmica
k	Condutividade térmica
ΔT	Diferença de temperatura
ΔG_v	Diferença entre as energias livres da fase sólida e fase líquida
γ	Energia livre de superfície
r^*	Raio crítico
ΔG^*	Energia livre de ativação
γ_{SI}	Energia interfacial sólido-superfície
γ_{SL}	Energia interfacial sólido-líquido
γ_{IL}	Energia interfacial líquido-superfície
C	Concentração
C_0	Concentração inicial de ar na água
K	Coeficiente de partição
V	Volume da bolha
ρ_l	Densidade da água
ρ_a	Densidade do ar
d	Diâmetro da área da bolha em contato com o gelo
θ	Ângulo de contato entre a bolha e a superfície
k_h	Constante de Henry
P	Pressão
σ_l	Tensão superficial da água
T_{amb}	Termopar que monitora a temperatura ambiente
T_{hot}	Termopar que monitora a base da forma

T_{cold}	Termopar que monitora o lado frio da unidade termoelétrica
t	Tempo
G	Energia livre de Gibbs
h	Entalpia
s	Entropia
r	Raio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	CONTEXTO HISTÓRICO DA PRODUÇÃO E USO DO GELO	19
1.2	CENÁRIO ATUAL DO MERCADO DE GELOS REFINADOS	21
1.3	DESAFIOS NA PRODUÇÃO DE GELO TRANSPARENTE	24
1.4	OBJETIVOS	25
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	26
2.1	CONGELAMENTO UNIDIRECIONAL	26
2.2	METAESTABILIDADE	29
2.3	MUDANÇA DE FASE	30
2.4	COMPORTAMENTO DAS BOLHAS	32
2.5	REMOÇÃO DE GASES DISSOLVIDOS	35
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	36
4	TRABALHO EXPERIMENTAL	49
4.1	BANCADA DE TESTES	49
4.1.1	– Forma de gelo	50
4.1.2	– Sistema de refrigeração	52
4.1.3	– Sistema de redução de pressão	54
4.1.4	– Sistema de agitação da água	54
4.2	INSTRUMENTAÇÃO	55
4.3	PLANO DE TESTES	58
4.4	METODOLOGIA	59
5	RESULTADOS	62
5.1	DINÂMICA DE CONGELAMENTO	62
5.2	RESULTADOS GERAIS	64
5.3	RESULTADOS VISUAIS	67
5.4	ANÁLISE DE REPETIBILIDADE	68
5.5	RESULTADOS DOS TESTES EXTRAS	69
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
6.1	CONCLUSÕES	71
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	72
	APÊNDICE A – IMAGENS DAS FACES DOS CUBOS DE GELO	77
	APÊNDICE B – GRÁFICOS DE TEMPERATURA E FLUXO DE CALOR	87

APÊNDICE C – GRÁFICOS DE PRESSÃO	92
APÊNDICE D – VÍDEO DA DINÂMICA DE CONGELAMENTO	94

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO HISTÓRICO DA PRODUÇÃO E USO DO GELO

Há muito tempo, o gelo tem desempenhado um papel relevante em diversas atividades humanas, seja na conservação de alimentos, tratamento de enfermidades, em processos industriais ou no consumo associado a bebidas e alimentos. Inicialmente, ele foi extraído de maneira direta de ambientes em que era encontrado naturalmente.

Um dos primeiros registros da coleta e armazenamento para consumo é de cerca de 1700 a.C. na atual região da Síria. O então soberano da região, Zimri-Lim, rei de Mari, ordenou a construção de casas de gelo, para armazenar gelo formado durante o inverno para consumo em períodos em que não era encontrado na natureza (DALLEY, 2002). Outro registro antigo é do Irã, em estruturas denominadas *Yakhchal* (poço de gelo em tradução literal do persa) que eram utilizadas para o mesmo fim (ver Figura 1.1). Elas possuíam características construtivas que objetivavam o não derretimento do gelo, como a cobertura em formato de domo e parte do interior abaixo do nível do solo. Acredita-se que tenham sido construídas desde o século V a.C., com alguns exemplares que ainda sobrevivem (HOSSEINI e NAMAZIAN, 2012). No decorrer da história, muitas outras culturas também consumiram gelo de forma parecida.



Figura 1.1 - Yakhchal na província de Yazd.
Fonte: Wikimedia Commons (2008)

Todavia, no início do século XIX, nos Estados Unidos da América, a dinâmica da relação da sociedade com o consumo do gelo mudaria. Até então, era um bem pouco acessível, limitado àqueles que tinham a disposição suas próprias casas de gelo. No entanto, devido ao seu tamanho reduzido, as casas de gelo não armazenavam gelo suficiente para a conservação de alimentos, portanto seu uso era restrito a outros fins.

Em 1806, Frederic Tudor inicia seu negócio de comercialização de gelo, coletado na região da Nova Inglaterra. Inicialmente vendido na região sul dos Estados Unidos e no Caribe, o gelo extraído por Frederic Tudor de lagos e rios congelados chegou a ser vendido em praticamente todos os continentes do mundo. A Figura 1.2 mostra o processo de colheita de gelo em Massachussets. Ao longo do século XIX, devido a escala industrial desse processo, o gelo passou a ser mais acessível e usado como meio de conservar alimentos em climas quentes. Os impactos não se limitaram a vida doméstica, com o uso de *ice boxes* (caixas isoladas e refrigeradas com uma porção de gelo) para conservação de alimentos em casa, sendo a indústria de alimentos frescos e bebidas também afetada. Regiões distantes dos consumidores, com climas mais adequados à agricultura, passaram a ser viáveis para produção uma vez que os alimentos frescos poderiam ser conservados enquanto eram transportados com a temperatura controlada. Alguns tipos de cervejas, que dependiam de um ambiente frio para serem produzidas, como a *lager*, com a produção antes limitada ao inverno, agora poderia ser produzida o ano todo (REES, 2018).

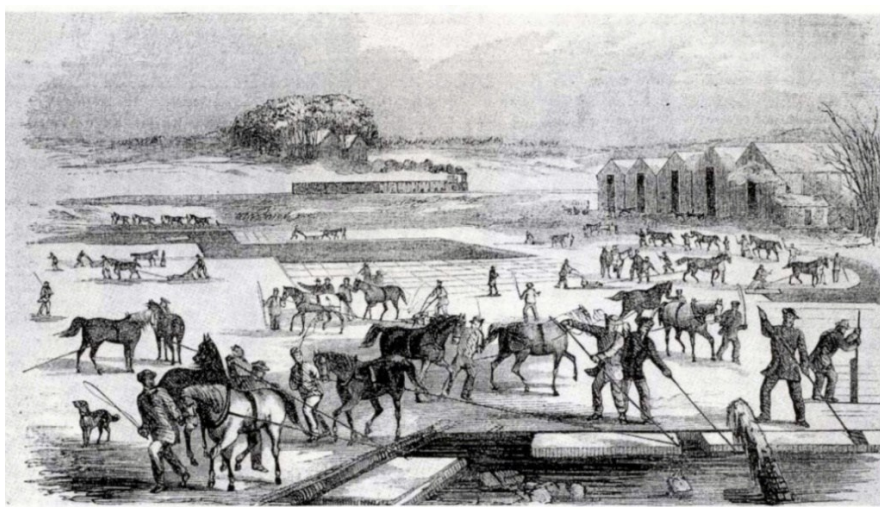


Figura 1.2 - Colheita de gelo no Spy Pond, Arlington, Massachusetts, 1852.
Fonte: Wikimedia Commons (2012)

Posteriormente, com o advento da refrigeração por compressão mecânica, o gelo obtido através da coleta direta da natureza passou a ser substituído por gelo produzido em fábricas a partir do final do século XIX, por razões de qualidade e possibilidade de produção em locais com clima quente. A Figura 1.3 mostra o ambiente fabril de uma fábrica de gelo dessa época:

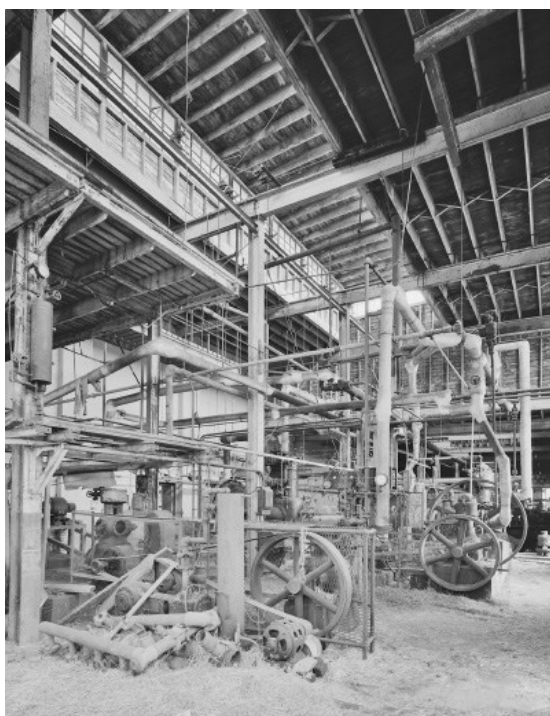


Figura 1.3 - Visão geral dos compressores e tubulações da Champion Ice Manufacturing and Cold Storage Company, em Covington.
Fonte: Rees (2018).

Outro evento que também impactou essa indústria foi a popularização do refrigerador doméstico, a partir da década de 1930 nos Estados Unidos e 1950 na Europa, permitindo a conservação de alimentos sem a necessidade do uso de gelo, além da possibilidade de produzir alguma quantidade de gelo com esse equipamento (WIKIPEDIA, 2025). No ano de 2022, a indústria de gelo movimentou \$5,19 bilhões globalmente, atendendo os setores como alimentação, varejo, saúde e consumo residencial (YAHOO FINANCE, 2023).

1.2 CENÁRIO ATUAL DO MERCADO DE GELOS REFINADOS

À medida que surgem novos conhecimentos, novas tecnologias são criadas e novos produtos entram no mercado. Empresas buscam introduzir produtos que apelem mais ao consumidor do que o seu concorrente, observando os desejos e

necessidades deles. Para o segmento de gelo adicionado a bebidas, aspectos como o som, a textura e a aparência do gelo no copo são relevantes. Esse é um dos resultados de uma pesquisa realizada pela empresa Bosch, em que 54% dos entrevistados afirmaram que essas experiências sensoriais impactam seu consumo de gelo (BOSCH HOME APPLIANCES, 2020). De forma semelhante, uma pesquisa sobre o mercado de *ice makers*, setor que movimentou \$5,4 bilhões em 2025, mostrou que o setor de gelos *gourmet*, entendidos como transparentes e sem odor, despertou um interesse em *ice makers* especializados (RESEARCH AND MARKETS, 2025).

Nessa linha, já existem produtos e empresas que procuram prover gelos mais refinados. As soluções partem de simples aparatos colocados dentro de refrigeradores domésticos e entregam ao final do congelamento um gelo transparente. Por algumas centenas de reais é possível encontrar à venda um exemplar na Internet, como o exemplo da Figura 1.4:



Figura 1.4 - Aparato para produção de gelo transparente
Fonte: Amazon (2024)

Também, existem soluções embutidas em refrigeradores comerciais, como exemplificado por um modelo de geladeira da marca LG, que é capaz de fazer gelo no formato de esferas de maneira automática (ver Figura 1.5). Esse produto é vendido no mercado nacional por cerca de R\$18.000.

Gelo Gourmet

Gelos em formato de esferas que derretem lentamente.



Imagens meramente ilustrativas.

Figura 1.5 - Recurso de produção automática de gelo esférico da marca LG
Fonte: Magazine Luiza (2024)

Para atender a demanda de consumidores que necessitam uma quantidade maior de gelo de alta qualidade, como bares e restaurantes, a empresa Hundred Weight Ice produz gelo transparente na cidade de Nova Iorque. Entre os diversos formatos e tamanhos, são produzidas 4,5 toneladas por dia. Essa larga escala é atingida através de um processo de produção industrial, com maquinário de congelamento personalizado e ferramental de corte, ilustrado na Figura 1.6:



Figura 1.6 - Processo produtivo do gelo na empresa Hundred Weight Ice
Fonte: Eater (2023)

1.3 DESAFIOS NA PRODUÇÃO DE GELO TRANSPARENTE

A transparência do gelo é afetada pela presença de gases ou impurezas residuais no processo de congelamento da água líquida. Água com um baixo nível de impurezas, para essa aplicação, é facilmente encontrada e não se mostra como um grande empecilho para a produção de gelo transparente. Esse não é o caso dos gases residuais. A água em estado líquido carrega consigo uma quantidade de ar atmosférico dissolvido. Apesar de não ser visível a olho nu, pois é uma solução homogênea, é mensurável e tem relação com temperatura e pressão da água, conforme mostra a Figura 1.7:

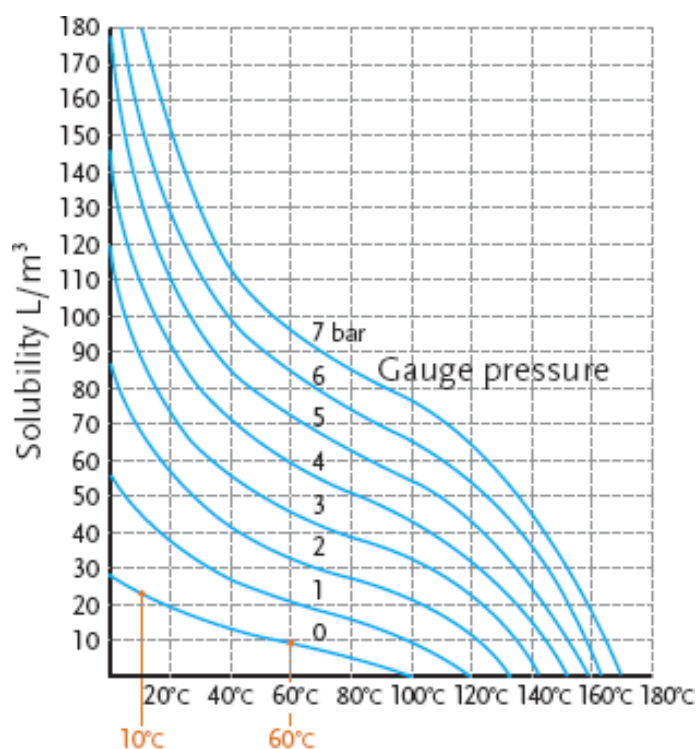


Figura 1.7 - Solubilidade do ar na água em função da temperatura para diferentes níveis de pressão
Fonte: Cibse Journal (2010)

O ar dissolvido na água é praticamente insolúvel no gelo. Durante o congelamento, ocorre a nucleação de uma fase gasosa e o sistema final é composto por duas fases: gelo (sólida) e ar (gasosa).

Uma maneira de contornar essa situação é congelar o gelo a partir de uma única direção, permitindo que o ar se movimente para longe da fase sólida. Esse processo é conhecido como congelamento unidirecional e é adotado, por exemplo, pela forma de silicone e pela empresa Hundred Weight Ice, apresentados anteriormente. Adicionalmente, é necessário que isso seja feito de maneira

extremamente lenta, pois caso contrário, o ar não consegue se afastar da crescente fase sólida e é incorporado ao sistema. Para tornar mais rápida essa movimentação, a empresa Hundred Weight Ice utiliza bombas dentro de seus tanques de congelamento, para forçar movimentação do líquido e consequentemente do ar ali dissolvido.

1.4 OBJETIVOS

Diante da crescente demanda por gelos de maior qualidade, torna-se relevante estudar com mais profundidade o fenômeno de congelamento da água em condições similares às utilizadas atualmente. Os desafios tecnológicos para alcançar essas condições e a escassez de trabalhos que propõem soluções práticas e comercialmente viáveis para produzir gelo transparente reforçam a pertinência do tema.

Nesse contexto, o presente trabalho tem o objetivo de estudar os efeitos de determinados parâmetros operacionais no processo de formação de gelo unidirecional, a fim de produzir gelo mais transparente com uma maior velocidade de congelamento. Para tanto, uma bancada experimental foi projetada e construída para produzir cubos de gelo sob diferentes velocidades de congelamento, de maneira unidirecional e sob diferentes níveis de concentração de ar dissolvido, por meio de agitação magnética e redução da pressão da superfície. Por fim, podem-se enumerar os seguintes objetivos específicos:

- Construir uma bancada experimental para produção de gelo transparente unidirecionalmente.
- Avaliar o impacto no aspecto visual do gelo sob diferentes condições de agitação, pressão na superfície e velocidade de congelamento.

2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONGELAMENTO UNIDIRECIONAL

O congelamento unidirecional de uma porção de água ocorre quando a mudança de fase acontece num plano que se movimenta de maneira perpendicular a um dado eixo. Os primeiros trabalhos analíticos conhecidos sobre o tema de mudança de fase nessas condições foram realizados por Lemé e Clapeyron (1831) e Stefan (1891) (HAHN e ÖZISIK, 2012). Nos anos 1860, Neumann encontrou uma solução exata mais geral de um desses problemas, que foi somente publicada posteriormente por Riemann e Weber (1912).

Na prática, pequenas variações ocorrem durante esse processo, todavia ele pode ser aproximado por um modelo matemático utilizando determinadas condições de contorno. A Figura 2.1 é a representação gráfica desse modelo, onde T_i é a temperatura do líquido, T_f é a temperatura de solidificação, T_c é a temperatura da base, q'' é o fluxo de calor imposto na base e z_{sl} é a posição da interface sólido-líquido no eixo Z .

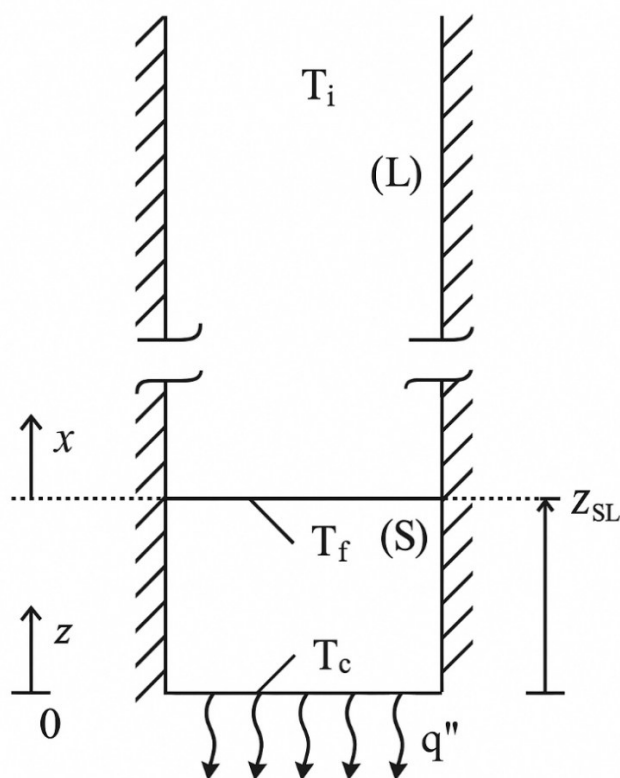


Figura 2.1 - Modelo de congelamento unidirecional
Fonte: adaptado de Melo (2024)

Tal modelo matemático considera que o sistema é infinitamente longo na direção de Z , perfeitamente isolado nas laterais, que a interface sólido-líquido está suficientemente longe da base e que o acúmulo de energia na fase sólida é desprezado.

A partir dessas informações é possível concluir que todo o calor que é retirado pela base é o mesmo que atravessa a interface sólido-líquido. Também, é possível afirmar que esse calor é igual ao responsável pela mudança de fase na interface:

$$\rho_s h_{sl} \frac{dz_{sl}}{dt} = q'' \quad (2.1)$$

onde ρ_s é a densidade do sólido, h_{sl} é o calor latente de solidificação. Reorganizando, fica evidente que numa condição de fluxo de calor constante a velocidade do avanço da interface também é constante:

$$v_{zsl} = \frac{dz_{sl}}{dt} = \frac{q''}{\rho_s h_{sl}} \quad (2.2)$$

A posição da interface é conhecida resolvendo o problema acima, cuja solução é dada por:

$$z_{sl}(t) = \frac{q''}{\rho_s h_{sl}} t \quad (2.3)$$

Adicionalmente, é possível obter informações sobre o comportamento da temperatura da base do sistema analisando sob a ótica de um circuito térmico. A região de interesse parte da base com temperatura T_c , passa pela fase sólida que se comporta como uma resistência térmica R''_s e termina na interface cuja temperatura é conhecida, T_f . A Figura 2.2 representa graficamente esse circuito:

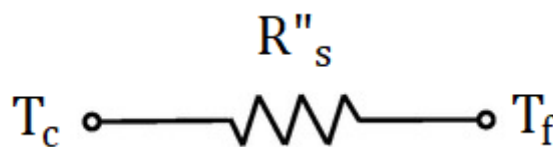


Figura 2.2 - Representação gráfica do circuito térmico

É sabido que os circuitos térmicos são regidos pela seguinte equação:

$$q'' = \frac{\Delta T}{R''_s} \quad (2.4)$$

onde k a condutividade térmica do material e ΔT a diferença de temperatura entre os pontos analisados:

$$R''_s = \frac{z_{sl}}{k} \quad (2.5)$$

Substituindo a equação (2.5) na equação (2.4) e agrupando os termos conhecidos, temos que:

$$T_c(z_{sl}) = \frac{q'' z_{sl}}{k} + T_f \quad (2.6)$$

Nota-se que a temperatura da base tem um comportamento linear, decaindo à medida que interface avança (q'' é negativo), uma vez que todos os demais termos são constantes. A Figura 2.3 demonstra graficamente tal situação em dois instantes do tempo:

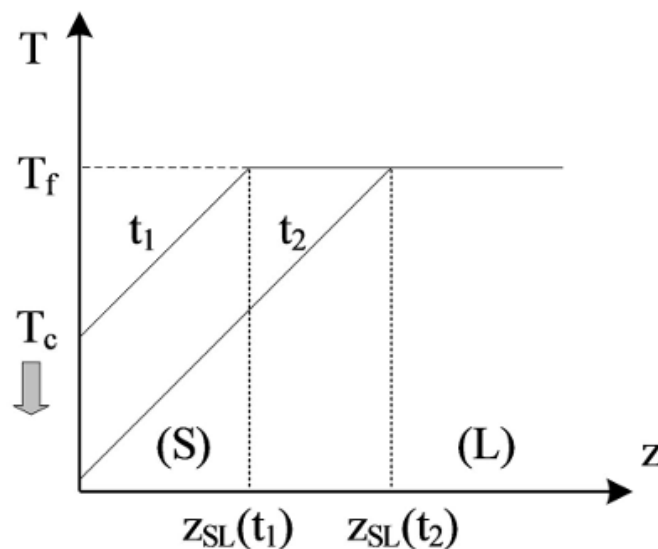


Figura 2.3 - Temperaturas na base do sistema em dois instantes do tempo
Fonte: Melo (2024)

2.2 METAESTABILIDADE

Uma das limitações do modelo exposto na seção anterior é a condição de temperatura constante na interface sólido-líquido. Durante um processo prático de congelamento unidirecional, tal situação acontece durante a maior parte do processo, mas não nos momentos próximos ao início da mudança de fase. No entanto, em determinadas situações, a depender de diversas condições do fluido e do meio, o sistema pode atingir temperaturas abaixo da temperatura de fusão sem que a mudança de fase aconteça. Tal fenômeno é chamado de metaestabilidade. Isso significa que o sistema não está na condição de mínima energia livre para aquela condição termodinâmica, que o permite mudar de fase (CALLISTER e RETHWISCH, 2016). Em outras palavras, nos momentos anteriores ao início da mudança de fase, a temperatura da água líquida é negativa, à pressão atmosférica. A Figura 2.4 mostra as condições de estabilidade da água em função da temperatura e pressão:

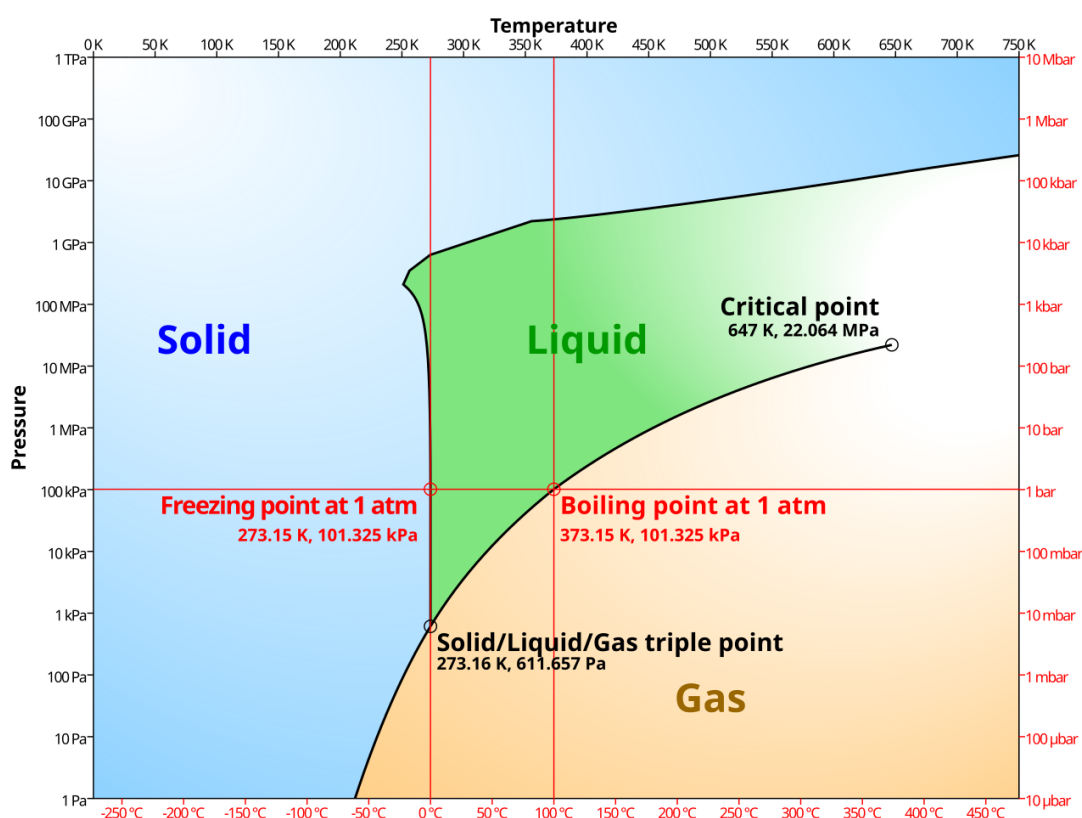


Figura 2.4 - Diagrama de fases da água
Fonte: Wikimedia Commons (2025)

Outra manifestação da metaestabilidade ocorre na concentração de gás dentro de um líquido. A água comumente encontrada em nosso planeta é repleta de

outras substâncias nela dissolvidas. Algumas delas são os gases presentes no ar. Para uma certa quantidade de água, a uma dada temperatura e pressão, existe um limite no qual ar pode ficar dissolvido indefinidamente (ver Figura 1.7). Se por algum motivo o ar dissolvido superar essa quantidade, pode-se dizer que a água está superconcentrada de ar e em regime de metaestabilidade, sujeita a formação de uma nova fase no sistema.

2.3 MUDANÇA DE FASE

O processo de mudança de fase de uma substância é composto por duas etapas: nucleação e crescimento. O parâmetro que governa a nucleação é a energia livre de Gibbs. Tal parâmetro é composto pelas variáveis termodinâmicas da entalpia, temperatura e entropia de um sistema:

$$G = h + Ts \quad (2.7)$$

Em particular, é a variação desse parâmetro que determina se uma mudança de fase é possível, sendo apenas as variações negativas entre reagentes e produtos capazes de a realizar.

Adicionalmente, existem dois tipos de nucleação, a saber: homogênea e heterogênea. A primeira ocorre quando os núcleos surgem no interior do líquido, onde os átomos se encontram formando um arranjo similar ao encontrado na fase sólida e são comumente assumidos como tendo formato esférico com raio r . A segunda ocorre em regiões de heterogeneidade estrutural.

