

**TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO  
CONGELAMENTO DE POLPA DE GOIABA**

**MARCIU JOSÉ RENO**

**2010**

**MARCIU JOSÉ RENO**

**TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO  
CONGELAMENTO DE POLPA DE GOIABA**

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

Orientador  
Prof. Dr. Jaime Vilela de Resende

LAVRAS  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2010

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da  
Biblioteca Central da UFLA**

Reno, Marciu José.

Transferência de calor no congelamento de polpa de goiaba /  
Marciu José Reno. – Lavras : UFLA, 2010.  
63 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2010.  
Orientador: Jaime Vilela de Resende.  
Bibliografia.

1. Coeficientes de transferência de calor convectivos. 2. Polpa de  
fruta. 3. Consumo de energia. 4. Velocidade do ar. 5. Tempo de  
congelamento. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 664.804421

**MARCIU JOSÉ RENO**

**TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO  
CONGELAMENTO DE POLPA DE GOIABA**

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

APROVADA em 26 de Fevereiro de 2010

Prof. Alexandre de Paula Peres UFLA

Prof. Jefferson Luiz Gomes Corrêa UFLA

Dra. Mônica Elisabeth Torres Prado UFLA

Prof. Jaime Vilela de Resende  
UFLA  
(Orientador)

LAVRAS  
MINAS GERAIS – BRASIL

**DEDICO**

A Deus  
A minha Família

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder saúde e sabedoria para a realização deste trabalho.

Aos meus familiares pelo incentivo e força.

Ao meu orientador, professor Jaime Vilela de Resende, pelo apoio, orientação dedicada e pelos importantes ensinamentos.

Ao meu co-orientador, professor Alexandre de Paula Peres pela orientação e ensinamentos

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

Aos meus colegas de laboratório Natália, Gustavo, Márcia e Fausto pela ajuda, paciência e confiança.

A Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Ciências dos Alimentos, pela oportunidade de realização desta dissertação.

Aos colegas do curso de mestrado.

Aos colegas de casa.

Aos membros da banca Prof. Jefferson Luiz Gomes Corrêa e Mônica Elisabeth Torres Prado por todas as orientações, conselhos e correções.

A FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro à pesquisa.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desse trabalho, só posso agradecer.

**Muito obrigado!**

## SUMÁRIO

	<b>Página</b>
LISTA DE SÍMBOLOS.....	i
RESUMO.....	iv
ABSTRACT.....	vi
1 INTRODUÇÃO.....	01
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	04
2.1 Polpas de fruta.....	04
2.2 Goiaba.....	05
2.3 Congelamento.....	06
2.4 Propriedades termofísicas.....	07
2.5 Velocidade do ar.....	09
2.6 Coeficiente de transferência de calor convectivos.....	10
2.7 Tempo de congelamento.....	14
2.8 Predição do tempo de congelamento.....	15
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	18
3.1 Polpa de goiaba.....	18
3.2 Congelamento da polpa de goiaba.....	18
3.3 Monitoramento da temperatura das amostras e ar.....	21
3.4 Medição da velocidade do ar.....	26
3.5 Determinação do consumo energético.....	32
3.6 Determinação do coeficiente de transferência de calor convectivos.....	32
3.6.1 Caixas.....	33
3.6.2 Baldes e tambores.....	34
3.7 Propriedades termofísicas da polpa de goiaba.....	34
3.8 Predição do tempo de congelamento.....	35
3.9 Erro dos tempos de congelamento predito.....	36

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
4.1 Velocidade do ar.....	37
4.1.1 Caixas.....	37
4.1.2 Baldes.....	38
4.1.3 Tambores.....	39
4.2 Temperatura.....	40
4.2.1 Caixas.....	40
4.2.2 Baldes.....	42
4.2.3 Tambores.....	45
4.3 Tempo de congelamento experimental.....	47
4.4 Coeficiente de transferência de calor convectivos.....	49
4.5 Predição dos tempos de congelamento.....	51
4.6 Consumo de energia.....	55
5 CONCLUSÕES.....	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59



## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	constante;
$A'$	área da superfície do alimento ( $m^2$ );
$a$	largura do duto (m);
$a_{ws}$	atividade de água;
$B$	constante;
$b$	altura do duto (m);
$Bi$	número de Biot;
$c_p$	calor específico ( $kJ/kg^{\circ}C$ );
$D$	diâmetro cilindro (m);
DA	demanda ativa (kW);
$D_h$	diâmetro hidráulico (m);
$\epsilon$	emissividade;
$e$	erro (%);
EA	energia ativa (kWh);
$E_{AS}$	fator de forma geométrica;
ER	energia reativa (kVArh);
$F$	fator de radiação;
$H$	altura cilindro (m);
$H'$	altura bloco (m);
$h$	coeficiente de transferência de calor convectivo ( $W/m^2^{\circ}C$ );
$h_{eq}$	coeficiente de transferência de calor equivalente ( $W/m^2^{\circ}C$ );
$k$	condutividade térmica ( $W/m^{\circ}C$ );
$L_1$	comprimento placa (m);
$L_2$	largura placa (m);
$m$	constante;
MDA	demanda máxima ativa (kW);

$n$	constante;
$Nu$	número de Nusselt;
$Pr$	número de Prandlt;
$P_T$	pressão parcial de vapor (Pa);
$Re$	número de Reynolds;
$T_a$	temperatura do ar (°C);
$T_c$	temperatura final (°C);
$T_d$	temperatura do ponto de orvalho (°C);
$t_{exp}$	tempo predito (h);
$t_f$	tempo predito (h);
$T_{fm}$	temperatura média de congelamento (°C);
$t_{f,placa}$	tempo predito placa (h);
$T_i$	temperatura inicial (°C);
$T_{ic}$	temperatura início de congelamento (°C);
$T_{max}$	temperatura máxima (°C);
$T_{rad}$	temperatura de radiação (°C);
$T_s$	temperatura da superfície (°C);
$Tu$	intensidade da turbulência;
$U$	velocidade média (m/s).
$\overline{u^2}$	média da flutuação da velocidade;
$v$	velocidade do ar (m/s <sup>2</sup> );
$x_i$	fração do componente do alimento;
$x_i^v$	fração volumétrica do componente;

#### Símbolos Gregos

$\beta_1$	dimensão em razão de $H/D$ (cilindro);
$\beta_1$	dimensão em razão de $L_1/H'$ (bloco);
$\beta_2$	dimensão em razão de $L_2/H'$ (bloco);

$\Delta H$	variação da entalpia;
$\varepsilon$	porosidade;
$\lambda_{ef}$	calor latente efetivo (kJ/kg);
$\mu$	viscosidade (Pa.s);
$\rho$	densidade (kg/m <sup>3</sup> );
$\sigma$	constante de Stefan-Boltzmann;

## RESUMO

RENO, Marciu José. **Transferência de calor no congelamento de polpa de goiaba**. 2010. 63 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.\*

O processo de transferência de calor, coeficientes de transferência convectivos, tempos de congelamento e consumo energético foram avaliados durante o congelamento em batelada de polpas de goiaba em túnel de congelamento com corrente de ar forçado. Foram congelados 600 kg de polpa, utilizando três configurações de embalagens que são comuns no processamento industrial. Empilhamento sobre palete no interior da câmara de 40 caixas plásticas contendo em cada uma 15 kg de polpa de goiaba acondicionadas em sacos de polietileno; empilhamento sobre palete de 40 baldes plásticos contendo cada um 15 kg de polpa de goiaba e 3 tambores metálicos sobre palete alinhados lateralmente com capacidade de 200 kg cada. A temperatura dentro de todas as embalagens foi monitorada com sensores de temperatura colocados no interior das amostras em pontos estratégicos para determinação das trocas de calor. A monitoração das temperaturas foi feita com termopares e termoresistências (RTDs) conectados a um sistema de aquisição de dados. A velocidade do ar dentro do túnel foi medida com termomanômetro de fio quente. O consumo energético dos processos também foi medido. O estabelecimento de um sistema de coordenadas para especificar o posicionamento das embalagens e sensores no interior do túnel permitiu a análise dos parâmetros de escoamento do ar e transferência de calor através de superfícies de contorno usando regressão por mínimos quadrados. Correlações do número de Nusselt em função dos números de Reynolds e Prandtl e turbulência foram usadas para determinar os coeficientes de transferência de calor convectivos de acordo com a configuração dos sistemas. Os coeficientes foram aplicados nas predições do tempo de congelamento usando modelos encontrados na literatura. Para todas as configurações as amostras congelaram mais rapidamente na periferia dos arranjos com as temperaturas mais altas localizadas na região central. Nas regiões periféricas foi possível observar a formação de canais preferenciais de escoamento do ar. As estimativas dos valores de  $h$  e conseqüente predição do tempo de congelamento se mostraram mais eficientes para o processamento em baldes. Para tambores, a correlação que leva em consideração os efeitos de um fator de turbulência foi satisfatória e para as caixas, a correlação produziu bons

---

Comitê Orientador: Jaime Vilela de Resende - UFLA (Orientador) e Alexandre de Paula Peres – UFLA

resultados apenas para caixas localizadas na região central do empilhamento. Os tempos de congelamento foram em média de 96 horas para as polpas acondicionadas em tambores; 45,8 horas em sacos de polietileno acondicionados em caixas e de 50,9 horas em baldes. Para as mesmas condições operacionais do equipamento, os resultados mostram que com configurações usando caixas e baldes é possível processar a mesma quantidade de produto com maior qualidade (resfriamento mais rápido) e com cerca de 50% de redução no 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 nestes aspectos.

## ABSTRACT

RENO, Marciu José. **Heat transfer in freezing of guava pulp**. 2010. 63 p. Dissertation (Master Program in Food Science) - Federal University of Lavras, Lavras, MG.\*

This study evaluated the heat transfer by forced convection flow inside a circular tube during the freezing process of guava pulp in batches. The convection heat-transfer coefficients, the freezing time and the energy requirements were also evaluated. For the experiment, 600 kg of guava pulp were frozen, using three common packaging configurations all of them stacked on pallets. In the freezing tunnel, one the configuration settings was made of 40 plastic boxes (HDPE), each containing 15kg of guava pulp filled in polyethylene bags. The second configuration had 40 plastic buckets (HDPE) containing 15kg of guava pulp each and in the third configuration, 3 steel drums were lined up laterally, each of them with 200 kg capacity. The temperature within all packaging was monitored through sensors placed in the samples, in strategic points in order to determine the heat transfers. It were used the thermocouples and resistive thermal devices (RTDs) sensors connected to a data acquisition system to monitor the temperature. The air velocity in the tunnel was measured with a hot wire anemometer. The energy consumed throughout the procedures was also measured. The establishment of coordinate systems designed to specify the position of both packaging and sensors inside the tunnel allowed the airflow parameters and heat transfers analyzes through the contour plots using the least square regression. The turbulence and the Nusselt number correlation as a function of the Reynolds and Prandtl numbers were used to determine the convective heat transfer coefficients according to the configuration of the systems. The coefficients were applied to the freezing time prediction using models found in the literature review. In all configurations, the samples froze more rapidly in the periphery of the arrangements, with the highest temperatures located in the central region of the stacking. It was possible to observe the formation of air flow preferential channels in peripheral regions. Estimates for the  $h$  values and, consequently, the freezing time prediction were more efficient for the configuration that used plastic buckets (HDPE). For the steel drums the correlation that considers the effects of a turbulence factor was satisfactory. As for the plastic boxes (HDPE), the correlation yielded encouraging results only for those boxes located in the central area of the stacking. On average, the

---

Guidance Committee: Jaime Vilela de Resende - UFLA (Major Professor) and Alexandre de Paula Peres - UFLA

freezing times were of 96 hours for the guava pulp in steel drums, of 45.8 hours, in polyethylene bags packed and placed in the plastic boxes (HDPE) and of 50.9 hours, in plastic buckets (HDPE). When compared to process using steel drums and under the same operational conditions of the equipment, the results show that it is possible to process the same amount of product, with higher quality (faster cooling), and about 50% reduction in power consumption with settings of plastic boxes (HDPE) and plastic buckets (HDPE). The decision making over a given configuration should be based on its handling easiness and on the initial cost. Regarding these tow late considerations, the guava pulp processing in plastic buckets (HDPE) have shown more advantageous.

## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a maior parte da produção de alimentos é sazonal, principalmente de origem vegetal e este fato motiva e torna necessário o desenvolvimento de métodos essenciais que prolonguem seu período de armazenamento. O Brasil é também um dos maiores produtores em vários mercados de frutas, sendo notável a grande variedade destes itens no mercado. Porém, o índice de perdas neste setor agrícola pode chegar a 40% dependendo do produto. Por exemplo, a goiaba que está entre as espécies de maior produção e maiores índices de perdas.

Entre os principais problemas apontados como responsáveis pela perda destes produtos estão a falta de infra-estrutura para a sua preservação, a falta de equipamentos e o armazenamento deficiente.

Dentro deste contexto, um dos processos a ser focado é o processo de congelamento, que é um método de preservação importante na cadeia do frio. Uma vez instalado, contribui para a redução destas perdas, para a agregação de valor ao produto, além de disponibilizar produtos de qualidade durante todo o ano.

As taxas de transferência de calor são determinadas principalmente a partir das propriedades termofísicas que ocorrem em função da água e de sua mudança de estado durante o congelamento. O conhecimento dos fatores que promovem as condições ótimas para a mudança de estado da água é essencial para o controle operacional do processo de congelamento (George, 1993).

O processamento industrial na maioria dos casos utiliza as mesmas condições operacionais para diferentes produtos, sendo que a única variável é o tempo de residência da polpa de fruta no equipamento e este, por sua vez, é pré-estabelecido de acordo com a quantidade de produto a ser processado.



O processo é realizado em câmaras ou túneis de congelamento de forma empírica, não havendo um controle sistemático de parâmetros operacionais como a temperatura do ar, velocidade do ar e capacidade frigorífica do equipamento que podem contribuir diretamente para a minimização do tempo de congelamento e influenciar quanto aos aspectos econômicos do processo. Na prática industrial, estes parâmetros são mantidos constantes e, por várias vezes, o produto não é processado adequadamente, não atendendo aos atributos de qualidade necessária ao armazenamento posterior, ou então o processo se torna dispendioso.

