

Análise da transferência de calor no congelamento do pescado num freezer horizontal convencional

Jesus Marlinaldo de Medeiros ^[1], Shirley do Nascimento Borges ^[2], Márcio Gomes da Silva ^[3]

[1] jesus_medeiros@yahoo.com.br; [2] shirley-music@hotmail.com. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB - Campus Cabedelo. [3] mgcefet@gmail.com. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB - Campus João Pessoa

RESUMO

O processo de congelamento do pescado é complexo, pois envolve a transferência de calor e massa, a mudança de fase assim como o escoamento do fluido de congelamento que dependem das condições de temperatura e velocidade do ar de insuflamento do sistema frigorífico e da temperatura de recebimento do pescado. Este trabalho relata um estudo experimental durante o congelamento do pescado em um freezer horizontal sob condições de convecção natural do ar e condução de calor nas suas paredes. Inicialmente, os perfis de temperatura e razão de umidade em um freezer horizontal vazio foram obtidos no seu interior utilizando dois ter-higrômetros e dois termômetros com sensores tipo K. Os resultados mostraram grande variação da temperatura e da umidade do ar no interior do freezer, interferindo nos tempos de congelamento e de armazenamento do pescado. Em seguida, foi introduzido o pescado sob três condições: congelamento (-18 °C), extra-frio (-24 °C) sem adição de gelo e congelamento (-18 °C) com adição de gelo, para determinação do perfil de temperatura e o tempo de congelamento. Os resultados no pescado mostraram que o congelamento foi lento, podendo comprometer a qualidade do pescado, sendo não recomendado este tipo de freezer para congelamento.

Palavras-chave: Refrigeração. Pescado. Congelamento. Freezer. Convecção natural.

ABSTRACT

The process of freezing the fish is complex, because involves of the mass and heat transfer, the phase change and fluid flow which depend on the temperature's conditions and velocity of the air supply system and temperature of the fish. This paper reports an experimental study during freezing of fish in a horizontal freezer under conditions of natural convection of air and heat conduction on its walls. Initially, the profiles of temperature and humidity ratio in an empty horizontal freezer inside were obtained using two hygrometers and two thermometers with type-K sensors. The results showed great variation in temperature and humidity ratio of the air inside the freezer interfering with freezing and storage times. Then the fish was introduced under three conditions: freezing (-18° C) and extra cold (-24 ° C) without the addition of ice and freezing (-18 ° C) by adding ice, to determine the profile temperature and time of freezing. The results showed that freezing fish was slow and can compromise the quality of the fish, and not recommend this type of freezer to freezing.

Keywords: Refrigeration. Fish. Freezing. Freezer. Natural Convection.

1 Introdução

O pescado é um dos alimentos mais suscetíveis à deterioração devido à composição química, rápida oxidação de gorduras insaturadas, elevada atividade de água e pH próximo da neutralidade, fatores que favorecem o desenvolvimento microbiano.

Os maiores produtores de pescado do mundo são: China, Índia, Indonésia, Japão, Bangladesh, Tailândia, Noruega, Chile, Vietnã e Estados Unidos.

O Brasil ocupa uma posição que oscila próximo do vigésimo sétimo lugar no ranking, embora seja um dos países com maior velocidade de crescimento da atividade aquícola do mundo.

Da captura até o ponto de venda, o pescado percorre um longo caminho, durante o qual os

produtos se deterioram em minutos após a morte, facilitando a contaminação. Em função disso, o ideal é que o pescado seja congelado rapidamente ou submetido à imediata redução da temperatura, próxima à de congelamento da água com a utilização de gelo.

O congelamento permite a conservação dos alimentos por um longo período, inclusive daqueles com alta atividade de água. O congelamento a -35°C em período de 5 horas caracteriza o congelamento rápido e ideal para manter a textura e a qualidade, pois se congelado lentamente a -18°C , parte da água se manterá líquida, diminuindo o tempo de prateleira. Uma vez congelados, os produtos devem ser mantidos a uma temperatura de -18°C a -20°C até o momento de sua utilização pelo consumidor. Pela legislação, podem ser comercializados a -15°C nos estabelecimentos de venda ao consumidor (FURTA-DO, 2000).

O processo de glaciamento (glazing) consiste no tratamento do produto congelado, mediante imersão numa solução resfriada, de modo a protegê-lo com uma camada superficial de gelo. O grande benefício da aplicação do glaciamento é a melhoria no manuseio dos produtos congelados, tornando-os mais resistentes às quebras, proporcionando sensível economia (GONÇALVES, 2003).

Uma revisão bibliográfica sobre o congelamento do pescado em um equipamento frigorífico foi detalhada a seguir. Moraga e Medina (2000) investigaram o tempo de congelamento e perfil de temperatura de um bife de salmão em uma câmara refrigerada por convecção, forçada de ar insuflado por um sistema de refrigeração, considerando a condução de calor no

bife e sua validação experimental com medição das temperaturas no bife com termopares. Os resultados numéricos apresentaram um bom ajuste com desvios menores que 10,6 %.

Chaiwanichsiria et al. (2001) estudaram as propriedades termo-físicas da lula para determinar o tempo de congelamento do pescado utilizando o método das diferenças finitas e sua validação com dados experimentais e outros modelos analíticos, e chegaram a um erro inferior a 1,5 %.

Jain et al. (2005) estudaram um modelo matemático para o congelamento de um peixe com gelo em uma caixa térmica isolada. Eles investigaram modelos exponenciais e assintóticos, validando com dados experimentais e ajustaram o modelo a partir de análise de regressão, para determinar o perfil de temperatura e o coeficiente de resfriamento.

Pham (2006) fez uma revisão de modelos de transferência de calor e massa empregados para descrever os processos de congelamento, descongelamento e armazenagem de alimentos. Ele concluiu que tais processos não podem ser tratados puramente como um problema de transferência de calor, mas devem levar em consideração a transferência de massa, a nucleação e o crescimento dos cristais.

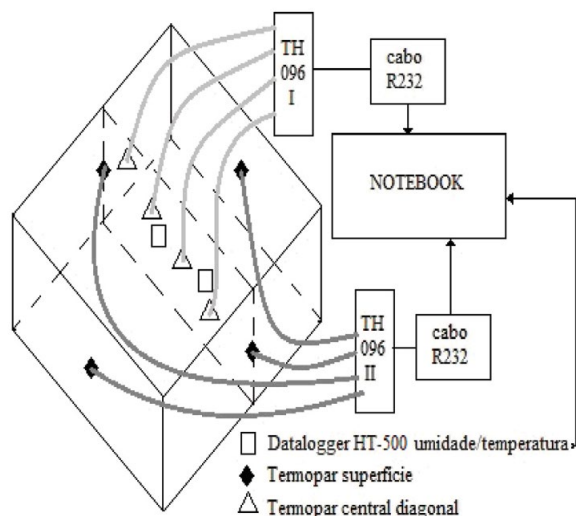
Jain e Pathare (2007) propuseram um método simples para determinar a difusividade térmica de peixes de água doce resfriados em gelo, utilizando a solução analítica para equação de calor de Fourier em coordenadas cilíndricas. Os resultados obtidos demonstraram o efeito do peso do peixe na difusividade térmica e sua faixa de utilização a partir de um ajuste com modelo logarítmico.

