

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA

DESEMPENHO DE UM CONGELADOR DOMÉSTICO
NA ROTINA CASEIRA

Autor: JOSÉ RICARDO GONÇALVES
Engenheiro Químico

Orientador: Prof. Dr. CARLOS ALBERTO GASPARETTO

Parcer
Este exemplar corresponde a versão
final da tese defendida por José
Ricardo Gonçalves e aprovada pela
Comissão Julgadora em 17.03.89.
Campinas, 17 de março de 1989.

Carlos Alberto Gasparetto

Presidente da Banca

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos
para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Alimentos

Campinas, março 1989

A meus pais, esposa
e filhos

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Carlos Alberto Gasparetto, pela orientação, dedicação e estímulo dados durante o desenvolvimento do trabalho.

Ao Dr. Alfredo de Almeida Vitali pela sugestão do tema da tese e acompanhamento da pesquisa na Seção de Operações Unitárias (ITAL).

À Cristina Helena R.C. Gonçalves (ITAL), pela revisão do vernáculo.

À Carmen S.B. Penteado e Marlene A. Santos (ITAL) pela datilografia.

À Cristina M.F. Anhezini e Dora R.D. Chiaramonte (ITAL), pela elaboração das Figuras.

Aos funcionários do Serviço de Informação Tecnológica e da Biblioteca (ITAL), pela atenção dispensada durante a etapa de revisão bibliográfica.

Aos funcionários e estagiários da Seção de Operações Unitárias (ITAL) pela contribuição constante durante o desenvolvimento experimental.

À Kibon S.A. Indústrias Alimentícias e à Companhia Nestlé S.A., pelo gentil fornecimento das embalagens tipo cartucho para sorvete.

À Associação Brasileira da Indústria da Alimentação (ABIA), pela tiragem de cópias do trabalho.

A todos aqueles que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

ÍNDICE GERAL

TABELAS	I
FIGURAS	II
NOMENCLATURA	IV
RESUMO	VI
SUMMARY	VII
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Introdução	4
2.2. Fenômenos que ocorrem nas etapas do processo e suas conseqüências	5
2.2.1. Congelamento	5
2.2.2. Estocagem frigorificada	11
2.2.3. Descongelamento	15
2.3. Relação entre velocidade de congelamento e qualidade	18
2.4. Tempo de congelamento	24
2.4.1. Importância para o dimensionamento de processos	24
2.4.2. Dependência em função de alguns parâmetros críticos	27
3. MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1. Congelador doméstico	33
3.2. Escolha do material para processamento	33
3.3. Obtenção de parâmetros preliminares de congelamento	35
3.3.1. Elaboração do modelo de serragem	35
3.3.2. Condições de ensaio	36
3.3.3. Previsão do tempo de congelamento	38

3.3.4.	Obtenção do coeficiente convectivo de transferência de calor.....	41
3.3.5.	Determinação da temperatura de congelamento do modelo de serragem.....	41
3.4.	Desempenho do congelador no processamento e estocagem.....	42
3.4.1.	Elaboração dos pacotes de carga.....	42
3.4.2.	Arranjo dos termopares e dos pacotes de carga no congelador.....	45
3.4.3.	Condições de ensaio.....	47
3.4.4.	Cálculo do coeficiente global de transferência de calor.....	49
3.4.5.	Determinação do consumo de energia.....	49
3.4.6.	Determinação do consumo de energia elétrica na formação e manutenção de estoque.....	51
3.5.	Determinação da composição centesimal básica.....	52
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
4.1.	Desenvolvimento do modelo de serragem.....	54
4.2.	Desempenho do congelador doméstico no processamento e estocagem.....	61
4.2.1.	Processamentos sem mudança de fase nos pacotes de carga.....	62
4.2.1.1.	Distribuição da temperatura interna (sem carga).....	62
4.2.1.2.	Cálculo do coeficiente global de transferência de calor.....	66
4.2.1.3.	Distribuição da temperatura interna (com carga).....	69
4.2.1.4.	Características operacionais do termostato.....	74
4.2.2.	Processamento com mudança de fase nos pacotes de carga.....	76
4.2.2.1.	Características do processo de congelamento.....	76

4.2.2.2.	Expectativa de desenvolvimento microbiano em função das condições de processamento	84
4.2.2.3.	Energia consumida no congelamento doméstico	86
4.2.3.	Energia elétrica consumida na manutenção dos hábitos alimentares de uma família.....	89
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	92
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

APÊNDICES

I.	Propriedades termofísicas dos materiais à temperatura ambiente	100
II.	Propriedades termofísicas da água, carne moída e do modelo de serragem, acima e abaixo da temperatura de congelamento	101
III.	Características de construção do congelador doméstico	102
IV.	Cálculo da quantidade de energia prevista para o congelamento de 1kg do modelo de serragem contendo 74,5% de umidade.....	103
V.	Cálculo da energia consumida para congelar 1kg do modelo de serragem contendo 74,5% de umidade.....	104
VI.	Cálculo do consumo mensal de energia elétrica do congelador.....	107
VII.	Tabela de conversão de unidades.....	109

ÍNDICE DE TABELAS

	Página
IV.1. Resultados experimentais obtidos nos ensaios de congelamento de carne moída e do modelo de serragem	56
IV.2. Comportamento do ciclo do termostato em função da carga acomodada no congelador	75
IV.3. Consumo de energia elétrica do congelador em função da carga contida no seu interior	75
IV.4. Parâmetros obtidos no processamento em função da carga e do sistema de funcionamento do compressor ..	78
IV.5. Consumo de energia elétrica do congelador a partir de valores médios obtidos nos processamentos..	88
IV.6. Balanço de energia obtido no processamento de 1kg do produto.....	88
IV.7. Consumo mensal de energia elétrica do congelador (desdobrado em parcelas).....	90

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
2.1. Curvas típicas de congelamento	6
3.1. Vista geral da caixa térmica contendo o modelo de serragem	37
3.2. Localização dos termopares na simulação da placa infinita	39
3.3. Modelo de serragem acondicionado em cartuchos de 1/2 e 1ℓ	43
3.4. Vista interna do congelador acomodando uma carga de 75kg	44
3.5. Arranjo dos termopares e dos pacotes de carga no interior do congelador	46
4.1. Curvas experimentais de congelamento da carne moída e do modelo de serragem até a temperatura de -180C	59
4.2. Distribuição da temperatura interna em várias regiões do congelador na ausência de produto	63
4.3. Histórico da temperatura interna junto ao bulbo sensor do termostato e em pontos centrais localizados no gabinete	65
4.4. Elevação da temperatura interna em partes centrais do gabinete (sem carga).....	67
4.5. Taxa de elevação da temperatura interna do congelador em função do tempo	68
4.6. Histórico da temperatura interna do congelador e da carga congelada durante a estocagem (ensaio nº 12). Arranjo dos termopares conforme a Figura 3.5....	70

4.7.	Elevação da temperatura interna do congelador contendo uma carga de 75kg, após o corte de energia elétrica	73
4.8.	Processamento de uma carga de 75kg com o funcionamento intermitente do compressor	79
4.9.a.	Processamento de uma carga de 15kg com o funcionamento intermitente do compressor. (a) Abaixamento da temperatura da carga durante o congelamento ...	81
4.9.b.	Processamento de uma carga de 15kg com o funcionamento intermitente do compressor. (b) Elevação da temperatura da carga congelada	82
4.10.	Processamento de uma carga de 15kg com o funcionamento contínuo do compressor (ensaio nº 22). Arranjo dos termopares conforme a Figura 3.5	83

NOMENCLATURA

C	= calor específico à pressão constante	(KJ/kg °C)
C_s	= calor específico volumétrico (Pcte) abaixo do ponto de congelamento	(J/m ³ °C)
C_l	= calor específico volumétrico (Pcte) acima do ponto de congelamento	(J/m ³ °C)
D	= espessura	(m)
E_i	= energia proveniente do meio externo	(kwh)
E_s	= energia consumida para estocagem	(kwh)
E_r	= energia devido a variação de temperatura da carga congelada	(kwh)
E_c	= energia consumida para conclusão do processo de congelamento	(kwh)
E_m	= energia consumida mensalmente pelo congelador	(kwh.mês)
E'_p	= energia consumida para congelar uma unidade de peso do produto	(kwh)
E_p	= energia prevista para congelar uma unidade de peso do produto	(kwh)
h	= coeficiente efetivo de transferência de calor	(w/m ² °C)
h_c	= coeficiente convectivo de transferência de calor	(w/m ² °C)
I	= intensidade de corrente	(A)
K	= condutividade térmica	(w/m °C)
K_l	= condutividade térmica acima do ponto de congelamento	(w/m °C)
K_s	= condutividade térmica abaixo do ponto de congelamento	(w/m °C)
L	= calor latente de solidificação	(KJ/kg)
P_c	= potência consumida	(kw)
T_0	= temperatura do congelador no instante $t = 0$	(°C)
T	= temperatura do congelador no instante $t \neq 0$	(°C)

T_{∞}	= temperatura do meio externo (ambiente)	($^{\circ}\text{C}$)
T_i	= temperatura inicial	($^{\circ}\text{C}$)
T_{ic}	= temperatura inicial de congelamento	($^{\circ}\text{C}$)
T_{oc}	= temperatura final de congelamento	($^{\circ}\text{C}$)
\overline{T}_a	= temperatura média do meio de resfriamento	($^{\circ}\text{C}$)
T_f	= temperatura final	($^{\circ}\text{C}$)
T_s	= temperatura superficial	($^{\circ}\text{C}$)
t_c	= tempo de congelamento	(s)
t_{exp}	= tempo de congelamento experimental	(min)
t_{op}	= tempo de operação do compressor	(min)
t_d	= tempo de descanso do compressor	(min)
t	= tempo	(s)
t_{tot}	= tempo completo do ciclo do termostato	(min)
V	= tensão	(v)
V_c	= velocidade de congelamento	(cm/h)
x	= distância da superfície na direção x	(m)
α_l	= difusividade térmica acima do ponto de congelamento	(m^2/h)
α_s	= difusividade térmica abaixo do ponto de congelamento	(m^2/h)
ρ	= densidade	(kg/m^3)
ρ_a	= densidade aparente	(kg/m^3)
ρ_l	= densidade acima do ponto de congelamento	(kg/m^3)
ρ_s	= densidade abaixo do ponto de congelamento	(kg/m^3)
ΔH	= variação de entalpia entre a temperatura inicial de congelamento e -10°C	(J/m^3)
$\cos \gamma$	= fator de potência	
Ste	= nº Stefan	
Pk	= nº Plank	
Bi	= nº Biot	

RESUMO

Foi estudado o desempenho de um congelador vertical (270ℓ) contendo permanentemente 75kg de produto, a fim de atender mensalmente as necessidades de consumo no lar. Para tanto, foram observadas três situações comuns no Brasil na reposição dessa carga congelada: (a) por simples aquisição de produto pré-congelado (apenas estocagem); (b) congelando-se cinco vezes ao mês uma carga de produto (15kg), conforme instruções do fabricante; e (c) congelando-se mensalmente a carga máxima admitida de uma só vez no congelador (75kg), prática comum de cozinhar os alimentos necessários em um único dia do mês e armazená-los no congelador para o resto do período.

Em vez de produto alimentício, partiu-se de um modelo formulado com serragem de madeira, cloreto de sódio e água (respectivamente, 23, 0,5 e 76,5%, em peso), cujas características termofísicas são semelhantes às da carne magra. O material foi acondicionado em sacos de polietileno previamente colocados no interior de embalagens tipo cartucho para sorvete (papel cartão), de modo a adquirir a forma de blocos retangulares (70 x 89 x 156mm e 40 x 76 x 164mm). A temperatura inicial do modelo foi de aproximadamente 23°C.

Os resultados revelaram que, em qualquer dos casos estudados, o consumo mensal de energia elétrica não foi muito diferente.

Por outro lado, o sistema de funcionamento contínuo do compressor ("quick freezing") conseguiu reduzir o tempo de congelamento em cerca de 37%, quando a carga do produto foi de 15kg. Ainda assim, a elevação da velocidade de congelamento foi pouco significativa, quase não oferecendo oportunidade para a ocorrência de super-resfriamento. No caso do

congelamento da carga de 75kg não houve vantagem alguma em utilizar esse sistema, sendo também notado que a temperatura do produto só atingiu cerca de 15⁰C após pelo menos 2 horas de processo. Na prática, isso poderá significar a deterioração prévia de produtos com elevada população microbiana inicial, oriunda de excessivo manuseio ou condições de higiene insatisfatórias.

Finalmente, pode ser concluído que o processo de congelamento doméstico é tipicamente lento, devendo ser limitado a produtos que não sofram perdas significativas de qualidade sob velocidades de congelamento entre 0,1 a 0,2cm/h, ou que tão pouco dependam desse parâmetro. O funcionamento ininterrupto do compressor ("quick freezing") tem sido superenfaticado, talvez por razões de estratégia comercial dos fabricantes.

SUMMARY

Performance of a home freezer (270ℓ) containing permanently 75kg of product in order to attend monthly consumption requirement was studied. Three common situations used in Brazil to continuously replace the load of product was observed: (a) by simple acquisition of frozen product (only storage); (b) five times per month, freezing of a small load of product (15kg) following the manufacturer's instruction and (c) monthly, full load of unfrozen product placed at once in the freezer (75kg), because, here, it's a common practice of cooking the food needs for one month in a single day and storing frozen for the rest of the period.

A model containing sawdust, sodium chloride and water (23, 0.5 and 76.5%, respectively) with thermal properties close to lean meat, was used. This model product was pocked in high density polyethylene bags (10µm) and placed inside carton rectangular

boxes used for ice cream (70 x 89 x 156mm and 40 x 76 x 164mm). The initial temperature of model was maintained around 23⁰C.

In all the cases studied, the monthly energy consumption was not too different.

The freezer's continuous run system (quick freeze switch) was able to reduce the freezing time about 37% for the case (b). Even in this situation the freezing velocity was maintained around 0.2cm/h, almost not showing the occurrence of supercooling. In case (c) the quick freeze switch was useless. It was observed that product's temperature reached 15⁰C just after 2 hours of process. In practice this may cause microbial spoilage in those products with high initial microbial count.

Finally, it may be concluded in this simulation that the some freezing practice is a slow process and should be limited to those products that don't change their characteristics under freezing between 0.1 and 0.2cm/h. Apparently the function of quick freezing switch has been often over emphasized as a commercial strategy.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento da classe média brasileira nos últimos anos veio acompanhado de mudanças de hábitos, entre eles, maior dedicação ao lazer, famílias mais reduzidas em número de pessoas e menos disponibilidade de tempo, inclusive para o preparo de refeições. Conseqüentemente, as gerações mais recentes vêm sendo obrigadas a se adaptar aos novos padrões de vida. Em relação ao hábito alimentar, a grande tendência na modificação do perfil do consumidor pode ser constatada pelo fato de milhares de pessoas, notadamente mulheres, procurarem anualmente os cursos de congelamento doméstico (1). Para profissionais, tais cursos têm sido freqüentes e já fazem parte do currículo de algumas escolas para nutricionistas, cozinheiros industriais, etc.

Na área industrial, o Brasil domina boa parte dos conhecimentos sobre processos, equipamentos e infra-estrutura do congelamento, principalmente nos setores de suco de laranja e carnes de boi e de frango. A rede de armazéns frigoríficos de uso público, em grande parte aprovada para exportação, cresceu de 40 para 935 mil metros cúbicos entre os anos de 1972 e 1982 (1). Novos congeladores industriais e materiais de embalagem vêm sendo lançados no mercado, enquanto várias redes de supermercados e lojas procuram aumentar a sua capacidade de vendas. Tudo isso faz com que o País seja atualmente o segundo produtor mundial de alimentos congelados, superado apenas pelos Estados Unidos (8).

Entretanto, trabalhar com produtos congelados não é uma tarefa simples como pode parecer inicialmente. A qualidade final depende de uma série de cuidados, desde a escolha da matéria-prima até a distribuição do produto para consumo. Segundo informações da indústria, é no varejo que surge a principal

dificuldade para o progresso comercial de seus produtos. Os revendedores nem sempre estão conscientes sobre a manutenção de boas práticas, como, por exemplo, manter tais produtos numa temperatura adequada de estocagem. Isso já foi percebido pelo consumidor (8).

Fatos desta natureza deram um impulso razoável no congelamento caseiro, cuja justificativa mais freqüente é a economia proporcionada, além da oportunidade do próprio consumidor controlar a qualidade dos produtos. Há quem diga que o investimento inicial, incluindo os acessórios para congelamento, pode ser recuperado em alguns meses (44). Outra vantagem anunciada é a possibilidade de uma pessoa ocupar-se no preparo de refeições em apenas um único dia por mês, aproveitando o tempo restante para atribuições de caráter profissional, social ou de lazer. Tais estratégias de mercado possibilitaram, no início desta década, a comercialização anual de 400 mil congeladores domésticos, significando o surgimento progressivo de novos consumidores e pequenos distribuidores do ramo (1).

Sob o aspecto tecnológico é quase inexistente o volume de informações confiáveis a respeito do congelamento caseiro. Admite-se que os congeladores domésticos foram criados nos países desenvolvidos para conservar alimentos previamente congelados, funcionando como equipamento auxiliar de estocagem, notadamente nos períodos de entressafra. Entretanto, para a produção habitual no lar, a movimentação natural do ar frio limita as velocidades de congelamento, prolongando demasiadamente o tempo de processo desses alimentos. Conseqüentemente, há uma expectativa de restrição ao tipo, qualidade e quantidade de produtos que poderiam ser processados nessas condições. A alegação dos

fabricantes é que o problema estaria solucionado (ou minimizado) nos modelos mais recentes de congeladores, que são dotados de um dispositivo que permite o funcionamento ininterrupto do compressor aumentando a velocidade de congelamento do processo ("Fast" ou "Quick Freezing"). Contudo, os benefícios desse artifício não parecem tão evidentes, além de exigir um esforço adicional da unidade de refrigeração e aumentar o consumo de energia elétrica no lar.

Com base nessas observações, foi avaliado neste trabalho o desempenho de um congelador doméstico no atendimento das necessidades habituais de consumo de alimentos congelados no lar. Como produto foi utilizado um material não alimentício, com propriedades termofísicas semelhantes às da carne magra.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Introdução

As temperaturas baixas têm sido utilizadas para inibir a atividade microbiana, bem como retardar as reações bioquímicas e enzimáticas, as quais ocorrem normalmente em alimentos mantidos à temperatura ambiente (21). Quanto menor a temperatura, tanto mais reduzida será a influência desses fatores. Por isso, o congelamento é tido como um dos processos mais vantajosos para a preservação de grande parte dos alimentos, principalmente durante longos períodos. Entretanto, na prática, alguns cuidados devem ser observados para evitar que o produto final apresente danos de ordem nutricional, como a oxidação de gorduras e algumas vitaminas, ou alterações substanciais na textura, em decorrência da morte de células, retrogradação de polissacarídeos, desestabilização de sistemas coloidais, desnaturação de proteínas, etc, conforme "amplamente" comentado na literatura (12, 21, 32).

O processo de congelamento consiste basicamente de três etapas: congelamento, estocagem frigorificada e descongelamento do produto para consumo (21). Cada uma destas etapas geralmente envolve a ocorrência de fenômenos físicos, químicos e físico-químicos, quase sempre irreversíveis, mas que podem ser controlados sem conseqüências comercialmente indesejáveis. Por essa razão, o sucesso do método depende da condução adequada de toda a extensão do processo. Obviamente, a qualidade dos produtos congelados também está subordinada às características da matéria-prima e seu preparo. Esses pontos são fundamentais e justificam um conhecimento adicional que precede todos os cuidados com o processamento em si, notadamente no caso dos vegetais.

2.2. Fenômenos que ocorrem nas etapas do processo e suas consequências

2.2.1. Congelamento

Em geral, a maioria dos alimentos "in natura" possui acima de 60% de água, sendo, portanto, o componente majoritário. Parte dela está fortemente ligada a constituintes celulares, enquanto o restante permanece livre, apresentando, portanto, uma certa mobilidade. A proporção em que cada fração é encontrada depende da composição química do alimento (18). Por exemplo, em pescado, parte dela está ligada a grupos polares das proteínas e o restante é considerado água livre. Segundo LEACH (32), estima-se que 94% da água presente na constituição de células vegetais está na forma livre e, portanto, disponível para a cristalização ou participação em reações comercialmente indesejáveis. Analogamente, esse valor corresponde a 88% para as células animais.

Quando a água pura é submetida ao congelamento sua temperatura diminui até atingir o ponto de congelamento, onde permanece constante, liberando o calor latente da solidificação. Posteriormente, sua temperatura continua abaixando e tendendo ao equilíbrio com a temperatura do meio de resfriamento. Uma forma prática de conhecer essa evolução é registrando a variação da temperatura em função do tempo durante o processo. O registro fornece a curva de congelamento, mostrada na Figura 2.1 para a água pura e para uma solução aquosa (30). Enquanto a água pura possui um ponto de congelamento definido, a solução aquosa apresenta uma faixa de temperatura durante a mudança de fase. Como os alimentos, em geral, são constituídos por mais de um soluto, é de se esperar que apresentem curvas de congelamento mais parecidas com a de uma solução aquosa do que com a água pura. Cada uma das

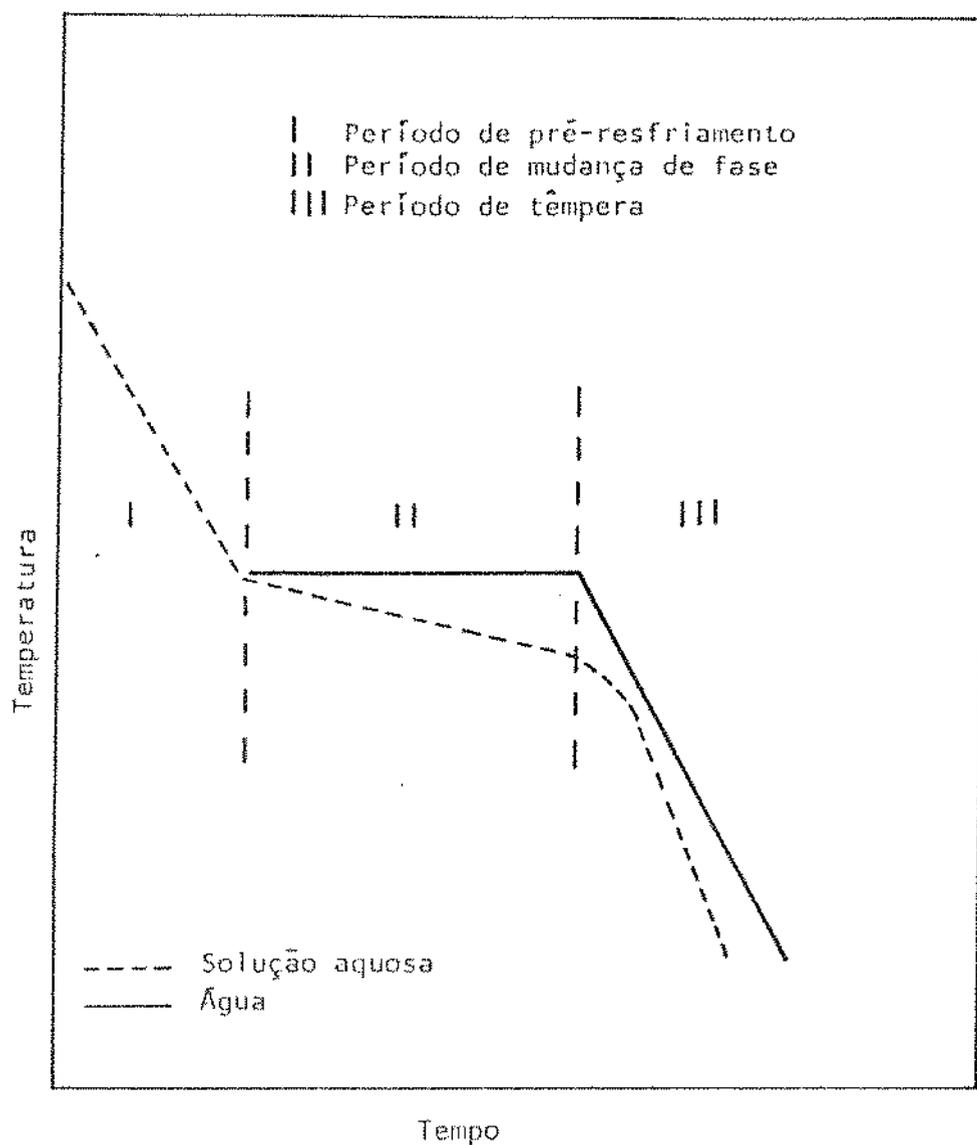


FIGURA 2.1. Curvas típicas de congelamento (esquemático).

frações desses solutos deve ter influência na forma final da curva que representa o congelamento de um alimento.

Durante a cristalização, as moléculas da água pura sofrem uma expansão de aproximadamente 9% do seu volume inicial. Na maioria dos alimentos, isso também ocorre, mas com menor efeito (cerca de 6%), visto que parte da água está na forma de solução, e também pela presença de ar (28). São raros os casos em que a expansão de volume é quase imperceptível em sistemas aquosos (21). Um deles é o da sacarose, cuja solução com 60% (em peso) do açúcar, quando submetida à temperatura de -18°C , apresenta apenas uma ligeira formação de gelo. Porém, ao reduzir essa concentração à metade, observa-se cristalização abundante entre -3° e -4°C , acompanhada de uma expansão de 6,3% em relação ao volume inicial da solução (32). No último caso, a magnitude do fenômeno é tão comum como na maioria dos alimentos.

À medida que a água presente nos alimentos se cristaliza, ocorre paralelamente uma concentração progressiva dos demais constituintes não aquosos. Esse aumento de concentração causa uma mudança no equilíbrio ácido-base, o qual está associado à estabilidade de muitos colóides e suspensões. Caso haja a precipitação de sais e compostos ligeiramente solúveis, pode resultar, também, uma mudança brusca de pH. Por exemplo, as lipoproteínas de baixa densidade (viteleninas) da gema de ovo sofrem desnaturação irreversível, chamada geleificação, devido à redução do pH de 7 para 5 e ao aumento da concentração de fosfatos (26). O fenômeno é causado pela agregação dessas lipoproteínas e ocorre a -6°C , quando 81% da água na gema de ovo está cristalizada (30). Como consequência, há um aumento substancial da viscosidade após o descongelamento do produto, em relação à sua condição de

fresco. Nessa etapa do processo a geleificação é favorecida por velocidades de congelamento relativamente baixas (14, 21).

