



NATÁLIA CRISTINA BELCHIOR

**TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO
CONGELAMENTO DE POLPA DE MARACUJÁ**

LAVRAS – MG

2012

NATÁLIA CRISTINA BELCHIOR

**TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO
CONGELAMENTO DE POLPA DE MARACUJÁ**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos, área de concentração em Ciência dos Alimentos, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Jaime Vilela de Resende

LAVRAS – MG

2012

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca da UFLA**

Belchior, Natália Cristina.

Transferência de calor no congelamento de polpa de maracujá /
Natália Cristina Belchior. – Lavras: UFLA, 2012.
126 p.: il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2012.

Orientador: Jaime Vilela de Resende.

Bibliografia.

1. Tempo de congelamento. 2. Processamento. 3. Indução do
fluxo de ar. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 664.804425

NATÁLIA CRISTINA BELCHIOR

**TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO
CONGELAMENTO DE POLPA DE MARACUJÁ**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos, área de concentração em Ciência dos Alimentos, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 29 de fevereiro de 2012.

Dr. Lanamar de Almeida Carlos UFSJ

Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa UFLA

Dr. Jaime Vilela de Resende

Orientador

LAVRAS – MG

2012

Aos meus pais, Sirlei e Dan Dureya, por todo amor, dedicação e apoio incondicional.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e em especial por me fazer acreditar que todo esforço é válido quando há vontade de vencer.

Aos meus pais, Sirlei e Dan Dureya, pelos incentivos a minha formação.

Ao meu irmão, Bruno e a minha sobrinha, Bruna, pelo carinho e força.

Ao meu noivo, Uélisson, pelo amor, companheirismo, incentivo e paciência.

Ao Departamento de Ciência dos Alimentos, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos e à Universidade Federal de Lavras, pela oportunidade de obter o título de mestre.

Ao meu orientador, professor Dr. Jaime Vilela de Resende, pelo apoio, orientação, dedicação e ensinamentos tão importantes.

Aos membros da banca examinadora, por todas as orientações, sugestões e correções.

Ao técnico de laboratório do Laboratório de Refrigeração de Alimentos, Tales Márcio Giarola, pela ajuda valiosa.

Aos amigos Tânia, Gustavo, Márcia, Fausto, Willian e Arianne, pela amizade, apoio e ajuda.

À CAPES e ao CNPq, pelo apoio financeiro.

À empresa Gemacom, pela doação de itens necessários para a execução deste trabalho.

Aos amigos da Pós-Graduação, aos funcionários do DCA e a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito Obrigada!

RESUMO

Este trabalho foi realizado com o objetivo de estudar a transferência de calor no congelamento de polpa de maracujá e está dividido em dois estudos. O primeiro estudo trata do processo de transferência de calor de polpas de maracujá submetidas ao congelamento em caixas de polietileno de alta densidade (PEAD) sem e com a indução do fluxo de ar. Nas duas condições foram feitas medidas dos perfis de temperatura, velocidade do ar e coeficientes de transferência de calor convectivos, usando uma metodologia que considera o regime transiente de troca de calor. Os resultados mostraram que a fixação de placas de poliestireno expandido em torno do empilhamento das caixas aumentou em 37,11% os valores médios dos coeficientes convectivos de transferência de calor. A indução do fluxo de ar no empilhamento de polpa de maracujá gerou uma troca de calor mais uniforme e reduziu o tempo de congelamento. Os tempos de congelamento foram, em média, de 40,13 horas, para as polpas submetidas ao congelamento sem a indução do fluxo de ar e 32,37 horas, para as polpas submetidas ao congelamento com a indução do fluxo de ar. Induzindo o fluxo de ar foi possível reduzir em cerca de 20% o consumo de energia quando comparado ao processamento sem indução do fluxo de ar. O segundo estudo trata do processo de transferência de calor de polpas de maracujá submetidas ao congelamento em dois tipos de embalagens cilíndricas (baldes de PEAD e tambores metálicos). Os tempos de congelamento foram, em média, de 95,7 horas, para as polpas acondicionadas em tambores e de 47,22 horas, para as polpas acondicionadas em baldes. Para as mesmas condições operacionais do equipamento, os resultados mostram que é possível processar a mesma quantidade de produto com maior qualidade (resfriamento mais rápido) em baldes de PEAD. Com essa configuração foi possível reduzir cerca de 60% o consumo de energia, quando comparado ao processamento em tambores. A decisão sobre a configuração indicada deve ser feita baseada na facilidade de manuseio e custo inicial, sendo o processamento em baldes vantajoso em ambos os aspectos.

Palavras-chave: Congelamento. Transferência de calor. Polpa de maracujá. Indução do fluxo de ar. Tempo de congelamento.

ABSTRACT

This work was developed with the aim to study the heat transfer on the freezing of passion fruit pulps, and it is divided into two studies. The first study is related to the process of heat transfer of passion fruit pulps submitted to freezing in boxes of High Density Polyethylene (HDPE) with and without inducing air flow. In both conditions profiles of temperature, air speed and coefficient of heat transfer were measured, using a methodology that considers the transient regime of heat exchange. Results showed that fixation of polystyrene expanding around boxes stacking enhanced by 37.11% the mean values of convective coefficient of heat transfer. The induction of air flow on stacking passion fruit pulps generated more uniform heat transfer and reduced freezing time. Freezing time was averaged 40.13 hours for pulps submitted to freezing without induction of air flow and 32.37 hours for pulps submitted to freezing inducing air flow. It was possible to reduce by 20% the energy consumption when compared to processing without inducing air flow. The second study is related to the heat transfer of passion fruit pulps submitted to freezing in two types of cylindrical packing (buckets of HDPE and metallic drums). The freezing time was, in mean, 95.7 hours for pulps kept in drums and 47.22 hours for pulps kept in buckets. For the same operational conditions of the equipment, results show that it is possible to process the same quantity of the product with higher quality (faster freezing) in HDPE buckets. Using these settings it was possible to reduce by 60% the energy consumption, when compared to processing in drums. The decision about the indicated setting must be done based on the ease on handling and initial cost. Processing in buckets was useful in both aspects.

Keywords: Freezing. Heat transfer. Passion fruit pulp. Induction of air flow. Freezing time.

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1	Modelos de propriedades termofísicas para os componentes dos alimentos ($-40\text{ °C} \leq T \leq 150\text{ °C}$).....	32
Tabela 2	Modelos de propriedades termofísicas para os componentes dos alimentos ($-40\text{ °C} \leq T \leq 150\text{ °C}$).....	32

CAPÍTULO 2

Tabela 3	Dados de composição da polpa de maracujá (UNICAMP, 2006)	60
Tabela 4	Características dos tanques utilizados no experimento.	63
Tabela 5	Comparação entre os tempos de congelamento experimental e preditos	83
Tabela 6	Parâmetros elétricos medidos durante o processo de congelamento sem e com a indução do fluxo de ar sobre o empilhamento	86

CAPÍTULO 3

Tabela 7	Características dos recipientes utilizados no experimento	100
Tabela 8	Comparação entre os tempos de congelamento experimental e preditos	118
Tabela 9	Parâmetros elétricos medidos durante o processo de congelamento sem e com a indução do fluxo de ar sobre o empilhamento	121

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 1	Fluxograma de obtenção da polpa de maracujá.....	59
Figura 2	Configurações de empilhamento das caixas (A) sem indução do fluxo de ar; (B) com indução do fluxo de ar, em que 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 equivalem aos números dos tanques apresentados na Tabela 4	64
Figura 3	Dimensões internas do túnel de congelamento utilizado.....	65
Figura 4	Pontos de medidas experimentais da velocidade do ar.....	67

CAPÍTULO 3

Figura 10	Empilhamento dos baldes sobre os paletes para o congelamento das polpas e camada do centro do empilhamento no plano XZ do sistema de coordenadas retangulares	101
Figura 11	Disposição dos tambores sobre os paletes para o congelamento das polpas	102

LISTA DE GRÁFICOS

CAPÍTULO 2

Gráfico 1	Curva de resfriamento para o congelamento (a) sem a indução (SD) e (b) com indução (CD) do fluxo de ar das polpas de maracujá acondicionadas em caixas localizadas em diferentes posições do empilhamento.....	73
Gráfico 2	Alteração das velocidades do ar causada pelo direcionamento do fluxo de ar nas posições frontais aos corpos de prova.....	76
Gráfico 3	Curva de resfriamento do tanque de aço galvanizado usado como corpo de prova.....	77
Gráfico 4 ^a	Coefficientes convectivos de transferência de calor médios para polpas de maracujá submetidas ao congelamento sem a indução do fluxo de ar e localizadas nas posições: (a) (0,365 ; 0,673), (b) (1,165 ; 0,673) e (c) (1,965 ; 0,673) do empilhamento.....	78
Gráfico 4B	Coefficientes convectivos de transferência de calor médios para polpas de maracujá submetidas ao congelamento com a indução do fluxo de ar e localizadas nas posições: (a) (0,365 ; 0,673), (b) (1,165 ; 0,673) e (c) (1,965 ; 0,673) do empilhamento.....	80
Gráfico 5	Alteração dos coeficientes convectivos de transferência de calor médios, causada pelo direcionamento do fluxo de ar.....	82

CAPÍTULO 3

Gráfico 6	Curva de resfriamento das polpas de maracujá acondicionadas em baldes.....	110
Gráfico 7	Curva de resfriamento das polpas de maracujá acondicionadas em tambores metálicos.....	111
Gráfico 8	Variação da velocidade do ar no túnel de congelamento com as polpas de maracujá submetidas ao congelamento em baldes de PEAD, em função da altura (Y) e do comprimento (X).....	112
Gráfico 9	Variação da velocidade do ar no túnel de congelamento com as polpas de maracujá submetidas ao congelamento em tambores metálicos, em função da altura (Y) e do comprimento (X).....	113
Gráfico 10	Curva resfriamento do cilindro de aço galvanizado usado como corpo de prova.....	114
Gráfico 11	Curva de resfriamento do tambor metálico usado como corpo de prova.....	115

Gráfico 12	Valores de h_m para o congelamento da polpa de maracujá em baldes de PEAD (a) linha 1 : $h_m = 13,37 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ e (b) linha 2: $h_m = 13,51 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$	116
Gráfico 13	Valores de h_m para o congelamento da polpa de maracujá em tambores metálicos: $h_m = 18,265 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$	117

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área (m ²);
c_p	calor específico (kJ/kg°C);
CE	consumo específico (kWh/kg);
h	coeficiente convectivo de transferência de calor (W/m ² °C);
k	condutividade térmica (W/m°C);
MDA	demanda máxima ativa (kW);
DA	demanda ativa (kW);
L	dimensão característica do alimento (m);
q	energia (J);
EA	energia ativa (kWh);
EAM	energia ativa mensal (kWh);
ER	energia reativa (kVArh);
e	erro (%);
E_{AN}	fator de forma geométrica;
E_{AS}	fator de forma geométrica;
FC	fator de carga;
FP	fator de potência;
$m_{sol.}$	massa da solução (kg);
m_{tq}	massa do tanque (kg);
Bi	número de Biot;
NBM	número de bateladas por mês;
PFM	produção física mensal (kg);
QBAT	quantidade de polpa de fruta processada por batelada (kg);
T_∞	temperatura do ar (°C);
T_b	temperatura do produto (°C);
$T_{sol.}$	temperatura da solução (°C);

T_{tq}	temperatura do tanque (°C);
T_c	temperatura final (°C);
T_{ic}	temperatura de início de congelamento (°C);
T_i	temperatura inicial (°C);
T_{fm}	temperatura média de congelamento (°C);
t_{exp}	tempo de congelamento experimental (h);
$t_{pred.}$	tempo de congelamento predito (h);
$t_{f,placa}$	tempo predito placa (h);
ΔH	variação da entalpia;
ΔT	variação da temperatura;
Δt	variação do tempo;
dq	variação da energia;
dt	variação do tempo;
dT	variação da temperatura;

Símbolos Gregos

$\lambda_{,ef}$	calor latente efetivo (kJ/kg);
ρ	densidade (kg/m ³);
β_1	dimensão em razão de H/D (cilindro);
β_1	dimensão em razão de L_1/H' (bloco);
β_2	dimensão em razão de L_2/H' (bloco);

SUMÁRIO

	CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL	17
1	INTRODUÇÃO	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	Maracujá	20
2.2	Polpa de fruta	21
2.3	Congelamento de alimentos	23
2.3.1	Influência do congelamento sobre microrganismos	28
2.4	Tempo de congelamento	28
2.5	Propriedades termofísicas	31
2.6	Transferência de calor	34
2.7	Coefficientes de transferência de calor	35
2.7.1	Medidas de temperatura em regime permanente	37
2.7.2	Medidas de temperatura em regime transiente	38
2.8	Efeito da embalagem do produto sobre o coeficiente de transferência de calor	41
2.9	Túneis com ar forçado	43
2.10	Instrumentos e métodos de medição de velocidade e vazão do ar de escoamento	45
	REFERÊNCIAS	47
	CAPITULO 2 Análise da tranferência de calor durante o congelamento de polpas de maracujá acondicionadas em caixas empilhadas sem e com a indução do fluxo de ar	53
1	INTRODUÇÃO	56
2	MATERIAIS E MÉTODOS	58
2.1	Material	58
2.2	Obtenção da polpa de maracujá	58
2.3	Propriedades termofísicas da polpa de maracujá	60
2.4	Congelamento da polpa	61
2.4.1	Preparo das caixas contendo polpa de maracujá	61
2.4.2	Preparo dos tanques contendo soluções anticongelantes usados como corpos de provas	61
2.4.3	Montagem das configurações	63
2.4.4	Congelamento da polpa de maracujá	65
2.4.5	Monitoração das temperaturas das caixas, dos tanques metálicos e do ar	66
2.5	Medidas da velocidade do ar	66
2.6	Determinação do coeficiente convectivo de transferência de calor (h)	67
2.7	Tempo de congelamento experimental	69

2.8	Validações dos valores experimentais de h pelas estimativas dos tempos de congelamento	70
2.9	Determinação do consumo energético	71
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
3.1	Históricos de temperatura	73
3.2	Velocidade do ar	74
3.3	Coefficientes convectivos de transferência de calor (h).....	77
3.4	Tempo de congelamento experimental	83
3.5	Consumo de energia	84
4	CONCLUSÃO	89
	REFERÊNCIAS	91
	CAPÍTULO 3 Influência do tipo de embalagem na transferência de calor de polpas de maracujá	93
1	INTRODUÇÃO	96
2	MATERIAL E METODOS	98
2.1	Material	98
2.2	Obtenção da polpa de maracujá	98
2.3	Montagem dos corpos de prova usados para medirem os coeficientes convectivos de transferência de calor (h).....	98
2.4	Congelamento das polpas.....	100
2.4.1	Congelamento da polpa de maracujá em baldes de polietileno de alta densidade (PEAD).....	100
2.4.2	Congelamento da polpa de maracujá em tambores metálicos	102
2.5	Monitoramento da temperatura das amostras, dos recipientes de aço galvanizado, do tambor metálico, da solução anticongelante e do ar	103
2.6	Medidas da velocidade do ar	104
2.7	Determinação do coeficiente convectivo de transferência de calor (h)	104
2.8	Validações dos valores experimentais de h pelas estimativas dos tempos de congelamento	106
2.8.1	Tempo de congelamento experimental	106
2.8.2	Tempo de congelamento estimado	107
2.9	Determinação do consumo energético	109
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	110
3.1	Histórico de temperatura para tambores e baldes	110
3.2	Velocidade do ar	111
3.3	Coefficientes convectivos de transferência de calor (h).....	114
3.4	Tempo de congelamento experimental	118
3.5	Consumo de energia	119
4	CONCLUSÃO	124

REFERÊNCIAS	126
--------------------------	------------

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL

1 INTRODUÇÃO

O congelamento é uma técnica de conservação que visa, principalmente, promover o retardamento das velocidades das diversas transformações de deterioração que ocorrem em alimentos, pela redução de sua temperatura a níveis compatíveis com o tempo de estocagem pretendido e, principalmente, com a labilidade do próprio produto. Ao contrário de outros métodos de conservação de alimentos, o congelamento é o único capaz de manter inalteradas as características sensoriais do produto fresco.

A produção e o consumo de alimentos congelados têm aumentado rapidamente, causando um interesse cada vez maior na determinação de propriedades térmicas de alimentos, simulação de processos de congelamento e no desenvolvimento de novos sistemas e equipamentos destinados à refrigeração e ao congelamento dos alimentos (SALVADORI et al., 1998; SCOTT; BECK; HELDMAN, 1992). Sendo assim, o conhecimento dos coeficientes de transferência de calor entre a superfície do produto e o ar frio faz-se absolutamente necessário para a construção de sistemas de congelamento ou para adaptar condições de operação de sistemas já existentes. Os coeficientes convectivos de transferência de calor são essenciais para estimar o tempo de processo. Porém, existe uma complexidade na determinação deste coeficiente que depende do tamanho e da forma da amostra, das características do fluxo do meio de resfriamento e dos produtos estudados. Em condições normais, esses coeficientes variam com a temperatura, a umidade do ar e, principalmente, com a velocidade do mesmo.

O congelamento de produtos alimentícios é um processo complexo que envolve transferência de calor com mudança de fase. É realizado, predominantemente, em túneis de congelamento com convecção forçada de ar,

em que o escoamento de ar ocorre em regime turbulento e a transferência de calor do produto para o ar, em regime transiente.

Os perfis de velocidade em túneis de congelamento por ar forçado são fortemente influenciados por quaisquer alterações na quantidade de produto e na distribuição do mesmo no interior do equipamento, podendo fazer com que o escoamento ocorra através de caminhos preferenciais e, conseqüentemente, leve a erros comuns na determinação de tempos de congelamento e coeficientes de transferência de calor nestes equipamentos.

O controle do fluxo de ar é um ponto crítico, já que determina a eficiência e a homogeneidade dos tratamentos aos quais os produtos devem ser submetidos. É importante, então, analisar a distribuição do ar em relação à geometria da câmara e à uniformidade da trajetória do escoamento.

Os objetivos principais deste trabalho foram:

- a) estudar os processos de transferência de calor durante o congelamento da polpa de maracujá;
- b) caracterizar o processo de transferência de calor pela determinação dos coeficientes convectivos de transferência de calor;
- c) determinar os tempos de processamentos nas seguintes situações: quando as polpas são submetidas ao congelamento sem e com a indução do fluxo de ar e quando as polpas são submetidas ao congelamento em embalagens cilíndricas com diferentes tamanhos (caixas, baldes e tambores);
- d) determinar o consumo energético do processamento de acordo com a configuração usada no processamento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Maracujá

O maracujazeiro é botanicamente definido como uma planta trepadeira sublenhosa que apresenta grande vigor vegetativo (MELETTI; MOLINA, 1999). Pertence à ordem Passiflorales e a variedade que tem maior interesse comercial é a Passifloracea, destacando-se o gênero Passiflora.

O maracujá é originário da América Tropical, com mais de 150 espécies de *Passifloraceas* utilizadas para consumo humano. As espécies mais cultivadas no Brasil e no mundo são o maracujá-amarelo (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa*), o maracujá-roxo (*Passiflora edulis*) e o maracujá-doce (*Passiflora alata*). O maracujá-amarelo é o mais cultivado no mundo, responsável por mais de 95% da produção do Brasil e utilizado, principalmente, no preparo de sucos. Esta espécie apresenta uma série de características superiores à do maracujá-roxo, tais como maior tamanho do fruto, maior peso, os híbridos apresentam maiores rendimentos, maior teor de caroteno, maior acidez total, maior resistência às pragas e maior produtividade/hectare (PIZA JÚNIOR, 1991). O maracujá-doce é destinado ao mercado de fruta fresca, devido à sua baixa acidez.

O Brasil é o maior produtor e consumidor mundial de maracujá. Em 2010, segundo os dados mais recentes compilados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2011), a produção foi de 920,158 mil toneladas, volume 29% maior que o do ano anterior.

A região nordeste é a maior produtora, responsável por 76% da produção nacional da fruta, seguida das regiões sudeste (13,85%), norte (5,35%), centro-oeste (3%) e sul (1,8%) (IBGE, 2011). A Bahia é o maior produtor nacional de maracujá, responsável por mais da metade da produção brasileira.

Estima-se que mais de 60% da produção brasileira de maracujá-azedo sejam destinados ao consumo *in natura*, por meio de sacolões, feiras, supermercados, etc. O restante é destinado às indústrias de processamento, sendo o suco o principal produto.

As frutas do maracujazeiro são muito valorizadas, tanto pelas suas características nutricionais como pelo seu sabor particular, constituindo uma fonte interessante para a fabricação de bebidas de sucos de frutas.

A importância econômica do fruto do maracujazeiro está na produção de suco integral concentrado, natural ou congelado. Porém, outros alimentos são elaborados a partir do fruto, tais como polpa para servir de matéria-prima para a elaboração de doces e outras formulações, néctares, refrescos, concentrados para refrigerantes, xaropes, sorvetes e geleias, dentre outros produtos (MELETTI; MOLINA, 1999).

2.2 Polpa de fruta

Em razão da sazonalidade da produção agrícola e da perecibilidade das frutas em seu estado natural, a comercialização de frutas processadas em forma de polpas vem adquirindo grande importância e sua maior aplicação é como matéria-prima para outras indústrias, como a de sucos, sorvetes, doces, iogurtes, biscoitos, bolos, alimentos infantis, etc. A qualidade da polpa está relacionada à preservação de seus nutrientes e de suas características físico-químicas e sensoriais, o que dependerá do controle realizado em todas as etapas do processamento. A polpa é um produto suscetível à degradação pela ação do calor, de microrganismos, de enzimas, de oxigênio e da luz, durante o processamento e o período de estocagem (CÔRREA NETO; FARIA, 1999).

A indústria de polpa de frutas tem como objetivos a obtenção de produtos com características sensoriais e nutricionais próximas às da fruta *in*

natura, a segurança microbiológica e a qualidade, visando atender não apenas aos padrões exigidos pela legislação brasileira, como também às exigências do consumidor.

A produção de polpas surgiu como alternativa para o aproveitamento do excedente de frutas não comercializadas na forma *in natura* e, nos últimos anos, tem crescido notadamente o mercado do produto, estimulado pela praticidade de consumo e por conservar propriedades da fruta fresca. No Brasil, a polpa industrializada destina-se, principalmente, à produção de sucos concentrados, para o abastecimento do mercado interno e do externo. Nos últimos trinta anos, houve um grande crescimento do mercado nacional e internacional de sucos de frutas, o que foi de extrema importância para o contexto de desenvolvimento da agroindústria brasileira e mundial (AMARO; BONILHA; MONTEIRO, 2002).

O mercado brasileiro de frutas tem crescido de forma acentuada, apresentando grande demanda no consumo de frutas frescas e processadas, tornando-se cada vez mais exigente em qualidade, pressionando pela busca de novas tecnologias de produção, colheita, pós-colheita, armazenamento, transporte e comercialização (SOUZA et al., 2002).

De acordo com Souza et al. (2002), a conscientização do consumidor quanto à importância de uma dieta à base de frutas, o seu valor nutricional, a imensa riqueza de aromas e sabores de frutas tropicais e a tendência cada vez maior do consumo de alimentos processados com as características sensoriais do alimento *in natura* têm contribuído para o aumento do consumo de polpas de frutas tropicais e seus derivados.