Existe uma grande necessidade de informações mais precisas sobre os coeficientes de transferência de calor para uma variedade de situações práticas. O efeito das condições variáveis com o tempo também é importante. Além do valor da carga térmica média do processo, o projeto industrial freqüentemente necessita de estimativas das taxas de remoção de calor em função do tempo, para produtos de formas geométricas bastante complexas.

Em caixas, baldes e tambores com grande quantidade de produto, o congelamento de toda a embalagem individual é importante. Isto se torna mais necessário quando o produto tem uma composição heterogênea, forma irregular, ou diferenças devido à porosidades no interior do produto, ou entre o produto e a embalagem. Quando ocorrem estas situações, o principal problema para o projeto do sistema está na falha em se obter condições uniformes de processamento no interior da câmara de congelamento. Entre estas situações, estão: a distribuição da velocidade do ar e da temperatura por todo o produto, a incerteza sobre a relação entre os coeficientes de transferência de calor superficiais e o meio de resfriamento.

Os objetivos principais deste trabalho foram:

Estudo dos processos de transferência de calor durante o congelamento da polpa de goiaba;

Caracterizar o processo de transferência de calor pela determinação dos coeficientes de transferência de calor nas configurações;

Determinar os tempos de processamentos quando os produtos estão acondicionados em embalagens com diferentes geometrias (caixas, baldes e tambores) levando em consideração as características inerentes aos processamentos (distribuição de temperatura, distribuição da velocidade do ar e formação de canais preferenciais);

Determinar o consumo energético do processamento de acordo com a configuração usada no processamento.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Polpas de fruta

Por serem perecíveis e deteriorarem em poucos dias, a comercialização de frutas “in natura” é bastante difícil a grandes distâncias. Além disso, estima-se que perdas pós-colheita variem de 15 a 50%. Em vista destas características, 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).

A legislação brasileira do Ministério da Agricultura define polpa de fruta como o produto não fermentado, não concentrado, não diluído, obtida pelo esmagamento de frutos polposos, através de um processo tecnológico adequado, com um teor mínimo de sólidos totais proveniente da parte comestível do fruto, específico para cada um destes mesmos (Brasil, 2000).

As polpas devem ser preparadas com frutas sãs, limpas, isentas de matéria terrosa, de 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).

No rótulo da embalagem do produto, deverá constar a denominação “polpa”, seguido do nome da fruta de origem. As características físicas, químicas e sensoriais deverão corresponder às provenientes do fruto de sua origem, observando-se os limites mínimos e máximos fixados para cada polpa de fruta, previstos nas normas específicas (Brasil, 2000).

A polpa de fruta tem grande importância como matéria-prima em indústrias de conservas de frutas, que podem produzir as polpas nas épocas de safra, armazená-las e reprocessá-las nos períodos mais propícios, ou segundo a

demanda do mercado consumidor, como doces em massa, geléias e néctares (Hoffmann, 1997). Ao mesmo tempo, também são comercializadas para outras indústrias que utilizam a polpa de fruta como parte da formulação de iogurtes, doces, biscoitos, bolos, sorvetes, refrescos e alimentos infantis (Bueno et al., 2002).

Com a tecnologia disponível, o mercado de polpas de frutas congeladas tem tido um crescimento razoável e apresenta grande potencial mercadológico em função da variedade de frutas com sabores exóticos bastante agradáveis. Devido à inexistência de padrões para todos os tipos de frutas, encontram-se no mercado produtos sem uniformidade (Bueno et al., 2002).

## **2.2 Goiaba**

A goiaba é originária da região tropical das Américas, foi disseminada para as diferentes regiões do mundo (Lemos et al., 1995) e constitui-se em uma das mais importantes matérias-primas para as indústrias de sucos, polpas e néctares. Tem grande aceitação no mercado, sendo considerada uma das melhores fontes de vitamina C, apresentando conteúdo de ácido ascórbico variando de 55 a 1.044 mg de ácido ascórbico por 100 g de polpa, de acordo com a cultivar, local e manejo (Carvalho, 1994).

Considerando que a maioria da produção de frutos de goiabeira concentra-se no período de janeiro a fevereiro e a importância do aproveitamento dos excedentes de produção, tem-se que o processamento da goiaba em derivados, como polpas íntegras e trituradas, merece atenção dada à utilização dos mesmos como matérias-primas de indústrias secundárias ou para consumo direto (Brunini et al., 2003).

A polpa de fruta substitui perfeitamente a fruta in natura no preparo de sucos, néctares, doces, geléias, sorvetes e apresenta a vantagem de estar

disponível no mercado em período de entressafra da fruta (Evangelista & Vieites, 2006).

O processamento de goiaba para obtenção de polpa é uma atividade agroindustrial importante na medida em que agrega valor econômico à fruta, evitando desperdícios e minimizando as perdas que podem ocorrer durante a comercialização do produto in natura (Furtado et al., 2000), além de permitir estender sua vida útil com manutenção da qualidade (Evangelista & Vieites, 2006).

### **2.3 Congelamento**

O congelamento é um dos melhores métodos para a armazenagem de um produto, pois ocorrem transformações mínimas que assim ajudam a preservar seu valor nutritivo, sensorial, entre outros fatores responsáveis pela qualidade do produto. Nos alimentos congelados, a qualidade final está relacionada às condições empregadas durante o processo de congelamento e às condições de armazenamento (Ciabotti, 2000).

Amer & 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 processo de redução da temperatura pode ser dividido em três distintas fases: um pré-resfriamento, fase em que o material é resfriado a partir de sua temperatura inicial para temperatura do ponto de congelamento; uma fase onde ocorre uma mudança de fase representa a cristalização da maior parte da água, e uma fase em que o produto chegue a temperatura final estabelecida.

Quando a fruta é congelada na forma de polpa, o efeito do processo de congelamento é verificado pela alteração na consistência da polpa e através 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).

#### 2.4 Propriedades termofísicas

As Tabelas 1 e 2, segundo Ashrae Handbook (2002), mostram as equações que podem ser utilizadas para estimativa das propriedades termofísicas baseadas na composição da polpa de goiaba em função da temperatura de processamento.

TABELA 1 Modelos de propriedades termofísicas para os componentes dos alimentos ( $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Propriedade	Componente	Modelo
$k$ (W/m $^{\circ}\text{C}$ )	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	$k = 3,2962 \cdot 10^{-1} + 1,4011 \cdot 10^{-3}T - 2,9069 \cdot 10^{-6}T^2$
$\rho$ (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 $^{\circ}\text{C}$ )	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 et al., 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)	$k = 5,7109 \cdot 10^{-1} + 1,7625 \cdot 10^{-3}T - 6,7036 \cdot 10^{-6}T^2$
	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho = 9,9718 \cdot 10^2 + 3,1439 \cdot 10^{-3}T - 3,7574 \cdot 10^{-3}T^2$
	$c_p$ (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)	$k = 2,2196 - 6,2489 \cdot 10^{-3}T + 1,0154 \cdot 10^{-4}T^2$
	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho = 9,1689 \cdot 10^2 - 1,307110^{-1}T$
	$c_p$ (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 através da equação (1) segundo Ashrae Handbook (2002).

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

Onde  $\varepsilon$  = porosidade,  $x_i$  = fração do componente e  $\rho_i$  = densidade do componente.

Para o cálculo do calor específico pode ser utilizada a equação (2) (Ashrae Handbook, 2002).

$$c_p = \sum c_i x_i \quad (2)$$

Onde  $c_i$  = calor específico do componente.

Para o cálculo da condutividade térmica podem ser utilizadas as equações (3) e (4) (Ashrae Handbook, 2002).

$$k = \sum x_i^p k_i \quad (3)$$

$$x_i^p = \frac{x_i / \rho_i}{\sum x_i / \rho_i} \quad (4)$$

Onde  $k_i$  = 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 sistemas modelos e os resultados são aplicados para alimentos de composição similar. Para simular ensaios com polpas de frutas, tem-se usado soluções de sacarose e diferentes tipos de géis, com suas concentrações ajustadas de acordo com o teor de sólidos solúveis da polpa (Silva, 1994).

## 2.5 Velocidade do ar

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).

Outra questão importante é a distribuição do ar em relação à geometria da câmara e a uniformidade da trajetória do escoamento. Dentro deste contexto, o controle do escoamento de ar é um ponto crítico na instalação. No congelamento de alimentos, o perfil de velocidade do escoamento determina a eficiência e a homogeneidade dos tratamentos aos quais o produto está sendo submetido. Em equipamentos usados no processamento de alimentos, o escoamento do ar é geralmente turbulento e 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 para a determinação da vazão e cálculos de transferência de calor (Resende et al., 2002).

Mirade & Daudin (1998); Peyrin et al. (1995) têm relatado dificuldades relacionadas às medidas da velocidade do ar. Dentre estas estão: (1) O escoamento é instável; (2) A direção do escoamento do ar é fortemente influenciada pela presença de objetos e, nas proximidades do ponto de medida, esta é mais difícil de ser avaliada; (3) A temperatura do ar é, em geral, muito diferente daquela utilizada pelo fabricante para calibrar o aparelho que freqüentemente está em torno de  $-20^{\circ}\text{C}$ .

## **2.6 Coeficientes de transferência de calor convectivos**

O coeficiente 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 ( $h$ ) (Chavarria & Heldman, 1984).

Um dos grandes desafios continua sendo a determinação do coeficiente convectivo de transferência de calor, 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).

Usando métodos experimentais, a determinação deste coeficiente é muito complexa pela quantidade de fatores que o influenciam. Soma-se a isso o fato de que a determinação experimental da temperatura da superfície implica um grau de incerteza grande, pela dificuldade para a colocação e fixação do sensor na superfície das frutas (Amendola, 2003).

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).

Segundo Kondjoyan (2006), muitas vezes o total de energia trocada na superfície dos alimentos por convecção, radiação e evaporação é descrito utilizando um coeficiente de transferência efetivo ( $h_{ef}$ ), como na equação (5).

$$h_{ef} = h \frac{T_a - T_s}{T_{max} - T_s} + F \epsilon \sigma \frac{T_{rad}^4 - T_s^4}{T_{max} - T_s} + k \Delta H \frac{P_{T_s} - a_{ws} P_{T_s}}{T_{max} - T_s}$$

convecção →      radiação →      evaporação

(5)

Onde  $T_a$  = temperatura do ar,  $T_{rad}$  = temperatura de radiação,  $T_d$  = temperatura do ponto de orvalho,  $T_{max}$  = temperatura máxima,  $T_s$  = temperatura da superfície,  $F$  = fator de radiação,  $\epsilon$  = emissividade,  $\sigma$  = constante de Stefan-

Boltzmann,  $\Delta H$  = variação da entalpia,  $P_T$  = pressão parcial de vapor na temperatura  $T$ ,  $a_{ws}$  = atividade de água na superfície.

Valores médios do coeficiente de transferência dados pela literatura resultam de uma interação entre: as propriedades do fluxo do ar (velocidade média e turbulência), e as propriedades do alimento (forma, a dimensão, direção do fluxo) (Verboven et al., 1997).

Sob convecção forçada, coeficientes de transferência de calor e massa em torno de placas, cilindros e esferas são dados na literatura por correlações do número de Nusselt ou Sherwood em função do número de Reynolds. Correlações expressam a diminuição do coeficiente de transferência de calor com o aumento da quantidade de produto e isto aumenta com a velocidade do ar. Mas isto não pode ser aplicado diretamente em situações industriais, pois estas não levam em conta os efeitos de: turbulência do escoamento, forma do produto e direção do fluxo no produto (Kondjoyan, 2006).

Para a estimativa dos valores de  $h$  em torno de dutos retangulares pode-se utilizar as correlações enumeradas abaixo, usando o diâmetro hidráulico como dimensão característica.

Para o cálculo do  $D_h$  (diâmetro hidráulico) é utilizada a equação (6).

$$D_h = \frac{2ab}{(a+b)} \quad (6)$$

Onde  $a$  = largura do duto,  $b$  = altura do duto para escoamento do ar.

O número de Reynolds é calculado através da equação (7).

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (7)$$

Onde  $\rho$  = densidade,  $v$  = velocidade,  $\mu$  = viscosidade e  $D = D_h$ .

Para o cálculo do número de Nusselt podem ser utilizadas as equações (8) e (9) (Dittus & Boelter, 1985).

$$Nu = 0,116[Re^{2/3} - 125]Pr^{1/3}\left[1 + \frac{D_h}{L_1}\right]^{2/3} \quad (8)$$

Para  $2.000 < Re < 10.000$ , onde  $L_1$  = comprimento da placa e  $Pr$  = número de Prandtl.

$$Nu = 0,023(Re)^{0,8}Pr^{1/3} \quad (9)$$

Para  $Re \geq 10.000$ .

Os valores de  $h$  são calculados através da correlação (10).

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (10)$$

Quando  $L_1/Dh \leq 60$ , é necessário o cálculo do coeficiente de transferência de calor convectivo equivalente ( $h_{eq}$ ), que é valor utilizado para base de cálculos.

Então, os valores de  $h_{eq}$  são calculados através da equação (11).

$$h = h_{eq}\left[1 + 1,4\frac{D_h}{L_1}\right] \quad (11)$$

Para o cálculo dos valores de  $h$  em torno de cilindros, a estimativa do número de Nusselt pode ser feita utilizando as correlações (12) e (13) (Salvadori & Mascheroni, 1996) ou com correlação de Nusselt que considere um fator de turbulência no escoamento.

$$Nu = 0,193Pr^{0,33}Re^{0,618} \quad (12)$$

Para  $Re < 40.000$ .

$$Nu = 0,027Pr^{0,33}Re^{0,806} \quad (13)$$

Para  $Re > 40.000$ .

A correlação (14) é utilizada para obtenção do número de Nusselt que considera um fator de turbulência no escoamento do ar (Kondjoyan, 2006).

$$Nu = ARe^n(1 + BtuRe^m) \quad (14)$$

Onde  $A$ ,  $n$ ,  $B$  e  $m$  são valores tabelados e dependentes da razão  $H/D$  (diâmetro/altura) do cilindro e do ângulo de contato entre a superfície do recipiente e o fluxo de ar, o fator de turbulência  $(Tu) = \sqrt{\bar{u}^2}/U$ , sendo  $\bar{u}^2 =$  média da flutuação da velocidade, e  $U =$  velocidade média (m/s).