Industrialmente, a prevenção desse problema é feita durante a etapa de preparação da matéria-prima para congelamento. Açúcares como sacarose, arabinose, galactose e glicose, adicionados à gema de ovo em concentrações de 10% atuam como agentes crioprotetores. O mesmo objetivo é alcançado com a adição de 5% de glicerol. Nenhum desses aditivos altera apreciavelmente as propriedades do produto. Porém, o cloreto de sódio, utilizado comercialmente na prevenção da geleificação, causa um aumento na translucidez e na viscosidade do produto após o descongelamento, em relação à gema de ovo fresca (14). Segundo a literatura (21) concentrações de 5 a 10% desse sal são suficientes para prevenir a geleificação, permitindo, ainda, alguma fluidez ao produto descongelado. Outro método utilizado é a hidrólise das proteínas de baixa densidade por enzimas proteolíticas, antes do congelamento do produto (21). Por fim, é possível inibir, mas não prevenir a geleificação da gema de ovo por meios mecânicos, ou seja, utilizando-se de um homogeneizador ou ainda de um moinho coloidal (14, 21).

Um tipo de dispersão muito comum encontrado nos alimentos são os colóides. Muitas substâncias naturais como amido, gelatina, pectina e proteínas (clara de ovo) quando dissolvidas na água formam colóides. Estes normalmente caracterizam-se como sendo solúveis ou rígidos (respectivamente sóis ou géis). Também estão presentes em alimentos prontos como geléias (géis) ou cremes e molhos (sóis). Geralmente, possuem carga elétrica negativa e são capazes de apresentar o fenômeno da sinérese, isto é, a separação das fases líquida e sólida que os compõem. Essa alteração pode ser

trazida pelo congelamento e provavelmente se deve à aproximação entre partículas da fase sólida durante a formação de cristais de gelo. Isso pode resultar numa mudança de carga elétrica, pH e/ou num aumento da força ou número de ligações (ou ambos) existentes entre os elementos estruturais. A formação de ligações intermoleculares adicionais diminui o espaço disponível para as moléculas do solvente e as fases líquida e sólida se separam. Se sacarose for adicionada aos sôis, ela pode reduzir a sinêrese pelo abaixamento do ponto de congelamento, pela redução da quantidade de gelo formado ou ainda, evitando a aproximação entre partículas para formar ligações intermoleculares (32).

A intensidade da sinêrese depende do tipo de alimento em questão. Diz-se popularmente que gelatina não congela bem, mas na presença de sacarose a sinêrese torna-se mais branda. Da mesma forma, o iogurte caseiro geralmente apresenta a separação de fases, mas aqueles que contêm sacarose congelam bem (32).

Quanto ao amido, sabe-se que contém dois tipos de polissacarídeos: amilopectina e amilose. O primeiro, quando utilizado na elaboração de massas e molhos caseiros é estável diante do congelamento, mas a amilose apresenta tendência a formar aglomerados com conseqüente perda da capacidade de retenção de água (retrogradação). O fenômeno ocorre com maior intensidade ao redor de -2°C e é amenizado nos processos com velocidade de congelamento mais elevada, geralmente utilizados pela indústria (32).

Outro tipo comum de dispersão são as emulsões, definidas como sendo a dispersão de gotículas de um líquido imiscível (fase dispersa) em outro líquido imiscível (fase contínua) por agitação mecânica (32). Molho de salada ("french dressing") é uma

emulsão do tipo óleo-água muito instável, separando-se devido ao congelamento ou mesmo durante a permanência no refrigerador por uma semana. Maionese, outra emulsão óleo-água, deve sua maior estabilidade às membranas da lipoproteína que se formam ao redor dos glóbulos de óleo quando gema de ovo é adicionada. Essas membranas, entretanto, são sensíveis ao congelamento e a emulsão geralmente quebra após o descongelamento. Outro fator que contribui para isso é a cristalização do óleo a baixas temperaturas. Se o óleo de milho ou de oliva for substituído pelo de amendoim ou de açafrão (ainda não comercializado no Brasil), a estabilidade do molho de salada, preparado com pasta de cereais, é muito maior. O leite, também uma emulsão óleo-água, sofre desestabilização devido ao congelamento. Normalmente, sua estabilização é feita pelas membranas fosfolipídicas, que envolvem os glóbulos de óleo e pela proteína (caseína) na fase aquosa coloidal. A desestabilização dessas membranas pela temperatura baixa provoca a separação dos glóbulos de óleo dando formação a uma camada oleosa. O efeito é maior em processos com velocidades de congelamento relativamente baixas. Essa mudança é reversível e o leite recupera a sua consistência inicial, desde que a desnaturação da proteína não seja total (32).

Do ponto de vista físico, os tecidos animal e vegetal podem ser tratados, aproximadamente, como soluções aquosas diluídas, cujo ponto de congelamento depende da concentração molar dos solutos presentes e não da quantidade de água (21, 28). As frutas, em geral, possuem alto conteúdo de água e ponto inicial de congelamento entre -2° e -3°C . Por outro lado, as carnes magras possuem menos água e um ponto de congelamento inicial de -1°C . Esse contraste é atribuído ao alto teor de açúcar e de acidez nas

frutas em comparação com o baixo teor de solutos nas carnes.

A formação de cristais não começa necessariamente no ponto de congelamento, pois poderá ocorrer o super-resfriamento, fenômeno este caracterizado por uma redução de temperatura até valores abaixo do ponto de congelamento do material, sem a ocorrência de cristalização. O super-resfriamento cessa quando um cristal de gelo é formado, disparando de uma só vez o processo de cristalização. Conseqüentemente, a temperatura aumenta rapidamente até o ponto de congelamento, promovendo, predominantemente, a formação intracelular de cristais. Nessas condições há uma expectativa de melhor qualidade para o produto, mostrando que os efeitos indesejáveis não se devem tão somente ao abaixamento da temperatura, mas principalmente pela mudança de fase durante o processo (21). Por exemplo, quando ovo cozido (integral) é congelado, após o descongelamento apresenta aparência e textura inaceitáveis. Entretanto, se submetido a um super-resfriamento até por volta de -9°C , esse aspecto pode ser melhorado substancialmente. Na indústria isso é facilmente obtido com o emprego de velocidades de congelamento elevadas, mas no congelamento doméstico ainda não foi encontrado um método plenamente satisfatório. Segundo LEACH (32), obtêm-se 75% de resultados aceitáveis quando os ovos, após o cozimento, são resfriados no refrigerador e então congelados sem a remoção da casca. Ainda assim, qualquer fissura externa que permita a introdução de um cristal de gelo durante o super-resfriamento poderá disparar o processo de cristalização. Entretanto, a ocorrência do fenômeno no congelamento doméstico é rara (21, 32).

2.2.2. Estocagem frigorificada

Embora boa parte das alterações físicas nos produtos

tenham início durante o congelamento, elas podem prosseguir ao longo da estocagem frigorificada. A taxa de deterioração depende da natureza do produto e do tempo e temperatura de estocagem, normalmente estipulada no valor máximo de -18°C . Para produtos como peixe e sorvete, pode ser conveniente o uso de temperaturas mais baixas (24).

Um dos problemas mais críticos nessa etapa é a perda de umidade do produto, principalmente durante períodos prolongados. Embalagens pouco permeáveis ao vapor d'água mantêm a perda de umidade em níveis comercialmente satisfatórios. Porém, se o produto não é embalado, ou ainda, se a embalagem é muito permeável ao vapor d'água, a perda de umidade pode alcançar cerca de 1,5% ou mais (28). Acredita-se que esse fato seja devido à sublimação da camada superficial de gelo do produto que, via de regra, é causada pela flutuação da temperatura de estocagem (28, 32). Mesmo quando a embalagem é adequada nesse sentido, se ela não tiver um bom contato com a superfície do produto, a desidratação ainda pode ocorrer. Mas a água removida permanece na forma de gelo no espaço deixado entre a superfície do produto e a embalagem.

Além da perda de umidade, a desidratação excessiva pode acelerar as reações oxidativas devido à eventual presença de ar em contato com os tecidos, principalmente em produtos protéicos, causando a queima pelo frio. É uma transformação irreversível com mudanças inaceitáveis na coloração e textura, mais comumente em peixes e aves congelados.

Do ponto de vista físico, uma das transformações mais importantes é a recristalização, que apresenta efeitos adversos à textura dos produtos, particularmente em pudins, pães e alimentos à base de ovos e amido. Pode ser minimizada por

temperaturas de estocagem relativamente baixas e uniformes, o que é muito difícil, mesmo na escala comercial, pois flutuações de 1° a 2°C são comuns. Porém, não é esse tipo de flutuação que afeta substancialmente a qualidade, mas sim aquele que ocorre quando o produto é retirado da câmara de estocagem e transportado aos centros de distribuição, onde permanece em cabines abertas. Nesse caso, o produto localizado no topo pode atingir temperaturas de até 10°C acima da temperatura média da cabine, devido à influência da radiação térmica, sendo que a mais importante está na faixa do infra-vermelho e não da luz visível. Uma proteção em torno da área exposta da cabine ou o uso de embalagens de folha metálica polida podem reduzir a temperatura do produto no topo da cabine em 6° a 8°C (28).

Uma transformação química importante é devida às modificações de pH. Ela está associada à concentração de alguns componentes e também pode ser causada por atividades enzimáticas. Não se sabe exatamente como as variações de pH afetam a qualidade dos produtos. Elas têm efeito na desnaturação de proteínas, mas conforme relatado por VAN DEN BERG (43), ambos não estão diretamente correlacionados. Enquanto a desnaturação de proteínas continua durante a estocagem frigorificada e é função da temperatura, o mesmo não se pode dizer a respeito das mudanças de pH. Um exemplo típico, já comentado, é a descaracterização da gema de ovo "in natura", observada após o descongelamento. Essa mudança irreversível, que é acentuada nos processos com velocidade de congelamento relativamente baixa, chega a um estado máximo após 2 a 4 meses de estocagem a -18°C. Conforme relatado anteriormente, é possível minimizá-la pela adição de agentes crioprotetores durante o preparo da matéria-prima para congelamento. Outro exemplo

similar é a desnaturação da caseína do leite, iniciada durante o congelamento. A evolução prossegue ao longo da estocagem frigorificada e é mais rápida à medida que a temperatura aumenta. Aparentemente, a reação é iniciada devido à cristalização da lactose na fase aquosa da emulsão. A transformação é irreversível mas, em casa, pode ser evitada pela adição de açúcar, antes do congelamento. Na indústria, o uso de polifosfato de sódio é empregado com essa finalidade (32).

Em produtos altamente açucarados, a cristalização do açúcar pode ser iniciada pela desidratação causada por embalagens perfuradas ou danificadas. No caso da sacarose, o fenômeno assemelha-se a uma contaminação por fungos, porém desaparece ao descongelar. A formação do hidrato pode ser evitada pela substituição de um terço da sacarose por glicose ou dextrose, antes do congelamento. Todavia, se essa proporção for excedida poderá formar o hidrato de dextrose, cuja aparência é de uma pérola branca. A temperatura crítica para o hidrato de sacarose é -23°C , e o seu desenvolvimento é retardado numa faixa acima ou abaixo desse valor. Outro açúcar capaz de sofrer a cristalização é a lactose, causando uma textura arenosa típica em sorvete, geralmente conferindo uma qualidade inferior.

Quanto aos produtos formulados com amido foi comentado que a retrogradação é a principal transformação, sendo iniciada durante o congelamento. Entretanto, ela prossegue ao longo da estocagem frigorificada, principalmente em razão das flutuações de temperatura. Por exemplo, pão congelado torna-se seco e esfarelado. Se estiver embalado e estocado sob condições adequadas, essa transformação provavelmente não será devida à perda de umidade, mas sim à retrogradação do amido, que o torna

quebradiço (28, 32). Em cobertura para torta se a amilose estiver presente na formulação, após o descongelamento a parte superior do produto torna-se opaca, enquanto o fundo poderá empapar devido à absorção da umidade liberada pela retrogradação. Já a amilopectina é mais estável. Por essa razão, farinhas cerosas preparadas com algumas variedades de milho, sorgo e arroz são compostas inteiramente desse polissacarídeo e largamente empregadas na fabricação industrial de pratos congelados. Em situações onde o produto não necessita de aquecimento após o descongelamento, a farinha cerosa de arroz tem se mostrado superior às demais. Assim, um molho branco engrossado com essa farinha é ainda estável após um ano de estocagem a -18°C . Se aparentemente houver o desenvolvimento de coágulo, basta fazer um aquecimento a 50° ou 60°C (32).

Resta lembrar que a estocagem feita adequadamente à temperatura de, no máximo, -18°C , pode preservar a qualidade dos alimentos durante seis meses a dois anos, em geral. Proteínas, gorduras e carboidratos não perdem o seu valor nutricional nem energético ao longo desse período. O mesmo se aplica aos componentes minerais (28, 32). Entretanto, no caso doméstico, esse tempo deve ser reduzido para, aproximadamente, três meses, uma vez que o consumidor não tem condições de fazer um controle mais efetivo sobre o processamento global desses alimentos (28).

2.2.3. Descongelamento

O descongelamento tem sido uma operação pouco considerada dentro do processo de congelamento. Entretanto, é nessa etapa que são detectadas as transformações ocorridas como consequência do congelamento e estocagem do produto. Massas de bolo apresentam redução de volume e a sinérese torna-se evidente em geléias e iogurtes caseiros. Enrijecimento do tecido

animal também se manifesta, bem como o ranço em carnes gordas. As frutas apresentam-se amolecidas em razão da perda da semi-permeabilidade das membranas celulares e a incapacidade das células em reter umidade. Quando o gelo funde as células parcialmente distorcidas recuperam a sua forma original, mas a textura não, e colapsam enquanto ocorre a perda de líquido por gotejamento ("drip"). Essa exsudação é influenciada principalmente pela estrutura celular, velocidade de congelamento, tempo e temperatura de estocagem e área de exposição do produto. Segundo LEACH (32), aparentemente a velocidade de descongelamento não é tão importante. Todas essas alterações ocorrem com maior intensidade na ausência de agentes retardadores ou crioprotetores (14, 21, 32).

Apesar da importância secundária que lhe é dada, sabe-se que a velocidade de descongelamento pode influir na qualidade final, mesmo que as etapas anteriores do processo tenham obedecido critérios adequados. Por exemplo, produtos congelados por processos ultra-rápidos devem ser descongelados o mais rápido possível. No congelamento doméstico, não é aconselhável descongelar pão lentamente no refrigerador, devido à maior tendência à desidratação (32). Hortaliças como ervilha, vagem, cenoura e couve-de-Bruxelas podem ser descongeladas por imersão em água morna. As frutas, em geral, devem ser submetidas a gradientes mais moderados de temperatura, ou seja, descongela-se à temperatura ambiente ou sob água corrente. Devem, ainda, ser consumidas prontamente devido à rápida alteração de cor e textura. Pequenos pedaços de carne, peixe ou frango congelados podem ser cozidos diretamente, se desejados. Porções maiores devem ser descongeladas, ao menos parcialmente, antes do cozimento. Nesse

caso, o tempo necessário ao descongelamento de 1cm de espessura à temperatura ambiente é de 1 a 2 horas, ou utilizando o refrigerador doméstico, de 3 a 4 horas, aproximadamente (24).

Em alimentos originalmente sólidos, onde predomina a transferência de calor por condução, sabe-se que o descongelamento é mais lento que o congelamento. Essa diferença é atribuída ao fato de que a condutividade térmica do gelo é quatro vezes maior que a da água e a difusividade térmica do gelo é nove vezes maior que a da água. Isso significa que a água "imobilizada" é um isolante térmico mais efetivo que o gelo. Durante o descongelamento a transferência de calor atua numa frente do tipo água-gelo, ocorrendo o inverso no caso do congelamento (21). Conseqüentemente, grandes peças, como quartos de carne levam muito tempo para descongelar à temperatura ambiente. Se as condições microbiológicas iniciais do produto não são satisfatórias, poderá ocorrer a deterioração. Nesse caso a alternativa doméstica é efetuar o descongelamento parcial no refrigerador e concluí-lo simultaneamente com o início do cozimento num forno comum ou de microondas. A propósito, o aquecimento por microondas funciona melhor para alimentos cuja composição química é homogênea. Infelizmente grande parte dos alimentos congelados são heterogêneos, contendo fases congeladas e não congeladas, além da distribuição não uniforme de gordura. Esses componentes diferem bastante na maneira de absorver energia, podendo causar o superaquecimento em determinadas áreas, enquanto outras ainda estão congeladas.

Do ponto de vista nutricional, após o descongelamento podem ocorrer perdas de compostos solúveis no líquido exsudado, incluindo vitaminas, minerais, açúcares e mesmo proteínas. A

extensão dessas perdas depende do tratamento que o produto recebe em cada uma das etapas anteriores do processo e podem ser controladas se os cuidados forem adequados. Ainda assim, esse fato assume uma importância relativa. Por exemplo, embora as frutas e hortaliças possam ser fontes de carboidratos e proteínas, elas têm como contribuição principal o fornecimento de vitaminas e minerais. Conseqüentemente, as perdas de vitamina C são mais importantes em relação a outros componentes. Por outro lado, as carnes são as maiores fontes de proteínas e gorduras, além de vitamina B, ferro e outros minerais. Então as perdas de proteínas são fatores mais críticos (32).

Portanto, quanto ao valor nutricional, os alimentos congelados podem ser tão atrativos como os alimentos frescos. Boa parte dos consumidores ainda têm uma imagem negativa, achando que qualquer produto congelado é de qualidade inferior. Nesse ponto são induzidos por alguns fabricantes que afirmam que como o seu processo de congelamento é rápido, o produto final possui qualidade idêntica ao produto fresco. Nenhum dos dois conceitos é totalmente verdadeiro, pois sempre haverá alguma perda de sabor e de nutrientes, particularmente vitaminas. Entretanto, o aspecto mais importante é minimizá-las no sentido de se preservar o componente de maior interesse em cada tipo de alimento (28).

2.3. Relação entre velocidade de congelamento e qualidade

Vários pesquisadores têm divulgado que determinados parâmetros de qualidade estão associados com a formação e localização de cristais de gelo, que por sua vez dependem da velocidade de congelamento proporcionada ao produto (21, 23, 25, 28, 34). Com base em observações experimentais foi concluído que o congelamento rápido se traduz em melhor qualidade, notadamente na

textura, indicando que a formação de gelo intracelular é desejável.

Entretanto, termos como lento, rápido ou ultra-rápido, freqüentemente encontrados na literatura, são subjetivos, pois uma velocidade considerada lenta no congelamento de uma suspensão de células pode ser entendida como ultra-rápida no congelamento de alimentos. Assim sendo, conclui-se, aparentemente, que as definições existentes para esse parâmetro são baseadas em diferentes metodologias ou conceitos, e comparações entre os vários estudos são difíceis ou mesmo impraticáveis. Em princípio, outros fatores também têm contribuído para esse desentendimento, tais como: comparações de amostras com dimensões distintas, diferença nas facilidades encontradas para o desenvolvimento do trabalho, ou ainda a falta de reconhecimento no mérito de outros métodos. Segundo FENNEMA (21), uma solução apropriada poderia ser obtida a partir da padronização dos métodos. Uma ampla discussão sobre o assunto seria saudável, inclusive para a eliminação de métodos e conceitos impróprios. O mesmo autor relaciona as definições mais comuns sobre velocidade de congelamento e que estão descritas a seguir:

(a) Métodos térmicos

Baseiam-se na quantidade de gelo formada por unidade de massa no tempo unitário, determinada por calorimetria. É um método preciso e representativo mas pouco conveniente quando as amostras são congeladas rapidamente ou em ensaios numerosos de rotina.

(b) Aparência da amostra

A aparência da frente de congelamento (contínua ou descontínua), tamanho e localização dos cristais podem ser

utilizados como medida da velocidade de congelamento. Porém, são insensíveis às pequenas mudanças desse parâmetro, além de sofrer influência de outros fatores difíceis de controlar.

(c) Velocidade da frente de gelo

É uma expressão válida, mas de difícil medida em muitos casos. É uma técnica limitada a velocidades de congelamento suficientemente baixas para produzir uma frente de congelamento contínua (interface sólido-líquido).

(d) Mudança de temperatura na unidade de tempo

Trata-se de um método popular mas muito questionável, pois a taxa de variação de temperatura no interior de uma amostra varia substancialmente ao longo do processo de congelamento. A aplicação de uma taxa média não representa adequadamente a velocidade de congelamento do processo, pois a quantidade de material que muda de estado devido ao abaixamento de uma unidade de temperatura não é uniforme. Alguns autores empregam o termo intensidade de resfriamento expressa em °C/min, e reconhecem as suas limitações como representante da velocidade de congelamento (34).

(e) Tempo para ocorrer uma dada variação de temperatura

É um método prático e razoavelmente preciso, desde que a faixa de temperatura selecionada abranja o intervalo onde a maior parte da água sofra cristalização. Em princípio, sua única limitação está na aplicação de processos com velocidades de congelamento extremamente elevadas. Nesse caso, torna-se muito difícil distinguir as várias partes da curva de congelamento, notadamente a que corresponde à mudança de fase, concluindo na

impossibilidade de selecionar a faixa de temperatura desejada. Porém, velocidades de congelamento dessa magnitude não são tão comuns em processos comerciais.

O Instituto Internacional do Frio (28) adota esse método e define velocidade de congelamento como sendo a relação entre a maior distância, medida da superfície ao centro térmico do produto, e o tempo decorrido a partir do instante em que a superfície atinge 0°C, até que o centro térmico esteja a uma temperatura de 10°C abaixo do ponto inicial do congelamento do produto. Assim sendo, a velocidade de congelamento é expressa em cm/h.

Segundo o IIF (28), os valores mais comuns encontrados na prática e seus respectivos processos são: 0,2cm/h (lento), para congelamento a granel em câmaras frias ventiladas; 0,5 a 3cm/h (rápido), para produtos embalados e congelados em câmaras de ar forçado ou em congeladores de placas; 5 a 10cm/h (rápido), para congelamento individual de produtos de pequenas dimensões, como no sistema de leite fluidizado; 10 a 100cm/h (ultra-rápido), para congelamento em "spray" e/ou imersão em gases liquefeitos.

Apesar da existência de várias definições sobre o assunto, algumas até limitadas, foi possível chegar experimentalmente a conclusões importantes. MONZINI e MALTINI (34) deduziram que, para obter a formação de gelo intracelular, são requeridas intensidades médias de resfriamento de 0,3°C/min para tecido animal e 2°C/min para tecido vegetal.

De fato, embora haja uma certa similaridade entre ambos, o tecido vegetal possui, normalmente, uma estrutura semi-rígida, composta de células poliédricas ordenadas ou não. Por

isso, é comum após o descongelamento observar o rompimento e separação dessas células, com conseqüentes alterações na textura. Já as fibras musculares formam uma estrutura mais flexível e são altamente ordenadas, acomodando parte dos efeitos produzidos pelo abaixamento da temperatura (21).

Por razões práticas, o congelamento rápido tem sido preferido industrialmente, embora nem sempre justifique uma qualidade melhor para qualquer produto. Na verdade, grande parte dos alimentos admite uma ampla faixa de velocidades de congelamento sem alterações perceptíveis de qualidade como, por exemplo, as carnes de boi, peixe e aves em geral (24, 28). Segundo HERMANN (24), o pescado requer velocidades superiores a 0,1-0,3cm/h, valores aparentemente compatíveis com o processo de congelamento doméstico. Nesse caso, cuidados adicionais devem ser observados, pois valores inferiores podem dar origem a problemas microbiológicos.

Por outro lado, isso não significa que a velocidade de congelamento seja totalmente secundária, pois há um grupo de alimentos cuja qualidade progride em função desse parâmetro. Dentre eles estão: tomate, pepino, aspargos, morango e vagem (24, 28, 34). Os dois últimos apresentam melhor textura e capacidade de retenção de água se congelados em sistemas ultra-rápidos, isto é, requerem velocidades mínimas de congelamento superiores àquelas encontradas nos processos industriais mais comuns.

A título de orientação alguns autores têm sugerido velocidades mínimas de congelamento entre 1,8 e 4,0cm/h para que os vegetais mantenham uma boa qualidade. São citados: cenoura, couve-flor, vagem, berinjela, ervilha, pimentão e abobrinha. Nas frutas essa faixa é de 3 a 4cm/h, visto que possuem uma estrutura

ainda mais frágil (34). Em geral são valores obtidos com certa facilidade e viabilidade econômica apenas em sistemas de leite fluidizado.

Situação não menos problemática ocorre em produtos pré-cozidos, geralmente caseiros. A clara de ovo só é aceitável a partir de velocidades de congelamento em torno de 2cm/h, e considerada boa se acima de 8cm/h (24, 34). Dentre os produtos pré-cozidos supergelados, ela é uma exceção, pois quase todos os demais parecem se acomodar numa faixa de 2 a 3cm/h, o que pode ser obtido limitando-se as dimensões de cada produto. Entende-se como alimentos supergelados aqueles cujo processo deve ser conduzido de modo a ultrapassar brevemente a zona de cristalização máxima, conforme as necessidades específicas de cada um (27, 28).

Com base nesse breve relato, nota-se que o sucesso do congelamento doméstico está mais próximo de produtos como as carnes em geral, o que vem a coincidir com o interesse popular (36). Os congeladores mais modernos são dotados de um dispositivo que, segundo os fabricantes, aumenta a velocidade de congelamento ("quick" ou "fast freezing"). Ainda assim, sabe-se que o processo doméstico é tipicamente lento e não há termo de comparação com as velocidades atingidas nos processos industriais (6, 12). A propósito, tal dispositivo meramente proporciona o funcionamento ininterrupto do compressor, extraíndo-se mais calor do produto por um dado período de tempo. O congelamento de outros produtos, sejam "in natura" ou pré-cozidos, fica a critério da habilidade e da exigência do próprio consumidor.