A legislação brasileira define polpa de fruta como o produto não fermentado, não concentrado, não diluído, obtido pelo esmagamento de frutos polposos por meio de um processo tecnológico adequado, com um teor mínimo de sólidos totais proveniente da parte comestível dos frutos, específico para cada um deles (BRASIL, 2000).

As polpas devem ser preparadas com frutas frescas maduras, sãs, limpas, isentas de matéria terrosa, parasitas e detritos de animais ou vegetais. Não deverão conter fragmentos das partes não comestíveis da fruta, nem substâncias estranhas à sua composição normal. Deve-se também observar as características microscópicas, como ausência de sujidades, parasitas e larvas (JACKIX, 1988).

As características físicas, químicas e organolépticas da polpa de fruta deverão ser as provenientes do fruto de sua origem e não deverão ser alteradas pelos equipamentos, utensílios, recipientes e embalagens utilizadas durante o seu processamento e comercialização (BRASIL, 2000).

A polpa de fruta destinada à industrialização de outras bebidas e não destinado ao consumo direto poderá ser adicionada de aditivos químicos previstos para a bebida a que se destina. Podem ser adicionados à polpa acidulantes, como regulador de acidez, conservadores químicos e corantes naturais, nos mesmos limites estabelecidos para sucos de frutas, ressalvados os casos específicos (BRASIL, 2000).

2.3 Congelamento de alimentos

O congelamento é uma operação unitária que visa à extensão da vida de prateleira de um alimento perecível (WELTY-CHANES; VERGARA-BALDERAS; BERMUDEZ-AGUIRRE, 2005).

O uso do congelamento para a preservação de alimentos data dos tempos pré-históricos. Os homens primitivos observaram que, em temperaturas climáticas baixas, os alimentos perecíveis podiam ser mantidos, quase que indefinidamente e com a mesma qualidade, durante o tempo em que permaneciam congelados (JUL, 1984).

Heldman (1992) cita muitos documentos, indicando que o congelamento como conservação surgiu nos últimos 160 anos e o processo se tornou uma etapa

indispensável na manipulação e na distribuição de alimentos em muitos países desenvolvidos. Silva (2000) lembra que a produção do frio em circuito fechado foi proposta por Olivier Evans, em 1805. Entretanto, a produção mecânica do frio industrial teve início somente na segunda metade do século XIX, juntamente com a circulação do ar forçado.

O congelamento é tido como um dos melhores métodos empregados para a conservação de um produto, com transformações mínimas, preservando, assim, seu valor nutritivo, sensorial, além de outros fatores responsáveis pela qualidade do mesmo. Esse processo tem como propósito reduzir a temperatura do produto tanto quanto economicamente possível, na tentativa de minimizar as atividades microbiológicas e enzimáticas. Dessa forma, retarda as taxas de reação de deterioração, promovendo uma extensão de sua vida de prateleira (AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE, 1998).

Nos alimentos congelados, a qualidade final está relacionada com as condições empregadas durante o processo de congelamento e com as condições de armazenamento (CIABOTTI, 2000).

Muitos tipos diferentes de alimentos podem ter sua vida de prateleira estendida pelo congelamento, tais como frutas, produtos cárneos, aves e peixes.

A temperatura recomendada para o armazenamento é de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Temperaturas inferiores a essa podem ser utilizadas, porém, elevam bastante o custo de manutenção do produto. As flutuações de temperatura devem ser evitadas, uma vez que poderão provocar recristalizações, com o aumento do tamanho dos cristais de gelo, o que é muito prejudicial para a textura do produto (PARDI et al., 2001).

Campañone, Salvadori e Mascheroni (2001) relatam que variações da temperatura durante a estocagem dos alimentos congelados são transferidas aos alimentos e que, em determinados períodos, a temperatura da superfície dos

alimentos pode ser superior à temperatura da câmara de estocagem, ocasionando processos de sublimação, que podem ocasionar significativas perdas de peso, além de alterações na qualidade dos alimentos, com conseqüente perda econômica.

No congelamento de alimentos, três etapas merecem a atenção do profissional em alimentos: o congelamento propriamente dito, a estocagem e o descongelamento.

Métodos de congelamento têm sido estudados a fim de minimizar as alterações químicas e físicas que deles decorrem. O principal fator de estudo é como a velocidade de congelamento influencia as características do produto final. Variações nas temperaturas das câmaras são problemas observados nas indústrias e levam à depreciação da qualidade do produto. Já o descongelamento dos alimentos é importante, devido às diferenças existentes entre as propriedades de transporte de energia na forma de calor entre a água e o gelo, ou seja, a forma como se processa o congelamento não é a mesma de como ocorre o descongelamento (COLLA; HERNÁNDEZ, 2003).

O congelamento envolve o decréscimo da temperatura a até $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou abaixo, a cristalização da água e dos solutos. Esses efeitos não ocorrem individualmente, mas simultaneamente, compreendendo a redução da temperatura sem mudança de fase e a cristalização (FELLOWS, 1987).

Antes do congelamento, o calor sensível é removido para diminuir a temperatura do alimento até a temperatura inicial de congelamento, abaixo do ponto de congelamento da água pura, devido às substâncias dissolvidas nas soluções que formam o alimento (BECKER; FRICKE, 1999). Essa etapa consiste na redução da temperatura abaixo do ponto de congelamento da água, sem mudança de fase.

A cristalização é a formação de uma fase sólida organizada em uma solução (FENNEMA; POWRIE; MARTH, 1973). O processo de cristalização

envolve a nucleação e o crescimento de cristais. O crescimento de cristais é simplesmente o alargamento dos núcleos formados na fase de nucleação, promovido pela adição de moléculas de água ao núcleo de cristalização. Portanto, nucleação e cristalização ocorrem simultaneamente.

Quando se inicia o congelamento, parte da água livre do alimento cristaliza-se, ocasionando a concentração da solução restante e diminuição de seu ponto de congelamento. Com o contínuo decréscimo da temperatura, aumenta a formação de cristais de gelo e, conseqüentemente, a concentração de solutos na solução restante ocasiona a diminuição do ponto de congelamento, sendo a quantidade de gelo e água durante o congelamento, portanto, dependentes da temperatura (BECKER; FRICKE, 1999).

Os alimentos congelam-se dentro de uma grande faixa de temperatura, dependendo da concentração de sais e água em suspensão coloidal na célula. A velocidade de congelamento dependerá da quantidade de água livre presente na célula e da quantidade de sais dissolvidos (ROÇA, 1999).

Quanto à taxa de congelamento, é aceito que, por meio do congelamento rápido, obtêm-se produtos finais congelados de melhor qualidade, devido à formação de pequenos cristais de gelo entre as estruturas das células, nos espaços intercelulares e intracelulares, sendo o tamanho dos cristais tão pequeno que não ocorrem danos às células (MARTIN et al., 1982).

Amer e Rubiolo (1998) relatam que o congelamento rápido de um alimento preserva sua qualidade, uma vez que seu uso leva à retenção de maior quantidade dos aromas voláteis que são perdidos durante o congelamento lento, além de ter menor fração de produto não congelado.

O resfriamento rápido pode ser realizado de diversas formas e com diferentes métodos, entre eles, resfriamento a vácuo, resfriamento com água gelada, câmara de resfriamento, resfriamento por ar forçado e resfriamento criogênico (BROSNAN; SUN, 2001; TERUEL, 2000).

No congelamento lento formam-se cristais maiores do que no congelamento rápido, ocasionando a ruptura das membranas celulares devido aos cristais formados no espaço intercelular. Outras causas da ruptura de membranas são a injúria celular ocasionada pelo aumento da pressão osmótica e a precipitação irreversível ou desnaturação dos constituintes coloidais da célula. Esse fato traz, em consequência, forte exsudação no descongelamento, com perda de elementos nutritivos (PARDI et al., 2001).

Durante o congelamento lento, ocorre a formação de gelo exclusivamente no meio extracelular, da seguinte forma: primeiramente, a concentração de solutos na fase não congelada aumenta e a pressão de vapor gradualmente diminui; como os cristais aparentemente não podem penetrar nas membranas celulares em temperaturas muito baixas e a pressão de vapor do meio intracelular excede à do meio extracelular, ocorre a difusão da água com desidratação das células e depósito sobre a superfície dos cristais. O congelamento lento (taxa de 1 °C/min) de tecidos vegetais, animais ou de microrganismos, geralmente causa a formação de cristais, principalmente no meio extracelular (WEINLING, 1984). Condições que levam, preferencialmente, à formação de cristais no meio extracelular resultam em cristais maiores de gelo, associados ao máximo deslocamento de água e encolhimento das células no estado congelado.

Todos os tipos de tecidos, animais, vegetais ou células de microrganismos, sem exceção, exibem uma distribuição de cristais de gelo uniforme quando congelados rapidamente sob temperaturas muito baixas (ROÇA, 1999). Condições que produzem cristalização intracelular resultam em formação de pequenos cristais de gelo em grande quantidade, com mínimo deslocamento da água, sendo a aparência do produto congelado similar à do produto não congelado e o produto obtido é de melhor qualidade que aquele produzido sob baixas taxas de congelamento.

2.3.1 Influência do congelamento sobre microrganismos

Durante o congelamento, a flora de microrganismos presente diminui consideravelmente, podendo aumentar se a operação de descongelamento não for realizada corretamente.

Quanto à influência dos processos de congelamento sobre microrganismos, é conhecido que a temperatura limite para o crescimento de microrganismos em alimentos é de -5 °C a -8 °C e de até 3 °C abaixo para as leveduras. O crescimento de microrganismos não ocorre a -18 °C, temperatura utilizada na estocagem de alimentos; entretanto, *Pseudomonas* sp. e leveduras (basidiomicetos) podem ser encontrados, mas sem apresentar crescimento (GEIGES, 1996).

De acordo com Geiges (1996), os principais fatores responsáveis pela morte ou injúria de microrganismos, durante os processos de congelamento, são:

- a) danos mecânicos às paredes celulares e membranas devido à formação de cristais intracelulares;
- b) perda do balanço eletrolítico resultante da desidratação e aumento da concentração de solutos devido à formação de gelo, podendo levar à desnaturação de proteínas;
- c) ruptura de membranas devido à máxima compressão e diminuição do volume celular;
- d) danos devido a processos de recristalização.

2.4 Tempo de congelamento

Os processos de resfriamento e congelamento de alimentos são complexos. O congelamento de alimentos depende, basicamente, da quantidade

de água que está presente no alimento e que vai congelar durante o processo (HELDMAN, 1992).

Anteriormente ao congelamento, o calor sensível deve ser removido do alimento para reduzir a temperatura inicial até a temperatura de início de congelamento. Depois ocorre a transformação da água em gelo, com a retirada do calor latente, quando quase não ocorre variação da temperatura do produto e o posterior resfriamento até a temperatura final de equilíbrio, próximo à temperatura do meio de resfriamento (BARBIN, 2007).

O tempo de congelamento efetivo é normalmente definido como o tempo total necessário para baixar a temperatura de um produto desde um valor de temperatura inicial até uma determinada temperatura abaixo do ponto de congelamento. Ele deve ser determinado em relação a uma posição no alimento, usualmente no centro térmico, no qual a mudança de temperatura é mais lenta.

Existem duas alternativas para a determinação do término do processo de congelamento. Uma delas é quando o centro térmico atinge uma determinada temperatura e a outra é quando uma média de temperatura do produto é alcançada. A desvantagem do uso de uma temperatura média do produto para o ponto final de congelamento é que são necessários muitos dados sobre as temperaturas para estimativa do tempo de congelamento (CLELAND, 1992). Assim, definições do tempo de congelamento são, geralmente, citadas como o tempo para chegar a uma determinada temperatura, no ponto mais lento de resfriamento (centro geométrico) (HOSSAIN; CLELAND; CLELAND, 1992).

O tempo gasto para o término do processo de congelamento depende de vários fatores, como temperatura, tamanho e geometria do produto, e condutividade térmica do material da embalagem.

O tempo e a taxa de resfriamento podem ser determinados tanto de forma experimental como analítica. Para a determinação analítica, devem ser desenvolvidos modelos matemáticos que possam representar adequadamente o

processo de transferência de calor que ocorre no produto, o que se torna uma tarefa complicada para alimentos, devido à sua composição complexa e formatos irregulares (CLELAND, 1992).

A velocidade de congelamento pode ser avaliada pela velocidade de deslocamento da frente do gelo através do produto. É maior próximo à superfície e mais lento próximo ao centro térmico do produto (SANTOS, 2005).

Para a estimação dos tempos de congelamento de alimentos processados industrialmente, já foram usados com limitado sucesso vários métodos analíticos e empíricos que assumiam a existência de estado estacionário e requerimento de propriedades constantes do produto. Ramakrishnan, Wysk e Prabhu (2004) citam que, independente do método adotado para calcular os tempos de congelamento, o controle do sistema de congelamento é um ponto crítico que precisa ser considerado. Dessa maneira, estes autores sugeriram que um controle de alimentação envolvendo a monitoração contínua da quantidade de produto que entra pode ser usado para controlar o congelamento em túneis e obter consideráveis economias de energia.

O tempo de resfriamento dos alimentos é influenciado pela razão entre as resistências à transferência de calor interna e externa. Esta razão é chamada número de Biot, definida pela Equação 1.

$$Bi = \frac{hL}{K} \quad (1)$$

em que h é o coeficiente de transferência de calor convectivo ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$), L é a dimensão característica do alimento (m) e k é a condutividade térmica do alimento ($W/m \text{ } ^\circ C$).

Quando o número de Biot é próximo de zero ($Bi \rightarrow 0$), a resistência interna é muito menor que a resistência externa, sendo, portanto, a resistência à

transferência de calor por condução menor que por convecção (HELDMAN, 1992). Neste caso, a distribuição da temperatura no material é uniforme e um balanço global de energia fornece resultados satisfatórios quando aplicados em procedimentos experimentais.

Quando o número de Biot é muito grande, ($Bi \rightarrow \infty$), a resistência interna à transferência de calor é muito maior que a resistência externa e pode-se assumir que a temperatura da superfície seja igual à do meio de resfriamento. Para esta situação, soluções da equação de transferência de calor de Fourier são úteis. Quando o número de Biot está dentro da faixa de $0,1 < Bi < 40$, ambas as resistências, interna e externa, devem ser consideradas. Neste caso, soluções de séries que incorporam funções transcendentais pela influência do número de Biot são aplicáveis para formas simples.

Como os fatores inerentes aos produtos, tais como condutividade e difusividade térmicas, não podem ser alterados, então, a redução da taxa de congelamento deve ser alcançada alterando-se as variáveis do sistema, como a velocidade e a temperatura do ar no processo.

2.5 Propriedades termofísicas

Nas Tabelas 1 e 2, segundo ASHRAE (2002), mostram-se as equações que podem ser utilizadas para estimativa das propriedades termofísicas baseadas na composição da polpa de maracujá em função da temperatura de processamento.

Tabela 1 Modelos de propriedades termofísicas para os componentes dos alimentos ($-40\text{ °C} \leq T \leq 150\text{ °C}$)

Propriedade	Componente	Modelo
k (W/m °C)	Proteína	$k = 1,7881 \cdot 10^{-1} + 1,1958 \cdot 10^{-3}T - 2,7178 \cdot 10^{-6}T^2$
	Carboidrato	$k = 2,0141 \cdot 10^{-1} + 1,3874 \cdot 10^{-3}T - 4,3312 \cdot 10^{-6}T^2$
	Fibra	$k = 1,8331 \cdot 10^{-1} + 1,2497 \cdot 10^{-3}T - 3,1683 \cdot 10^{-6}T^2$
	Cinza	$k = 3,2962 \cdot 10^{-1} + 1,4011 \cdot 10^{-3}T - 2,9069 \cdot 10^{-6}T^2$
ρ (kg/m ³)	Proteína	$\rho = 1,3299 \cdot 10^3 - 5,1840 \cdot 10^{-1}T$
	Carboidrato	$\rho = 1,5991 \cdot 10^3 - 3,1046 \cdot 10^{-1}T$
	Fibra	$\rho = 1,3115 \cdot 10^3 - 3,6589 \cdot 10^{-1}T$
	Cinza	$\rho = 2,4238 \cdot 10^3 - 2,8063 \cdot 10^{-1}T$
c_p (kJ/kg °C)	Proteína	$c_p = 2,0082 + 1,2089 \cdot 10^{-3}T - 1,3129 \cdot 10^{-6}T^2$
	Carboidrato	$c_p = 1,5488 + 1,9625 \cdot 10^{-3}T - 5,9399 \cdot 10^{-6}T^2$
	Fibra	$c_p = 1,8459 + 1,8306 \cdot 10^{-3}T - 4,6509 \cdot 10^{-6}T^2$
	Cinza	$c_p = 1,0926 + 1,8896 \cdot 10^{-3}T - 3,6817 \cdot 10^{-6}T^2$

O conhecimento das propriedades termofísicas de alimentos é necessário para o desenvolvimento de cálculos de transferência de calor que estão envolvidos nos projetos dos equipamentos de refrigeração e armazenamento de alimentos. Tais propriedades são essenciais para a simulação da variação da temperatura no interior dos alimentos durante o congelamento e são também importantes para as estimativas do tempo de congelamento e da carga térmica do produto (RESENDE; NEVES FILHO; SILVEIRA JÚNIOR, 2002).

Tabela 2 Modelos de propriedades termofísicas para os componentes dos alimentos ($-40\text{ °C} \leq T \leq 150\text{ °C}$)

	Propriedade	Modelo
Água	k (W/m °C)	$k = 5,7109 \cdot 10^{-1} + 1,7625 \cdot 10^{-3}T - 6,7036 \cdot 10^{-6}T^2$
	ρ (kg/m ³)	$\rho = 9,9718 \cdot 10^2 + 3,1439 \cdot 10^{-3}T - 3,7574 \cdot 10^{-3}T^2$
	c_p (kJ/kg °C), $T < 0$	$c_p = 4,0817 - 5,3062 \cdot 10^{-3}T + 9,9516 \cdot 10^{-4}T^2$
	c_p (kJ/kg °C), $T > 0$	$c_p = 4,1762 - 9,0864 \cdot 10^{-3}T + 5,4731 \cdot 10^{-6}T^2$
Gelo	k (W/m °C)	$k = 2,2196 - 6,2489 \cdot 10^{-3}T + 1,0154 \cdot 10^{-4}T^2$
	ρ (kg/m ³)	$\rho = 9,1689 \cdot 10^2 - 1,307110^{-1}T$
	c_p (kJ/kg °C)	$c_p = 2,0623 + 6,0769 \cdot 10^{-3}T$

Após o cálculo das propriedades de cada componente do alimento, a densidade pode ser calculada por meio da equação (2), segundo ASHRAE (2002).

$$\rho = \frac{(1 - \varepsilon)}{\sum x_i / \rho_i} \quad (2)$$

em que ε = porosidade, x_i = fração do componente e ρ_i = densidade do componente.

Para o cálculo do calor específico pode ser utilizada a equação (3) (ASHRAE, 2002).

$$c_p = \sum c_i x_i \quad (3)$$

em que c_i = calor específico do componente.

Para o cálculo da condutividade térmica podem ser utilizadas as equações (4) e (5) (ASHRAE, 2002).

$$k = \sum x_i^v k_i \quad (4)$$

$$x_i^v = \frac{x_i / \rho_i}{\sum x_i / \rho_i} \quad (5)$$

em que k_i = condutividade térmica de cada componente do alimento.

Grande parte dos estudos envolvendo o desenvolvimento de modelos matemáticos e medidas experimentais das propriedades térmicas de alimentos é

realizada utilizando-se sistemas modelos e os resultados são aplicados para alimentos de composição similar. Para simular ensaios com polpas de frutas, têm-se utilizado soluções de sacarose e diferentes tipos de géis, com suas concentrações ajustadas de acordo com o teor de sólidos solúveis da polpa (SILVA, 2007).

2.6 Transferência de calor

A transferência de calor é definida como a transmissão de energia devido a uma diferença de temperatura em um meio ou, ainda, entre meios diferentes (WELTY; WICKS; WILSON, 1984).

A transferência de calor na superfície de um produto pode ocorrer por uma combinação da condução, convecção, radiação e evaporação. Apesar disso, a maioria dos métodos usados para estimar as exigências de tempo de congelamento assume que a transferência de calor durante o congelamento ocorre principalmente devido à condução e à convecção.

A transferência de calor por condução consiste na troca de calor entre um fluido e a superfície de um sólido, quando estes estão em contato e se encontram em temperaturas diferentes, provocando, assim, um gradiente de temperatura no interior do sólido e induzindo à transferência de calor por condução (SILVA, 2007).

A transferência de calor por convecção é classificada em convecção natural e convecção forçada, de acordo com a natureza do escoamento do fluido. Define-se convecção natural quando o movimento do fluido ocorre como resultado somente das diferenças de massa específica causadas pelos gradientes de temperatura. Quando o escoamento do fluido é induzido por agentes externos, tal como uma bomba, o processo é denominado convecção forçada (SILVA, 2007).

O conhecimento dos coeficientes de transferência de calor e massa ar-produto faz-se absolutamente necessário para a construção de sistemas de congelamento ou para adaptar ou mudar condições de operação de sistemas já existentes. Os coeficientes são essenciais para estimar o tempo de processo, assim como a perda de massa provocada pela evaporação ou sublimação da água na superfície do alimento (TOCCI; MASCHERONI, 1995).

2.7 Coeficientes de transferência de calor

O coeficiente global de transferência de calor entre a superfície do produto e o meio de resfriamento é um importante parâmetro nos estudos do tempo de congelamento de alimentos. Em sistemas nos quais o meio de transferência é ar frio, como nos túneis de congelamento, um dos fatores que controlam a taxa de congelamento é o coeficiente de transferência de calor convectivo (RESENDE; SILVEIRA JÚNIOR; NEVES FILHO, 2003).

Em condições normais, os coeficientes de transferência de calor variam com a temperatura, com a umidade do ar e, principalmente, com a velocidade do ar (RESENDE, 2001).

Valores de coeficientes encontrados na literatura de engenharia química na forma de números adimensionais, tal como Nusselt, em função do número de Reynolds para placas, cilindro ou esfera, são raramente utilizados em modelos porque levam a valores calculados diferentes dos resultados experimentais. Por isso, um dos grandes desafios continua sendo a determinação do coeficiente convectivo de transferência de calor (h), o qual tem papel determinante nos processos que envolvem convecção. Uma das causas mais comuns de erro no cálculo da temperatura dos produtos é originada pelo valor adotado para este coeficiente, ou pelo valor obtido aplicando-se algum dos métodos matemáticos conhecidos (AMENDOLA; TERUEL, 2005).

Na maioria dos modelos descritos na literatura, o valor deste coeficiente é adotado seguindo-se algumas faixas recomendadas pela literatura, as quais nem sempre caracterizam, de forma adequada, o processo em particular (BENAVIDES; AVENDANO, 1997).

A determinação do coeficiente de transferência de calor, usando-se métodos experimentais, é muito complexa, devido à quantidade de fatores que o influenciam. Soma-se a isso o fato de que a determinação experimental da temperatura da superfície implica em um grau de incerteza grande, pela dificuldade para a colocação e a fixação do sensor na superfície do produto (AMENDOLA, 2003).