## 2.7 Tempo de congelamento

A distribuição da temperatura dentro de um produto varia consideravelmente durante o processo de congelamento, o tempo de

congelamento deve ser definido em relação a uma posição. O centro térmico é geralmente tomado como referência, este é o local onde a temperatura muda mais lentamente. 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 térmico) (Hossain et al., 1992).

## 2.8 Predição do tempo de congelamento

De acordo com Cleland & Earle (1982), o tempo de congelamento de um produto multidimensional pode ser determinado através do tempo de congelamento de uma placa plana que opere sob as mesmas condições e um mesmo fator de forma, assinalada inicialmente para estes, como *EHTD* e, mais recentemente, como  $E_{AS}$ , segundo a equação (15).

$$t_{pred} = \frac{t_{f,placa}}{E_{AS}} \quad (15)$$

O parâmetro  $E_{AS}$  pode ser definido como a razão entre o tempo de congelamento de um corpo de prova e tempo real de congelamento para o produto, de dimensões iguais, ambos sendo expostos às mesmas condições. Para um cilindro infinito  $E_{AS} = 2$ , enquanto que para uma esfera  $E_{AS} = 3$ . Diversas expressões foram derivadas para o cálculo do  $E_{AS}$  para outras formas: a versão

original, válida para algumas geometrias simples e outras fórmulas empíricas, válidas para geometrias regulares e irregulares.

Para calcular  $t_{f, placa}$  pode-se utilizar o método de Pham (Pham, 1986). Cleland & Earle (1982) recomendam este método como uma base para equação, à qual o fator dimensional,  $E_{AS}$ , pode ser aplicado. O tempo de congelamento de uma placa é calculado com a equação (16), que divide o processo em duas fases, pré-resfriamento e congelamento, e considera a equação modificada de Plank para a mudança de fase:

$$t_{f, placa} = 2 \frac{LV}{kA'} \left( \frac{\Delta H_1}{\Delta T_1} + \frac{\Delta H_2}{\Delta T_2} \right) \left( \frac{1}{Bi} + \frac{1}{4} \right) \quad (16)$$

Onde  $\Delta H_1 = \rho_o c_{p_o} (T_i - T_{fm})$ ;  
 $\Delta H_2 = \lambda_{ef} + \rho_o c_{p_f} (T_{fm} - T_c)$ ;  
 $\Delta T_1 = \frac{T_i + T_{fm}}{2} - T_a$ ;  
 $\Delta T_2 = T_{fm} - T_a$ ;  
 $T_{fm} = 1,8 + 0,263 T_o + 0,105 T_a$ ;  
 $Bi = \frac{hD}{k}$

Sendo  $T_i$  = temperatura inicial do produto,  $T_a$  = temperatura média do ar,  $T_c$  = temperatura final do produto,  $\lambda_{ef}$  = 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) podem ser utilizadas as equações (17) e (18).

$$E_{AS} = \frac{\left(1 + \frac{2}{Bt}\right) \left(1 + \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2}\right)}{\left[\frac{2}{Bt} + \frac{2}{3\left(1 + \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2}\right)} + \frac{1 + \beta_1 + \beta_2}{3}\right]} \quad (17)$$

Para bloco retangular, onde  $\beta_1 =$  (largura/altura) e  $\beta_2$  (comprimento/altura) do bloco.

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

Para cilindros com altura > diâmetro, onde  $\beta_1 =$  (altura /diâmetro).



### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Polpa de goiaba

A polpa de goiaba -- cultivar Pedro Sato -- foi fornecida pela Casa da Goiaba, agroindústria localizada no município de Lavras, MG e à qual adicionou-se conservante (sorbato de potássio 0,5%) para preservação da qualidade microbiológica até o momento do processamento.

#### 3.2 Congelamento da polpa de goiaba

O congelamento da polpa foi feito em túnel de congelamento em batelada com corrente forçada de ar dirigida sobre o produto. A Figura 1 esquematiza o túnel de congelamento.

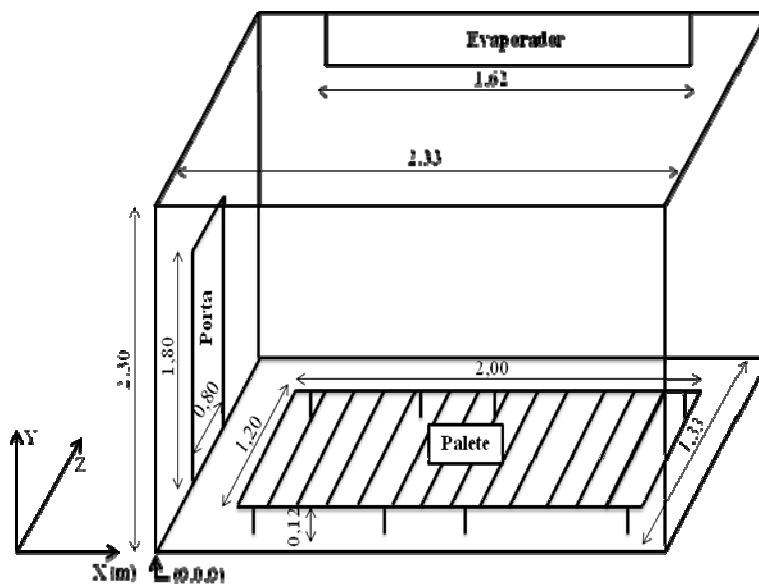


FIGURA 1 Dimensões internas do túnel de congelamento utilizado.

Foram utilizados 3 tipos de embalagens para o congelamento da polpa de goiaba, tambores metálicos, baldes de PEAD (polietileno de alta densidade) e caixas plásticas de PEAD. Em cada montagem foram congelados 600 kg de polpa, distribuídos em 40 caixas contendo 15 kg de polpa de goiaba na primeira configuração, 40 baldes contendo 15 kg foram utilizados na segunda configuração e 3 tambores contendo 200 kg foram utilizados na terceira configuração. Nos tambores e caixas foram utilizados sacos de polietileno para acondicionamento da polpa.

Os empilhamentos foram feitos mantendo todos os espaços laterais iguais (entre a pilha e as paredes do túnel) e também os espaços de frente e fundo, ou seja, todas as configurações foram colocadas exatamente na região central do túnel de congelamento.

A Figura 2 mostra o empilhamento das caixas plásticas sobre os paletes para o congelamento das polpas.

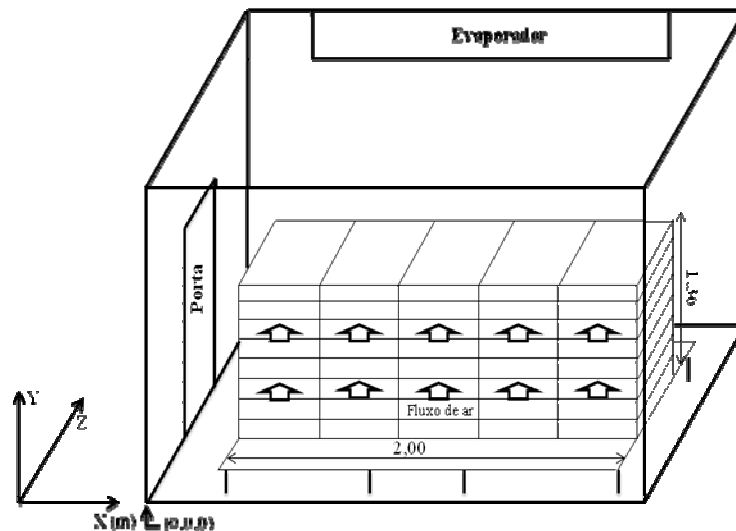


FIGURA 2 Dimensões do empilhamento das caixas.

A dimensão das caixas foi de 0,60 m (comprimento) x 0,40 m (largura) x 0,17 m (altura) e constituídas de polietileno de alta densidade, além de serem vazadas (todos os lados) para permitir a passagem de ar.

As amostras (polpas) foram acondicionadas em sacos plásticos e colocadas dentro das caixas plásticas. Todos os sacos contendo as polpas continham as mesmas dimensões, 0,47 m (comprimento) x 0,36 m (largura) x 0,086 (altura).

A Figura 3 mostra o empilhados dos baldes sobre os paletes e suas dimensões. As dimensões dos baldes foram de 0,32 m (diâmetro) x 0,37 m (altura). Estes também são constituídos de polietileno de alta densidade, material adequado para o processamento a baixas temperaturas.

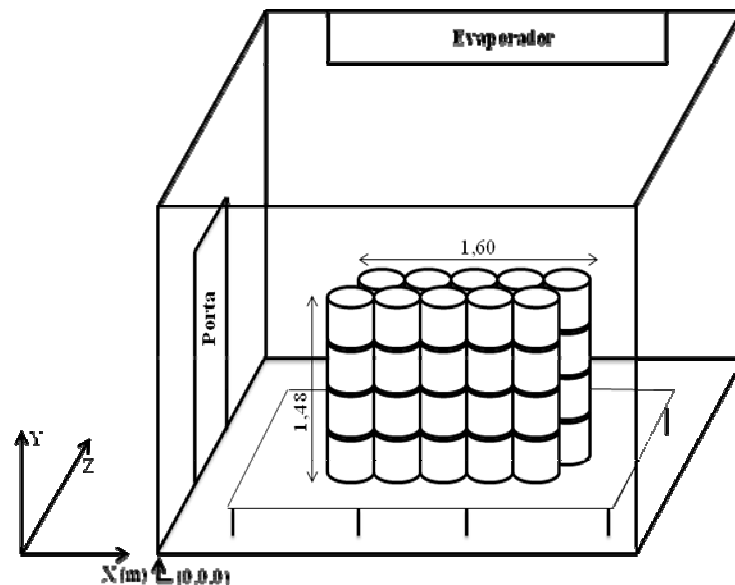


FIGURA 3 Dimensões do empilhamento dos baldes.

A Figura 4 mostra a disposição dos tambores dentro do túnel de congelamento. As dimensões dos tambores foram: 0,82 m (altura) e 0,57 m (diâmetro), sendo contituídos de material metálico.

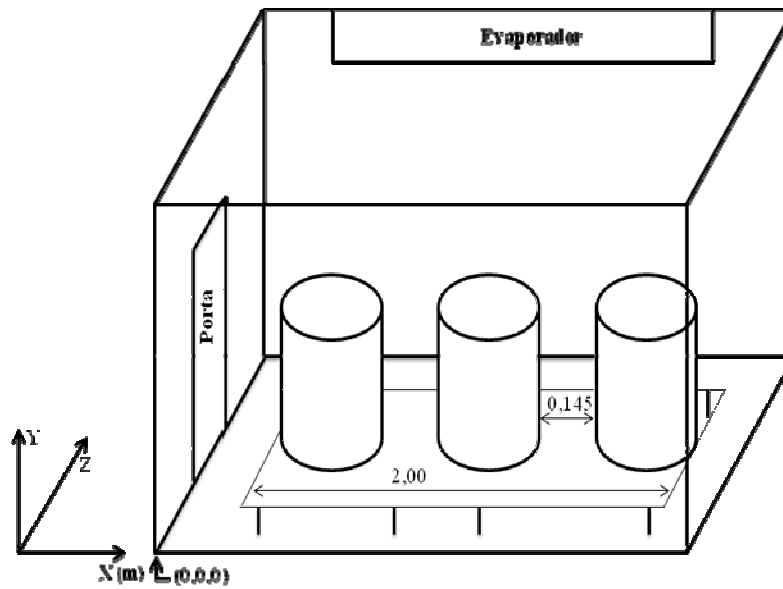


FIGURA 4 Disposição dos tambores no túnel de congelamento.

### 3.3 Monitoramento da temperatura das amostras e ar

A Tabela 3 mostra as coordenadas referentes ao posicionamento dos termopares e termoresistências (Pt100) dentro das amostras nas caixas. Os sensores foram posicionados no centro geométrico dos sacos plásticos.

TABELA 3 Posição dos sensores no empilhamento das caixas.

X(m)	Y(m)	Z(m)
0,365	0,163	0,665
0,765	0,163	0,665
1,165	0,163	0,665
1,565	0,163	0,665
1,965	0,163	0,665
0,365	0,333	0,665
0,765	0,333	0,665
1,165	0,333	0,665
1,565	0,333	0,665
1,965	0,333	0,665
0,365	0,503	0,665
0,765	0,503	0,665
1,165	0,503	0,665
1,565	0,503	0,665
1,965	0,503	0,665
0,365	0,673	0,665
0,765	0,673	0,665
1,165	0,673	0,665
1,565	0,673	0,665
1,965	0,673	0,665
0,365	0,843	0,665
0,765	0,843	0,665
1,165	0,843	0,665
1,565	0,843	0,665
1,965	0,843	0,665
0,365	1,013	0,665
0,765	1,013	0,665
1,165	1,013	0,665
1,565	1,013	0,665
1,965	1,013	0,665
0,365	1,183	0,665
0,765	1,183	0,665
1,165	1,183	0,665
1,565	1,183	0,665
1,965	1,183	0,665
0,365	1,353	0,665
0,765	1,353	0,665
1,165	1,353	0,665
1,565	1,353	0,665
1,965	1,353	0,665

Para se obter o histórico das temperaturas, foram instalados termopares tipo T (cobre-constantan AWG-30) e *RTDs* (Pt100) em toda a configuração experimental, em pontos escolhidos entre as amostras, ou arranjo de 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 coletados em intervalos de 2 minutos utilizando o *software* LabVIEW 8.5.

A Tabela 4 apresenta as coordenadas de posição dos termopares e Pt100 dentro das amostras nos baldes. Os sensores foram posicionados no centro geométrico das amostras.

A Tabela 5 apresenta as coordenadas de posicionamento dos termopares e Pt100 dentro das amostras nos tambores. Os sensores foram posicionados nos tambores de modo a permitir uma melhor verificação da transferência de calor.

A temperatura do ar foi monitorada através da leitura de um arranjo de termopares tipo T, acoplados em paralelo e distribuídos uniformemente na frente do evaporador. Os registros das temperaturas foram feitos através do sistema de aquisição de dados.

Esta técnica termométrica permite determinar a temperatura média do ar de resfriamento ao longo de toda a seção de saída do evaporador durante todo o processamento.

TABELA 4 Posição dos sensores no empilhamento dos baldes.