Existem duas parcelas que compõem a energia livre de um núcleo, relacionadas ao seu volume e a sua superfície. A parte volumétrica é composta pela diferença entre as energias livres da fase sólida e fase líquida ΔG_v , multiplicada pelo volume esférico do núcleo. Enquanto a parte superficial está relacionada a energia livre de superfície γ multiplicada pela área da interface:

$$\Delta G = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma \quad (2.8)$$

É bastante didático analisar a equação (2.8) de forma gráfica. A parcela volumétrica, em vermelho, é negativa e decresce a terceira potência de r , enquanto a

parcela superficial, em azul, é positiva e cresce de modo quadrático. O resultado líquido, em verde, é inicialmente positivo e posteriormente negativo, como mostra a Figura 2.5:

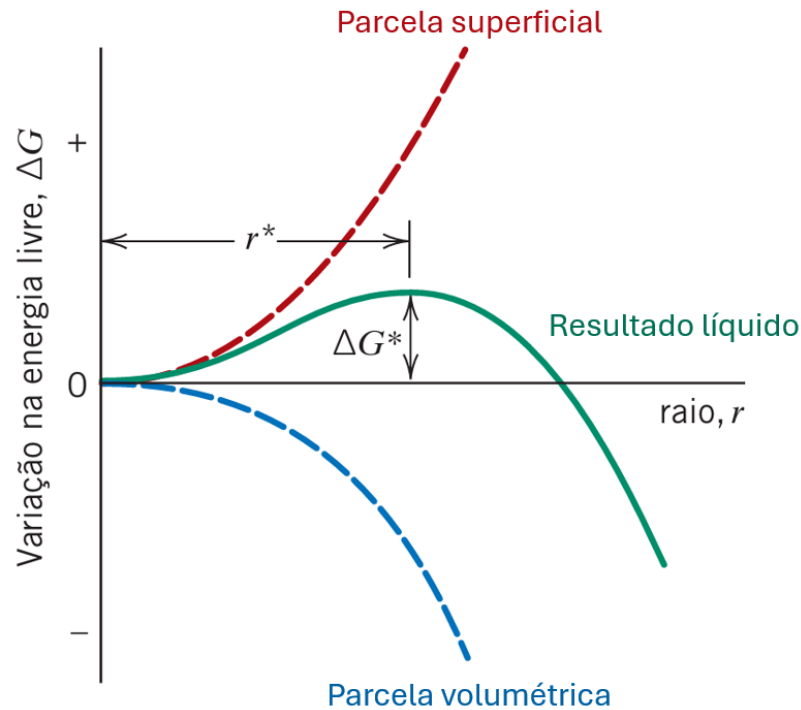


Figura 2.5 - Energia livre em função do raio do núcleo
Fonte: adaptado de Callister e Rethwisch (2016)

Derivando a equação (2.8) é encontrado o ponto onde o crescimento do núcleo formado reduzirá sua energia livre. O raio associado a essa condição é chamado de raio crítico r^* , valor mínimo para formação de um núcleo estável:

$$r^* = \frac{2\gamma}{\Delta G_v} \quad (2.9)$$

Substituindo a equação (2.9) na equação (2.8), podemos obter o ponto relativo à energia livre de ativação ΔG^* , correspondente a energia mínima para formação de um núcleo estável:

$$\Delta G = \frac{16\pi\gamma^3}{3(\Delta G_v)^2} \quad (2.10)$$

Até então, não foram considerados efeitos de contatos com outras superfícies para formação do núcleo, ou seja, referem-se ao caso de nucleação homogênea. Todavia, as nucleações heterogêneas, aquelas que ocorrem na interface com um substrato, têm uma menor energia de ativação, o que significa que são mais propensas a formações de núcleos do que a nucleação homogênea. A Figura 2.6 representa graficamente essa situação:

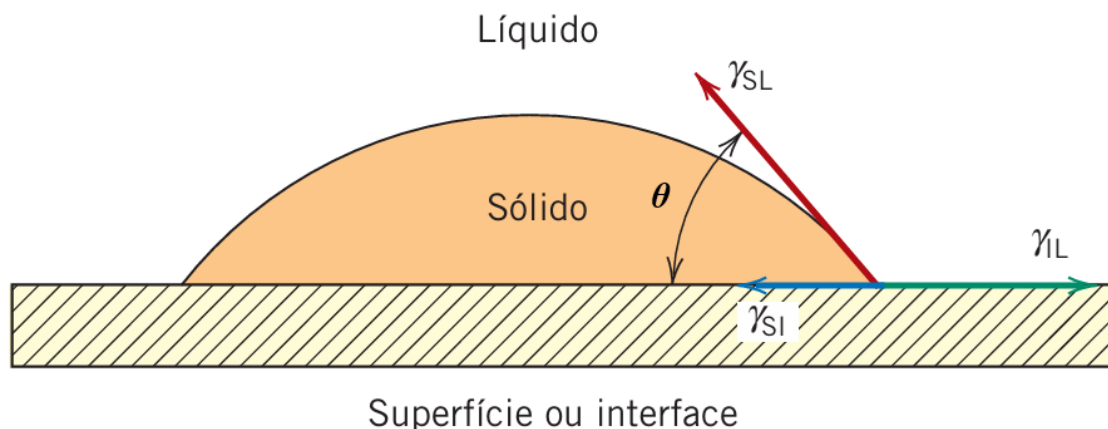


Figura 2.6 - Nucleação heterogênea de um sólido a partir de um líquido
Fonte: adaptado de Callister e Rethwisch (2016)

em que γ_{SI} , γ_{SL} , γ_{IL} , são as energias interfaciais sólido-superfície, sólido-líquido e líquido-superfície, respectivamente e θ é o ângulo de molhamento (ângulo entre γ_{SI} e γ_{SL}). A energia de ativação para esse caso é dada por:

$$\Delta G_v^* = \frac{16\pi\gamma^3}{3(\Delta G_v)^2} S(\theta) \quad (2.11)$$

O termo $S(\theta)$ tem sempre valor entre 0 e 1 e é apenas função da forma do núcleo (θ), ou seja, sempre uma fração do valor do caso homogêneo (CALLISTER e RETHWISCH, 2016). Após a nucleação, o processo de mudança de fase segue no sentido de aumentar a dimensão dos núcleos formados, na fase de crescimento.

2.4 COMPORTAMENTO DAS BOLHAS

Além da energia livre, existem outras variáveis, não explícitas nas equações anteriores, que são mais tecnologicamente convenientes para analisar o processo de mudança de fase. Esse é o caso para concentração de ar num líquido que sofre

congelamento unidirecional. O ar, praticamente insolúvel no gelo, não é incorporado nessa fase e é movido para fase líquida, decrescente ao longo do tempo. Dessa forma, a massa do soluto (ar) permanece constante, enquanto a do solvente (água líquida) diminui. Assim, a concentração C , razão entre esses dois termos, cresce.

Bari e Hallett (1974), inspirados em trabalhos anteriores, descreveram essa situação por meio da solução da seguinte equação diferencial:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + v_{zsl} \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.12)$$

onde D é o coeficiente de difusão do ar na água e x é a posição descrita a partir de um sistema de coordenadas com origem na interface sólido-líquido (Figura 2.1). Sujeitando a equação (2.12) às condições iniciais de $t = 0$ e $C = C_0$, sendo C_0 a concentração inicial de ar na água e K o coeficiente de partição, razão entre as concentrações de ar nas fases sólida e líquida, obtemos:

$$\frac{C}{C_0} = 1 + \frac{1-K}{K} \left\{ \exp \left[-\frac{v_{zsl}}{D} \right] - \exp \left[-\frac{v_{zsl}(1-K)(x + Kv_{zsl}t)}{D} \right] \right\} \quad (2.13)$$

Adicionalmente, para o caso particular localizado na interface ($x = 0$), vale:

$$\frac{C}{C_0} = 1 + \frac{1-K}{K} \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{v_{zsl}^2(1-K)Kt}{D} \right] \right\} \quad (2.14)$$

Já para uma localização longe da interface, após um longo período a concentração é:

$$\frac{C}{C_0} = 1 + \frac{1-K}{K} \exp \left(-\frac{x}{D/v_{zsl}} \right) \quad (2.15)$$

Carte (1961) elaborou um gráfico da equação (2.13), mostrando a supersaturação de ar em função da posição da interface sólido-líquido, para algumas velocidades de congelamento, utilizando $D = 1,1 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ e $K = 0,01$, exposto na Figura 2.7:

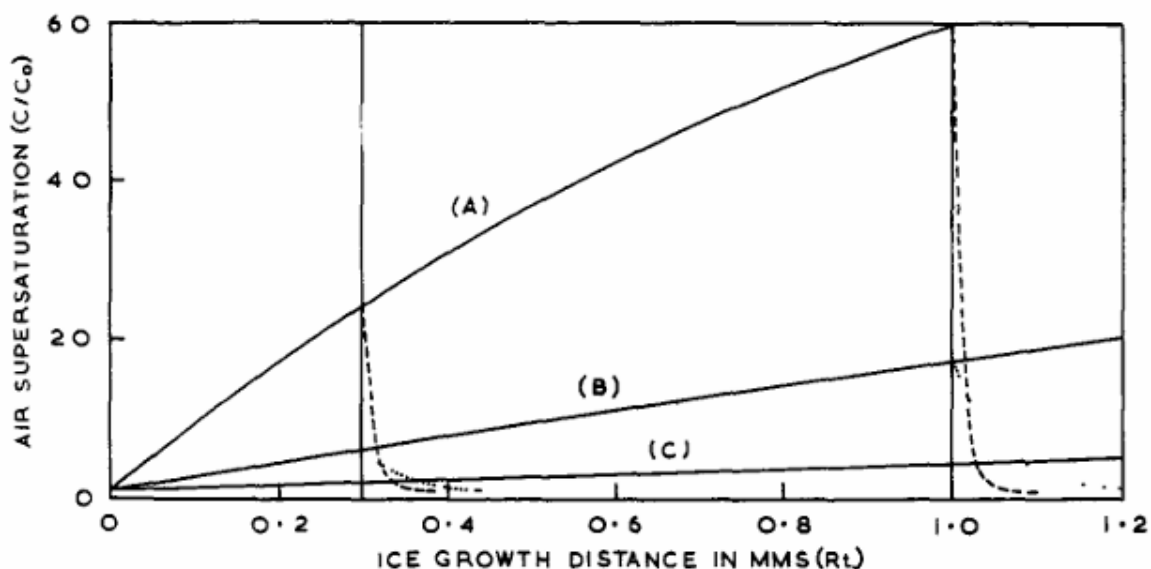


Figura 2.7 - Supersaturação de ar calculada para velocidades de congelamento:
 (a) 6 mm min^{-1} , (b) $1,2 \text{ mm min}^{-1}$, (c) $0,24 \text{ mm min}^{-1}$.
 Fonte: Carte (1961)

As linhas pontilhadas são a concentração de ar para o líquido a frente da interface. É possível perceber que existe superconcentração apenas numa região muito próxima a interface, logo a frente a concentração retorna muito rapidamente ao valor inicial.

Como já discutido anteriormente, a superconcentração é um estado metaestável, ou seja, propício a mudar de fase. Essa afirmação é consistente com os resultados reportados por Carte (1961), que relatou valores de superconcentração entre 12 e 27, antes da nucleação de uma bolha de ar. Após a nucleação, as bolhas funcionavam como um sumidouro local de ar, reduzindo a concentração de ar na região. Esse processo poderia ser repetido, caso o gelo fosse suficientemente grande, dando um caráter periódico ao fenômeno.

Todavia, a incorporação da bolha na estrutura do gelo não é garantida. Maeno (1967) descreveu mecanicamente a situação da bolha aderida a interface sólido-líquido. Segundo o autor, para que a bolha escape da interface é necessário que a força de empuxo atuando nela supere a força adesiva. Satisfazendo a seguinte equação:

$$V (\rho_l - \rho_a) g = \pi d \sigma_l \sin \theta \quad (2.16)$$

Sendo V o volume da bolha, ρ_l e ρ_a as densidades da água e do ar respectivamente, d o diâmetro da área da bolha em contato com o gelo, σ_l a tensão superficial da água e θ o ângulo de contato entre a bolha e a superfície. Um esquemático da situação é exposto na Figura 2.8:

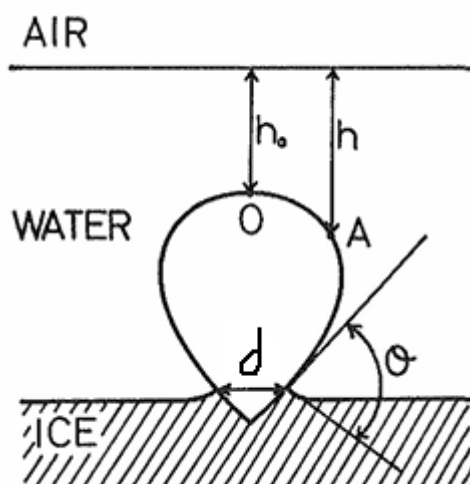


Figura 2.8 - Esquemático da bolha aderida a superfície do gelo
Fonte: adaptado de Maeno (1967)

2.5 REMOÇÃO DE GASES DISSOLVIDOS

A remoção de gases dissolvidos da água, como oxigênio e nitrogênio, pode ser entendida como um processo de desequilíbrio e transferência de massa da fase líquida para a fase gasosa. Esse processo é governado principalmente pela lei de Henry, que estabelece que a concentração de um gás C , em um líquido, em equilíbrio com a fase gasosa, é proporcional à sua pressão parcial P , através da constante de Henry, k , para um dado gás:

$$C = k_h P \quad (2.17)$$

A equação mostra que, ao reduzir a pressão total ou parcial sobre a solução, a concentração de equilíbrio diminui, levando à difusão do gás dissolvido para fora do líquido. Todavia, esse processo pode ser bastante lento, pois é regido pela difusão, quando não perturbado. Todavia com a introdução de agitação mecânica do líquido ou a vibração com ondas ultrassônicas, outros mecanismos agem de modo a aumentar a velocidade desse processo.

Ainda na mesma década, Maeno (1967) analisou com mais detalhe o processo de formação de bolhas de ar durante o congelamento unidirecional de uma quantidade de água. Reiterou a relação entre a supersaturação de ar e o surgimento de bolhas na região próxima à interface sólido-líquido, propondo uma condição para a captura ou o escape da bolha de ar, com base na comparação entre a força adesiva, causada pela tensão superficial, e a força de empuxo (Figura 2.8).

Além disso, o autor verificou que os contornos de grão da fase sólida não atuavam como núcleos para formação de bolhas, todavia quando a superfície do gelo era arranhada, várias bolhas se formavam ao longo do arranhão (Figura 3.2). Na mesma linha, introduziu partículas sólidas na mistura e percebeu que podiam agir como pontos de nucleação, principalmente quando não tratadas química e fisicamente, indicando um papel importante do ar adsorvido a suas superfícies.

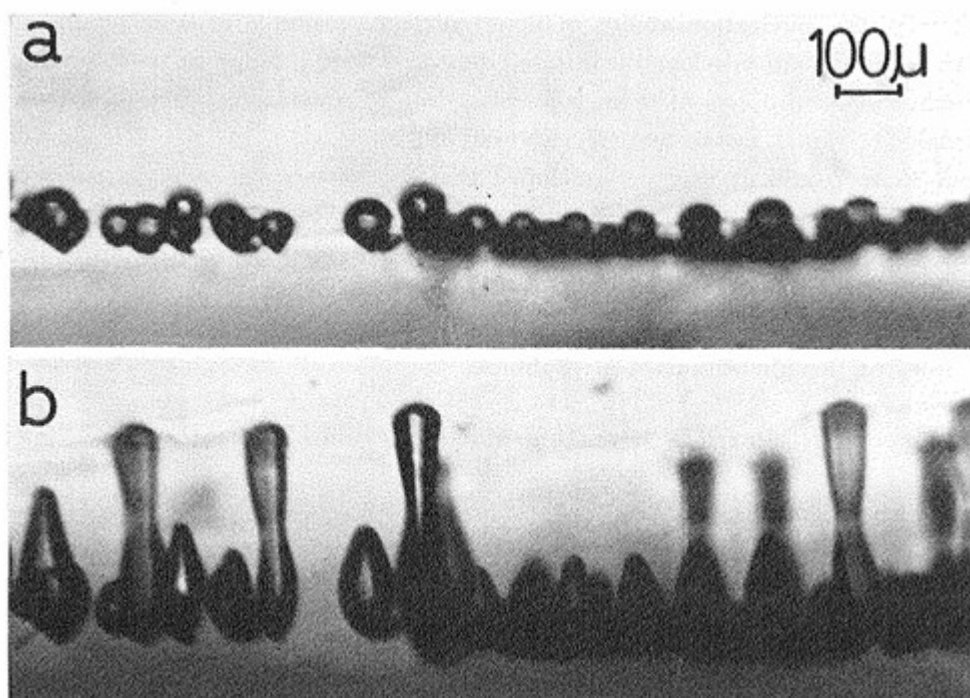


Figura 3.2 - Formação de bolhas de ar ao longo do arranhão na superfície do gelo depois de:
(a) 5 segundos após nucleação, (b) 20 segundos após nucleação.

Fonte: Maeno (1967)

Por fim, o autor descreveu a mudança de forma de bolhas de ar após o congelamento completo da água. Sob condições isotérmicas, de gradiente de temperatura ou sob stress mecânico, bolhas de ar situadas dentro do gelo mudaram de formato após um certo período (Figura 3.3).

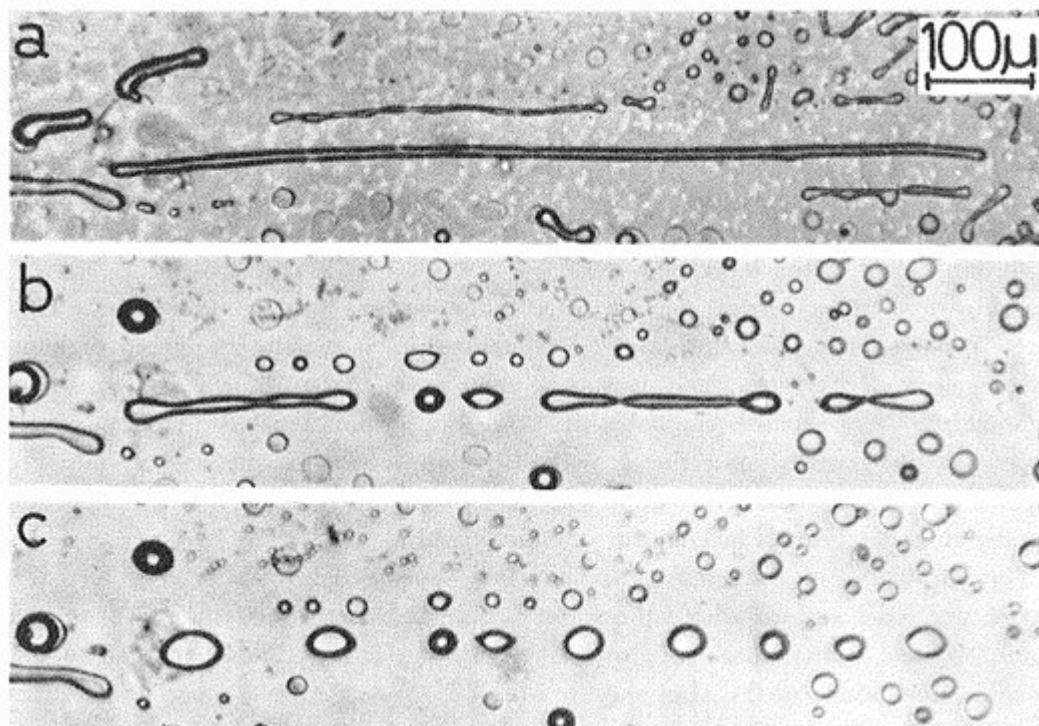


Figura 3.3 - Metamorfismo das bolhas de ar sob condição isotérmica a -10°C após: (a) 0h, (b) 20h, (c) 120h.
Fonte: Maeno (1967)

Em relação a estudos experimentais sobre formação de bolhas durante o congelamento da água, Bari e Hallett (1974) realizaram alguns experimentos de destaque. Num deles, os autores conduziram o congelamento unidirecional de água destilada saturada com ar a 850 mbar e 20°C , em um sistema vertical, prescrevendo uma temperatura na base do sistema. Deste modo, a taxa de congelamento variava ao longo do tempo, diminuindo à medida que a espessura de gelo aumentava. Observou-se que a morfologia das bolhas dependia diretamente dessa taxa: em velocidades superiores a aproximadamente $25\text{ }\mu\text{m/s}$, formaram-se bolhas ovais com a extremidade mais estreita voltada para a interface de crescimento; já em taxas inferiores, surgiram bolhas cilíndricas, com o eixo orientado na direção de solidificação. Em condições ainda mais lentas, próximas de $3\text{ }\mu\text{m/s}$ ou menos, não se observou formação de bolhas, resultando em gelo visualmente transparente (Figura 3.4). Também, verificou-se que as bolhas se organizavam em camadas com espaçamento crescente à medida que a taxa de congelamento diminuía. Esse comportamento indicava um fenômeno periódico de nucleação de bolhas.

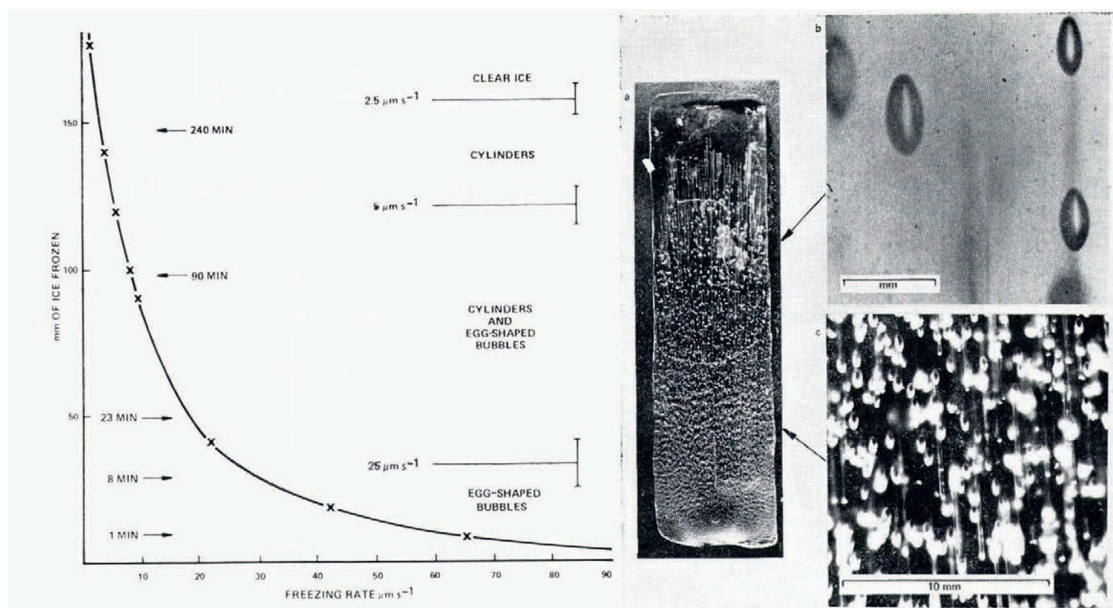


Figura 3.4 - Gráfico associando taxas de congelamento e morfologia das bolhas de ar, evidenciadas numa foto de um corte vertical do gelo, com partes ampliadas.

Fonte: Bari e Hallett (1974)

Noutro experimento, os autores adotaram o método Bridgman (1925), que busca manter uma taxa de congelamento constante. Esse arranjo permitiu avaliar de forma sistemática a influência da velocidade de solidificação e do conteúdo particulado da água sobre a nucleação de bolhas. Os resultados mostraram que, em velocidades inferiores a $1,5 \mu\text{m/s}$, o gelo formado era completamente transparente, sem formação de bolhas visíveis, mesmo em água saturada com ar. Acima desse limiar, a nucleação passou a ocorrer com maior intensidade, sendo altamente sensível à quantidade e ao tipo de partículas presentes no líquido. Ensaios com microesferas de látex com $0,37 \mu\text{m}$ de diâmetro introduzidas no sistema e tratamentos prévios de cavitação ultrassônica elevaram drasticamente a concentração de bolhas, chegando a valores até cem vezes maiores em relação à água destilada (Figura 3.5).

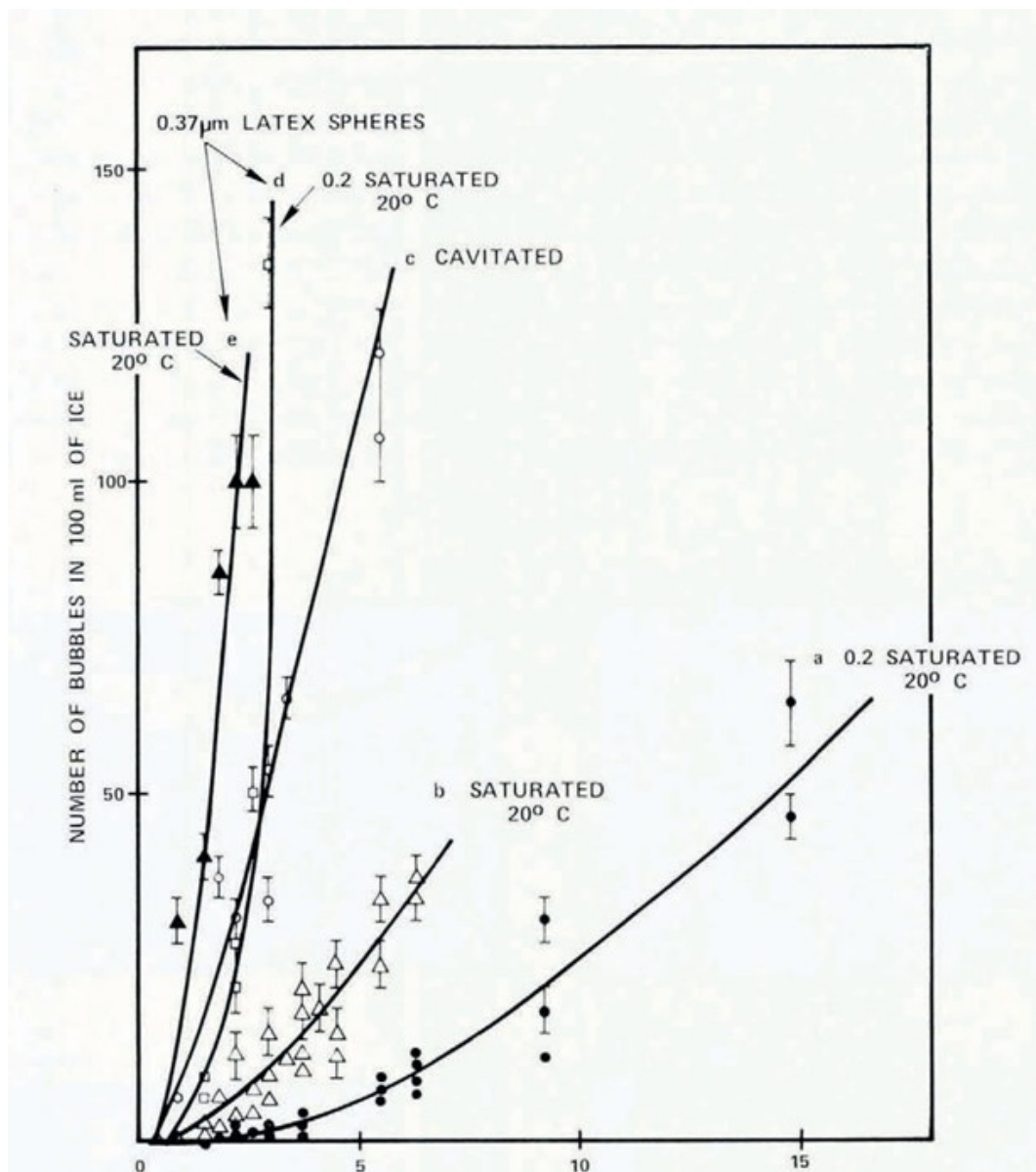


Figura 3.5 - Influência de taxa de congelamento na concentração de bolhas no gelo sob diferentes condições de particulado, saturação de ar e prévia cavitação.

Fonte: Bari e Hallett (1974)

Adicionalmente, os autores conduziram alguns experimentos num regime de baixa pressão e observaram uma mudança na morfologia das bolhas, cujos diâmetros cresceram a um fator de dez até 2-3 mm, enquanto a concentração não se alterou. Na Figura 3.6 é possível observar o formato das bolhas formadas a partir do congelamento de água saturada com ar a 850 mbar, num ambiente de 500 mbar, a uma taxa de 6 μm/s.



Figura 3.6 - Bolhas com diâmetro maior sob condição de baixa pressão
Fonte: Bari e Hallett (1974)

Lipp et al. (1987) utilizaram um aparato composto por dois blocos metálicos com temperaturas controladas, separados por uma pequena distância, unidos por um tubo capilar de seção transversal retangular preenchido com água, que era movido em direção ao bloco mais frio a uma dada velocidade, para realizar um experimento onde o fluido era congelando progressivamente (Figura 3.7).