Este trabalho tem como objetivo principal analisar o perfil de temperatura e umidade no interior de um freezer horizontal convencional, o perfil de temperatura e o tempo de congelamento do pescado.

2 Materiais e Métodos

A montagem da bancada experimental para a determinação de parâmetros físicos do escoamento do ar dentro do freezer horizontal convencional, conforme Figura 1, mostrando os pontos de medição de temperaturas e umidades relativas no interior do freezer. Tal experimento foi realizado utilizando um freezer horizontal convencional EDH 250 ESMAL-TEC com tripla ação: Extra-frio (-24°C), Congelador (-18°C) e Conservação (0°C a $+5^{\circ}\text{C}$).

Figura 1 – Diagrama esquemático dos pontos de medição do ar dentro do freezer.



O Termômetro Digital TH-096 da Instrutherm foi utilizado para medição das temperaturas no interior do freezer conforme mostrado na Figura 2. As características do instrumento são: display de LCD de 5 dígitos, sensor Termopar Tipo K, escala $-199,9^{\circ}\text{C}$ a $999,9^{\circ}\text{C}$, precisão de $\pm (0,5\% + 1^{\circ}\text{C})$, resolução $0,1^{\circ}\text{C}$, quatro canais de entrada: T1, T2, T3 e T4, tempo de resposta: aprox. 1 segundo, interface serial: RS-232, Datalogger até 16000 dados; O termopar tipo K S-02K da Instrutherm utilizado pode ser visto também na Figura 2.

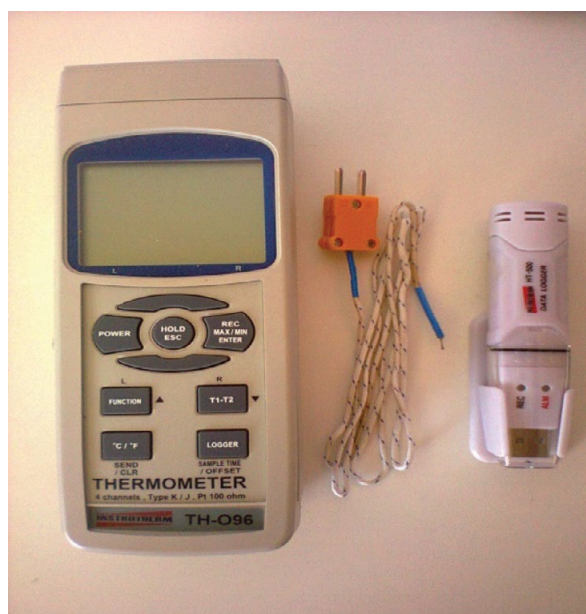
O Datalogger HT-500 da Instrutherm foi utilizado para medição da temperatura e umidade relativa do ar dentro do freezer conforme mostrado na Figura 2. As características do instrumento utilizado são: indicação através de dois LEDs; escala: umidade: 0 a 100% RH; temperatura: -40 a 70°C ; precisão: umidade: $\pm 3\%$ RH; temperatura: 1°C (-20 a 50°C); resolução: $0,1\%$ RH / $0,1^{\circ}\text{C}$; ciclo de medição selecionável: 2s, 5s, 10s, 30s, 1min, 5min, 10min, 30min, 1h, 2h, 3h, 6h, 12h, 24h; interface USB; memória: 16000 leituras para temperatura e 16000 leituras para umidade relativa.

O procedimento de aquisição de dados do termômetro TH-096 para o notebook foi realizado a partir da instalação de dois softwares: o 1º software referiu-se a um conversor de RS-232 para USB CRS-80 e o 2º software DL2005 para descarregamento dos dados da memória do instrumento.

O software DL2005 da Instrutherm foi instalado com sucesso em um notebook, resultando em um arquivo de dados gerado em formato tipo *dat*, que pode

ser lido em editores de texto ou planilha de dados. No entanto, a visualização dos dados não é separada por sensor de temperatura em várias colunas, e sim numa sequência em uma única coluna do 1º ao 4º sensor para cada tempo de amostragem pré-determinado pelo operador do instrumento. Para separar os dados por sensor, foi elaborado um programa de computador e posteriormente utilizado um software para geração e visualização de gráficos.

Figura 2 – Termômetro Digital TH-096, Termopar Tipo K S-02K e Datalogger de Temperatura e Umidade HT-500.

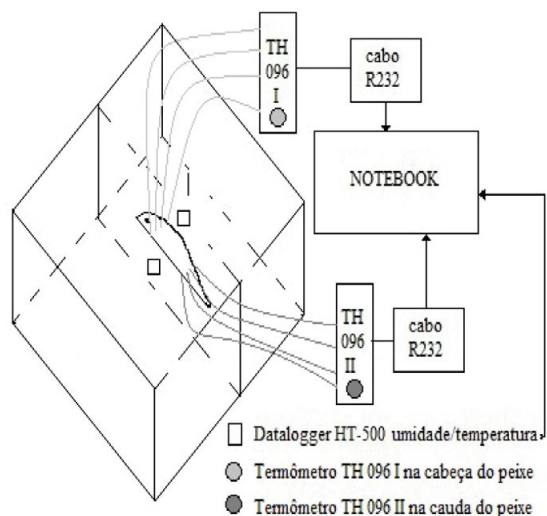


Na Figura 3, são mostrados os pontos de medição de temperatura e umidade relativa no interior do freezer e temperatura no interior do peixe.

O pescado utilizado para congelamento foi adquirido no mercado público da cidade de Cabedelo-PB, considerando peixe fresco. No entanto, sabe-se que o pescado, após a pesca, foi mantido sob resfriamento através de gelo em escama. No mercado, ele encontrava-se exposto sem refrigeração adequada. Por esse motivo, foram realizadas análises sensoriais para garantia mínima das condições do pescado para estudo.

A percepção sensorial é o método mais antigo e confiável para a avaliação do frescor do pescado, sendo largamente empregada no dia a dia, pela necessidade de rapidez no julgamento do pescado, bem como pela facilidade de execução. (GONÇALVES, 2011).

Figura 3 – Diagrama esquemático mostrando os pontos de medição do pescado.