Teruel (2000) confirmou a existência de uma ampla faixa de valores para o coeficiente convectivo de transferência de calor, justificada pela complexidade da determinação deste coeficiente, que depende das características do escoamento do ar (velocidade e turbulência) e das características dos produtos estudados (geometria, dimensões e temperaturas superficiais).

Resende, Silveira Júnior e Neves Filho (2003) analisaram a existência de diferença significativa entre os coeficientes de transferência de calor efetivos para amostras colocadas em diferentes posições dentro das caixas e observaram que, em diferentes condições de processamento, não é possível obter uma transferência de calor uniforme em toda a superfície do produto e que o centro térmico é modificado, certamente não coincidindo com o centro geométrico das formas consideradas.

Dessa forma, Resende, Silveira Júnior e Neves Filho (2003) observaram que é necessário considerar a presença de canais preferenciais, zonas de baixas pressões e irregularidades que possam existir no produto ou em sua forma durante o processamento. Os mesmos autores verificaram experimentalmente que o comportamento da taxa de resfriamento em caixas colocadas em diferentes

posições varia muito e que a transferência de calor ocorre em todas as direções e não é uniforme em toda a superfície.

Diversos métodos de medição de coeficientes efetivos de convecção são descritos na literatura. Os mais comuns são os que envolvem medidas de temperatura no regime permanente (CLELAND, 1992).

2.7.1 Medidas de temperatura em regime permanente

Neste método, uma energia é gerada no sistema, como um aquecimento por uma resistência elétrica no centro do produto, por exemplo, e a temperatura deve ser mantida constante por meio da retirada desta energia na superfície de contorno.

O coeficiente de transferência de calor superficial pode ser calculado, conhecendo-se a área superficial do produto (A), a quantidade de energia adicionada (q) e a diferença entre as temperaturas do meio de resfriamento e do produto ($T_b - T_\infty$), como pode ser visto na equação (6).

$$q = hA(T_b - T_\infty) \quad (6)$$

Porém, de acordo Resende (2001), esse método tem algumas limitações, como:

- a) os parâmetros de temperatura e velocidade do meio de resfriamento devem ser mantidos constantes em condições experimentais, o que o torna mais complexo, limitando a utilização deste método;
- b) dificuldade em se medir a temperatura da superfície. Segundo Resende (2001), se o sensor é colocado sobre a superfície, a camada limite é perturbada e, então, torna-se difícil saber se esta realmente é

- a temperatura superficial, a temperatura na camada limite ou uma média destas que está sendo medida;
- c) outra dificuldade de se utilizar esse método para alimentos é que as propriedades físicas podem ser afetadas pela fonte de energia.

2.7.2 Medidas de temperatura em regime transiente

Esse método consiste na utilização de um corpo metálico ou de outro material de alta condutividade térmica, no intuito de minimizar o gradiente de temperatura formado durante a transferência de calor do meio de resfriamento para o produto ($Bi < 0,1$), permitindo uma temperatura praticamente uniforme a cada instante. Neste método, os ensaios de resfriamento ocorrem sem mudança de fase e as propriedades térmicas são admitidas constantes com a variação da temperatura.

De acordo com Brosnan e Sun (2001), aplicando-se um balanço de energia em um sistema de condução de calor transiente em que se possa desprezar a resistência interna, podem-se obter as equações para o cálculo do coeficiente de transferência de calor efetivo.

Pela Lei de Newton do resfriamento, a taxa de transferência de calor em um determinado volume de controle é dada por:

$$\frac{dq}{dt} = h_c A (T_b - T_\infty) \quad (7)$$

em que q é a quantidade de energia retirada (J) por tempo t (s); h_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m^2C); A é a área (m^2); T_b é o valor de temperatura do produto ($^{\circ}C$) e T_∞ é o valor da temperatura do meio de resfriamento ($^{\circ}C$).

A variação de energia em um corpo metálico com propriedades constantes é dada pela equação:

$$\frac{dq}{dt} = m_b c_b \frac{dT}{dt} \quad (8)$$

em que m_b é a massa do produto e c_b é o calor específico do produto.

Combinando-se as equações 7 e 8 tem-se

$$m_b c_b \frac{dT}{dt} = h_c A (T_b - T_\infty) \quad (9)$$

Integrando-se a equação (9), obtém-se a solução para a variação de temperatura em função do tempo.

$$m_b c_b \Delta T = h_c A (T_b - T_\infty) \Delta t \quad (10)$$

Rearranjando-se a equação (10), tem-se

$$h_c = \frac{m_b c_b \Delta T}{A (T_b - T_\infty) \Delta t} \quad (11)$$

Cleland, Cleland e Jones (1994) apontam este método como o mais comum para medir o coeficiente de transferência de calor, porém, segundo os mesmos autores, existem três dificuldades em se utilizar este método. Primeiramente, ele fornece um coeficiente de transferência de calor superficial médio ao longo de toda a superfície exposta. Se particularmente ocorrem taxas

de transferência de calor nas bordas de um bloco retangular, por exemplo, estas influenciarão h significativamente. Assim, existe um erro inerente e desconhecido.

A segunda dificuldade é que os coeficientes de transferência de calor podem ser dependentes do tamanho e da forma da amostra, da rugosidade da superfície e em experimentos com ar podem levar em conta efeito da radiação e/ou evaporação.

A terceira dificuldade é a necessidade de amenizar os efeitos da transferência de calor nas bordas, no caso de formas envolvendo a transferência de calor uni ou bidimensional.

Este método descrito foi utilizado por diversos autores, como Cowell e Namour (1967). Lind (1988) e Lind e Skjoldebrand (1984) usaram alumínio para avaliar os coeficientes de transferência de calor superficiais durante o descongelamento; Khairullah e Singh (1991) utilizaram um corpo de prova de cobre com esta finalidade; Reinick e Schwartzberg (1985) utilizaram o método para medir o valor de h para blocos simples e arranjos de blocos submetidos a aquecimento e resfriamento transiente; Bonacina e Comini (1972) utilizaram um corpo de prova metálico para validar esse método de análise para obtenção de h a partir de curvas tempo-temperatura e Le Blanc, Kok e Timbers (1990), Resende, Neves Filho e Silveira Júnior (2002) e Wang e Kolbe (1994) também relataram experimentos, nos quais utilizaram o método descrito para a obtenção de h_c a partir de curvas de temperatura em função do tempo de resfriamento de produtos.

Segundo Resende, Neves Filho e Silveira Júnior (2002), algumas precauções devem ser tomadas durante a utilização deste método. Se um corpo de prova é constituído de um bloco metálico, podem existir taxas de transferência de calor pelas bordas do material, influenciando significativamente nos valores de h_c determinados. Além disso, existe o fato de os coeficientes de

transferência de calor serem dependentes do tamanho e forma da amostra, sendo que em experimentos com ar pode ocorrer o efeito da radiação e/ou evaporação. Assim, deve-se atentar para o correto posicionamento do corpo de prova a fim de evitar que haja condensação de água durante os ensaios e isolar as bordas do corpo ou outras partes que possam interferir nos valores de temperatura durante o processo.

2.8 Efeito da embalagem do produto sobre o coeficiente de transferência de calor

A embalagem dos alimentos durante o processo de congelamento faz-se necessária para evitar a desidratação pelo frio, com conseqüentes alterações na cor, na textura, no sabor e no valor nutricional do produto (SILVA, 2000).

As embalagens, além de evitar alteração das características sensoriais do produto, devem satisfazer às necessidades de *marketing*, custo e disponibilidade, entre outras. Além desses requisitos, a boa hermeticidade do sistema de fechamento assegura a manutenção das características do material de embalagem e evita a recontaminação microbiológica do produto (BUREAU; MULTON, 1998).

No entanto, as embalagens afetam os coeficientes de transferência de calor de alimentos de várias maneiras. Ela isola o alimento, apresentando uma barreira para a transferência de energia dos alimentos, diminuindo, assim, o coeficiente de transferência de calor. A embalagem também pode criar vazios cheios de ar em torno do alimento, isolando-o ainda mais e reduzindo o coeficiente de transferência de calor.

Um ponto importante para um bom desempenho de um sistema de resfriamento por ar forçado é que a embalagem ou o palete devem possuir aberturas para permitir a passagem do ar através do produto embalado, de forma

a promover uma rápida e uniforme transferência de calor entre o meio de resfriamento e o produto no interior da embalagem (BARBIN, 2007).

Teruel (2000) mostrou a importância de um correto dimensionamento do sistema, comprovando que quanto maior a área de abertura para circulação menor a exigência dos sistemas de refrigeração e circulação de ar e mais uniforme a taxa de resfriamento.

Meana et al. (2005) mostraram que os espaços vazios entre as embalagens plásticas que são utilizadas no resfriamento de morangos por ar forçado influenciam significativamente o tempo de resfriamento dos produtos. Estes autores conseguiram uma redução de 82 minutos para 65 minutos no tempo de resfriamento, quando preencheram os espaços entre as embalagens com isolantes.

De acordo com Castro, Vigneault e Cortez (2003), o custo do processo de resfriamento aumenta significativamente quando utilizadas caixas com áreas de abertura inferiores a 14%. Estes autores sugerem, como mínimo, uma abertura para ventilação de 7% da embalagem, para que se tenha um processo de resfriamento rápido e uniforme.

Santos (2005) mostrou que o congelamento de carnes em caixas de papelão é um processo demorado e o tempo de residência dos produtos nos túneis com insuflação de ar pode ser insuficiente para o congelamento das mesmas. Com a substituição de caixas de papelão por caixas de metal do tipo telada, houve uma redução de até 45% no tempo de congelamento para o produto.

No entanto, uma área de abertura muito grande ou mal dimensionada pode afetar significativamente a resistência das caixas utilizadas para o armazenamento de produtos nas câmaras frigoríficas. Na prática deve-se buscar uma otimização da área de abertura das caixas, de forma a permitir um baixo

tempo de congelamento e, conseqüentemente, um menor custo sem, no entanto, afetar a resistência das embalagens.

2.9 Túneis com ar forçado

O ar é escolhido como meio de resfriamento em muitas situações, por exemplo, nos túneis de congelamento com corrente forçada. As duas principais considerações para a utilização do ar em sistemas de refrigeração são o consumo de energia para movê-lo e passá-lo pelo produto e a distribuição espacial da velocidade do ar ao redor do produto (EARLE, 1985).

O fluxo de ar está relacionado à velocidade do ar que passa através dos produtos e é um importante parâmetro, pois sua variação significará um maior ou menor tempo de congelamento, influenciando diretamente a eficiência do sistema. Uma correta orientação do fluxo de ar dentro do equipamento e ao redor do produto pode reduzir consideravelmente os tempos de processo, representando um menor gasto energético e um processo mais eficaz (BARBIN, 2007).

Em túneis de congelamento, o escoamento do ar ocorre em regime turbulento e a transferência de calor em regime transiente. Devido à forte variabilidade da velocidade do ar no espaço e no tempo, a sua medida é tida como um grande problema, produzindo resultados não muito confiáveis e indispensáveis na determinação da vazão e cálculos de transferência de calor. Dessa forma, o controle do fluxo de ar é um ponto crítico em grandes plantas industriais, já que determina a eficiência e a homogeneidade dos tratamentos aos quais os produtos devem ser submetidos. Sendo assim, é importante, então, analisar a distribuição do ar em relação à geometria da câmara e à uniformidade da trajetória do escoamento (RESENDE; NEVES FILHO; SILVEIRA JÚNIOR, 2002).

Mirade e Daudin (1998) relataram dificuldades relacionadas às medidas da velocidade do ar nas plantas industriais, como a instabilidade do escoamento, a influência da presença de objetos na direção do escoamento do ar e a influência da temperatura utilizada pelo fabricante para calibrar o aparelho (anemômetro), que, frequentemente, está em torno de 20 °C, muito diferente da praticada nos túneis.

Buscando eliminar essas dificuldades e as fontes de erros inerentes ao escoamento, Resende, Neves Filho e Silveira Júnior (2002) desenvolveram uma metodologia para medir a velocidade do ar e analisar o seu perfil em câmaras de congelamento carregadas com caixas contendo polpas de frutas. Analisaram também a influência da quantidade de produto no interior das caixas sobre a resistência ao fluxo de ar. Para isso, mediram as velocidades do ar em um número de pontos relativamente grande ao longo da seção do escoamento, com a finalidade de se ter uma representação consistente do perfil de velocidade. Como resultados, obtiveram medidas muito heterogêneas, às quais atribuíram à presença de obstáculos. Na tentativa de amenizar estas dificuldades, os resultados experimentais foram ajustados por meio de regressão não linear, utilizando-se um software. Essa técnica promoveu uma varredura dos valores pontuais das medidas da velocidade do ar por toda a seção de escoamento, levando-se em conta a presença de fluxos localizados, permitindo, assim, uma estimativa da vazão por meio de um tratamento matemático. Isso possibilitou a detecção e a visualização de distúrbios, fenômenos e problemas inerentes ao escoamento, por meio de métodos estatísticos simples.

Em outro estudo, Resende, Neves Filho e Silveira Júnior (2002) desenvolveram um método de predição dos tempos de congelamento de formas regulares, levando-se em conta a presença de caminhos preferenciais do ar, vácuo e irregularidades que possam existir no produto ou em sua forma, durante o seu processamento. Verificaram, com os resultados obtidos

experimentalmente, que os perfis de velocidade em túneis de congelamento por ar forçado são fortemente influenciados por quaisquer alterações na quantidade de produto e na sua distribuição no interior do equipamento. Com isso, mostraram que a negligência da existência de canais preferenciais do ar pode levar a erros comuns na estimação de tempos de congelamento e coeficientes de transferência de calor nestes equipamentos. Dessa forma, constataram também que a transferência de calor ocorre em todas as direções e não é uniforme em toda a superfície.

2.10 Instrumentos e métodos de medição de velocidade e vazão do ar de escoamento

Existem diversas técnicas de medida de velocidade do ar citados em literatura, cada uma delas com princípios físicos diferentes, sendo que a precisão dos sensores utilizados em cada uma destas técnicas varia significativamente, tornando-as adequadas a aplicações particulares.

De acordo com Nunes et al. (2003) e Resende e Silveira Júnior (2002), o termoanemômetro é um dos aparelhos mais utilizados, por ser um dos mais sensíveis à direção do escoamento e, portanto, de uso mais conveniente. Devido à sua reduzida dimensão e ao curto tempo de resposta, os anemômetros de fio quente são especialmente adequados ao estudo detalhado de escoamento de fluidos, sendo comumente utilizados na medição do escoamento de ar em sistemas de ventilação e ar condicionado.

Os termoanemômetros medem as velocidades instantâneas de um fluido por meio da detecção das trocas de calor a partir de um pequeno sensor eletricamente aquecido, exposto ao escoamento.

Métodos alternativos e práticos de medição de vazão utilizam estes anemômetros com esse fim. Nunes et al. (2003) e Resende e Silveira Júnior

(2002) sugerem que o local onde se deseja medir a vazão seja dividido em seções e obtida a velocidade média para cada uma dessas áreas, pois quanto maior o número de medidas da velocidade mais preciso será o resultado da vazão.

REFERÊNCIAS

- AMARO, A. P.; BONILHA, P. R. M.; MONTEIRO, M. Efeito do tratamento térmico nas características físico-químicas e microbiológicas da polpa de maracujá. **Alimentos e Nutrição**, São Paulo, v. 13, n. 1, p. 151-162, 2002.
- AMENDOLA, M. Analysis of the parameters associated to the numerical simulation of the heat transfer process in agricultural products. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON INFORMATION TECHNOLOGIES AND COMPUTING TECHNIQUES FOR AGRO-FOOD, 10., 2003, Barcelona. **Proceedings...** Barcelona: Universidad del Barcelona, 2003. 1 CD-ROM.
- AMENDOLA, M.; TERUEL, B. Uso de um esquema implícito e de splines para a simulação numérica do processo de resfriamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 1, p. 78-82, 2005.
- AMER, M. I.; RUBIOLO, A. C. Influencia del proceso de congelación en la variación de la vitamina C durante el almacenamiento de frutillas congeladas. In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE INGENIERIA DE ALIMENTOS, 4., 1998, Bahía Blanca. **Anales...** Bahía Blanca: Palpiquei, 1998. 1 CD-ROM.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Food storage and equipment, food refrigeration: refrigeration handbook**. Atlanta, 1998. 32 p.
- _____. **Thermal properties of foods: refrigeration handbook**. Atlanta, 2002. 30 p.
- BARBIN, D. F. **Avaliação do processo de congelamento em túnel “portátil” com convecção forçada por exaustão e insuflação em paletes**. 2007. 158 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.
- BECKER, B. R.; FRICKE, B. A. Freezing times of regularly shaped food items. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Oxford, v. 26, n. 5, p. 617-626, Sept. 1999.

BENAVIDES, M. N.; AVENDAÑO, G. O. Curvas de congelación y descongelación de fresas y frambuesas calculadas con el método de diferencias finitas. In: CONGRESO IBEROAMERICANO DE AIRE ACONDICIONADO Y REFRIGERACIÓN, 1., 1997, Barcelona. **Anales...** Barcelona: ASHRACE, 1997. v. 1, p. 154-159.

BONACINA, C.; COMINI, G. Calculation of a convective heat transfer coefficients for time-temperature curves. In: COGRES DE INSTITUT INTERNATIONAL DU FROID, 1., 1972, Paris. **Anales...** Paris: Annexe, 1972. p. 157-167.

BRASIL. Instrução normativa Nº 1, de 7 de janeiro de 2000. Regulamento técnico geral para fixação dos padrões de identidade e qualidade para polpa de fruta. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, n. 6, 10 jan. 2000. Seção I, p. 54-58.

BROSNAN, T.; SUN, D. W. Precooling techniques and applications for horticultural products: a review. **International Journal of Refrigeration**, Surrey, v. 24, n. 2, p. 154-170, Mar. 2001.

BUREAU, G.; MULTON, J. L. **Embalage de los alimentos de gran consumo**. Zaragoza: Acríbia, 1998. 748 p.

CAMPAÑONE, L. A.; SALVADORI, V. O.; MASCHERONI, R. H. Weight loss during freezing and storage of unpackaged foods. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 47, n. 2, p. 69-79, Feb. 2001.

CASTRO, L. R.; VIGNEAULT, C.; CORTEZ, L. A. B. Container opening design for horticultural produce cooling efficiency. **Journal of Food, Agriculture and Environment**, Helsinki, v. 2, n. 1, p. 135-140, Mar. 2003.

CIABOTTI, E. D. **Alterações das propriedades físico-químicas do suco de maracujá para diferentes técnicas de congelamento inicial ao longo do período da armazenagem frigorificada**. 2000. 107 p. Dissertação (Mestrado em Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2000.

CLELAND, A. C. **Food refrigeration process: analysis, design and simulation**. London: Elsevier Applied Science, 1992. 284 p.

CLELAND, D. J.; CLELAND, A. C.; JONES, R. S. Collection of accurate experimental data testing the performance of simple methods for food freezing time prediction. **Journal of Food Process Engineering**, Westport, v. 17, n. 1, p. 93-119, Jan. 1994.

COLLA, L. M.; HERNÁNDEZ, C. P. Congelamento e descongelamento: sua influência sobre os alimentos. **Vetor**, Rio Grande, v. 13, p. 53-66, 2003.

CORRÊA NETO, R. S.; FARIA, J. A. F. Fatores que influenciam na qualidade do suco de laranja. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 19, n. 1, p. 153-160, jan./abr. 1999.

COWELL, N. D.; NAMOR, M. S. S. Heat transfer coefficients in plate freezing: the effect of packaging materials. **Bulletin de Institut International du Froid**, Paris, v. 3, p. 45-50, 1974.

EARLE, R. L. Freezing of foods: an overview food engineering and process applications. **Food Engineering and Process Applications**, Alberta, v. 2, n. 1, p. 3-20, 1985.

FELLOWS, P. **Food processing technology**. Boca Raton: CRC, 1987. 491 p.

FENNEMA, O.; POWRIE, W.; MARTH, E. **Low-temperature preservation of foods and living matter**. New York: M. Decker, 1973. 598 p.

GEIGES, O. Microbial processes in frozen foods. **Advances in Space Research**, Oxford, v. 18, n. 12, p. 109-118, Dec. 1996.

HELDMAN, D. R. Food freezing. In: HELDMAN, D. R.; LUND, D. B. (Ed.). **Handbook of food engineering**. New York: Dekker, 1992. p. 277-315.

HOSSAIN, M. M.; CLELAND, D. J.; CLELAND, A. C. Prediction of freezing and thawing times for foods of two-dimensional irregular shape by using a semi-analytical geometric factor. **International Journal of Refrigeration**, Surrey, v. 15, n. 4, p. 235-240, Aug. 1992.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Culturas temporárias e permanentes**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pam/2010/PAM2010_Publicacao_completa.pdf>. Acesso em: 2 nov. 2011.

JACKIX, M. H. **Doces, geléias e frutas em calda**. Campinas: UNICAMP, 1988. 172 p.

JUL, M. **The quality of frozen foods**. London: Academic, 1984. 317 p.

KHAIRULLAH, A.; SINGH, R. P. Optimization of fixed and fluidized bed freezing process. **International Journal of Refrigeration**, Surrey, v. 14, n. 2, p. 176-181, 1991.

LE BLANC, D. I.; KOK, R.; TIMBERS, G. E. Freezing of a parallelepiped food product: part 1, experimental determination. **International Journal of Refrigeration**, Surrey, v. 13, n. 16, p. 371-378, Nov. 1990.

LIND, I. Surface heat transfer in thawing by forced air convection. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 7, n. 1, p. 19-39, Mar. 1988.

LIND, I.; SKJOLDEBRAND, C. Surface heat and mass transfer during thawing. In: MAKENNA, B. M. (Ed.). **Engineering in Food**. New York: Elsevier Applied Science, 1984. v. 1, p. 165-175.

MARTIN, R. E. et al. **Chemistry and biochemistry of marine food products**. Westport: AVI, 1982. 365 p.

MEANA, M. B. et al. Forced-air cooling of strawberries in reusable plastic containers. **Proceedings of Florida State Horticultural Society**, Tallahassee, v. 118, p. 379-382, 2005.

MELETTI, L.; MOLINA, M. **Maracujá: produção e comercialização**. Campinas: UNICAMP, 1999. 64 p.

MIRADE, P. S.; DAUDIN, J. D. A new experimental methods for visualizing air flow in large food plants. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 36, n. 1, p. 31-49, Feb. 1998.

NUNES, M. et al. Estudo sobre técnicas de medição de vazão em bocas de insuflamento e de exaustão de ar. In: METROLOGIA PARA A VIDA, 1., 2003, Recife. **Anais...** Recife: SBM, 2003. 1 CD-ROM.

PARDI, M. C. et al. Ciência e higiene da carne: tecnologia da sua obtenção e transformação. In: _____. **Ciência, higiene e tecnologia da carne**. 2. ed. Goiânia: UFG, 2001. v. 1, p. 560-571.