Em que pese a todas essas observações associando velocidade de congelamento e qualidade, há ainda uma série de cuidados que devem ser previstos durante a estocagem dos produtos

congelados. Variações freqüentes de temperatura provocam o crescimento de cristais, anulando as vantagens eventualmente conseguidas nos processos mais sofisticados, principalmente quando o período de armazenamento é prolongado (24, 25). Uma recomendação oportuna é não ignorar o processo de descongelamento.

Resta dizer que a velocidade de congelamento, baseada na medida da velocidade média de avanço da frente de gelo, permite, na verdade, a ocorrência de valores distintos entre a superfície e o interior do produto durante o processo. Contudo, a partir do momento em que a temperatura desejada for atingida no ponto de referência (centro térmico), é evidente que as demais regiões já se encontram congeladas. Apesar disso, para produtos com dimensões limitadas, como no caso dos supergelados, e gradientes de temperatura não muito elevados, a velocidade média pode ser tomada, com certa aproximação, como a velocidade de congelamento efetiva. Nos demais casos, é possível que haja um aumento da influência das dimensões e forma geométrica do produto, sendo necessário cautela na comparação de resultados (28, 34).

2.4. Tempo de congelamento

2.4.1. Importância para o dimensionamento de processos

A necessidade principal de se conhecer o tempo de congelamento está no dimensionamento de equipamentos e sistemas de frio. Embora a velocidade de congelamento definida por alguns métodos seja uma medida aceitável na avaliação da qualidade, o mesmo não se pode afirmar quando se trata do dimensionamento de processos. Porém, esse parâmetro quando convertido em tempo de congelamento dá uma visão do tempo de residência do produto no sistema e facilita o cálculo da capacidade de refrigeração

necessária à conclusão do processo de congelamento (23). Sua previsão é uma etapa essencial que afetará sensivelmente o custo total do sistema projetado. Sem ela o dimensionamento torna-se muito dependente de dados obtidos experimentalmente.

A dificuldade do cálculo está geralmente associada à determinação das propriedades termofísicas do produto que, por sua vez, são subordinadas a outros fatores, inclusive às variações de temperatura encontradas no processo (23, 39).

Quando um alimento começa a congelar, o calor latente é liberado durante uma faixa de temperatura, não havendo distinção clara entre o material congelado e o não congelado, mas uma zona intermediária que depende das condições de processo. A presença dessa zona e a variação das propriedades termofísicas do produto parcialmente congelado, conjugadas às condições de contorno não lineares, dificultam a previsão do tempo de congelamento (11).

Para efeito de cálculo a mudança de fase pode ser considerada por dois caminhos diferentes. O primeiro supõe que o calor latente é liberado numa temperatura de congelamento definida, na qual ocorrem simultaneamente a mudança de fase e as alterações das propriedades termofísicas. No segundo, isso ocorre numa faixa de temperatura, utilizando as alterações no calor específico aparente e as variações da condutividade térmica (11).

O primeiro método tem sido muito empregado, apesar de ser uma solução apenas aproximada. O outro é limitado pela maneira irregular e substancial na qual o calor específico e a condutividade térmica nos alimentos variam com a temperatura, embora seja fisicamente mais correto.

Outro aspecto que merece comentário são as condições de contorno, tradicionalmente conhecidas como do primeiro,

terceiro e quarto tipos. No primeiro tipo, supõe-se que a temperatura da superfície do material se iguala instantaneamente à temperatura do meio de resfriamento. Na prática, isso pode ser obtido em casos como no congelamento por placas ou por imersão em líquido agitado. No terceiro tipo, caso que inclui a lei de Newton para o resfriamento, admite-se que a temperatura da superfície (T_s) do material é diferente da temperatura do meio de resfriamento (T_a) e o fluxo térmico é proporcional à diferença entre ambas. Matematicamente a condição de contorno do terceiro tipo é representada pela equação (2.1):

$$h (T_a - T_s) = -K \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} \quad (2.1)$$

Esta condição de contorno é a mais comum na prática. A condição de contorno do quarto tipo é encontrada quando a temperatura superficial do material é uma função arbitrária do tempo de processo, porém não é comumente utilizada na previsão do tempo de congelamento (11).

A respeito das condições iniciais, na prática ocorrem distribuições de temperatura tanto uniformes como não uniformes. Geralmente as soluções analíticas são aplicadas para o primeiro caso em que o problema matemático é mais simples, enquanto as soluções numéricas são aplicadas aos dois casos de distribuição de temperatura do material. Também é possível utilizar uma temperatura inicial média para representar casos de distribuição não uniforme, e simplificar a solução do problema. Contudo, é mais comum encontrar o produto a uma temperatura inicial acima da qual ele começa a congelar.

Com base nessas considerações, muitas soluções foram

propostas para a previsão do tempo de congelamento, mas poucas são aplicáveis ao caso mais comum, que conjuga condições de contorno do terceiro tipo e temperatura inicial do produto acima da sua temperatura inicial de congelamento.

Para formas geométricas bem definidas e dimensões finitas como placas, cilindros, esferas e blocos retangulares, uma série de soluções analíticas, com ou sem modificações empíricas, fornecem resultados aproximados cuja exatidão depende das suposições feitas na derivação da solução. Métodos versáteis de diferenças finitas e elementos finitos podem ser aplicados com maior sucesso nos casos de formas geométricas irregulares. Considerações a respeito dos fatores que afetam o tempo de congelamento foram apresentadas por CLELAND (11), num estudo elaborado a partir de uma substância modelo não alimentícia, derivada da celulose e com propriedades termofísicas semelhantes às da carne magra.

2.4.2. Dependência em função de alguns parâmetros críticos.

Conforme foi relatado anteriormente, as soluções exatas para a previsão do tempo de congelamento dependem da resolução de complexas equações de transferência de calor, o que tem sido possível por meio de soluções numéricas e com o auxílio de sistemas avançados de computação (23). Contudo, a sofisticação desses métodos ainda não permite o acesso fácil a eles. Por essa razão, os métodos analíticos simplificados, que se baseiam em modelos, têm sido utilizados com maior freqüência.

O modelo analítico mais antigo é o de Plank (eq. 2.2.), o qual considera basicamente a ocorrência de três etapas no processo: (a) a transferência de calor por convecção entre o meio

de resfriamento e a superfície do produto; (b) a liberação do calor latente no ponto de congelamento, e (c) a transferência de calor por condução no interior do produto congelado. Há, entretanto, algumas suposições, como: a temperatura do material permanece no ponto de congelamento durante a mudança de fase; o regime de transferência de calor entre o meio de resfriamento e o produto é estacionário; e a água do produto mantém-se totalmente na fase líquida antes do congelamento. Em razão dessas hipóteses existe a expectativa de um resultado subestimado, pois a equação não considera o tempo necessário para remover o calor sensível nos períodos de pré e sub-resfriamento (23, 34, 39). Apesar de não ser normalmente utilizada no dimensionamento de processos, ela é aplicável com sucesso em grande parte dos casos onde se deseja apenas estimar o tempo de congelamento, sendo descrita abaixo:

$$t_c = \frac{\rho_s \cdot L}{T_{ic} - T_a} \frac{P.D.}{h} + \frac{R.D^2}{K_s} \quad (2.2)$$

Outros modelos analíticos são discutidos por RAMASWAMY e TUNG (37) dando ênfase àqueles que podem ser resolvidos sem o emprego de sistemas computadorizados. Os mesmos autores mostram a necessidade de aperfeiçoar os modelos derivados de Plank, a fim de melhorar a exatidão das estimativas dentro de uma larga faixa de situações práticas.

Como as condições de processo estão relacionadas com o consumo energético e a qualidade do produto após o descongelamento, torna-se necessário um conhecimento maior sobre o fenômeno da mudança de fase, alterações na estrutura biofísica, comportamento das propriedades termofísicas e influência da geometria e da homogeneidade do produto.

Analisando a equação de Plank, constata-se que vários fatores contribuem para a magnitude do tempo de congelamento. Em ordem de importância estão: a temperatura do meio

de resfriamento, o coeficiente convectivo de transferência de calor e a dimensão, geometria e propriedades termofísicas do produto.

Para efeito estimativo, HSIEH *et alii* (26) demonstraram que a exatidão na medição de alguns parâmetros, como temperatura inicial de congelamento, umidade total, percentagem de água não congelada e densidade acima do ponto de congelamento, tem influência reduzida na previsão do tempo de congelamento por métodos numéricos. Relatam, ainda, que as oscilações na medição da condutividade térmica acima do ponto de congelamento são inexpressivas como fonte de erro na estimativa do tempo de congelamento. Embora essas deduções sejam provenientes de um trabalho de simulação em computadores, restrito a determinadas condições do meio de resfriamento e ao tipo de produto (vegetais), o fato representa um contraste em relação ao mesmo cálculo desenvolvido por métodos analíticos.

As dimensões do produto podem ter influência significativa no tempo de congelamento. Como todo o calor é transferido do interior para a sua superfície, a relação entre a superfície e a massa do produto (superfície específica) é importante. Quando essa relação aumenta, o tempo de congelamento diminui. Em se tratando de pequenas partículas, cujo gradiente é desprezível, o tempo de congelamento é inversamente proporcional à superfície específica. Já em produtos pré-embalados o gradiente é crítico e o tempo de congelamento torna-se diretamente proporcional à espessura, aproximadamente. Para formas geométricas distintas, prevalece a relação entre superfície e volume. Quando essa relação aumenta, o tempo de congelamento diminui e, portanto, uma esfera resfria-se mais rapidamente que uma placa plana de dimensões características semelhantes.

Para o dimensionamento de sistemas de frio, há evidências que o grau de exatidão das propriedades termofísicas do produto torna-se secundário em comparação com as magnitudes das resistências de contato do produto com a embalagem (ou placa de resfriamento) e do coeficiente convectivo de transferência de calor (h_c). Este último, quando estimado sem grandes cuidados, pode fornecer erros de 200 a 400% no cálculo das taxas iniciais de transferência de calor (10). Entretanto, é o parâmetro mais difícil de ser medido e controlado, visto depender de uma série de outros fatores físicos e geométricos (10, 23). Para o pesquisador, o problema mais importante é justamente a obtenção de valores aceitáveis do h_c para cada caso prático, em função das condições experimentais. A propósito esse coeficiente pode apresentar uma extensa faixa de valores, comumente entre 5 e 500 $W/m^2 \cdot ^\circ C$, e que geralmente caracterizam o tipo de processo (5).

A partir de uma simples equação como a de Plank (eq. 2.2.), pode-se prever a dependência entre o tempo de congelamento e a dimensão principal do produto, fixada a magnitude de h_c . Esse caso é exemplificado na literatura, simulando o congelamento de uma placa infinita de carne magra, cuja temperatura do meio de resfriamento é de $-21^\circ C$ (22). Parece evidente que quando h_c é pequeno, a influência da espessura da placa torna-se mais crítica para o tempo de congelamento. Assim sendo, produtos de grandes dimensões quando congelados com ar frio por convecção natural, merecem uma certa atenção nos aspectos de consumo de energia, custo de produção e qualidade. Esse é o caso típico do congelamento doméstico. Cabe lembrar, ainda, que a transferência de calor por irradiação não deve ser ignorada, pois o coeficiente de irradiação pode ser da mesma magnitude que o de convecção. Por

outro lado, concluiu-se que uma redução substancial do tempo de congelamento pode ser obtida para valores de h_c até cerca de $170 \text{ w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Resultados semelhantes foram previstos por HELDMAN (23) no congelamento de morango.

Um outro aspecto interessante relatado na literatura (16, 22) é que quando o coeficiente convectivo é muito baixo, a resistência térmica acrescentada pelo uso de embalagens comuns para congelamento não é muito importante, numa faixa de espessura amplamente utilizada na prática. Isso significa que um produto embalado nessas condições e congelado em ar frio por convecção natural, como no processamento doméstico, sofreria apenas um ligeiro retardamento em relação ao mesmo procedimento, sem o uso da embalagem. A observação vem a calhar, pois no caso de um processo lento a embalagem, já nessa etapa, tem função importante na redução da perda de peso do produto, sem entretanto prolongar demasiadamente o tempo de congelamento.

Por fim, resta comentar o parâmetro tido como o mais importante, que é a temperatura do meio de resfriamento. No processo de congelamento, à medida que ela se torna mais baixa, aumenta a força motriz da transferência de calor e reduz-se o tempo de congelamento (23). Este é inversamente proporcional à expressão $(T_{ic} - T_a)$ contida na equação (2.2.). A influência é particularmente crítica quando a temperatura final do processo e a temperatura do meio de resfriamento são próximas, como no caso doméstico, tornando a etapa final muito lenta (23). Não obstante, o abaixamento da temperatura do meio de resfriamento reduza o tempo de congelamento, esse fato deve ser analisado cuidadosamente sob o aspecto do consumo de energia.

Em síntese, conhecendo-se as principais características biofísicas e termofísicas de um determinado produto, é possível estimar as condições e o tipo de processo requeridos para obtê-lo congelado com uma qualidade aceitável e a partir de um consumo mínimo de energia. A otimização dos parâmetros discutidos poderá levar a um processo com velocidade de congelamento compatível com as exigências de qualidade do produto, principalmente no caso dos chamados supergelados.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Congelador doméstico

Foi utilizado um congelador vertical de marca Brastemp, com capacidade nominal de $0,27\text{m}^3$ contendo todas as prateleiras evaporadoras. No painel superior encontra-se um dispositivo para funcionamento ininterrupto do compressor ("quick freezing switch"). O conjunto moto-compressor é hermético, com motor monofásico, cuja potência nominal é de 125w, tensão de alimentação de 115v e fator de potência entre 0,60 e 0,65 (20).

Segundo o seu manual de instruções, o controle da temperatura interna é automático (termostato), mantendo um valor médio constante de -20°C . Nas duas prateleiras evaporadoras superiores é normal a formação de camadas mais espessas de gelo (a entrada do evaporador é no topo). O sistema "quick freezing" serve para aumentar a velocidade de congelamento permitindo que o produto atinja mais rapidamente a sua temperatura ideal de congelamento. Entretanto, segundo recomendações do fabricante, o uso desse dispositivo por um tempo superior a 24 horas deve ser evitado. Aconselha também não colocar diretamente no congelador alimentos que tenham sido preparados por aquecimento, sem antes deixá-los esfriar até a temperatura ambiente. A título complementar foi revelado informalmente pelo fabricante que o referido modelo possui uma capacidade máxima de estocagem de 90 a 100kg de produtos congelados. Nos processamentos caseiros, a capacidade máxima de congelamento é de 11 a 14kg de produtos para cada 24 horas.

3.2. Escolha do material para processamento

Os alimentos e materiais biológicos, em geral, raramente são homogêneos, havendo alguma dificuldade na obtenção de boa repetibilidade de resultados nos ensaios de congelamento. Essa

dificuldade está associada a alterações de estrutura dos alimentos durante o processamento. Um outro aspecto importante é a questão do custo dos experimentos, notadamente quando um grande número de ensaios se faz necessário, pois normalmente os alimentos devem ser processados apenas uma vez. Por essas razões, optou-se pela utilização de um modelo não alimentício, cujas características de congelamento sejam semelhantes às de um alimento típico do consumidor brasileiro.

O modelo internacional utilizado nos ensaios de congeladores domésticos é composto de hidroxietil-metil celulose, cloreto de sódio, água e paraclorometacresol (respectivamente, 23,00, 0,50, 76,42 e 0,08%, em peso). Segundo BAILEY (7), o ingrediente derivado da celulose apresenta extrema dificuldade para ser misturado com a água, quando em concentrações acima de 10%. Conseqüentemente, é necessário um potente misturador mecânico para formular o modelo. Ainda assim, um grande número de pequenas bolhas de ar permanece no produto final, cuja consistência assemelha-se a de uma borracha semi-flexível de difícil manipulação e moldagem.

Assim sendo, a simulação do produto foi feita com base no modelo citado pela ABNT (2), composto de serragem de madeira, cloreto de sódio e água (respectivamente, 23, 0,5 e 76,5%, em peso). Segundo a ABNT o ponto de congelamento da mistura é -1°C e suas características térmicas são correspondentes às da carne magra.

A serragem utilizada (predominantemente pinho e peroba) sofreu um processo de moagem num desintegrador tipo Rietz. Devido à capacidade moderada do equipamento, essa operação foi realizada em etapas. Posteriormente, o material foi classificado num conjunto de peneiras vibratórias com diâmetros de 2,0, 1,5, 1,0 e 0,5mm.

A água e o cloreto de sódio utilizados na formulação definitiva foram os de uso comum, ou seja, água tratada da rede normal de abastecimento e o sal de cozinha (refinado). A título de observação experimental, esses componentes foram substituídos, respectivamente, por água destilada e cloreto de sódio grau analítico, em algumas formulações. Isso foi feito devido à existência de um projeto de norma da ABNT para a elaboração de um modelo à base de carboximetilcelulose, cloreto de sódio e água, com o objetivo de substituir eventualmente o modelo de serragem. Para o novo modelo o projeto prescreve o uso de água destilada e sal não iodado (3).

3.3. Obtenção de parâmetros preliminares de congelamento

3.3.1. Elaboração do modelo de serragem

Pequenas quantidades do modelo foram preparadas à medida das necessidades experimentais. Após a pesagem de cada componente, preparou-se uma pré-mistura manual durante 5 minutos. Posteriormente, o material foi desaerado num misturador a vácuo (23 pol. Hg) durante 3 minutos, sob rotação moderada do agitador.

A compactação e o acondicionamento do modelo foram realizados manualmente numa caixa com dimensões internas de 12,5 x 100 x 100mm, confeccionada em acrílico. O recipiente foi termicamente isolado nas laterais e no fundo com placas de poliestireno de espessura igual a 25mm. Como proteção mecânica e contra a umidade, o isolamento foi recoberto com placas de madeira, com espessura de 10mm, revestidas externamente por uma película de silicone. Por fim, uma placa de acrílico com 2mm de espessura, fixada por parafusos, serviu como cobertura (tampa) da superfície

exposta para a transferência de calor predominante, formando uma "caixa térmica" (Figura 3.1). O arranjo completo produziu a simulação de uma placa plana infinita, cuja espessura efetiva equivale a 25mm, isto é, o dobro da espessura real.

Considerando-se que a serragem de madeira tinha cerca de 12% de umidade, a formulação foi inicialmente composta de 26 partes de serragem, 0,5 de cloreto de sódio e o restante de água para completar 100 partes, em peso.

3.3.2. Condições de ensaio

Os ensaios de congelamento foram desenvolvidos na prateleira central do gabinete, comportando uma amostra por experimento. Ao todo, foram preparadas duas amostras de carne magra (coxão mole) e outras duas do modelo de serragem. A carne magra, após a eliminação do excesso de gordura e aponevroses, foi picada e passada num moedor doméstico, cuja placa possuía furos com um diâmetro médio de 5mm. No caso do modelo de serragem, as amostras, uma vez processadas, foram reconduzidas até as condições iniciais de processo (descongelamento) e reprocessadas pelo menos uma vez.

Para fins comparativos, a temperatura de -10°C foi escolhida arbitrariamente para representar o final do processo. Sabe-se que nesse valor a mudança de fase da água nos alimentos é quase completa (11). A temperatura inicial das amostras foi mantida em torno de 10°C .

A obtenção dos históricos de temperatura foi feita pela instalação de três termopares no fundo da caixa de acrílico (plano equivalente à meia espessura da placa), acoplados a um registrador. Os termopares mantiveram uma equidistância de 25mm, sendo o central aquele que representou o centro geométrico da

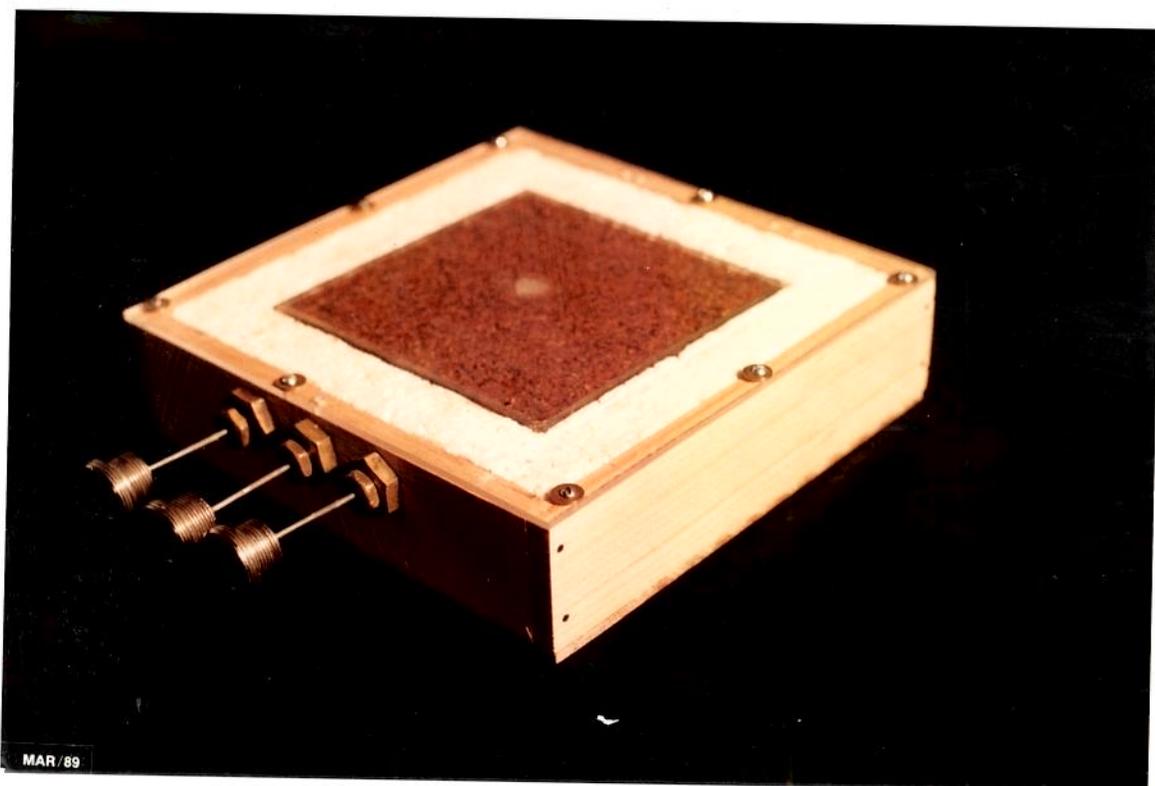


FIGURA 3.1. Vista geral da "caixa térmica" contendo o modelo de serragem.

placa e, conseqüentemente, a temperatura de referência do processo. Ocasionalmente, outros três termopares foram colocados externamente, rente à superfície da tampa para observar a evolução da temperatura local, conforme o esquema mostrado na Figura 3.2. A temperatura do processo foi obtida pela média de, pelo menos, 20 valores registrados ao longo de cada ensaio (escolhidos arbitrariamente) e correspondentes ao centro geométrico do congelador.

3.3.3. Previsão do tempo de congelamento

A previsão do tempo de congelamento foi realizada com base na equação de Plank, para transferência de calor unidimensional, a partir da temperatura inicial de congelamento:

$$t_c = \frac{\Delta H}{T_{ic} - T_a} \left(P \cdot \frac{D}{h} + R \cdot \frac{D^2}{k_s} \right) \quad (3.1)$$

A fim de computar o tempo de processo desde o período de pré-resfriamento das amostras, foram utilizadas outras duas equações desenvolvidas por CLELAND (11) e que modificam as constantes P e R:

$$P = 0,5072 + 0,2018 \cdot Pk + Ste \left(0,3224 \cdot Pk + \frac{0,0105}{Bi} + 0,0681 \right) \quad (3.2)$$

$$R = 0,1684 + Ste (0,2749 \cdot Pk - 0,135) \quad (3.3)$$

onde:

$$Ste = \frac{C_s (T_f - T_a)}{\Delta H}$$

$$Pk = \frac{C_l (T_{ic} - T_f)}{\Delta H}$$

$$Bi = \frac{h \cdot D}{k}$$

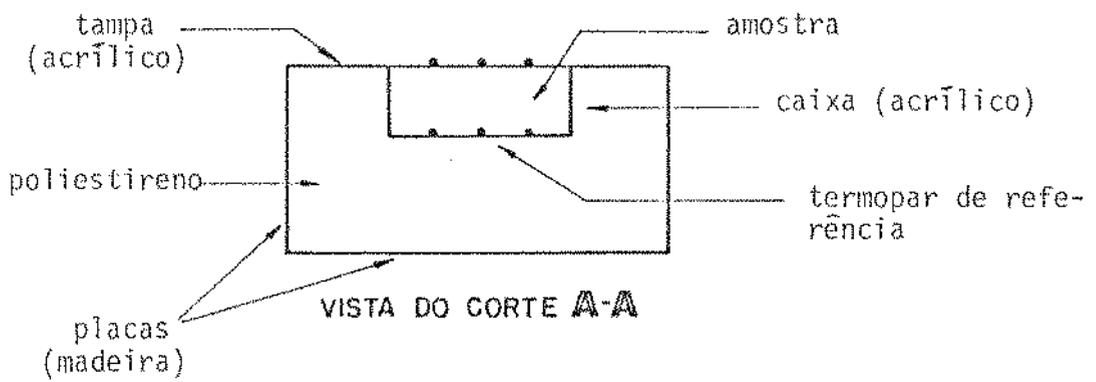
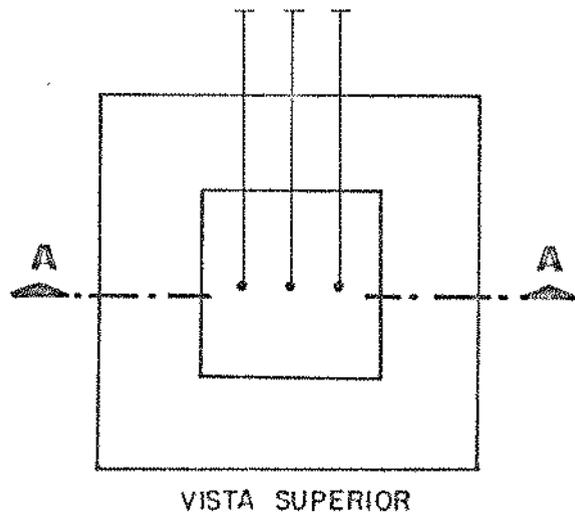


FIGURA 3.2. Localização dos termopares na simulação da placa infinita (esquemático).