O método de avaliação sensorial utilizado nessa pesquisa para o peixe fresco verificou:

- Olhos transparentes, brilhantes e salientes;
- Guelras róseas, não apresentando odor característico do produto estragado;
- Ventre roliço, não deixando sinal de dedo, quando comprimido;
- Escamas brilhantes e firmes;
- Carne firme, consistente e elástica.

Foi utilizado o peixe da família Lutjanidae, cujos nomes científico e comum são *Lutjanus analis* e caruncho, respectivamente, com peso e dimensões aproximadas entre as amostras utilizadas. Para análise dos dados coletados, foi utilizado um peixe em cada dia de medição, totalizando seis amostras.

O peso e as dimensões do pescado foram avaliados, resultando num peso variando entre 800 a 880 gramas e comprimento em torno de 400 mm.

Em seguida, foram determinadas as posições horizontais para introdução dos termopares variando verticalmente na espessura do pescado. Para tanto, foram determinadas as posições horizontais partindo da boca do peixe distante de 140 mm e de 240 mm, respectivamente. Dessa forma, foram realizadas medições de temperatura em duas partes do peixe: uma próxima à cabeça e a outra próxima à cauda com variação da espessura e largura devido à geometria irregular do pescado.

A variação de espessuras locais onde foram introduzidos os termopares esteve compreendida entre 47 a 51 mm na posição próxima à cabeça do pescado e 37 a 44 mm, próxima à outra extremidade respectivamente, para cada peixe em estudo.

Para cada posição horizontal, foram realizados furos no pescado e introduzidos quatro sensores. O primeiro sensor foi introduzido próximo à superfície em contato direto com o ar dentro do freezer, o segundo e terceiro sensores ficaram em posições intermediárias e o quarto sensor próximo ao recipiente de alumínio retangular, onde foi acondicionado o peixe na superfície horizontal do freezer.

No congelamento do pescado, exige-se a remoção de calor através de um sistema de refrigeração adequado, passando pela remoção de calor sensível, depois calor latente (pela mudança da água de líquido para sólido dentro do pescado) e novamente calor sensível até a temperatura de congelamento, variando de acordo com o tempo requerido para armazenamento. O perfil de temperatura referenciado na literatura (EVANS, 2008; GONÇALVES, 2011) é mostrado na Figura 4.

Durante a primeira fase de resfriamento, a temperatura cai rapidamente até um pouco abaixo de 0°C (ponto de congelamento da água). Posteriormente, transforma parte da água constituída no pescado em gelo. Durante a terceira fase, a maioria da água remanescente congela e se atinge a temperatura de congelamento para armazenamento.

3 Resultados e Discussão

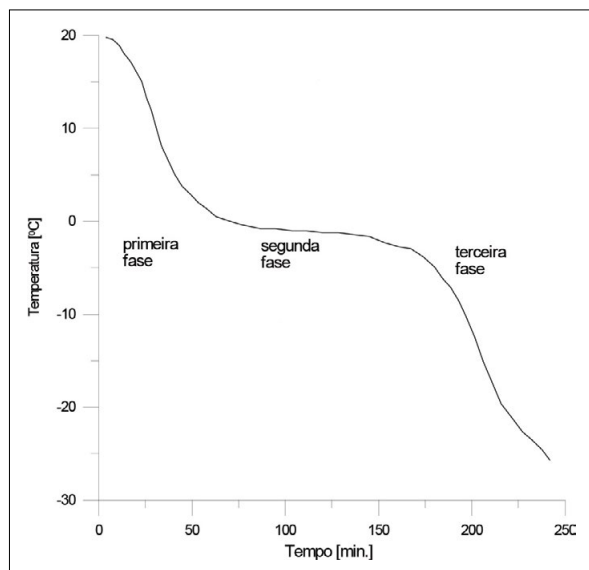
3.1 Congelamento no freezer sem pescado

Nessa fase da pesquisa, foram realizados experimentos para analisar o perfil de temperatura dentro do freezer horizontal, fazendo a medição com sensores termopares tipo K ligados ao termômetro TH-096 com gravação de dados a cada 15 segundos.

A disposição dos termopares foi utilizada em diagonal do vértice inferior entre as paredes frontal e lateral direita e o centro do freezer dividido por uma grade. Para fixação dos termopares, foi utilizada uma haste cilíndrica de alumínio. O termopar 1 localiza-se próximo à parte superior da grade, já o termopar 4 localiza-se na extremidade inferior do freezer, enquanto os termopares 2 e 3 estão em posições intermediárias para medição da temperatura no interior do freezer vazio em função do tempo. Para isso,

partiu-se da condição de temperatura ambiente em torno de 30°C no freezer e o termostato do freezer funcionamento na posição de congelamento normal (-18°C dado do fabricante) até atingir o regime intermitente com desligamento e religamento contínuo do compressor do freezer.

Figura 4 – Perfil de temperatura do pescado durante o congelamento.



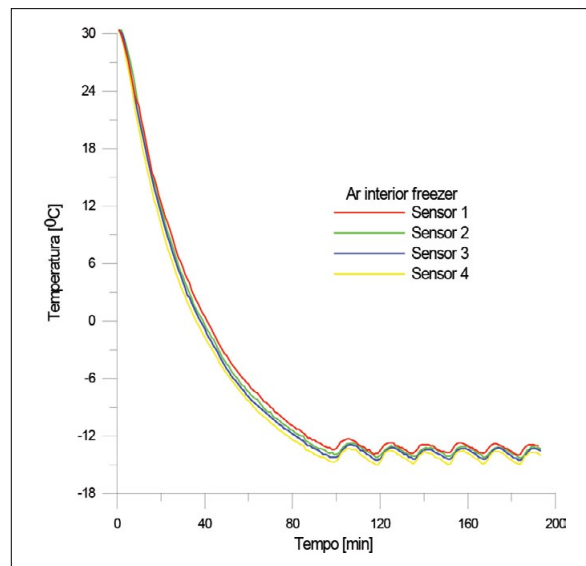
Na Figura 5, é representado o comportamento da temperatura de cada sensor instalado dentro do freezer nas suas respectivas posições, as quais retratam a condição do ar interior no centro do freezer, que após 100 minutos o sistema transiente entra em regime intermitente desligando o compressor e religando diversas vezes, oscilando numa temperatura entre -13 a -15 °C.

É importante ressaltar que a temperatura do freezer em torno de -18°C não foi alcançada. Pode-se observar também que o sensor 4 atingiu a menor temperatura, pois está mais próximo das paredes onde circula a serpentina de refrigeração do evaporador do freezer. Enquanto que o sensor 1 atingiu a maior temperatura, já que está posicionado próximo à tampa do freezer, onde não há serpentina de refrigeração.