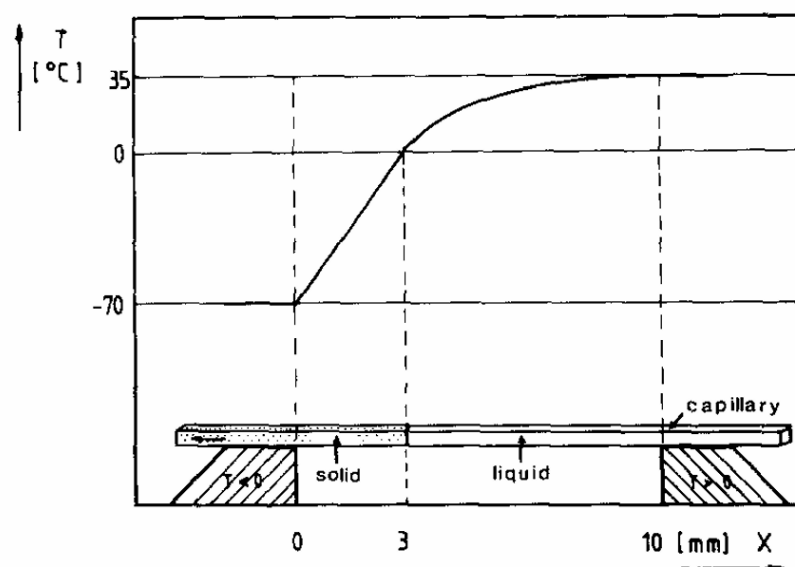


Figura 3.7 - Aparato experimental de congelamento e perfil de temperatura computado a uma velocidade de $54 \mu\text{m/s}$ e gradiente de temperatura de 17°C/mm
Fonte: Lipp et. al (1987)

As amostras de água foram primeiramente desgaseificadas e, posteriormente, regaseificadas com dióxido de carbono, oxigênio ou ar antes de serem utilizadas nos experimentos. Observando o comportamento do congelamento, puderam perceber que o crescimento de bolhas na interface sólido-líquido era influenciado tanto pela expansão da bolha, que reduzia a concentração local de gás dissolvido, quanto pelo avanço da interface, que aumentava essa concentração. Dividiram o crescimento das bolhas em três momentos distintos: crescimento esférico, com a bolha sendo empurrada pela superfície de congelamento; encapsulamento parcial, no qual parte da bolha fica presa, mas seu raio continua aumentando; e encapsulamento completo, quando a interface ultrapassa o centro da bolha e o raio deixa de crescer (Figura 3.8).

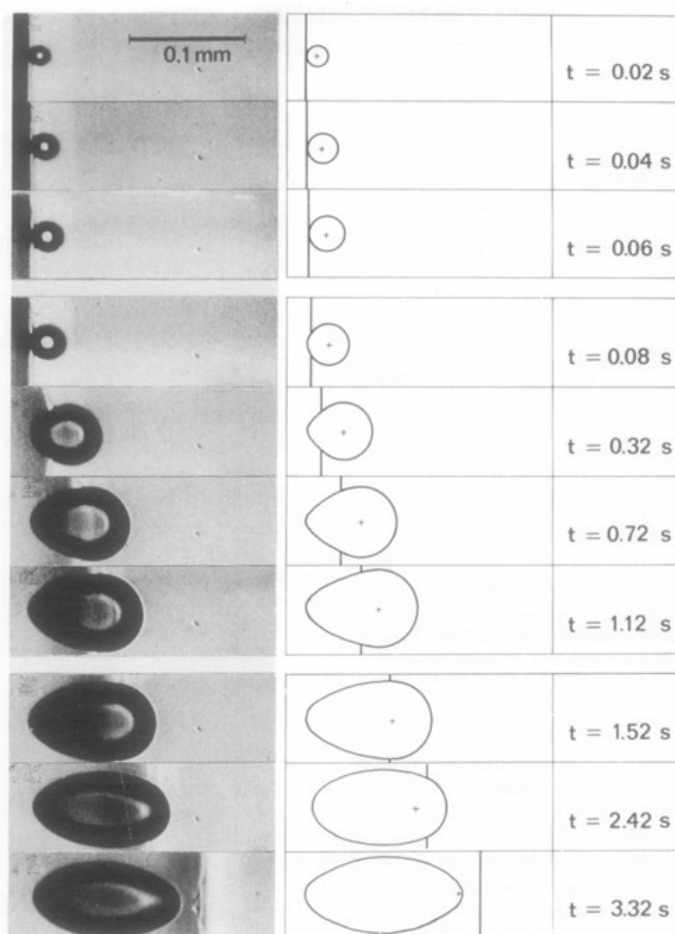


Figura 3.8 - Fases de crescimento da bolha nucleada na interface sólido-líquido

Fonte: Lipp et al. (1987)

Os pesquisadores Bianchi e Viskanta (1999), buscando entender os efeitos térmicos das inclusões de bolhas de ar durante o congelamento, realizaram experimentos com amostras de água em diferentes saturações de ar e pressões

ambientes. Seu aparato experimental consistia num prisma retangular de paredes laterais de acrílico, com as tampas inferiores e superiores feitas de material metálico, acopladas a sistemas de banhos capazes de estabelecer uma temperatura desejada nessa região. Além disso, os autores utilizaram um sistema para realizar a circulação da água antes de iniciar o teste, que era responsável por homogeneizar a temperatura da amostra. Tudo isso era colocado dentro de uma câmara de vácuo, onde a pressão poderia ser controlada. Também, alguns termopares foram instalados em diferentes posições para monitoramento da temperatura (Figura 3.9).

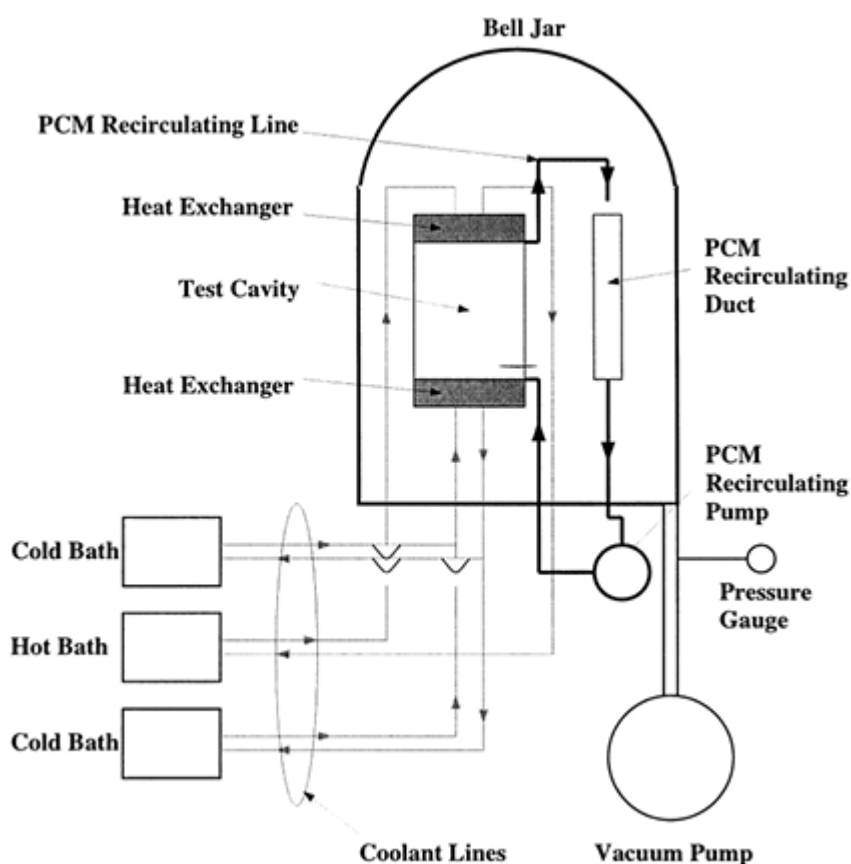


Figura 3.9 - Esquemático do aparato experimental
Fonte: Bianchi e Viskanta (1999)

Para evitar efeitos convectivos, realizaram o congelamento de cima para baixo, garantindo que a amostra de água estivesse a $3,5^{\circ}\text{C}$, abaixo da temperatura de densidade máxima, $3,98^{\circ}\text{C}$, segundo os autores. Água saturada de ar e degaseificada foram congeladas a temperatura ambiente, água supersaturada de ar foi congelada a uma pressão de 0,3 atm. O aspecto visual dos gelos formados é exposto na Figura 3.10:

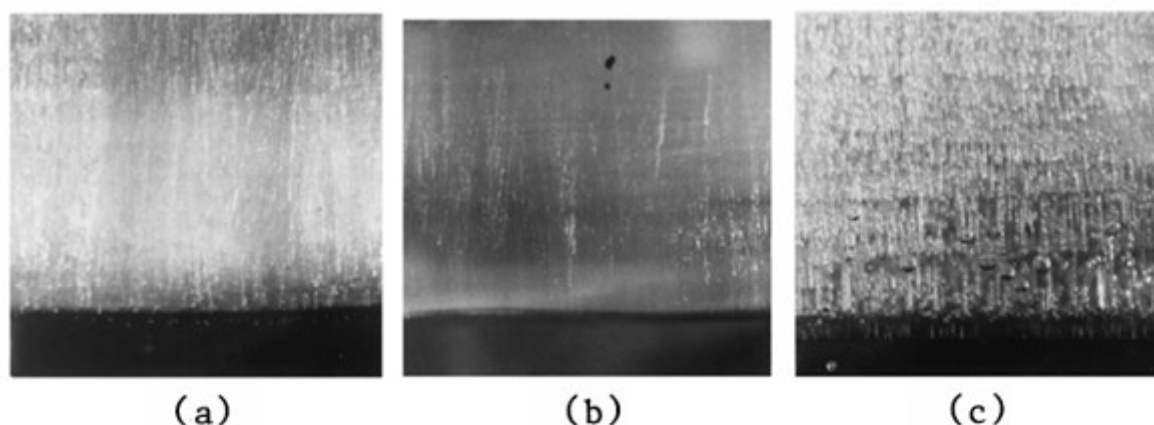


Figura 3.10 - Aspecto visual dos gelos feitos com água: (a) saturada de ar, (b) desgaseificada e (c) supersaturada de ar.

Fonte: adaptado de Bianchi e Viskanta (1999)

Os autores pontuam que o gelo feito com água desgaseificada é quase transparente, com apenas algumas bolhas, indicando que o ar dissolvido na água não foi removido completamente. A evolução da posição da interface sólido-líquido ao longo do tempo e as temperaturas foram muito similares para todos os experimentos, apontando para não influência da presença de bolhas no processo de congelamento.

Murakami e Nakajima (2002) utilizaram um aparato experimental baseado na solidificação unidirecional de soluções de água saturadas com dióxido de carbono em uma célula de vidro. Nele, foi utilizada uma célula, de 35 mm de largura, 150 mm de altura que era gradualmente imersa em um banho de álcool mantido a -20°C , promovendo o congelamento ascendente da solução aquosa. A velocidade de descida da célula, que determinava a taxa de crescimento da fase sólida, variava de 3 a $45\ \mu\text{m/s}$. A solidificação e a formação das bolhas eram observadas usando um microscópio digital. A pressão no interior da célula era controlada e, em condições normais, mantida em torno da pressão atmosférica, mas variações eram aplicadas para estudar seus efeitos no crescimento das bolhas.

Durante a solidificação, o dióxido de carbono dissolvido era rejeitado pela frente de congelamento, levando à nucleação de bolhas. A morfologia das bolhas dependia fortemente da taxa de crescimento. Em baixas velocidades (cerca de $3\ \mu\text{m/s}$), bolhas nucleadas na interface cresciam formando colunas alongadas no sentido da solidificação. À medida que a velocidade aumentava, os poros se tornavam mais curtos, e acima de certas velocidades (12 a $18\ \mu\text{m/s}$) formavam estruturas do tipo "castanha" (chestnut-shaped) (Figura 3.11).

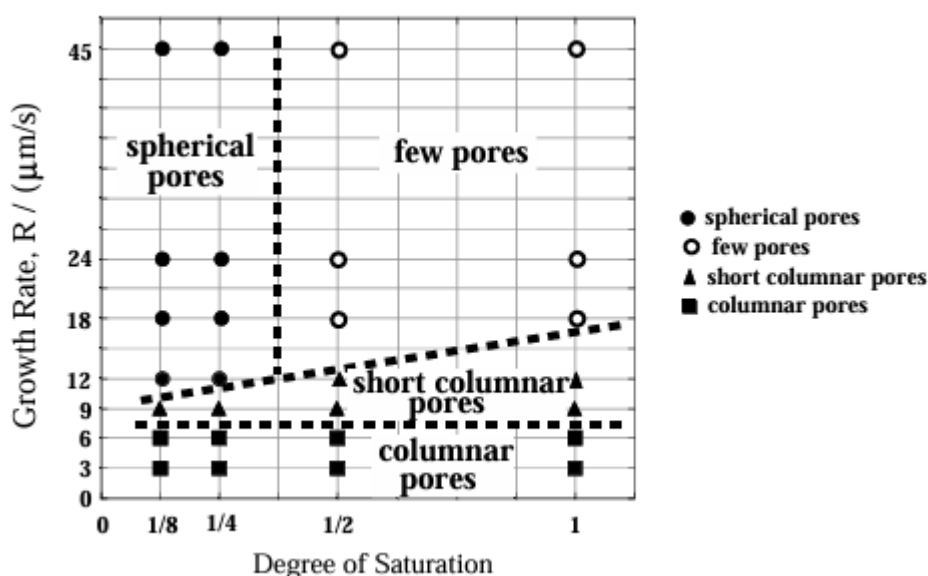


Figura 3.11 - Morfologia das bolhas em função do nível de saturação e velocidade de congelamento.
Fonte: adaptado de Murakami e Nakajima (2002)

Outro fenômeno observado foi a formação periódica de bolhas ao longo da direção de solidificação, principalmente em baixas taxas de crescimento ou baixas concentrações de gás carbônico. O período diminuía com o aumento da taxa de crescimento, sendo pouco influenciada pela pressão dentro da célula. Mudanças súbitas na pressão aplicada causavam variações no diâmetro dos poros: reduções de pressão temporariamente aumentavam o diâmetro das bolhas, enquanto aumentos bruscos podiam levar ao encapsulamento e desaparecimento das bolhas pela frente de congelamento. Interações entre poros próximos também foram relatadas, incluindo coalescência e competição pelo suprimento de dióxido de carbono dissolvido (Figura 3.12).

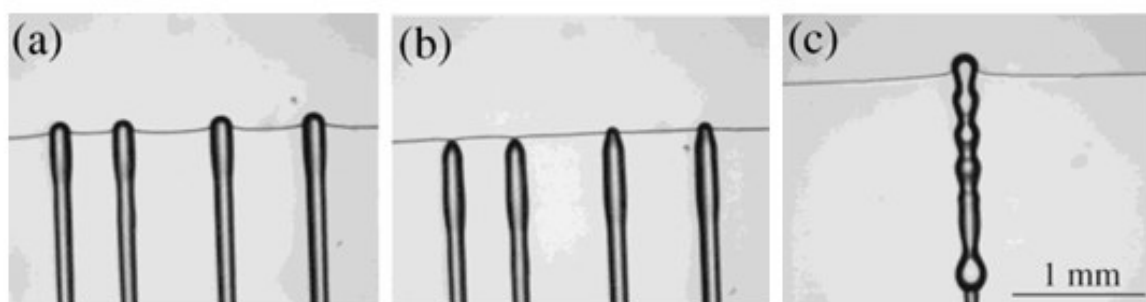


Figura 3.12 - Efeito da aplicação de pressão no crescimento de bolhas colunares. A pressão é crescente em (a), decrescente em (b) e periodicamente variada em (c).
Fonte: adaptado de Murakami e Nakajima (2002)

Yoshimura, Inada e Koyama (2008) desenvolveram um sistema para observar bolhas de oxigênio incorporadas em cristais de gelo durante o congelamento unidirecional. O resfriamento da água era promovido por circulação de etanol refrigerado no fundo do sistema, fazendo com que o congelamento se iniciasse de baixo para cima. Também, controlavam a pressão do oxigênio acima da superfície da água através de um cilindro de oxigênio conectado ao topo do recipiente, permitindo experimentos em diferentes pressões. Antes dos experimentos, água destilada era saturada apenas com oxigênio. A formação de bolhas era observada em diferentes posições verticais, correspondendo a diferentes velocidades locais de crescimento do gelo. Durante a solidificação, quatro padrões distintos de morfologia de bolhas foram identificados. A transição entre esses padrões dependia tanto da velocidade de crescimento do gelo quanto da pressão ambiente. Em geral, o aumento da velocidade favorecia a formação de bolhas ovais, enquanto o aumento da pressão favorecia bolhas cilíndricas. Outra característica observada em função desses parâmetros foi o diâmetro das bolhas cilíndricas, que crescia com a redução da velocidade e da pressão (Figura 3.13).

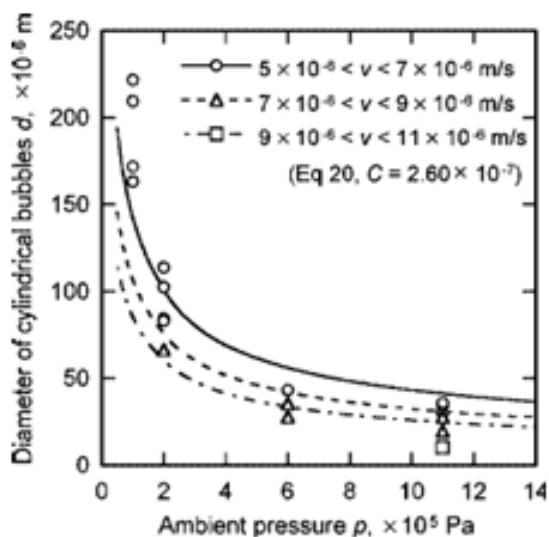


Figura 3.13 - Diâmetro médio das bolhas cilíndricas em função da pressão e da velocidade de crescimento do gelo.

Fonte: Yoshimura, Inada e Koyama (2008).

Melo (2023) projetou e construiu uma bancada experimental para a produção de gelo visando investigar os fatores que influenciam o grau de transparência do gelo. A seção de testes consistiu em numa forma com paredes isoladas, resfriada a partir da base por uma unidade termoeletrônica tipo Peltier, possibilitando a aplicação de

diferentes condições de contorno: temperatura prescrita (-12°C , -8°C e -4°C) ou fluxo de calor prescrita (1700 , 1300 e 650 W/m^2). O sistema também contava com um agitador para promover movimentação controlada da água durante o congelamento. Com isso, foi capaz de avaliar o impacto da velocidade, concentração de ar dissolvido na água e agitação da água no aspecto visual do gelo. Através da captura e processamento de imagens dos gelos prontos, atribuiu uma nota para a qualidade do gelo, permitindo uma análise quantitativa dos resultados. A análise foi feita a partir de uma análise fatorial dos parâmetros entrada de cada ensaio e as suas respectivas notas. Para os testes realizados com temperaturas prescritas, a agitação, a baixa concentração de oxigênio e as baixas velocidades tiveram impactos positivos para a qualidade do gelo. Já para os testes com fluxo de calor prescrita, a agitação e as baixas velocidades tiveram efeito positivo, enquanto a baixa concentração de ar atuou negativamente. Os resultados para o caso de fluxo prescrita são expostos no gráfico (Figura 3.14):

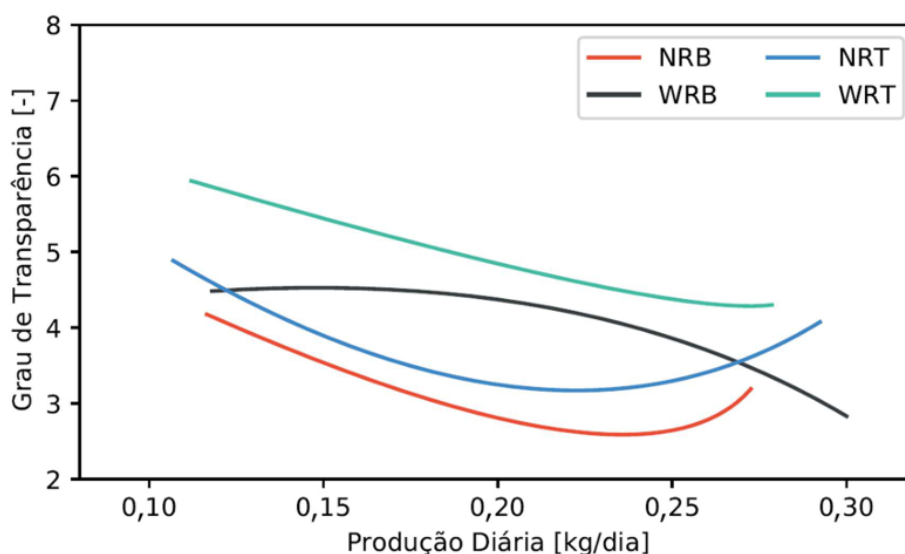


Figura 3.14 - Grau de transparência em função da taxa de produção diária para ensaios diferentes ensaios: (NRB) sem agitação, água fervida; (WRB) com agitação, água fervida; (NRT) sem agitação, água da torneira; (WRT) com agitação, água da torneira.

Fonte: Melo (2023)

Asakura e Yasuda (2022) investigaram a desgaseificação ultrassônica da água com diferentes frequências (22 a 1960 kHz) e potências (5 a 20 W), utilizando um aparato experimental composto por um vaso com parede dupla e controle térmico feito a partir da circulação de água. As vibrações foram produzidas por um transdutor do

tipo Langevin ou tipo disco, que recebiam um sinal de ondas senoidais amplificadas, produzidas por um gerador. A avaliação da remoção do ar dissolvido foi feita a partir da medição do oxigênio dissolvido, por meio de um medidor de oxigênio dissolvido. Os autores avaliaram o processo tanto em condições atmosféricas (101,3 kPa) quanto sob vácuo (5 kPa), pela redução do oxigênio dissolvido em amostras de 100 mL. Para fins comparativos, também foram realizados testes com agitação mecânica sob vácuo (5 kPa). A agitação mecânica, apesar de mais lenta, também demonstrou capacidade de promover desgaseificação, como ilustrado na Figura 3.15:

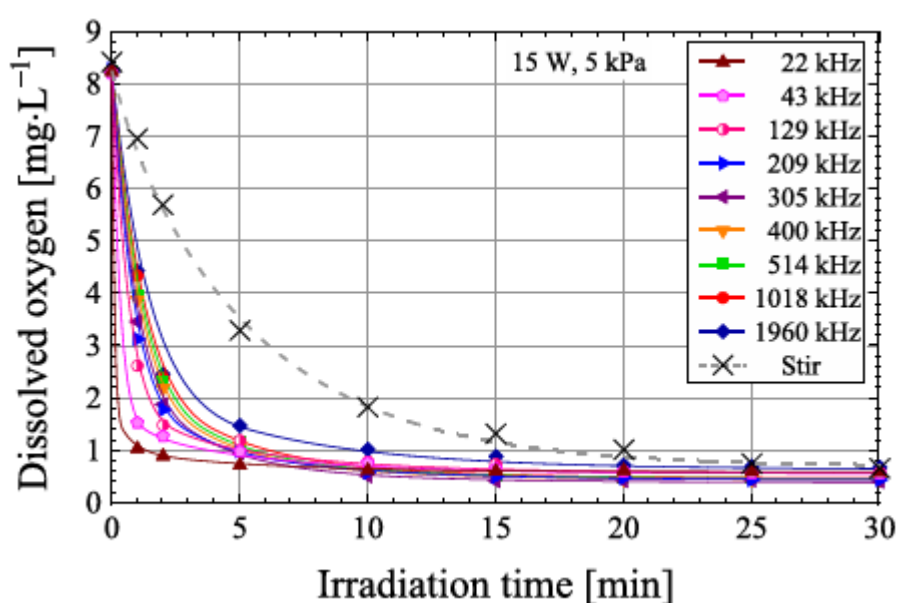


Figura 3.15 - Variação do oxigênio dissolvido em função da irradiação ultrassônica ou agitação mecânica num regime de baixa pressão
Fonte: Asakura e Yasuda (2022)

A partir da revisão dos trabalhos, percebe-se que boa parte deles avaliou os efeitos da velocidade, saturação de ar e pressão no aspecto visual do gelo. Todavia, nenhum trabalho estudou a viabilidade da agitação mecânica associada à baixa pressão como estratégia para melhora no aspecto visual do gelo ou redução do tempo de produção, fatores relevantes quando o gelo é encarado como um produto com valor agregado e não apenas um material. O presente trabalho se propõe a preencher tais lacunas.

4 – TRABALHO EXPERIMENTAL

4.1 BANCADA DE TESTES

A construção de uma bancada de testes foi elementar para a avaliação dos parâmetros de produção de gelo, visto que inexistem soluções comercialmente disponíveis que permitam o controle e monitoramento das variáveis significativas nesse processo. A bancada é formada por 4 conjuntos que são responsáveis por promover a solidificação unidirecional de cubos de gelo. A Figura 4.1 mostra os principais componentes da bancada e indica sequência dos locais onde a forma de gelo é posicionada ao longo dos testes. Ela é inicialmente agitada no local identificado com o número 1 e posteriormente refrigerada no local identificado com o número 2, onde efetivamente ocorre o congelamento.

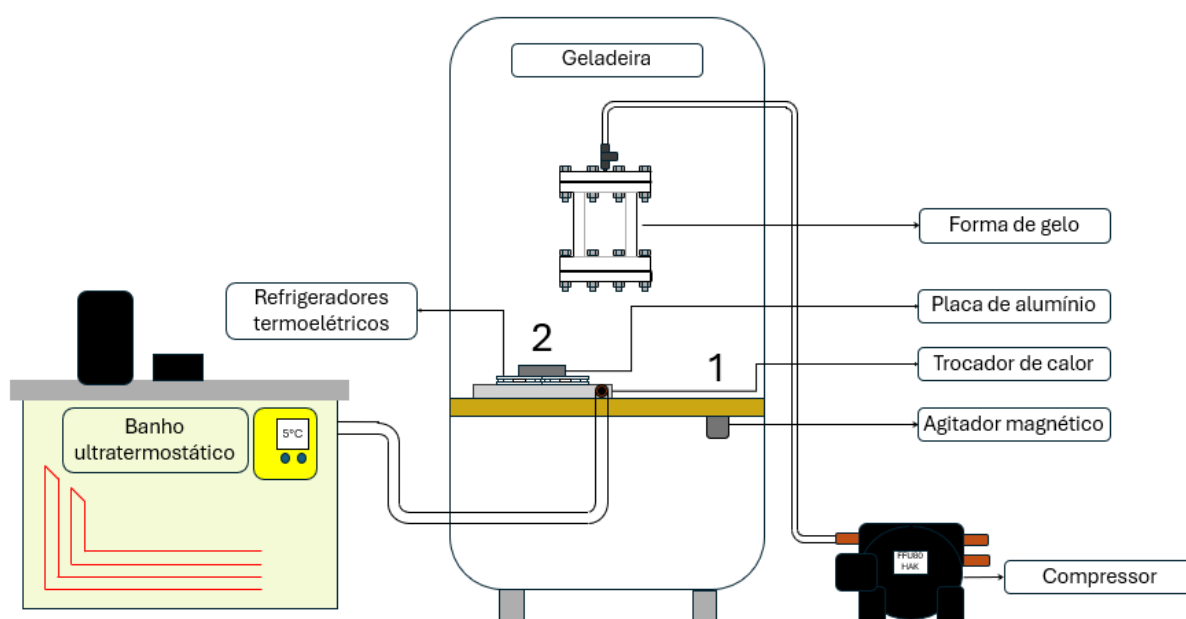


Figura 4.1 - Bancada para produção de gelo

A seção de testes onde ocorre o congelamento pode ser visualizada com mais detalhes na forma de modelo 3D na Figura 4.2:

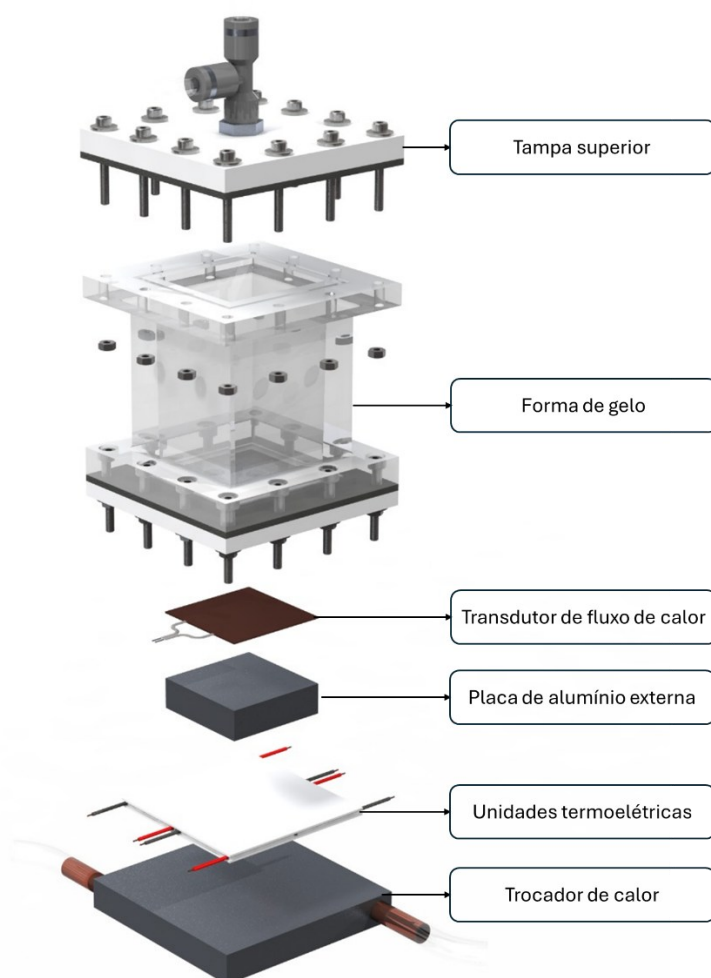


Figura 4.2 - Modelagem 3D da seção de testes

4.1.1 – Forma de gelo

A forma onde o gelo é formado é composta por uma base quadrada com 5 cm de lado, impressa em resina transparente. Ela possui flanges na parte inferior e superior, permitindo o acoplamento de uma base de alumínio, termicamente condutiva, necessária para a remoção de calor, e de uma tampa espessa de poliacetal na parte superior, capaz de resistir à baixa pressão de vácuo imposta pelo sistema de vácuo. As paredes têm cerca de 1 cm de espessura para suportar essa condição de baixa pressão. A distância entre a flange inferior e superior é de 10 cm, garantindo um volume interno adequado para a produção dos cubos de gelos desejados. A escolha pela impressão 3D com resina transparente deveu-se à maior facilidade de fabricação de geometrias mais complexas, comparada a outros métodos, e à possibilidade de visualização do processo de congelamento. Na tampa, também foram acopladas

conexões pneumáticas que conectam a forma ao compressor de ar (utilizado como bomba de vácuo) e ao transdutor de pressão. As juntas possuem vedações de borracha e são apertadas por parafusos e porcas. Os ensaios de formação de gelo foram realizados com isolamentos térmicos instalados ao redor da área do cubo, exceto os ensaios com visualização por vídeo. A Figura 4.3 mostra um modelo 3D da montagem da forma de gelo e a Figura 4.4 mostra uma foto dela montada:

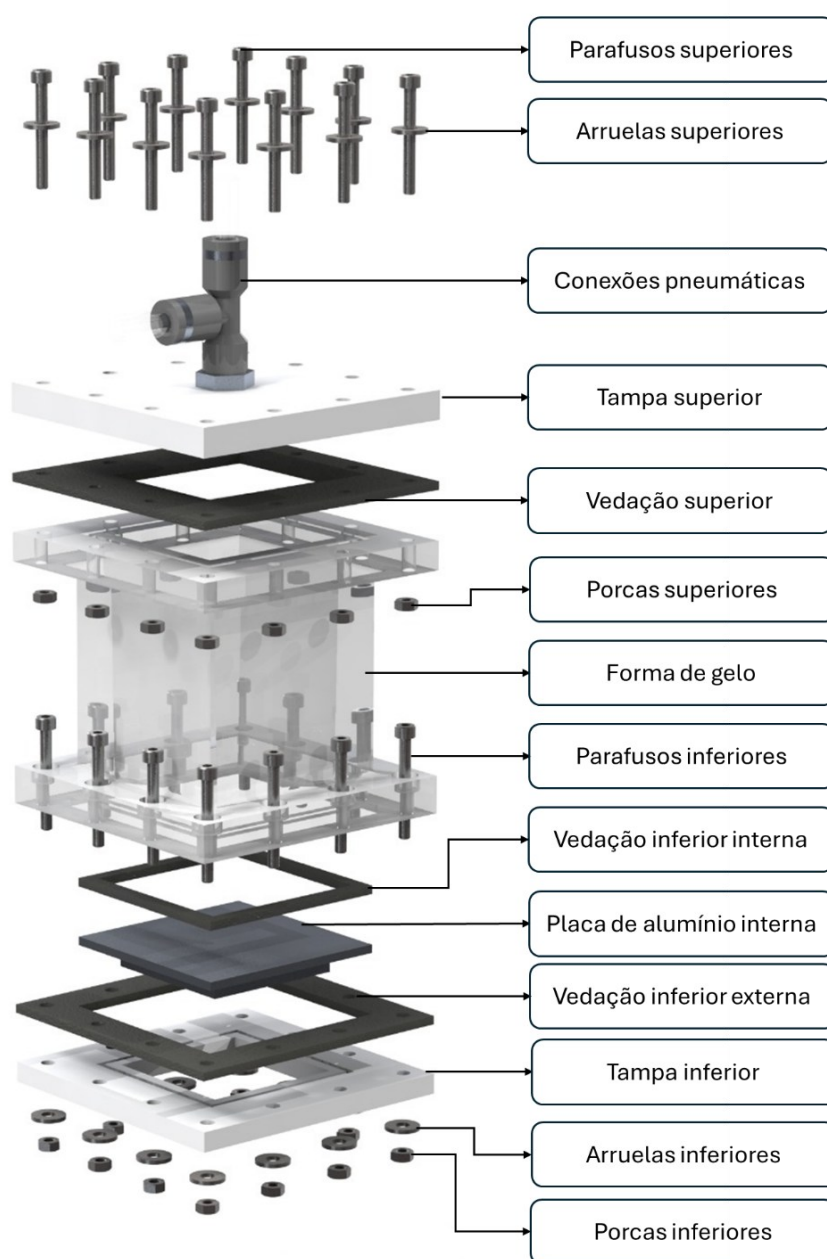


Figura 4.3 – Modelo 3D da montagem da forma de gelo

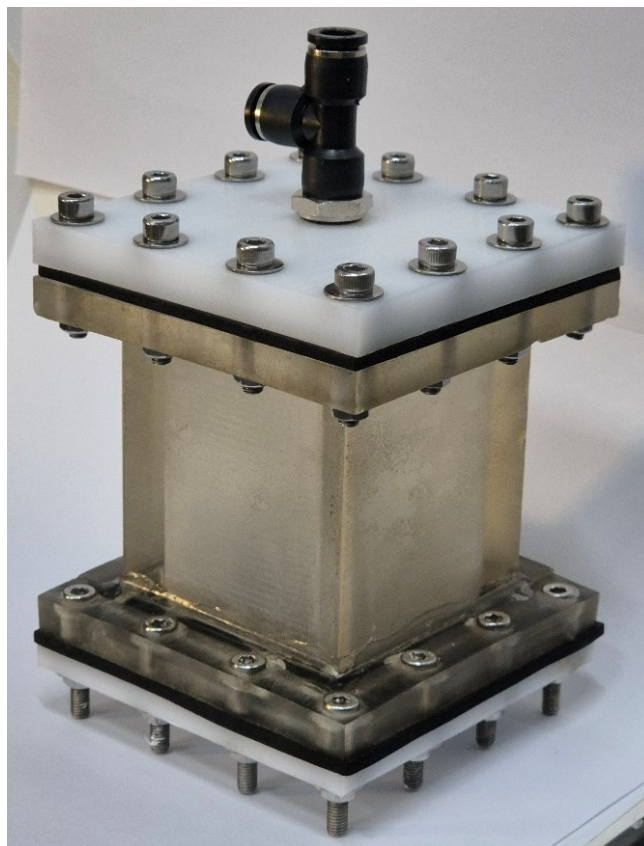


Figura 4.4 - Forma de gelo montada

4.1.2 – Sistema de refrigeração

O sistema de refrigeração é composto por 4 unidades termoeletricas tipo Peltier de modelo TEC-12706, cada uma com capacidade máxima de refrigeração de 50 W e temperatura mínima de -41°C , num ambiente de 25°C . As unidades Peltier foram montadas sobre um trocador de calor de alumínio, que por sua vez é conectado a um banho ultratermostático, modelo Q214M2 da marca Quimis, com capacidade de refrigeração de 2100 W. A decisão de utilizar 4 unidades termoeletricas tipo Peltier foi tomada no sentido de tornar o fluxo de calor o mais homogêneo possível na base da forma de gelo, visto que quase todos esses dispositivos a venda no mercado têm 4 cm de lado, sendo que a base do gelo tem 5 cm. Assim, as unidades termoeletricas foram montadas em paralelo e uma peça de alumínio quadrada de 5 cm de lado foi colocada sobre elas. A parte da área das unidades termoeletricas que não estava em contato com a peça de alumínio e os lados da peça de alumínio foram cobertas com uma fita termicamente isolante, com objetivo de minimizar a perda de calor para o ambiente. O controle do fluxo de calor gerado por esse sistema é feito por um controlador do tipo PI, que lê os dados de um transdutor de fluxo de calor posicionado

acima da placa de alumínio e controlava a alimentação dos refrigeradores termoeletricos por uma técnica de PWM. A Figura 4.5 mostra o conjunto com a instrumentação e a Figura 4.6 o banho termostático utilizado:

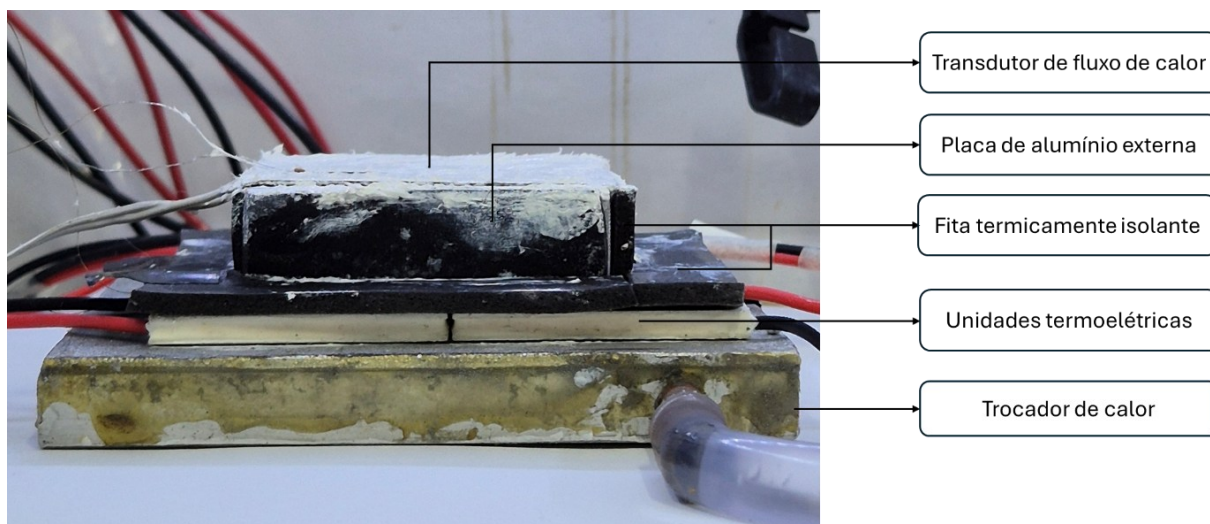


Figura 4.5 - Conjunto com trocador de calor, unidade termoeletrica e placa de alumínio (com instrumentação).



Figura 4.6 - Banho ultratermostático Quimis Q214M2

Também com objetivo de reduzir as perdas de calor para o ambiente, os ensaios foram realizados com a seção de testes montada no interior de uma geladeira, com temperatura interna monitorada e controlada. Outro benefício é a redução no efeito de condensação do ar nas laterais da forma, que atrapalha a visualização do teste.

4.1.3 – Sistema de redução de pressão

A redução da pressão na superfície da água foi obtida por meio de um compressor Embraco modelo FFU80HAK com 499W de capacidade de refrigeração (Figura 4.7). Uma mangueira pneumática une a entrada dele à conexão na tampa da forma.



Figura 4.7 - Compressor Embraco FFU80HAK
Fonte: Mercado Livre

4.1.4 – Sistema de agitação da água

A agitação da água foi realizada por meio de um agitador magnético constituído por um motor elétrico Akyiama AK280/0.63PF05R330SC com 1,8 W de potência, que gira a 330 rpm. No seu eixo estão posicionados 2 ímãs de neodímio de grau N42 em formato de disco com 10 mm de diâmetro com 4 mm de altura. Um outro ímã igual é posicionado na parte interna da forma de gelo. Apenas uma pequena

distância, composta em sua maior parte pela espessura da placa de alumínio, separa os imãs externos do interno. Dessa forma, existe interação magnética entre eles, de modo que a rotação dos imãs internos causa a rotação do imã interno. O conjunto do motor e dos imãs externos são fixados numa placa de madeira, com um furo circular central e diversos furos para posicionamento da forma de gelo. O conjunto é apresentado na Figura 4.8:



Figura 4.8 - Vista superior do agitador magnético

4.2 INSTRUMENTAÇÃO

Com intuito de monitorar e controlar parâmetros relevantes para o trabalho, a bancada experimental foi instrumentada com sensores de temperatura, pressão e fluxo de calor. A Figura 4.9 mostra uma representação esquemática da instrumentação:

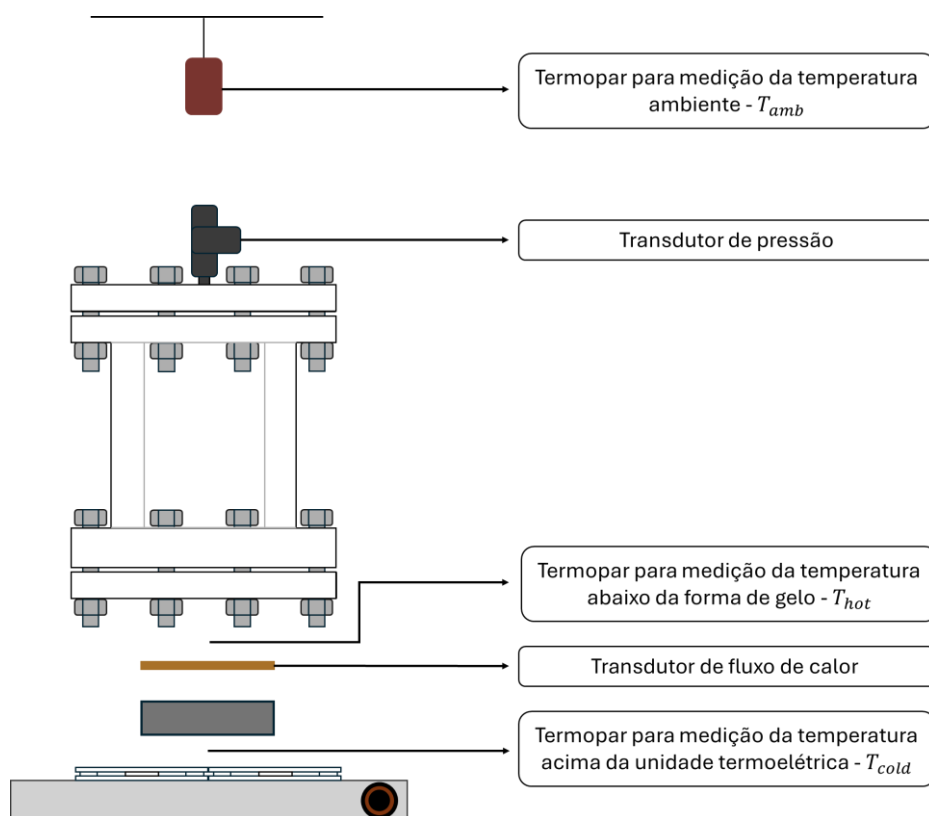


Figura 4.9 - Esquemático da instrumentação

Foram utilizados 3 termopares do tipo T. O termopar denominado T_{amb} monitorava a temperatura ambiente, por isso foi montado acoplado a uma massa de cobre. T_{cold} e T_{hot} eram os termopares responsáveis pelo monitoramento logo abaixo da forma e acima das unidades termoeletricas, respectivamente. Por estarem entre superfícies planas, necessitam ter uma dimensão bastante reduzida, portanto a parte próxima a sua junta era construída com fios bastante finos sem revestimento.

O fluxo de calor removido da seção de testes (cubo de água/gelo) é medido por meio de um transdutor de fluxo de calor a gradiente tangencial, quadrado com 5 cm de lado. A determinação do fluxo de calor nesse tipo de transdutor é feita através da medida de um gradiente de temperatura em um plano tangente ao plano de medida do fluxo. Por meio de contatos pontuais as linhas de fluxo de calor são distorcidas, gerando uma diferença de temperatura sobre uma termopilha planar (Güths, 1994). Os transdutores foram devidamente calibrados e possuem um erro de 3%. A Figura 4.10 mostra um esquemático de seu funcionamento.

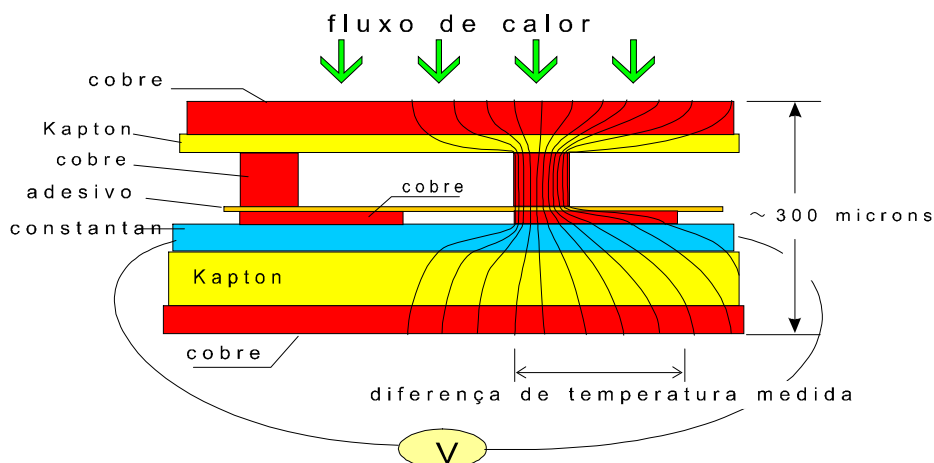


Figura 4.10 - Funcionamento do transdutor de fluxo calor a gradiente tangencial
Fonte: adaptado de Güths (1994)

O transdutor de pressão usado é o modelo PX309-030A5V da marca Omega, com faixa de medição de 0 a 2.1 bar e erro de medição de até 4,5%, adequado ao caso de pressão de vácuo. Ele foi posicionado fora da geladeira e é conectado à forma por meio de uma mangueira pneumática.

Os sinais elétricos dos sensores foram coletados por um sistema de aquisição Keysight 34972A e processados por um software dedicado. O software foi escrito na linguagem LabVIEW. Uma vista da tela principal do software é mostrada na Figura 4.11:

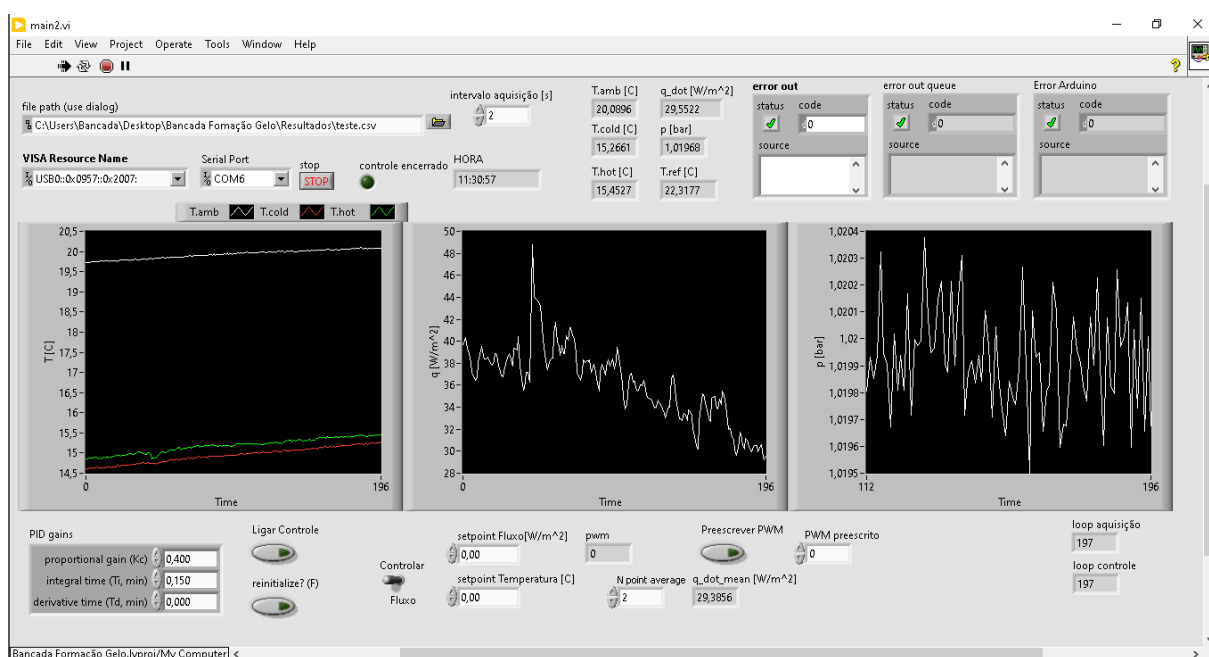


Figura 4.11 - Tela principal do programa em LabVIEW

4.3 PLANO DE TESTES

O aparato experimental construído no presente trabalho permite a realização de ensaios de formação de gelo unidirecional sob diferentes condições de fluxo de calor e solubilidade do ar na água, sendo este último parâmetro variado tanto por meio da possibilidade de agitação prévia da água, quanto por meio da redução da pressão na superfície da água.

Os ensaios foram planejados considerando a variação de dois principais parâmetros operacionais: o fluxo de remoção de calor da água e a condição de vácuo/agitação, organizados em dois eixos experimentais. O primeiro eixo refere-se ao fluxo de calor removido da base da forma. Os limites superiores e inferiores foram definidos em ensaios preliminares. O limite superior, de 1000 W/m^2 , foi definido com base na capacidade máxima do sistema de refrigeração, enquanto o limite inferior, de 400 W/m^2 , corresponde ao valor mínimo necessário para a produção de gelo. Abaixo disso, gelo não é formado. Além desses dois extremos, foi incluído um nível intermediário de fluxo, de 700 W/m^2 , visando proporcionar uma análise mais detalhada do efeito da taxa de resfriamento sobre o processo de congelamento. O segundo eixo abrange as condições de vácuo e agitação da água. Na condição de referência, denominada NV (sem vácuo), a água não é previamente agitada e a pressão na superfície permanece em condição ambiente (atmosférica) ao longo de todo o ensaio. Já na condição de vácuo total, denominada TV, a água foi previamente agitada por meio de um agitador magnético e a pressão na superfície foi reduzida (vácuo) durante toda a duração do congelamento. Dessa forma, para cada nível de fluxo de calor, os ensaios foram conduzidos sob ambas as condições de vácuo/agitação, permitindo avaliar os efeitos combinados desses fatores no processo de formação do gelo. Além dos ensaios principais, foram realizados testes extras, a saber: (i) dois testes de repetibilidade na condição NV com fluxo de calor de 1000 W/m^2 , como forma de avaliar a repetibilidade dos experimentos; (ii) um ensaio com utilização da agitação magnética e vácuo apenas no período preliminar do teste, antes de iniciar a remoção de calor pela base da forma, denominado vácuo parcial (PV), sob fluxo de calor de 1000 W/m^2 ; e (iii) um ensaio com água fervida em condição NV com fluxo de calor de 1000 W/m^2 , com objetivo de avaliar se a estratégia de desgaseificação estava sendo efetiva, visto que a fervura é um método provado para desgaseificação da água, resumidos na Tabela 4.1:

Tabela 4.1 - Plano de testes

	Principais		Extras		
	NV Sem vácuo	TV Vácuo total	Repetibilidade NV Sem vácuo	NV + água fervida Sem vácuo	PV Vácuo parcial
1000 W/m ²	✓	✓	✓ (x2)	✓	✓
700 W/m ²	✓	✓			
400 W/m ²	✓	✓			

Adicionalmente, outros ensaios foram realizados sem o isolamento térmico na forma de gelo, exclusivamente para captura de imagens do processo.

4.4 METODOLOGIA

A fim de obter resultados padronizados, um procedimento padrão de teste foi elaborado. Os passos foram seguidos na ordem descrita a seguir:

1. Coletar água de um bebedouro
2. Adicionar 125 ml da água coletada à forma de gelo
3. Adicionar o imã interno a forma de gelo (apenas testes PV e TV)
4. Fechar a forma e fixar a tampa por meio do apertamento de porcas e parafusos
5. Ligar o agitador magnético (apenas testes PV e TV)
6. Abrir a porta da geladeira
7. Conectar as mangueiras pneumáticas à forma de gelo
8. Posicionar a forma sobre o agitador magnético
9. Fechar a porta da geladeira
10. Ligar o compressor (apenas testes PV e TV)
11. Aguardar um período de 30 minutos
12. Desligar o sistema de agitação magnética (apenas testes PV e TV)
13. Abrir porta da geladeira
14. Posicionar o imã interno fora da água com o auxílio de outro imã externo (apenas testes PV e TV)
15. Posicionar a forma sobre o sistema de refrigeração
16. Desligar o sistema de vácuo (apenas testes PV)
17. Aguardar 15 minutos
18. Ligar o sistema de refrigeração

19. Aguardar até o gelo estar completamente congelado
20. Desligar o sistema de refrigeração
21. Desligar o sistema de vácuo (apenas testes TV)
22. Abrir porta da geladeira
23. Remover a forma da geladeira
24. Remover a tampa da forma
25. Posicionar a forma de ponta cabeça
26. Aguardar o gelo escorregar para fora da forma
27. Posicionar o gelo sobre uma superfície iluminada
28. Tirar fotos padronizadas das 6 faces do gelo

A razão de aguardar 30 minutos no passo 10, mesmo que nenhum processo seja realizado para os testes NV, é reduzir a influência desse eixo de variáveis no eixo de fluxo de calor. A água e a forma de gelo, em temperatura ambiente, são resfriadas pelo ambiente frio do refrigerador. Na mesma linha, o passo 17 foi estabelecido para mitigar os efeitos térmicos da agitação da água e do atrito da movimentação do ímã interno.

A superfície iluminada era composta por uma luminária de LED associada a uma peça de polímero semitransparente, capaz de fornecer uma iluminação homogênea, apropriada para fotos padronizadas.

A determinação do momento do fim do congelamento é feita pela análise da curva de temperatura do termopar mais próximo a forma de gelo. Após a mudança de fase, a temperatura cai de maneira progressivamente mais lenta. Num dado momento, essa queda é acelerada e posteriormente retorna a desacelerar. O momento da aceleração está relacionado com o fim da retirada de calor de forma latente do sistema, ou seja, fim do congelamento. A figura 4.12 mostra graficamente esse cenário para um teste realizado na condição NV com 1000 W/m^2 de fluxo de calor:

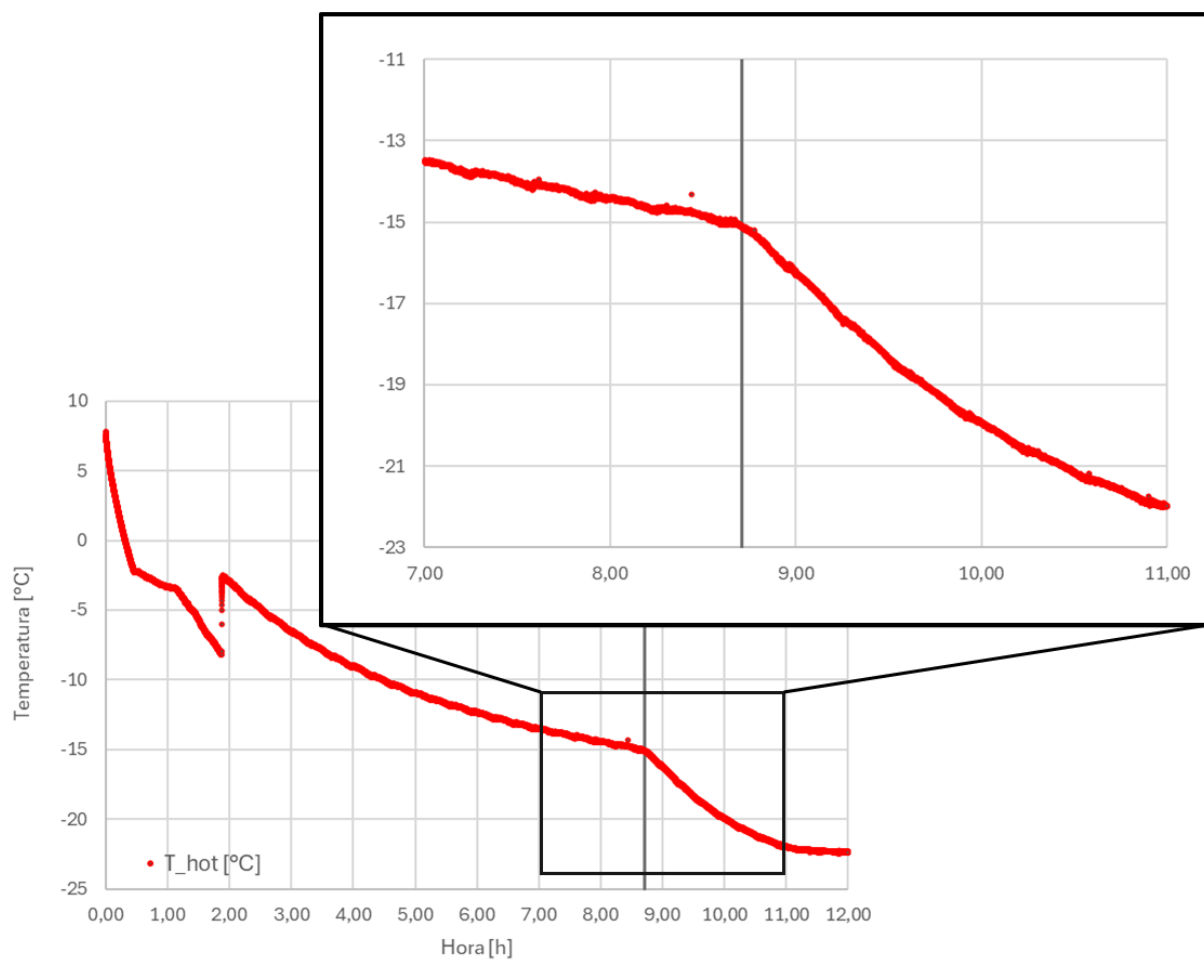


Figura 4.12 - Método de determinação do fim do teste

5 – RESULTADOS

5.1 DINÂMICA DE CONGELAMENTO

Ensaio preliminares, sem isolamento nas laterais do cubo, foram realizados com monitoramento em vídeo a fim de examinar detalhadamente a evolução do congelamento da água. Em tais ensaios é possível visualizar que a água atinge temperaturas abaixo do ponto de fusão, sem mudar de fase. Isso porque, num dado momento, a água congela parcialmente de maneira abrupta, formando sólidos similares a "cristais" (veja Figura 5.1b). Tais resultados, observados em todos os testes que foram filmados, mostram que, definitivamente, o fenômeno de metaestabilidade está presente. Isso corrobora as medições de temperatura na base do gelo, como será mostrado a seguir neste capítulo. Quando a solidificação se inicia, calor é liberado e o líquido super-resfriado é rapidamente aquecido. Na sequência, a estrutura cristalina formada é derretida, de forma total ou parcial (as imagens são inconclusivas) e o congelamento segue com o crescimento da fase sólida com a movimentação de um plano, da base para o topo. A Figura 5.1 mostra esse processo num teste realizado sem vácuo, agitação e isolamento com fluxo de 1900 W/m^2 , em que (a) é o momento imediatamente anterior a formação de cristais, (b) é a formação dos cristais em apenas 2 minutos, (c) é o gelo parcialmente formado, com o sistema majoritariamente líquido, 2 horas após a mudança de fase e (d) é o gelo parcialmente formado com o sistema majoritariamente sólido, 4 horas após a mudança de fase.