X(m)	Y(m)	Z(m)
0,525	0,248	0,505
0,845	0,248	0,505
1,165	0,248	0,505
1,481	0,248	0,505
1,805	0,248	0,505
0,525	0,618	0,505
0,845	0,618	0,505
1,165	0,618	0,505
1,481	0,618	0,505
1,805	0,618	0,505
0,525	0,988	0,505
0,845	0,988	0,505
1,165	0,988	0,505
1,481	0,988	0,505
1,805	0,988	0,505
0,525	1,358	0,505
0,845	1,358	0,505
1,165	1,358	0,505
1,481	1,358	0,505
1,805	1,358	0,505
0,525	0,248	0,825
0,845	0,248	0,825
1,165	0,248	0,825
1,481	0,248	0,825
1,805	0,248	0,825
0,525	0,618	0,825
0,845	0,618	0,825
1,165	0,618	0,825
1,481	0,618	0,825
1,805	0,618	0,825
0,525	0,988	0,825
0,845	0,988	0,825
1,165	0,988	0,825
1,481	0,988	0,825
1,805	0,988	0,825
0,525	1,358	0,825
0,845	1,358	0,825
1,165	1,358	0,825
1,481	1,358	0,825
1,805	1,358	0,825

TABELA 5 Posição dos sensores nos tambores.

X(m)	Y(m)	Z(m)
0,220	0,240	0,665
0,335	0,240	0,665
0,450	0,240	0,665
0,935	0,240	0,665
1,050	0,240	0,665
1,165	0,240	0,665
1,280	0,240	0,665
1,395	0,240	0,665
1,880	0,240	0,665
1,995	0,240	0,665
2,110	0,240	0,665
0,220	0,510	0,665
0,335	0,510	0,665
0,450	0,510	0,665
0,935	0,510	0,665
1,050	0,510	0,665
1,165	0,510	0,665
1,280	0,510	0,665
1,395	0,510	0,665
1,880	0,510	0,665
1,995	0,510	0,665
2,110	0,510	0,665
0,220	0,780	0,665
0,335	0,780	0,665
0,450	0,780	0,665
0,935	0,780	0,665
1,050	0,780	0,665
1,165	0,780	0,665
1,280	0,780	0,665
1,395	0,780	0,665
1,880	0,780	0,665
1,995	0,780	0,665
2,110	0,780	0,665



### 3.4 Medição da velocidade do ar

A velocidade do ar foi determinada em diferentes pontos do túnel de congelamento utilizando um anemômetro de fio quente (TSI – modelo 9535-USA). A Figura 5 mostra os pontos de medidas no túnel de congelamento onde o anemômetro foi introduzido para determinação da velocidade do ar.

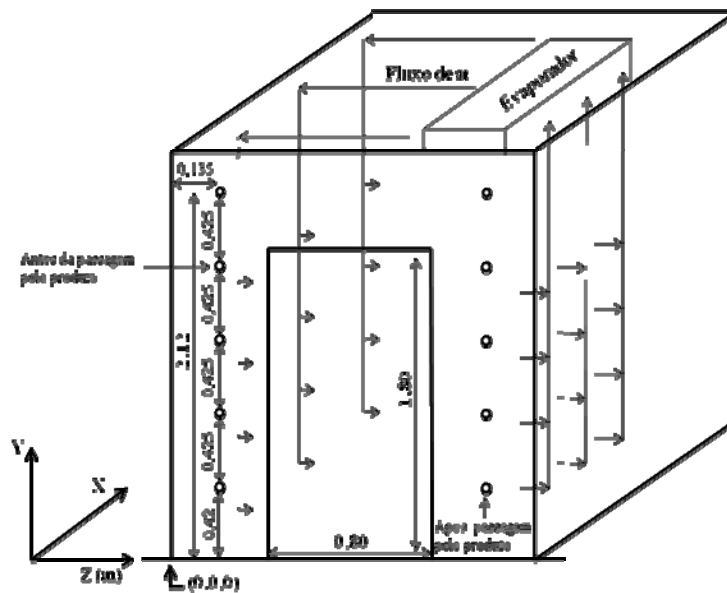


FIGURA 5 Pontos de medidas experimentais da velocidade do ar.

Através da Figura 5, pode-se verificar como ocorre o fluxo de ar dentro do túnel de congelamento, no evaporador existem forçadores (ventiladores) que forçam a passagem do ar pelo produto e, em seguida, o retorno ao evaporador.

A Tabela 6 mostra as coordenadas de cada ponto de medida da velocidade do ar. Estas coordenadas foram utilizadas para todas as configurações.

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

TABELA 6 Coordenadas das medidas de velocidade do ar para todas as configurações testadas.

X(m)	Y(m)	Z(m)
0,000	0,420	0,135
0,090	0,420	0,135
0,180	0,420	0,135
0,270	0,420	0,135
0,360	0,420	0,135
0,450	0,420	0,135
0,540	0,420	0,135
0,630	0,420	0,135
0,720	0,420	0,135
1,610	0,420	0,135
1,700	0,420	0,135
1,790	0,420	0,135
1,880	0,420	0,135
1,970	0,420	0,135
2,060	0,420	0,135
2,150	0,420	0,135
2,240	0,420	0,135
2,330	0,420	0,135
0,000	0,845	0,135
0,090	0,845	0,135
0,180	0,845	0,135
0,270	0,845	0,135
0,360	0,845	0,135
0,450	0,845	0,135

“...continua...”

“TABELA 6, Cont.”

0,540	0,845	0,135
0,630	0,845	0,135
0,720	0,845	0,135
1,610	0,845	0,135
1,700	0,845	0,135
1,790	0,845	0,135
1,880	0,845	0,135
1,970	0,845	0,135
2,060	0,845	0,135
2,150	0,845	0,135
2,240	0,845	0,135
2,330	0,845	0,135
0,000	1,270	0,135
0,090	1,270	0,135
0,180	1,270	0,135
0,270	1,270	0,135
0,360	1,270	0,135
0,450	1,270	0,135
0,540	1,270	0,135
0,630	1,270	0,135
0,720	1,270	0,135
1,610	1,270	0,135
1,700	1,270	0,135
1,790	1,270	0,135
1,880	1,270	0,135
1,970	1,270	0,135
2,060	1,270	0,135
2,150	1,270	0,135
2,240	1,270	0,135
2,330	1,270	0,135
0,000	1,695	0,135
0,090	1,695	0,135
0,180	1,695	0,135
0,270	1,695	0,135
0,360	1,695	0,135
0,450	1,695	0,135
0,540	1,695	0,135
0,630	1,695	0,135
0,720	1,695	0,135

“...continua...”

“ TABELA 6, Cont.”

1,610	1,695	0,135
1,700	1,695	0,135
1,790	1,695	0,135
1,880	1,695	0,135
1,970	1,695	0,135
2,060	1,695	0,135
2,150	1,695	0,135
2,240	1,695	0,135
2,330	1,695	0,135
0,000	2,120	0,135
0,090	2,120	0,135
0,180	2,120	0,135
0,270	2,120	0,135
0,360	2,120	0,135
0,450	2,120	0,135
0,540	2,120	0,135
0,630	2,120	0,135
0,720	2,120	0,135
1,610	2,120	0,135
1,700	2,120	0,135
1,790	2,120	0,135
1,880	2,120	0,135
1,970	2,120	0,135
2,060	2,120	0,135
2,150	2,120	0,135
2,240	2,120	0,135
2,330	2,120	0,135
0,000	0,420	1,195
0,090	0,420	1,195
0,180	0,420	1,195
0,270	0,420	1,195
0,360	0,420	1,195
0,450	0,420	1,195
0,540	0,420	1,195
0,630	0,420	1,195
0,720	0,420	1,195
1,610	0,420	1,195
1,700	0,420	1,195
1,790	0,420	1,195

“...continua...”

“TABELA 6, Cont.”

1,880	0,420	1,195
1,970	0,420	1,195
2,060	0,420	1,195
2,150	0,420	1,195
2,240	0,420	1,195
2,330	0,420	1,195
0,000	0,845	1,195
0,090	0,845	1,195
0,180	0,845	1,195
0,270	0,845	1,195
0,360	0,845	1,195
0,450	0,845	1,195
0,540	0,845	1,195
0,630	0,845	1,195
0,720	0,845	1,195
1,610	0,845	1,195
1,700	0,845	1,195
1,790	0,845	1,195
1,880	0,845	1,195
1,970	0,845	1,195
2,060	0,845	1,195
2,150	0,845	1,195
2,240	0,845	1,195
2,330	0,845	1,195
0,000	1,270	1,195
0,090	1,270	1,195
0,180	1,270	1,195
0,270	1,270	1,195
0,360	1,270	1,195
0,450	1,270	1,195
0,540	1,270	1,195
0,630	1,270	1,195
0,720	1,270	1,195
1,610	1,270	1,195
1,700	1,270	1,195
1,790	1,270	1,195
1,880	1,270	1,195
1,970	1,270	1,195
2,060	1,270	1,195

“...continua...”

“TABELA 6, Cont.”

---

2,150	1,270	1,195
2,240	1,270	1,195
2,330	1,270	1,195
0,000	1,695	1,195
0,090	1,695	1,195
0,180	1,695	1,195
0,270	1,695	1,195
0,360	1,695	1,195
0,450	1,695	1,195
0,540	1,695	1,195
0,630	1,695	1,195
0,720	1,695	1,195
1,610	1,695	1,195
1,700	1,695	1,195
1,790	1,695	1,195
1,880	1,695	1,195
1,970	1,695	1,195
2,060	1,695	1,195
2,150	1,695	1,195
2,240	1,695	1,195
2,330	1,695	1,195
0,000	2,120	1,195
0,090	2,120	1,195
0,180	2,120	1,195
0,270	2,120	1,195
0,360	2,120	1,195
0,450	2,120	1,195
0,540	2,120	1,195
0,630	2,120	1,195
0,720	2,120	1,195
1,610	2,120	1,195
1,700	2,120	1,195
1,790	2,120	1,195
1,880	2,120	1,195
1,970	2,120	1,195
2,060	2,120	1,195
2,150	2,120	1,195
2,240	2,120	1,195
2,330	2,120	1,195

---

### 3.5 Determinação do consumo energético

O consumo energético das diferentes configurações 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) e os parâmetros 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 equipamento (túnel de congelamento), ou seja, inicialmente foram feitas as montagens (600 kg, nos diferentes recipientes) e, em seguida, o túnel de congelamento foi ligado.

### 3.6 Determinação do coeficiente de transferência de calor convectivos

Os valores dos coeficientes de transferência de calor convectivos ( $h$ ) do ar foram estimados através de equações apresentadas na seção 2.6. Essas equações levam em consideração as velocidades e as propriedades do ar, assim como a turbulência nos escoamentos.

A Tabela 7 mostra os valores das propriedades do ar seco utilizadas nos cálculos segundo MSPC (2010), nas temperaturas médias correspondentes a cada processamento.

TABELA 7 Propriedades do ar seco sob pressão normal.

	$\rho$ (kg.m <sup>-3</sup> )	$\mu$ (Pa.s)	$k$ (W.m <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup> )	$Pr$
$T = -18,37$ °C (baldes)	1,381	0,000016464	0,0196	0,718
$T = -19,33$ °C (caixas)	1,386	0,000016424	0,0195	0,718
$T = -22,66$ °C (tambores)	1,402	0,000016263	0,0193	0,719

### 3.6.1 Caixas

Os valores de  $h$  referentes ao congelamento da polpa nas caixas foram estimados através das seguintes correlações baseadas no diâmetro hidráulico do duto retangular formado entre as superfícies das amostras (sacos de polietileno) e o fundo da caixa superior do empilhamento. A Figura 6 esquematiza o acondicionamento dos sacos com polpa de goiaba dentro das caixas.

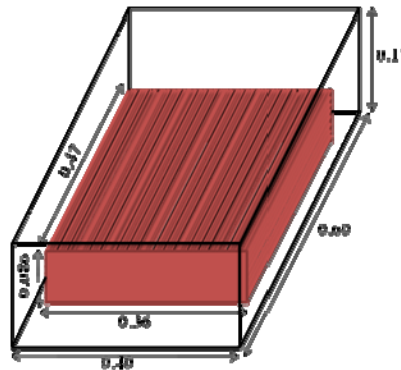


FIGURA 6 Esquema do acondicionamento das polpas nos sacos dentro das caixas.

Para o cálculo do  $Dh$  (diâmetro hidráulico), foi utilizada a equação (6).

O número de Reynolds foi calculado através da equação (7).

Para o cálculo do número de Nusselt, foram utilizadas as equações (8) e (9).

Os valores de  $h$  foram calculados através das equações (10), como  $L_1/D_h \leq 60$ , o valor de  $h_{eq}$  foi calculado pela equação (11).



### 3.6.2 Baldes e tambores

Para o cálculo dos valores de  $h$  para os baldes e tambores foram utilizadas correlações para formas geométricas cilíndricas.

O número de Reynolds foi calculado através da equação (7), onde  $D$  corresponde ao diâmetro do cilindro.

Para o cálculo do número de Nusselt, foram utilizadas as correlações (12) e (13).

Outra correlação utilizada para obtenção do número de Nusselt e coeficiente de transferência de calor convectivo em formas cilíndricas que leva em consideração um fator de turbulência do processo durante o escoamento do ar ao redor das embalagens foi aquela mostrada na equação (14).

Para o cálculo dos valores de  $h$ , foi utilizada a equação (10).

### 3.7 Propriedades termofísicas da polpa de goiaba

Para a predição das propriedades termofísicas foi utilizada modelos segundo Ashrae Handbook (2002), usando dados da composição da polpa de goiaba.

A Tabela 8 apresenta a composição centesimal da polpa de goiaba segundo Cabral et al. (2007).

TABELA 8 Composição da polpa de goiaba.

Componente	Quantidade
Umidade	84,0 (g/100 g)
Proteína	1,54 (g/100 g)
Cinzas	0,59 (g/100 g)
Fibras	5,22 (g/100 g)
Carboidratos	7,85 (g/100 g)

A Tabela 9 apresenta as propriedades termofísicas da polpa de goiaba, onde, o subscrito  $_o$  refere-se a  $T > T_{ic}$  e o subscrito  $_f$  a  $T < T_{ic}$ , sendo  $T_{ic}$  = temperatura de início de congelamento.

TABELA 9 Propriedades termofísicas previstas para a polpa de goiaba.