Uma nova disposição dos termopares no centro das superfícies das paredes verticais é mostrada. O termopar 1 localiza-se na superfície frontal à abertura do freezer, já o termopar 2 na superfície posterior, enquanto o termopar 3 na superfície lateral esquerda e o sensor 4 localiza-se na superfície lateral direita para medição da temperatura no freezer vazio em

função do tempo. Para isso, partiu-se da condição de temperatura ambiente em torno de 30°C no freezer e termostato na posição de congelamento normal (-18°C) até atingir o regime intermitente de “liga e desliga” do compressor.

Figura 5 – Perfil de temperatura no interior do freezer – Posição central



Na Figura 6, é representado o comportamento da temperatura de cada sensor instalado dentro do freezer nas suas respectivas posições, as quais retratam a condição do ar interior nas paredes do freezer, que após 80 minutos o sistema transiente entra em regime desligando o compressor e religando diversas vezes, oscilando numa temperatura entre -14 a -19 °C.

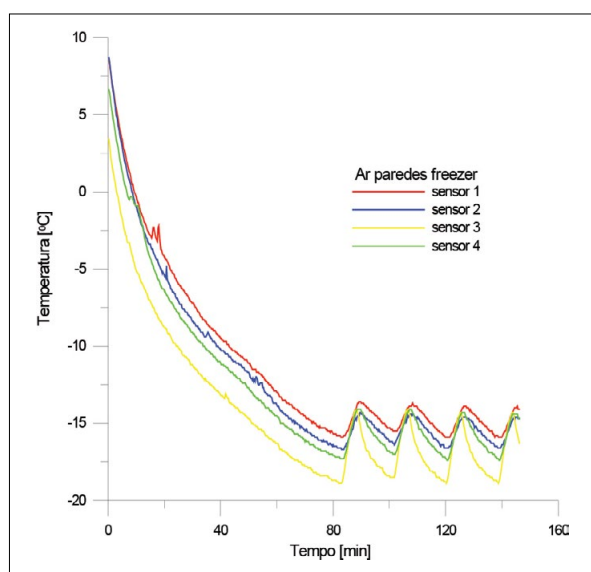
É importante ressaltar que foi alcançada a temperatura de congelamento normal inferior -18°C apenas na superfície da parede 3. Pode-se observar também que os sensores 3 e 4 atingiram as menores temperaturas, devido a áreas superficiais com maior serpentina de refrigeração do evaporador do freezer. Enquanto que os sensores 1 e 2 atingiram as maiores temperaturas em regime intermitente, pois estão com áreas superficiais com menor serpentina de refrigeração.

Em seguida, foi realizada uma montagem com dois termômetros digitais para medição instantânea das temperaturas nas paredes e na região central sobre a grade do freezer e um *datalogger* para medir a umidade relativa dentro do freezer, sob condições de extra-frio (-24°C).

Na Figura 7, é apresentado o comportamento da temperatura de cada sensor instalado dentro do freezer nas suas respectivas posições, que retrataram a condição do ar interior nas paredes e na grade central do freezer, indicando que não foi atingido o sistema em regime intermitente. É importante ressaltar que a temperatura de congelamento extra-frio (-24°C) não foi alcançada no período de tempo estudado. Pode-se observar comportamento similar no perfil de temperatura ao estudado anteriormente na condição de congelamento normal (-18°C). O freezer com temperatura menor não mudará a velocidade de resfriamento, apenas aumentará o tempo de armazenamento do pescado.

De forma simultânea, foi levantado o perfil de temperatura e razão de umidade no centro do freezer com o *datalogger* HT-500.

Figura 6 – Perfil de temperatura no interior do freezer – Posição nas paredes.



Na Figura 8, foi observado comportamento similar de temperatura ao descrito através do termômetro digital até 207 minutos na Figura 7. Exatamente nesse momento a tampa do freezer é levantada e a temperatura começa a subir devido à entrada de uma massa de ar quente e úmida. O *datalogger* é retirado do freezer e colocado no notebook para parar a medição e descarregar os dados com temperatura próxima à ambiente de 30°C . Observa-se um decréscimo rápido da razão de umidade de $20\text{ g água/kg ar seco}$ com rápido resfriamento para $2\text{ g água/kg ar seco}$ em torno de 50 minutos, depois um decréscimo lento da razão de umidade com lento resfriamento

até $0,5\text{ g água/kg ar seco}$ até abertura da tampa do freezer após mais de 200 minutos, que se caracteriza pela desumidificação do ar dentro do freezer. Após a abertura deste e posterior retirada do instrumento de medição de temperatura e umidade relativa, o ar que entra no interior do equipamento provoca a condensação de água, umidificação do ar e elevação da temperatura.

Figura 7 – Perfil de temperatura no interior do freezer – Posições centrais e paredes.

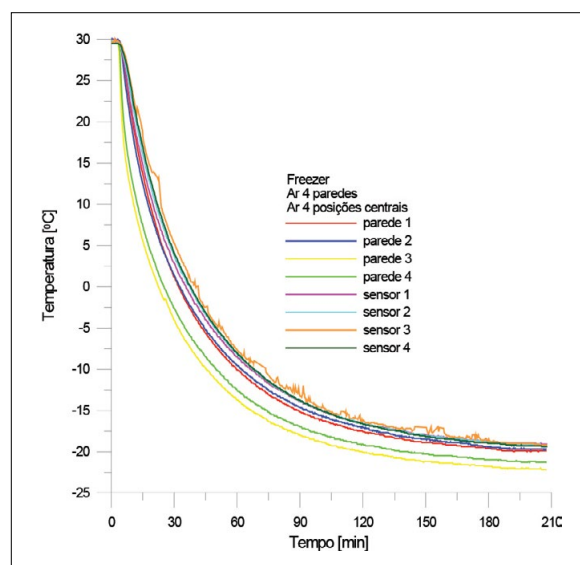
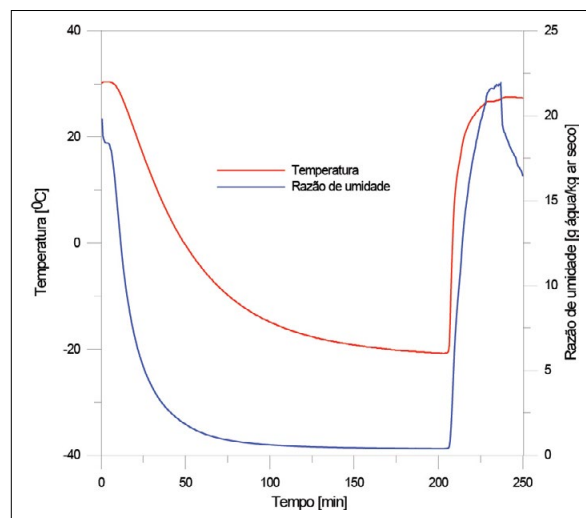


Figura 8 – Perfil de temperatura e razão de umidade no centro do freezer.