Quanto às propriedades termofísicas necessárias ao cálculo, foram utilizados valores citados por CLELAND (11) e considerados reais para a carne moída (magra) contendo 74% de umidade. A condutividade térmica da fase congelada do produto foi considerada constante durante a mudança de fase e corresponde à temperatura de -30°C , conforme sugestão do autor. No caso do modelo de serragem, a variação de entalpia foi estimada em relação ao gelo (37), considerando-se a umidade total como água congelável. A condutividade térmica e o calor específico foram estimados, respectivamente, pelas equações de Sweat e Siebel, descritas a seguir:

(a) Equação de Sweat: fornece a condutividade térmica para carnes em geral, com 60 a 80% de umidade e submetidas a temperaturas de 0° a 60°C , ou ainda, com 65 a 85% de umidade, e temperaturas de -5° a -40°C , conforme descrito em (41):

$$K_{\gamma} = 0,08 + 0,0052 (\% \text{ água}) \quad (3.4)$$

$$K_S = -0,28 + 0,019 (\% \text{ água}) - 0,0092.T_j \quad (3.5)$$

(b) Equação de Siebel: fornece o calor específico para produtos com alto teor de umidade, notadamente frutas e hortaliças, conforme relatado por KASAHARA (30):

$$C_{\gamma} = 33,47 (\% \text{ água}) + 836,82 \quad (3.6)$$

$$C_S = 12,45 (\% \text{ água}) + 836,82 \quad (3.7)$$

Para a conclusão do cálculo, o coeficiente efetivo de transferência de calor foi obtido indiretamente a partir da equação (3.1), utilizando-se os dados estimados conjugados aos experimentais (Apêndice II).

3.3.4. Obtenção do coeficiente convectivo de transferência de calor

O coeficiente convectivo (h_c) foi estimado indiretamente pela equação citada por EARLE (16) e descrita a seguir:

$$\frac{1}{h} = \frac{1}{h_c + h_r} + \frac{1}{h_p} \quad (3.8)$$

Para o cálculo, o coeficiente efetivo (h) foi obtido por meio da eq. (3.1), enquanto para o coeficiente de irradiação (h_r) foi adotado o valor de $4,0 \text{ w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, sugerido por EARLE (16) para condições semelhantes de ensaio. O coeficiente equivalente da tampa de acrílico (h_p) foi obtido pelo quociente entre a condutividade térmica (média) e a espessura do material, conforme procedimento do mesmo autor.

3.3.5. Determinação da temperatura de congelamento do modelo de serragem

Para determinar a temperatura de congelamento, foi extraído o suco desse material, sendo posteriormente congelado. O procedimento utilizado foi o seguinte: aproximadamente 100g do modelo de serragem foram prensados manualmente em tecido de algodão. Do suco obtido, cerca de 20ml foram utilizados para a determinação (em triplicata) da temperatura de congelamento pelo método da garrafa térmica, conforme descrito por KLEEBERG (31). Trata-se de um dispositivo de simples construção, adaptado para acomodar internamente um tubo de ensaio, onde é colocada a amostra sujeita a agitação manual. Externamente a esse tubo, encontra-se salmoura saturada a -10°C . Um termômetro de vidro (padrão) inserido na amostra serve para determinar a temperatura de congelamento, normalmente identificada após um ligeiro sub-resfriamento, quando a leitura permanece estável por alguns momentos.

3.4. Desempenho do congelador no processamento e estocagem

3.4.1. Elaboração dos pacotes de carga

Num tacho aberto e em bateladas de 10kg, foram pré-misturados manualmente 28kg de serragem de madeira (12% de umidade), 0,5kg de sal de cozinha (refinado), 5kg de conservante comercial (solução 20% de formol) e o restante de água, para cada 100kg da formulação. Em seguida, o material foi colocado num tacho misturador a vácuo (23 pol. Hg) e desaerado durante 5 minutos sob rotação moderada do agitador.

A compactação e o acondicionamento do modelo foram realizados manualmente, acomodando-o em sacos plásticos de polietileno de alta densidade (PEAD), com espessura média de 10µm. Estes foram previamente colocados no interior das embalagens tipo cartucho para sorvete (papel cartão), de modo a adquirir a forma de blocos retangulares (Figura 3.3). O fechamento dos sacos plásticos foi feito por uma seladora doméstica, enquanto os cartuchos, embora possuíssem um encaixe próprio, também foram colados para evitar eventuais problemas com o manuseio ao longo dos experimentos. Posteriormente, cada pacote foi pesado individualmente para obtenção da densidade aparente média, conforme metodologia descrita por CAMPOS (9).

A fim de acomodar uma quantidade substancial de pacotes no congelador, foram utilizados cartuchos com capacidades nominais de 1/2 e 1ℓ (respectivamente 43 e 75, totalizando 118 pacotes). A Figura 3.4 fornece uma visão interna do congelador contendo uma carga de 75kg.

Em termos de valores médios, os materiais de embalagem apresentaram as seguintes características, medidas a partir de 20 amostras de cada tipo por um paquímetro de precisão:

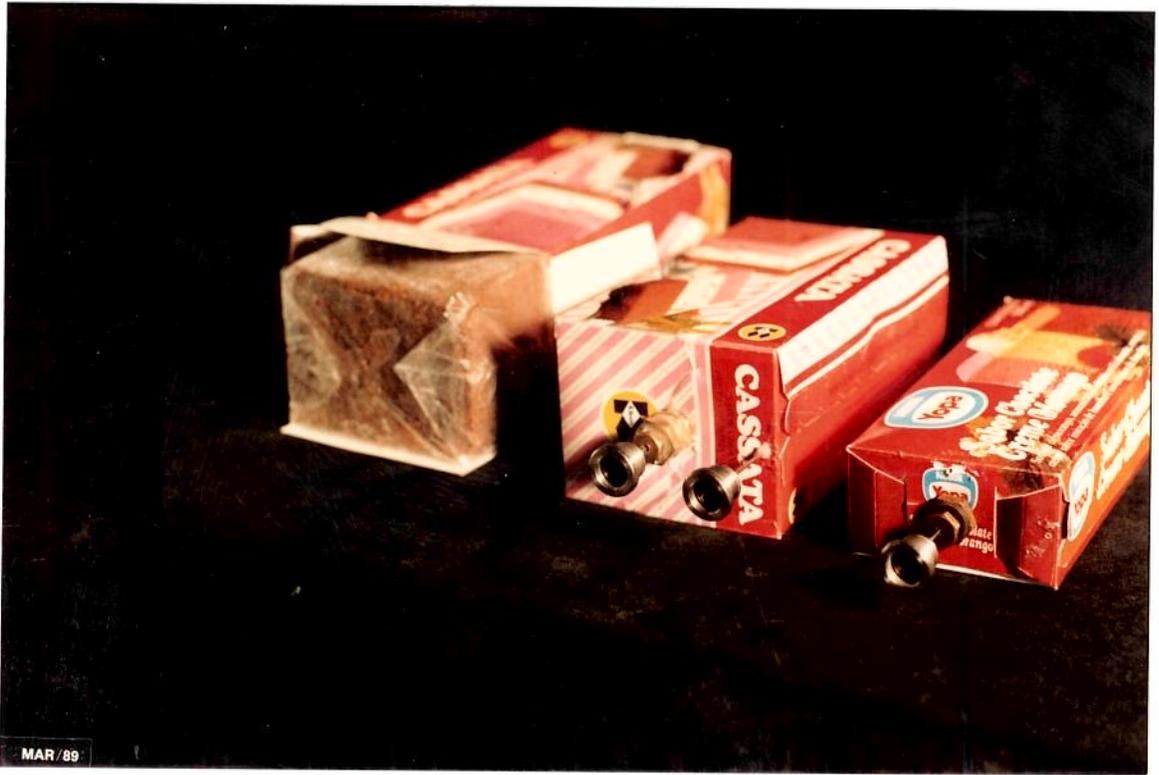


FIGURA 5.3. Modelo de serragem acondicionado em cartuchos de 1/2 e 1 l.



FIGURA 3.4. Vista interna do congelador acomodando uma carga de 75kg.

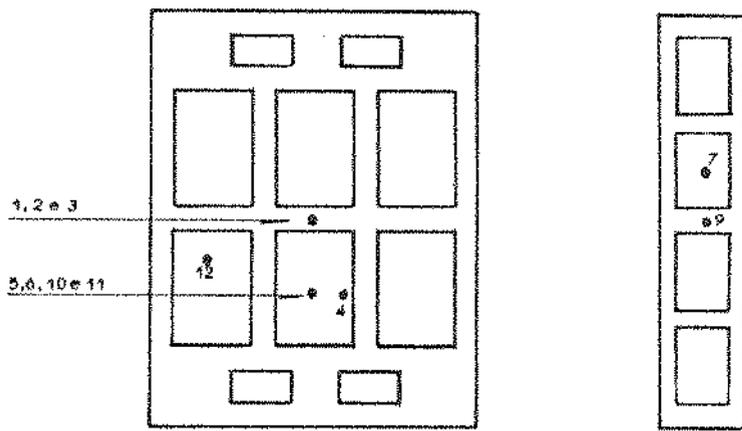
	PEAD (1/2ℓ)	PEAD (1ℓ)	CARTUCHO (1/2ℓ)	CARTUCHO (1ℓ)
Dimensões (mm)	120x300	160x300	40x76x164	70x89x156
Volume (ml)	-	-	499	972
Peso (g)	0,71	0,95	18,5	35,4
Espessura (mm)	-	-	0,35	0,40

3.4.2. Arranjo dos termopares e dos pacotes de carga no congelador

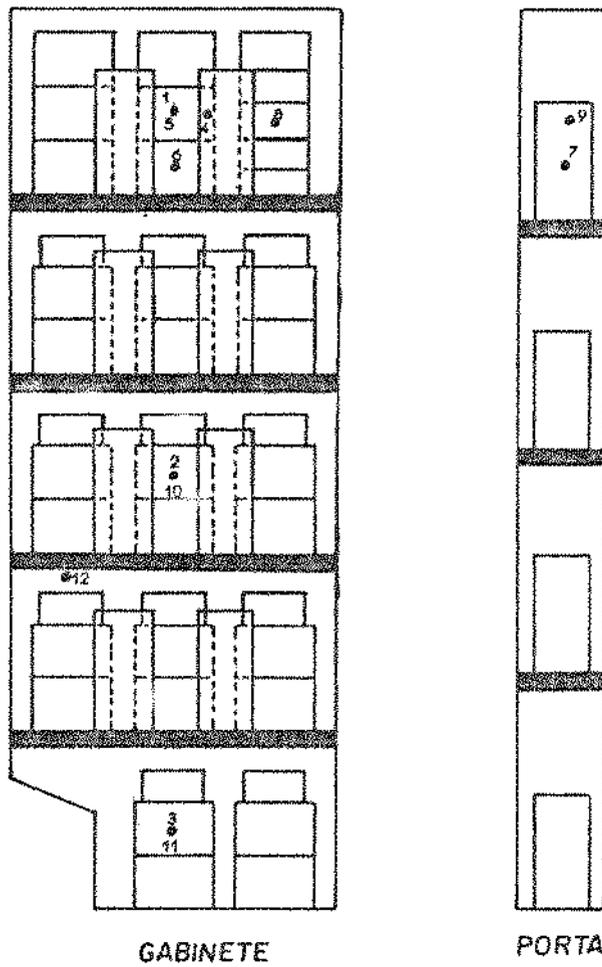
Para avaliar a distribuição da temperatura interna do congelador sem carga (vazio), foram colocados nove termopares nos centros geométricos correspondentes aos espaços reservados entre cada duas prateleiras vizinhas. Um outro termopar foi instalado junto ao bulbo sensor do termostato (Figura 4.2).

Nos experimentos com carga, o arranjo dos pacotes e dos termopares consta da Figura 3.5. No gabinete os pacotes foram empilhados (3 unidades por pilha), reservando-se um espaço lateral de 10 a 20mm entre as pilhas. Na porta os pacotes foram acomodados em pé, mantendo entre si essa mesma distância.

A prateleira localizada no topo do gabinete proporciona um volume útil maior que as demais e acomodou relativamente bem cerca de 15kg de carga. Por se tratar de uma região de temperatura mais elevada, foi escolhida para a monitoração da temperatura do modelo de serragem durante o processo de congelamento. O pacote de referência (1ℓ) permaneceu no centro da pilha, com um termopar no seu centro geométrico (nº 5) e outro logo abaixo da sua superfície lateral (nº 4). Dessa forma, estimou-se a



VISTA SUPERIOR



GABINETE

PORTA

VISTA LATERAL

FIGURA 3.5. Arranjo dos termopares e dos pacotes de carga no interior do congelador (esquemático).

velocidade de congelamento como se cada pilha correspondesse a um único bloco do material.

Foram utilizados no máximo 12 termopares do tipo cobre-constantan, com revestimento de aço inoxidável, cuja colocação está representada por pontos na Figura 3.5

3.4.3. Condições de ensaio

O congelador foi instalado numa sala comum, mobiliada, mas sem a presença de correntes excessiva de ar e de outros equipamentos em operação. Uma distância de 300mm entre as partes laterais e traseira do congelador e suas vizinhanças foi observada de forma a facilitar a circulação de ar no local. Durante os experimentos a temperatura da sala (ambiente) permaneceu em $25 \pm 1^\circ\text{C}$, utilizando-se um sistema de ar condicionado e, eventualmente, um aquecedor elétrico comum. Já a umidade relativa não foi controlada, variando em função das condições meteorológicas locais. Entretanto, ambos os parâmetros foram medidos e registrados por um termohigrógrafo, com erros admissíveis dentro de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ e $\pm 5\%$, respectivamente, nas medições de temperatura e umidade relativa.

Para avaliar o comportamento do congelador foram realizados experimentos envolvendo processamentos com e sem mudança de fase nos pacotes, sendo o congelador mantido permanentemente com 75kg de carga (modelo de serragem).

Nos processamentos sem mudança de fase, 75kg de carga previamente congelada e ao redor de -18°C foram acomodadas no congelador, gastando-se cerca de 18 minutos para carregá-lo. Os pacotes assim permaneceram durante, pelo menos, 15 horas, tempo considerado suficiente para que todo o sistema entrasse em equilíbrio termodinâmico. Posteriormente, foi avaliada a magnitude

do ciclo completo do termostato, utilizando-se dois cronômetros, com escala de 0 a 30 minutos subdividida em 0,2 segundos. Um deles marcou o tempo de operação e o outro o tempo de descanso do compressor, que somados totalizaram um ciclo. Os ensaios foram realizados em triplicata e cada um teve a duração correspondente a 10 ciclos completos do termostato. O mesmo tipo de avaliação foi feito com o congelador sem carga (vazio).

Nos processamentos com mudança de fase foram ensaiadas duas alternativas em função da carga de pacotes. Primeiramente, foi congelada uma carga de 15kg, acomodada no topo do gabinete mantendo-se o volume útil restante do congelador previamente ocupado com pacotes congelados. O tempo de carregamento foi de 6 minutos, aproximadamente. No outro caso, foi congelada uma carga de 75kg acomodada de uma só vez no congelador. O tempo de carregamento foi cerca de 18 minutos. Em ambos os casos, a temperatura inicial das amostras permaneceu em torno da ambiente, enquanto a temperatura de -18°C representou a conclusão do processamento, medida pelo termopar de referência. As velocidades de congelamento foram estimadas conforme a definição do Instituto Internacional do Frio (28). Ao final de cada ensaio a carga foi descongelada lentamente até retornar às condições iniciais para um novo processamento ou repetição do mesmo, isto é, o material modelo sofreu várias reutilizações (reprocessamentos) até a conclusão final do estudo. As características gerais do processo de congelamento foram avaliadas em função do sistema de funcionamento do compressor, ou seja, intermitente ou contínuo (respectivamente, acoplado ou não ao termostato).

Em todos os ensaios, o congelador foi precedido de degelo, além das condições normais de regime de funcionamento.

3.4.4. Cálculo do coeficiente global de transferência de calor

O coeficiente global de transferência de calor entre o meio externo (ambiente) e o interior do congelador foi calculado a fim de se avaliar as condições do isolamento térmico, tendo como base a seguinte equação:

$$\ln \left(\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} \right) = \frac{U.A.}{M.C.} \cdot t \quad (3.9)$$

No cálculo, o produto M.C. foi obtido a partir da soma das capacidades caloríficas de cada componente da parede do congelador, ou seja, do isolante térmico (espuma de poliuretano) e dos revestimentos interno e externo (respectivamente, poliestireno de alto impacto e chapa de aço carbono). Também foi considerado o ar que ocupa o volume interno do congelador. Finalmente, optou-se por utilizar no cálculo a área interna do congelador, em razão da facilidade de medição e pelo fato de se tratar de parede relativamente fina ($D < 50\text{mm}$).

Teoricamente a equação (3.9) é aplicável somente em casos onde existe a condição de uniformidade da temperatura do meio interno, no caso o ar.

As medidas e os materiais característicos de construção do congelador constam do Apêndice III, enquanto as propriedades termofísicas utilizadas nos cálculos foram valores médios tomados do Apêndice I.

3.4.5. Determinação do consumo de energia

O consumo de energia elétrica necessário para congelar e abarixar a temperatura de uma determinada carga até -18°C e mantê-la nessa temperatura durante a estocagem foi calculado a

partir da potência consumida pelo compressor, segundo a equação abaixo, descrita na literatura (19):

$$P_c = V.I. \cos \gamma / 10^3 \quad (3.10)$$

O produto da equação (3.10) pelo tempo de operação do compressor forneceu a energia elétrica consumida pelo compressor em cada um dos casos estudados.

Foram empregados os seguintes instrumentos na medição dos parâmetros: (a) medidor de tensão e corrente, respectivamente nas escalas de 0 a 10 A e 95 a 130 V, com precisão de $\pm 3\%$ do fundo de escala; (b) medidor de fator de potência, com precisão de $\pm 3^\circ$ do ângulo de fase; e (c) totalizador de horas, com precisão de 0,1 hora, para medir o tempo de operação do compressor.

A fim de poder comparar com a medida elétrica, a energia a ser removida pelo refrigerante (evaporador) para a manutenção da temperatura usual de estocagem foi obtida pela seguinte equação da literatura (17, 40), descrita a seguir:

$$E = U.A. (T_\infty - \bar{T}_a) \cdot t / 10^3 \quad (3.11)$$

A energia a ser removida de 1kg do material modelo para congelar e abaixar a sua temperatura até -18°C também foi calculada. No cálculo (Apêndice IV), foram utilizados os calores específicos previstos pelas equações (3.6) e (3.7) e a variação de entalpia do gelo entre T_{ic} e T_{oc} (respectivamente, $-0,4$ e -10°C), faixa de temperatura adotada para a mudança de fase completa. A unidade total do modelo foi considerada como água congelável.

A equação empregada consta da literatura (17, 40), sendo descrita a seguir:

$$E_p = \frac{M}{3,6 \cdot 10^6} \cdot C_l(T_i - T_{ic}) + \frac{\Delta H}{\rho} + C_s(T_{oc} - T_f) \quad (3.12)$$

Para fins comparativos com os resultados da equação (3.12), foi feito um balanço de energia nos ensaios 17, 21 e 22. Das Figuras 4.8, 4.9-a e 4.10 foram obtidas as temperaturas médias dos processamentos, com base no termopar localizado no centro geométrico do congelador (curva 2). No balanço foram computados as principais parcelas de energia que devem ser removidas pelo refrigerante (evaporador), a saber:

a) energia proveniente do meio externo (E_i): refere-se à energia que penetra nas paredes termicamente isoladas do congelador. Para tanto, foram utilizados a equação (3.11) e os dados experimentais obtidos;

b) energia devido à variação de temperatura da carga congelada (E_p): trata-se dos pacotes de carga restantes e já congelados que sofrem elevação da temperatura devido à abertura da porta para carregamento (processamentos de 15kg). Foi calculada como calor sensível que deve ser removido para a recuperação da temperatura dessa carga.

Somando-se essas duas parcelas e descontando da energia consumida pelo compressor (E_c) em cada processamento, obteve-se o valor prático desejado para comparação. Detalhes de cálculo constam do Apêndice V.

3.4.6. Determinação do consumo de energia elétrica na formação e manutenção de estoque

O consumo de energia elétrica necessário à manutenção dos hábitos alimentares de uma família foi calculado. Para tanto, optou-se pela simulação da formação e manutenção de um esto

que de 75kg de produtos que estariam disponíveis mensalmente para esse fim. Essa carga seria reposta ao longo do período por uma das três alternativas comumente praticadas no Brasil: (a) aquisição e estocagem de produtos congelados industrialmente e distribuídos no varejo; (b) processamento doméstico e posterior estocagem de 15kg de produtos, cinco vezes ao mês (carga próxima da capacidade limite do congelador); e (c) processamento doméstico e posterior estocagem de 75kg de produtos em operação única no mês, numa prática comum de cozinhar em um só dia os alimentos necessários para o mês e estocá-los no congelador.

Posteriormente, as três alternativas foram comparadas em termos de consumo mensal de energia, obtidos nos experimentos com os pacotes de carga a partir da equação (3.10). No caso do processamento doméstico, o cálculo foi composto pela soma de duas parcelas: uma correspondente ao congelamento da carga especificada e a posterior redução da sua temperatura até -18°C , medida pelo termopar de referência; a outra, referente à manutenção da carga nessa temperatura durante a estocagem no congelador. Assim sendo, para o caso da compra de produtos congelados foi considerada apenas a segunda parcela. Não foram computados os tempos em que o congelador permaneceu aberto para carregamento nem para a retirada de material, durante o período analisado (um mês foi equivalente a 720 horas).

3.5. Determinação da composição centesimal básica

A carne moída foi analisada em termos de proteína total, matéria graxa e umidade, sendo esta última também determinada para o modelo de serragem. Os métodos utilizados foram os seguintes:

(a) Proteína total: segundo o método Kjeldahl modificado, conforme AOCS (4);

(b) Matéria graxa: segundo a AOCS (4);

(c) Umidade: determinada em estufa a vácuo a 70°C, durante 24 horas.

Em relação à umidade do modelo de serragem acondicionado nos pacotes de carga, cada batelada forneceu uma amostra, tomada aleatoriamente após a mistura, para compor o valor médio final.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Desenvolvimento do modelo de serragem

Devido ao volume restrito de informações fornecido pela ABNT (2) sobre o modelo, foi necessária a elaboração de vários ensaios, a fim de se conhecer melhor as suas características gerais. Assim sendo, ficou constatado que o uso de água e sal de cozinha comuns não foi crítico em comparação com os respectivos ingredientes de maior pureza, conforme propõe o projeto de norma da ABNT (3). Por outro lado, a desaeração do modelo formulado mostrou-se desejável na eliminação de eventuais interferências na temperatura de congelamento, provavelmente devido à presença de ar dissolvido na água. Porém, o último projeto não consta no projeto de norma.

Outro aspecto examinado foi quanto à granulação. Durante as tentativas de elaboração do modelo observou-se que a serragem com tamanho de partícula entre 0,5 e 1,0mm era a mais adequada, sendo adotada definitivamente nos experimentos. Partículas de tamanho superior apresentaram dificuldades na retenção de salmoura (exsudação), enquanto um empapamento ocorreu em consequência do uso de partículas menores que 0,5mm (finos de peneira). Nenhum tipo de madeira em particular foi estudado, optando-se por uma mistura de serragem, cuja predominância era de pinho e peroba, por razões de disponibilidade. A propósito, a literatura mostra que ambos os tipos não diferem substancialmente em termos de propriedades termofísicas (Apêndice I).

Antes de iniciar a discussão dos resultados obtidos nos ensaios de congelamento, cabem aqui mais algumas considerações sobre a montagem dos experimentos. Os termopares laterais instalados no plano equivalente à semi-espessura da placa (Figura 3.2) indicaram temperaturas muito semelhantes entre si ao longo dos processamentos e atingiram -10°C antes do termopar de referência.

Porém, a diferença foi inferior a 3% em termos de tempo de congelamento. Esse fato parece constatar que a transferência de calor do processo ocorreu predominantemente numa só direção, conforme a proposta inicial. Um outro fator que vem reforçar essa hipótese é que a temperatura do ar, medida esporadicamente em três pontos próximos à superfície da tampa, apresentou um comportamento semelhante ao do caso referente à semi-espessura equivalente. Em outras palavras, num plano horizontal muito próximo à interface ar-tampa, a temperatura do ar evoluiu mais rapidamente nos pontos mais afastados da região central. Aparentemente, conclui-se que a movimentação natural do ar não é suficiente para provocar uma distribuição de temperatura mais uniforme na tampa, havendo certa dificuldade em atingir a região central. Como as taxas de transferência de calor no interior de uma amostra dependem da evolução da sua temperatura superficial, era de se esperar que o tempo de congelamento no centro geométrico equivalente fosse maior que nos demais pontos do mesmo plano. Isso vem ratificar a boa construção da "caixa térmica".

Os resultados obtidos nos ensaios de congelamento constam da Tabela IV.1. A carne moída caracterizou-se por uma composição química básica contendo 73,8% de umidade, 23,2% de proteínas e 2,0% de matéria graxa. Ao término do seu acondicionamento e compactação, operação que levou alguns minutos, notou-se uma mudança gradual da coloração vermelha característica para a vermelho-castanho e que foi intensificada após o descongelamento. Esse fenômeno, já esperado, é ocasionado pela exposição do produto ao ar e luz ambientes antes do congelamento, devido à oxidação da mioglobina (32). Entretanto, sabe-se que essa reação evolui durante o processo de congelamento quando as velocidades de congelamento são muito baixas (29). Experimentalmente, o tempo de congelamento do produto nos dois processamentos realizados sob

TABELA IV.1. Resultados experimentais obtidos nos ensaios de congelamento de carne moída e do modelo de ser-
ragem.