- PIZA JÚNIOR, C. de T. **A cultura do maracujá**. Campinas: Secretaria de Agricultura e Abastecimento, 1991. 71 p.
- RAMAKRISHNAN, S.; WYSK, R. A.; PRABHU, V. V. Prediction of process parameters for intelligent control of tunnel freezers using simulation. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 65, n. 1, p. 23-31, Jan. 2004.
- REINICK, A. R.; SCHWARTZBERG, H. G. Coefficients for air-to-solid heat transfer for uniformly spaced array of rectangular foods. **Food Engineering and Process Applications**, Alberta, v. 1, p. 273-283, 1985.
- RESENDE, J. V. de. **Análise do processo de transferência de calor para o congelamento de polpas de frutas em caixas comerciais**. 2001. 350 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.
- RESENDE, J. V. de; NEVES FILHO, L. C.; SILVEIRA JÚNIOR, V. Coeficientes de transferência de calor efetivos no congelamento com ar forçado de modelos de polpas de frutas em caixas comerciais. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 5, n. 1, p. 33-42, Feb. 2002.
- RESENDE, J. V. de; SILVEIRA JÚNIOR, V. Escoamento de ar através de embalagens de polpa de frutas em caixas comerciais: efeitos sobre os perfis de velocidade em túneis de congelamento. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 22, n. 2, p. 184-191, 2002.
- RESENDE, J. V. de; SILVEIRA JÚNIOR, V.; NEVES FILHO, L. C. Experimental measures of the effective heat transfer coefficients in air blast freezers for the processing of fruit pulps. **Engenharia Térmica**, Curitiba, v. 3, n. 1, p. 11-18, 2003.
- ROÇA, R. O. **Tecnologia da carne e produtos derivados**. Botucatu: UNESP, 1999. 201 p.
- SALVADORI, V. O. et al. Storage of frozen foods: effect of operation conditions of the cold store on food quality and energy costs. **Science et Technique du Froid**, Paris, v. 16, n. 5, p. 189-196, 1998.
- SANTOS, C. A. **Estudo da transferência de calor durante o congelamento de cortes de aves em caixas de papelão ondulado**. 2005. 114 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

SCOTT, E. P.; BECK, J. V.; HELDMAN, D. R. Estimation of time variable heat transfer coefficients in frozen foods during storage. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 15, n. 1, p. 99-121, 1992.

SILVA, J. A. **Tópicos da tecnologia de alimentos**. São Paulo: Varela, 2000. 159 p.

SILVA, R. R. **Estudo da transferência de calor em tanque submerso: influências do modo e da intensidade da agitação da água**. 2007. 114 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

SOUZA, J. S. et al. **Maracujá: pós-colheita**. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2002. 51 p. (Frutas do Brasil, 23).

TERUEL, M. B. **Estudo teórico-experimental do resfriamento de laranja e banana com ar forçado**. 2000. 300 p. Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

TOCCI, A. M.; MASCHERONI, R. H. Heat and mass transfer coefficients during the refrigeration, freezing and storage of meats, meat products and analogues. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 26, n. 1, p. 147-160, Apr. 1995.

WANG, D.; KOLBE, E. Analysis of food block freezing using a pc-based finite element package. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 21, n. 4, p. 521-530, Feb. 1994.

WEINLING, H. **Tecnología práctica de la carne**. Zaragoza: Acribia, 1984. 253 p.

WELTY, J. R.; WICKS, C. E.; WILSON, R. E. **Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer**. 3th ed. New York: J. Wiley, 1984. 335 p.

WELTY-CHANES, J.; VERGARA-BALDERAS, F.; BERMUDEZ-AGUIRRE, D. Transport phenomena in food engineering: basic concepts and advances. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 67, n. 1/2, p. 113-128, Mar. 2005.

CAPITULO 2

ANÁLISE DA TRANFERÊNCIA DE CALOR DURANTE O CONGELAMENTO DE POLPAS DE MARACUJÁ ACONDICIONADAS EM CAIXAS EMPILHADAS SEM E COM A INDUÇÃO DO FLUXO DE AR

RESUMO

Este trabalho foi realizado com o objetivo de caracterizar o processo de transferência de calor pela determinação dos coeficientes convectivos de transferência de calor de polpas de maracujá acondicionadas em caixas de polietileno de alta densidade (PEAD) e submetidas ao congelamento em duas situações: sem e com a indução do fluxo de ar. Para determinar os coeficientes convectivos de transferência de calor, intercalaram-se polpas de maracujá acondicionadas em caixas de PEAD com bandejas metálicas com a mesma geometria e dimensão das caixas, contendo soluções de baixo ponto de congelamento. Foram utilizados três tipos de soluções: etileno glicol, propileno glicol e etanol. A indução do fluxo de ar sobre o empilhamento de polpas de maracujá proporcionou valores mais elevados de h para a situação em que houve a indução do fluxo de ar. Isto comprova que o direcionamento do fluxo de ar sobre o empilhamento do produto a ser resfriado promove uma troca de calor mais uniforme e eficiente. Além disso, o tempo de congelamento e o consumo de energia foram reduzidos em 20% quando o fluxo de ar foi induzido, o que se torna interessante e viável para pequenos produtores e pequenas agroindústrias que almejam uma redução do tempo de processamento, do consumo de energia e, conseqüentemente, do custo global do produto final.

Palavras-chave: Coeficientes convectivos de transferência de calor. Polpa de maracujá. Congelamento. Indução do fluxo de ar.

ABSTRACT

This work was developed with the aim to characterize the process of heat transfer by determination of convective coefficient of heat transfer of passion fruit pulps kept in boxes of high density polyethylene (HDPE) and submitted to freezing in two situations: with and without induction of air flow. In order to determine convective coefficient of heat transfer, pulps of passion fruit kept in boxes of HDPE with metallic trays with the same geometry and dimension of boxes containing solutions of low freezing point were interspersed. Three types of solutions were used: glycol ethylene, glycol propylene and ethanol. The induction of air flow on stacking of passion fruit pulps provided higher h values when the air flow was induced. This proves that direct the air flow on the stacking of the product to be frozen provides a more uniform and efficient heat exchange. Besides, the freezing time and energy consumption was reduced by 20% when the air flow was induced, what it is interesting and useful for small farmers and small agro-industries that aim to reduce processing time, energy consumption and consequently, the global cost of final product.

Keywords: Convective coefficients of heat transfer. Passion fruit pulp. Freezing. Induction of air flow.

1 INTRODUÇÃO

Os processos de resfriamento e congelamento dos alimentos reduzem efetivamente reações químicas e biológicas desencadeadas pela atividade de microrganismos e enzimas, além de a cristalização da água livre nos alimentos reduzir a atividade de água, retardando assim o processo de deterioração do alimento (AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE, 2002; DELGADO; SUN, 2001; HELDMAN, 1992; SALVADORI; MASCHERONI, 1996; WELTI-CHANES; VERGARA-BALDERAS; BERMUDEZ-AGUIRRE, 2005).

No sistema de resfriamento por ar forçado, é utilizado ar à baixa temperatura como meio de resfriamento, baseado no princípio de convecção. O ar é forçado a passar pelo produto, geralmente embalado em caixas, de forma a reduzir o tempo de congelamento (THOMPSON, 2004).

O tempo de resfriamento em sistemas de refrigeração por ar forçado é determinado pela temperatura do meio, pelo fluxo de ar e pela disposição e geometria do produto.

Resende e Silveira Júnior (2002) mostraram que os perfis de velocidade em túneis de congelamento por ar forçado são fortemente influenciados por quaisquer alterações na quantidade de produto e na sua distribuição no interior do equipamento, fazendo com que o escoamento ocorra, geralmente, através de caminhos preferenciais, podendo levar a erros comuns na determinação de tempos de congelamento e coeficientes de transferência de calor nestes equipamentos. Foi mostrado, ainda, que a transferência de calor pode ser constante através da superfície do produto, porém, podem existir variações nos coeficientes de transferência de calor de acordo com as diferentes posições do produto e com sua distribuição dentro do túnel de congelamento.

Dentre os fatores que influenciam a taxa de resfriamento por ar forçado, além da diferença de temperatura, estão a área de superfície de contato do meio de resfriamento com o produto, a velocidade do ar de resfriamento e a orientação da configuração, e o empilhamento do produto a ser resfriado (BAIRD; GAFFNEY; TALBOT, 1988; FRASER, 1998; LAGUERRE; BEN-AMARA; FLICK, 2006).

Promover a indução do fluxo de ar sob o empilhamento de produto a ser resfriado é de interesse prático, pois, dessa forma, pode-se evitar que o ar passe por caminhos preferenciais, promovendo, assim, uma troca de calor mais uniforme e eficiente. Esta forma de operação altera um dos pontos críticos do processo, que é o controle do fluxo do ar, já que este determina a eficiência e homogeneidade dos tratamentos aos quais os produtos são submetidos.

Este trabalho foi realizado com os objetivos de caracterizar o processo de transferência de calor, pela determinação dos coeficientes convectivos de transferência de calor de polpas de maracujá acondicionadas em caixas de polietileno de alta densidade (PEAD) e submetidas ao processo de congelamento sem e com a indução do fluxo de ar; validar as medidas dos coeficientes de transferência de calor através das estimativas dos tempos de congelamento e avaliar os efeitos das alterações nas configurações sobre os tempos de congelamento e consumo energético.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Material

Foi utilizada polpa de fruta, proveniente da extração do maracujá amarelo (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa* Deg.), cujos frutos foram adquiridos diretamente de produtores agrícolas da região de Lavras, MG e produzidos, por cultivo convencional, na safra 2009/2010.

2.2 Obtenção da polpa de maracujá

Para a obtenção da polpa foram utilizados frutos com estágio de maturação uniforme, ou seja, todos os frutos apresentavam casca de coloração amarela. O processamento da polpa foi realizado na Planta Piloto de Processamento de Produtos Vegetais, no Departamento de Ciência dos Alimentos da Universidade Federal de Lavras.

Com o objetivo de sanitizar os frutos, os maracujás foram lavados em água corrente para a remoção de sujidades e imersos em solução de hipoclorito de sódio 200 mg.L⁻¹, por 15 minutos. Após a sanitização, foram selecionados e descartados os frutos impróprios para a utilização. Os maracujás foram cortados, a polpa com semente extraída e sua casca descartada. A polpa foi separada da semente utilizando-se uma despolpadeira elétrica (Macanuda[®], Joinville, Santa Catarina). Após a obtenção da polpa, 0,5 g/100 g de sorbato de potássio foram adicionados com o objetivo de inibir o crescimento de microrganismos. A polpa (15 kg) foi, inicialmente, acondicionada em baldes de polietileno de alta densidade (PEAD) com capacidade de 20 L, congeladas em túnel de congelamento com ar forçado e armazenadas, a -18 °C, até a montagem do experimento.

Na Figura 1 mostra-se o fluxograma de obtenção da polpa de maracujá.

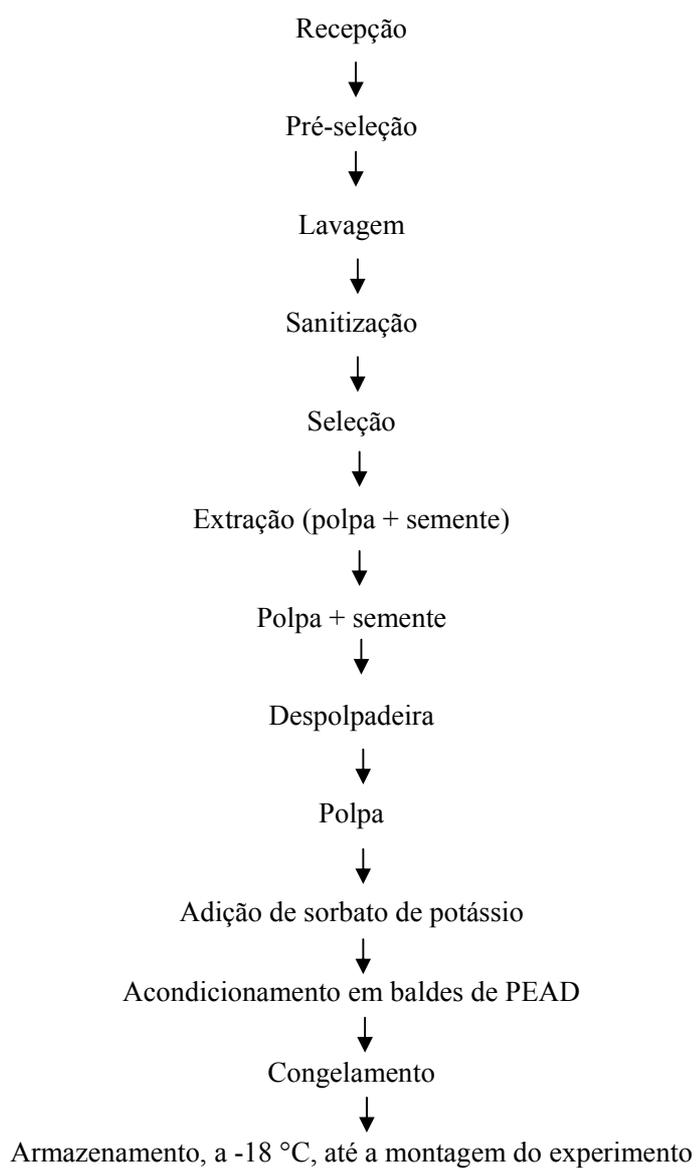


Figura 1 Fluxograma de obtenção da polpa de maracujá

2.3 Propriedades termofísicas da polpa de maracujá

A temperatura de início de congelamento ($T_{ic} = -2,2 \text{ °C}$) da polpa de maracujá foi medida experimentalmente por Pereira et al. (2012). As condutividades térmicas das polpas foram obtidas em função da temperatura de congelamento, usando a Equação (12), desenvolvida ajustando-se dados experimentais ao seguinte modelo matemático.

$$k_{\text{passion}} = 2,3831 - 1,8371 e^{\frac{T}{16,5535}} \quad (12)$$

As densidades foram calculadas utilizando-se as equações das Tabelas 1 e 2 (ASHRAE, 2002) e os dados de composição da polpa de maracujá necessários para os cálculos estão mostrados na Tabela 3 (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - UNICAMP, 2006).

Tabela 3 Dados de composição da polpa de maracujá (UNICAMP, 2006)

Componente (g/100 g de polpa)	Polpa de maracujá
Carboidratos	12,3*
Proteínas	2,0
Gorduras	2,1
Fibras	1,1
Cinzas	0,8
Umidade	82,9

* Nos valores de carboidratos estão incluídas as fibras totais

2.4 Congelamento da polpa

2.4.1 Preparo das caixas contendo polpa de maracujá

A polpa congelada foi descongelada e mantida em ambiente com temperatura controlada de 20 °C, por 48 horas, para atingir a homogeneidade térmica das amostras. Após a uniformização da temperatura, 15 kg da polpa de maracujá foram pesados, acondicionados em sacos de polietileno e distribuídos em 26 caixas de polietileno de alta densidade (PEAD).

As caixas de PEAD tinham dimensões de 0,60 m (comprimento) x 0,40 m (largura) x 0,17 m (altura), com 12,40% de aberturas nas dimensões largura x comprimento, 26,55% nas dimensões largura x altura e 29,13% nas dimensões largura x comprimento (fundo) para permitirem a passagem de ar e o contato com o produto. As dimensões dos sacos contendo a polpa de fruta no interior de cada caixa foram de 0,53 m (comprimento) x 0,36 m (largura) x 0,172 m (altura).

2.4.2 Preparo dos tanques contendo soluções anticongelantes usados como corpos de provas

Para a medida experimental do coeficiente efetivo de transferência de calor local (h_{eff}) corpos de provas que consistem em tanques de aço galvanizados completamente preenchidos com soluções anticongelantes foram propostos segundo metodologia descrita por Santos (2005). Portanto, tanques de aço galvanizado com a mesma geometria e dimensões das caixas de PEAD usadas para acondicionar a polpa de maracujá durante o congelamento foram confeccionados para esta finalidade. O aço foi o material escolhido por ter elevada condutividade térmica ($k \sim 43 \text{ W/m.K}$, a 27 °C) e por ser de fácil obtenção e manuseio. Por ser galvanizado, existe a presença de uma fina película

de zinco, cujo $k = 116 \text{ W/m.K}$ a 27 °C (INCROPERA; DEWITT, 2003). Apesar de existirem materiais de condutividade térmica maior, optou-se pela utilização do aço galvanizado, devido a questões econômicas. Ainda segundo Incropera e Dewitt (2003), o calor específico do aço ($c_{p\text{aq}}$) é de, aproximadamente, $0,444 \text{ kJ/kg.K}$.

Foram confeccionados nove tanques com espessura da placa de aço de 2.10^{-3} m e volume interno de aproximadamente 15 litros (15.10^{-3} m^3). Para a realização dos experimentos, os nove tanques foram pesados e identificados. A massa de cada tanque é dada na Tabela 4. Estes tanques foram completamente preenchidos com soluções anticongelantes e novamente pesados para o cálculo da massa das soluções. Foram usadas três soluções (etileno glicol, propileno glicol e etanol). Os calores específicos para estas soluções nestas concentrações (Tabela 4) podem ser obtidos em função da temperatura de resfriamento utilizando-se as seguintes equações ajustadas considerando os dados obtidos para as concentrações mostradas na Tabela 4.

$$Cp_{\text{etileno glicol}} = 0,0034T + 3,401 \quad (13)$$

$$Cp_{\text{propileno glicol}} = 0,0028T + 3,7505 \quad (14)$$

$$Cp_{\text{etanol}} = 0,0049T + 4,1658 \quad (15)$$

Tabela 4 Características dos tanques utilizados no experimento

N ^o do tanque	Solução	Massa do tanque vazio (kg)	Massa do tanque com a solução (kg)
1	Etileno glicol (40%)	3,285	18,720
2	Etileno glicol (40%)	3,290	18,735
3	Etileno glicol (40%)	3,310	18,855
4	Etanol (30%)	3,320	18,540
5	Etanol (30%)	3,280	18,465
6	Etanol (30%)	3,310	18,400
7	Propileno glicol (33,33%)	3,295	18,410
8	Propileno glicol (33,33%)	3,290	18,435
9	Propileno glicol (33,33%)	3,290	18,450

2.4.3 Montagem das configurações

As caixas de PEAD contendo a polpa foram empilhadas intercaladas com as caixas de aço galvanizado contendo as soluções anticongelantes (etileno glicol, propileno glicol e etanol) dentro do túnel de congelamento. O empilhamento das caixas (PEAD e aço galvanizado) foi feito no centro do túnel, mantendo-se todos os espaços laterais iguais (entre a pilha e as paredes do túnel) frente e fundo para todas as configurações.

Foram testadas duas configurações: sem e com a indução do fluxo de ar. Em ambas as configurações, o empilhamento consistia em 5 colunas contendo 7 caixas em cada coluna. Estas configurações mostrando a posição das caixas e de cada um dos tanques metálicos no empilhamento sobre paletes estão mostradas na Figura 2. Na Figura 2A é mostrada a configuração sem indução e, na Figura 2B, com indução do fluxo de ar.

Para a montagem da configuração com indução do fluxo de ar (Figura 2B), painéis de poliestireno expandido de 0,20 m de espessura foram utilizados como barreira ao escoamento do ar, eliminando canais preferenciais e forçando o ar a passar pelo produto antes de retornar ao evaporador. Na Figura 2 também é

mostrado o posicionamento dos tanques metálicos numerados como descrito na Tabela 4.

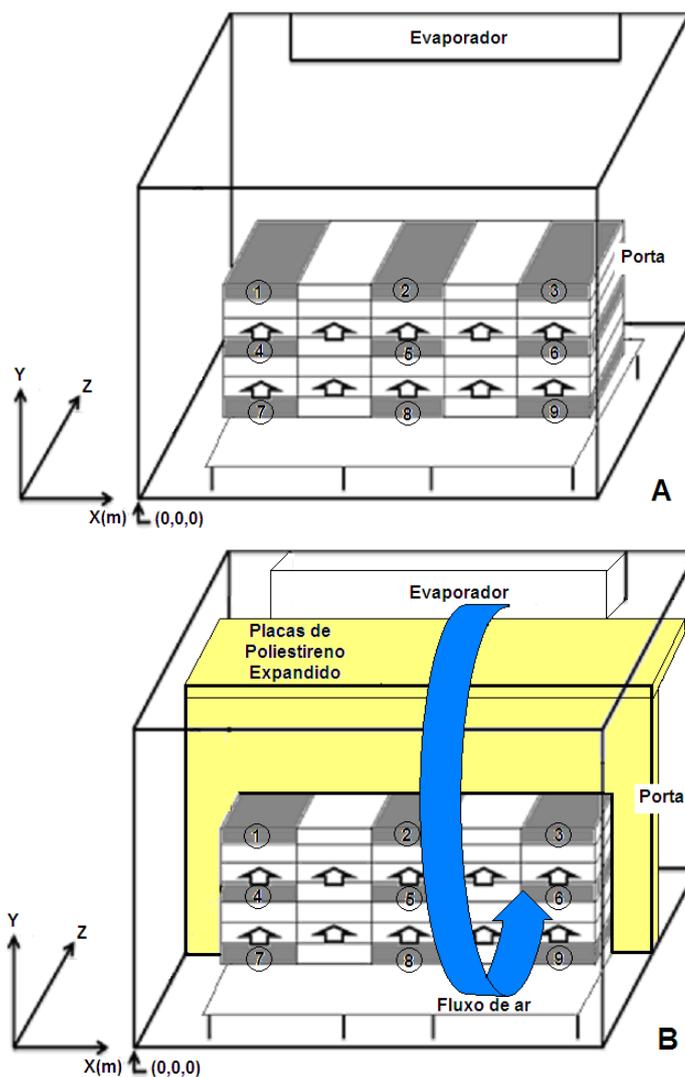


Figura 2 Configurações de empilhamento das caixas (A) sem indução do fluxo de ar; (B) com indução do fluxo de ar, em que 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 equivalem aos números dos tanques apresentados na Tabela 4

2.4.4 Congelamento da polpa de maracujá

Todo o empilhamento das caixas foi resfriado em batelada em um túnel de congelamento com corrente forçada de ar dirigida sobre o produto. A temperatura de operação do túnel foi de $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Na Figura 3 mostram-se as dimensões do túnel de congelamento e os sistemas de coordenadas retangulares que foram utilizados como referência em todo o trabalho.

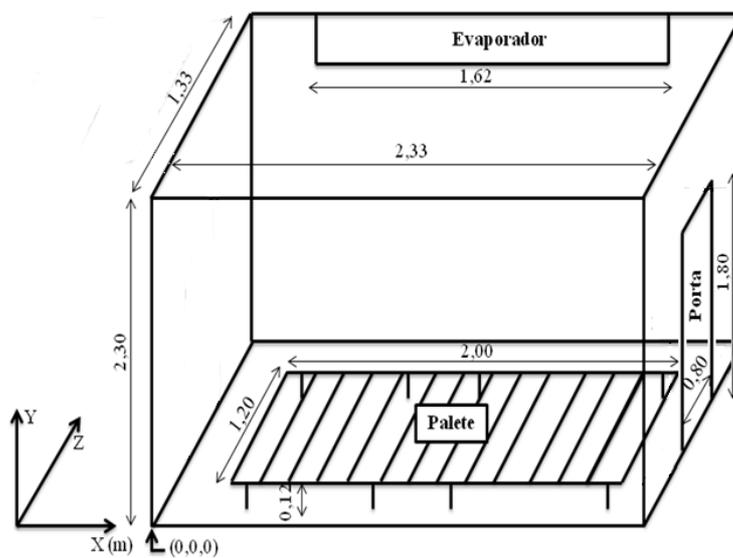


Figura 3 Dimensões internas do túnel de congelamento utilizado

2.4.5 Monitoração das temperaturas das caixas, dos tanques metálicos e do ar

Para se obter o histórico das temperaturas, foram instalados 28 termopares tipo T (cobre-constantan AWG-30) e 15 *RTDs* (Pt100) em toda a configuração experimental, em pontos escolhidos entre as amostras, de forma que melhor pudessem traduzir o comportamento transiente da transferência de calor durante o processo. Estes foram conectados a um sistema de acondicionamento de sinal (National Instruments - Modelo SCXI - Hungria).