3.2 Congelamento no freezer com pescado

O congelamento do pescado no freezer convencional horizontal foi analisado sobre três condições: frio (-18 °C) sem adição de gelo, extra-frio (-24 °C), sem adição de gelo e frio (-18 °C) com adição de gelo.

Na Figura 9, mostra-se o peixe em análise antes do congelamento e a disposição dos termopares em duas posições horizontais de 140 mm e 240 mm em relação à extremidade da boca sobre recipiente retangular de alumínio em contato direto com o ar no freezer, para determinar o perfil de temperatura e o tempo de seu congelamento. O termopar 1 localiza-se internamente próximo à superfície superior do peixe em contato direto com o ar refrigerado (convecção natural) do freezer, os termopares 2 e 3 estão dentro do alimento com penetração intermediária entre a espessura do peixe e o sensor 4; localiza-se dentro do alimento próximo à superfície inferior em contato direto com o recipiente de alumínio no freezer. Inicialmente, o freezer já estava ligado na posição de congelamento normal para introdução do peixe para congelamento. Após introdução dos sensores, foi colocado um filme plástico de PVC para preservar o peixe do contato direto com o ar de refrigeração do freezer.

Na Figura 10, é representado o comportamento da temperatura de cada sensor instalado no pescado com as seguintes características: peso de 800 gramas, comprimento em torno de 400 mm, espessuras de 45 e 35 mm nas respectivas posições de medição dos sensores, que após 110 minutos foi atingida a temperatura próxima à 0°C, passando pela mudança de fase da água no pescado do estado líquido para o estado sólido, como registrado nos três sensores internos ao peixe dos dois termômetros utilizados: TH 096 I e TH 096 II. Já o quarto sensor, em contato próximo ao recipiente de alumínio de cada instrumento, não teve a formação de gelo.

Observou-se que o resfriamento do pescado aconteceu de baixo para cima, evidenciando que a troca de calor por condução na superfície horizontal do freezer é predominante em relação à troca de calor por convecção natural do ar resfriado com a superfície superior do pescado. Além disso, a carga sensível do pescado foi absorvida de 22 °C até 0°C em torno de 110 minutos. A partir de 110 minutos, teve-se a carga latente com a mudança de fase da água contida no pescado em gelo. A medição foi interrompida em

torno de 225 minutos, não sendo registrado o congelamento abaixo de 0°C (calor sensível), dentro do pescado, sendo possível retirar os sensores do peixe sem dificuldades.

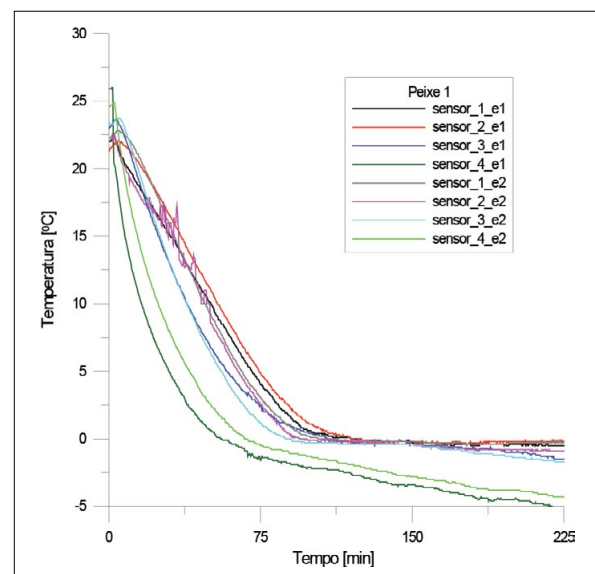
Os sensores do termômetro TH 096 II (e2) mediram temperaturas mais baixas que os sensores do termômetro TH 096 I (e1), pelo fato de que a espessura 2 (35 mm) ser menor que a espessura 1 (45 mm) propagando o calor mais rapidamente na parte do pescado com menores dimensões.

No termômetro e2, o sensor_2 registrou oscilação da medição que foi solucionada ao longo do experimento com ajuste na colocação do sensor nos terminais do equipamento.

Figura 9 – Peixe antes do congelamento.

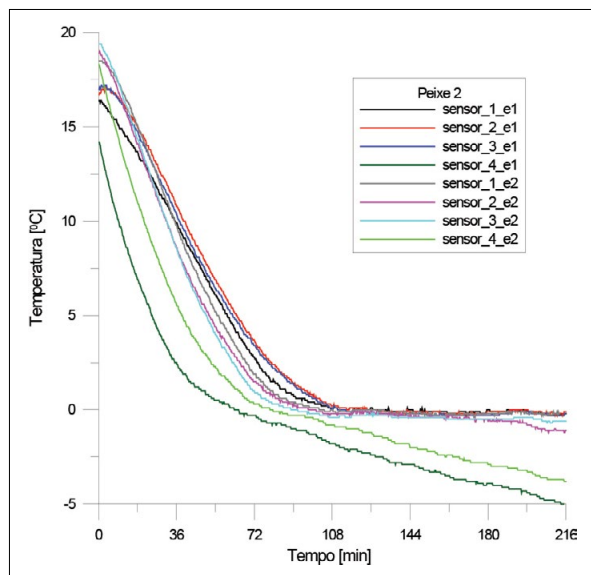


Figura 10 – Perfil de temperatura no peixe 1: congelamento normal freezer (-18 °C).



Na Figura 11, é representado o comportamento da temperatura de cada sensor instalado no pescado com as seguintes características: peso de 795 gramas, comprimento em torno de 400 mm, espessuras de 45 e 35 mm nas respectivas posições de medição dos sensores, que após 108 minutos foi atingida a temperatura próxima à 0°C, passando pela mudança de fase da água no pescado do estado líquido para o estado sólido, como registrado nos três sensores internos ao peixe dos dois termômetros utilizados. Já o quarto sensor, em contato próximo ao recipiente de alumínio de cada instrumento, não teve a formação de gelo. Observou-se que o resfriamento do pescado tem comportamento similar ao observado no experimento anterior (peixe 1). Além disso, a carga sensível do pescado foi absorvida de 18°C até 0°C em torno de 108 minutos. A partir de 108 minutos, teve-se a carga latente com a mudança de fase líquida da água contida no pescado. A medição foi interrompida em torno de 216 minutos, não sendo registrado o congelamento abaixo de 0°C (calor sensível), dentro do pescado. Após o experimento, foi possível retirar os sensores do peixe sem dificuldades, pois não houve congelamento dos sensores.