Nº Ensaio	ρ_a (kg/m ³)	Ti (OC)	\bar{T}_a (OC)	t _{exp} (min)	t _c (min)	$\left(\frac{t_c - t_{exp}}{t_{exp}} \cdot 100\right)$ (%)	h (w/m ² OC)	h _C (w/m ² OC)
1 ^a	1104	9,1	-30,4	179	165	-7,8	12,0	9,7
2 ^a	1104	10,2	-29,5	181	166	-8,3	12,4	10,3
3	912	8,9	-30,6	160	140	-12,5	15,1	13,8
4	912	9,0	-31,4	160	140	-12,5	14,7	13,2
5	912	9,1	-20,8	239	220	-8,6	13,9	12,1
6	912	8,6	-20,8	237	217	-8,4	14,1	12,2
7	968	9,4	-30,2	154	134	-13,0	16,1	15,2
8	968	8,8	-30,2	151	132	-12,6	16,3	15,6

(a): carne moída.

condições semelhantes foi quase o mesmo.

Quanto ao modelo de serragem, as amostras submetidas a condições de processamento semelhantes apresentaram resultados experimentais quase idênticos. Em princípio, isso revela que as suas propriedades termofísicas não foram alteradas em razão do reprocessamento, possibilitando o reaproveitamento de amostras em estudos mais exaustivos. A propósito, nos ensaios 5 e 6 a temperatura do meio de resfriamento foi aumentada de forma a reduzir a dois terços o valor da expressão $(T_{ic} - T_a)$. Conseqüentemente, o tempo de congelamento aumentou cerca de 50%. Esse resultado era matematicamente esperado, pois a relação entre ambos é inversamente proporcional (Equação 3.1).

A título de acompanhamento, o tempo de congelamento também foi calculado pela equação de Plank modificada por Cleland (Equações 3.1, 3.2 e 3.3). Considerando-se a totalidade dos ensaios, os resultados previstos matematicamente foram inferiores aos experimentais, porém, mantendo uma diferença percentual aceitável. Particularmente nos ensaios sob condições semelhantes essa diferença foi repetitiva. Isso leva à conclusão que o erro foi sistemático, provavelmente originado nos valores adotados para as propriedades termofísicas que constam do Apêndice II. Para a carne moída, os dados apresentados por CLELAND (11), são considerados reais, sendo aqui adotados devido à semelhança entre as amostras de carne em termos de umidade. Coincidentemente, a diferença percentual foi menor entre os valores previstos e experimentais, comparados aos demais ensaios. Já no caso do modelo de serragem, nota-se que os dados estimados pelas equações são quase todos inferiores aos da carne moída, embora possua um teor de umidade ligeiramente superior. Aparentemente, o fato é estranho, pois sabe-se que as propriedades termofísicas dependem desse componente. A propósito, as equações de Sweat e Siebel são fundamentadas nesse princípio, porém aplicáveis a produtos alimentícios. Há, ainda, prováveis fontes de erro nas medidas experimentais, como, por exemplo, na temperatura do meio de

resfriamento, para a qual foi adotado um valor médio conforme descrito em 3.3.2.

A partir do tempo de congelamento experimental, foram obtidos outros parâmetros importantes na verificação do andamento geral do processo. O coeficiente efetivo de transferência de calor, estimado indiretamente pela equação de Plank, apresentou repetibilidade razoável nos ensaios sob condições semelhantes (duplicatas). Contudo, no global, nota-se uma certa superioridade dos valores correspondentes ao modelo de serragem. A explicação para o fato é complexa e as próprias fontes de erro podem ter contribuído para isso. Posteriormente, admitindo-se na equação (3.8) valores da literatura para o coeficiente de irradiação e o coeficiente equivalente da tampa (embalagem), foi possível obter o coeficiente convectivo. A obtenção desse parâmetro mais uma vez confirma a boa condução experimental, pois segundo ASHRAE (5), a faixa comum de h_c para transferência de calor por convecção natural é de 5,5 a 17 $\text{w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Todos os resultados apresentados concordam plenamente com a literatura acima.

Complementando a discussão sobre o assunto, a Figura 4.1 mostra as curvas de congelamento para a carne moída e para o modelo de serragem. Para efeito didático, elas podem ser divididas em três períodos: pré-resfriamento, mudança de fase e sub-resfriamento (ou têmpera) dos produtos.

No período de pré-resfriamento as curvas são muito parecidas, quase coincidentes. O parâmetro requerido para explicar esse comportamento é a difusividade térmica, definida matematicamente como o quociente entre a condutividade térmica e o calor específico do produto, ora expresso em bases volumétricas. Como os dois produtos possuem propriedades termofísicas semelhantes, esperar-se-ia que as respectivas difusividades térmicas fossem da

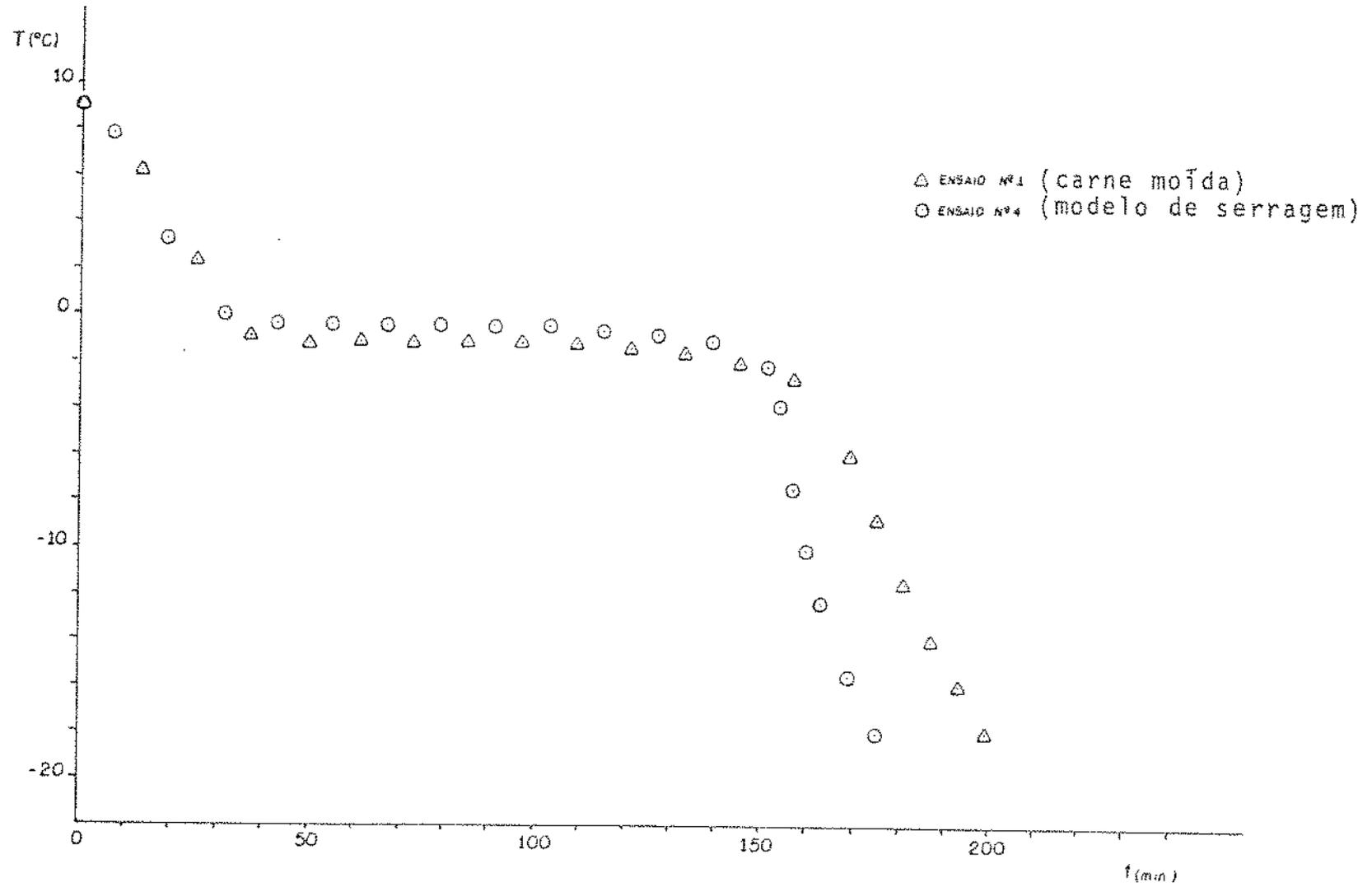


FIGURA 4.1. Curvas experimentais de congelamento da carne moída e do modelo de serragem até a temperatura de -18°C .

mesma ordem de grandeza (Apêndice II).

No início da mudança de fase da água, surgiram as primeiras diferenças entre as curvas em questão. Ambas exibiram um patamar quase horizontal, mas com temperaturas iniciais de congelamento distintas, ou seja, $-1,1^{\circ}$ e $-0,4^{\circ}\text{C}$, respectivamente para a carne moída e para o modelo de serragem. Para a carne moída, esse valor é comumente encontrado na literatura (11, 28). Já no caso do modelo de serragem, o resultado não concorda com a indicação da ABNT (2). A determinação da temperatura de congelamento do material apresentou valores entre $-0,3$ e $-0,4^{\circ}\text{C}$. Admitindo-se que, nessa formulação, o cloreto de sódio seja solúvel apenas na água e sem interação com outros componentes, sua concentração seria $0,5/76,2$, ou seja, cerca de 0,65% em peso. A tabela apresentada por SILVA (40) permite concluir que para tal concentração, a temperatura de congelamento da salmoura deve ser da ordem de $-0,35^{\circ}\text{C}$, o que concorda com a determinação experimental e, conseqüentemente, com a hipótese adotada.

No último período, percebe-se que as curvas são mais inclinadas em relação ao período de pré-resfriamento, mostrando uma elevação nas taxas de congelamento. Esse fato era esperado, pois, em geral, após a mudança de fase, ocorre um aumento da condutividade térmica e uma diminuição do calor específico. Essas alterações proporcionam um aumento da ordem de seis vezes na difusividade térmica dos alimentos e de nove vezes, no caso particular da água (25, 26). Outro detalhe observado é que a curva do modelo de serragem exibiu uma inclinação ligeiramente mais acentuada, sugerindo uma difusividade térmica superior à da carne moída. Em princípio, a observação deve ser verdadeira, pois o seu teor de umidade é maior. Além disso, o valor previsto para α_s parece concordar com a observação.

Feita a análise das curvas, resta tentar explicá-las em termos de tempo de congelamento. Segundo a literatura (10), esse parâmetro é influenciado principalmente pela temperatura do meio de resfriamento e pelos coeficientes de transferência de calor. Embora os produtos sejam diferentes, as condições globais de ensaio foram semelhantes. A abordagem matemática da equação de Plank mostra que, para o modelo de serragem, a parcela $\left\{ \frac{\Delta H}{T_{ic} - T_a} \right\}$ é apenas 5% superior à da carne moída. Por outro lado, o coeficiente efetivo de transferência de calor chega a ser 22% mais elevado, podendo se tornar no principal responsável pela redução de 25 minutos no tempo de congelamento, em comparação ao processamento da carne moída (Figura 4.1).

De qualquer modo, os resultados finais apresentados na comparação entre os dois produtos são aceitáveis diante das ponderações apresentadas ao longo das discussões. O modelo de serragem pode simular um produto alimentício comum, no caso a carne magra moída. Mais importante ainda, foi saber que as suas características termofísicas mantiveram-se estáveis, proporcionando boa repetibilidade de resultados e justificando a sua utilização neste trabalho. Além disso, é possível indicá-lo como modelo a outros pesquisadores que trabalham na área de congelamento.

4.2. Desempenho do congelador doméstico no processamento e estocagem

Os pacotes de carga contendo o modelo de serragem, utilizados nos experimentos seguintes, apresentaram 74,5% de umidade e densidade aparente igual a $812 \pm 4 \text{ kg/m}^3$, sendo ambos inferiores aos respectivos valores da etapa preliminar. No primeiro caso, a compactação natural exercida pelas camadas superiores do material, durante a elaboração do modelo, provocou

uma ligeira exsudação de salmoura, observada no fundo do tacho misturador. Esse fato sugeriu uma pequena redução do teor de água na formulação. Posteriormente, a natureza semi-flexível do cartucho não permitiu reproduzir o mesmo grau de compactação, em razão da necessidade de se manter a forma geométrica de blocos retangulares.

Em relação à umidade relativa externa (ambiente) pode-se dizer que esteve dentro de uma faixa comum a Campinas, isto é, entre 60 e 80%, para a época dos ensaios (junho a dezembro).

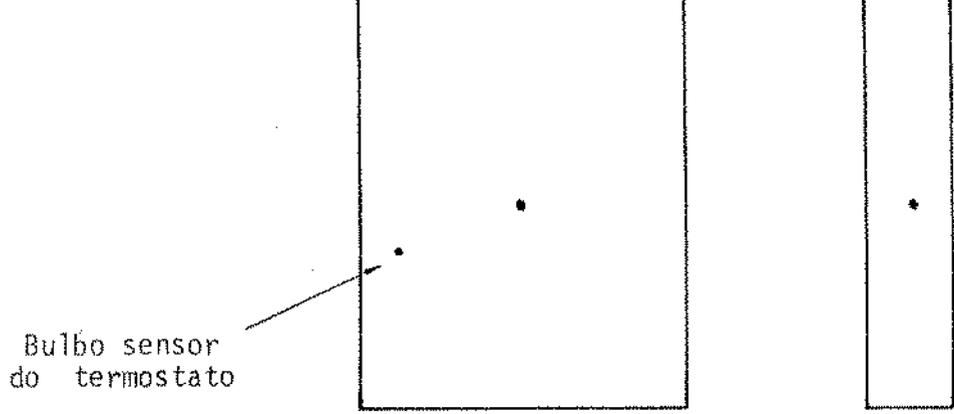
4.2.1. Processamentos sem mudança de fase nos pacotes de carga

4.2.1.1. Distribuição da temperatura interna (sem carga)

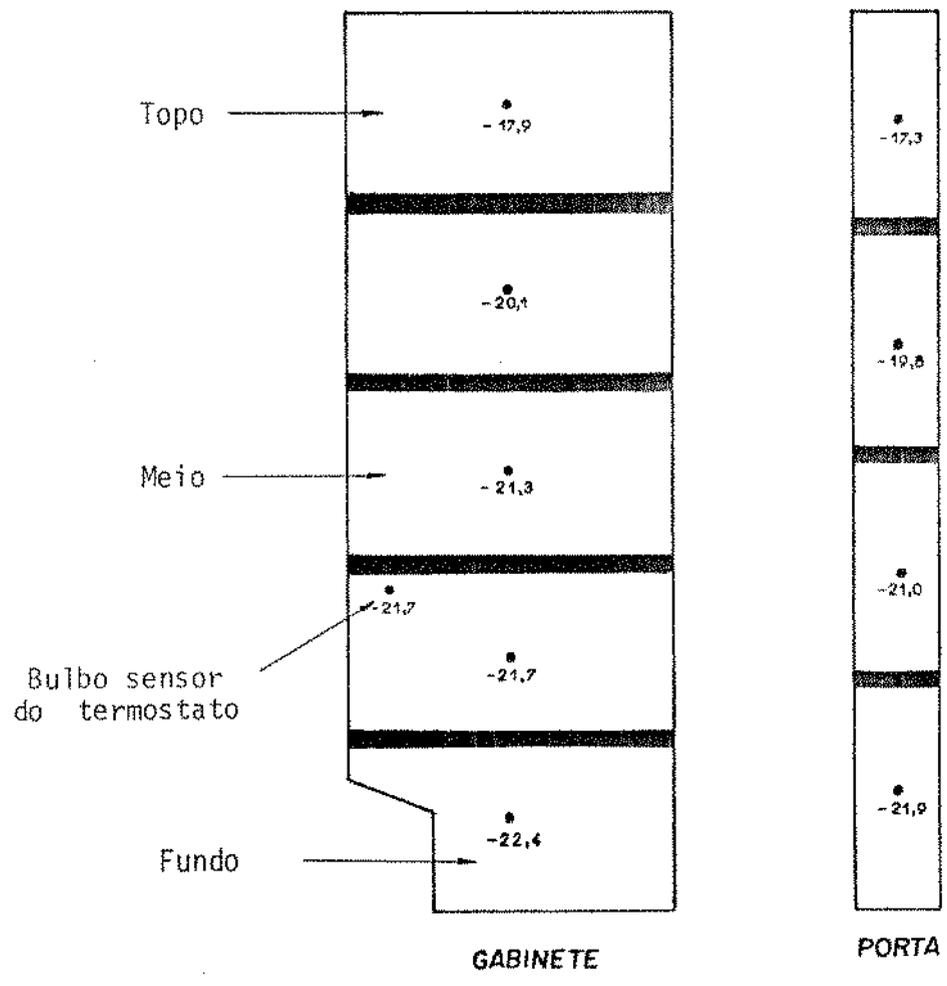
A Figura 4.2 mostra a distribuição de temperatura baseada em pontos estratégicos, na ausência total de carga no congelador. São valores médios obtidos ao longo do funcionamento de 10 ciclos completos do termostato. Quase todos os pontos de medição apresentaram temperaturas médias em torno do valor citado no manual de instruções do fabricante, ou seja -20°C .

Numa comparação feita em torno de um mesmo plano horizontal, nota-se que na porta as temperaturas foram ligeiramente superiores às aquelas apresentadas no gabinete. Acontece que as prateleiras evaporadoras são vazadas e se constituem basicamente em superfícies aletadas do próprio evaporador, permitindo a movimentação mais livre do ar. Isso não ocorre em relação à porta. Além disso, os pontos selecionados no gabinete são centralizados, portanto, mais afastados das zonas de transferência de calor com o meio externo.

No sentido vertical, a distribuição de temperatura



VISTA SUPERIOR



VISTA LATERAL

FIGURA 4.2. Distribuição da temperatura interna em várias regiões do congelador na ausência de produto (ensaio nº 10).

confirma a presença de um gradiente típico do processo de transferência de calor por convecção natural (5). Esse gradiente é sustentado pelas variações na densidade do ar em função da temperatura, dando origem à formação de duas zonas distintas, cuja diferença é da ordem de 5°C . O interesse prático está na chamada "zona quente", localizada no topo do congelador. Nessa região, a temperatura média permaneceu ligeiramente abaixo de -18°C (notadamente na porta), que é o valor máximo convencional para a estocagem de produtos congelados (28).

Não apenas o conhecimento da temperatura média é importante, mas também as suas flutuações durante a estocagem frigorificada. Assim sendo, o histórico de temperatura de alguns pontos estratégicos da Figura 4.2 é apresentado na Figura 4.3. Nela observa-se que as frequências de variação desse parâmetro foram semelhantes entre os referidos pontos, inclusive em relação ao bulbo sensor do termostato. Porém, em termos de amplitude, houve uma ligeira diferença. A flutuação de temperatura no topo foi de $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ e aumentou gradualmente em direção ao fundo do gabinete até atingir $\pm 2,2^{\circ}\text{C}$, em torno das respectivas temperaturas médias.

Em princípio, a própria temperatura externa deve favorecer um pequeno gradiente no sentido vertical. Contudo, também foi observado na prática que próximo às paredes externas do fundo do congelador a temperatura variava continuamente entre 27° e 32°C , portanto, acima do valor da temperatura média externa. Ocorre que no local estão instalados o compressor e o pré-resfriamento de óleo, que funcionam como fonte extra de calor quando a unidade de refrigeração está em operação. Conseqüentemente, a diferença média de temperatura entre o interior do congelador e o meio externo é maior nesse local, devendo resultar em um aumento das taxas de transferência de calor.

- 1 - Topo
- 2 - Meio
- 3 - Fundo
- 12 - Bulbo sensor do termostato

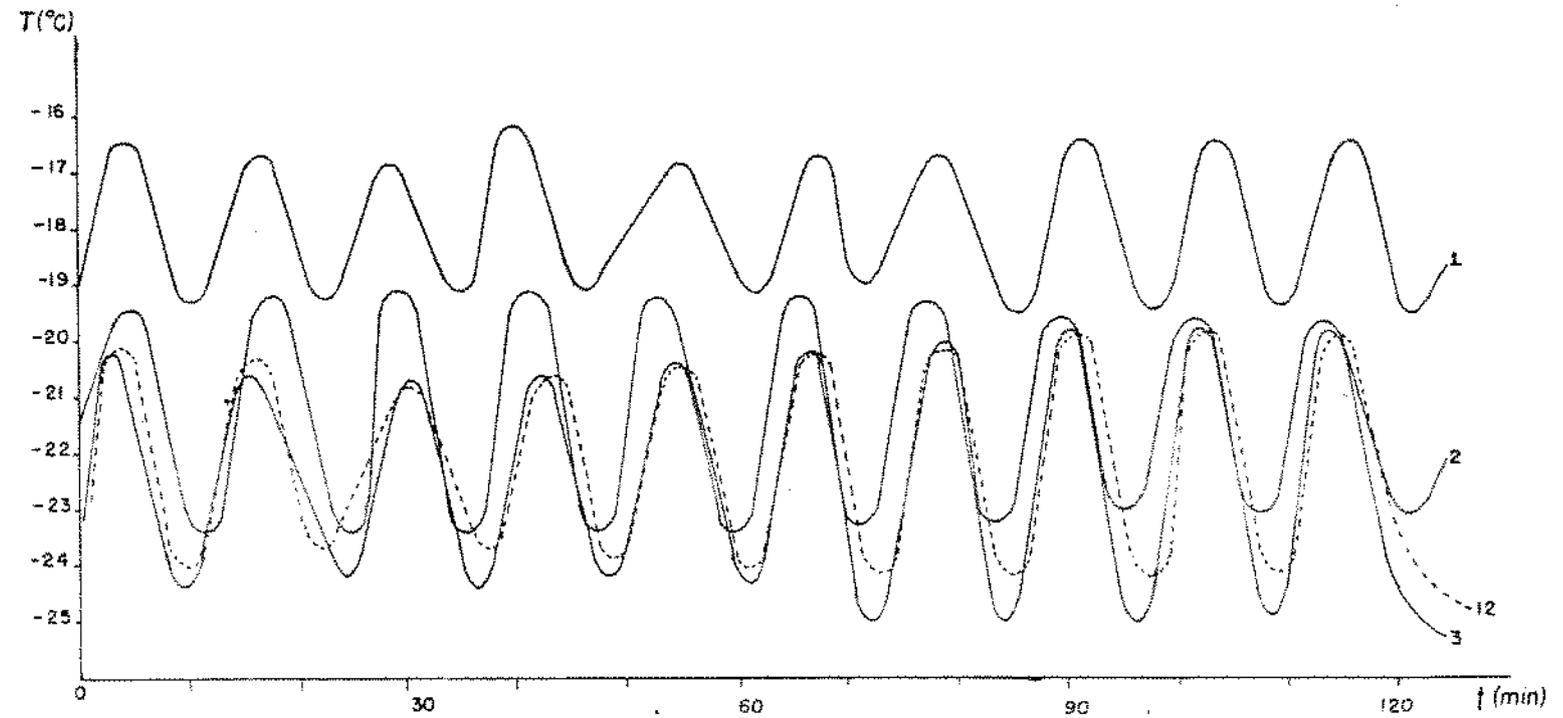


FIGURA 4.3. Histórico da temperatura interna junto ao bulbo sensor do termostato e em pontos centrais localizados no gabinete (sem carga), conforme descrição da Figura 4.2.

4.2.1.2. Cálculo do coeficiente global de transferência de calor

A Figura 4.4 apresenta as curvas obtidas após a conclusão do ensaio nº 10, quando o fornecimento de energia elétrica ao congelador foi interrompido. Nota-se que a temperatura interna não é uniforme em função dos locais avaliados, embora mostre uma discreta tendência à uniformidade ao longo do tempo. Rapidamente, o ponto situado no topo do congelador (curva 1) atingiu 0°C , logo seguido pelos demais.

Para efeito de aproximação, o cálculo de U foi baseado no histórico de temperatura correspondente ao centro geométrico do congelador (curva 2), cuja taxa de elevação de temperatura consta da Figura 4.5. Embora a temperatura interna não seja uniforme, a regressão apresentou boa correlação linear, atestando a correspondência da equação (3.9) para este caso. Desse modo, o valor de U obtido foi $0,6 \text{ w/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$.

Na literatura nada foi encontrado sobre a magnitude desse parâmetro, especificamente para congeladores domésticos. Contudo, consideradas as limitações do cálculo, o resultado é comparável a $0,4 \text{ w/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$, que é tido como valor típico para uma câmara frigorífica comercial com paredes de poliuretano de espessura igual $5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$. Aparentemente trata-se de uma câmara de pequeno porte, cuja espessura é semelhante àquela encontrada no congelador doméstico aqui estudado.