Propriedade	Valor
$T_{ic}$ (°C)	-2,0963
$\rho_o$ (kg/m <sup>3</sup> )	1057,6292
$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	997,0756
$\kappa_o$ (W/m°C)	0,5474
$\kappa_f$ (W/m°C)	1,7896
$c_{po}$ (J/kg°C)	3,7650
$c_{pf}$ (J/kg°C)	2,3090
$\lambda_{,ef}$ (kJ/kg)	271,3500

A temperatura de início de congelamento da polpa de goiaba ( $T_{ic}$ ) foi determinada experimentalmente, através da curva de congelamento da polpa de goiaba obtida pela aquisição de dados de temperatura por um termopar tipo T inserido no centro da amostra a cada um segundo e em triplicata. O ponto de início de congelamento foi identificado após o subresfriamento e ligeira elevação da temperatura observada durante o resfriamento no início da mudança de fase.

### 3.8 Predição do tempo de congelamento

Para o cálculo do tempo de congelamento das diferentes configurações (caixas, baldes e tambores), foi utilizada a equação (15).

Para calcular  $t_{f,placa}$ , foi utilizado o método de Pham, equação (16).

Para calcular os fatores de forma  $E_{AS}$ , foram utilizadas as equações (17) para as polpas armazenadas em sacos dentro das caixas e (18), para as polpas nos baldes e tambores.

### 3.9 Erro dos tempos de congelamento predito

Nas diferentes configurações, o erro entre o tempo de congelamento experimental e predito das polpas foi determinado utilizando a equação (19).

O tempo de congelamento experimental para todas as amostras foi determinado quando os sensores imediatamente indicaram  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  em todas as embalagens das configurações.

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

(19)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Velocidade do ar

A velocidade e distribuição do ar é um parâmetro importante para caracterizar a uniformidade do resfriamento e para determinação dos coeficientes de transferência de calor convectivos. Através da análise da variação destes parâmetros, é possível avaliar a eficiência do processo de transferência de calor e identificar fluxos diferenciais decorrentes da formação de canais preferenciais de escoamento do ar nas configurações do produto.

#### 4.1.1 Caixas

A Figura 7 mostra a variação da velocidade do ar dentro do túnel de congelamento com as polpas armazenadas nas caixas, com  $Z = 0,135$  m. Todas as Figuras apresentadas e curvas de nível foram obtidas através de regressão por mínimos quadrados, utilizando o programa *Statística 8*.

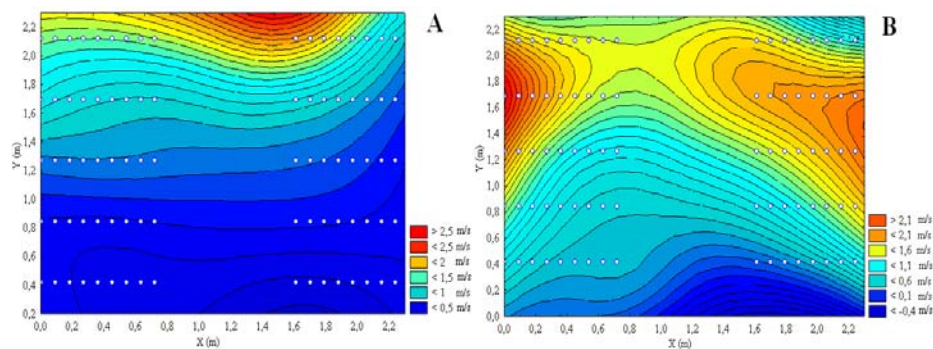


FIGURA 7 Variação da velocidade do ar no túnel de congelamento com as polpas de goiaba acondicionadas em caixas, em função da altura (Y) e comprimento (X), sendo (A) ar circulando na direção horizontal, (B) ar circulando na direção vertical.

Através da Figura 7, verifica-se que a velocidade do ar na direção horizontal é maior em função do aumento na altura dentro do túnel, isto é explicado pelo posicionamento do evaporador na parte superior do túnel.

A velocidade na direção vertical é maior nas extremidades laterais do túnel e também na parte superior, isto provavelmente se deve aos espaços livres formados entre o empilhamento e as paredes do túnel, formando canais de escoamento.

As caixas formam obstáculos ao fluxo de ar e induzem a formação de canais preferenciais no retorno do ar ao evaporador.

Nahor et al. (2005) verificaram que a velocidade dentro de um túnel de congelamento vazio, com dimensões ( $Y = 3,6$ ;  $X = 2,8$ ;  $Z = 4,25$  m), varia entre 0,1 e 1 m/s, em relação a Y e X, com  $Z = 2,85$  m, sendo maior para as extremidades de Y, principalmente para o retorno do ar na parte mais baixa do túnel e maior quanto mais ao centro em relação a X.

#### **4.1.2 Baldes**

A Figura 8 mostra a variação da velocidade do ar dentro do túnel com as polpas armazenadas nos baldes, com  $Z = 0,135$  m.

Com as polpas nos baldes, a velocidade do ar no túnel apresenta semelhança com as polpas nas caixas. Pela Figura 8, verifica-se que a velocidade horizontal do ar é maior na parte superior, próximo ao evaporador e soprador de ar e a velocidade vertical também é maior nas extremidades.

A velocidade do ar atinge valores mais baixos nos pontos centrais e inferiores nos sistemas de coordenadas XY. Como, por exemplo, observa-se que nos pontos ( $X = 1,2$ ;  $Y = 0,4$  m) os valores para a velocidade do ar são menores que 1 m/s. Nesta região, o empilhamento oferece maior resistência à passagem do ar que desvia, formando canais preferenciais nas laterais e na parte superior do empilhamento.

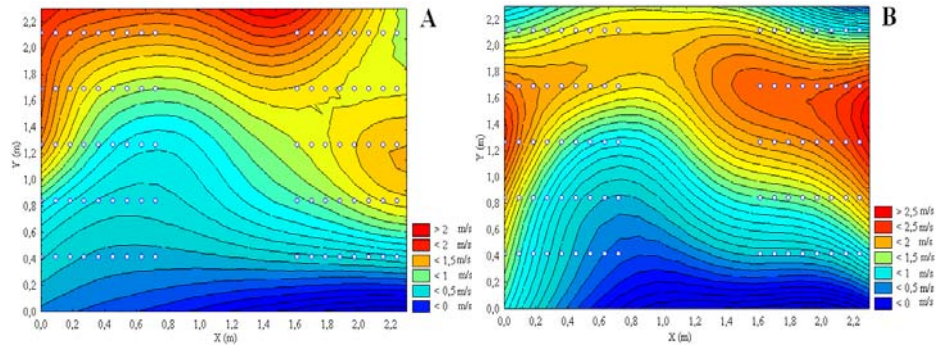


FIGURA 8 Variação da velocidade do ar no túnel de congelamento com as polpas de goiaba acondicionadas em baldes, em função da altura (Y) e comprimento (X), sendo (A) ar circulando na direção horizontal, (B) ar circulando na direção vertical.

#### 4.1.3 Tambores

A Figura 9 apresenta a variação da velocidade do ar de resfriamento dentro do túnel de congelamento com as polpas armazenadas dentro dos tambores, com  $Z = 0,135$  m.

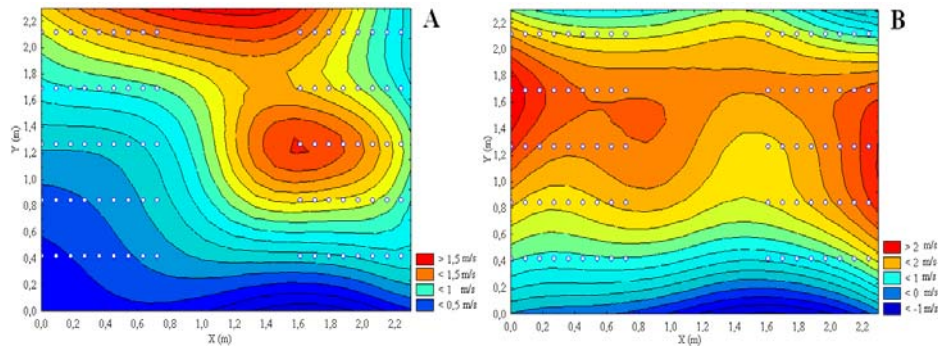


FIGURA 9 Variação da velocidade do ar no túnel de congelamento com as polpas de goiaba acondicionadas em tambores, em função da altura (Y) e comprimento (X), sendo (A) ar circulando na direção horizontal, (B) ar circulando na direção vertical.

Pela Figura 9, verifica-se que a velocidade no sentido horizontal decresce em relação à diminuição da altura do túnel (Y) e aumenta em função do aumento do comprimento do túnel (X), mais distante da porta de entrada. A velocidade vertical é mais alta nas áreas superiores do túnel e quase não difere em relação ao comprimento (X). Isto ocorre porque o tambor em cima dos paletes tem aproximadamente 94 cm de altura, permitindo mais facilmente o fluxo de ar na região imediatamente acima dos tambores.

## **4.2 Temperatura**

A temperatura das polpas foi monitorada ao longo do processo nos diferentes tipos de embalagens.

### **4.2.1 Caixas**

A Figura 10 mostra a variação da temperatura ao longo do tempo de processamento das polpas armazenadas em sacos plásticos dentro das caixas, com  $Z = 0,665$  m.

A Figura 10 mostra que ocorreu um padrão de variação de temperatura ao longo do tempo. Temperaturas mais elevadas no centro do túnel de congelamento e temperaturas mais baixas nos extremos do túnel de congelamento.

A variação da temperatura das polpas nos sacos plásticos dentro das caixas está diretamente relacionada à velocidade do ar. As coordenadas de posição dos sacos com menores temperaturas correspondem às coordenadas XY que apresentaram maiores valores de velocidade do ar.

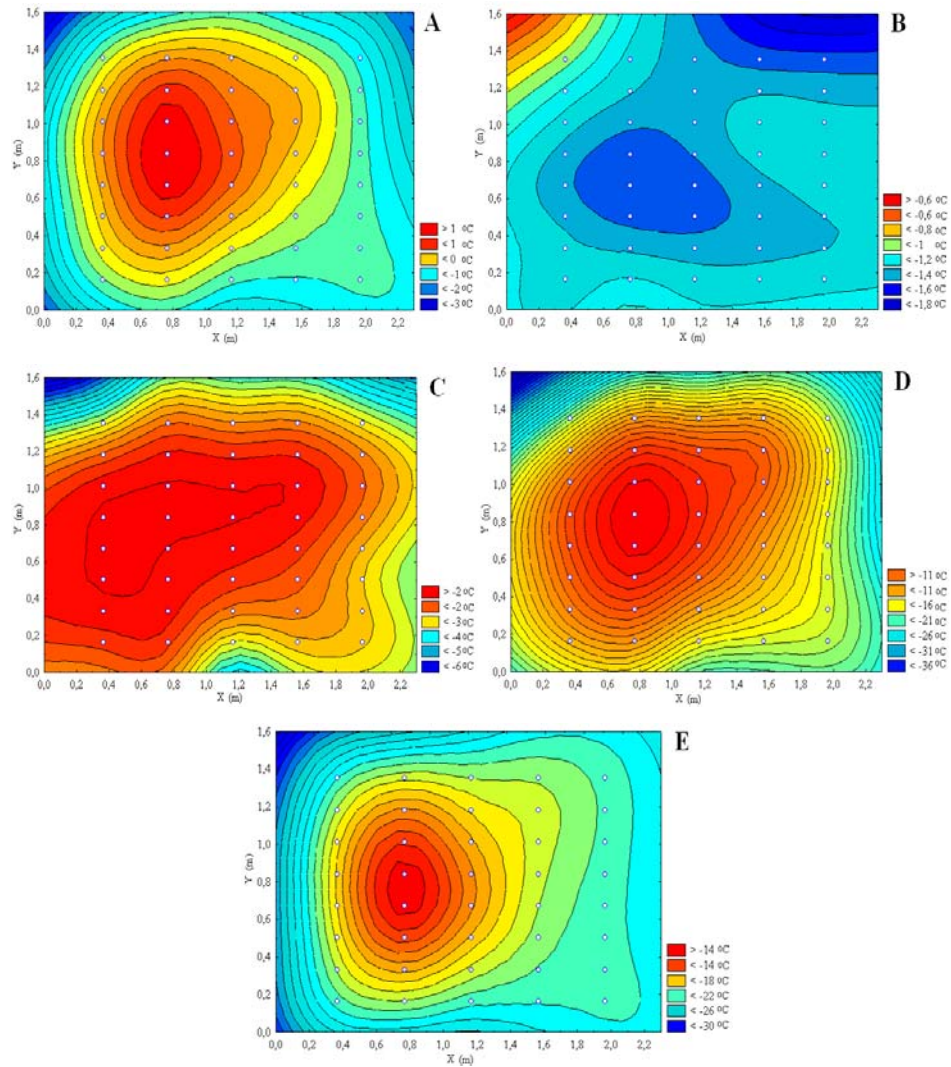


FIGURA 10 Variação da temperatura da polpa de goiaba acondicionada em caixas em função da altura (Y) e comprimento do túnel de congelamento (X), nos tempos (horas): (A)  $t=10$ , (B)  $t=20$ , (C)  $t=30$ , (D)  $t=40$  e (E)  $t=50$ .



#### 4.2.2 Baldes

A Figura 11 mostra a variação de temperatura ao longo do processo de congelamento das polpas armazenadas nos baldes, com  $Z = 0,505$  m.