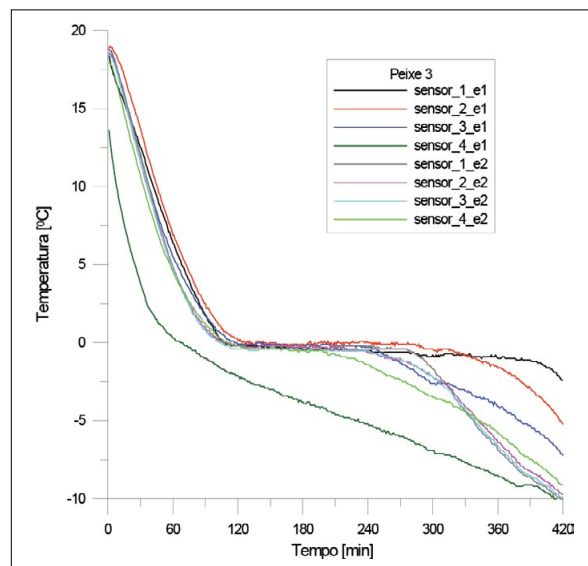
Figura 11 – Perfil de temperatura no peixe 2: congelamento normal freezer (-18 °C).



Na Figura 12, é representado o comportamento da temperatura de cada sensor instalado no pescado com as seguintes características: peso de 840 gramas, comprimento em torno de 400 mm, espessuras de 47 e 37 mm nas respectivas posições de medição

dos sensores, que após 120 minutos foi atingida a temperatura próxima à 0°C, passando pela mudança de fase da água no pescado do estado líquido para o estado sólido, como registrado nos três sensores internos ao peixe do termômetro e1 e nos quatro sensores do termômetro e2. Isso deve ter acontecido no sensor 4 devido à não penetração total em contato próximo ao recipiente de alumínio. Observa-se também predominância da troca de calor por condução em relação à troca de calor por convecção natural. Além disso, a carga sensível do pescado foi absorvida de 18°C até 0°C em torno de 120 minutos. A partir de 120 minutos, teve-se a carga latente com a mudança de fase líquida da água contida no pescado até 240 minutos. A partir de 240 minutos, foi registrado o congelamento abaixo de 0°C (calor sensível), dentro do pescado atingindo temperaturas em torno de -10°C nos sensores do termômetro e2 em torno de 420 minutos. No caso dos sensores do termômetro e1, constatou-se uma variação linear da temperatura de acordo com a posição de cada sensor. Portanto, seria necessário mais tempo para que todo o pescado estivesse congelado de maneira uniforme. A medição foi interrompida em torno de 420 minutos, razão pela qual só foi possível retirar os sensores do peixe após descongelamento.

Figura 12 – Perfil de temperatura no peixe 3: congelamento normal freezer (-18 °C).



Na Figura 13, é representado o comportamento da temperatura de cada sensor instalado no pescado com as seguintes características: peso de 840 gramas, comprimento em torno de 400 mm, espessuras

de 47 e 37 mm nas respectivas posições de medição dos sensores, que após 120 minutos foi atingida a temperatura próxima à 0°C, passando pela mudança de fase da água no pescado do estado líquido para o estado sólido como registrado nos três sensores internos ao peixe do termômetro e1 e nos dois primeiros sensores do termômetro e2. Nesse caso, ocorreu o contrário do experimento anterior (peixe 3), provavelmente porque o sensor 3 penetrou próximo ao sensor 4, no qual não se tem a formação de gelo. Observou-se também predominância da troca de calor por condução em relação à troca de calor por convecção natural. Além disso, a carga sensível do pescado foi absorvida de 17 °C até 0°C, com início em torno de 75 minutos para o termômetro e2 e 100 minutos para o termômetro e1. No termômetro e1, ocorreu a mudança de fase nos sensores 1 e 2 de 100 a 300 minutos e no sensor 3, de 100 a 150 minutos. A troca de calor foi mais rápida no sensor 3 devido à proximidade da fonte fria. No termômetro e2, ocorreu a mudança de fase nos sensores 1 e 2 de 75 a 175 minutos e apenas congelamento sensível nos sensores 3 e 4. Em seguida, em ambos os termômetros foram registrados o congelamento abaixo de 0°C (calor sensível) dentro do pescado, atingindo temperaturas próximas à -13°C em torno de 450 minutos com congelamento uniforme. A medição foi interrompida em torno de 450 minutos, por essa razão só foi possível retirar os sensores do peixe após descongelamento.

Na Figura 14, é representado o comportamento da temperatura de cada sensor instalado no pescado com as seguintes características: peso de 880 gramas, comprimento em torno de 400 mm, espessuras de 51 e 44 mm nas respectivas posições de medição dos sensores. Nesse caso, foi ajustado o termostato do freezer para posição de extra-frio (-24 °C) para verificação da sua influência em relação à posição de congelamento (-18 °C). Observou-se também predominância da troca de calor por condução em relação à troca de calor por convecção natural. No termômetro e1, ocorreu a mudança de fase nos sensores 1 e 2 de 112 a 288 minutos e no sensor 3, de 112 a 192 minutos, comportamento similar ao experimento anterior (peixe 4). No termômetro e2, ocorreu a mudança de fase nos sensores 1 e 2 de 96 a 192 minutos e apenas congelamento sensível nos sensores 3 e 4, comportamento também similar ao experimento anterior (peixe 4). Em seguida, em ambos os termômetros foram registrados o congelamento abaixo de 0°C (calor sensível) dentro do pescado, atingindo temperaturas próximas a -15°C em torno de 416 minutos com congelamento próximo do uniforme. A medição foi interrompida em torno de 416 minutos, por isso só foi possível retirar os sensores do peixe após descongelamento. Foi observado que a utilização do termostato na posição extra-frio (-24 °C) não gerou ganho significativo em relação ao congelamento normal (-18 °C).

Figura 13 – Perfil de temperatura no peixe 4: congelamento normal freezer (-18 °C)..