As medições de temperatura foram coletadas em intervalos de 2 minutos, utilizando-se o software LabVIEW 8.5.

Os sensores de temperatura foram inseridos nos centros geométricos das polpas, nas soluções anticongelantes e nos tanques de aço galvanizado, para medir a variação de temperatura.

Nos tanques metálicos foram utilizados três sensores em cada recipiente. Um sensor foi instalado no centro geométrico do tanque para medir a variação da temperatura da solução durante o resfriamento; outro foi instalado na superfície metálica externa do recipiente e o último foi utilizado para a medição da temperatura do ar adjacente.

2.5 Medidas da velocidade do ar

As medidas da velocidade do ar foram feitas com um anemômetro de fio quente acoplado a um sistema de aquisição de dados (TSI – modelo 9535-USA).

As medidas foram feitas em diferentes alturas (coordenada $Y(m)$ = 0,420; 0,845; 1,270; 1,695; e 2,120), comprimentos (coordenada $X(m)$ = 0,000; 0,090; 0,180; 0,270; 0,360; 0,450; 0,540; 0,630; 0,720; 0,810; 0,900; 0,990; 1,080; 1,170; 1,260; 1,350; 1,440; 1,530; 1,610; 1,700; 1,790; 1,880; 1,970;

2,060; 2,150; 2,240; e 2,330) e larguras (coordenada Z(m) = 0,135 e 1,195) no túnel de congelamento na direção horizontal de circulação do ar.

Os pontos de medidas da velocidade do ar no túnel de congelamento são mostrados na Figura 4.

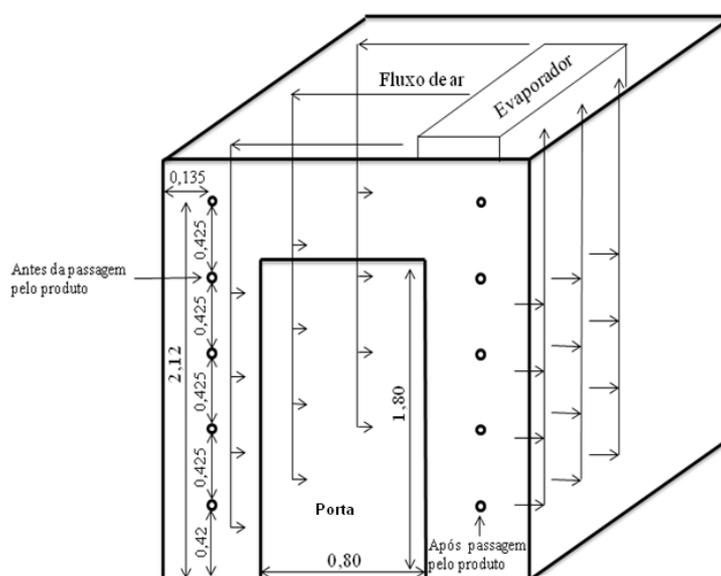


Figura 4 Pontos de medidas experimentais da velocidade do ar

2.6 Determinação do coeficiente convectivo de transferência de calor (h)

Os coeficientes convectivos de transferência de calor foram determinados a partir de tanques retangulares construídos com chapas metálicas de 2 mm de espessura, conforme a metodologia descrita por Santos (2005). Esses recipientes foram preenchidos com três tipos de soluções (alcoólica, etileno glicol e propileno glicol) e intercalados com caixas plásticas de PEAD contendo polpa de maracujá. Sensores de temperatura foram inseridos na

solução, na superfície externa do recipiente metálico, e em pontos adjacentes ao recipiente metálico para a medição da temperatura do ar. As temperaturas foram registradas a cada dois minutos e observadas, por meio de uma aquisição de dados conectada a um computador. Esses dados de temperatura foram utilizados para estimar os coeficientes de transferência de calor (h) dentro do túnel.

Para a análise da transferência de calor, a temperatura da superfície dos recipientes construídos com chapas de aço galvanizado foi considerada homogênea em qualquer ponto da sua superfície e as propriedades termofísicas do ar foram consideradas constantes durante a realização dos ensaios.

Um balanço de energia do sistema resulta na equação utilizada para determinar os valores de h a partir de dados experimentais.

A equação (16) resume esse balanço de energia, em que A é a área de transferência de calor; m_{tq} e m_{sol} são os pesos do tanque vazio e da solução, respectivamente; c_{tq} e c_{sol} é o calor específico do aço galvanizado e da solução, respectivamente e T_{sol} é a temperatura da solução.

Desta forma, a aproximação do processo de transferência de calor como uma sucessão de processos quase estacionários leva a valores de h que podem ser determinados pela Equação (17) (SANTOS, 2005).

A diferença efetiva de temperatura entre a superfície do tanque (T_{tq}) e a do ar (T_{∞}) durante um intervalo de tempo Δt é dada pela equação (18).

$$m_{\text{tq}}c_{\text{tq}} \frac{dT_{\text{tq}}}{dt} + m_{\text{sol}}c_{\text{sol}} \frac{dT_{\text{sol}}}{dt} = hA(T_{\text{tq}} - T_{\infty}) \quad (16)$$

$$h = \frac{(mc\Delta T)_{\text{tq}} + (mc\Delta T)_{\text{sol}}}{A(T_{\text{tq}} - T_{\infty})\Delta t} \quad (17)$$

$$(T_{iq} - T_{\infty}) = \left[\frac{T_{iq}(t) + T_{iq}(t + \Delta t)}{2} \right] - \left[\frac{T_{\infty}(t) + T_{\infty}(t + \Delta t)}{2} \right] \quad (18)$$

Os dados de temperatura que foram utilizados para calcular o h foram registrados após o fechamento da porta do túnel de congelamento.

Como as temperaturas foram registradas a cada 2 minutos, esse intervalo de tempo foi o valor mínimo utilizado para calcular a diferença efetiva na temperatura entre a superfície do recipiente e do ar, ou seja, $(T_{iq} - T_{\infty})$.

A duração de cada experimento foi limitada pela taxa de resfriamento das soluções, ou seja, quando as soluções e as temperaturas dos recipientes construídos com chapas de aço galvanizado chegaram perto da temperatura do ar (T_{∞}), os dados não foram utilizados devido a pequenas variações na entalpia do sistema e por causa do baixo valor da diferença $(T_{iq} - T_{\infty})$.

2.7 Tempo de congelamento experimental

O tempo de congelamento experimental foi avaliado pelas leituras dos termopares instalados nas polpas de maracujá. O fim do processo de congelamento foi determinado quando todos os termopares acusaram temperaturas imediatamente iguais a -18°C para as duas situações (sem e com a indução do fluxo de ar). Esta temperatura foi escolhida por ser a mais comumente utilizada comercialmente e por representar um parâmetro em que já se encontram poucas atividades enzimáticas e microbiológicas no alimento.

2.8 Validações dos valores experimentais de h pelas estimativas dos tempos de congelamento

Para o cálculo do tempo de congelamento das configurações foi utilizada a equação (19), usando o fator de forma (E).

$$t_{\text{pred}} = \frac{t_{f,\text{placa}}}{E} \quad (19)$$

O parâmetro E pode ser definido como a razão entre o tempo de congelamento de um corpo de prova e o tempo real de congelamento para o produto, de dimensões iguais, ambos sendo expostos às mesmas condições

Para calcular $t_{f,\text{placa}}$, segundo Cleland (1992), o método de Pham (PHAM, 1986), que divide o processo em duas fases, pré-resfriamento e congelamento e considera a equação modificada de Plank para a mudança de fase, é o mais indicado.

Para caixas, o fator geométrico (E) foi calculado seguindo a metodologia do fator geométrico (E_{AN}) derivado a partir da solução analítica dos problemas de transferência de calor com mudança de fase (HOSSAIN; CLELAND; CLELAND, 1992).

$$E_{AN} = \left(1 + \frac{2}{Bi_s}\right) \left\{ \left(1 + \frac{2}{Bi_s}\right) - 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\text{sen} Z_n}{\left(Z_n^3 \left(1 + \frac{\text{sen}^2 Z_n}{Bi_s}\right) \left[\frac{Z_n}{Bi_s} \text{senh}(Z_n \beta_1) + \text{cosh}(Z_n \beta_1) \right] \right)} \right] \right\}$$

$$- 8 \beta_2^2 \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \left[\text{sen} Z_n \text{sen} Z_m \left\{ \left[\cosh(Z_{nm}) + \frac{Z_{nm}}{Bi_s} \frac{1}{\beta_2} \text{senh}(Z_{nm}) \right] \right\} \right]$$

$$\times Z_n Z_m Z_{nm}^2 \left(1 + \frac{1}{Bi_s} \operatorname{sen}^2 Z_n \right) \left(1 + \frac{1}{Bi_s \beta_1} \operatorname{sen}^2 Z_m \right) \left. \right\}^{-1} \left. \right\}^{-1} \quad (20)$$

em que os valores de Z_n e Z_m são as raízes das equações.

$$Bi_s = Z_n \tan Z_n \quad (21)$$

e

$$Bi_s \times \beta_1 = Z_m \tan Z_m \quad (22)$$

e os valores de Z_{nm} são obtidos a partir da equação (19):

$$Z_{nm}^2 = Z_n^2 \beta_2^2 + Z_m^2 \left(\frac{\beta_2}{\beta_1} \right)^2 \quad (23)$$

Para determinar o erro entre o tempo de congelamento experimental e predito foi utilizada a equação (24).

$$\varepsilon(\%) = 100 \sqrt{\left[\frac{\text{Temp}_{\text{pred}} - \text{Temp}}{\text{Temp}} \right]^2} \quad (24)$$

2.9 Determinação do consumo energético

O consumo energético nas duas situações (sem e com a indução do fluxo de ar) foi determinado utilizando-se um medidor de energia e transdutor de grandezas elétricas (KRON - Modelo Mult-k 120-Brasil) acoplado ao

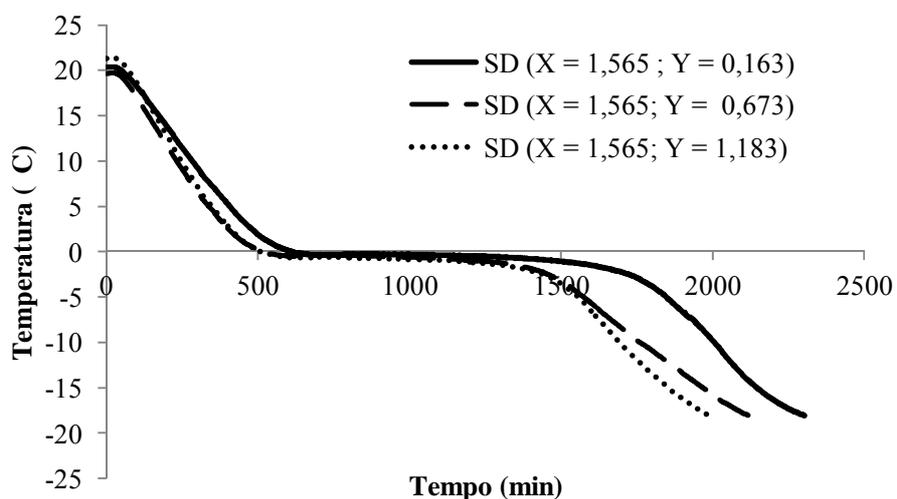
computador via conversor (KR-485/USB). Os dados foram analisados com o software RedeMB5 - Versão 5.19, rede padrão RS-485, protocolo Modbus.

O início da medição se deu a partir do ligamento do túnel de congelamento e o término da medição se deu quando todos os sensores distribuídos entre as amostras indicaram $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Os parâmetros elétricos medidos em cada batelada e usados para análises foram energia ativa (EA), energia reativa (ER), demanda ativa (DA) e máxima demanda ativa (MDA).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Históricos de temperatura

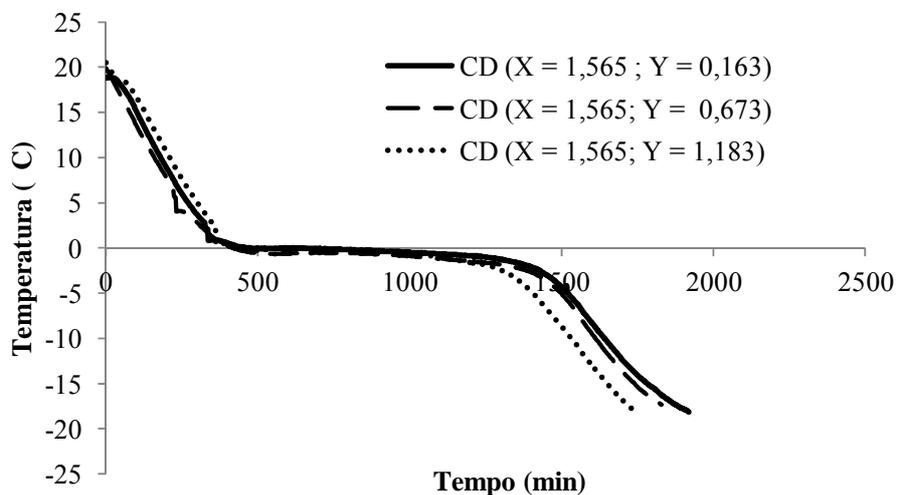
Os históricos de temperatura obtidos durante o congelamento sem e com a indução do fluxo de ar das polpas de maracujá acondicionadas em caixas localizadas nas posições $(X = 1,565 ; Y = 0,163)$, $(X = 1,565; Y = 0,673)$ e $(X = 1,565; Y = 1,183)$ são mostrados no Gráfico 1.



(a)

Gráfico 1 Curva de resfriamento para o congelamento (a) sem a indução (SD) e (b) com indução (CD) do fluxo de ar das polpas de maracujá acondicionadas em caixas localizadas em diferentes posições do empilhamento

(...Continua...)



(b)

A curva do Gráfico 1 mostra que ocorreu um padrão de variação de temperatura ao longo do tempo para as configurações sem e com a indução do fluxo de ar, ou seja, a redução da temperatura ao longo do tempo foi mais rápida para o topo do empilhamento e mais lenta para a base do empilhamento em ambas as situações (sem e com a indução do fluxo de ar). Isto pode ser explicado pela localização do soprador de ar na parte superior do túnel, que proporciona o contato direto da corrente de ar frio com o produto que se encontra no topo do arranjo das camadas.

3.2 Velocidade do ar

A velocidade do ar é um parâmetro importante para caracterizar a uniformidade do resfriamento, além de avaliar a eficiência do processo de

transferência de calor e identificar a existência de canais preferenciais de escoamento do ar.

No Gráfico 2 observa-se a alteração na velocidade média do ar dentro do túnel de congelamento, causada pela instalação das placas de poliestireno para o direcionamento (indução) do fluxo de ar para o empilhamento de caixas. A instalação das placas aumentou, em média, 13% a velocidade do ar na base do empilhamento, 41% na região central e 46% próximo às caixas localizadas no topo do empilhamento. As coordenadas mostradas na Figura 4 se referem aos pontos de medidas da velocidade do ar localizados exatamente nas posições frontais aos tanques utilizados como corpos de prova para a determinação dos coeficientes convectivos de transferência de calor.

Também no Gráfico 2 é possível perceber que a velocidade do ar, tanto para a configuração sem quanto para a configuração com indução do fluxo de ar, aumenta em função do aumento da altura do empilhamento de caixas. Isto pode ser explicado pela localização do soprador de ar na parte superior do túnel, que proporciona o contato direto da corrente de ar com o produto que se encontra no topo do arranjo das camadas.

A heterogeneidade das medidas observadas pode ser atribuída às mudanças bruscas no direcionamento do escoamento do ar, devido à presença de obstáculos e de acessórios do insuflamento, o que significa que a velocidade do ar varia muito rapidamente em função do tempo e seu valor médio em uma determinada localização se torna de mais difícil medição.

Reno et al. (2010) avaliaram a velocidade e a distribuição do ar durante o congelamento de polpas de goiaba acondicionadas em três tipos diferentes de embalagens em um túnel de congelamento com as mesmas dimensões do túnel descrito aqui neste trabalho. Dentre os três tipos de embalagens utilizadas no estudo estavam caixas comerciais de PEAD. O autor observou que, no congelamento da polpa de goiaba em caixas de PEAD, a velocidade do ar na

direção horizontal era maior em função do aumento na altura dentro do túnel, corroborando os resultados obtidos neste trabalho.

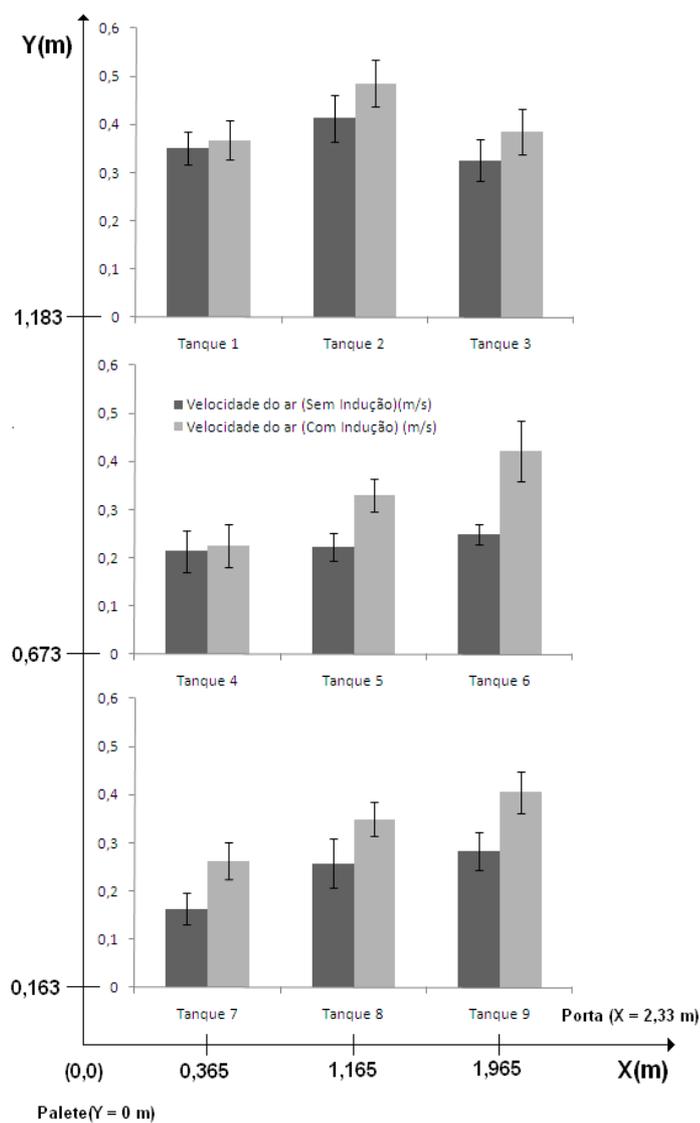


Gráfico 2 Alteração das velocidades do ar causada pelo direcionamento do fluxo de ar nas posições frontais aos corpos de prova

3.3 Coeficientes convectivos de transferência de calor (h)

As curvas de temperatura versus tempo, obtidas pelos sensores de temperatura instalados no tanque 5, usado como corpo de prova para a determinação dos coeficientes convectivos de transferência de calor, são mostradas no Gráfico 3.

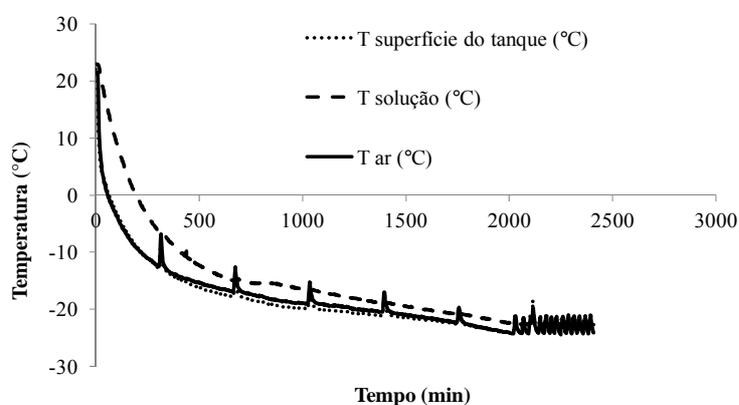
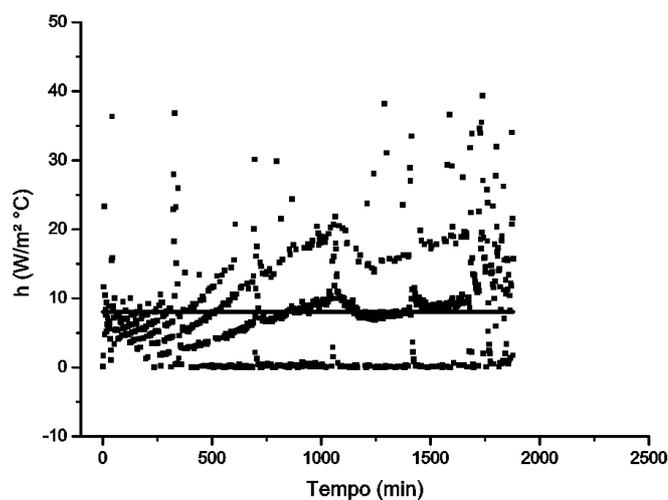


Gráfico 3 Curva de resfriamento do tanque de aço galvanizado usado como corpo de prova

Para o cálculo de h , foram utilizados os dados de temperatura obtidos a partir do momento em que a porta do túnel de congelamento foi fechada. As temperaturas foram lidas em intervalos de 2 minutos, até que todos os sensores instalados nas polpas de maracujá acusaram $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Os valores de h foram calculados para cada recipiente metálico contendo solução anticongelante, de acordo com as Equações (16), (17) e (18). Os valores médios de h (h_m) foram obtidos a partir da média aritmética de todos os valores de h ao longo do tempo,

para cada um dos nove recipientes metálico. As dispersões observadas nos valores de h podem estar associadas ao uso de diferenças médias de temperatura para a transferência de calor por convecção. Além disso, observou-se a ocorrência de flutuações macroscópicas na circulação de ar no túnel de congelamento. Isso implica que os coeficientes convectivos de transferência de calor locais também variam com o tempo, em uma dada posição fixa no interior do túnel. Assim, a comparação dos valores de h deve ser realizada por meio dos valores médios.

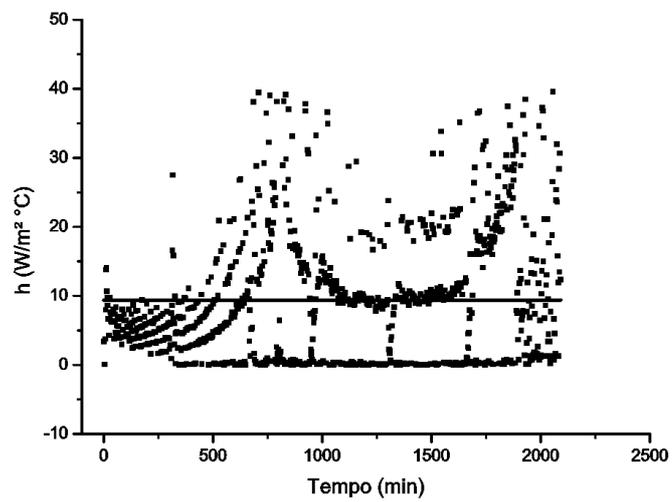
Os gráficos contendo os valores de h_m para as duas situações (sem e com indução do fluxo de ar) são apresentados nos Gráficos 4A e 4B.