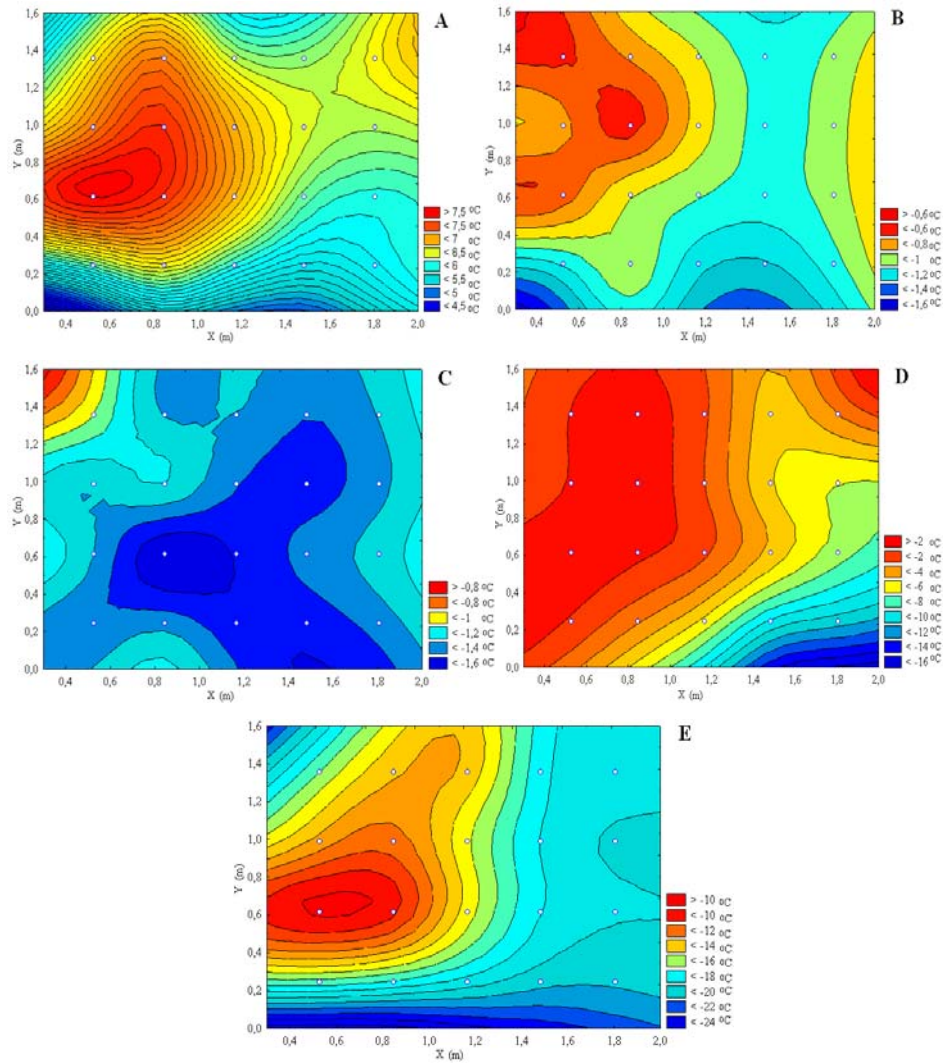


FIGURA 11 Variação da temperatura da polpa de goiaba acondicionada em baldes em função da altura (Y) e comprimento (X), nos tempos (horas): (A)  $t=10$ , (B)  $t=20$ , (C)  $t=30$ , (D)  $t=40$  e (E)  $t=50$ .

Verifica-se na Figura 11, baldes localizados na frente do empilhamento, que as temperaturas mais elevadas estão localizadas no meio do empilhamento e mais próximas da entrada do túnel, isto se deve provavelmente à dificuldade de passagem do ar entre os baldes e à infiltração de calor pela porta do túnel de congelamento. A Figura 11E mostra que após 50 horas de processamento, ainda existem alguns baldes não congelados,  $T > -18$  °C.

A Figura 11C mostra o início de mudança de fase do produto, onde ocorre ligeiro aumento da temperatura do produto. Com as polpas armazenadas nos baldes, este início de mudança de fase ocorreu após 30 horas, já para as polpas armazenadas nos sacos em caixas, este processo ocorreu com 20 horas, evidenciando a maior rapidez do processamento das polpas armazenadas nos sacos em caixas.

A Figura 12 mostra a variação de temperatura ao longo do processo de congelamento das polpas armazenadas nos baldes localizados na parte traseira do empilhamento ( $Z = 0,825$ ) em relação ao fluxo de ar. Através destas, verifica-se um comportamento muito semelhante com as polpas localizadas nos baldes dianteiros.

As Figuras 11D e 12D mostram a diferença entre as temperaturas no interior dos baldes dianteiros e traseiros. Após 40 horas de processamento, os baldes localizados no empilhamento traseiro mostraram temperaturas mais elevadas, verificadas pela maior faixa vermelha da Figura 12D em relação à Figura 11D. Isto mostra que a velocidade do ar nas proximidades dos baldes traseiros provavelmente era menor, devido à dificuldade da passagem do ar pelos baldes dianteiros. Esta pilha de baldes ocasionou uma barreira para a passagem do ar.

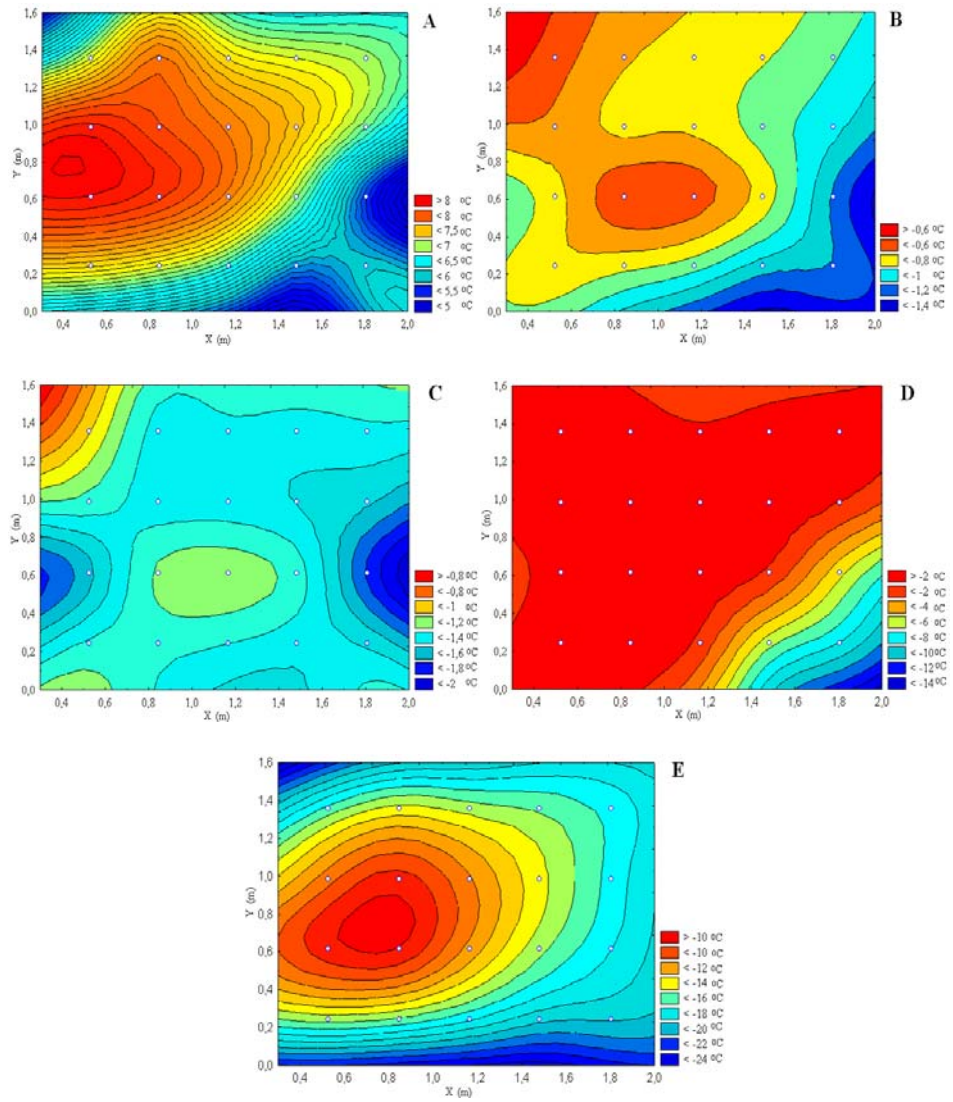


FIGURA 12 Variação da temperatura da polpa de goiaba acondicionada em baldes em função da altura (Y) e comprimento (X), nos tempos (horas): (A)  $t=10$ , (B)  $t=20$ , (C)  $t=30$ , (D)  $t=40$ , e (E)  $t=50$ .

Trabalhando com uma pilha de caixas com peras, Nahor et al. (2005) verificaram que a temperatura em relação à maior e menor alturas (Y) não tem grande variação, sendo que as caixas mais baixas resfriaram mais rapidamente. Em relação à temperatura na frente das caixas (que recebe primeiro o fluxo de ar) e o outro lado das caixas, a parte frontal teve uma queda de temperatura mais elevada em relação ao tempo, assim como os baldes dianteiros e traseiros.

As Figuras 11 e 12 mostraram que o abaixamento mais rápido de temperatura nos baldes ocorreu em posições com maiores valores de X e menores valores de Y. Em relação a 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 a vedação da porta não foi totalmente eficiente. Em relação a Y, as velocidades de retorno do ar provavelmente foram elevadas, mas devido a dificuldades de obtenção de dados próximos ao piso do túnel, isto não foi constatado uma vez que as medidas mais próximas ao piso estavam a 0,42 m.

#### **4.2.3 Tambores**

A Figura 13 apresenta a variação da temperatura dentro dos tambores, onde os sensores estão localizados em diferentes posições dentro de cada tambor,  $Z = 0,665$  m. Através destas análises, pode-se verificar o fluxo de calor dentro de cada embalagem.

A Figura 13 mostra que as temperaturas mais elevadas estão localizadas próximas ao centro geométrico e que os pontos de medida mais abaixo do centro geométrico como, por exemplo, ( $X = 0,22$ ;  $Y = 0,24$ ) têm temperaturas mais baixas em relação aos pontos de medidas localizados mais acima do centro geométrico dos tambores ( $X = 0,22$  ;  $Y = 0,78$ ). Isto pode ser explicado devido ao espaço existente entre a superfície do tambor e a polpa de goiaba, ou seja, o tambor não estava completamente cheio, diferentemente do fundo do tambor,

onde o produto entrava em contato direto com a lateral do tambor, assim facilitando as trocas de calor.

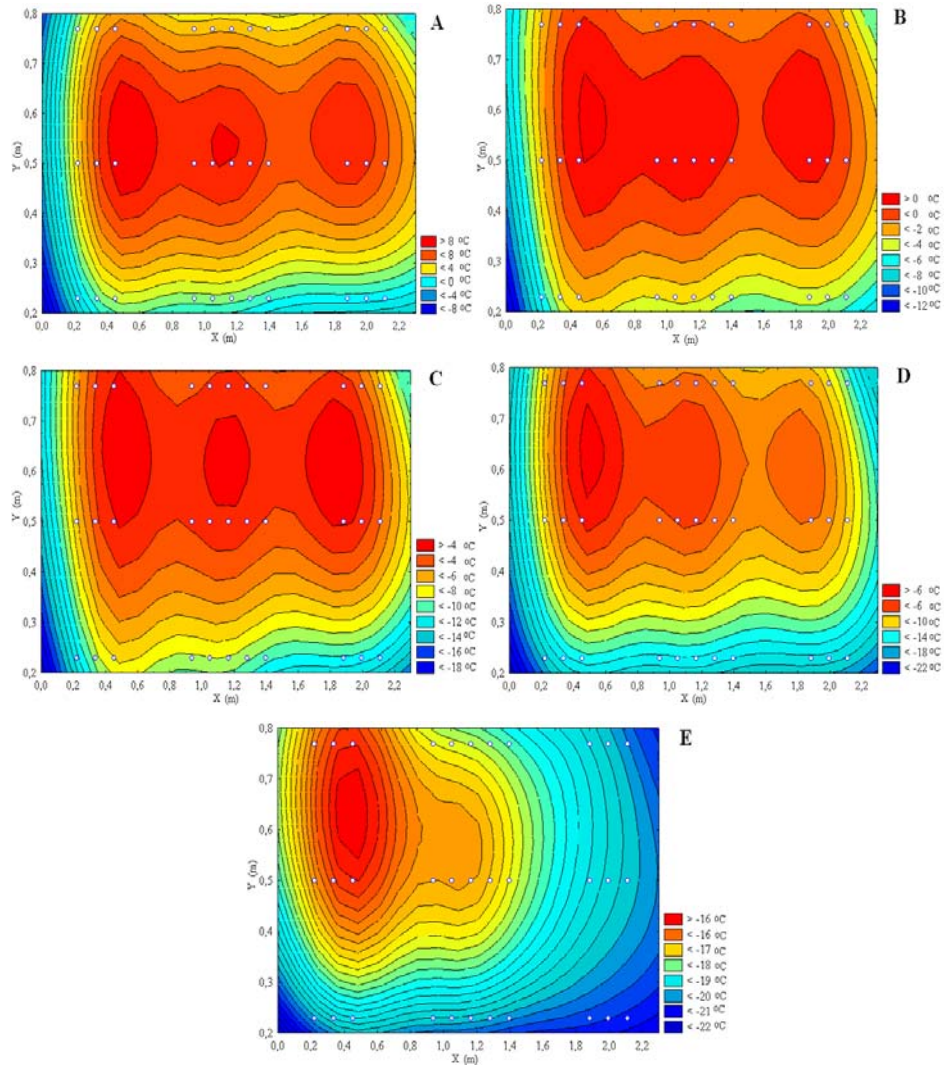


FIGURA 13 Variação da temperatura da polpa de goiaba acondicionada em tambores em função da altura (Y) e comprimento (X), nos tempos (horas): (A)  $t=20$ , (B)  $t=40$ , (C)  $t=60$ , (D)  $t=80$  e (E)  $t=100$ .

As Figuras 13D e 13E mostram que as trocas de calor ocorreram mais rapidamente em função do aumento do comprimento do túnel de congelamento, após 100 horas de processamento todos os pontos de medidas localizados no tambor mais ao fundo do túnel estavam abaixo de  $-18^{\circ}\text{C}$ , no tambor central as temperaturas estavam um pouco mais elevadas, e no tambor localizado mais próximo a porta existiam pontos de medidas com temperaturas acima de  $-16^{\circ}\text{C}$ , como por exemplo,  $(X = 0,45; Y = 0,78)$ .

### **4.3 Tempo de congelamento experimental**

A Figura 14 mostra o tempo gasto para o congelamento de todos os pontos de medidas dentro das amostras, a temperatura considerada foi  $-18^{\circ}\text{C}$ .