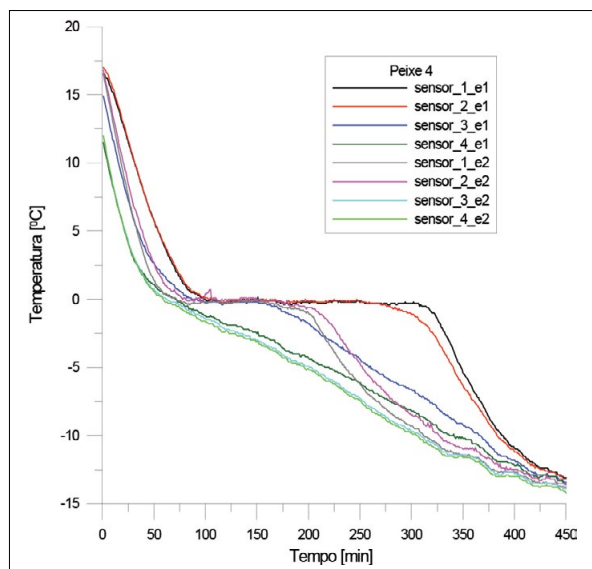
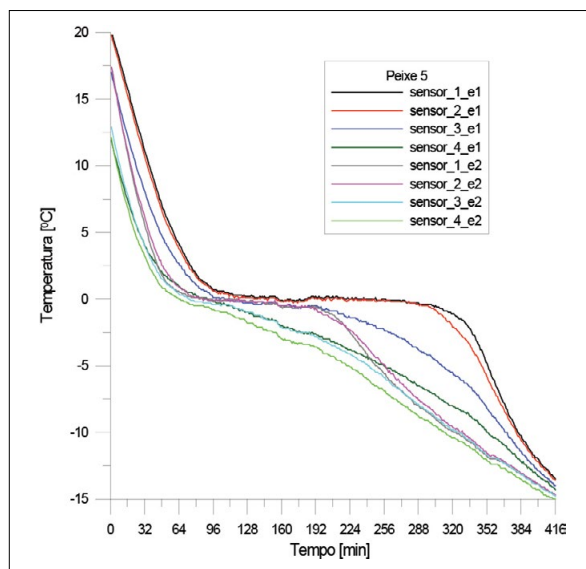
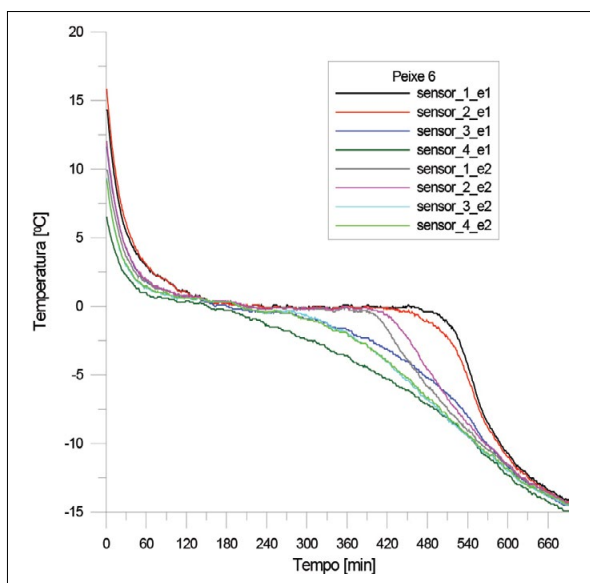


Figura 14 – Perfil de temperatura no peixe 5: congelamento normal freezer (-24 °C).



Na Figura 15, é representado o comportamento da temperatura de cada sensor instalado no pescado com as seguintes características: peso de 860 gramas, comprimento em torno de 400 mm, espessuras de 50 e 43 mm nas respectivas posições de medição dos sensores. Nesse caso, foi ajustado o termostato do freezer para posição de frio (-18 °C) e adicionado gelo em escamas dentro do recipiente de alumínio, cobrindo todo o pescado para verificação do comportamento. No termômetro e1, ocorreu a mudança de fase nos sensores 1 e 2 de 120 a 420 minutos e no sensor 3, de 120 a 270 minutos. No termômetro e2, ocorreu a mudança de fase nos sensores 1 e 2 de 120 a 390 minutos e nos sensores 3 e 4, de 120 a 270 minutos.

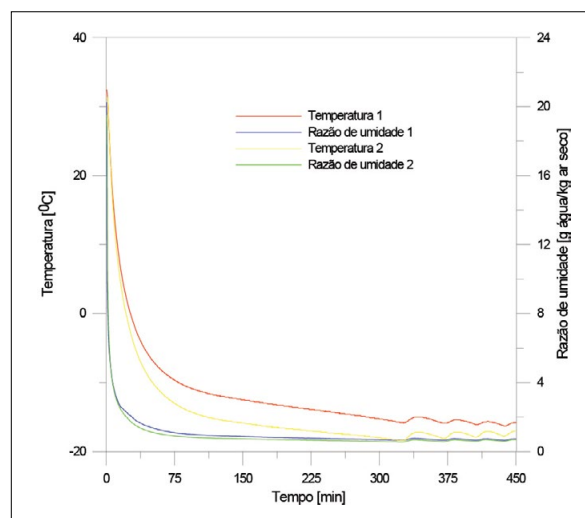
Figura 15 – Perfil de temperatura no peixe 6: congelamento normal freezer (-18 °C) com gelo.



Em seguida, em ambos os termômetros foram registrados o congelamento abaixo de 0°C (calor sensível) dentro do pescado, atingindo temperaturas próximas a -15°C em torno de 690 minutos com congelamento uniforme. A medição foi interrompida em torno de 690 minutos, razão pela qual só foi possível retirar os sensores do peixe após descongelamento. Foi observado que a utilização do gelo em escama retardou um pouco a troca de calor na primeira fase de congelamento (calor sensível), retardou bastante a segunda fase (calor latente) e também retardou a terceira fase (calor sensível), o que significa que a introdução do gelo não gerou ganhos. O gelo acrescentou mais uma carga térmica.

Na Figura 16, representa-se o comportamento de temperatura e umidade próximo ao pescado e no centro do freezer, respectivamente. Para os sensores de temperatura dos termo-higrômetros TH1 e TH2 atingirem a temperatura de 0°C foi preciso cerca de 23 minutos. Para atingirem a temperatura mínima em TH1 e TH2 de -15,8 °C e -18,4 °C, respectivamente, foi de 324 minutos. Em seguida, o freezer entrou em regime intermitente de desligar e religar o compressor por cerca de 130 minutos até ser aberto o freezer e retirado os instrumentos e o pescado. Em relação à razão de umidade, observou-se medição inicial próximo de 20 g água/kg ar seco e dentro do freezer após 225 minutos em torno de 0,7 g água/ kg ar seco garantindo a desumidificação do ar.

Figura 16 – Perfil de temperatura e razão de umidade próximo ao pescado e no centro do freezer: peixe 4.



Na Figura 17, representa-se o comportamento de temperatura e umidade próximo ao pescado e no centro do freezer, respectivamente. Para os sensores de temperatura dos termo-higrômetros TH1 e TH2 atingirem a temperatura de 0 °C foi preciso cerca de 23 minutos. Para atingirem a temperatura mínima em TH1 e TH2 de -17,8 °C e -19,8 °C, respectivamente, foi de 466 minutos. O freezer na posição extra-frio (-24 °C) não entrou em regime intermitente de desligar e religar o compressor, aumentando o consumo de energia elétrica até ser aberto o freezer e retirados os instrumentos e o pescado. Em relação à razão de umidade, observou-se medição inicial próximo de 20 g água/kg ar seco e, dentro do freezer, após 224 mi-

nutos em torno de 0,7 g água/ kg ar seco, garantindo a desumidificação do ar.