Como os equipamentos domésticos, em geral, possuem áreas de transferência de calor menores que nos casos comerciais, é possível ainda que, por razões econômicas, o fabricante tenha utilizado um tipo de poliuretano cuja condutividade térmica esteja acima dos valores da literatura (Apêndice I). A propósito, essa propriedade depende de uma série de fatores associados ao polímero e também ao processo de fabricação. Geralmente, o isolan-

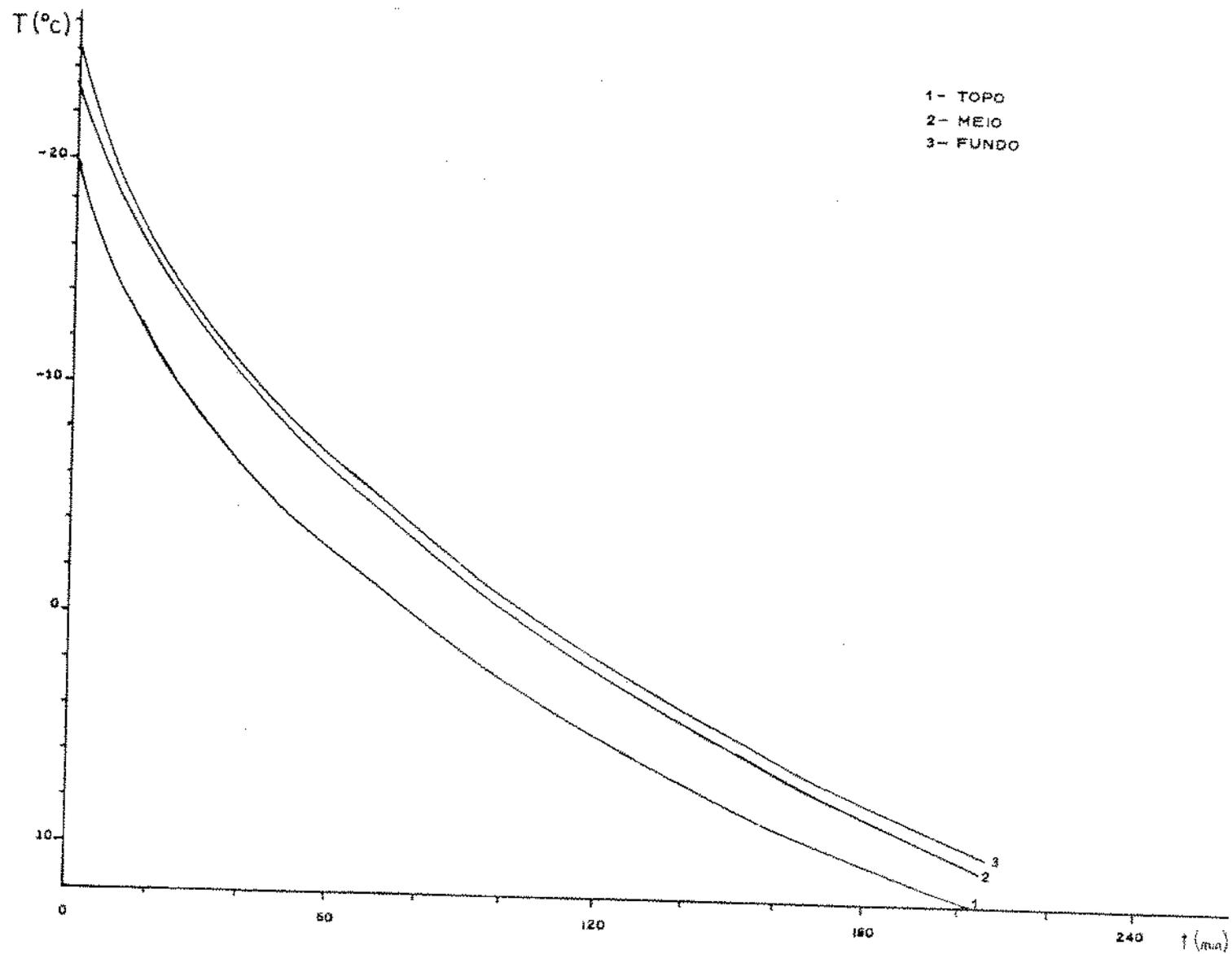


FIGURA 4.4. Elevação da temperatura interna em partes centrais do gabinete (sem carga) conforme descrição da Figura 4.2.

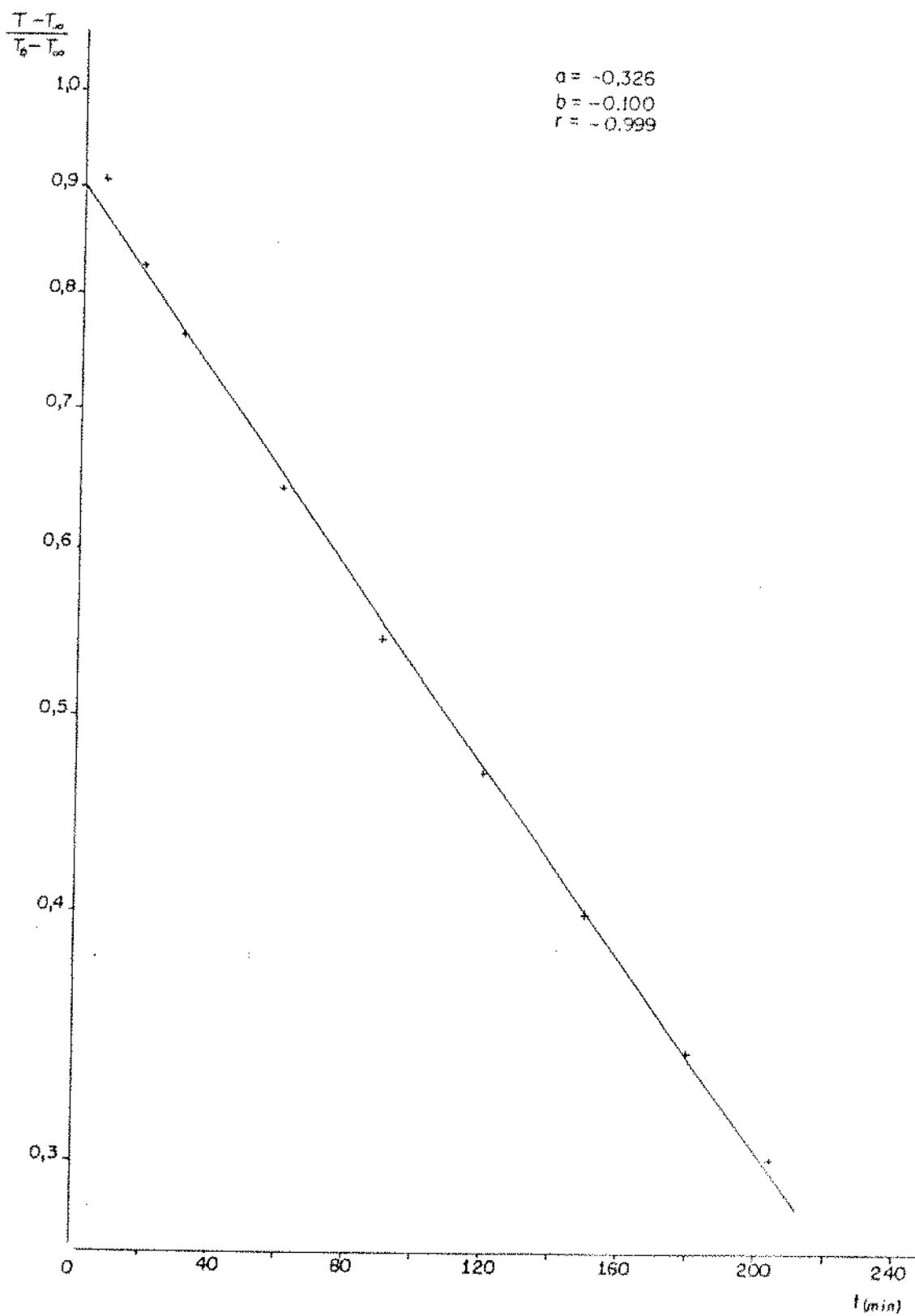


FIGURA 4.5. Taxa de elevação da temperatura interna do congelador em função do tempo (centro geométrico).

recém-fabricado possui uma dada condutividade térmica que se eleva em função do tempo, devido à difusão do ar, presente no meio ambiente, para o interior da espuma (processo de envelhecimento). A condutividade térmica final depende do grau de permeabilidade das células formadas, que estabelece um equilíbrio por difusão entre o ar e o gás de expansão do processo (42).

4.2.1.3. Distribuição da temperatura interna (com carga)

A Figura 4.6 mostra que a temperatura média do ar nas regiões do topo, meio e fundo do gabinete foi quase a mesma em relação ao experimento sem carga (respectivamente curvas 1, 2 e 3). Entretanto, a frequência de variação desse parâmetro sofreu uma discreta redução, enquanto a amplitude foi visivelmente reduzida.

No primeiro caso, o resultado era previsto, pois durante o descanso do compressor parte do calor proveniente do meio externo ao congelador deve ser transferida para a carga, cuja capacidade calorífica é muito superior à do ar. Com isso a temperatura do ar tende a alcançar mais demoradamente o limite superior fixado pelo termostato. A magnitude com que a frequência das flutuações de temperatura é reduzida deve depender também das dimensões da carga, ou seja, da área de transferência de calor. Pacotes menores geralmente possuem superfícies relativamente grandes e transferem calor com taxas mais elevadas. No experimento, os pacotes de 1/2ℓ e 1ℓ têm área da base semelhante entre si e estão empilhados de forma que a área total de cada pilha é quase a mesma, não sendo esperado, portanto, uma influência significativa nesse aspecto.

Por outro lado, a amplitude de variação da temperatura deveria se mostrar independente da carga, conforme relatado por QUAST (38), pois os seus limites são determinados pelo termostato.

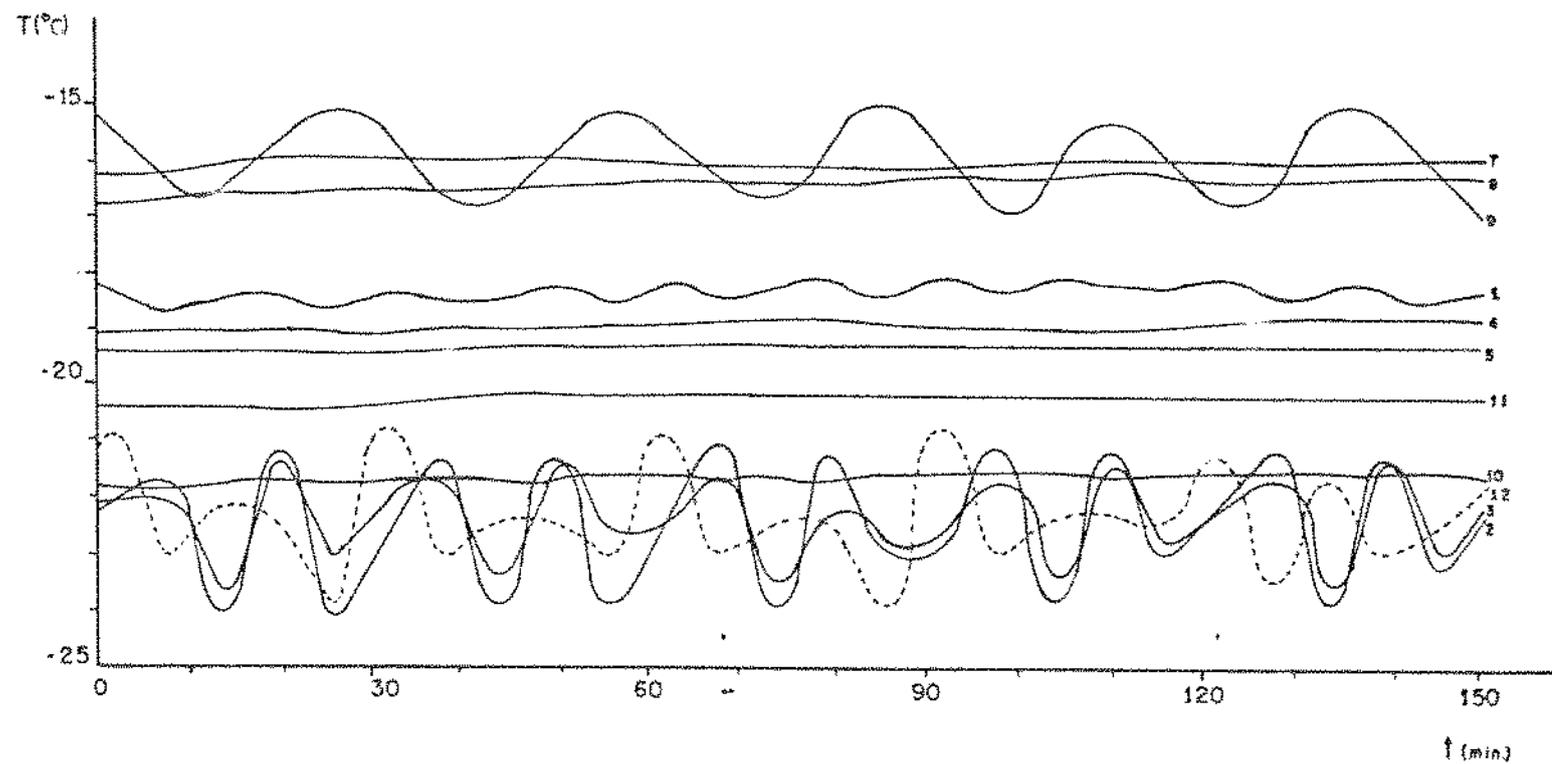


FIGURA 4.6. Histórico da temperatura interna do congelador e da carga congelada durante a estocagem (ensaio nº 12). Arranjo dos termopares conforme a Figura 3.5.

Curiosamente, observa-se que o histórico da temperatura do ar junto ao bulbo sensor do termostato foi irregular nesse aspecto (curva 12). Outra observação oportuna é que, na porta, a temperatura média do ar foi a mais elevada, provavelmente devido à aproximação com o isolamento térmico e também pela maior dificuldade na movimentação do ar no local (curva 9).

Em relação aos pacotes congelados, as variações observadas nos respectivos centros geométricos foram mínimas, porém, a temperatura diferiu em função da localização no interior do congelador.

Conforme relatado no experimento sem carga, a região do topo constituiu-se numa zona de temperatura mais elevada. Era de se esperar, portanto, que a presença da carga não modificasse tal situação. O pacote colocado na porta (curva 7) apresentou uma temperatura perfeitamente compatível com a temperatura do ar nas suas proximidades, embora elevada (curva 9). Já o pacote de referência (curva 5), que está no centro geométrico de uma pilha de três pacotes, manteve um valor aceitável, provavelmente devido ao contato direto da pilha com a prateleira evaporadora. Uma das evidências é o fato das temperaturas no centro geométrico e na superfície (respectivamente, curvas 5 e 4) terem sido ligeiramente inferiores à temperatura do ar que as envolve (curva 1). Contudo, o mesmo efeito não foi observado numa pilha vizinha, cuja massa era aproximadamente a mesma, porém, formada por cinco pacotes de menor capacidade (curva 8). Uma vez que o compressor é acionado intermitentemente, a temperatura do congelador flutua, não existindo um equilíbrio termodinâmico real e sim um processo transiente de transferência de calor. Nesse caso, o aumento do número de camadas de papel cartão deve ter gerado um aumento proporcional na resistência à transferência de calor no sentido vertical. Assim sendo, o empilhamento de pacotes de menor capacidade no topo do congelador tende a

aumentar a dependência do processo de transferência de calor com a temperatura do ar nessa região. A propósito, a temperatura observada no centro geométrico dos pacotes, tanto na porta (12) como no gabinete (1/22), foi ligeiramente superior a -18°C , o que deixa dúvidas quanto às condições mínimas de estocagem num caso real, pois a literatura recomenda não superar esse valor.

Nas regiões do meio e do fundo, os pacotes apresentaram temperaturas adequadas para estocagem (respectivamente curvas 10 e 11). Mais uma vez, o efeito da transferência de calor por condução pode explicar a temperatura ligeiramente inferior do pacote localizado na região mediana. Ocorre que no fundo do gabinete, o empilhamento foi necessariamente efetuado sobre uma superfície que constitui o revestimento interno, junto ao isolamento térmico do congelador.

Uma outra informação de interesse para o usuário foi obtida a partir da interrupção do fornecimento de energia elétrica ao congelador. Na prática, isso pode ocorrer devido à necessidade de conserto do equipamento, ou ainda por motivos que fogem ao controle do próprio usuário. Nesse caso, a tendência é a elevação da temperatura interna do congelador e, conseqüentemente, o descongelamento do produto. Entretanto, a Figura 4.7 mostra que esse processo é lento e apenas parcial no período de 24 horas, mantendo-se, obviamente, o congelador fechado. Os pacotes utilizados na monitoração do experimento atingiram temperaturas entre -4° e -7°C , dependendo da localização. Nessa faixa muitos produtos ainda armazenam grande parte da entalpia de fusão e que corresponde, aproximadamente, a 70% de todo o calor que deve ser retirado durante o processo (32).

Segundo COX (12), tem sido demonstrado experimentalmente que, durante a interrupção de energia elétrica por um prazo de 24 horas, os congeladores verticais raramente atingem a tempera

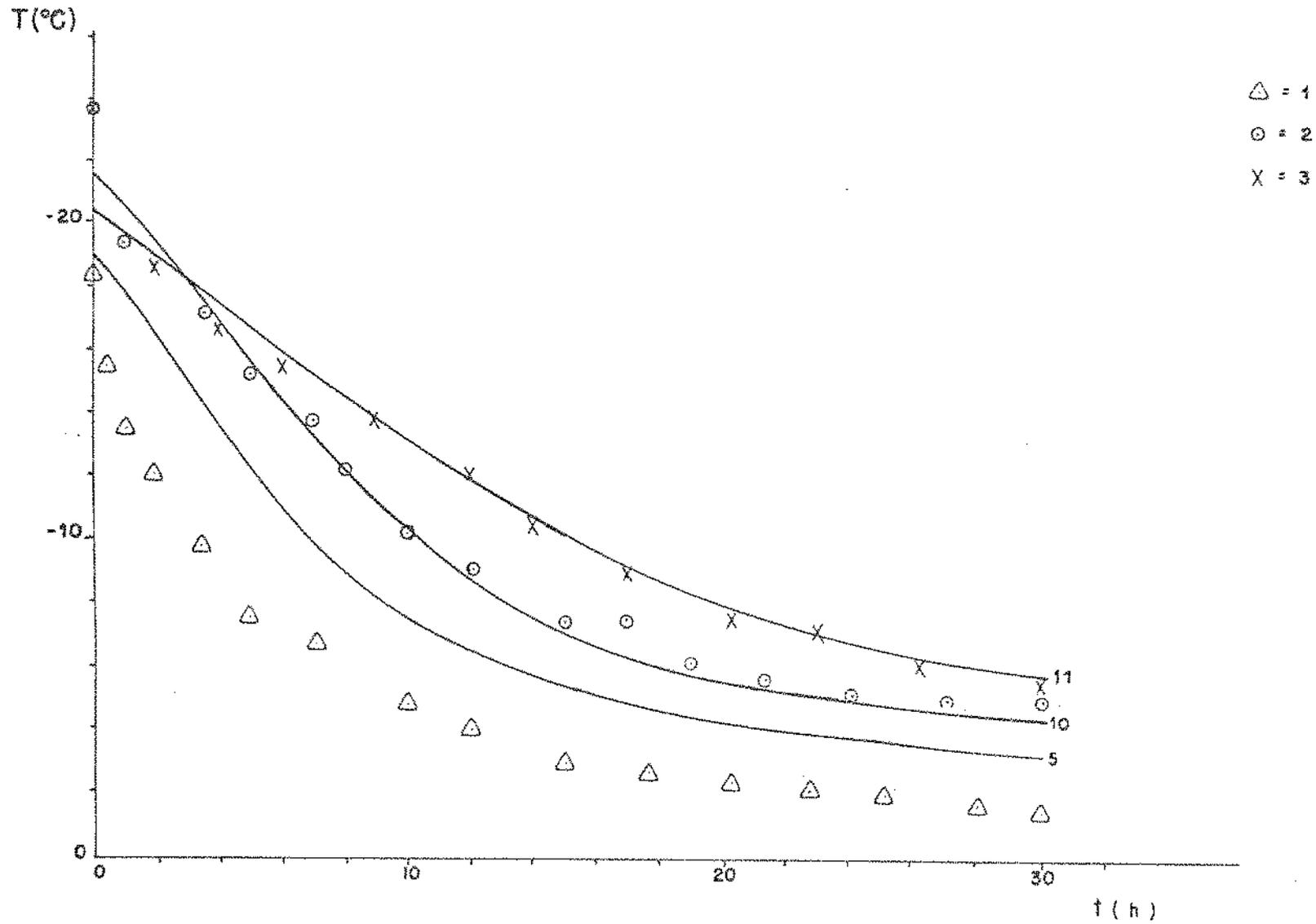


FIGURA 4.7. Elevação da temperatura interna do congelador contendo uma carga de 75kg, após o corte de energia elétrica. Arranjo dos termopares conforme a Figura 3.5.

tura de -5°C . Em linhas gerais, os resultados apresentados na Figura 4.7 estão de acordo com essa afirmação. O autor sugere, ainda, que no caso de uma emergência são possíveis duas alternativas para se evitar o descongelamento total da carga estocada: transferi-la para um outro congelador ou adicionar dióxido de carbono solidificado ("gelo seco") até que o fornecimento de energia elétrica seja restabelecido.

4.2.1.4. Características operacionais do termostato

A Tabela IV.2 mostra que os tempos de operação e de descanso do compressor foram mais longos na presença dos pacotes congelados. Conseqüentemente, o ciclo completo do termostato tornou-se mais extenso e menos freqüente na unidade de tempo, confirmando a expectativa apresentada em 4.2.1.3 em relação à distribuição da temperatura do ar.

A conversão dos tempos de operação e descanso, acima referidos, em percentagem, resultou em valores muito parecidos, indicando que a presença dos pacotes congelados não foi um fator operacional crítico (Tabela IV.3). Por outro lado, na literatura (30) considera-se que o tempo de operação aceitável para o compressor deve ser de aproximadamente 50% do ciclo completo do termostato. Assim sendo, os resultados parecem satisfatórios nesse aspecto.

As medições de tensão, intensidade de corrente e fator de potência resultaram, respectivamente, em 125 V, 2 A e 0,63. Conseqüentemente, a potência consumida e calculada pela equação (3.10) foi 0,158 kw, ou seja, cada hora de operação contínua do compressor consumiu 0,158 kwh. A Tabela IV.3 mostra, ainda, que a energia elétrica requerida para a estocagem convencional durante 24 horas não dependeu da carga, fixando-se em torno de 2,0 kwh. Por outro lado, a energia retirada pelo evaporador para a manutenção da temperatura de estocagem no mesmo período foi prevista pela equação (3.11). No cálculo foram utilizados o coeficiente global obtido em 4.2.1.2 e a temperatura

TABELA IV.2. Comportamento do ciclo do termostato em função da carga acomodada no congelador.

Nº Ensaio	Carga (kg)	t_{op} (min)	t_d (min)	t_{tot} (min)	ciclos- -hora
9	0	6,8	5,9	12,7	4,7
10	0	6,7	5,6	12,3	4,9
11	0	6,4	5,5	11,9	5,0
12	75	7,8	7,2	15,0	4,0
13	75	9,2	8,1	17,3	3,5
14	75	8,8	8,5	17,3	3,5

TABELA IV.3. Consumo de energia elétrica do congelador em função da carga contida no seu interior (estocagem).

Nº Ensaio	Carga (kg)	t_{op} (%)	t_d (%)	$t_{op}/24h$ (h)	E_s (kwh x 24h)	E_s (kwh x 24h/m ³)
9	0	53,5	46,5	12,8	2,02	7,5
10	0	54,5	45,5	13,1	2,07	7,7
11	0	53,8	46,2	12,8	2,02	7,5
12	75	52,0	48,0	12,5	1,98	7,3
13	75	53,2	46,8	12,7	2,00	7,4
14	75	50,9	49,1	12,2	1,93	7,2

média do congelador de -20°C obtida a partir das curvas 1, 2 e 3 da Figura 4.6. O valor resultante foi de 1,7 kwh durante 24 horas. O fato da medida elétrica apresentar um valor superior, era esperado, pois ela também inclui a eficiência do compressor.

Considerando-se agora o consumo de energia elétrica pelo volume unitário do congelador, o resultado é comparável ao valor apresentado por HEATON e WOODROOF e citado por DREW e RHEE (15), isto é, $7,1 \text{ kwh} \times 24\text{h}/\text{m}^3$. A partir desse valor, os autores estimaram o custo de estocagem de vegetais congelados num congelador convencional de $0,45\text{m}^3$ de capacidade. Embora a comparação dependa de outros fatores, sabe-se que um congelador de maior capacidade possui menor superfície em relação ao seu volume interno e, portanto, apresenta um consumo de energia proporcionalmente menor, para a mesma finalidade (32).

4.2.2. Processamento com mudança de fase nos pacotes de carga

4.2.2.1. Características do processo de congelamento

A Tabela IV.4 apresenta as características do processo de congelamento com base no pacote de carga de referência. Nota-se que nos processamentos de 75kg o tempo de congelamento foi quase independente do sistema de funcionamento do compressor, o que também pode ser constatado pelas velocidades de congelamento obtidas. Isso ocorreu devido à temperatura do congelador ter permanecido acima da temperatura superior fixada pelo termostato (ponto de "cut-off" = -21°C), obrigando o funcionamento contínuo do compressor durante quase todo o processamento (caso semelhante ao do sistema "quick freezing"). Por outro lado, nos processamentos de 15kg houve uma redução média de 37% no tempo de congelamento quando o funcionamento do compressor foi ininterrupto. Apesar disso, as velocidades de congelamento permaneceram não muito além de $0,20\text{cm}/\text{h}$,

valor que caracteriza o processo doméstico como tipicamente lento, conforme a definição do IIF (28). Essa afirmação já havia sido feita por BAILEY (6), após utilizar um congelador doméstico no processamento de carne "in natura". O autor ainda revela que a vantagem do sistema "quick freezing" é o abaixamento da temperatura do congelador e o seu uso é recomendado. Contudo, conclui que esse artifício não se constitui num meio de congelar rapidamente grandes quantidades de produto, conforme foi constatado acima. Por outro lado, o próprio fabricante não aconselha a utilização desse sistema por tempo superior a 24 horas. Isso não foi possível atender em nenhum dos casos estudados, pois os tempos de congelamento superaram esse limite, como pode ser visto na Tabela IV.4. A propósito, a literatura (32) estima que, em geral, cada metro cúbico de um congelador doméstico pode congelar 32kg de produtos durante 24 horas. Nesses termos, o congelador utilizado neste trabalho deveria congelar cerca de 8,6kg de produtos durante 24 horas e não de 11 a 14kg em igual período, conforme informação do fabricante. Concluiu-se, portanto, que a sua capacidade de congelamento está superestimada, o que parece verdadeiro diante dos resultados experimentais aqui obtidos.

As curvas de congelamento correspondentes ao processamento de uma carga de 75kg constam da Figura 4.8. De imediato percebe-se que o pacote colocado na prateleira superior da porta sofreu um processamento mais longo (curva 7). Nessa região, a temperatura do ar manteve-se relativamente elevada (curva 9), pois o local não permite o contato direto da carga com o evaporador. Além disso, ficou constatado anteriormente, que a temperatura do pacote de carga não conseguiu atingir o valor mínimo adequado para estocagem, tornando não recomendável o aproveitamento desse espaço por longos períodos. Quanto aos demais, todos atingiram a temperatura de -18°C , ainda que lentamente. Novamente aqui, a transferência de

TABELA IV.4. Parâmetros obtidos no processamento em função da carga e do sistema de funcionamento do compressor ($T_f = -18^{\circ}\text{C}$).