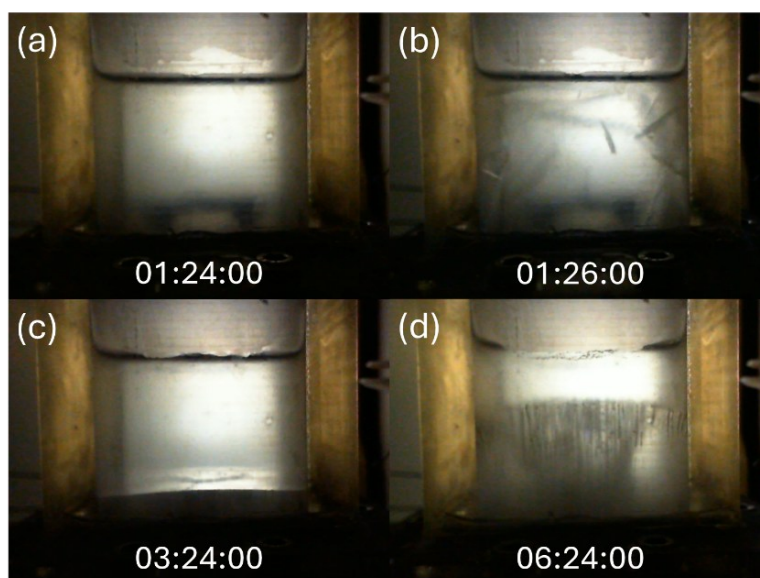


Figura 5.1 - Dinâmica de congelamento da bancada construída

O vídeo foi processado com o software Tracker, que possibilitou a seleção de pontos, localizados a partir de uma referência, da interface sólido-líquido em diferentes momentos no tempo. Deste modo, foi possível calcular as velocidades médias para cada passo, a partir da variação da posição da interface e do tempo decorrido. A tela principal do programa com o vídeo analisado é mostrada na Figura 5.2:

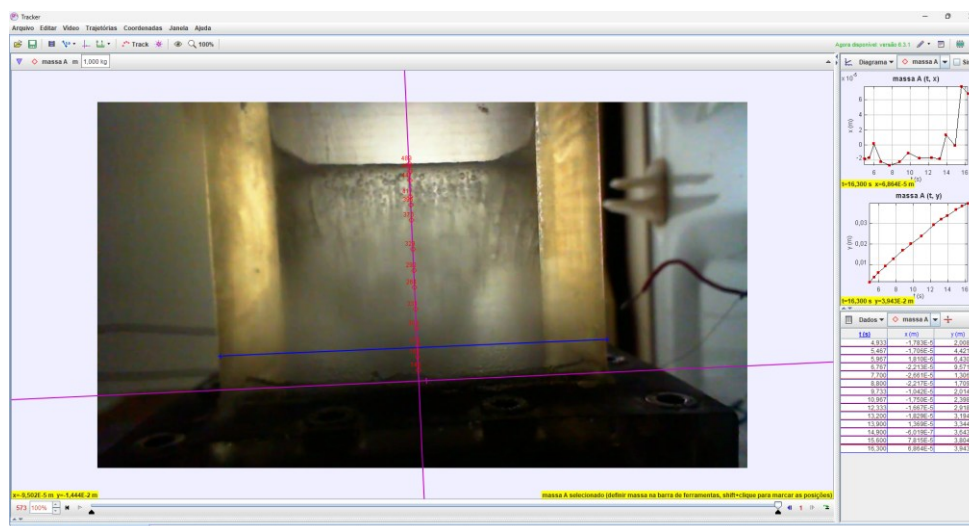


Figura 5.2 - Tela principal do software Tracker.
As linhas rochas são os eixos de referência, a linha azul a dimensão de referência e os pontos vermelhos os pontos selecionados.

Com os dados obtidos da análise desse vídeo e da observação todas os demais testes filmados, ficou perceptível que, apesar do fluxo de calor constante, a velocidade de congelamento decaiu à medida que a interface sólido-líquido avançou. Tal comportamento destoa do modelo teórico, onde um congelamento sob fluxo de calor constante era sinônimo de uma velocidade de avanço da interface, pois não eram levadas em consideração perdas de calor para o ambiente. À medida que o gelo cresce, a diferença de temperatura entre a mistura e o ambiente externo também cresce, intensificando as perdas de calor para o ambiente. Consequentemente, a fração do fluxo de calor retirado pelo aparato experimental efetivamente utilizado para o congelamento decai ao longo de cada teste, fato diretamente relacionado a desaceleração do movimento da interface, conforme mostra a Figura 5.3:

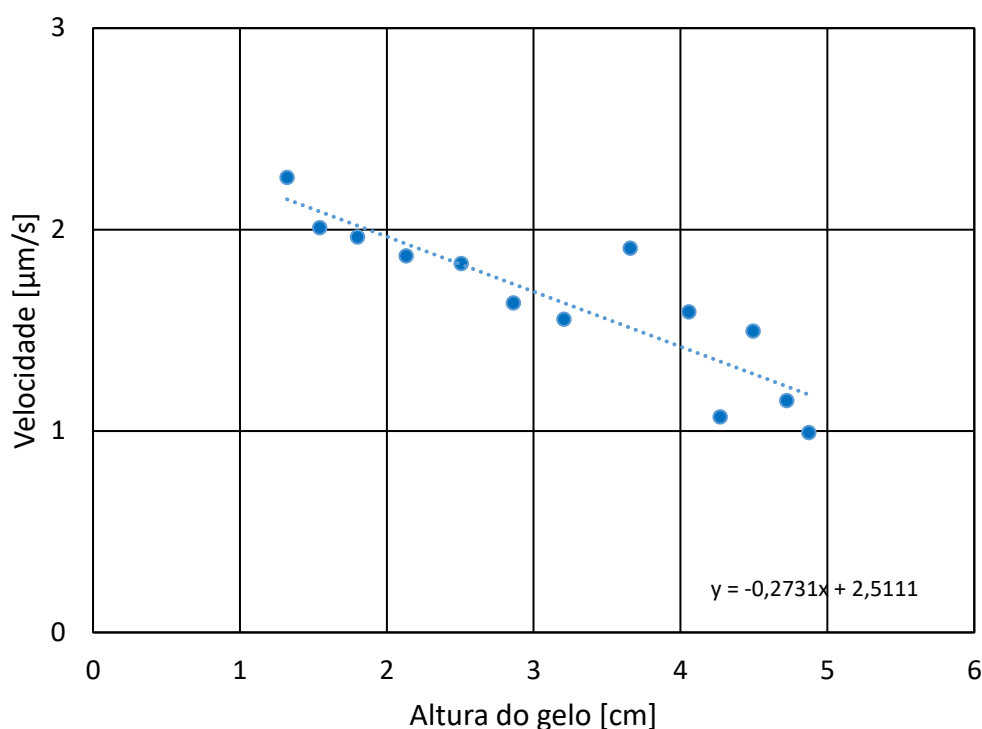


Figura 5.3 - Velocidade média de congelamento em função da altura da interface sólido-líquido

5.2 RESULTADOS GERAIS

O tempo total de congelamento foi fortemente influenciado pelo fluxo de calor, resultado esperado a partir da teoria, conforme a equação (2.3), onde a posição da interface sólido-líquido é diretamente proporcional ao fluxo de calor e ao tempo. Os tempos para produção de gelo estão resumidos na Tabela 5.1:

Tabela 5.1 - Tempo de congelamento em horas

	NV Sem vácuo	TV Vácuo total
1000 W/m ²	8,71	6,23
700 W/m ²	11,15	9,15
400 W/m ²	24,26	16,85

Entretanto, na Tabela 5.1 fica evidente que a relação entre o tempo e o fluxo de calor não são proporcionais para todos os casos, à luz do modelo teórico. Isso deve-se às imperfeições do isolamento térmico nos testes experimentais. Quanto menor é o fluxo de calor, mais tempo o processo de congelamento leva, consequentemente mais tempo o sistema fica exposto a um ambiente mais quente do que ele e mais

energia é dissipada para o ambiente. Assim, o calor efetivamente utilizado para congelamento é proporcionalmente menor, comparando com o total medido. Tal fenômeno fica mais claro ao se analisar a energia total removida pelo sistema de resfriamento, através de integração dos valores medidos pelo transdutor de fluxo de calor (Tabela 5.2):

Tabela 5.2 - Energia total removida em kJ, medida pelo transdutor de fluxo de calor

	NV Sem vácuo	TV Vácuo total
1000 W/m ²	78,43	56,12
700 W/m ²	70,25	57,70
400 W/m ²	87,36	60,70

Sabe-se que a agitação da água e o vácuo na superfície atuam no sentido de reduzir a solubilidade de ar na água e, consequentemente, reduzir o número de bolhas presas no sólido, deixando o gelo mais transparente. Nesse contexto, não se espera um efeito destas variáveis no tempo de congelamento e na energia dispendida para congelamento. No entanto, a Tabela 5.1 mostra que, para um mesmo fluxo de calor, o tempo de congelamento e a energia dispendida foram reduzidas quando o vácuo na superfície foi mantido ao longo de todo o período de congelamento entre -17,9% e -30,5% para ambas as variáveis. Fica evidente que, nestes casos, o vácuo reduziu a taxa de transferência de calor por convecção na superfície da água, reduzindo a troca (perda) de calor total com o ambiente, impactando o resultado das variáveis de tempo e energia.

A evolução do processo congelamento pode ser observada através das Figuras 5.4 e 5.5, gráficos de temperaturas e fluxo de calor dos testes mais lento (NV 400 W/m²) e mais rápido (TV 1000 W/m²), respectivamente. Nelas é possível visualizar a queda na temperatura na base do sistema, que é resultado da manutenção do fluxo de calor, a medida em que as temperaturas do líquido metaestável ou da crescente fase sólida diminuem. Também fica evidente o momento em que o início da mudança de fase ocorre, devido a abrupta elevação das temperaturas e o momento em que ela se encerra, com a mudança na taxa de diminuição das temperaturas. Gráficos para os demais testes realizados se encontram no Apêndice B.

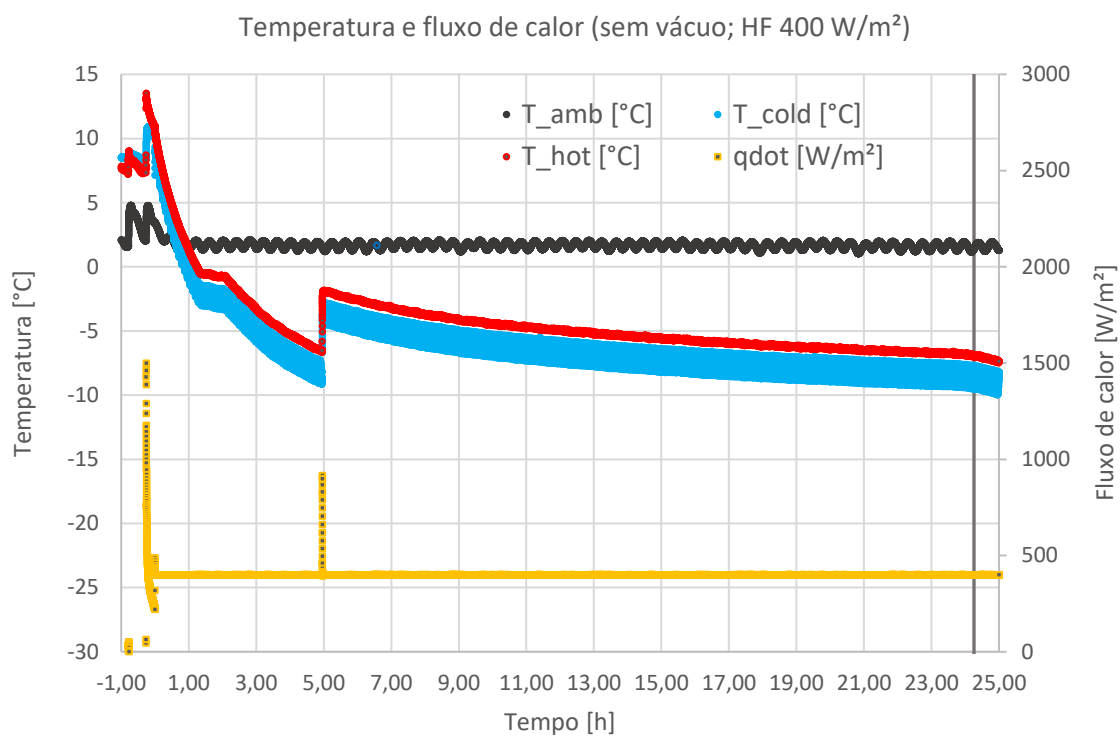


Figura 5.4 - Gráfico de temperatura e fluxo de calor do teste de 400 W/m² na condição NV

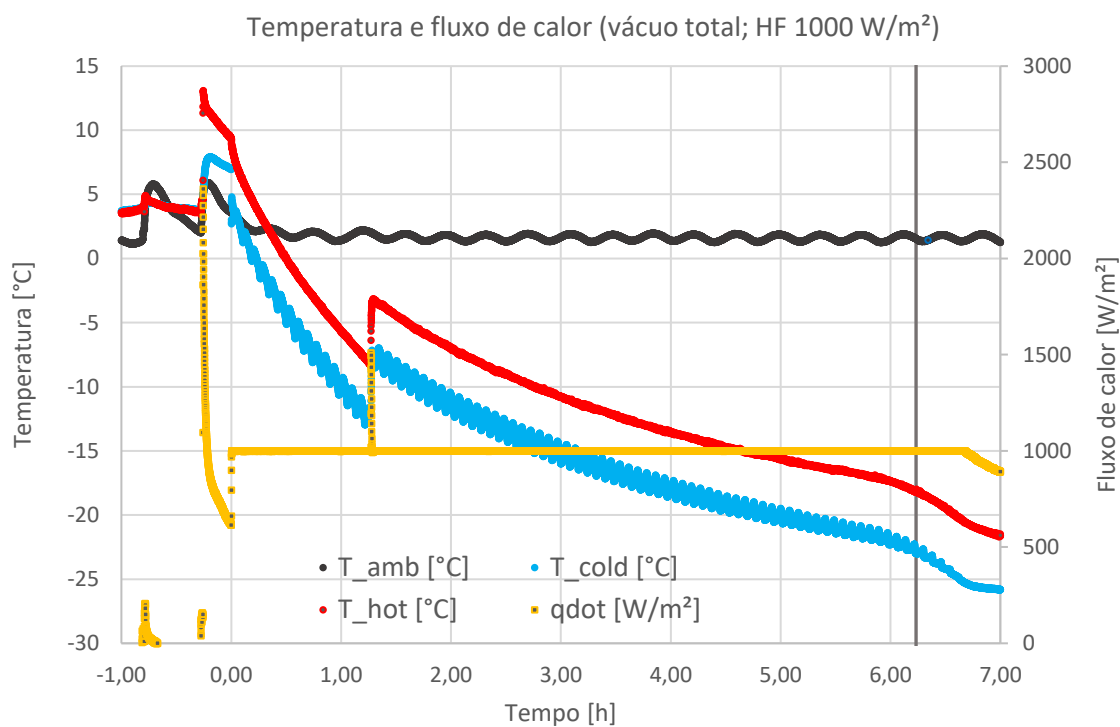


Figura 5.5 - Gráfico de temperatura e fluxo de calor do teste de 1000 W/m² na condição TV

5.3 RESULTADOS VISUAIS

Conforme discutido na seção de Fundamentação Teórica e mostrado por diversos autores, citados na Revisão Bibliográfica, a qualidade perceptível do gelo formado é inversamente proporcional à velocidade de congelamento. Neste sentido, os ensaios com maior fluxo de calor (1000 W/m^2) foram aqueles que geraram amostras de gelo com piores aspectos visuais e apresentam melhora no aspecto visual à medida o fluxo de calor decresceu, seja para os casos NV ou TV. A Figura 5.6 mostra uma das faces de cada gelo produzido:

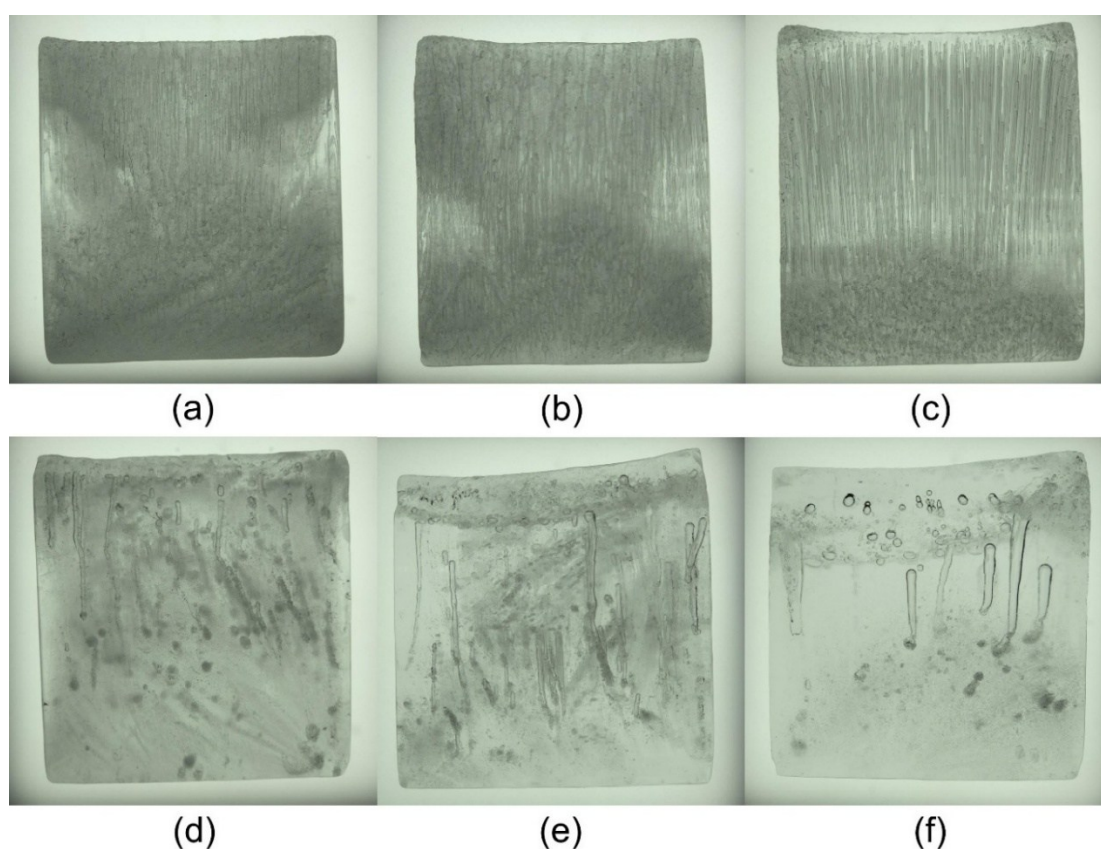


Figura 5.6 – Faces laterais dos gelos produzidos nos testes principais.
Testes NV com (a) 1000 W/m^2 , (b) 700 W/m^2 e (c) 400 W/m^2 .
Testes TV com (d) 1000 W/m^2 , (e) 700 W/m^2 e (f) 400 W/m^2 .

Para os testes realizado na condição NV, é possível observar bolhas com formato predominantemente esférico ou elipsoidal na região mais próxima a base e bolhas cilíndricas mais próximas ao topo. Isso deve-se a variação da velocidade de congelamento durante o teste, discutida anteriormente. Esse fenômeno foi observado por Bari e Hallet (1974) e Murakami e Nakajima (2002), onde em menores velocidades relataram bolhas em “formato de ovo” e esféricas, respectivamente, e em maiores

velocidades ambos relataram bolhas em formato cilíndrico. Também, a altura do gelo em que as bolhas se transformam de esféricas para cilíndricas é maior para fluxos maiores, outra evidência da relação entre formato das bolhas e velocidade de congelamento, que decresce à medida que o congelamento avança. Nos testes da condição TV, as bolhas possuem um diâmetro visivelmente maior, convergindo com as observações de Bari e Hallet (1974) e Yoshimura, Inada e Koyama (2008).

Em contraste com o observado Bari e Hallet (1974), que foram capazes de obter gelo transparente em velocidades inferiores a $1,5 \mu\text{m/s}$, no teste NV e 700 W/m^2 , com velocidade média de $1,36 \mu\text{m/s}$, são encontradas bolhas em todo o sólido.

Ao comparar testes de igual fluxo e diferentes condições de vácuo e agitação, fica evidente que a estratégia adotada foi efetiva em aumentar significativamente o nível de transparência de cada amostra, através da remoção do ar dissolvido na água. Esse resultado é harmônico com o apresentado por diversos autores e particularmente com os testes realizados com diferentes saturações de gases dissolvidos em água por Bianchi e Viskanta (1999), onde o teste com água degaseificada foi quase transparente.

5.4 ANÁLISE DE REPETIBILIDADE

A partir da repetição do teste na condição NV com 1000 W/m^2 por mais duas vezes é possível observar uma manutenção no padrão de formação de bolhas, marginalmente mais intensos em ambos os testes repetidos, conforme mostra a Figura 5.7:

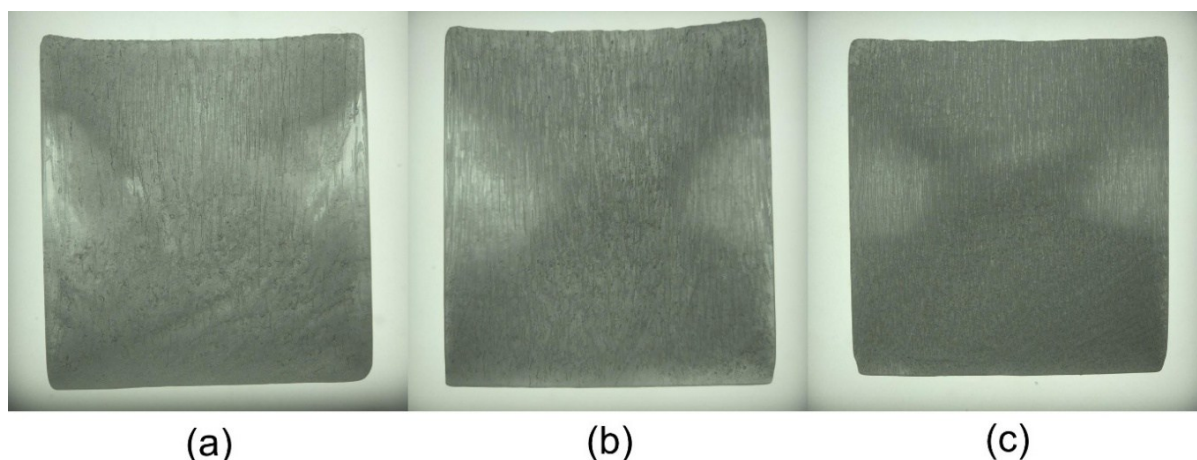


Figura 5.7 - Faces laterais dos testes NV 1000 W/m^2
Sendo: (a) primeiro teste (base), (b) segundo teste, (c) terceiro teste.

Essas características visuais vão ao encontro dos comportamentos em termos de tempo e energia utilizada para a formação do gelo, que foram marginalmente menores para os testes repetidos, conforme as tendências discutidas ao longo do trabalho e explicitadas na Tabela 5.3:

Tabela 5.3 - Análise de repetibilidade de tempo e energia total

Análise de repetibilidade	NV 1000 W/m ² Primeiro teste (base)	NV 1000 W/m ² Segundo teste	NV 1000 W/m ² Terceiro teste
Tempo [h]	8,71	7,84	7,69
Variação		-9,94%	-11,66%
Energia total [kJ]	78,43	70,65	69,27
Variação		-9,92%	-11,68%

As origens dessas variações podem ser multifatoriais, compostas por incertezas dos instrumentos de medição, variação das condições iniciais e do comportamento de mudança de fase, que não possui um ponto específico temperatura para a ocorrência do fenômeno.

5.5 RESULTADOS DOS TESTES EXTRAS

Os testes extras com condições diferentes dos principais são os testes com vácuo parcial (PV) e sem vácuo (NV) com água fervida, ambos com fluxo de 1000 W/m². Seus aspectos visuais têm forte presença de bolhas e são muito mais parecidos com os testes NV do que o teste TV para esse fluxo, ainda que haja uma pequena redução na densidade de bolhas. A Figura 5.8 mostra os gelos produzidos por esses dois testes:

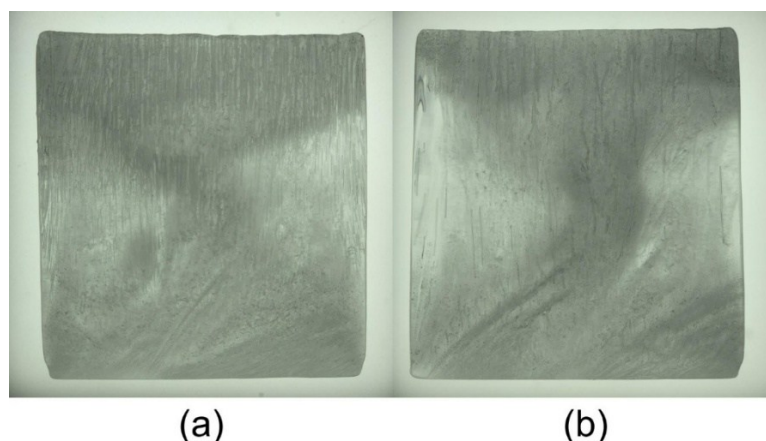


Figura 5.8 - Faces laterais dos testes extras:
(a) teste PV, (b) teste NV com água fervida

Em função do apresentado por Asakura e Yasuda (2022) e da relação entre temperatura de solubilidade do ar na água eram esperadas muito menos bolhas no gelo formado nessas duas condições, pois a água que serviu como matéria-prima, teoricamente, estava com uma quantidade muito menor de ar dissolvido. Uma possível explicação para esse resultado pode ser devido à regaseificação durante produção do gelo, devido a exposição a condições de temperatura externa baixa e pressão ambiente. A Tabela 5.4 mostra os dados gerais desses testes:

Tabela 5.4 - Resultados de tempo e temperatura dos testes extras

Testes extras	PV 1000 W/m ² Vácuo parcial	NV 1000 W/m ² Sem vácuo e água fervida
Tempo [h]	7,22	7,45
Energia total [kJ]	65,02	67,04

6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou um estudo do aspecto visual de cubos de gelo, buscando desenvolver uma nova estratégia para atingir cubos mais transparentes num período menor, através da construção de uma bancada experimental capaz de produzir cubos de gelo e avaliar seu aspecto visual e condições de produção.