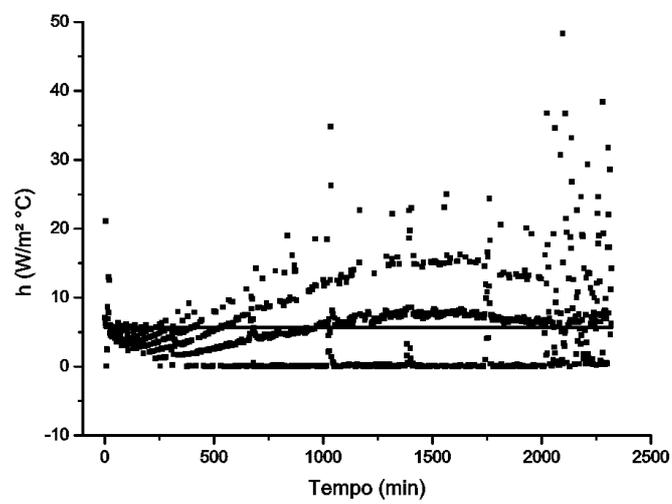
(a)

Gráfico 4A Coeficientes convectivos de transferência de calor médios para polpas de maracujá submetidas ao congelamento sem a indução do fluxo de ar e localizadas nas posições: (a) (0,365 ; 0,673), (b) (1,165 ; 0,673) e (c) (1,965 ; 0,673) do empilhamento

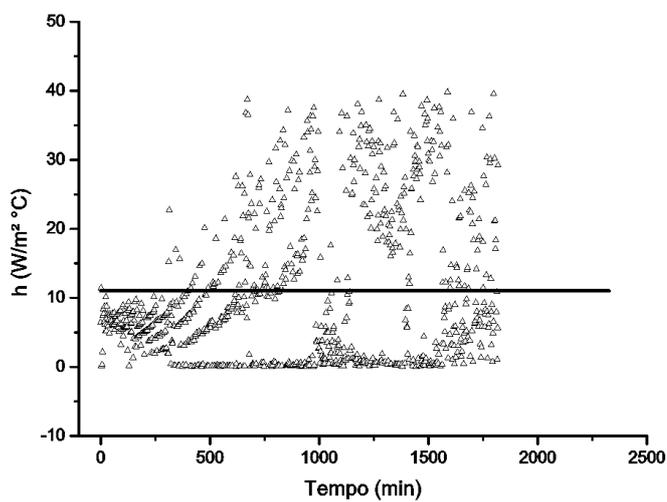
(...Continua...)



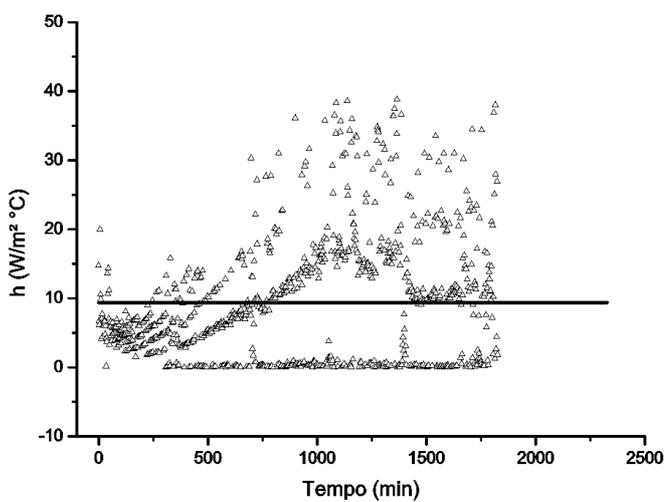
(b)



(c)



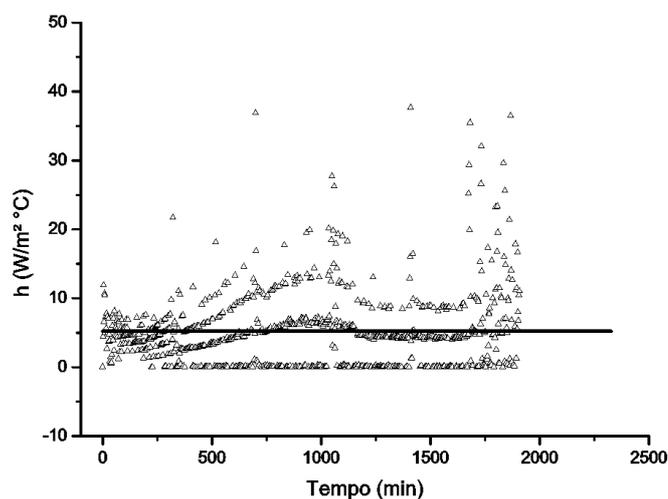
(a)



(b)

Gráfico 4B Coeficientes convectivos de transferência de calor médios para polpas de maracujá submetidas ao congelamento com a indução do fluxo de ar e localizadas nas posições: (a) (0,365 ; 0,673), (b) (1,165 ; 0,673) e (c) (1,965 ; 0,673) do empilhamento

(...Continua...)



(c)

Os coeficientes convectivos de transferência de calor (h) apresentaram valores mais altos para a situação em que houve a indução do fluxo de ar. Isso comprova que o direcionamento do fluxo de ar sob o empilhamento de produto a ser resfriado promove uma troca de calor mais uniforme e eficiente. Isto, provavelmente, ocorreu porque a indução do fluxo de ar evita que o ar passe por caminhos preferenciais e aumenta a homogeneidade do processo de transferência de calor.

Um valor médio dos coeficientes convectivos de transferência de calor foi calculado considerando-se os valores médios (h_m) de todos os tanques metálicos. Os valores médios calculados foram de $7,599 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, para a configuração sem indução do fluxo de ar e de $10,419 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, para a configuração com indução do fluxo de ar.

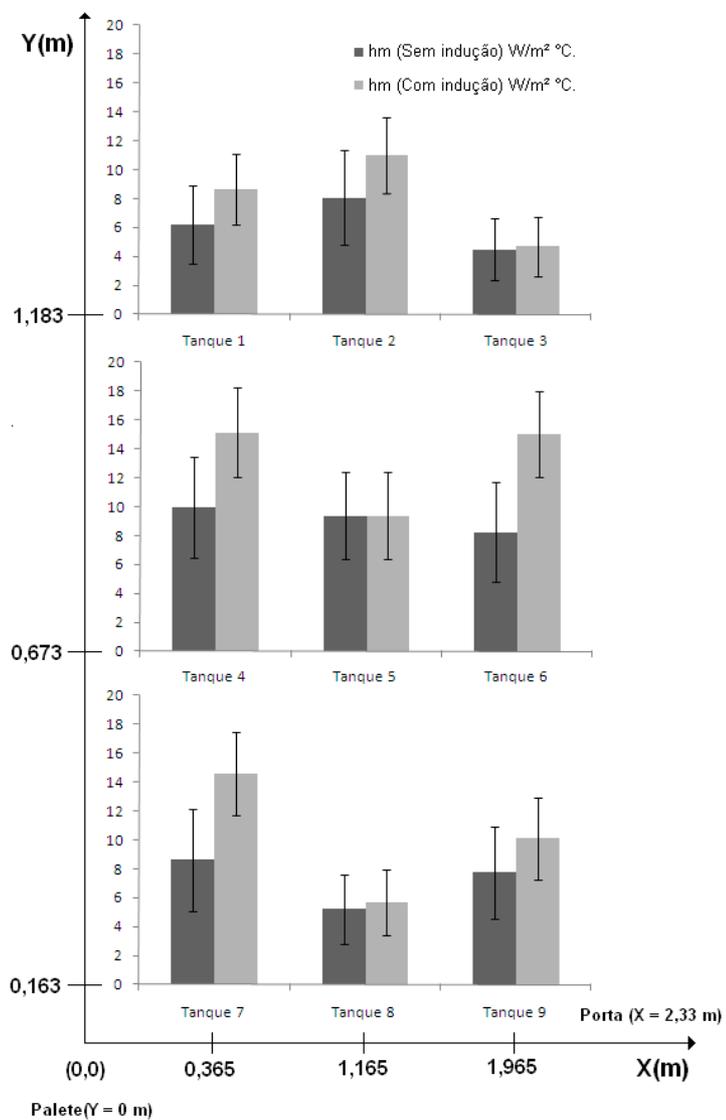


Gráfico 5 Alteração dos coeficientes convectivos de transferência de calor médios, causada pelo direcionamento do fluxo de ar

Estes resultados mostram que a fixação das placas de poliestireno expandido em torno do empilhamento das caixas aumentou em 37,11% os valores médios dos coeficientes convectivos de transferência de calor.

A maior efetividade da transferência de calor durante o congelamento das polpas de maracujá, quando o fluxo de ar foi direcionado sobre o produto, pode ser observada experimentalmente pelo menor tempo de processo necessário para o congelamento das polpas e pela maior média global de h_m .

3.4 Tempo de congelamento experimental

Na Tabela 5 observam-se os tempos de congelamento experimental que foram obtidos durante o processo de congelamento das polpas sem e com a indução do fluxo de ar. Esses valores foram obtidos após o término do processamento para as duas situações, quando todos os sensores de temperatura instalados nas polpas de maracujá registraram a temperatura de $-18\text{ }^\circ\text{C}$.

Tabela 5 Comparação entre os tempos de congelamento experimental e preditos

Processo	h_m ($\text{W}/\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C}$)	t_{exp} (h)	$t_{\text{pred}}(\mathbf{E}_{\text{AN}})$ (h)	$e(\mathbf{E}_{\text{AN}})$ (%)
Sem indução	7,599	40,13	45,19	12,62
Com indução	10,419	32,37	32,76	1,20

Pela Tabela 5 é possível observar também os valores preditos para o tempo de congelamento e os erros entre os valores preditos e experimentais. Os valores de tempo de congelamento predito foram obtidos utilizando-se valores médios dos coeficientes convectivos de transferência de calor aplicada a blocos retangulares. Os resultados das estimativas dos tempos de congelamento calculadas usando os dados de h obtidos experimentalmente mostraram bons acordos com as medidas experimentais, apresentando erros médios inferiores a

13%, quando o fator de forma E_{AS} (HOSSAIN, 1995) foi testado para a configuração sem indução do fluxo de ar e erros médios inferiores a 2%, quando a configuração testada foi com indução do fluxo de ar.

Ainda por meio da Tabela 5 pode-se observar que a indução do fluxo de ar sobre a pilha de produto a ser congelado diminuiu o tempo de congelamento do produto. Isso talvez possa ser justificado pela precisão nas medições de h_m , pela menor amplitude de variação, pela distribuição do fluxo de ar mais uniforme em torno das caixas e por uma maior homogeneidade na taxa de resfriamento.

3.5 Consumo de energia

Os valores das grandezas elétricas que foram medidas durante o processo de congelamento das polpas nas duas situações (sem e com a indução do fluxo de ar) são mostrados na Tabela 6. As grandezas elétricas foram obtidas após o término do processamento, para as duas situações, quando todos os sensores de temperatura instalados nas polpas de maracujá chegaram a $-18\text{ }^\circ\text{C}$.

Também na Tabela 6 observa-se o número de bateladas por mês (NBM), a energia ativa mensal (EAM), a produção física (PFM), o consumo específico (CE) e o fator de carga (FC).

O número de bateladas por mês usado para avaliar o consumo de energia durante o intervalo de 30 dias (730 horas) foi calculado utilizando-se a equação (25) (RENO et al., 2010).

$$NBM = \frac{730}{t_{\text{exp.máx}}} \quad (25)$$

A energia ativa mensal (EAM) durante o período de 30 dias foi determinada por meio da equação (26).

$$EAM = NMB(EA) \quad (26)$$

A produção física (PFM) durante este período foi determinada empregando-se a equação (27) (SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL - SENAI, 2003).

$$PFM = NMB(QBAT) \quad (27)$$

O consumo específico (CE) foi calculado utilizando-se a equação (28) e o fator de carga (FC) foi calculado por meio da equação (29) (SENAI, 2003).

$$CE = \frac{EAM}{PFM} \quad (28)$$

$$FC = \frac{EAM}{730(MDA)} \quad (29)$$

Tabela 6 Parâmetros elétricos medidos durante o processo de congelamento sem e com a indução do fluxo de ar sobre o empilhamento

Processo	QBAT (kg)	EA (kWh)	ER (kVArh)	DA (kW)	MDA (kW)	t_{exp,max} (h)
Sem indução	525	176,516	123,078	3,536	5,674	40,13
Com indução	525	147,099	100,721	3,586	5,602	32,37
	NBM	EAM(kWh)	PFM (kg)	CE (kWh/kg)	FC	FP
Sem indução	18	3177,288	9450	0,3362	0,7671	0,820
Com indução	22	3236,178	11550	0,2802	0,7913	0,825

Onde QBAT = quantidade de polpa de fruta processada por batelada, EA = energia ativa, ER = energia reativa, DA = demanda ativa, MDA = máxima demanda ativa, t_{exp,max} = tempo de congelamento experimental, NBM = número de bateladas por mês, EAM = energia ativa mensal, PFM = produção física mensal, CE = consumo específico, FC = fator de carga e FP = fator de potência

Os dados da Tabela 6 mostram que o maior consumo de energia ocorreu quando a polpa foi congelada em caixas sem a indução do fluxo de ar sobre o empilhamento (176,516 kWh), devido ao maior tempo necessário para congelar completamente as amostras. O menor consumo de energia (147,099 kWh) ocorreu quando a polpa foi congelada em caixas com o direcionamento do fluxo de ar. Na mesma Tabela também é possível observar que as polpas de maracujá congeladas em caixas sem direcionamento do fluxo de ar apresentaram um consumo específico (CE) mais alto (0,3362 kWh/kg de polpa) do que a mesma quantidade de polpa processada com o direcionamento do fluxo de ar (0,2802 kWh/kg de polpa), sendo a redução de aproximadamente 20%.

Ainda na Tabela 6 os dados indicam que a variação do fator de carga (FC) não foi significativa quando a configuração foi alterada. O fator de carga (FC) é o parâmetro elétrico que representa o grau máximo de demanda ativa. Geralmente, a demanda ativa (DA) é inversamente proporcional à energia ativa (EA). Porém, neste caso, os resultados mostraram que esta relação não foi muito significativa. Em outras palavras, houve redução nos gastos de energia ativa e a demanda se manteve praticamente constante quando a configuração foi alterada pela simples instalação de painéis de poliestireno expandido para direcionar o fluxo de ar sobre o produto. O fator de potência (FP) durante o processamento da polpa de maracujá com a indução do fluxo de ar foi ligeiramente mais elevado quando comparado ao sem indução.

Também pode ser observado na Tabela 6 que a energia reativa (ER) para a configuração com indução foi mais baixa quando comparada à sem indução. O fator de potência mostra o quanto da potência total fornecida (kVA) é usado como energia ativa (kW) e indica a eficiência do sistema elétrico. Para o processamento da polpa de maracujá sem a indução do fluxo de ar, o alto valor da ER indica que o motor do compressor operou vazio durante mais tempo neste processamento e, para o processamento da polpa de maracujá com a indução do

fluxo de ar, o valor mais baixo de ER indica que o sistema de resfriamento do túnel de congelamento operou mais intensamente nessa configuração.

Concluindo, com a indução do fluxo de ar é possível reduzir o consumo específico em aproximadamente 20% e aumentar a produção física sem comprometer a qualidade e o funcionamento do sistema elétrico.

4 CONCLUSÃO

A variação de temperatura dentro do túnel de congelamento foi semelhante para as duas configurações (sem e com a indução do fluxo de ar), com redução da temperatura mais rápida para o topo do empilhamento e mais lenta para a base do empilhamento.

O perfil da velocidade do ar dentro do túnel de congelamento foi semelhante para as duas configurações, tendo os maiores valores de velocidade sido encontrados nas posições mais elevadas (Y) do túnel. A velocidade média do ar dentro do túnel de congelamento foi alterada pela instalação de placas de poliestireno, a qual provocou um aumento na velocidade do ar dentro do túnel de congelamento.

Os coeficientes convectivos de transferência de calor (h) apresentaram valores mais altos para a situação em que houve a indução do fluxo de ar. Isto comprova que o direcionamento do fluxo de ar sob o empilhamento de produto a ser resfriado promove uma troca de calor mais uniforme e eficiente.

O maior tempo de processamento foi verificado quando as polpas foram submetidas ao congelamento sem a indução do fluxo de ar. As polpas submetidas ao congelamento com indução do fluxo de ar congelaram mais rapidamente.

O consumo de energia foi maior para o processamento sem indução do fluxo de ar, como consequência do maior tempo demandado para o processamento (40,13 horas). As polpas submetidas ao congelamento com a indução do fluxo de ar apresentaram, em média, 32,37 horas de processamento.

Para as mesmas condições operacionais do equipamento, os resultados mostram que é possível processar a mesma quantidade de produto mais rapidamente induzindo o fluxo de ar. Com essa configuração foi possível reduzir

cerca de 20% o consumo de energia quando comparado ao processamento sem indução do fluxo de ar.

A indução do fluxo de ar sobre o produto a ser resfriado gera uma troca de calor mais uniforme e diminuiu o tempo de congelamento, resultando em produtos congelados com grande qualidade final, além de reduzir o custo do processo, o que se torna interessante e viável para pequenos produtores e pequenas agroindústrias que almejam uma redução do tempo de processamento, do consumo de energia e, conseqüentemente, do custo global do produto final.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Thermal properties of foods**. Atlanta, 2002. 30 p.

BAIRD, C. D.; GAFFNEY, J. J.; TALBOT, M. T. Design criteria for efficient and cost effective forced air cooling systems for fruits and vegetables. **ASHRAE Transactions**, Atlanta, v. 94, n. 1, p. 1434-1453, 1988.

CLELAND, A. C. **Food refrigeration process: analysis, design and simulation**. London: Elsevier Applied Science, 1992. 284 p.

DELGADO, A. E.; SUN, D. W. Heat and mass transfer models for predicting freezing processes: a review. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 47, n. 3, p. 157-174, June 2001.

FRASER, H. **Tunnel forced-air coolers for fresh fruits & vegetables**. Ontario: Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 1998. 227 p.

HELDMAN, D. R. Food freezing. In: HELDMAN, D. R.; LUND, D. B. (Ed.). **Handbook of food engineering**. New York: Dekker, 1992. p. 277-315.

HOSSAIN, M. M. A simple method of freezing time calculation for foodstuffs of various shapes. **Food Australia**, North Sydney, v. 47, n. 3, p. 109-112, Mar. 1995.

HOSSAIN, M. M.; CLELAND, D. J.; CLELAND, A. C. Prediction of freezing and thawing times for foods of two-dimensional irregular shape by using a semi-analytical geometric factor. **International Journal of Refrigeration**, Surrey, v. 15, n. 4, p. 235-240, Aug. 1992.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 5. ed. São Paulo: LTC, 2003. 655 p.

LAGUERRE, O.; BEN-AMARA, S.; FLICK, D. Heat transfer between wall and packed bed crossed by low velocity airflow. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 26, n. 16, p. 1951-1960, 2006.

PEREIRA, C. G. et al. Thermal conductivity measurements and predictive models for frozen guava and passion fruit pulps. **International Journal of Food Properties**, Philadelphia, 2012. In press.

PHAM, Q. T. Simplified equation for predicting the freezing time of foodstuffs. **Journal of Food Technology**, Oxford, v. 21, n. 6, p. 209-219, Dec. 1986.

RENO, M. J. et al. Heat transfer and energy consumption in the freezing of guava pulp in large Containers. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 31, p. 545-555, Nov. 2010.

RESENDE, J. V.; SILVEIRA JÚNIOR, V. Escoamento de ar através de embalagens de polpa de frutas em caixas comerciais: efeitos sobre os perfis de velocidade em túneis de congelamento. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 22, n. 2, p. 184-191, 2002.

SALVADORI, V. O.; MASCHERONI, R. H. Freezing of strawberry pulp in large containers: experimental determination and prediction of freezing times. **International Journal of Refrigeration**, Surrey, v. 19, n. 2, p. 87-94, 1996.

SANTOS, C. A. **Estudo da transferência de calor durante o congelamento de cortes de aves em caixas de papelão ondulado**. 2005. 114 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL. **Evaluation of energy**. Porto Alegre, 2003. Disponível em: <<http://www.senairs.org.br>>. Acesso em: 15 fev. 2012.

THOMPSON, J. F. Pre-cooling and storage facilities. In: UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Agriculture handbook number 66 DRAFT**. Washington, 2004. p. 453-467.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS. **Tabela brasileira de composição de alimentos**. 2. ed. Campinas, 2006. 113 p.

WELTY-CHANES, J.; VERGARA-BALDERAS, F.; BERMUDEZ-AGUIRRE, D. Transport phenomena in food engineering: basic concepts and advances. **Journal of Food Engineering**, Surrey, v. 67, n. 1/2, p. 113-128, Mar. 2005.

CAPÍTULO 3

INFLUÊNCIA DO TIPO DE EMBALAGEM NA TRANSFERÊNCIA DE CALOR DE POLPAS DE MARACUJÁ

RESUMO

Este trabalho foi realizado com o objetivo de caracterizar o processo de transferência de calor pela determinação dos coeficientes de transferência de calor de polpas de maracujá acondicionadas em dois tipos de embalagens cilíndricas (balde de PEAD e tambores metálicos) que são comuns no processamento industrial. Para determinar os coeficientes convectivos de transferência de calor, intercalaram-se polpas de maracujá acondicionadas nos dois tipos de embalagens (balde e tambores) com recipientes metálicos com a mesma geometria e dimensão dos baldes e tambores, contendo solução de baixo ponto de congelamento (etileno glicol 40%). Pode-se observar que, para as mesmas condições operacionais do equipamento, os resultados mostram que, com configurações usando baldes, é possível processar a mesma quantidade de produto mais rapidamente, quando comparado ao processamento em tambores. Com essa configuração foi possível reduzir cerca de 60% o consumo de energia e em 50% o tempo de congelamento, em comparação ao processamento em tambores.

Palavras-chave: Transferência de calor. Coeficientes convectivos de transferência de calor. Polpa de maracujá.

ABSTRACT

This work aimed to characterize the process of heat transfer by determining the coefficient of heat transfer of passion fruit pulp kept in two types of cylindrical packing (buckets of HDPE and metallic drums) that are common on industrial processing. In order to determine convective coefficients of heat transfer, pulps of passion fruits kept in the two types of packing (buckets and drums) with metallic recipients with the same geometry and dimensions of buckets and drums containing solutions of low freezing points (glycol ethylene 40%) were interspersed. It was observed that for the same operational conditions of the equipment it was possible to process the same quantity of product faster than the processing in drums. Using these set it was possible to reduce by 60% the energy consumption and by 50% the freezing time, in comparison to the processing in drums.