Nº Ensaio	Carga (kg)	T_i ($^{\circ}\text{C}$)	t_{exp} (h)	t_{op} (h)	V_c (cm/h)
15 ^a	75	23,0	69,5	66,7	0,13
16 ^a	75	23,0	73,4	69,6	0,13
17 ^a	75	21,8	70,6	67,4	0,13
18 ^b	75	23,0	63,0	63,0	0,12
19 ^b	75	22,6	63,8	63,8	0,13
20 ^a	15	23,2	54,5	38,5	0,18
21 ^a	15	23,5	52,6	37,3	0,17
22 ^b	15	25,1	33,7	33,7	0,22
23 ^b	15	23,4	33,5	33,5	0,23
24 ^b	15	23,4	34,0	34,0	0,20

a: funcionamento intermitente do compressor (termostato).

b: funcionamento contínuo do compressor ("quick freezing").

calor por condução parece ser a responsável pela mudança de fase mais rápida ocorrida nos pacotes de carga colocados sobre as prateleiras evaporadoras (curvas 5 e 10), sendo o efeito mais efetivo no topo. Aparentemente pode haver um ligeiro contraste nessa observação, pois o refrigerante, ainda sub-resfriado, penetra no evaporador pelo topo, devendo trocar calor sensível com o ambiente antes de atingir a sua temperatura de evaporação. Entretanto, não foi possível fazer mais medições devido as dificuldades apresentadas por um sistema de refrigeração fechado. Conforme já comentado, no fundo do gabinete a carga foi assentada sobre o revestimento interno do congelador (curva 11). Apesar disso, a temperatura do ar nas

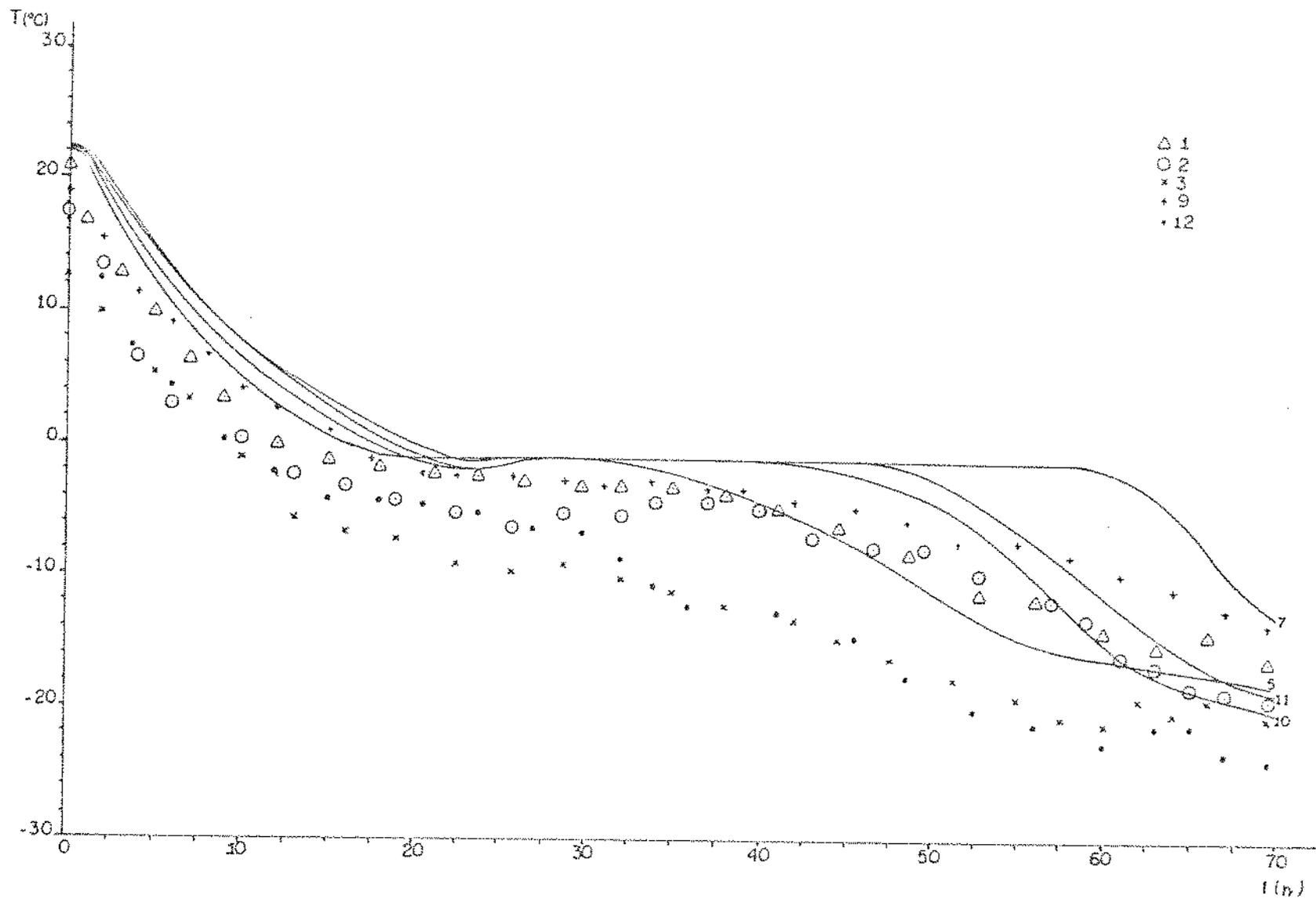


FIGURA 4.8. Processamento de uma carga de 75kq com o funcionamento intermitente do compressor (ensaio nº 17). Arranjo dos termopares conforme a Figura 3.5.

proximidades é suficientemente baixa para permitir a conclusão do processamento sem o contato direto da carga com o evaporador, diferindo, portanto, do caso da porta. As curvas correspondentes ao processamento de 75kg com o sistema "quick freezing" forneceram históricos de temperaturas semelhantes aos da Figura 4.8 e merecem igual comentário (não apresentados).

Em relação ao processamento de 15kg algumas observações devem ser acrescentadas com base nas Figuras 4.9.a e 4.9.b. O pacote de carga localizado abaixo do pacote de referência, e que sustenta a pilha (curva 6), sofreu um processamento bem mais rápido que o próprio pacote de referência (curva 5). Esse fato vem confirmar a presença do mecanismo de transferência de calor por condução entre o evaporador e o primeiro pacote, e daí para o restante da pilha (Figura 4.9.a). Outra observação é que a recuperação da temperatura interna em quase toda a extensão do gabinete foi relativamente rápida, permitindo apenas uma ligeira elevação da temperatura dos pacotes (3°C) representados pelas curvas 10 e 11 (Figura 4.9.b). A exceção ficou para a região do topo representada pela curva 1, onde se concentrou a maior parte da carga térmica. Com isso, a prateleira superior da porta apresentou temperaturas elevadas (curva 9), provocando um descongelamento mais intenso do pacote que representa a carga ali depositada (curva 7). Embora o descongelamento tenha sido parcial, a temperatura do pacote foi elevada em cerca de 10°C , sendo lenta a sua recuperação devido a dependência maior com a temperatura do ar no local (curva 9). Por fim, a Figura 4.10 mostra um comportamento semelhante em termos de recuperação da temperatura interna, quando o processamento foi feito com o sistema "quick freezing". O detalhe interessante é que não apenas a recuperação das temperaturas normais de funcionamento (-20°C) foi promovida, como também o seu abaixamento em cerca de 8°C . Aparentemente, isso se deve a uma certa inércia do ar em

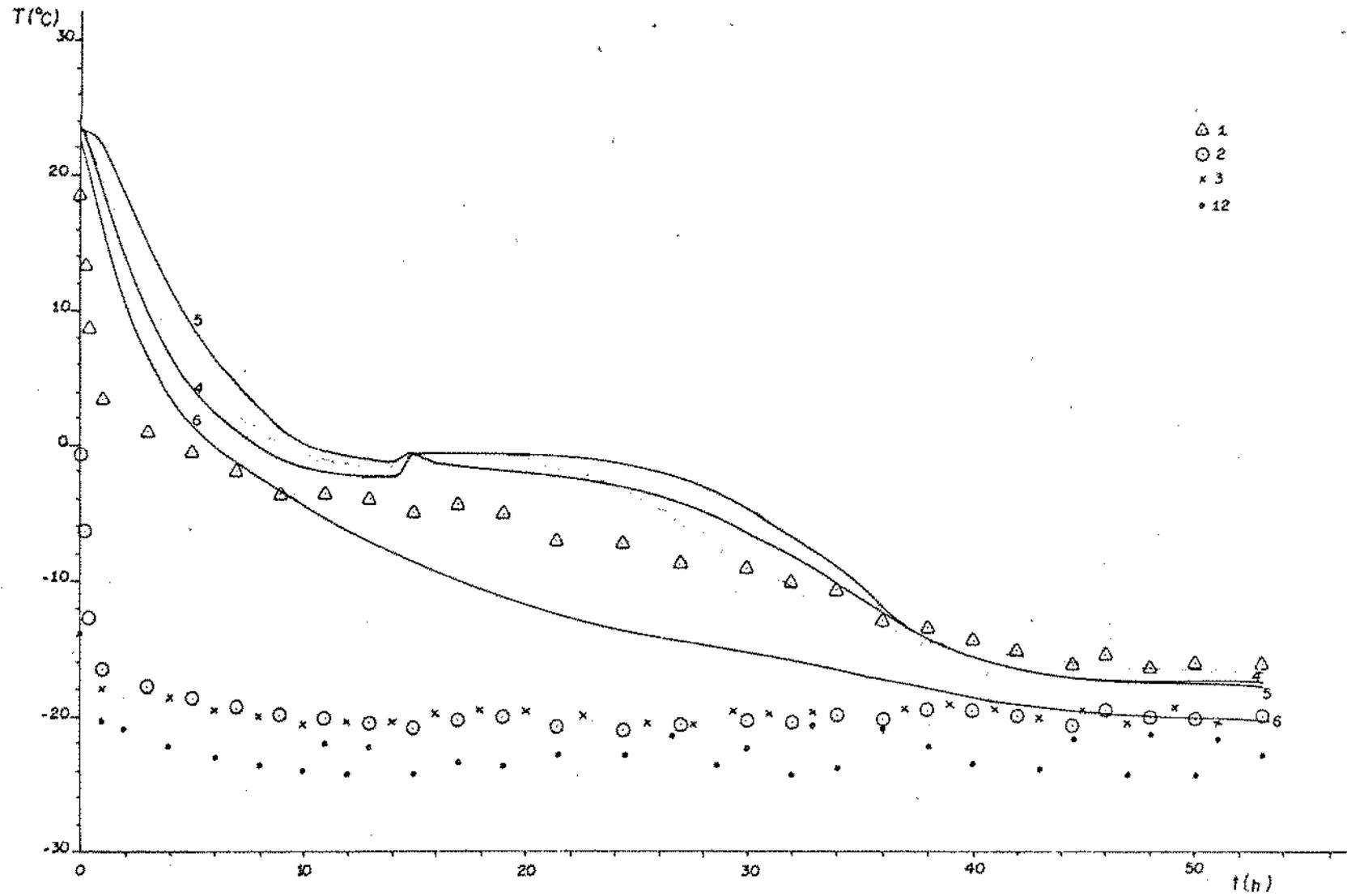


FIGURA 4.9.a. Processamento de uma carga de 15kg com o funcionamento intermitente do compressor (ensaio nº 21). Arranjo do termopares conforme a Figura 3.5. (a) Abaixamento da temperatura da carga durante o congelamento.

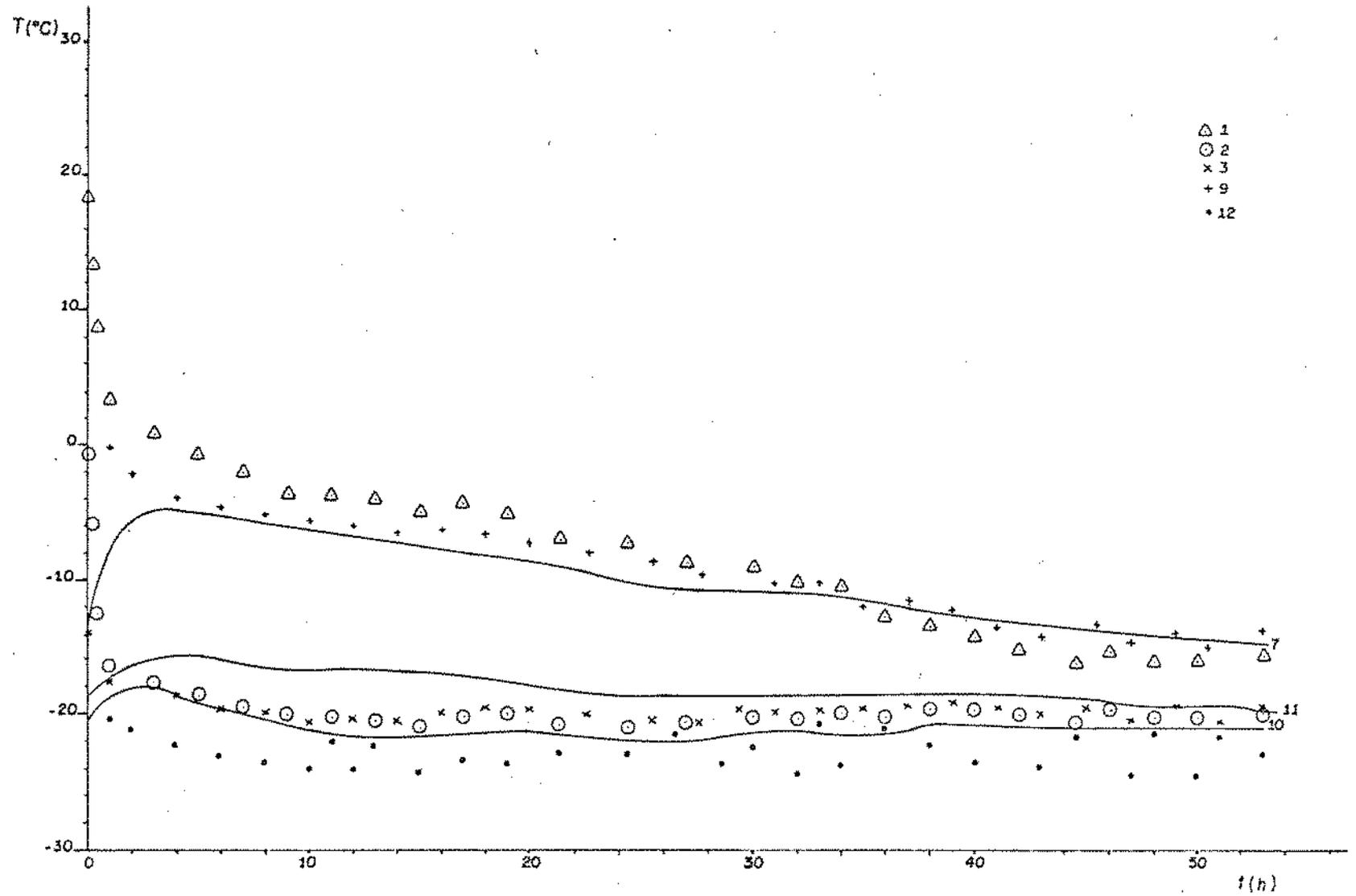


FIGURA 4.9.b. Processamento de uma carga de 15kg com o funcionamento intermitente do compressor (ensaio nº 21). Arranjo dos termopares conforme a Figura 3.5. (b) Elevação da temperatura da carga congelada.

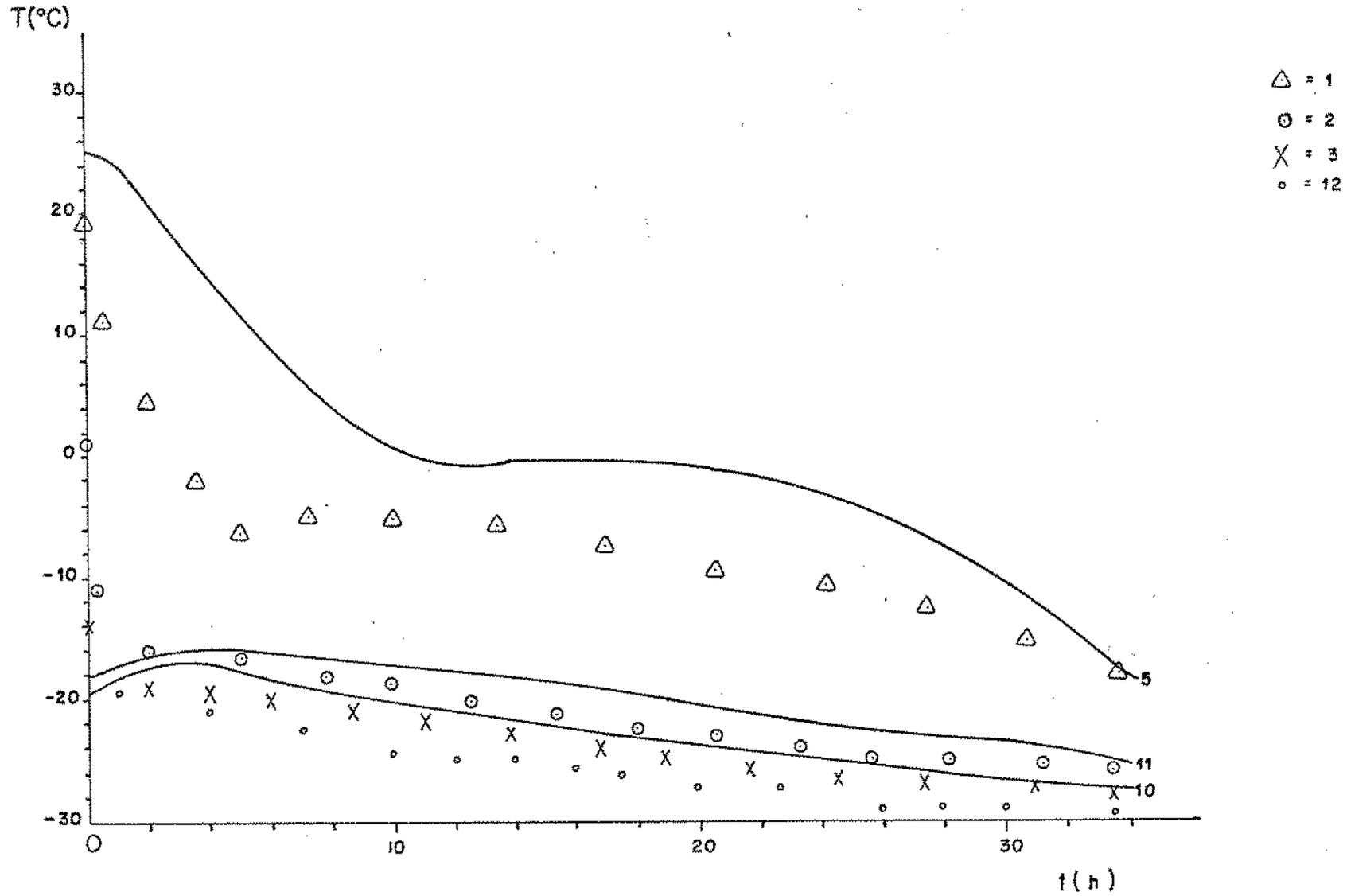


FIGURA 4.10. Processamento de uma carga de 15kg com o funcionamento contínuo do compressor (ensaio nº 22). Arranjo dos termopares conforme a Figura 3.5.

percorrer a extensão do congelador e pode explicar as diferenças não muito elevadas dos tempos de operação do compressor, obtidos nos dois sistemas de funcionamento (Tabela IV.4). Essa observação sugere que o processamento de 15kg seja feito distribuindo-se a carga nas prateleiras evaporadoras inferiores do gabinete, ou então, reduzindo-se essa carga de modo a acomodá-la numa única prateleira evaporadora inferior. A situação também poderá mudar diante da existência de ventilação interna, como nos modelos "frost-free". Contudo, nada foi encontrado a esse respeito na literatura.

Quanto à ocorrência do super-resfriamento, observou-se nas curvas apresentadas, apenas uma ligeira manifestação desse fenômeno (1° a 2°C), concordando, portanto, com as informações contidas na literatura (21).

4.2.2.2. Expectativa de desenvolvimento microbiano em função das condições de processamento

Sob o aspecto microbiológico, o processamento de uma carga de 75kg, acomodada de uma só vez no congelador, é particularmente preocupante. Em geral, as curvas de congelamento mostram que o período de pré-resfriamento foi lento, principalmente no topo do congelador, onde a temperatura do ar é mais elevada. A observação é pertinente, uma vez que BAILEY (7) conseguiu detectar aumentos significativos na contagem de microrganismos durante o processamento doméstico de quantidades apreciáveis de carne de cordeiro "in natura". A temperatura inicial desse produto foi de 31°C , que é um valor ambiental atingindo com facilidade no clima brasileiro.

Convém lembrar, ainda, que os produtos pré-cozidos e congelados, muito comuns na rotina caseira (36), constituem-se num caso especial, conforme relatado por DELAZARI (13). O cozimento

pode destruir quantidades apreciáveis de microrganismos, sem, no entanto, tornar o produto necessariamente estéril. Nessas condições pode-se esperar um risco de contaminação por patógenos. A contaminação geralmente ocorre durante o processamento, embora possa ocorrer durante o descongelamento em algum ponto da cadeia de distribuição do produto. Contudo, a maior probabilidade surge em razão do manuseio inadequado pelo próprio consumidor. O mesmo autor afirma que, em geral, num processamento rápido a deterioração é menos provável, pois o produto permanece exposto por menos tempo na faixa de temperatura ativa para o crescimento bacteriano.

Segundo LEITÃO (33), produtos perecíveis não devem ser mantidos por mais de 2 horas no intervalo de 5° a 60°C, principalmente entre 15° e 45°C, que é o ideal para patógenos mesofílicos. Nesse intervalo, desde que as demais condições sejam favoráveis, o tempo de geração pode ser igual ou inferior a 30 minutos, ou seja, a população microbiana pode dobrar a cada meia hora ou em menos tempo. Geralmente a contaminação é maior na superfície, mas poderá ser melhor distribuída no produto diante da necessidade de picá-lo ou triturá-lo antes do congelamento (carne moída, almôndega, hambúrguer, etc.).

Nos processamentos realizados, a carga permaneceu acima de 15°C durante mais de 2 horas, sendo particularmente preocupante o processamento de 75kg. Portanto, o processamento de quantidades substanciais de produtos em um congelador doméstico é questionável sob o aspecto microbiológico. Trata-se, entretanto, de uma prática comum no lar, geralmente realizada por cozinheiras profissionais ("freezeiras"). Estas se dispõem a preparar, em um só dia de trabalho, grande quantidade de refeições prontas ou semi-prontas, suficiente para o consumo mensal de uma família. Entretanto, parece ser uma prática abusiva, a menos que seja possível efetuar

rapidamente o pré-resfriamento de toda a carga de produto em uma operação à parte.

4.2.2.3. Energia consumida no congelamento doméstico

A partir da Tabela IV.4 (página 78) foram obtidos os valores médios do tempo de operação do compressor para os ensaios sob condições semelhantes. Esses valores multiplicados pela potência do compressor, calculada pela equação (3.10), forneceram os consumos de energia (médios) para cada condição de processamento. Os resultados constam da Tabela IV.5 e também sugerem, no aspecto energético, que o uso do sistema "quick freezing" foi quase indiferente no processamento de cargas de 75kg. Mesmo no processamento de 15kg, a redução de consumo foi inferior a 12%. Desse modo, conclui-se que no processamento de uma determinada carga comum aos limites caseiros, o sistema de funcionamento do compressor não é crítico em termos de consumo de energia elétrica. Também pode ser notado que esse consumo não foi proporcional à carga que sofreu o processamento.

Particularmente, nos processamentos de 15kg (Figuras 4.9a e 4.10), as curvas correspondentes à temperatura do congelador mostram a presença de uma diferença de temperatura muito grande entre o topo (curva 1) e as demais regiões (curvas 2 e 3). Esse fato evidencia uma certa inércia das correntes de convecção do ar, causando má distribuição de temperatura durante o processamento e provavelmente tenha influência no consumo de energia elétrica. Enquanto a temperatura do ar no topo é elevada, nas demais regiões ela se mantém próxima da temperatura convencional de estocagem ou mesmo abaixo, como no caso em que o sistema "quick freezing" foi utilizado (Figura 4.10).

Na tentativa de se conhecer (aproximadamente) a ener

gia consumida, na prática, para o processamento de 1kg do produto, foram computadas as parcelas de energia provenientes do meio externo e da variação de temperatura da carga congelada (60kg) durante os processamentos (devido a abertura da porta para carregamento). Para tanto, foram considerados os tempos de congelamento e de operação tomados da Tabela IV.4 (página 78), a potência do compressor (Equação 3.10) e os demais valores experimentais pertinentes aos ensaios 17, 21 e 22 (detalhes de cálculo no Apêndice V).

Os resultados constam da Tabela IV.6 e mostram que a energia proveniente do meio externo (E_i) representa de 31 a 55% da energia consumida nos processamentos (E_c). Os percentuais maiores pertencem aos experimentos com 15kg, provavelmente devido à temperatura reduzida do congelador. Isso explica o fato de E_c não ter sido proporcional à carga a ser congelada. Por outro lado, numa comparação direta entre os ensaios 21 e 22, que possuem cargas e temperaturas de processamento semelhantes, nota-se que t_c foi quase proporcional a E_i . Na prática, a influência de t_c e T_a na quantidade de energia proveniente do meio externo concorda com as correlações matemáticas da equação (3.11). Quanto a E_r , a eventual abertura da porta para carregamento resultou numa parcela desprezível, sendo um pouco maior quando o sistema "quick freezing" foi utilizado (ensaio 22).

Quanto ao consumo de energia por kg de material, o resultado previsto pela equação (3.12) foi de 0,10 kwh/kg para congelar e abaixar a temperatura do modelo de serragem até o valor usual para estocagem doméstica. Experimentalmente, os resultados correspondentes aos processamentos de 15kg estão mais distantes desse valor, provavelmente devido às aproximações e eventuais erros de medição instrumental.