A partir dos resultados, as seguintes observações foram assinaladas:

- Em linha com a literatura, foi percebido que gelos produzidos numa velocidade mais reduzida capturavam menos bolhas na sua fase sólida e apresentavam um aspecto visual mais transparente.
- Sujeitar o ambiente de congelamento durante todo o processo a um ambiente de baixa pressão, após agitação em baixa pressão, foi uma estratégia efetiva para a redução do número de bolhas e o aumento da transparência do cubo de gelo, para uma dada condição de fluxo de calor.
- Realizar agitação sob baixa pressão apenas antes do teste não teve um impacto significativo na transparência para uma dada condição de fluxo de calor. As razões disso ainda são incertas, podendo estar relacionadas à não remoção do ar dissolvido durante o processo, devido a falhas nesse sistema ou devido à regaseificação do líquido após a pressão ambiente ser reestabelecida no sistema.
- Da mesma forma, a fervura da água teve não teve um impacto significativo no aspecto visual, seja pela não remoção do ar durante a fervura, pela regaseificação durante o manuseio da amostra ou durante o teste.
- Um ambiente de baixa pressão teve um melhor desempenho energético e de tempo de produção de gelo, apontando para uma possível estratégia a ser

adotada por sistemas de refrigeração que produzem gelo e buscam uma melhoria de desempenho.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Pelo fato da demanda comercial por gelo de maior qualidade visual ser um fenômeno recente, existem poucos estudos sobre o tema orientados para esse fim. A seguir, possibilidades de trabalhos futuros são sugeridos como maneira de preencher as lacunas no conhecimento existente:

- Avaliar se há regaseificação durante o processo de congelamento em amostras de água previamente desgaseificadas.
- Estudar o impacto da superfície no grau de resfriamento e no aspecto visual do gelo
- Produzir cubos de gelo sob condição de agitação da água.
- Produzir cubos de gelo em baixa pressão em condições típicas de refrigeradores domésticos.

REFERÊNCIAS

AMAZON. [Máquina de gelo transparente em silicone para coquetéis e bebidas]. Disponível em: <https://a.co/d/1CoEQdj>. Acesso em: 2 abr. 2025.

ASAKURA, Yoshiyuki.; YASUDA, Keiji. Frequency and power dependence of ultrasonic degassing. *Ultrasonics Sonochemistry*, v. 82, p. 105890, 2022.

BARI, S. A.; HALLETT, J. Nucleation and growth of bubbles at an ice-water interface. *Journal of Glaciology*, v. 13, n. 67, p. 489–520, 1974.

BIANCHI, Marcus V. A.; VISKANTA, Raymond. The effect of air bubbles on the diffusion-controlled solidification of water and aqueous solutions of ammonium chloride. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 42, p. 1097–1110, 1999.

BOSCH HOME APPLIANCES. Bosch study reveals Americans are "ice obsessed" and hydration directly impacts overall wellbeing. 2 dez. 2020. Disponível em: <https://www.bosch-home.com/us/press/pressrelease-5056>. Acesso em: 1 abr. 2025.

BRIDGMAN, P. W. Certain physical properties of single crystals of tungsten, antimony, bismuth, tellurium, cadmium, zinc, and tin. *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*, v. 60, n. 6, p. 305–383, 1925.

CALLISTER, William D. Jr.; RETHWISCH, David G. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CARTE, A. E. Air bubbles in ice. *Proceedings of the Physical Society*, v. 77, n. 3, p. 757–768, mar. 1961.

CIBSE JOURNAL. Module 16: Reducing operational energy consumption by deaeration and dirt removal in water systems. Mai. 2010. Disponível em: <https://www.cibsejournal.com/cpd/modules/2010-05/>. Acesso em: 6 abr. 2025.

DALLEY, Stephanie. Mari and Karana: Two Old Babylonian Cities. New Jersey: Gorgias Press LLC, 2002.

EATER. Why All the Best Cocktail Bars in NYC Buy Their Ice From Richard Boccatto — Vendors. 22 mai. 2023. Disponível em: <https://youtu.be/ET8mqVGDQ1s>. Acesso em: 2 abr. 2025.

GÜTHS, S. Anémomètre à effet Peltier et fluxmètre thermique: conception et réalisation. Application à l'étude de la convection naturelle. 1994. Tese (Doutorado) – Université d'Artois, França.

HAHN, David W.; ÖZISIK, M. Necati. Heat conduction. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.

HOSSEINI, Bahareh; NAMAZIAN, Ali. An overview of Iranian ice repositories: an example of traditional indigenous architecture. METU Journal of the Faculty of Architecture, v. 29, n. 2, p. 223–234, 2012.

LAMÉ, G.; CLAPEYRON, B. P. Solidification par refroidissement d'un globe liquide. Annales de Chimie et de Physique, v. 47, p. 250–256, 1831.

LIPP, G.; KÖRBER, Ch.; ENGLISH, S.; HARTMANN, U.; RAU, G. Investigation of the behavior of dissolved gases during freezing. Cryobiology, v. 24, n. 6, p. 489–503, 1987.

MAGAZINE LUIZA. [Geladeira Refrigerador LG Frost Free Side by Side 598L com Dispenser de Água – GC-X257C]. Disponível em: <https://a-static.mlcdn.com.br/1500x1500/geladeira-refrigerador-lg-frost-free-side-by-side-598l-com-dispenser-de-agua-gc-x257c/magazineluiza/235051400/07613daffd7f1f850bc616c5b11cb53d.jpg>. Acesso em: 2 abr. 2025.

MAENO, N. Air bubble formation in ice. Physics of Snow and Ice: proceedings, v. 1, n. 1, p. 207–218, 1967.

MELO, Fabio de Souza. Um estudo teórico e experimental da produção de gelo transparente em condições típicas de refrigeração doméstica. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2024.

MERCADO LIVRE. [Motor Compressor Embraco 1/4 FFU80HAK Gás R134a 220V + Filtro]. Disponível em: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1194380955-motor-compressor-embraco-14-ffu80hak-gas-r134a-220vfiltro-_JM. Acesso em: 22 maio 2025.

MURAKAMI, Kenji; NAKAJIMA, Hideo. Formation of pores during unidirectional solidification of water containing carbon dioxide. *Materials Transactions*, v. 43, n. 10, p. 2582–2588, 2002.

REES, Jonathan. *Before the Refrigerator: How We Used to Get Ice*. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2018.

RESEARCH AND MARKETS. Ice Makers Presents a \$7.4 Billion Global Market Opportunity by 2033: Analysis of Growth Trends by Product Type, End Use Sector and Region. 25 fev. 2025. Disponível em: <https://www.globenewswire.com/news-release/2025/02/25/3031893/28124/en/Ice-Makers-Presents-a-7-4-Billion-Global-Market-Opportunity-by-2033-Analysis-of-Growth-Trends-by-Product-Type-End-Use-Sector-and-Region.html>. Acesso em: 6 abr. 2025.

RIEMANN, B.; WEBER, H. *Die partiellen Differentialgleichungen der mathematischen Physik*. 5. ed. v. 2. Leipzig: B. G. Teubner, 1912.

STEFAN, J. Über die Theorie der Eisbildung, insbesondere über die Eisbildung im Polarmeere. *Annalen der Physik und Chemie (Wiedemannsche Annalen)*, v. 42, n. 2, p. 269–286, 1891.

WIKIMEDIA COMMONS. Ice Harvesting, Massachusetts, 1852. 2012. Imagem digital de obra original de 1852. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Ice_trade#/media/File:Ice_Harvesting,_Massachusetts,_early_1850s.jpg. Acesso em: 5 jun. 2025.

WIKIMEDIA COMMONS. Phase diagram of water (simplified). 2025. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Phase_diagram_of_water_simplified.svg.

Acesso em: 16 mai. 2025.

WIKIMEDIA COMMONS. Yakhchal of Yazd province. 25 set. 2008. Imagem. Disponível em:

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Yakhchal_of_Yazd_province.jpg. Acesso em: 28 mar. 2025.

ICE TRADE. In: WIKIPEDIA: the free encyclopedia. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Ice_trade. Acesso em: 31 mar. 2025.

YAHOO FINANCE. Ice Market Global Market Report 2023. 28 jun. 2023. Disponível em: <https://finance.yahoo.com/news/ice-market-global-market-report-175400701.html>. Acesso em: 6 abr. 2025.

YOSHIMURA, Kenji; INADA, Takaaki; KOYAMA, Shigeru. Growth of spherical and cylindrical oxygen bubbles at an ice–water interface. *Crystal Growth & Design*, v. 8, n. 7, p. 2108–2115, 2008.

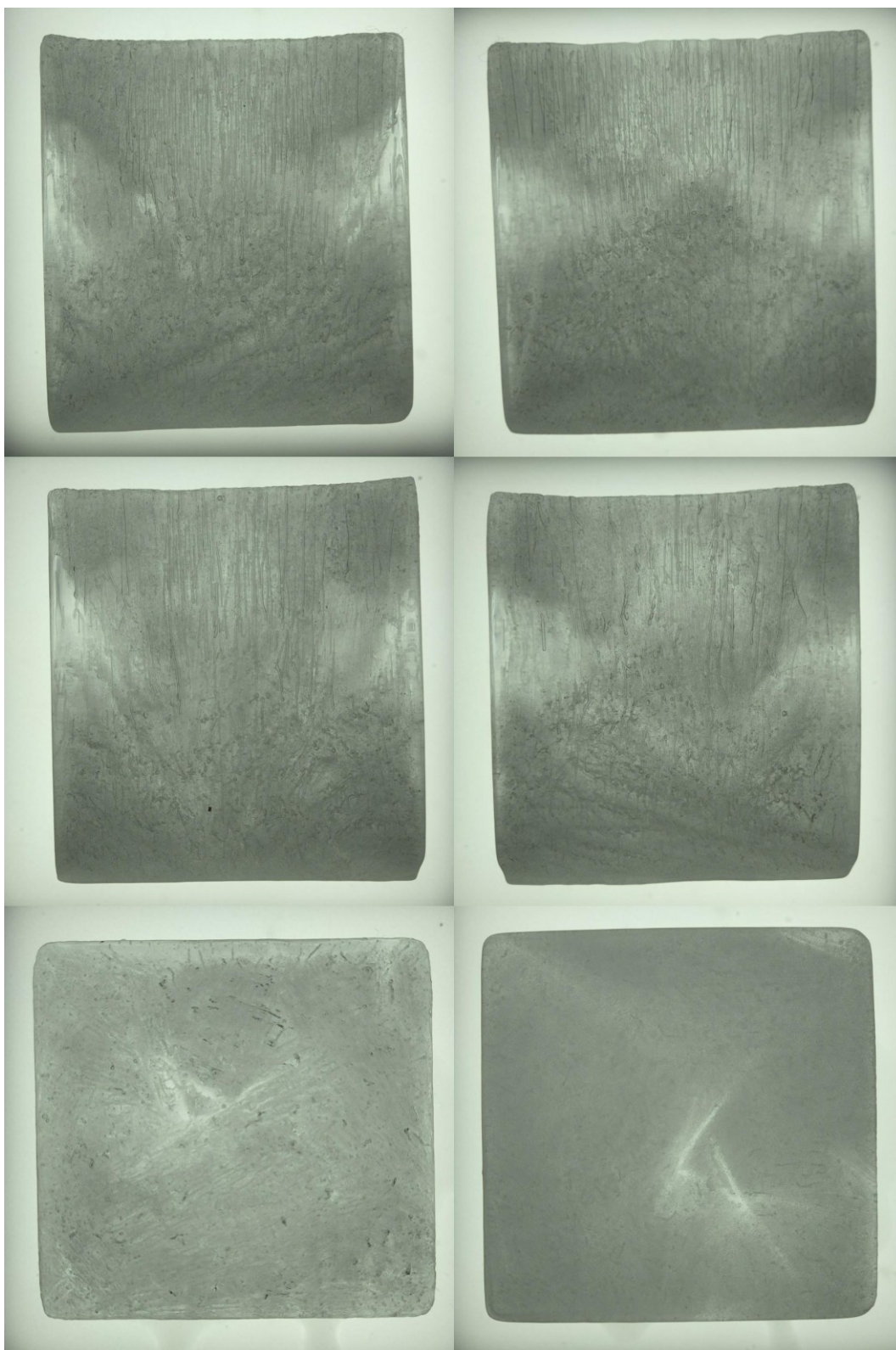
APÊNDICE A – IMAGENS DAS FACES DOS CUBOS DE GELO

Figura A.1 - Faces do primeiro teste com 1000 W/m^2 na condição NV.
As imagens das duas primeiras linhas são referentes às faces laterais, a imagem na linha inferior à esquerda é referente ao topo e na linha inferior à direita à base.

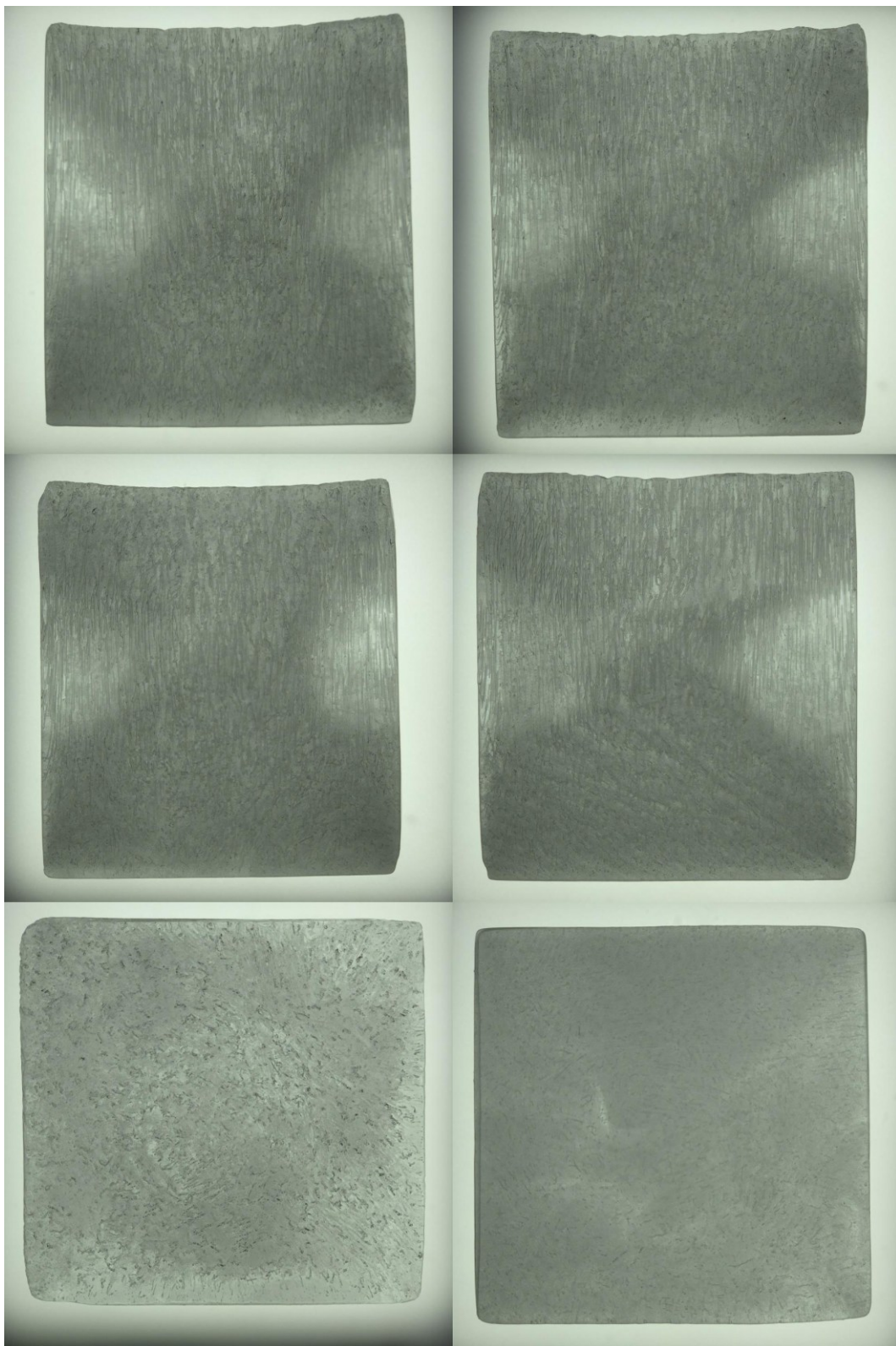


Figura A.2 - Faces do segundo teste com 1000 W/m^2 na condição NV.
As imagens das duas primeiras linhas são referentes às faces laterais, a imagem na linha inferior à esquerda é referente ao topo e na linha inferior à direita à base.

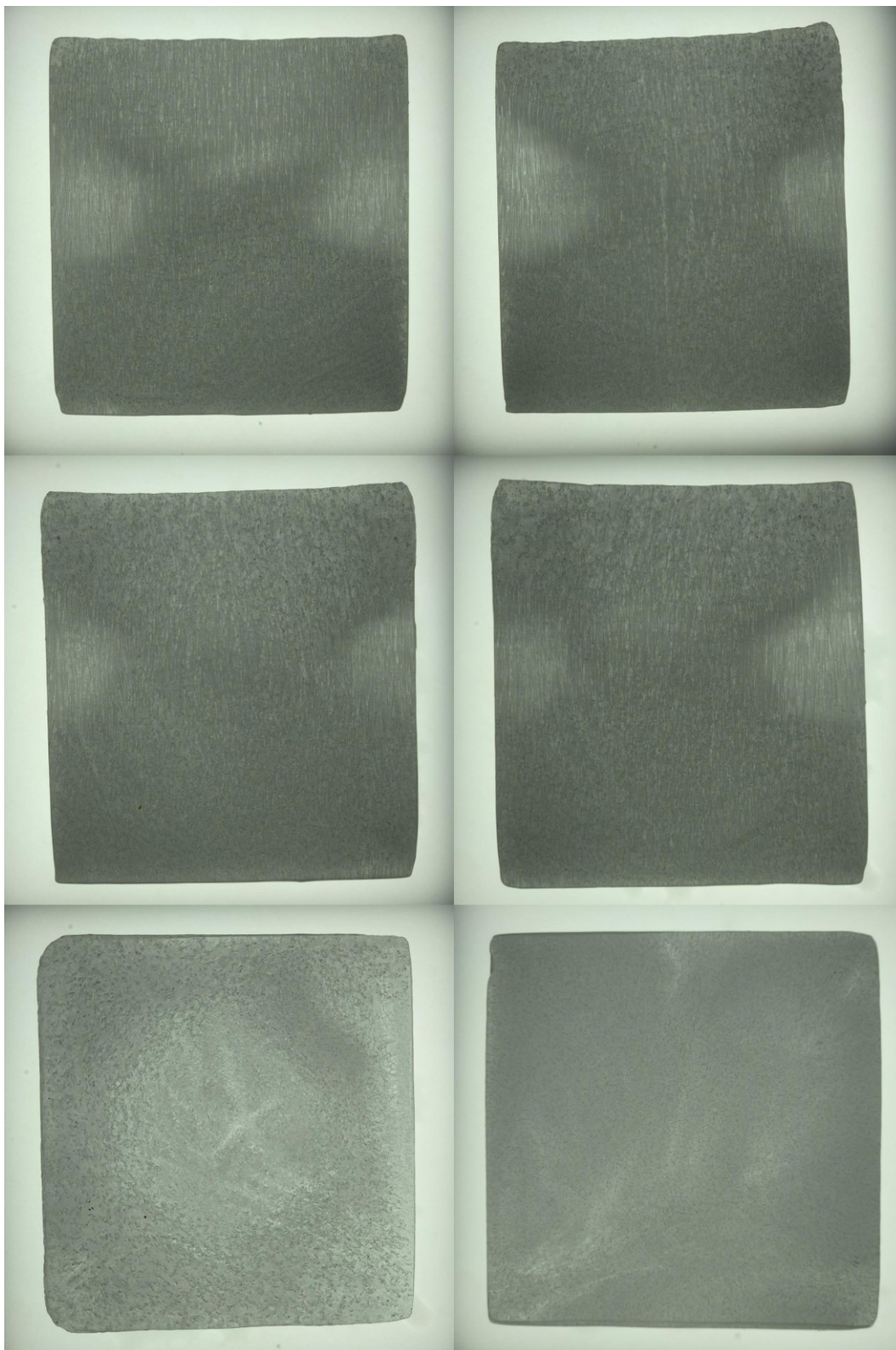


Figura A.3 - Faces do terceiro teste com 1000 W/m^2 na condição NV.
As imagens das duas primeiras linhas são referentes às faces laterais, a imagem na linha inferior à esquerda é referente ao topo e na linha inferior à direita à base.

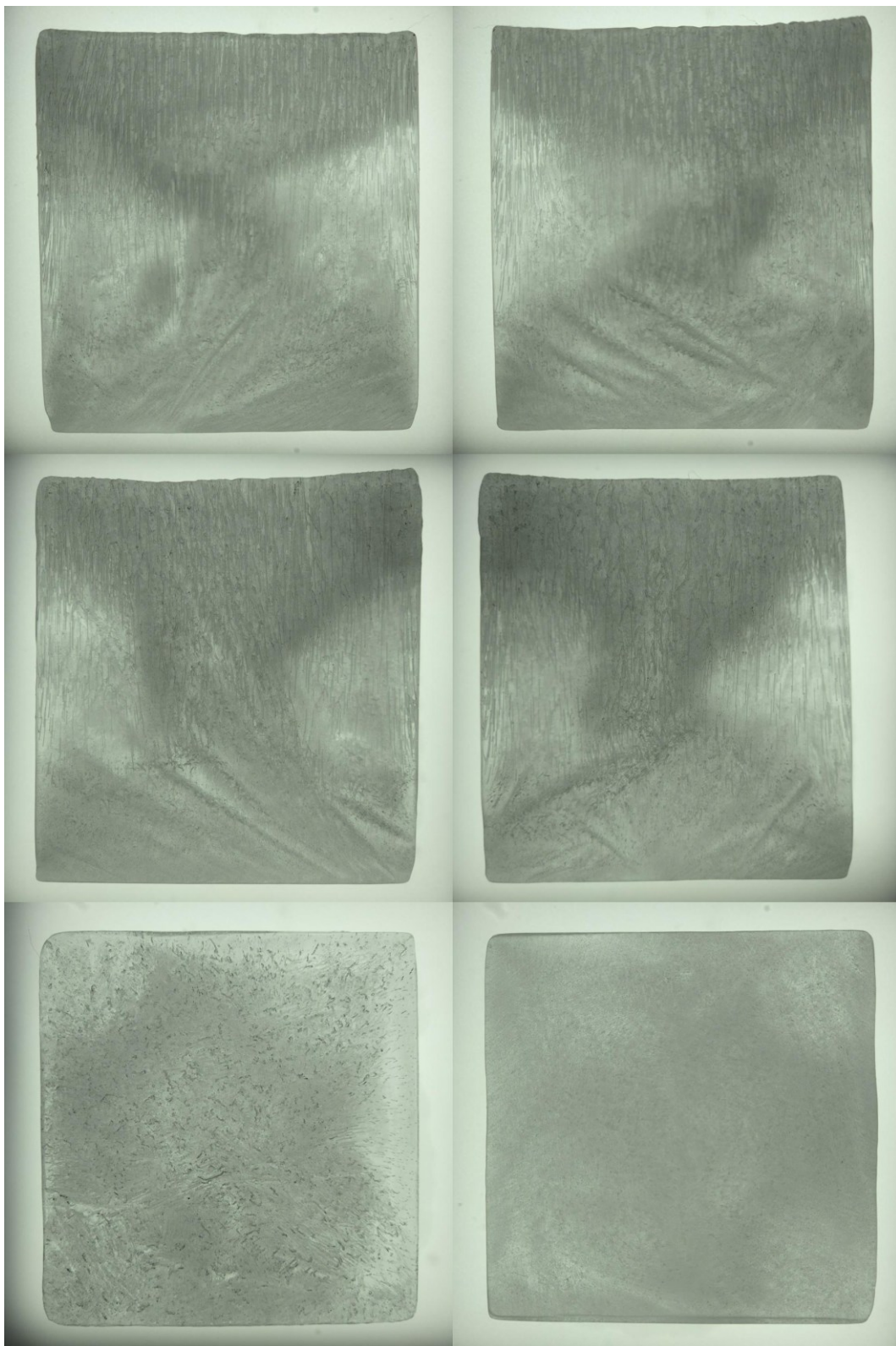


Figura A.4 - Faces do teste com 1000 W/m^2 na condição PV.
As imagens das duas primeiras linhas são referentes às faces laterais, a imagem na linha inferior à esquerda é referente ao topo e na linha inferior à direita à base.

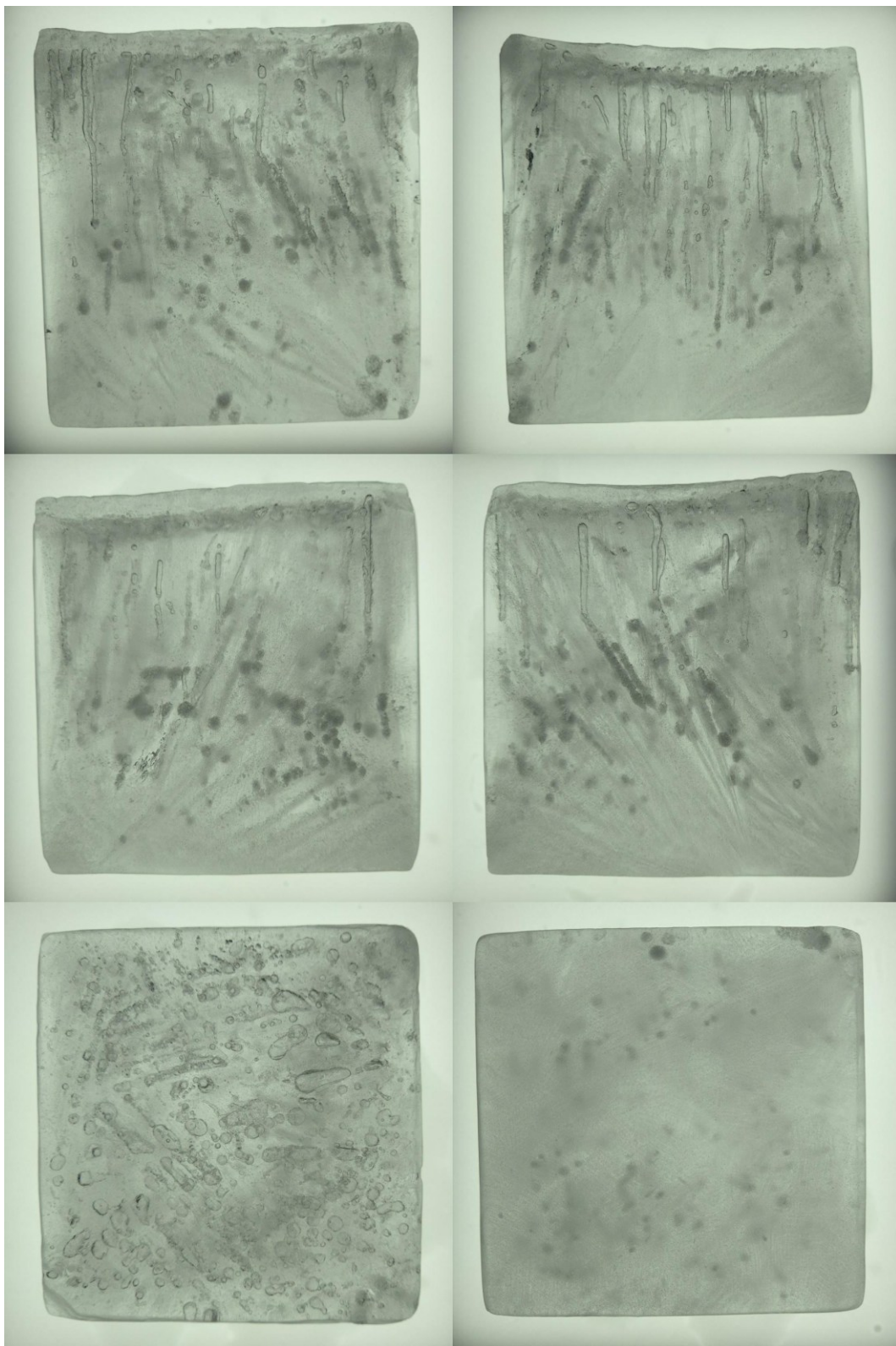


Figura A.5 - Faces do teste com 1000 W/m^2 na condição TV.
As imagens das duas primeiras linhas são referentes às faces laterais, a imagem na linha inferior à esquerda é referente ao topo e na linha inferior à direita à base.