Keyword: Heat transfer. Convective coefficients of heat transference. Passion fruit pulp.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a maior parte da produção de alimentos, principalmente de origem vegetal, é sazonal e o desenvolvimento de métodos que prolonguem o período de armazenamento se faz necessário para evitar perda destes produtos e garantir a disponibilidade destes durante todo o ano. Sendo assim, a produção de polpas de frutas congeladas tornou-se uma opção viável para o aproveitamento integral das frutas na época da safra, evitando os problemas ligados à sazonalidade (BARRET et al., 1994).

Quando a fruta é congelada na forma de polpa, o efeito do processo de congelamento é verificado pela alteração na consistência da polpa e por meio de mudanças em suas composições causadas por reações químicas durante o armazenamento posterior. A consistência da polpa e a aparência global são mais bem mantidas quando a polpa é congelada rapidamente (FERNANDES et al., 2009).

Este tipo de processamento, geralmente, ocorre em pequenos túneis de congelamento que são viáveis para pequenos produtores, associações de produtores e pequenas agroindústrias. Nestes equipamentos, a eficiência operacional está diretamente relacionada aos processos de transferência de calor e, conseqüentemente, ao tempo de residência do produto no equipamento. O tempo de processamento afeta o consumo de energia que incide no custo global do produto final.

O conhecimento dos coeficientes de transferência de calor entre a superfície do produto e o ar frio faz-se absolutamente necessário para a construção de sistemas de congelamento ou para adaptar ou mudar condições de operação de sistemas já existentes (TOCCI; MASCHERONI, 1995).

O valor do coeficiente de transferência de calor superficial depende das propriedades de transporte do meio de resfriamento e da geometria do produto.

Portanto, o tamanho e a forma da embalagem são parâmetros importantes que influenciam os coeficientes de transferência de calor convectivos, se as condições operacionais do equipamento são mantidas constantes. O conhecimento dos valores destes coeficientes fornece subsídios para analisar a eficiência do processo e reduzir custos de produção.

Este trabalho foi realizado com os objetivos de caracterizar o processo de transferência de calor pela determinação dos coeficientes de transferência de calor de polpas de maracujá acondicionadas em dois tipos de embalagens (balde de PEAD e tambores metálicos); avaliar o tempo de congelamento experimental; validar os resultados experimentais dos coeficientes de transferência de calor convectivos aplicados a modelos para estimativas dos tempos de congelamento; avaliar o consumo de energia para o processamento de polpa de maracujá acondicionada neste tipo de embalagem e indicar a melhor configuração de processamento, considerando a produção física mensal.

2 MATERIAL E METODOS

2.1 Material

Foi utilizada polpa de maracujá-amarelo (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa* Deg.). Os frutos utilizados para a obtenção da polpa foram adquiridos diretamente de produtores agrícolas da região de Lavras, MG, em estágio de maturação uniforme e produzidos por cultivo convencional na safra 2009/2010.

2.2 Obtenção da polpa de maracujá

A polpa de maracujá foi obtida como descrito no capítulo 2 no item 2.2.

2.3 Montagem dos corpos de prova usados para medirem os coeficientes convectivos de transferência de calor (h)

Os corpos de prova utilizados para a determinação do h consistiram em recipientes de aço galvanizados e recipientes metálicos completamente preenchidos com solução anticongelante, na qual foram inseridos termopares e termorresistências (Pt100) para o monitoramento da temperatura, conforme metodologia descrita por Santos (2005). A montagem desse sistema foi realizada com a confecção dos recipientes de aço galvanizado com a mesma geometria e dimensão das embalagens usadas para o acondicionamento da polpa (baldes de PEAD e tambores metálicos).

O aço foi o material escolhido para a confecção dos recipientes por ter elevada condutividade térmica ($k \sim 43\text{W/m.K}$ a $27\text{ }^\circ\text{C}$) e por ser de fácil obtenção e manuseio. Por ser galvanizado, há a presença de uma fina película de zinco, cujo $k = 116\text{W/m.K}$ a $27\text{ }^\circ\text{C}$ (INCROPERA; DEWITT, 2003). Apesar de

existirem materiais de condutividade térmica maior, optou-se pela utilização do aço galvanizado, devido a questões econômicas. Ainda segundo Incropera e Dewitt (2003), o calor específico do aço ($c_{p,eq}$) é de, aproximadamente, 0,444 kJ/kg.K.

Foram confeccionados seis cilindros com espessura da placa de aço galvanizado de 2.10^{-3} m e volume interno de aproximadamente 15 litros (15.10^{-3} m³) cada.

Os tambores metálicos adquiridos tinham volume interno de aproximadamente 300 litros (300.10^{-3} m³) cada.

Para a realização dos experimentos, os recipientes de aço galvanizado e os tambores metálicos foram pesados e identificados. O peso de cada recipiente é dado na Tabela 7. Em seguida, os recipientes foram completamente preenchidos com a solução anticongelante e novamente pesados para o cálculo da massa da solução. Para a realização desse experimento foi utilizada solução de etileno glicol em concentração de 40 g/100 g de solução.

Tabela 7 Características dos recipientes utilizados no experimento

Tipo de recipiente	Nº do recipiente	Peso do recipiente vazio (kg)	Peso do recipiente com a solução (kg)
Cilindro de aço galvanizado	1	1,450	16,450
	2	1,420	16,420
	3	1,450	16,450
	4	1,425	16,425
	5	1,390	16,390
	6	1,440	16,440
Tambor metálico	1	15,890	165,890

2.4 Congelamento das polpas

O congelamento da polpa foi feito em batelada em túnel de congelamento com corrente forçada de ar dirigida horizontalmente sobre o produto. Na Figura 2, do item 2.3.3 do capítulo 2, observa-se o esquema do túnel de congelamento. Foram processadas, em cada batelada, 450 kg de produto incluindo polpa e solução de etilenoglicol.

Foram testados dois tipos de embalagens cilíndricas para o congelamento da polpa de maracujá, que foram baldes de polietileno de alta densidade (PEAD) e tambores metálicos.

2.4.1 Congelamento da polpa de maracujá em baldes de polietileno de alta densidade (PEAD)

Para o congelamento da polpa de maracujá em baldes de PEAD foram utilizados 360 kg de polpa, distribuídos em 24 baldes contendo 15 kg de polpa cada.

As dimensões dos baldes foram de 0,32 m (diâmetro) x 0,37 m (altura).

Os baldes de PEAD contendo a polpa foram distribuídas dentro do túnel de congelamento em 3 camadas com 5 baldes cada uma. Os 6 cilindros de aço galvanizado contendo 15 kg de solução de etileno glicol cada foram colocados na camada do centro do empilhamento.

Na Figura 5 está ilustrado o empilhamento dos baldes de PEAD sobre os paletes para o congelamento das polpas e a disposição dos cilindros de aço galvanizado contendo a solução de etilenoglicol.

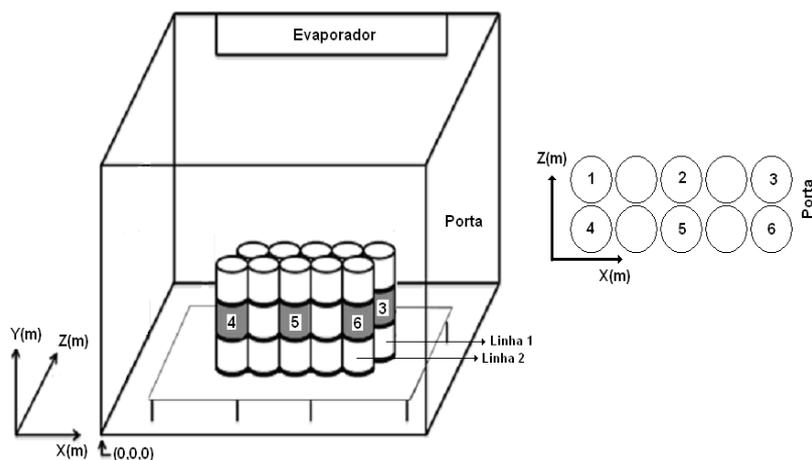


Figura 5 Empilhamento dos baldes sobre os paletes para o congelamento das polpas e camada do centro do empilhamento no plano XZ do sistema de coordenadas retangulares

O empilhamento de baldes dentro do túnel de congelamento foi feito mantendo-se todos os espaços laterais iguais (entre os baldes e as paredes do túnel) e também os espaços de frente e fundo, ou seja, a configuração foi colocada exatamente no centro do túnel de congelamento.

2.4.2 Congelamento da polpa de maracujá em tambores metálicos

Para o congelamento da polpa de maracujá em tambores metálicos foram utilizados 300 kg de polpa, distribuídos em 2 tambores contendo 150 kg de polpa cada. As dimensões dos tambores eram de 0,82 m de altura e 0,57 m de diâmetro.

Dois tambores metálicos contendo 300 kg de polpa e um tambor contendo 150 kg de solução de etileno glicol foram colocados em um arranjo linear no centro do túnel. O tambor metálico contendo a solução de etilenoglicol, o qual serviu como corpo de prova para determinar h , foi posicionado no centro do arranjo linear (Figura 6).

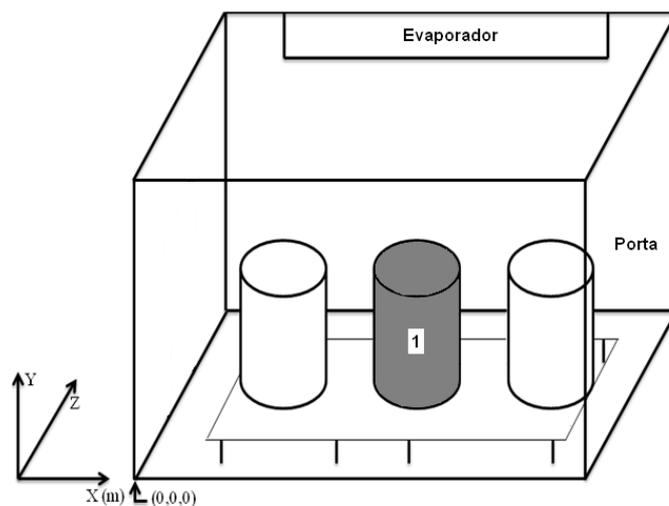


Figura 6 Disposição dos tambores sobre os paletes para o congelamento das polpas

A disposição dos tambores dentro do túnel de congelamento foi feita mantendo-se todos os espaços laterais iguais (entre os tambores e as paredes do túnel) e também os espaços de frente e fundo, ou seja, a configuração foi colocada exatamente no centro do túnel de congelamento.

2.5 Monitoramento da temperatura das amostras, dos recipientes de aço galvanizado, do tambor metálico, da solução anticongelante e do ar

Para se obter o histórico das temperaturas foram instalados 28 termopares tipo T (cobre-constantan AWG-30) e 15 RTDs (Pt100) em toda a configuração experimental, de forma que melhor pudesse traduzir o comportamento transiente da transferência de calor durante o processo de congelamento.

No congelamento da polpa em baldes de PEAD e em tambores metálicos, os sensores de temperatura foram inseridos no interior da solução de etileno glicol, na superfície externa do recipiente metálico, usado como corpo de prova e nas polpas, para medir a variação de temperatura.

Três sensores foram instalados em cada recipiente metálico usado como corpo de prova, sendo um no centro da solução, um na superfície metálica externa do corpo de prova e um para a medição da temperatura do ar adjacente.

Um sensor foi instalado no centro geométrico de cada balde de PEAD que continha a polpa de maracujá para monitorar a temperatura de resfriamento e três sensores foram utilizados em cada tambor metálico contendo polpa de maracujá. Estes foram instalados em posições equidistantes ao longo do eixo central do tambor, sendo que um destes coincidia com o centro geométrico do volume da polpa no interior do tambor.

Em todas as configurações as temperaturas foram registradas a cada 2 minutos e observadas por meio de um sistema de aquisição de dados conectado a um computador.

2.6 Medidas da velocidade do ar

As medidas da velocidade do ar foram feitas com um anemômetro de fio quente acoplado a um sistema de aquisição de dados (TSI – modelo 9535-USA).

As leituras das velocidades do ar foram feitas em um grande número de pontos ao longo da seção do escoamento, como pode ser visto na Figura 4, capítulo 2, item 2.5.

As velocidades do ar foram determinadas ao longo de diferentes alturas, comprimentos e larguras do túnel de congelamento, no sentido horizontal de circulação do ar.

2.7 Determinação do coeficiente convectivo de transferência de calor (h)

Os corpos de prova utilizados para a determinação dos coeficientes convectivos de transferência de calor no interior do túnel foram constituídos de cilindros de aço galvanizado e tambores metálicos. Esses recipientes foram preenchidos com solução de etileno glicol e intercalados com polpa de maracujá acondicionados em dois tipos de embalagens: baldes de PEAD e tambores metálicos. Sensores de temperatura foram inseridos na solução, na superfície externa do recipiente metálico e em pontos adjacentes ao recipiente metálico para a medição da temperatura do ar. As medições de temperatura foram coletadas em intervalos de 2 minutos, utilizando-se o software LabVIEW 8.5 (National Instruments - Modelo SCXI - Hungria). Esses dados de temperatura

foram utilizados para estimar os coeficientes de transferência de calor (h) dentro do túnel.

Para a análise da transferência de calor, as temperaturas da superfície dos recipientes metálicos foram consideradas espacialmente homogêneas e o calor específico da solução de etileno glicol 40% em função da temperatura é dado pela seguinte equação:

$$C_{p \text{ etileno glicol}} = 0,0034T + 3,401 \quad (30)$$

em que C_p (kJ/kg°C) é o calor específico e T (°C) é a temperatura da solução anticongelante.

Um balanço de energia do sistema levou à equação utilizada para determinar os valores de h a partir de dados experimentais.

A equação (31) resume esse balanço de energia, em que A é a área de transferência de calor; m_{tq} e m_{sol} são os pesos do tanque vazio e da solução, respectivamente, c_{tq} e c_{sol} são o calor específico do aço galvanizado e da solução, respectivamente e T_{sol} é a temperatura da solução.

$$m_{tq} c_{tq} \frac{dT_{tq}}{dt} + m_{sol} c_{sol} \frac{dT_{sol}}{dt} = hA(T_{tq} - T_{\infty}) \quad (31)$$

Dessa forma, a aproximação do processo de transferência de calor como uma sucessão de processos quase estacionários levou a valores de h que puderam ser determinados pela Equação (32). E a diferença efetiva de temperatura entre a superfície do tanque (T_{tq}) e a do ar (T_{∞}), durante um intervalo de tempo Δt , foi dada pela equação (33).

$$h = \frac{(mc\Delta T)_{\text{tq}} + (mc\Delta T)_{\text{sol}}}{A(T_{\text{tq}} - T_{\infty})\Delta t} \quad (32)$$

$$(T_{\text{tq}} - T_{\infty}) = \left[\frac{T_{\text{tq}}(t) + T_{\text{tq}}(t + \Delta t)}{2} \right] - \left[\frac{T_{\infty}(t) + T_{\infty}(t + \Delta t)}{2} \right] \quad (33)$$

Os dados de temperatura que foram utilizados para calcular o h foram registrados após o fechamento da porta do túnel de congelamento.

Como as temperaturas foram registradas a cada 2 minutos, esse intervalo de tempo foi o valor mínimo utilizado para calcular a diferença efetiva na temperatura entre a superfície do recipiente e do ar, ou seja, $(T_{\text{tq}} - T_{\infty})$.

A duração de cada experimento foi limitada pela taxa de resfriamento das soluções, ou seja, quando as soluções e as temperaturas dos recipientes metálicos chegaram perto da temperatura do ar (T_{∞}), os dados não foram utilizados devido a pequenas variações na entalpia do sistema e por causa do baixo valor da diferença $(T_{\text{tq}} - T_{\infty})$.

2.8 Validações dos valores experimentais de h pelas estimativas dos tempos de congelamento

2.8.1 Tempo de congelamento experimental

O tempo de congelamento experimental foi avaliado nos dois tipos de embalagem utilizados para o congelamento da polpa de maracujá. Esse tempo de congelamento foi determinado pelas leituras dos termopares instalados nas polpas, tendo o fim do processo de congelamento sido determinado quando todos os termopares acusaram temperaturas imediatamente iguais a -18°C . Esta temperatura foi escolhida por ser a mais comumente utilizada comercialmente e

por representar um parâmetro em que já se encontram poucas atividades enzimáticas e microbiológicas no alimento.

2.8.2 Tempo de congelamento estimado

Para o cálculo do tempo de congelamento das configurações foi utilizada a equação (34), usando fator de forma (E).

$$t_{\text{pred}} = \frac{t_{f,\text{placa}}}{E} \quad (34)$$

O parâmetro E pode ser definido como a razão entre o tempo de congelamento de um corpo de prova e o tempo real de congelamento para o produto, de dimensões iguais, ambos sendo expostos às mesmas condições.

Para calcular $t_{f,\text{placa}}$, pode-se utilizar o método de Pham (PHAM, 1986). Cleland e Earle (1982) recomendam este método como uma equação base, à qual o fator dimensional, E_{AS} , pode ser aplicado. O tempo de congelamento de uma placa é calculado com a equação (35), que divide o processo em duas fases, pré-resfriamento e congelamento, e considera a equação modificada de Plank para a mudança de fase:

$$t_{f,\text{placa}} = 2 \frac{LV}{kA \left(\frac{\Delta H_1}{\Delta T_1} + \frac{\Delta H_2}{\Delta T_2} \right) \left(\frac{1}{Bi} + \frac{1}{4} \right)} \quad (35)$$

em que:

$$\Delta H_1 = \rho_0 c_{p0} (T_i - T_{fm});$$

$$\Delta H_2 = \lambda_{ef} + \rho_{of} c_{pf} (T_{fm} - T_c);$$

$$\Delta T_1 = \left(\frac{T_i + T_{fm}}{2} \right) - T_a;$$

$$\Delta T_2 = T_{fm} - T_a;$$

$$T_{fm} = 1,8 + 0,263T_c + 0,105T_a;$$

$$Bi = \frac{hD}{K}$$

sendo T_i = temperatura inicial do produto, T_a = temperatura média do ar, T_c = temperatura final do produto, λ_{ef} = calor latente efetivo, k = condutividade térmica do alimento, A' = área da superfície do alimento.

Para calcular o fator de forma E_{AS} , segundo Hossain (1995), pode ser utilizada a equação (36)

$$E_{AS} = \frac{\left(1 + \frac{2}{Bi}\right) \left(1 + \frac{1}{\beta_1}\right)}{\left[\frac{2}{Bi} + \frac{1}{6\beta_1 \left(2 + \frac{1}{\beta_1}\right)} + (3 + 18\beta_1 + 4\beta_1^2) \right]} \quad (36)$$

para cilindros com altura > diâmetro, em que β_1 = (altura / diâmetro).

Para determinar o erro entre o tempo de congelamento experimental e o predito foi utilizada a equação (37).

$$\varepsilon(\%) = 100 \sqrt{\left[\frac{t_{pred} - t_{exp}}{t_{exp}} \right]^2} \quad (37)$$

2.9 Determinação do consumo energético

O consumo energético nos dois tipos de embalagem foi determinado utilizando-se um medidor de energia e transdutor de grandezas elétricas (KRON - Modelo Mult-k 120-Brasil) acoplado ao computador via conversor (KR-485/USB). Os dados foram analisados com o software RedeMB5 - Versão 5.19, rede padrão RS-485, protocolo Modbus.

O início da medição se deu a partir do ligamento do túnel de congelamento e o término da medição se deu quando todos os sensores distribuídos entre as amostras indicaram $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Os parâmetros elétricos medidos em cada batelada e utilizados para análises foram energia ativa (EA), energia reativa (ER), demanda ativa (DA) e máxima demanda ativa (MDA).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Histórico de temperatura para tambores e baldes

No Gráfico 6 observam-se os históricos de temperatura obtidos durante o congelamento da polpa de maracujá em baldes localizados na linha 2 (Figura 5) do empilhamento e nas posições (0,525 ; 0,988), (1,165 ; 0,988) e (1,805 ; 0,988).

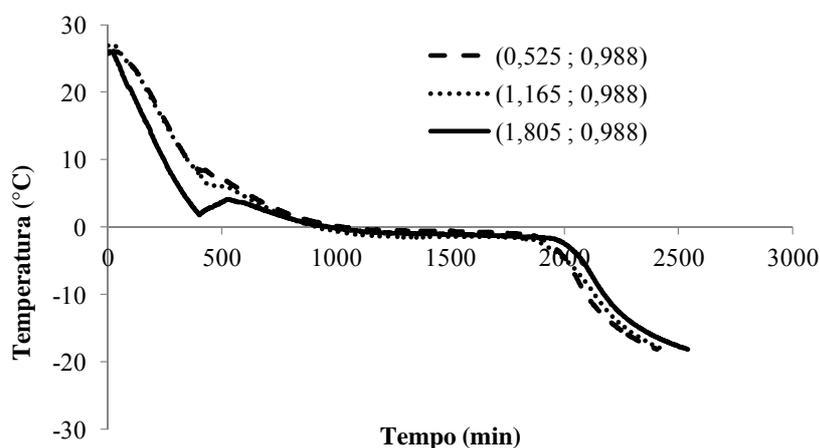


Gráfico 6 Curva de resfriamento das polpas de maracujá acondicionadas em baldes

Pode-se observar, no Gráfico 6, que o abaixamento mais rápido de temperatura nos baldes ocorreu em posições com menores valores de X. Isso pode ser explicado pela provável infiltração de calor pela porta, devido ao gradiente de temperatura entre o meio interno (túnel) e externo (ambiente), ou porque a vedação da porta não foi totalmente eficiente.

Os históricos de temperatura obtidos durante o congelamento da polpa de maracujá em tambores metálicos localizados nas posições (0,450 ; 0,510) e (1,880 ; 0,510) do empilhamento podem ser observados no Gráfico 7.

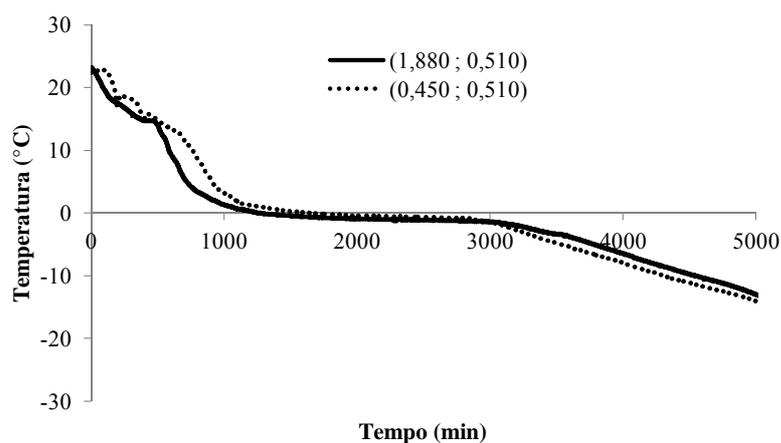


Gráfico 7 Curva de resfriamento das polpas de maracujá acondicionadas em tambores metálicos

Pode-se observar, no Gráfico 7, que as trocas de calor nos tambores, tal como observado no ensaio anterior, ocorreram mais rapidamente nas posições com menores valores de X, ou seja, no tambor localizado mais ao fundo do túnel.