Através da Figura 14A verifica-se que para as amostras armazenadas em caixas os tempos mais elevados, acima de 50 horas, foram verificados nas amostras localizadas no centro do túnel com relação à altura (Y) e mais próximos da porta em relação à posição (X), como por exemplo,  $(X = 0,76; Y = 0,84 \text{ m})$  os menores tempos foram verificados nas extremidades da pilha, e localizados ao fundo do túnel, esta situação vai a favor das figuras anteriormente mostradas, como variação de temperatura e variação da velocidade do ar. O processamento das polpas em sacos acondicionadas em caixas se mostrou difícil, devido a dificuldades de manuseio e necessidade de empacotadeira. Salvadori & Mascheroni (1996) verificaram que o tempo experimental de processamento de 38 kg de polpa de morango armazenadas em recipientes retangulares, assim como as caixas, mas metálicas, foi de aproximadamente 30 horas, naquele experimento o autor utilizou somente uma embalagem no processamento e a velocidade do ar de resfriamento era de 2 m/s.

Para as amostras armazenadas em baldes, A Figura 14B mostra que para as amostras armazenadas em baldes, os menores tempos de processamento foram verificados para os baldes localizados mais ao fundo do túnel de



congelamento, exemplo ( $X = 1,80$ ;  $Y = 0,24$  m) e que os tempos de processamento foram maior ( $X = 0,84$ ;  $Y = 0,61$  m) para os baldes localizados mais ao centro da pilha. Os tempos de congelamento variaram entre 48 e 54 horas. O processamento da polpa nos baldes foi vantajoso em relação ao fácil manuseio e não necessidade de outros equipamentos para o processamento. Salvadori & Mascheroni (1996) verificaram que aproximadamente 20 kg de polpa de morango armazenadas em uma única embalagem plástica com formato cilíndrico ( $D = 0,27$  m,  $H = 0,385$  m) levou 30 horas para congelar.

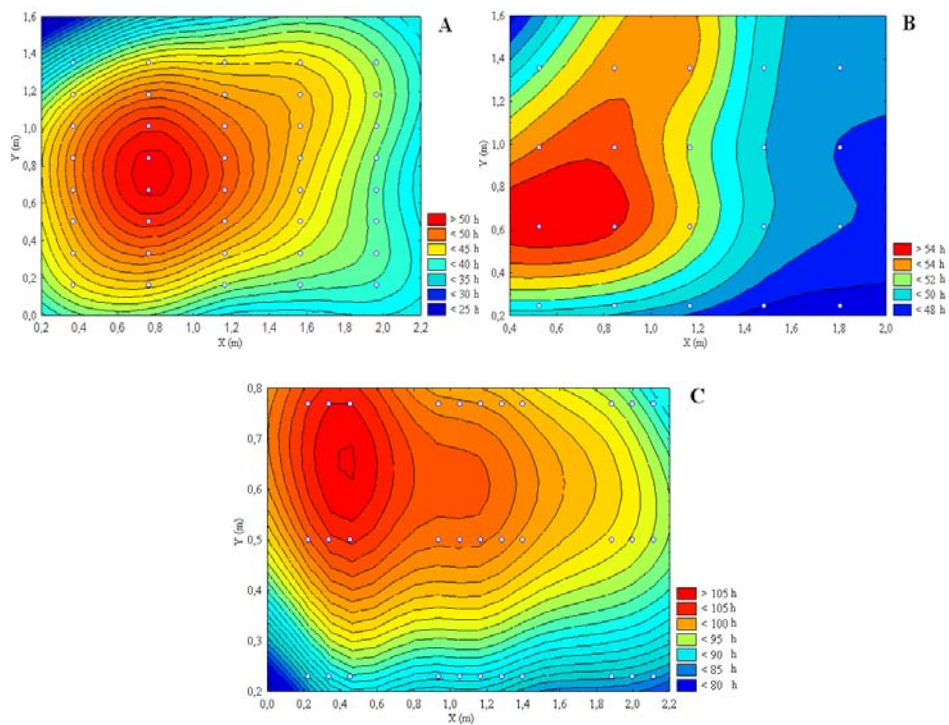


FIGURA 14 Variação do tempo de processamento em função da altura (Y) e comprimento (X) do túnel de congelamento, sendo (A) processamento com as caixas, (B) baldes e (C) tambores.

A Figura 14C mostra que os tempos mais elevados de processamento foram verificados nos pontos do tambor localizado próximos à porta do túnel, o que pode ser devido à infiltração de calor, ou devido à falha de vedação, além de a porta apresentar menor espessura de isolamento, parede do túnel (0,20 m) e a porta (0,11 m), criando assim um maior espaçamento entre tambor e porta. Este fato pode ter ocasionado uma diminuição da velocidade do ar próximo ao tambor localizado próximo à porta. Os pontos localizados na parte superior do tambor também tiveram tempos mais elevados, provavelmente causados pelo ar localizado entre a amostra e a superfície do tambor. O processamento das polpas nos tambores se mostrou dificultoso em relação a manuseio dos recipientes. Salvadori & Mascheroni (1996) verificaram que 200 kg de polpa de morango armazenadas em um único recipiente metálico com formato cilíndrico ( $D = 0,57$  m;  $H = 0,85$  m) levaram aproximadamente 100 horas para congelar.

#### **4.4 Coeficiente de transferência de calor convectivos**

Assim como foi descrito na metodologia, os valores de  $h$  são diretamente relacionados à velocidade do ar, quão 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.

Para o cálculo dos valores de  $h$ , foi considerada apenas a velocidade na direção horizontal de escoamento, pois o maior fluxo de ar que entra em contato com as embalagens está neste sentido.

A Figura 15 apresenta a variação dos coeficientes de transferência de calor dentro do túnel de congelamento para as três configurações utilizando as correlações (8), (9), (12) e (13), que não consideram um fator de turbulência.

Através da Figura 15A, pode-se verificar que os maiores coeficientes estão localizados na parte superior do túnel para as caixas, confirmando os tempos menores de processamento já verificados nesta posição, os índices



decrecem em função da diminuição de (Y), na Figura 15A verifica-se que as caixas localizadas mais abaixo da pilha também obtiveram menores tempo de processamento, o que não foi verificado pelos valores de  $h$  nestas posições, isto provavelmente deve ter ocorrido em função do fluxo maior de ar em baixo dos paletes em relação ao espaço entre as amostras. Os espaços entre as polpas localizadas nas caixas é de aproximadamente 0,084 m, já o espaço para o fluxo de ar em baixo dos paletes é de aproximadamente de 0,13 m.

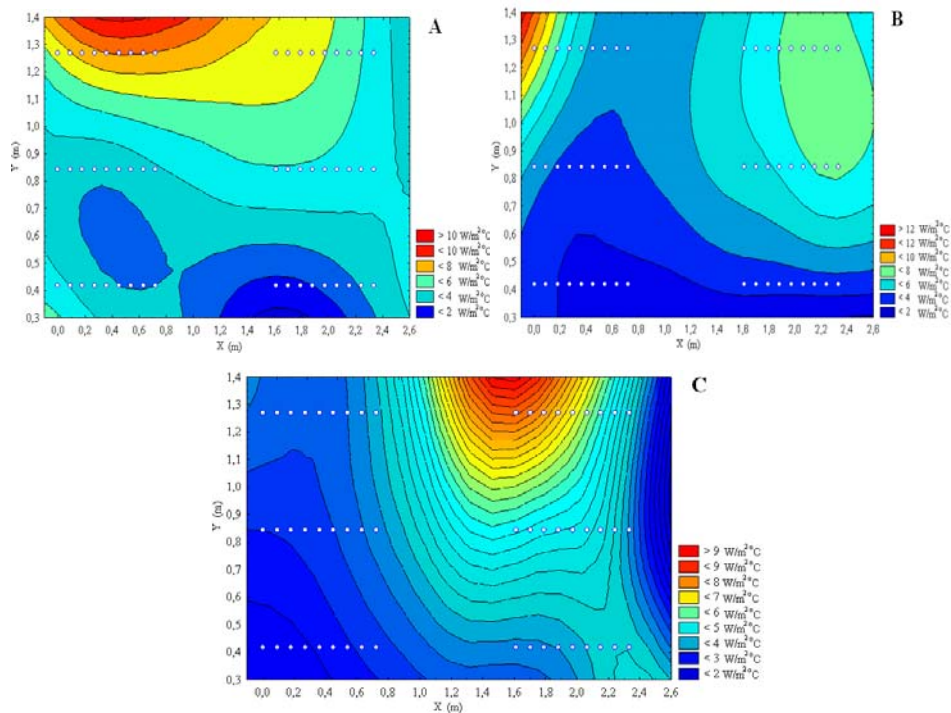


FIGURA 15 Variação do  $h$  em função da altura (Y) e comprimento (X) do túnel de congelamento, sendo (A) processamento com as caixas, (B) baldes e (C) tambores.

A Figura15B mostra que os valores de  $h$  decrescem em função da diminuição de (Y) e (X) para os baldes, assim como para os tempos de processamento. Os fluxos de ar por baixo dos paletes provavelmente facilitaram a diminuição do tempo de processamento não verificado pelos valores de  $h$  que apresentaram valores inferiores nesta posição, como por exemplo, (X = 2,24; Y = 0,42 m).

Isto pode ser justificado pelas medidas das velocidades de ar nesta posição. Os pontos de medida foram tomados em posições que não permitiam a detecção de fluxos localizados próximos ao piso do túnel de congelamento. A medida de velocidade mais próxima ao chão está localizada a 0,42 m.

A Figura 15C mostra que os maiores coeficientes foram localizados em função do aumento de (X) e diminuição de (Y). Este resultado é compatível com as da Figura14C, onde se verificou que os menores tempos de congelamento foram verificados nestas posições.

Ghisalberti & Kondjoyan (1999) encontraram valores de  $h$  em torno de  $15 \text{ W/m}^2\text{°C}$  para escoamento laminar, com velocidade do ar de 1,5 m/s, para cilindros com  $H/D = 0,5$ .

#### **4.5 Predição dos tempos de congelamento**

O tempo de congelamento predito é uma importante ferramenta para instalações industriais, pois assim é possível calcular os tempos demandados de determinados processamentos, sem a necessidade de valores experimentais. A grande dificuldade deste procedimento é que para o cálculo do tempo, o coeficiente de transferência de calor é um fator muito importante e é difícil encontrar o correto valor deste coeficiente que atua sobre a superfície da embalagem onde está acondicionado o produto.

Os valores de  $h$  utilizados para o cálculo do tempo predito foram determinados conforme maior proximidade dos pontos de medida de velocidade

do ar e medidas de temperatura das amostras e através de interpolação linear destes pontos.

A Tabela 10 mostra os tempos de processamento experimental e predito das polpas armazenadas em caixas, usando os modelos descritos pela equação (15) e (16). O erro foi calculado em relação à diferença de tempo de processamento encontrada entre o valor experimental e predito.

TABELA 10 Verificação do erro entre o tempo de congelamento predito e experimental de polpas de goiaba processadas em caixas plásticas.

X(m)	Y(m)	$h(W/m^2\text{°C})$	$t_{pred.}(h)$	$t_{exp.}(h)$	$e(\%)$
0,365	0,1629	2,24	73,66	44,33	66,17
1,165	0,1629	2,94	57,64	41,33	39,47
1,965	0,1629	3,74	46,69	39,87	17,10
0,365	0,6729	2,82	59,82	48,03	24,56
1,165	0,6729	3,75	46,58	52,37	11,05
1,965	0,6729	4,71	38,40	39,33	2,34
0,365	0,8429	3,23	53,04	48,77	8,76
1,165	0,8429	5,18	35,51	50,63	29,86
1,965	0,8429	5,37	34,48	40,10	13,99
0,365	1,3529	9,50	22,37	38,03	41,17
1,165	1,3529	6,67	29,04	43,90	33,84
1,965	1,3529	7,01	27,95	41,37	32,42

Pela Tabela 10, pode-se verificar que o erro entre o tempo de congelamento predito e experimental foi em média de 26,7 %. Isto se deve à dificuldade em determinar os coeficientes de transferência de calor nas posições que realmente traduzem o fluxo de ar sobre as polpas. Zhengfu et al. (2007) encontraram erro de 29 % do tempo predito em relação ao experimental para solução de metilcelulose (23 %), com características geométricas como as dos

sacos utilizados para as polpas (*slab*), com espessura de 0,012 m, com fluxo de calor infinito e  $h = 9$  (W/m<sup>2</sup>°C).

Os melhores resultados obtidos foram para a predição dos tempos de congelamento para as caixas localizadas na região central do empilhamento ( $X = 1,965$ ;  $Y = 0,6729$ ) com erro de 2,34 %; ( $X = 0,365$ ;  $Y = 0,8429$ ) com erro de 8,76 %, aplicáveis em cálculos de engenharia.

A Tabela 11 mostra a variação do erro entre o tempo de congelamento experimental e predito para o congelamento de polpas de goiaba acondicionadas em baldes, o tempo predito foi avaliado utilizando as correlações (12) e (13) para a determinação dos valores de  $h$  e a correlação (14) foi utilizada para determinar  $h_{turb}$ , que leva em consideração um fator de turbulência no escoamento do ar.

A Tabela 11 mostra que o cálculo do tempo predito com as correlações (12) e (13), que não leva em consideração um fator de turbulência no escoamento, se mostraram mais eficientes, com erro médio de 7,43 %. O erro médio ficou em 14,44 %, sendo  $Tu = 0,4$  % para o tempo predito com a correlação (14), com fator de turbulência.

Kondjoyan et al. (2006) encontraram o valor de  $h = 8,3$  (W/m<sup>2</sup>°C) para cilindros com  $H/D = 6$ , com fator de turbulência de 0,4 % e velocidade de 1 m/s. Zehua (2001) verificou que o  $h$  varia entre 8 e 14 (W/m<sup>2</sup>°C) para embalagens cilíndricas de presunto para velocidades médias de 1,33 m/s do ar.

A predição do tempo de processamento com as correlações (12) e (13) se mostraram mais eficientes, estando dentro dos padrões de erro de engenharia. Isto provavelmente se deve ao fato de estas correlações expressarem melhor os efeitos do escoamento do ar em torno de cilindros menores como, por exemplo, os baldes, além da dificuldade de determinação da flutuação da variação de velocidade para cálculo do fator de turbulência

TABELA 11 Verificação do erro entre o tempo predito e experimental de processamento com os baldes.