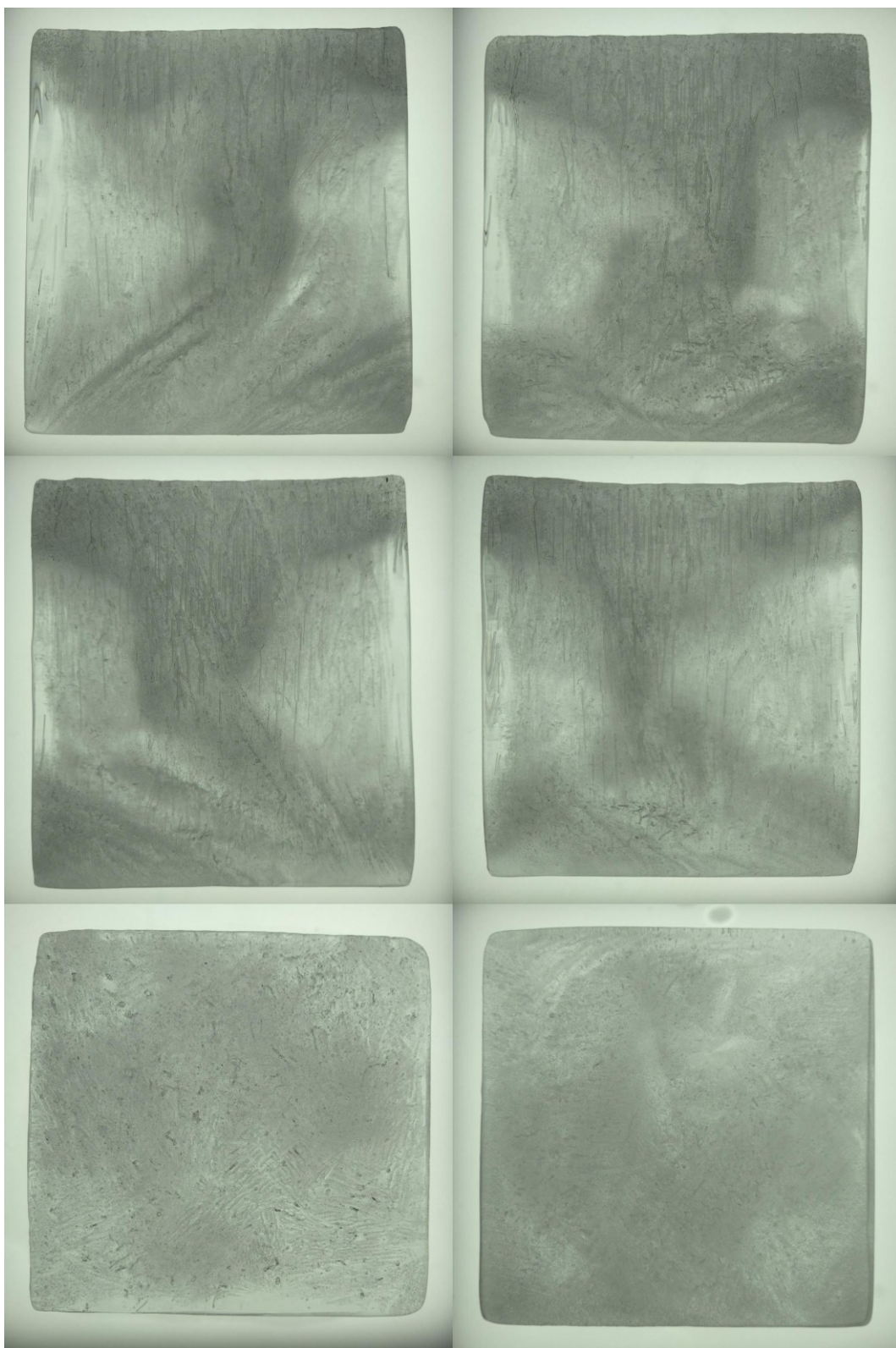


Figura A.6 - Faces do teste com 1000 W/m^2 com água fervida.
As imagens das duas primeiras linhas são referentes às faces laterais, a imagem na linha inferior à esquerda é referente ao topo e na linha inferior à direita à base.

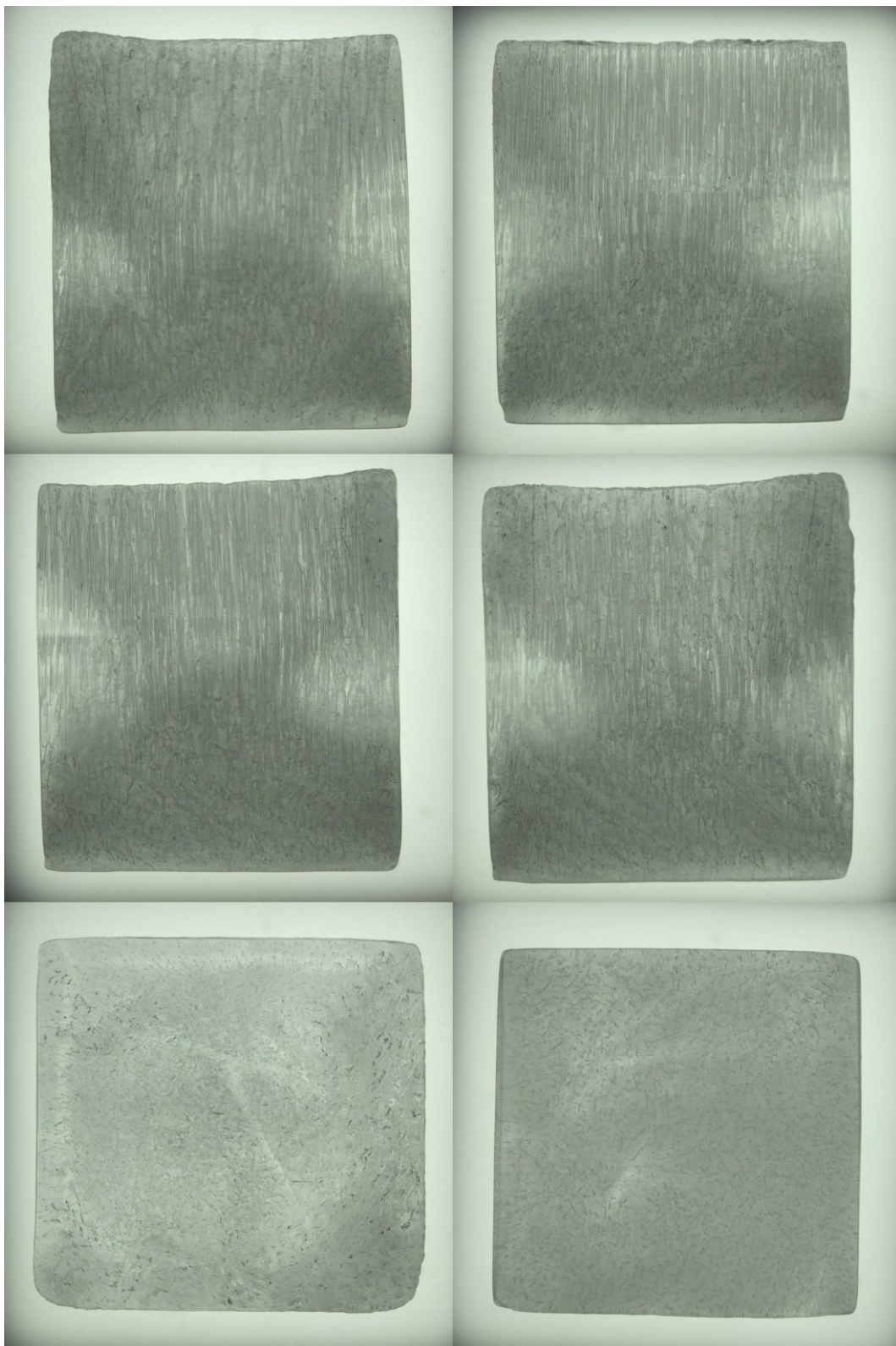


Figura A.7 - Faces do teste com 700 W/m^2 na condição NV.
As imagens das duas primeiras linhas são referentes às faces laterais, a imagem na linha inferior à esquerda é referente ao topo e na linha inferior à direita à base.

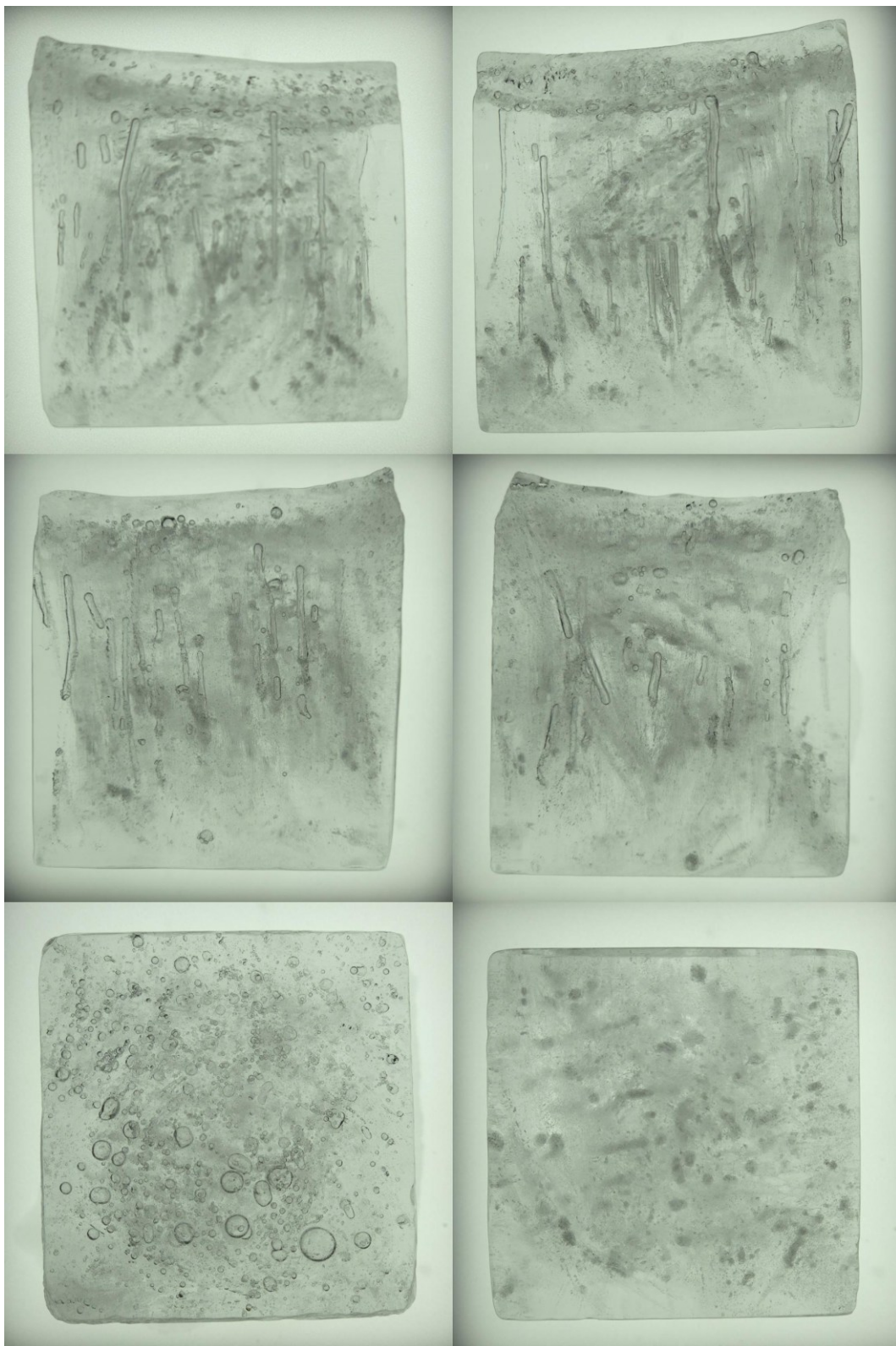


Figura A.8 - Faces do teste com 700 W/m^2 na condição TV.
As imagens das duas primeiras linhas são referentes às faces laterais, a imagem na linha inferior à esquerda é referente ao topo e na linha inferior à direita à base.

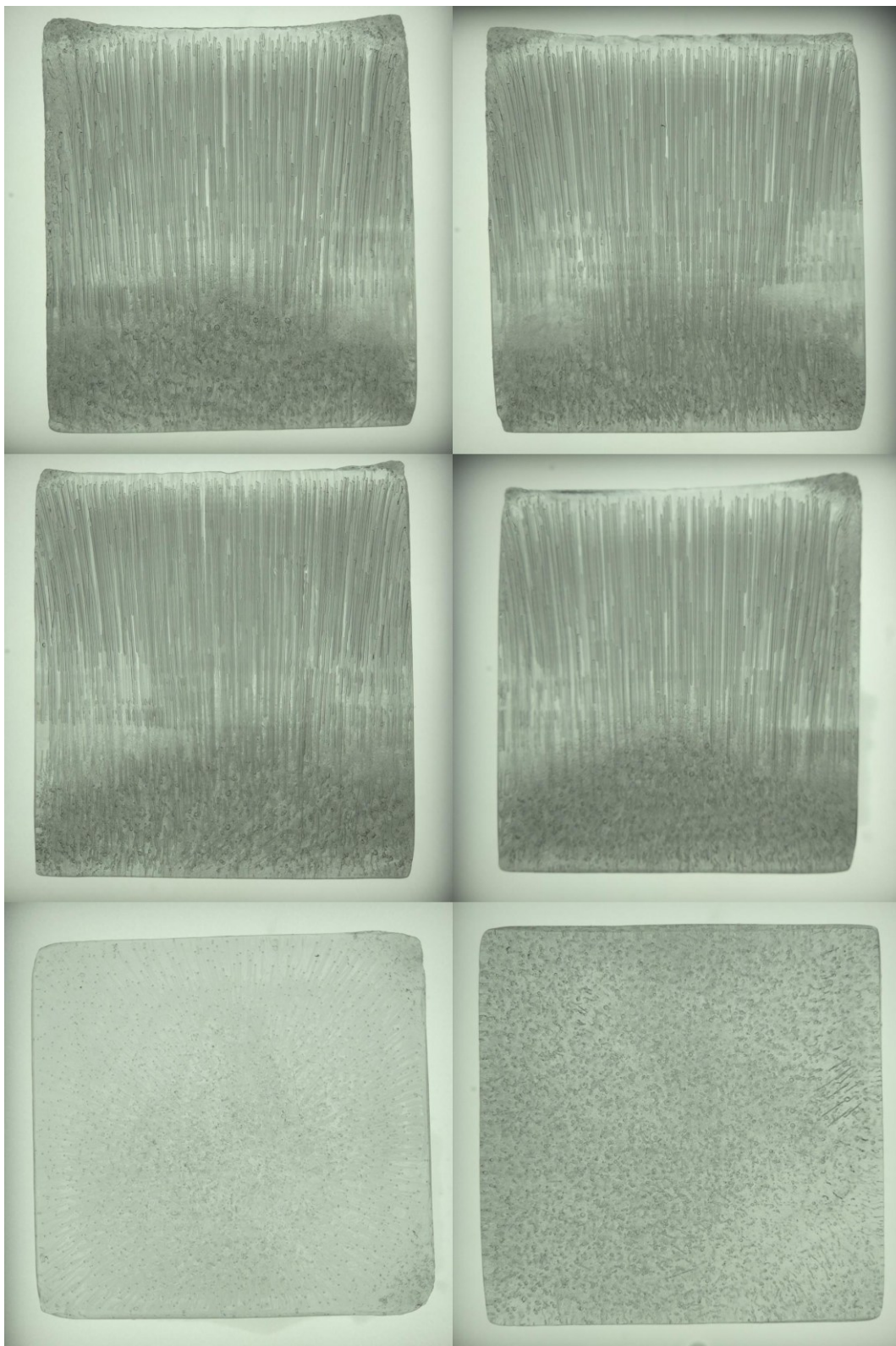


Figura A.9 - Faces do teste com 400 W/m^2 na condição NV.
As imagens das duas primeiras linhas são referentes às faces laterais, a imagem na linha inferior à esquerda é referente ao topo e na linha inferior à direita à base.

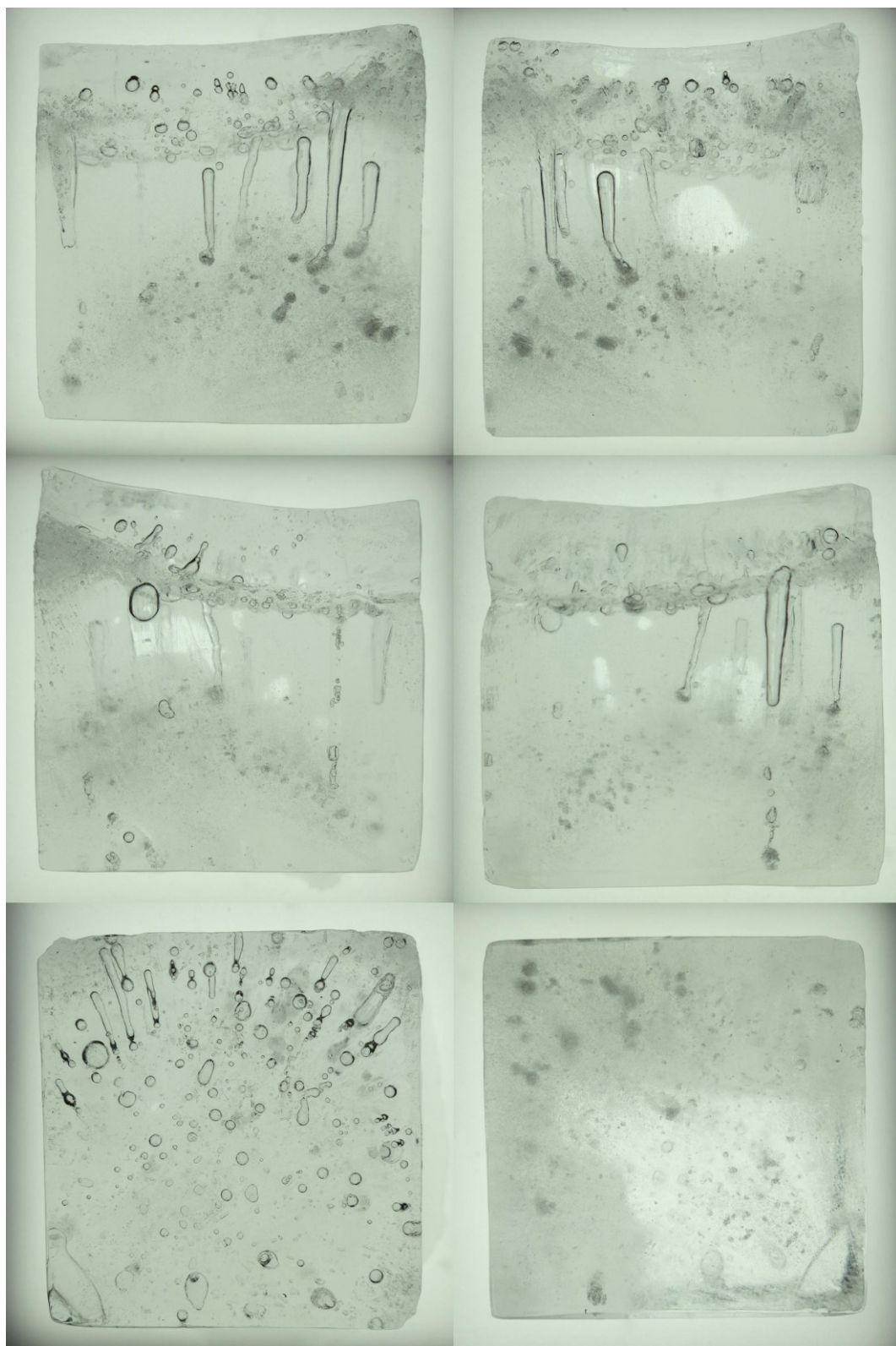


Figura A.10 - Faces do teste com 400 W/m^2 na condição TV.
As imagens das duas primeiras linhas são referentes às faces laterais, a imagem na linha inferior à esquerda é referente ao topo e na linha inferior à direita à base.

APÊNDICE B – GRÁFICOS DE TEMPERATURA E FLUXO DE CALOR

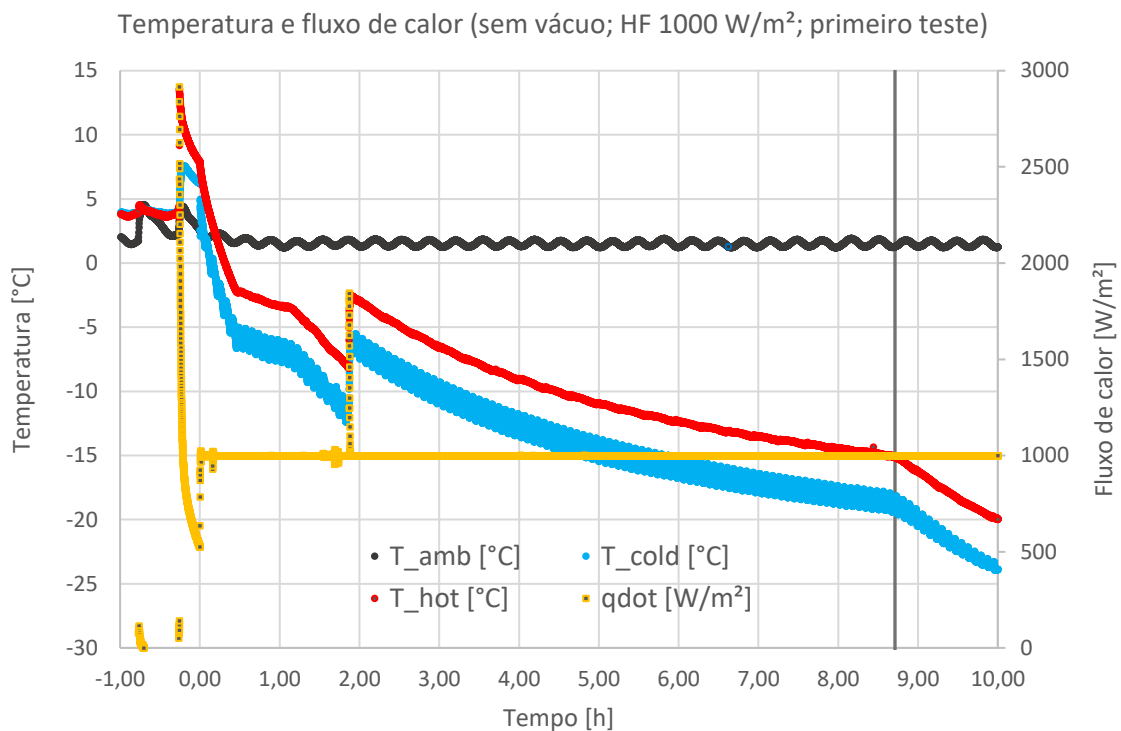


Figura B.1 - Gráfico de temperatura e fluxo de calor do primeiro teste de 1000 W/m² na condição NV

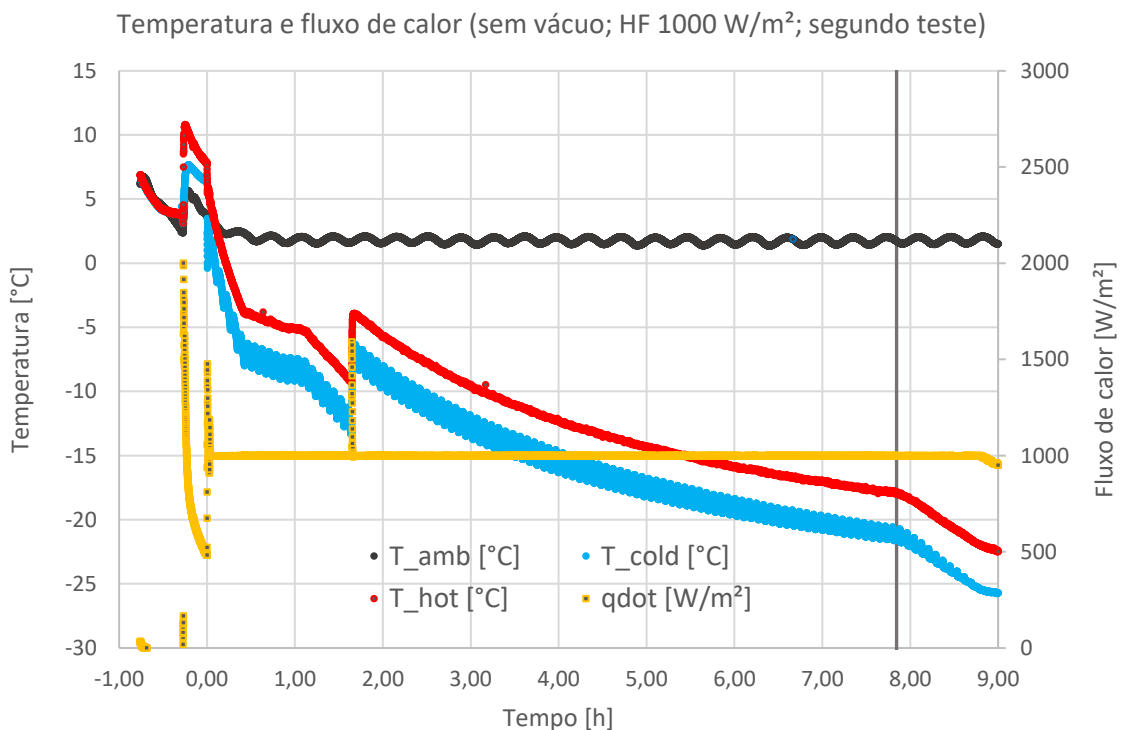


Figura B.2 - Gráfico de temperatura e fluxo de calor do segundo teste de 1000 W/m² na condição NV

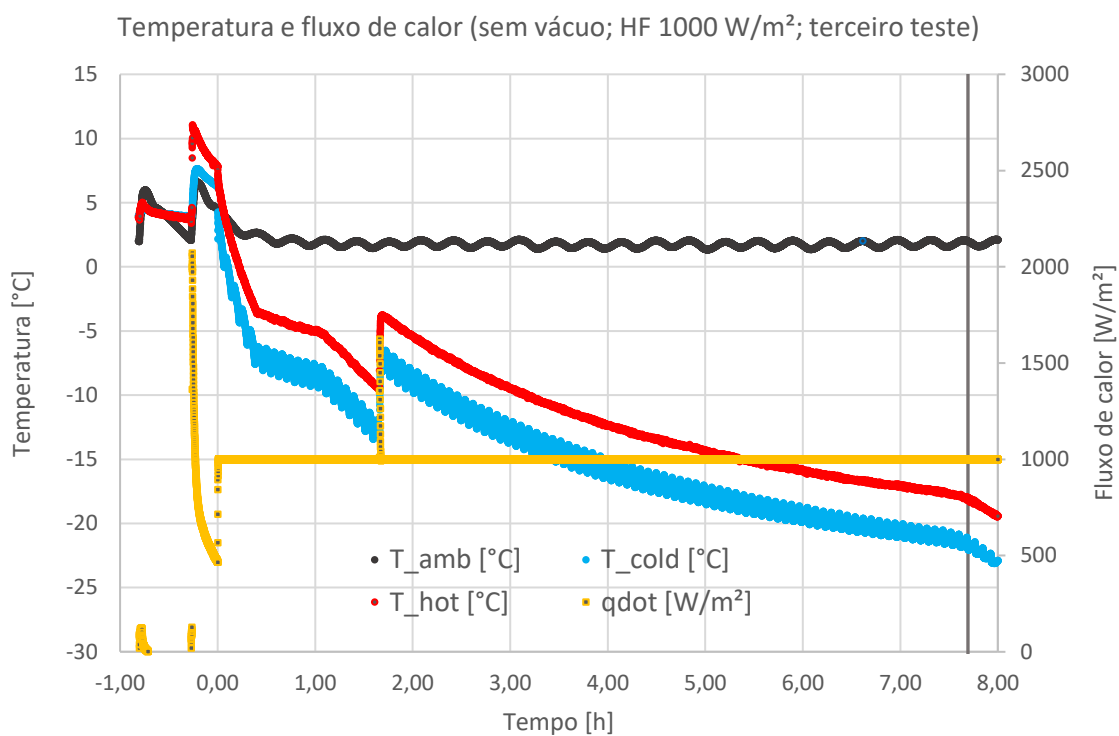


Figura B.3 - Gráfico de temperatura e fluxo de calor do terceiro teste de 1000 W/m² na condição NV