Na literatura foi encontrado um estudo desenvolvido por DREW e RHEE (15) a respeito do custo do processamento de

TABELA IV.5. Consumo de energia elétrica do congelador a partir de valores médios obtidos nos processamentos (Tabela IV.4).

Carga (kg)	t_c (h)	t_{op} (h)	E_c (kwh)	Sistema de funcionamento
75	71,2	67,9	10,7	Termostato
75	63,4	63,4	10,0	"Quick freezing"
15	53,6	37,9	6,0	Termostato
15	33,7	33,7	5,3	"Quick freezing"

TABELA IV.6. Balanço de energia obtido no processamento de 1kg do produto.

Nº Ensaio	Carga (kg)	t_c (h)	\bar{T}_a (°C)	E_c (kwh)	E_i (kwh)	E_r (kwh)	E_p (kwh)
17 ^a	75	70,6	- 4,2	10,65	3,33	-	0,10
21 ^a	15	52,6	-19,6	5,89	3,79	0,09	0,13
22 ^b	15	33,7	-21,0	5,32	2,50	0,30	0,17

a: funcionamento intermitente do compressor (termostato)

b: funcionamento contínuo do compressor ("quick freezing")

vegetais congelados no lar, utilizando um congelador de 0,45m³ de capacidade. Os autores estimaram o consumo de energia elétrica do processamento a partir de um valor de 0,22 kwh para congelar e abaixar a temperatura de 1kg do produto até -18°C. Trata-se de um valor superior àqueles da Tabela IV.6, porém, os próprios autores reconhecem que o consumo de energia é afetado por várias condições, dentre elas, o tipo, modelo e capacidade do congelador e também as características do processamento.

4.2.3. Energia elétrica consumida na manutenção dos hábitos alimentares de uma família

A partir das Tabelas IV.2 e IV.4 (respectivamente páginas 75 e 78), foi calculado o consumo de energia elétrica necessário à formação e manutenção de um estoque de 75kg de produto. Essa carga estaria disponível para ser consumida mensalmente, sendo reposta ao longo do período para conservar os hábitos alimentares de uma família. Como alternativas de reposição do estoque foram escolhidas, para fins comparativos, a compra de produtos congelados distribuídos no varejo e o processamento caseiro de 15 ou 75kg, conforme descrito em 3.4.6.

Para o cálculo foi utilizado o valor médio de 2,0 kwh obtido da Tabela IV.2, para representar o consumo de energia diário do congelador na manutenção da temperatura de estocagem, independente da carga de produto. A parcela correspondente ao processamento do produto até atingir -18°C foi tomada da Tabela IV.5 (página 88) para cada caso em particular (Apêndice VI).

Os resultados constam da Tabela IV.7 e revelam que o funcionamento do congelador requer, no mínimo, 60 kwh mensais, independente de estar ou não abastecido com produtos previamente congelados, adquiridos nos supermercados. De certa forma, isso

TABELA IV.7. Consumo mensal de energia elétrica do congelador (desdobrado em parcelas).

Carga (kg)	Congelamento (kwh por mês)	Estocagem (kwh por mês)	Total (kwh por mês)
0	-	60,0	60,0
15 ^{a, c}	30,0	37,7	67,7
15 ^{b, c}	26,5	46,0	72,5
75 ^{a, d}	10,7	54,1	64,8
75 ^{b, d}	10,0	54,7	64,7
75	-	60,0	60,0

a: Funcionamento intermitente do compressor (termostato)

b: Funcionamento contínuo do compressor ("quick freezing")

c: Cinco processamentos mensais de 15kg

d: Processamento mensal único de 75kg

permitiria alguma liberdade ao usuário, que não precisaria de regularidade na compra de produtos para a manutenção do seu estoque. Por outro lado, a necessidade maior de energia ocorre quando a reposição é feita por cinco processamentos mensais de 15kg. Nota-se, portanto, que a diferença entre os casos extremos é inferior a 13 kwh mensais e que, isoladamente, este não seria um fator economicamente decisivo para uma família disposta a conservar os seus hábitos alimentares. Decididamente, ficou evidente nessas comparações que o sistema de funcionamento do compressor pode ser ignorado em termos de consumo de energia elétrica. Resta lembrar que, embora seja razoável no aspecto de energia, o processamento mensal único de 75kg não é uma prática aconselhável por razões microbiológicas, já discutidas.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

(1) A temperatura máxima de -18°C , recomendada para a estocagem de produtos congelados, foi obtida em quase todos os pontos avaliados no interior do congelador, exceção feita para a região que corresponde à prateleira superior da porta. Nesse caso, os produtos estocados devem ser consumidos primeiramente, ou tão logo que possível, antes que se inicie a deterioração de algum fator de qualidade.

(2) Aparentemente, o isolamento térmico das paredes do congelador foi bem dimensionado para atender às exigências domésticas de rotina, ou ainda, numa situação de emergência, onde um reparo rápido no sistema eletromecânico se faça necessário. O mesmo pode ser dito em relação a cortes de energia elétrica durante um período de até 24 horas, para o congelador repleto de produtos congelados.

(3) Com base no conceito de velocidade de congelamento definido neste trabalho, o processamento doméstico é tipicamente lento nas situações de rotina, mesmo quando o compressor trabalha ininterruptamente até a conclusão final do processo.

(4) Sob o aspecto microbiológico, o processamento de uma carga substancial (75kg) a partir da temperatura ambiente e acomodada de uma só vez no congelador, parece ser uma prática abusiva. A menos que seja possível efetuar rapidamente o pré-resfriamento de toda a carga numa operação à parte, ela deve ser desencorajada. O sistema de funcionamento contínuo do compressor ("quick freezing") foi inútil nessa situação.

(5) O sistema de funcionamento do compressor (intermitente ou contínuo) não foi crítico em termos de consumo de energia elétrica para o processamento de uma determinada carga

comum aos limites caseiros. Para esses dois regimes de operação, a relação de consumo não ultrapassou a 1,13.

(6) Durante o processamento de cargas de 15kg, foi observada uma certa dificuldade na movimentação do ar no interior do congelador. A existência de ventilação interna poderá não só melhorar a distribuição da temperatura de estocagem, como também reduzir a temperatura média do ar e, conseqüentemente, o tempo de congelamento.

(7) O consumo de energia elétrica não foi um fator economicamente decisivo para a formação e manutenção de um estoque mensal de 75kg, cuja reposição foi comparada por três alternativas distintas e comuns na rotina caseira, resultando em consumos não muito diferentes.

(8) O modelo de serragem, utilizado na simulação de produto, manteve-se fisicamente estável durante o desenvolvimento do trabalho, apresentando resultados repetitivos excelentes. Como se trata de um modelo extremamente simples e barato, é recomendável o seu uso em estudos deste tipo, onde o produto real tornaria a pesquisa muito onerosa.

(9) Recomenda-se, também, trabalhos que analisem diferentes capacidades de refrigeração e, conseqüentemente, uma tentativa de otimizar o consumo de energia para a faixa dos congeladores domésticos.

(10) O estudo e desenvolvimento do modelo aqui utilizado e de outros modelos é importante para estabelecer padrões simples e baratos que poderão se constituir em referências normalizadas, principalmente para o estudo do desempenho de sistemas de congelamento e armazenagem frigorificada.

(11) Os estudos aqui desenvolvidos devem ser estendi

dados a unidades com circulação forçada do ar interno, principalmente para se determinar a cinética de congelamento e comparações de consumo de energia.

(12) Sugere-se, ainda, um estudo com dados experimentais mais específicos para balanço de energia, a fim de se fazer uma revisão sobre a capacidade de congelamento declarada nesses equipamentos pelo fabricante.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE ARMAZENAGEM FRIGORIFICADA. Assessoria Econômica. Revista da Associação Brasileira das Indústrias de Alimentação. São Paulo, p.6-22, mar./abr., 1983.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Refrigeradores e Congeladores Domésticos. Determinação do Desempenho. Método de Ensaio. NBR 7255, abril, 1982.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Refrigeradores e Congeladores Domésticos. Medição do Consumo de Energia. Método de Ensaio. Projeto 3:02.5151-001, janeiro, 1985.
4. AMERICAN OIL CHEMISTS' SOCIETY. Official and tentative methods. V.1, 1974. Illinois. USA.
5. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATION AND AIR-CONDITIONING ENGINEERING, INC. Fundamentals Volume. Chapter 31, 1981. New York, USA.
6. BAILEY, C. Domestic meat freezing: facts and fallacies. Meat Trades Journal (4581) Apr. 8-7, 19, 1976.
7. BAILEY, C. Meat freezing: why and how? Agricultural Research Council. Meat Research Institute. MRI Symposium, nº 3. Apr. Bristol, England, 1974.
8. BRASIL já é o segundo produtor de congelados. Folha de São Paulo, p.19, 28 de maio de 1987.
9. CAMPOS, H. Estatística aplicada à experimentação com cana-de-açúcar. Fundação de Estudos Agrários "Luiz de Queiroz". Piracicaba, São Paulo, 1984.

10. CHAVARRIA, V.N. Experimental determination of the surface heat transfer coefficient under food freezing conditions. M.S. Thesis. Agricultural Engineering Dept., 1978. Michigan Univ., E. Lansing, Mich. (USA).
11. CLELAND, A.C. Heat transfer during freezing of foods and prediction of freezing times. PhD Thesis. Biotechnology Dep. Massey University. New Zealand, 1977.
12. COX, P.M. The home book of food freezing. Faber and Faber Ltd. London (England), 1977.
13. DELAZARI, I. Microbiologia de alimentos congelados. II: Microflora de vários tipos de alimentos congelados. Boletim do Instituto de Tecnologia de Alimentos, Campinas, 17(1):31-49, jan./mar., 1980.
14. DESROSIER, E.N. & TRESSLER, D.K. Fundamentals of food freezing. The AVI Publishing Company, Inc., 1977. Westport, Connecticut. USA.
15. DREW, D. & RHEE, K.S. Energy use, cost and product quality in preserving vegetables at home by canning, freezing and dehydration. Journal of Food Science, (45):1561-1565, 1980.
16. EARLE, R.L. Physical aspects of the freezing of cartoned meat. Industry Research Institute of New Zealand (Inc.). Report nº 2, 1959.
17. EARLE, R.L. Unit operations in food processing. Pergamon Press Ltd., 1st ed., 1966.

18. EIROA, M.N.U. Atividade de água: influência sobre o desenvolvimento de microrganismos e métodos de determinação em alimentos. Boletim do Instituto de Tecnologia de Alimentos, Campinas, 18(3):353-385, jul./set., 1981.
19. ELETROMOTORES WEG S.A. Manual de motores elétricos. Catálogo 511.05.0582 PE. Santa Catarina.
20. EMPRESA BRASILEIRA DE COMPRESSORES S.A. Laboratório de Aplicações. Joinville, Santa Catarina, 1988.
21. FENNEMA, O.R. Principles of food science. Part II: Physical principles of food preservation. Chapter 6. Marcel Dekker, Inc., 1975, New York, USA.
22. GONÇALVES, J.R. Considerações sobre alguns parâmetros críticos no processo de congelamento de alimentos. Boletim do Instituto de Tecnologia de Alimentos, Campinas, 23(1):1-15, jan./mar., 1986.
23. HELDMAN, D.R. Factors influencing food freezing rates. Food Technology, (4):103-109, 1983.
24. HERRMANN, K. Alimentos Congelados. Tecnología y Comercialización. Editorial Acribia 1970, Zaragoza, España.
25. HOLDSWORTH, S.D. Heat transfer in the freezing of fruit and vegetables. The Chemical Engineer, (5):127-134, 1970.
26. HSIEH, R.C.; LEREW, L.E. & HELDMAN, D.R. Prediction of freezing times foods as influenced by product properties. Journal of Food Process Engineering (1):183-197, 1977.
27. INSTITUTO BRASILEIRO DE ALIMENTOS SUPERGELADOS. Recomendações para manuseio, armazenagem, transporte e exposição para vendas de alimentos supergelados. IBRAGEL, set., 1985, 14p. São Paulo, Brasil.

28. INTERNATIONAL INSTITUTE OF REFRIGERATION. Recommendations for the processing and handling of frozen foods. 2nd edition, 1972. Annexe au Bulletin de L'Institut International du Froid, 177, Boulevard Malesherbes, 75-Paris-17, France.
29. JAKOBSON, B. & BENGTTSSON, N. Freezing of raw beef: Influence of ageing, freezing rate and cooking method on quality and yield. *Journal of Food Science*, 38:560, 1973.
30. KASAHARA, I.G. Tópicos en transferencia de calor y propiedades termofísicas en refrigeración y congelación de alimentos. Universidad Católica de Valparaíso. Facultad de Recursos Naturales. Escuela de Alimentos. Chile.
31. KLEEBERG, F.H. Estudo comparativo dos parâmetros termodinâmicos e da cinética de congelamento de filê de pescada (*Cynoscion pêtuanus*) cru e cozido. Tese de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos. Departamento de Engenharia. Campinas, 1986.
32. LEACH, M. Freezer facts. Forbes Publications Ltd., 1975. England.
33. LEITÃO, M.F.F. Comunicação pessoal. Instituto de Tecnologia de Alimentos. Campinas, 1988.
34. MONZINI, A. & MALTINI, E. Surgelazione. Aspectti tecnici della congelazione e qualità dei prodotti. *Industrie Alimentari*, (10):749-770, 1984.
35. MODERN PLASTICS ENCYCLOPEDIA GUIDE TO PLASTIC. Property and specifications charts. Mc Graw Hill. New York, USA.
36. PEREIRA, L. Conservação de alimentos pelo frio. *Casa da Agricultura*. São Paulo. Ano 10: 31-32, mar./abr., 1988.

37. PERRY, R.H. & CHILTON, C.H. Chemical Engineers' Handbook. 5th ed. 1973. Mc Graw Hill. Book Company, USA.
38. QUAST, D.G. Product temperature variation during cold storage of foods. Presented at the Inter-Ice Seminar Solingen, Germany, 1979.
39. RAMASWAMY, H.S. & TUNG, M.A. A review on predicting freezing times of foods. Journal of Food Process Engineering, (7): 169-203, 1984.
40. SILVA, R.B. Instalações frigoríficas. Editado pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Faculdade de Engenharia Industrial. Departamento Engenharia Mecânica. São Paulo, 1979.
41. SWEAT, V.E. Modeling the thermal conductivity of meats. Transactions of the ASAE. 18(3):564-568, 1975.
42. TORREIRA, R.P. Isolamento térmico. Fulton Editora Técnica Ltda., São Paulo, 1980.
43. VAN DEN BERG, L. Physicochemical changes in some frozen foods. Journal of Food Science, 29:540, 1964.
44. VASCONCELOS, D. Os alimentos congelados estão voltando. Revista Alimentação e Nutrição. Federação Brasileira das Associações de Nutricionistas. São Paulo, p.14-25, março, 1983.

APÊNDICE I: Propriedades termofísicas dos materiais à temperatura ambiente (aproximadamente 20°C).

Material	ρ (kg/m ³)	C (KJ/kg.°C)	K (w/m.°C)	Referência
Ar (seco, 0°C)	1,32	1,00	0,02	(16)
Aço carbono (0,2%)	7850	0,48	39,4	(42)
Acrílico	1100 a 1280	0,35	0,17 a 0,25	(35)
Madeira (peroba)	800 a 900	1,76	0,23	(42)
Madeira (pinho)	500 a 600	1,67	0,21	(42)
Papel cartão	640	1,26	0,07	(16)
Poliestireno (alto impacto)	1040 a 1100	1,28	0,04 a 0,12	(35)
Polietileno	930 a 960	2,3	0,33 a 0,48	(5)
Poliuretano (espuma/R 11)	35 a 45	1,59	0,020 a 0,026	(42)

APÊNDICE II: Propriedades termofísicas da água, carne moída e do modelo de serragem, acima e abaixo da temperatura de congelamento.

Propriedades	Água ¹	Carne moída	Modelo de serragem
K_S (w/m °C)	2,53	1,55	1,44
K_L (w/m °C)	0,60	0,51	0,48
ρ_S (kg/m ³)	919	-	-
ρ_L (kg/m ³)	998	-	-
C_S (J/m ³ °C)	$1,73 \times 10^6$	$1,90 \times 10^6$	$1,65 \times 10^6$
C_L (J/m ³ °C)	$4,17 \times 10^6$	$3,65 \times 10^6$	$3,38 \times 10^6$
α_S (m ² /h)	52×10^{-4}	29×10^{-4}	31×10^{-4}
α_L (m ² /h)	$5,2 \times 10^{-4}$	$5,0 \times 10^{-4}$	$5,1 \times 10^{-4}$
ΔH (J/m ³)	328×10^6	226×10^6	252×10^6

1: medidas à pressão de 1 atm e nas temperaturas de +20° e -30°C, respectivamente para os estados líquido e sólido, conforme FENNEMA (21).

APENDICE III: Características de construção do congelador doméstico (valores médios ou aproximados)¹.

Material	Espessura (m)	Massa (kg)	Volume (m ³)
Revestimento interno (poliestireno de alto impacto)	1×10^{-3}	2,88	2,69
Isolamento térmico (espuma de poliuretano)	$4,8 \times 10^{-2}$	5,20	0,13
Revestimento externo (chapa aço carbono)	6×10^{-4}	12,63	1,61

1: Volume interno = 0,26m³

Área interna = 2,69m²

APENDICE IV: Cálculo da quantidade de energia prevista para o congelamento de 1kg do modelo de serragem contendo 74,5% de umidade (E_p).

a) Dados necessários

$$T_i = 23^{\circ}\text{C} \quad T_{ic} = -0,4^{\circ}\text{C}$$

$$T_f = -18^{\circ}\text{C} \quad T_{oc} = -10^{\circ}\text{C}$$

$$\begin{aligned} \Delta H &= (\rho_s \cdot \Delta H)_{\text{gelo}} \cdot (\% \text{ Água})/100 \\ &= 919 \cdot 358210 \cdot 74,5/100 \\ &= 245,250 \times 10^6 \text{ J/m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_l &= 33,47 (\% \text{ Água}) + 836,82 && \text{Eq. (3.6)} \\ &= 33,47 \cdot 74,5 + 836,82 \\ &= 3330 \text{ J/kg} \cdot ^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_s &= 12,55 (\% \text{ Água}) + 836,82 && \text{Eq. (3.7)} \\ &= 12,55 \cdot 74,5 + 836,82 \\ &= 1772 \text{ J/kg} \cdot ^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

b) Cálculo de E_p

$$E_p = \frac{M}{3,6 \times 10^6} \cdot \left| C_l(T_i - T_{ic}) + \frac{\Delta H}{\rho_s} + C_s(T_{oc} - T_f) \right| \quad \text{Eq. (3.12)}$$

$$= \frac{1}{3,6 \times 10^6} \cdot \left| 3330 (23 + 0,4) + \frac{245,250 \times 10^6}{919} + 1772 (-10 + 18) \right|$$

$$= 0,0997 \text{ kwh/kg}$$

$$= 0,10 \text{ kwh/kg}$$

APENDICE V: Cálculo da energia consumida para congelar 1kg do modo de serragem contendo 74,5% de umidade (E'_p).

Foi calculada por diferença com base na seguinte equação:

$$E'_p = \frac{E_c - (E_i + E_r)}{M}, \text{ onde } E_c = P_c \cdot t_{op}$$

1. Energia proveniente do meio externo (E_i)

A temperatura média do congelador (\bar{T}_a) foi composta pela média das temperaturas obtidas durante os períodos de pré-resfriamento, mudança de fase e têmpera, além dos respectivos tempos de duração (curva 2 das Figuras 4.8, 4.9-a e 4.10). Para o cálculo foi usado $U = 0,6 \text{ w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, $A = 2,69\text{m}$ e a equação (3.11):

$$E_i = UA (T_\infty - \bar{T}_a) \cdot t_c / 10^3 \quad (3.11)$$

a) Ensaio 17:

$$\bar{T}_a = \frac{(7^\circ\text{C} \cdot 19\text{h}) + (-5^\circ\text{C} \cdot 30\text{h}) + (-13^\circ\text{C} \cdot 21,6\text{h})}{70,6\text{h}} = -4,2^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned} E_i &= 0,6 \cdot 2,69 |25 - (-4,2)| \cdot 70,6 / 10^3 \\ &= 3,327 \text{ kwh} \approx 3,33 \text{ kwh} \end{aligned}$$

b) Ensaio 21:

$$\bar{T}_a = \frac{(-19^\circ\text{C} \cdot 15\text{h}) + (-20^\circ\text{C} \cdot 21\text{h}) + (-19,5^\circ\text{C} \cdot 16,6\text{h})}{52,6\text{h}} = -19,55^\circ\text{C} \approx -19,6^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned} E_c &= 0,6 \cdot 2,69 |25 - (-19,6)| \cdot 52,6 / 10^3 \\ &= 3,786 \text{ kwh} \approx 3,79 \text{ kwh} \end{aligned}$$

c) Ensaio 22:

$$\bar{T}_a = \frac{(-18^{\circ}\text{C} \cdot 11\text{h}) + (-22^{\circ}\text{C} \cdot 19\text{h}) + (-25^{\circ}\text{C} \cdot 37\text{h})}{33,7\text{h}} = -21,0^{\circ}\text{C}$$

$$E_i = 0,6 \cdot 2,69 \cdot |25 - (-21,0)| \cdot 33,7/10^3 \\ = 2,502 \text{ kwh} \approx 2,50 \text{ kwh}$$

2. Energia correspondente à variação de temperatura dos pacotes já congelados (E_r)

Foi calculada como calor sensível, tendo como base o 3º membro da equação (3.12), que considera a massa e as variações de temperatura dos pacotes congelados, bem como o calor específico abaixo do ponto de congelamento. Os tempos de operação do compressor tomados da Tabela IV.4, multiplicados pelo seu consumo de energia elétrica que é 0,158 kwh, forneceram E_c .

a) Ensaio 21:

$$E_r = \frac{M \cdot C_s}{3,6 \cdot 10^6} \cdot |-17 - (-20)| = \frac{60 \cdot 1772 \cdot 3}{3,6 \cdot 10^6} = 0,088 \text{ kwh} \approx 0,09 \text{ kwh}$$

b) Ensaio 22:

$$E_r = \frac{M \cdot C_s}{3,6 \cdot 10^6} \cdot |-17 - (-27)| = \frac{60 \cdot 1772 \cdot 10}{3,6 \cdot 10^6} = 0,295 \text{ kwh} \approx 0,30 \text{ kwh}$$

3. Cálculo de E'_p

a) Ensaio 17:

$$E'_p = \frac{(0,158 \cdot t_{op}) - (E_i + E_r)}{M} = \frac{(0,158 \cdot 67,4) - 3,33 + 0}{75} = 0,097 \text{ kwh/kg} \approx \\ \approx 0,10 \text{ kwh/kg}$$

b) Ensaio 21:

$$E'_{p} = \frac{(0,158 \cdot 37,3) - (E_i + E_r)}{M} = \frac{5,89 - (3,79 + 0,09)}{15} = 0,134 \text{ kwh/kg} \approx 0,13 \text{ kwh/kg}$$

c) Ensaio 22:

$$E'_{p} = \frac{(0,158 \cdot 33,7) - (E_i + E_r)}{M} = \frac{5,32 - (2,50 + 0,30)}{15} = 0,168 \text{ kwh/kg} \approx 0,17 \text{ kwh/kg}$$

APÊNDICE VI: Cálculo do consumo mensal de energia elétrica do congelador (E_m).

O cálculo foi feito utilizando os valores médios da Tabela IV.5 e a seguinte equação:

$$E_m = E_c \cdot n^{\circ} \text{ proc./mês} + |720 - (t_c \cdot n^{\circ} \text{ proc./mês})| \cdot 2/24$$

Situações:

a) Sem carga (vazio)

$$\begin{aligned} E_m &= 0 + |720 - 0| \cdot 2/24 = \\ &= 60,0 \text{ kwh} \cdot \text{mês} \end{aligned}$$

b) Cinco processamentos mensais de 15kg e estocagem (tesmostato)

$$\begin{aligned} E_m &= 6,0 \cdot 5 + |720 - (53,6 \cdot 5)| \cdot 2/24 = \\ &= (30,0)_{\text{cong.}} + (37,7)_{\text{estoc.}} = 67,7 \text{ kwh} \cdot \text{mês} \end{aligned}$$

c) Cinco processamentos mensais de 15kg e estocagem ("quick freezing")

$$\begin{aligned} E_m &= 5,3 \cdot 5 + |720 - (33,7 \cdot 5)| \cdot 2/24 = \\ &= (26,5)_{\text{cong.}} + (46,0)_{\text{estoc.}} = 72,5 \text{ kwh} \cdot \text{mês} \end{aligned}$$

d) Processamento mensal único de 75kg (termostato)

$$\begin{aligned} E_m &= 10,7 \cdot 1 + |720 - (71,2 \cdot 1)| \cdot 2/24 = \\ &= (10,7)_{\text{cong.}} + (54,1)_{\text{estoc.}} = 64,8 \text{ kwh} \cdot \text{mês} \end{aligned}$$

e) Processamento mensal único de 75kg ("quick freezing")

$$E_m = 10,1 \cdot 1 + |720 - (63,4 \cdot 1)| \cdot 2/24 =$$
$$= (10,0)_{\text{cong.}} + (54,7)_{\text{estoc.}} = 64,7 \text{ kwh} \cdot \text{mês}$$

f) Estocagem de 75kg (prē-congelados)

$$E_m = 0 + |720 - 0| \cdot 2/24 =$$
$$= 60,0 \text{ kwh} \cdot \text{mês}$$

APÊNDICE VII: Tabela de conversão de unidades.

Para converter de	Para:	Multiplique por
J/m ³	Kcal/m ³	0,239 x 10 ⁻³
J/m ³	Btu/pē ³	0,268 x 10 ⁻¹
J/s	Watt	1
kg/m ³	lb/pē ³	0,624 x 10 ⁻¹
KJ/kg °C	Kcal/kg °C	0,239
KJ/kg °C	Btu/lb °F	0,239
W/m ² .°C	Kcal/h.m ² .°C	0,859
W/m ² .°C	Btu/h.pē ² .°C	0,176
W/m.°C	Kcal/h.m.°C	0,859
W/m.°C	Btu/h.pē.°F	0,577

Fonte: PERRY & CHILTON (37).