X	Y	Z	$h$	$h_{turb}$	$t_{pred}$	$t_{pred/turb}$	$t_{exp.}$	$e(\%)$	$e_{turb}(\%)$
0,53	0,25	0,51	2,93	5,67	56,07	46,53	50,43	11,18	7,74
1,17	0,25	0,51	3,30	6,42	54,30	44,54	48,63	11,65	8,41
1,81	0,25	0,51	3,41	6,62	53,82	44,05	46,60	15,48	5,47
0,53	0,62	0,51	3,56	6,91	53,19	43,38	56,30	5,53	22,94
1,17	0,62	0,51	3,85	7,47	52,05	42,16	52,70	1,23	19,99
1,81	0,62	0,51	4,15	8,04	50,97	41,00	48,20	5,75	14,93
0,53	0,99	0,51	4,23	8,24	50,70	40,63	53,70	5,59	24,33
1,17	0,99	0,51	4,80	9,35	48,89	38,71	51,07	4,26	24,20
1,81	0,99	0,51	5,38	10,08	47,27	37,58	47,80	1,10	21,37
0,53	1,36	0,51	4,00	7,78	51,50	41,51	50,73	1,52	18,17
1,17	1,36	0,51	5,03	9,79	48,23	38,11	54,27	11,13	29,78
1,81	1,36	0,51	6,00	11,74	45,73	35,36	48,87	6,42	27,65
0,53	0,25	0,83	2,32	4,48	59,68	50,31	53,00	12,61	5,07
1,17	0,25	0,83	2,73	5,28	57,14	47,69	50,27	13,66	5,13
1,81	0,25	0,83	2,98	5,78	55,81	46,22	48,30	15,55	4,31
0,53	0,62	0,83	2,52	4,89	58,38	48,92	56,87	2,65	13,97
1,17	0,62	0,83	2,87	5,56	56,38	46,84	54,43	3,58	13,94
1,81	0,62	0,83	3,23	6,26	54,61	44,94	49,97	9,29	10,06
0,53	0,99	0,83	2,75	5,33	57,03	47,51	55,10	3,50	13,77
1,17	0,99	0,83	3,05	5,91	55,46	45,86	54,70	1,40	16,15
1,81	0,99	0,83	3,09	6,00	55,27	45,62	50,23	10,03	9,18
0,53	1,36	0,83	2,57	4,98	58,07	48,60	52,43	10,76	7,29
1,17	1,36	0,83	3,07	5,95	55,37	45,76	52,93	4,60	13,55
1,81	1,36	0,83	3,04	5,89	55,51	45,91	50,53	9,86	9,13

A Tabela 12 mostra a variação do erro entre o tempo de congelamento experimental e predito para as polpas de goiaba acondicionadas em tambores.

Assim como para os baldes, foram testadas as correlações (12), (13) e (14) para o cálculo do número de Nusselt e conseguinte cálculo dos valores de  $h$ . Diferentemente dos cálculos realizados para os baldes, para os tambores as correlações que levam em consideração um fator de turbulência no escoamento obtiveram melhores resultados, com erro médio de 21,07 %, sendo  $Tu = 0,5$  %,

já para o cálculo com as correlações (12) e (13) o erro médio foi de 96,02%. Provavelmente o empilhamento (feito para os baldes e não para os tambores) e a diferença de dimensões entre os baldes e tambores causaram estas diferenças entre as correlações testadas, sendo (12) e (13) melhor para os baldes e (14) para os tambores. Salvadori & Mascheroni (1996) encontraram erro médio de 14,48% para o tempo predito de congelamento de polpas de morango em tambores de 200 kg de capacidade, sendo que para seus cálculos foi utilizado um valor de  $h$  estimado segundo correlações que não levam em consideração um fator de turbulência no escoamento e fatores de forma estimados segundo metodologia diferente daquela usada neste trabalho.

TABELA 12 Verificação do erro entre o tempo predito e experimental de processamento com os tambores.

X	Y	$h$	$h_{turb}$	$t_{pred.}$	$t_{pred/turb}$	$t_{exp.}$	$e(\%)$	$e_{turb}(\%)$
0,44	0,24	3,13	9,69	199,00	124,16	96,03	107,23	29,30
1,16	0,24	3,32	10,33	195,03	120,29	94,03	107,42	27,92
1,88	0,24	3,13	9,69	199,00	124,16	85,45	132,89	45,31
0,44	0,51	3,16	9,98	198,36	122,37	105,70	87,66	15,77
1,16	0,51	3,20	10,31	197,51	120,40	105,43	87,34	14,20
1,88	0,51	3,25	10,64	196,47	118,52	96,50	103,60	22,82
0,44	0,78	3,31	10,28	195,24	120,58	106,97	82,52	12,72
1,16	0,78	5,33	15,41	163,00	97,88	101,50	60,59	3,56
1,88	0,78	3,72	11,60	187,35	113,45	96,10	94,95	18,05

#### 4.6 Consumo de energia

A Tabela 13 mostra os valores das grandezas elétricas que foram medidas durante o processo de congelamento das polpas nas diferentes

embalagens. Todas estas grandezas foram obtidas após o término do processamento, quando todos os sensores de temperatura chegaram a -18 °C.

TABELA 13 Grandezas elétricas medidas.

Processamento	EA (kWh)	ER (kVArh)	DA (kW)	MDA (kW)
Caixas	256,344	173,580	4,618	5,582
Baldes	270,862	180,969	3,536	5,683
Tambores	485,499	585,092	1,819	4,339

Onde EA = energia ativa, ER = energia reativa, DA = demanda ativa, MDA = máxima demanda ativa.

Através da Tabela 13, pode-se verificar que o consumo mais elevado ocorreu quando as polpas estavam armazenadas nos tambores (485,499 kWh), isto é decorrente do maior tempo demandado para o final do congelamento das amostras. O menor gasto de energia (256,344 kWh) foi verificado quando as polpas foram armazenadas em caixas, devido ao menor tempo de processamento.

A Tabela 13 também mostra que a demanda de potência (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. 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. Sendo assim, com as caixas, diferentemente dos tambores, o compressor do túnel de congelamento operou mais em relação à retirada da carga térmica.

## 5 CONCLUSÕES

O perfil da velocidade do ar dentro do túnel de congelamento foi semelhante para as três configurações, sendo que os maiores valores de velocidade foram encontrados nas extremidades (X) e nas posições mais elevadas (Y) do túnel.

A variação de temperatura dentro das amostras foi semelhante para os três tipos de embalagens, com temperaturas mais altas no centro dos empilhamentos e temperaturas mais baixas nas extremidades.

As polpas armazenadas em sacos de polietileno e acondicionadas em caixas congelaram mais rapidamente. Em seguida, com os baldes, e o maior tempo de processamento foi verificado com os tambores.

A estimativa dos valores de  $h$  e conseqüente predição do tempo de congelamento se mostraram eficientes para o processamento das polpas de goiaba nos baldes. Para os tambores, apenas a correlação que leva em consideração a turbulência no escoamento do ar se mostrou mais satisfatória; para as caixas, a predição do tempo de congelamento produziu alguns bons resultados. O posicionamento dos pontos de medidas da velocidade do ar pode ter impossibilitado a obtenção de melhores resultados para predição do tempo de congelamento. Estas medidas não contabilizaram as velocidades em canais preferenciais formados por baixo do paletes próximo ao piso da câmara.

O consumo de energia foi maior para o processamento das polpas nos tambores como conseqüência do maior tempo demandado de processamento (96 horas em média). O menor consumo foi verificado com o processamento das polpas nos sacos acondicionadas nas caixas, que foi de 45,8 horas em média. As polpas acondicionadas nos baldes apresentaram em média 50,9 horas de processamento.



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) com configurações usando caixas e baldes e com cerca de 50% de redução no 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 que o processamento em baldes é vantajoso sob estes aspectos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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 SECTOR, 2., 2003, Barcelona. **Proceedings...** Barcelona: Afot, 2003. p. 4-8.

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, jan./mar. 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: CONGRESO IBERO-AMERICANO DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS, 2., 1998, Bahía Blanca. **Anales...** Bahía Blanca: Palpiquei, 1998. CD-ROM.

ASHRAE HANDBOOK - REFRIGERATION. **Thermal properties of foods**. Atlanta, 2002. 30 p.

BARRET, R. L. DEL C.; CHITARRA, M. I. F.; CHITARRA, A. B. 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.

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, 4., 1997, Santiago do Chile. **Anales...** Santiago do Chile: Ditar, 1997. v. 1, p. 154-159.

BRASIL. Leis, decretos, etc. Instrução normativa N° 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] União**, n° 6, Brasília, 10 de janeiro de 2000. Seção I. p. 54-58.

BRUNINI, M. A.; OLIVEIRA, A. L.; VARANDA, D. B. Avaliação da qualidade de polpa de goiaba 'paluma' armazenada a -20°C. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 394-396, dez. 2003.

BUENO, S. M.; LOPES, M. R. V.; GRACIANO, R. A. S.; FERNANDES, E. C. B.; GARCIA-CRUZ, C. H. Avaliação da qualidade de polpas de frutas congeladas. **Revista Instituto Adolfo Lutz**, São Paulo, v. 62, n. 2, p. 21-126, 2002.

CABRAL, R. A. F.; TELIS-ROMERO, J.; TELIS, V. R. N.; GABAS, A. L.; FINZER, J. R. D. Effect of apparent viscosity on fluidized bed drying process parameters of guava pulp. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 80, n. 4, p. 1096-1106, June 2007.

CARVALHO, V. D. Qualidade e conservação pós-colheita de goiabas. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 17, n. 179, p. 48-54, 1994.

CHAVARRIA, V. M.; HELDMAN, D. R. Measurement of convective heat transfer coefficients during food freezing processes. **Journal of Food Science**. Chicago, v. 49, n. 3, p. 810-814, May 1984.

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 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Centro de Ciências e Tecnologia. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

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

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.

DITTUS, P. W.; BOELTER, L. M. K. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, New York, v. 12, n. 1, p. 3-22, Jan./Feb. 1985.

EARLE, R. L. Freezing of foods: an overview food engineering and process applications. **Food engineering and process applications**, Alberta, v. 2, p. 3-20, 1985. (International Congress on Engineering and Food, 4).

EVANGELISTA, R. M.; VIEITES, R. L. Qualidade de polpa de goiaba congelada, comercializada na cidade de São Paulo. **Segurança Alimentar e Nutricional**, Campinas, v. 13, n. 2, p. 76-81, 2006.

EVANGELISTA, R. M.; FERNANDES, T. N.; RIBEIRO, F. C. R.; LEMOS, F. S.; PRADO, M. E. T.; RESENDE, J. V.; BELCHIOR, N. C. Comportamento reológico, parâmetros físico-químicos e dinâmica do congelamento da polpa de maracujá adicionada de sacarose e pectina. VII BMCFB. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, jun. 2009. Número Especial.

FURTADO A. A. L.; CABRAL, L. M. C.; ROSA, M. F.; MODESTA, R. C. D.; PONTES, S. M. Avaliação microbiológica e sensorial da polpa de goiaba tratada termicamente. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 22, p. 91-95, 2000. Número Especial.

GEORGE, R. M. Freezing processes used in the food industry. **Trends in Food Science & Technology**, Cambridge, v. 4, n. 5, p. 134-138, May 1993.

GHISALBERTI, L.; KONDOYAN, A. Convective heat transfer coefficients between air flow and a short cylinder. Effect of air velocity and turbulence. Effect of body shape, dimensions and position in the flow. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 42, n. 1, p. 33-44, Oct. 1999.

HOFFMANN, F. L. Microrganismos contaminantes de polpas de frutas. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 17, n. 1, p. 32-37, jan./abr. 1997.

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, 1992.

JACKIX, M. H. **Doces, geléias e frutas em calda**. Campinas: LMC Livraria/Unicamp/Ícone, 1988.

KONDOYAN, A. A review on surface heat and mass transfer coefficients during air chilling and storage of food products. **International Journal of Refrigeration**, Surrey, v. 29, n. 6, p. 863-875, Sept. 2006.

LEMOS, G. C. da S.; OLIVEIRA JUNIOR, J. C. de.; COLLIER, L. S.; CARVALHO, A. J. C. de.; MANICA, I. Goiaba: amadurecimento, colheita, classificação, embalagem, transporte e armazenamento. **Cadernos de Horticultura da UFRS**, Porto Alegre, v. 3, n. 4, p. 1-8, 1995.

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, Apr. 1998.

MSPC. **Informações técnicas**. Disponível em: <<http://www.mspc.eng.br>>. Acesso em: 1 fev. 2010.

NAHOR, H. B.; HOANGA, M. L.; VERBOVENA, P.; BAELMANS, M.; NICOLAI, B. M. CFD model of the airflow, heat and mass transfer in cool stores. **International Journal of Refrigeration**, Surrey, v. 28, n. 3, p. 368-380, May 2005.

PEYRIN, F.; KONDOYAN, A.; DAUDIN, J. D. Analyse des difficultés de mesure de la vitesse de l'air dans les industries agro-alimentaires, **Industries Alimentaires et Agricoles**, Paris, v. 112, n. 10, p. 728-735, 1995.

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

RESENDE, J. V.; NEVES FILHO, L. C.; SILVEIRA JR, 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, May/Aug. 2002.

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

SILVA, S. B. **Propriedades termofísicas de polpa de abacaxi**. 1994. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos)-Faculdade de Engenharia de Alimentos. Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

VERBOVEN, P.; NICOLA, B.; SCHEERLINCK, N.; BAERDEMAEKER, J. The local surface heat transfer coefficient in thermal food process calculations: a CFD approach. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 33, n. 1, p. 15-35, July/Aug. 1997.

ZEHUA, H.; DA-WEN, S. Predicting local surface heat transfer coefficients by different turbulent k- $\epsilon$  models to simulate heat and moisture transfer during air-blast chilling. **International Journal of Refrigeration**, Surrey, v. 24, n. 7, p. 702-717, July 2001.

ZHENGFU, W.; HAN, W. GUANGHUA, Z.; XIAOJUN, L.; FANG, C.;  
JIHONG, W.; XIAOSONG, H. One-dimensional finite-difference modeling on  
temperature history and freezing time of individual food. **Journal of Food  
Engineering**, Essex, v. 79, n. 2, p. 502-510, Mar. 2007.