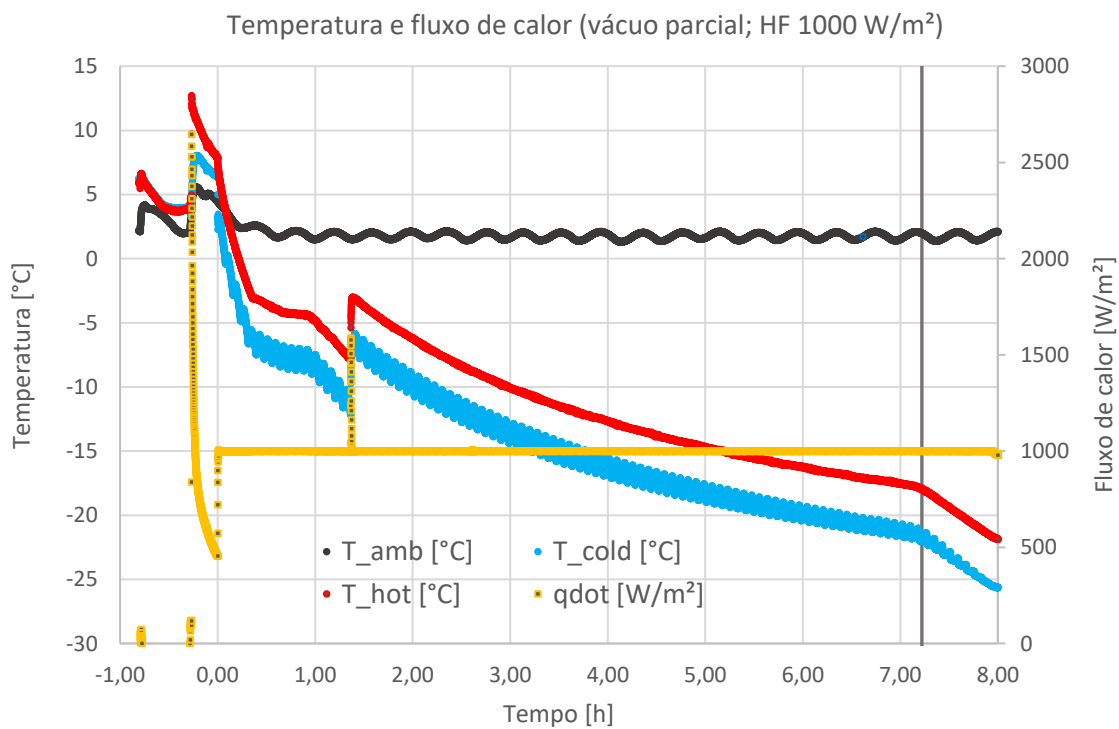


Figura B.4 - Gráfico de temperatura e fluxo de calor do teste de 1000 W/m² na condição PV

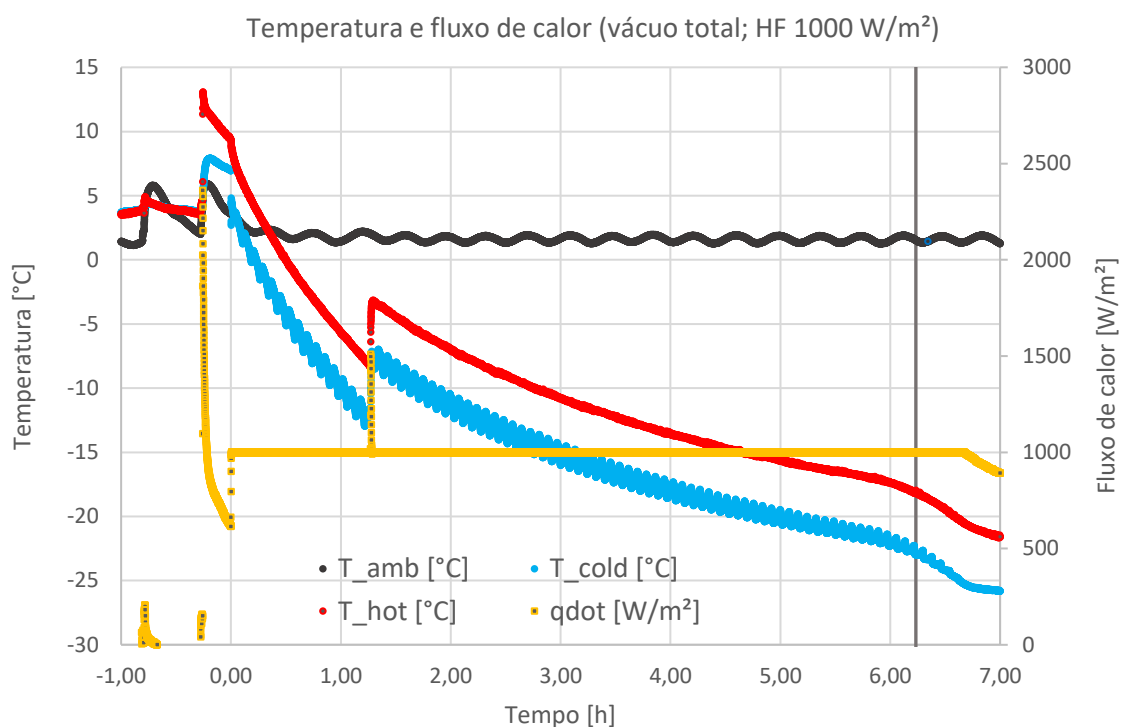


Figura B.5 - Gráfico de temperatura e fluxo de calor do teste de 1000 W/m² na condição TV

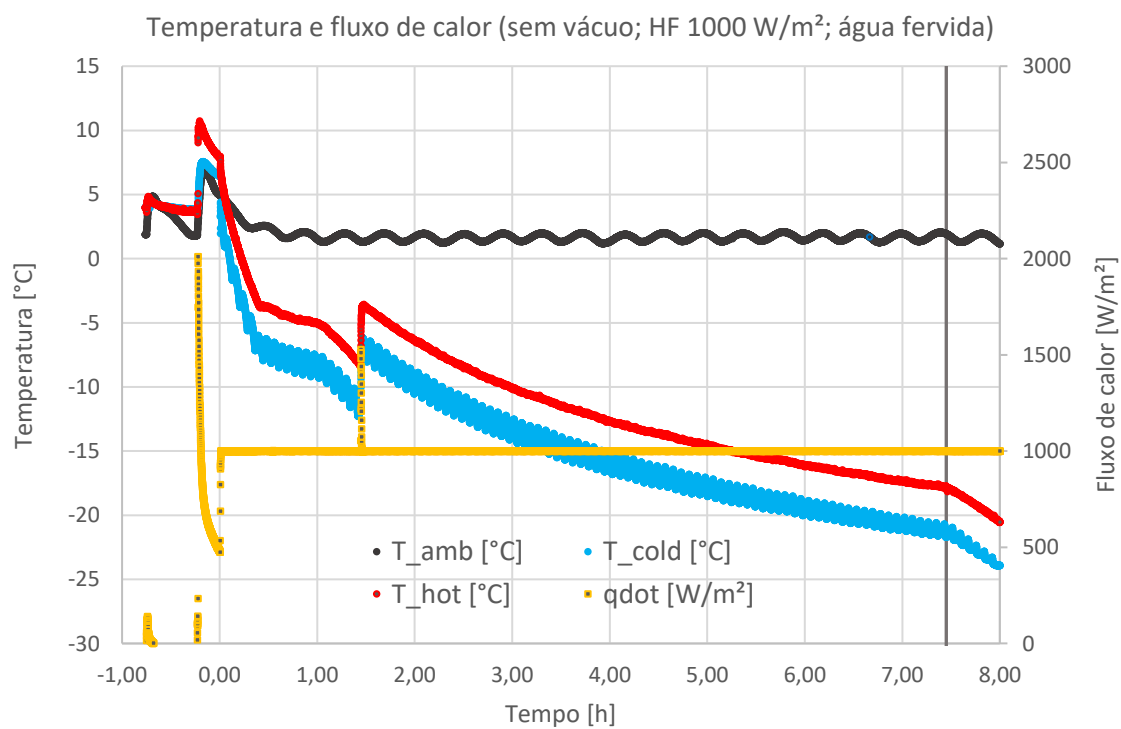


Figura B.6 - Gráfico de temperatura e fluxo de calor do teste de 1000 W/m² com água fervida

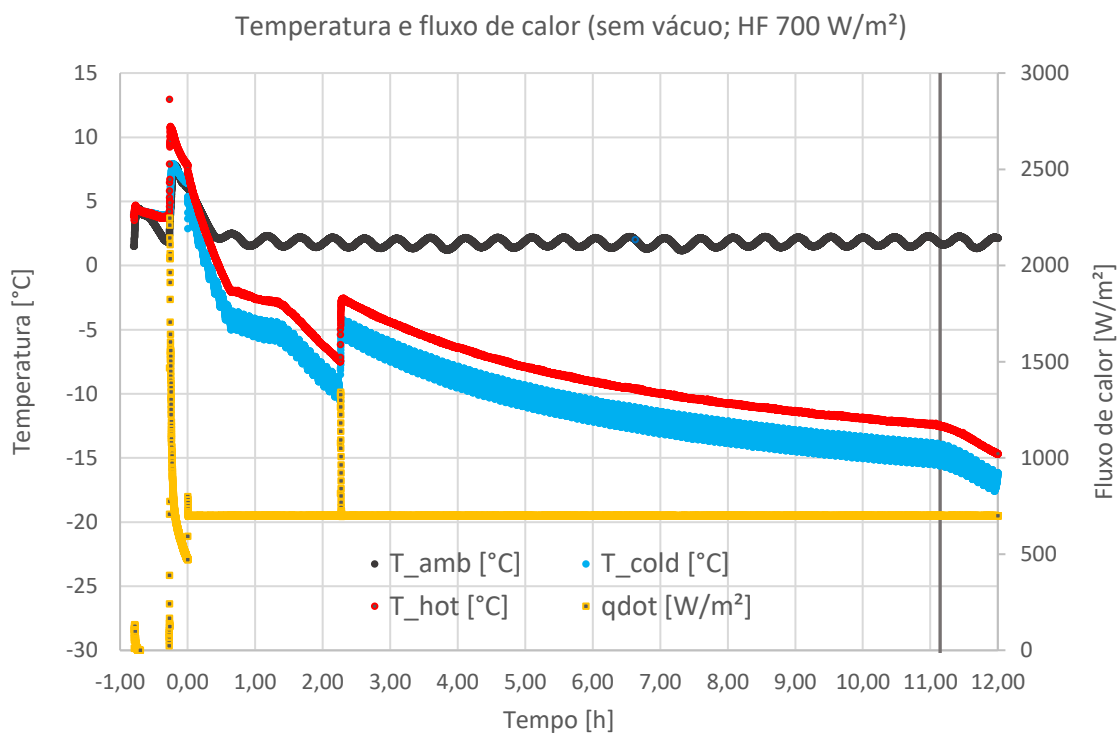


Figura B.7 - Gráfico de temperatura e fluxo de calor do teste de 700 W/m² na condição NV

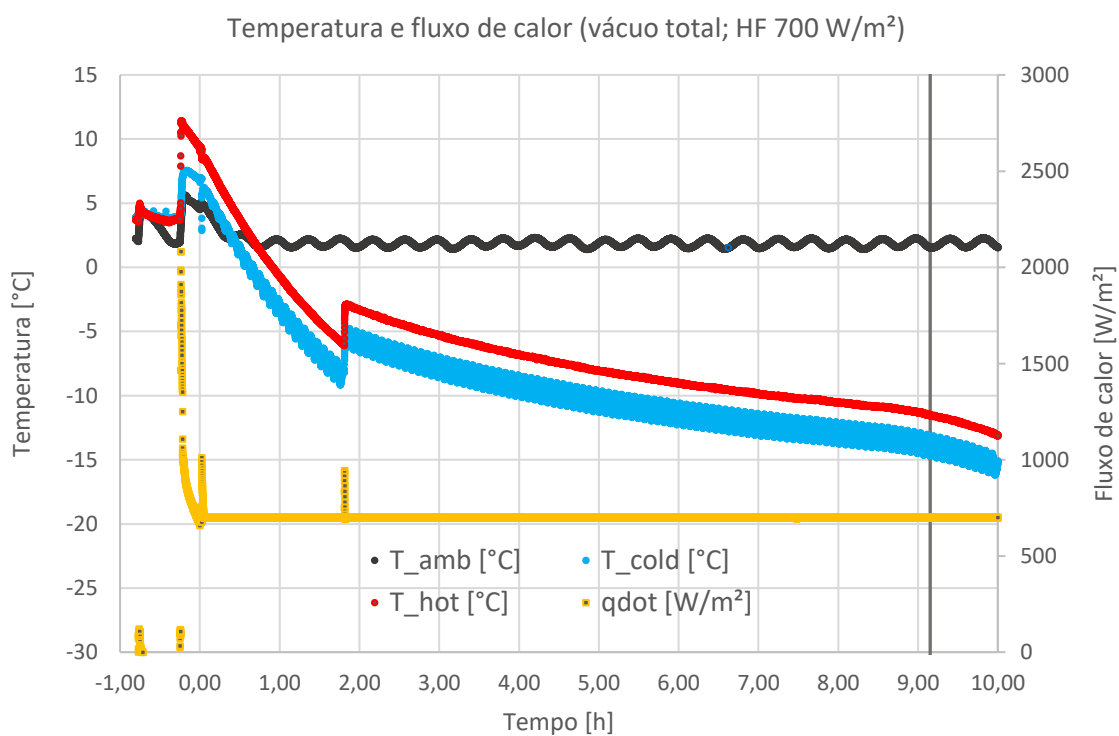


Figura B.8 - Gráfico de temperatura e fluxo de calor do teste de 700 W/m² na condição TV

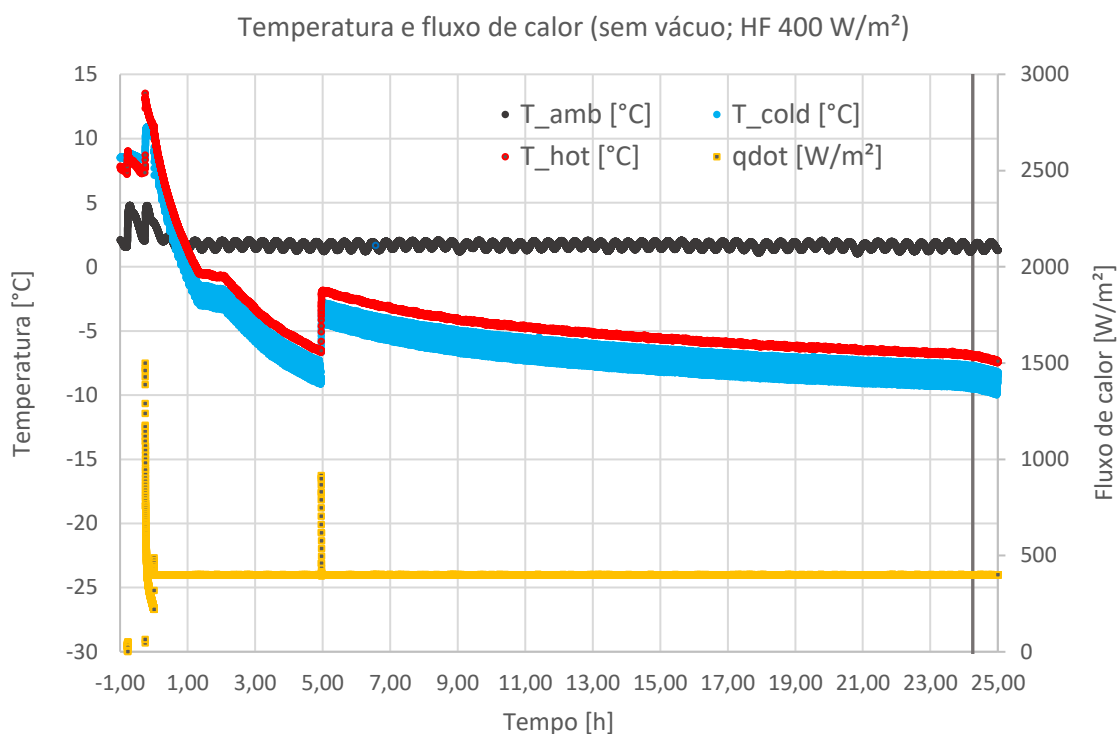


Figura B.9 - Gráfico de temperatura e fluxo de calor do teste de 400 W/m² na condição NV

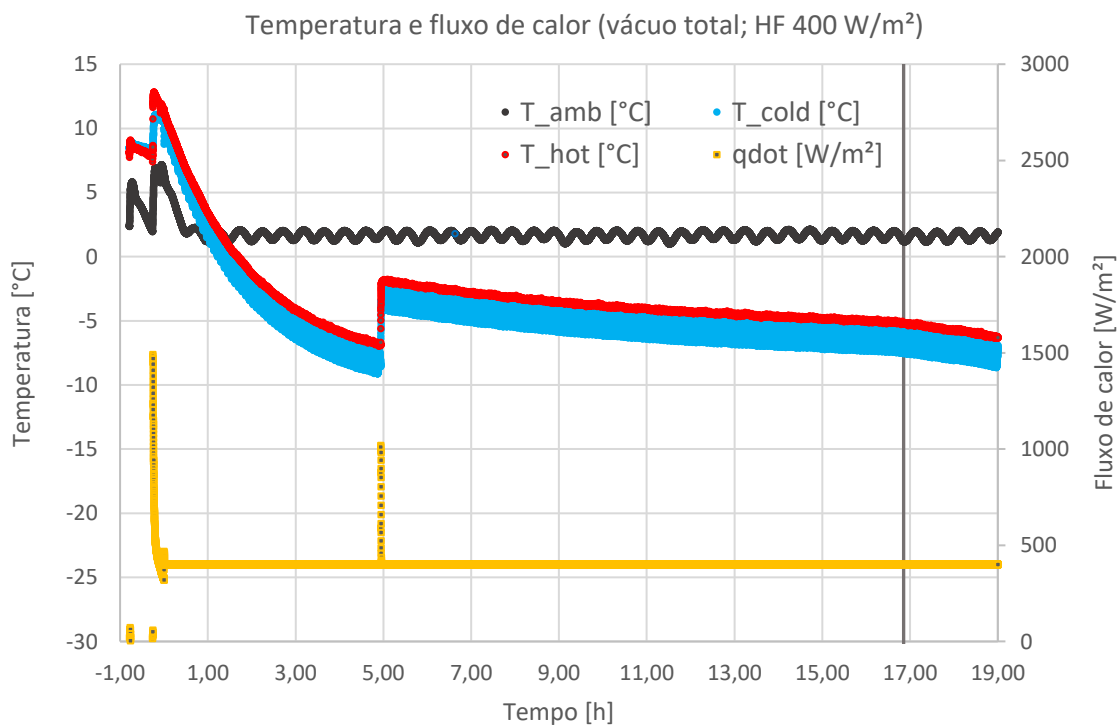
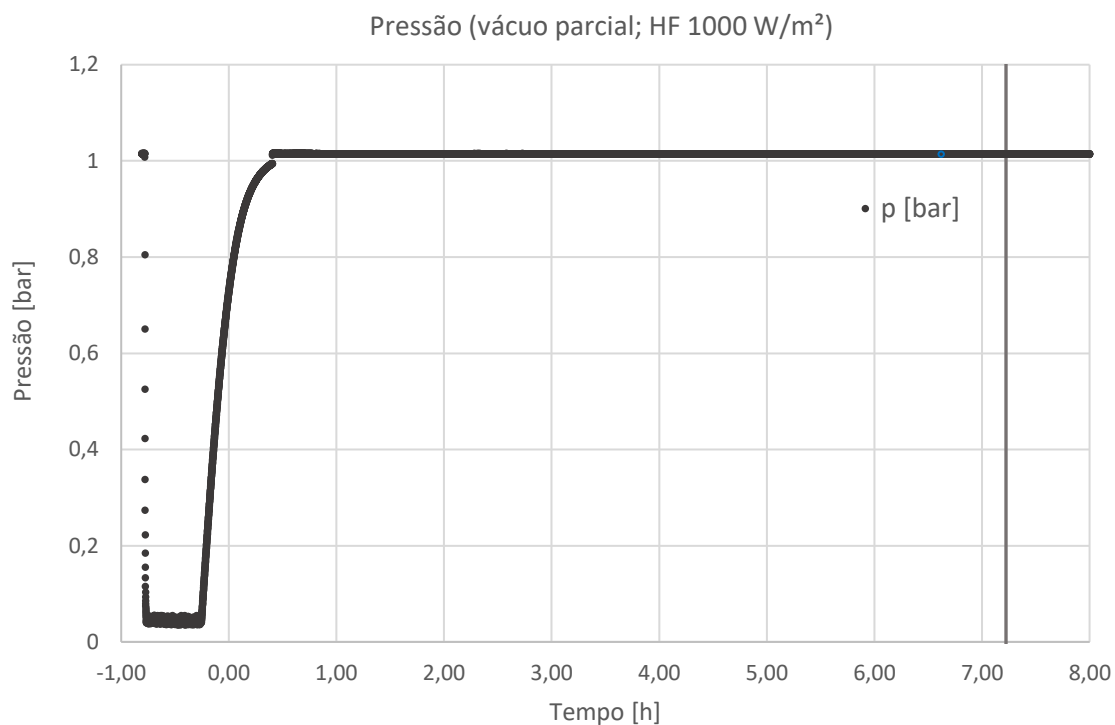
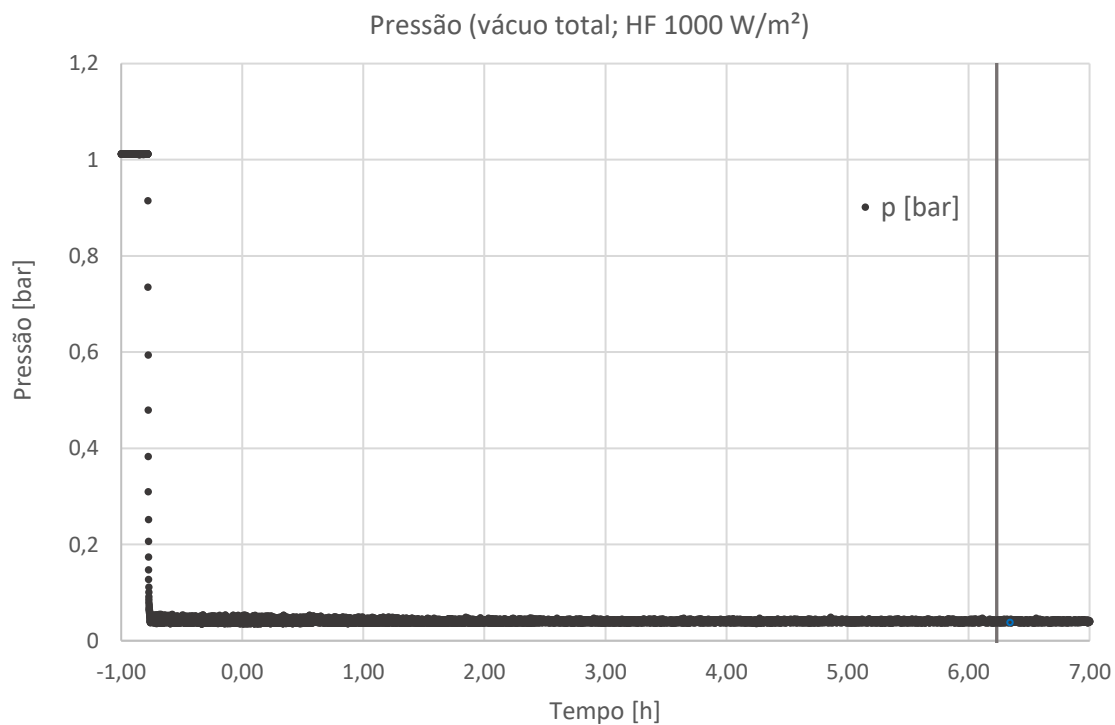
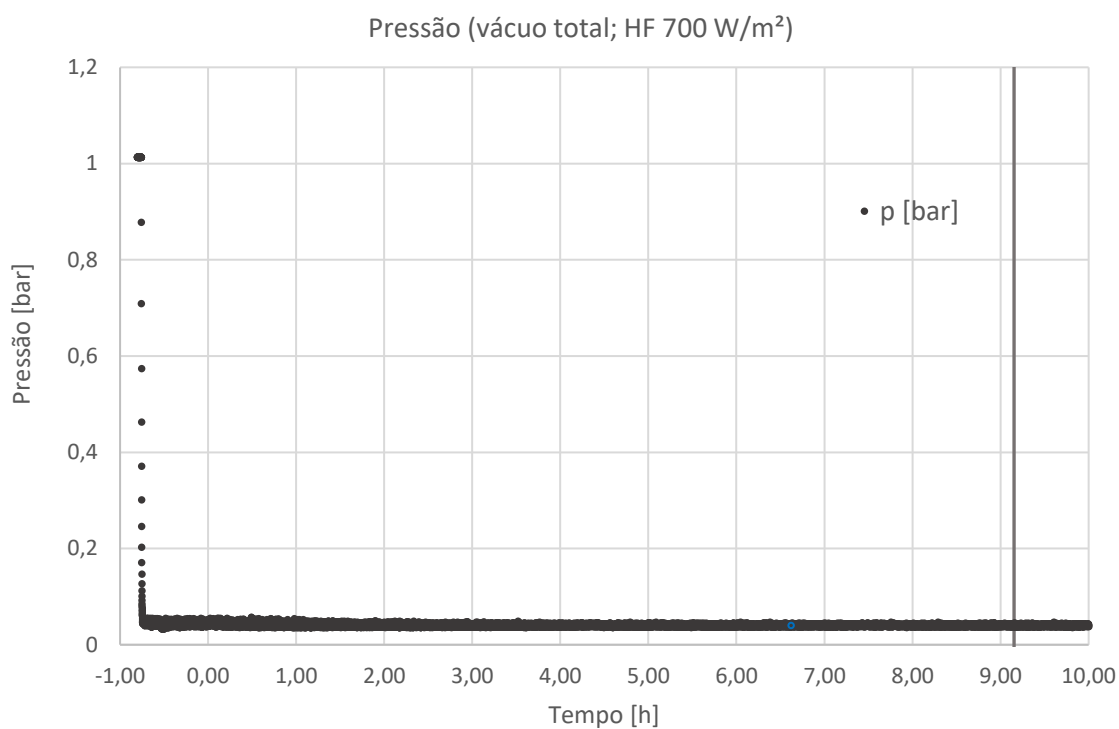
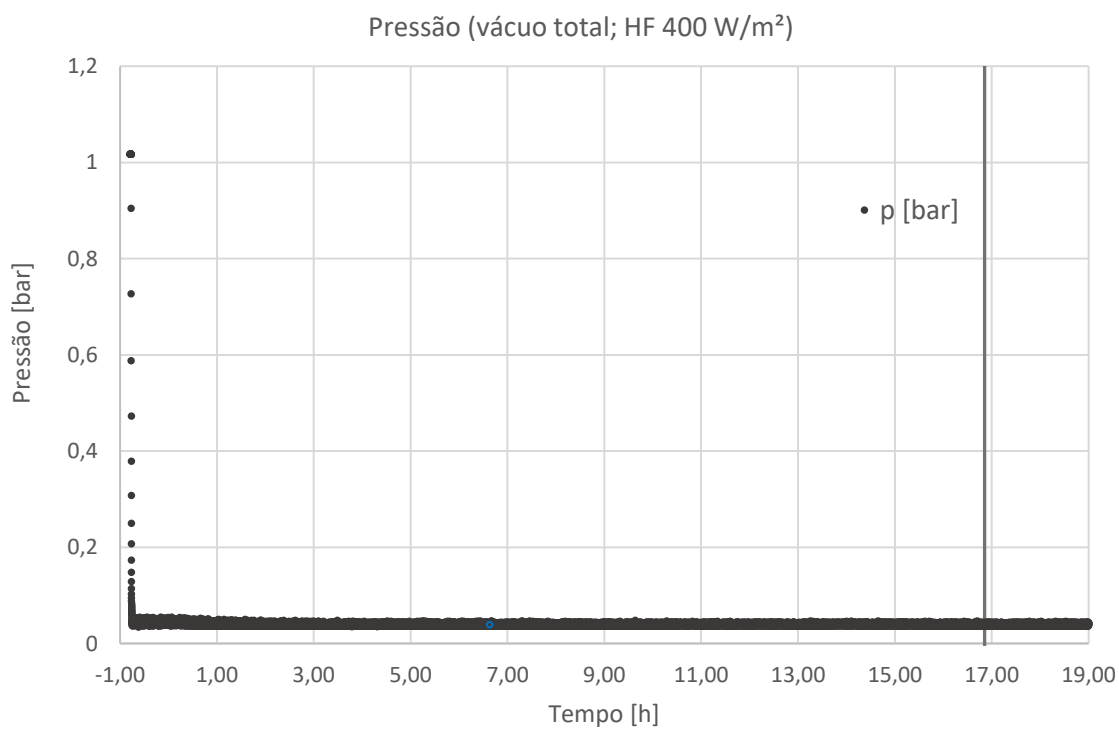


Figura B.10 - Gráfico de temperatura e fluxo de calor do teste de 400 W/m² na condição TV

APÊNDICE C – GRÁFICOS DE PRESSÃOFigura C.1 - Gráfico de pressão do teste de 1000 W/m² na condição PVFigura C.2 - Gráfico de pressão do teste de 1000 W/m² na condição TV

Figura C.3 - Gráfico de pressão do teste de 700 W/m² na condição TVFigura C.4 - Gráfico de pressão do teste de 400 W/m² na condição TV

APÊNDICE D – VÍDEO DA DINÂMICA DE CONGELAMENTO

Figura D.1 - Imagem do vídeo do teste NV 1900 W/m

Disponível em: <https://youtu.be/y2UZIMS3byk>