3.2 Velocidade do ar

Nos Gráficos 8 e 9 observa-se a variação da velocidade do ar dentro do túnel de congelamento, com as polpas sendo submetidas ao congelamento

aconditionadas nos dois tipos diferentes de embalagem (baldes de PEAD e tambores metálicos), com $Z = 0,135$ m.

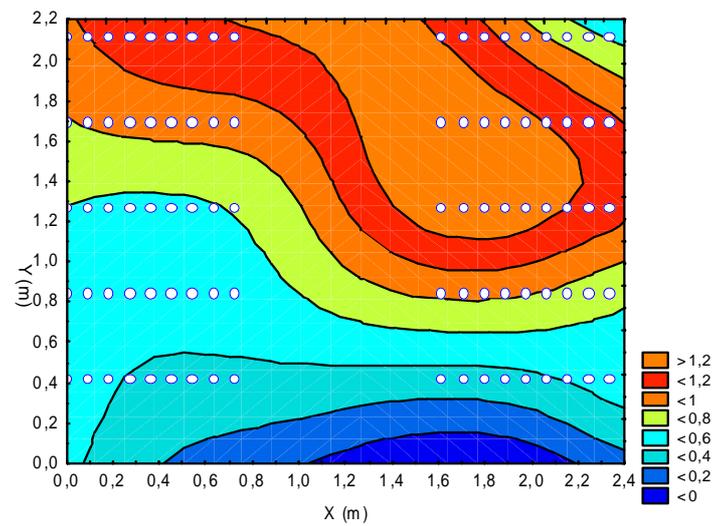


Gráfico 8 Variação da velocidade do ar no túnel de congelamento com as polpas de maracujá submetidas ao congelamento em baldes de PEAD, em função da altura (Y) e do comprimento (X)

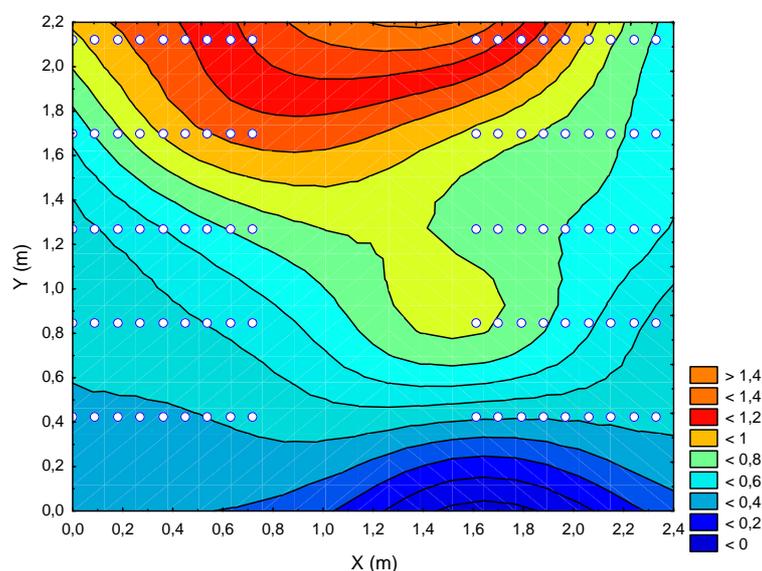


Gráfico 9 Variação da velocidade do ar no túnel de congelamento com as polpas de maracujá submetidas ao congelamento em tambores metálicos, em função da altura (Y) e do comprimento (X)

Observa-se, nos Gráficos 8 e 9, que a velocidade do ar aumenta em função do aumento da altura do túnel de congelamento. Isso pode ser explicado pela localização do soprador de ar na parte superior do túnel, que proporciona o contato direto da corrente de ar frio com o produto que se encontra no topo do arranjo das camadas.

Ainda observando-se os mesmos Gráficos, pode-se concluir que as velocidades do ar durante o congelamento são influenciadas pela quantidade de produto e pela disposição desses produtos no interior do túnel de congelamento, ou seja, ocorre a formação de canais preferenciais no retorno do ar ao evaporador, causado pelos obstáculos ao fluxo de ar. No caso do congelamento da polpa em baldes de PEAD, ocorre uma maior resistência à passagem do ar, provocando a formação de canais preferenciais nas laterais e na parte superior do

empilhamento. E, no caso do congelamento da polpa em tambores metálicos, o fluxo de ar é mais facilitado na região acima dos tambores.

3.3 Coeficientes convectivos de transferência de calor (h)

Para o cálculo de h , foram utilizados os dados de temperatura obtidos a partir do momento em que a porta do túnel de congelamento foi fechada. Nos Gráficos 10 e 11 é possível observar o histórico das temperaturas medidas nos corpos de prova, durante o processamento das polpas em baldes e tambores que foram usados na determinação de h por balanço de energia.

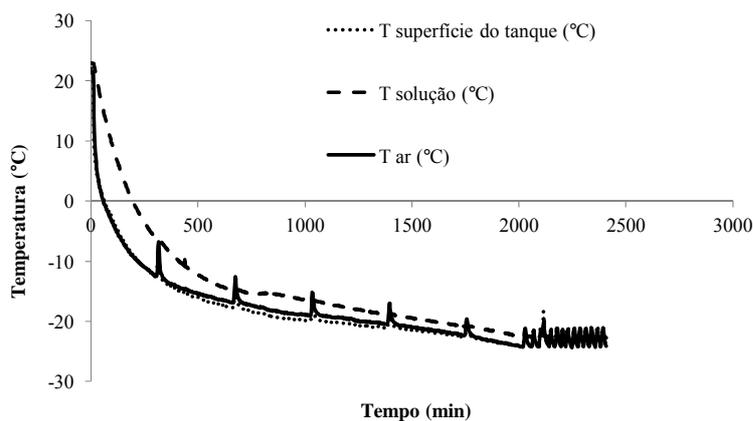


Gráfico 10 Curva resfriamento do cilindro de aço galvanizado usado como corpo de prova

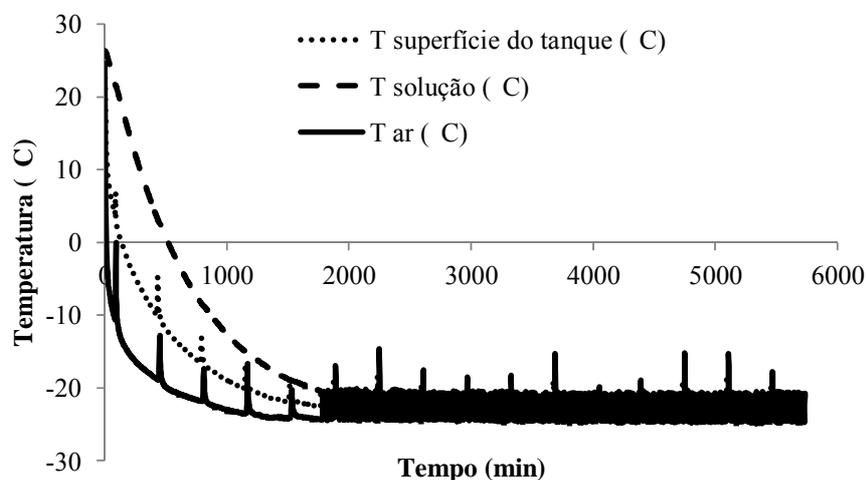


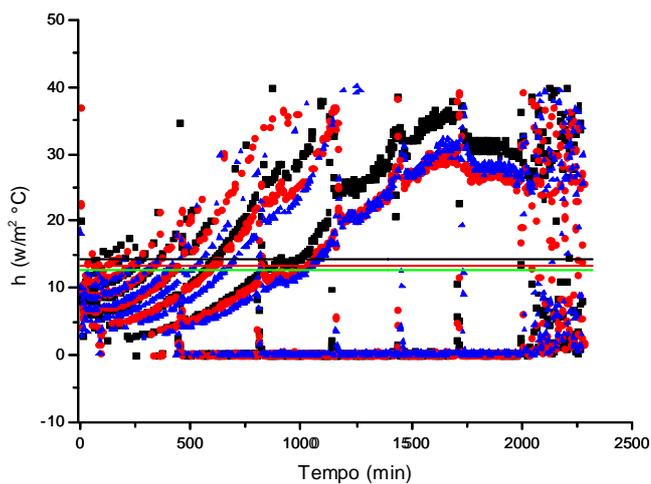
Gráfico 11 Curva de resfriamento do tambor metálico usado como corpo de prova

Os picos formados nas curvas de resfriamento dos Gráficos 10 e 11 ocorrem por causa do processo de degelo automático do túnel de congelamento. O degelo causa a elevação da temperatura interna da câmara por meio de resistências elétricas.

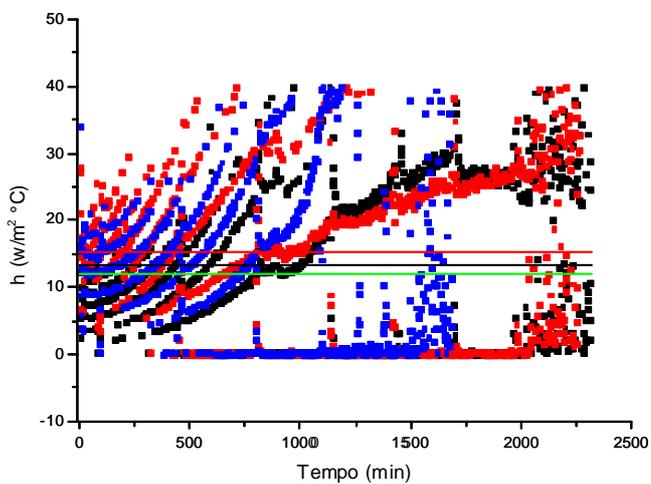
Os gráficos contendo os valores de h_m para os dois tipos de embalagem utilizados para o congelamento da polpa de maracujá são apresentados nos Gráficos 12 e 13.

Os valores de h_m foram calculados pela média aritmética dos valores de h determinados nos diferentes períodos do processamento das polpas em baldes e tambores. As dispersões observadas podem estar associadas com o uso de diferenças médias de temperatura para a transferência de calor por convecção. Além disso, observou-se a ocorrência de flutuações macroscópicas na circulação de ar no túnel de congelamento, o que implica que os coeficientes convectivos de transferência de calor locais também variam com o

tempo, em uma dada posição fixa no interior do túnel. Assim, a comparação dos valores de h deve ser realizada por meio dos valores médios.



(a)



(b)

Gráfico 12 Valores de h_m para o congelamento da polpa de maracujá em baldes de PEAD (a) linha 1 : $h_m = 13,37 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ e (b) linha 2: $h_m = 13,51 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

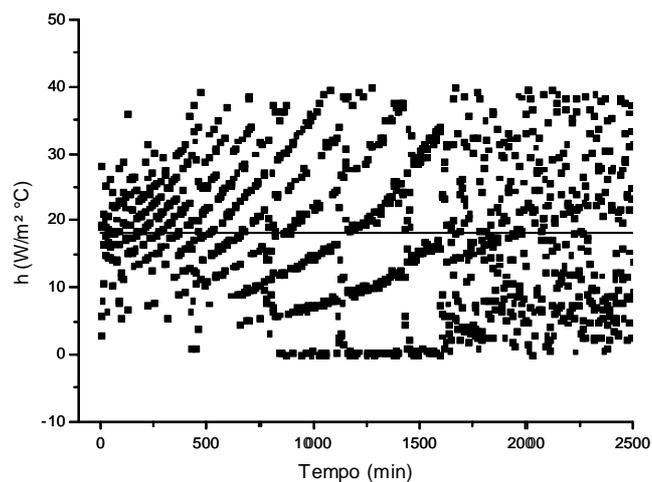


Gráfico 13 Valores de h_m para o congelamento da polpa de maracujá em tambores metálicos: $h_m = 18,265 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ C$

Observa-se que, para a configuração de baldes, o valor do coeficiente médio h_m para a linha 1 do empilhamento é ligeiramente inferior àquele referente à linha 2 (Gráfico 12). Os valores de h são diretamente relacionados à velocidade do ar, ou seja, quanto maior a velocidade do ar, maiores são os valores de h e, conseqüentemente, maior será a troca de calor entre o produto e o ar de resfriamento. A validação destes resultados é possível analisando-se e comparando-se os tempos de congelamento estimados, utilizando-se valores médios dos coeficientes mostrados no Gráfico 12 com aqueles obtidos experimentalmente pelas leituras de sensores de temperaturas instalados em toda a configuração durante o resfriamento.

Nos Gráficos 12 e 13 observa-se que os coeficientes convectivos de transferência de calor (h) apresentaram valores mais altos quando a polpa de maracujá foi congelada em tambores metálicos, porém, o processamento da polpa nos tambores se mostrou dificultoso em relação ao manuseio dos recipientes. Além disso, foi o processo mais demorado e com maior consumo de energia, portanto, o menos interessante para o congelamento em escala industrial, já que é o mais oneroso.

3.4 Tempo de congelamento experimental

Na Tabela 8 mostram-se os tempos de congelamento experimental que foram obtidos durante o processo de congelamento das polpas acondicionadas nos dois tipos de embalagens. Esses valores foram obtidos após o término do processamento, quando todos os sensores de temperatura instalados nas polpas de maracujá chegaram a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tabela 8 Comparação entre os tempos de congelamento experimental e preditos

Processo	h_m ($\text{W}/\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$)	t_{exp} (h)	$t_{\text{pred}}(\mathbf{E}_{\text{AS}})$ (h)	$e(\mathbf{E}_{\text{AS}})$ (%)
Baldes de PEAD	13,44	47,22	43,01	8,91
Tambor metálico	18,26	95,7	121,15	21,19

Observa-se, na Tabela 8, que, para a configuração de baldes, o tempo de congelamento predito pelo modelo usando os valores médios de h obtidos experimentalmente e extraídos de toda a superfície de controle é subestimado. Portanto, o resultado da estimativa do tempo de congelamento calculada usando os dados de h obtidos experimentalmente mostrou bons acordos com as medidas experimentais, apresentando erros médios inferiores a 9% quando o fator de

forma E_{AS} (HOSSAIN, 1995) foi testado. Para os tambores, os tempos de congelamento são superestimados e os resultados mostraram erros superiores a 20% não atendem aos padrões de aplicação em engenharia.

A explicação é que, na resolução, verifica-se que, para a configuração de baldes, o número de Biot é menor que 3 ($Bi_s = 2,32$) e, para tambores, o número de Biot é maior que 3 ($Bi_s = 6,01$). Segundo Hossain (1995), quando o número de Biot é maior que 3 ($Bi_s > 3$), muitos dos métodos se tornam limitados e imprecisos e, nestes casos, o método analítico completo deve ser usado para uma melhor predição do tempo de congelamento.

Reno (2010) encontrou erro médio de 7,43% do tempo predito em relação ao experimental para o congelamento de polpa de goiaba em baldes de PEAD e erro médio de 96,02% para o congelamento de polpa de goiaba em tambores metálicos. Tanto os baldes de PEAD quanto os tambores metálicos utilizados por Reno (2010) tinham as mesmas dimensões dos baldes e tambores utilizados neste trabalho.

3.5 Consumo de energia

Os valores das grandezas elétricas que foram medidas durante o processo de congelamento das polpas nos dois tipos de embalagem estão discriminados na Tabela 9. As grandezas elétricas foram obtidas após o término do processamento para as duas configurações, quando todos os sensores de temperatura instalados nas polpas de maracujá chegaram a $-18\text{ }^\circ\text{C}$.

Na Tabela 9 mostram-se também o número de bateladas por mês (NBM), a energia ativa mensal (EAM), a produção física (PFM), o consumo específico (CE) e o fator de carga (FC).

O número de bateladas por mês usado para avaliar o consumo de energia durante o intervalo de 30 dias (730 horas) foi calculado utilizando-se a equação (38) (RENO et al., 2010).

$$NBM = \frac{730}{t_{\text{exp.máx}}} \quad (38)$$

A energia ativa mensal (EAM) durante o período de trinta dias foi determinada empregando-se a equação (39).

$$EAM = NMB(EA) \quad (39)$$

A produção física (PFM) durante este período foi determinada por meio da equação (40) (SENAI, 2003).

$$PFM = NMB(QBAT) \quad (40)$$

O consumo específico (CE) foi calculado utilizando-se a equação (41) e o fator de carga (FC), pela equação (42) (SENAI, 2003).

$$CE = \frac{EAM}{PFM} \quad (41)$$

$$FC = \frac{EAM}{730(MDA)} \quad (42)$$

Tabela 9 Parâmetros elétricos medidos durante o processo de congelamento sem e com a indução do fluxo de ar sobre o empilhamento

Processo	QBAT (kg)	EA (kWh)	ER (kVarh)	DA (kW)	MDA (kW)	t_{exp,max} (h)
Baldes de PEAD	450	214,423	140,226	2,915	5,876	47,22
Tambor metálico	450	348,957	239,006	1,266	5,509	95,7
	NBM	EAM(kWh)	PFM (kg)	CE (kWh/kg)	FC	FP
Baldes de PEAD	15	3216,345	6750	0,4765	0,7498	0,837
Tambor metálico	7	2442,699	3150	0,7755	0,6074	0,825

Onde QBAT = quantidade de polpa de fruta processada por batelada, EA = energia ativa, ER = energia reativa, DA = demanda ativa, MDA = máxima demanda ativa, t_{exp,max} = tempo de congelamento experimental, NBM = número de bateladas por mês, EAM = energia ativa mensal, PFM = produção física mensal, CE = consumo específico, FC = fator de carga e FP = fator de potência

Os dados da Tabela 9 demonstram que o maior consumo de energia ocorreu quando a polpa foi congelada em tambores (348,957 kWh), devido ao maior tempo necessário para congelar completamente as amostras e que o menor consumo de energia (214,423 kWh) ocorreu quando a polpa foi congelada em baldes de PEAD.

Na mesma Tabela também se observa que as polpas de maracujá congeladas em tambores apresentaram um consumo específico (CE) muito alto (0,7755 kWh/kg de polpa), com cerca de 62,7% a mais do que para a mesma quantidade de polpa processada em baldes de PEAD (0,4765 kWh/kg de polpa). A variação do fator de carga (FC) também foi significativa, quando se compararam as duas configurações. O fator de carga (FC) é o parâmetro elétrico que representa o grau máximo de demanda ativa. Um FC mais baixo indica o consumo elétrico em curto intervalo de tempo, o que pode ser observado na Tabela 9, quando a mesma quantidade de polpa é congelada em tambores (FC = 0,6074) .

Ainda pelos dados da Tabela 9 é possível inferir que a demanda ativa (DA) do túnel de congelamento decresce em relação ao consumo de energia, ou seja, quanto maior foi o gasto energético, menor foi a demanda de potência. De acordo com Reno (2010), isto pode ser explicado pelo tempo de uso do equipamento; no início de processamento, o compressor do equipamento fica ligado constantemente, devido à alta carga térmica. Após a diminuição desta carga, o túnel de congelamento passa a operar em ciclos, com o compressor ligando e desligando, conforme a variação da temperatura interna. O sistema de resfriamento do túnel de congelamento operou mais intensamente na configuração com baldes, quando comparado aos dados de remoção de calor obtidos na avaliação destas duas configurações.

O fator de potência (FP) durante o processamento da polpa de maracujá em baldes PEAD foi mais elevado quando comparado àquele obtido no

processamento com tambores. Isso indica, e também pode ser observado na Tabela 9, que a energia reativa (ER) para a configuração com tambores foi mais elevada quando comparada à de baldes. O fator de potência mostra o quanto da potência total fornecida (kVA) é usado como energia ativa (kW) e indica a eficiência do sistema elétrico. Para o processamento da polpa de maracujá em tambores, os altos valores da ER indicam que o motor do compressor operou vazio durante mais tempo neste processamento.

Os valores estimados da área superficial para transferência de calor foram de 16,48 m² na configuração de baldes PEAD e de 5,94 m² na configuração de tambores. Estes valores também podem ser utilizados para analisar as altas taxas de remoção de calor observadas na configuração de baldes, quando comparadas com a de tambores e justificar as diferenças observadas entre os coeficientes de transferência de calor medidos, os tempos de congelamento e o consumo de energia.

4 CONCLUSÃO

A variação de temperatura dentro do túnel de congelamento foi semelhante para as duas configurações, com abaixamento mais rápido de temperatura em posições mais ao fundo do túnel de congelamento.

O perfil da velocidade do ar dentro do túnel de congelamento também foi semelhante para as duas configurações, tendo os maiores valores de velocidade sido encontrados nas posições mais elevadas do túnel em que está localizado o evaporador.

O maior tempo de processamento foi verificado quando as polpas foram submetidas ao congelamento em tambores metálicos. As polpas acondicionadas em baldes de PEAD congelaram mais rapidamente.

O consumo de energia foi maior para o processamento das polpas nos tambores como consequência do maior tempo demandado de processamento (95,7 horas). As polpas acondicionadas nos baldes apresentaram, em média, 47,22 horas de processamento.

Os coeficientes convectivos de transferência de calor médios (h_m) apresentaram valores mais altos quando a polpa de maracujá foi congelada em tambores metálicos, porém, o processamento da polpa nos tambores se mostrou dificultoso em relação ao manuseio dos recipientes. Além disso, foi o processo mais demorado e com maior consumo de energia, portanto, o menos interessante para o congelamento em escala industrial, já que é o processo mais oneroso.

Para as mesmas condições operacionais do equipamento, os resultados mostram que é possível processar a mesma quantidade de produto com maior qualidade (resfriamento mais rápido) em baldes de PEAD. Com essa configuração foi possível reduzir cerca de 60% o consumo de energia, quando comparado ao processamento em tambores. A decisão sobre a configuração

indicada deve ser feita baseada na facilidade de manuseio e no custo inicial, sendo o processamento em baldes vantajoso em ambos os aspectos.

REFERÊNCIAS

- BARRET, R. L. et al. Choque a frio e atmosfera modificada no aumento da vida pós-colheita de tomates: 2- coloração e textura. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 1, n. 14, p. 14-26, jan./jun. 1994.
- CLELAND, A. C.; EARLE, R. L. Freezing time prediction for foods: a simplified procedure. **International Journal of Refrigeration**, Surrey, v. 5, n. 3, p. 134-140, May 1982.
- FERNANDES, T. N. et al. Comportamento reológico, parâmetros físico-químicos e dinâmica do congelamento da polpa de maracujá adicionada de sacarose e pectina. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 12, p. 123-135, jun. 2009. Número especial.
- HOSSAIN, M. M. A simple method of freezing time calculation for foodstuffs of various shapes. **Food Australia**, North Sydney, v. 47, n. 3, p. 109-112, Mar. 1995.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 5. ed. São Paulo: LTC, 2003. 655 p.
- PHAM, Q. T. Simplified equation for predicting the freezing time of foodstuffs. **Journal of Food Technology**, Oxford, v. 21, n. 6, p. 209-219, Dec. 1986.
- RENO, M. J. **Transferência de calor no congelamento de polpa de goiaba**. 2010. 62 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.
- RENO, M. J. et al. Heat transfer and energy consumption in the freezing of guava pulp in large Containers. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 31, p. 545-555, Nov. 2010.
- SANTOS, C. A. **Estudo da transferência de calor durante o congelamento de cortes de aves em caixas de papelão ondulado**. 2005. 114 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- TOCCI, A. M.; MASCHERONI, R. H. Heat and mass transfer coefficients during the refrigeration, freezing and storage of meats, meat products and analogues. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 26, n. 1, p. 147-160, Apr. 1995.