Na Figura 18, representa-se o comportamento de temperatura e umidade próximo ao pescado e no centro do freezer, respectivamente. Para os sensores de temperatura dos termo-higrômetros TH1 e TH2 atingirem a temperatura de 0 °C foi preciso cerca de 26 minutos. Para atingirem a temperatura mínima em TH1 e TH2 de -18,1 °C e -19,4 °C, respectivamente, foram necessários 665 minutos. O freezer na posição frio (-18 °C) não entrou em regime intermitente de desligar e religar o compressor, aumentando o consumo de energia elétrica até ser aberto o freezer e retirados os instrumentos e o pescado. Em relação à razão de umidade, observou-se medição inicial próximo de 20 g água/kg ar seco e dentro do freezer após 300 minutos em torno de 1 g água/ kg ar seco, garantindo a desumidificação do ar

Figura 17 – Perfil de temperatura e razão de umidade próximo ao pescado e no centro do freezer: peixe 5.

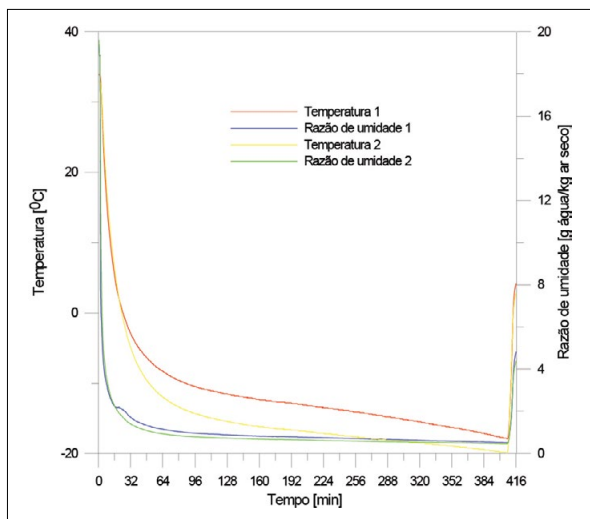
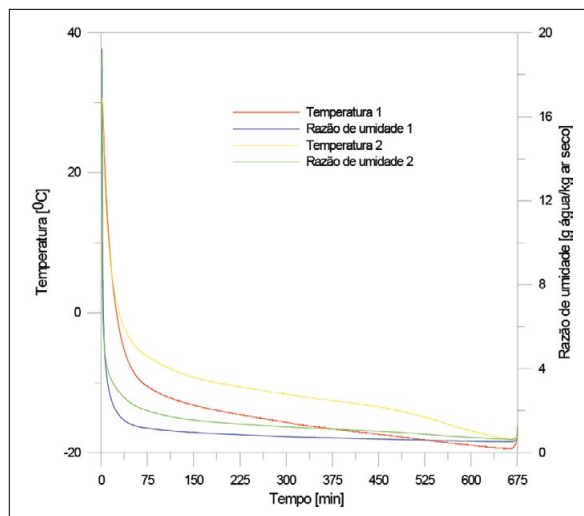


Figura 18 – Perfil de temperatura e razão de umidade próximo ao pescado e no centro do freezer: peixe 6.



4 Conclusões

Um estudo térmico do processo de congelamento em um freezer para conservação do pescado foi investigado a partir da medição de temperatura e umidade relativa para análise das condições do ar interior. Os resultados mostraram a evolução da temperatura em regime transiente no interior do freezer com grande variação de acordo com a posição do sensor e do termostato do freezer. Além disso, a temperatura do termostato especificada pelo fabricante do freezer não foi atingida na maioria dos casos, o que interferirá no tempo de armazenamento para manter a qualidade do produto. Em relação ao perfil de umidade, observou-se uma grande desumidificação do ar para baixas temperaturas do freezer para congelamento do pescado e, por isso, um estudo da transferência de massa entre o ar de congelamento e o pescado deve ser considerado.

Em relação ao pescado, conclui-se que este tipo de freezer comercial é inadequado para a operação de congelamento do pescado, pois não há convecção forçada para acelerar o processo de congelamento. Nesse sistema, é predominante a condução de calor das serpentinas do evaporador com as paredes internas do freezer, o que acarreta um tempo grande para congelamento do pescado, pois o peixe não estará sempre em contato com as paredes frias. Além disso, o ar que está diretamente em contato com o pescado tem uma condutividade térmica muito baixa e a con-

vecção natural é insuficiente. A adição do gelo não acelerou o processo de resfriamento e congelamento do pescado, pois o gelo tem uma condutividade térmica baixa. O gelo adicionou uma carga térmica a mais para o freezer.

REFERÊNCIAS

- CHAIWANICH SIRIA, S.; LAOHASONGKRAMA, K.; KOON-AREEB, O. Freezing Time Prediction for Cuttlefish. **ScienceAsia**, v. 27, p. 221-226, 2001.
- EVANS, J. **Frozen Food Science and Technology**. Wiley-Blackwell Publishing Ltd, 2008.
- FURTADO, A.A.L. Conservação de frutos do mar. In: **Seminário e workshop tecnologia para aproveitamento integral do pescado**. Campinas: Centro e Tecnologia de Carnes –ITAL, , 2000. p.7-12
- GONÇALVES, A. A. **Refrigeração**: resfriamento e congelamento. Material técnico-científico n° 5, Curso de Especialização em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, , 2003. 9 p.
- GONÇALVES, A. A. Tecnologia do pescado: ciência, tecnologia, inovação e legislação. In: **Tecnologias tradicionais: resfriamento & congelamento**. Cap. 2. São Paulo: Editora Atheneu, 2011.
- JAIN, D.; ILYAS S. M.; PATHARE, P.; PRASAD, S.; SINGH, H. Development mathematical model for cooling the fish with ice. Elsevier, Science Direct, **Journal of Food Engineering**, v. 71, p. 324-329, 2005.
- JAIN, D.; PATHARE, P. Determination of Thermal Diffusivity of Freshwater Fish during Ice Storage by using a One-dimensional Fourier Cylindrical Equation. **Biosystems Engineering**, v. 96, n. 3, p. 407–412, 2007.
- MORAGA, Nelson O.; MEDINA, Enzo E. Conjugate forced convection and heat conduction with freezing of water content in a plate shaped food. Pergamon, **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 43, p. 53-67, 2000.
- PHAM, Q. Tuan. Modelling heat and mass transfer in frozen foods: a review. Elsevier, Science Direct, **Journal of Food Engineering** .29, p. 876-888, 2006.