

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

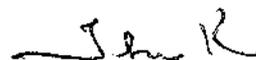
**ESTUDO DOS PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NO PRÉ-
RESFRIAMENTO DE UM LEITO DE PRODUTOS ESFÉRICOS
DISPOSTO NO INTERIOR DE UMA EMBALAGEM DE PAPELÃO**

PARECER

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por Fernanda Zaratini Vissotto aprovada pela Comissão Julgadora em 28 de maio de 1999.

Autora: Fernanda Zaratini Vissotto
Orientador: Prof. Dr. Theo Guenter Kieckbusch

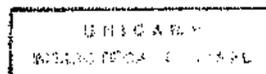
Campinas, 28 de maio de 1999



Prof. Dr. Theo G. Kieckbusch
Presidente da Banca

**Dissertação submetida à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade
de Engenharia de Alimentos, como parte dos requisitos necessários
para obtenção do grau de mestre em Engenharia de Alimentos**

Campinas – S.P.
Maio de 1999



445416

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA F.E.A. - UNICAMP

V828e

Vissotto, Fernanda Zaratini

Estudo dos parâmetros que influenciam no pré-resfriamento de um leite de produtos esféricos disposto no interior de uma embalagem de papelão. / Fernanda Zaratini Vissotto. -- Campinas, SP: [s.n.], 1999.

Orientador: Theo Guenter Kieckbusch.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos.

1. Pré-resfriamento. 2. Embalagens. 3. Papelão. 4. Laranja. I. Kieckbusch, Theo Guenter. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos. III. Título.

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA	
V.	
T.	38239
FE	229/99
	<input checked="" type="checkbox"/>
PRE	R\$ 11,00
DATA	10/08/99
N.º CDD	

CM-00134277-9

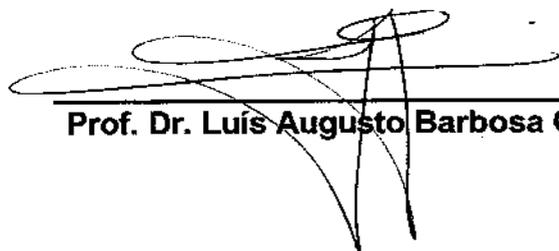
**Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora
constituída pelos professores:**



Prof. Dr. Theo Guenter Kieckbusch



Prof. Dr. Vivaldo Silveira Júnior



Prof. Dr. Luís Augusto Barbosa Cortez

Prof. Dr. Sílvio Luís Honório

Campinas, de maio de 1999

**Aos meus pais e ao meu irmão com amor e carinho.
Em especial ao César pelo companheirismo, compreensão e palavras de entusiasmo em todas as fases deste trabalho.**

Dedico

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Theo Guenter Kieckbusch pela orientação, dedicação e apoio dispensados durante o mestrado;

Ao Prof. MSc. Lincoln C. Neves Filho pelos artigos e pelas sugestões dadas na parte experimental;

Ao Prof. Dr. Clément Vigneault, do *Centre de Recherche et de Développement en Horticulture*, Canadá, pelas sugestões dadas na parte experimental e que contribuíram de maneira significativa para a realização deste projeto de pesquisa;

Ao Prof. Dr. Luís A. Barbosa Cortez e ao Prof. Dr. Vivaldo Silveira Júnior pelas sugestões dadas na fase de correção deste trabalho;

À empresa DANISCO Ingredients pela doação da goma K-Carragena utilizada nos ensaios deste projeto de pesquisa;

À empresa IGARAS Papéis e Embalagens pela doação das caixas de papelão utilizadas nos ensaios deste projeto de pesquisa;

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Alimentos da FEA pelo apoio durante a fase experimental;

Aos amigos do Laboratório de Refrigeração pelo incentivo e apoio;

Aos amigos e colegas do ITAL pelo incentivo e apoio;

Ao Ministério da Educação pela concessão da Bolsa de Estudos (CNPq);

A todas as pessoas que de forma direta ou indireta colaboraram na realização desta Tese.

ÍNDICE

Resumo.....	iv
Abstract.....	v
1. Introdução e Objetivos.....	1
2. Revisão Bibliográfica.....	6
2.1 Pré-Resfriamento.....	6
2.2 Métodos de Pré-Resfriamento.....	7
2.3 Pré-Resfriamento com Ar Forçado.....	14
2.4 Variáveis que Influenciam na Taxa de Resfriamento.....	19
2.4.1 Dimensões do Produto.....	19
2.4.2 Altura do Leito de Produtos.....	20
2.4.3 Aberturas nas Caixas para Ventilação.....	22
2.4.4 Arranjos das Caixas sobre os Paletes e dos Produtos no Interior das Caixas.....	25
2.5 Produto-Modelo.....	26
2.6 Transferência de Calor.....	28
2.6.1 Princípios Básicos.....	28

2.6.2 Critérios para Escolha de um Método de Solução dos Problemas de Transferência de Calor.....	29
2.6.2.1 Sistemas Agregados: Resistência Interna Desprezível.....	31
2.6.2.2 Sistemas Distribuídos: Efeitos Espaciais.....	32
2.6.3 Análise dos Dados de Resfriamento.....	35
2.6.4 Efeito da Variação da Temperatura com o Tempo.....	36
2.6.5 Pré-Resfriamento de Laranjas.....	37
3. Materiais e Métodos.....	39
3.1 Produtos-Modelo Utilizados para Representação das Frutas Esféricas.....	39
3.1.1 Produto-Modelo com 2% de Goma K-Carragena.....	39
3.1.2 Produto-Modelo com 3% de Goma K-Carragena.....	40
3.2 Embalagem Comercial de Papelão.....	43
3.3 Disposição dos Produtos-Modelo em Diferentes Arranjos.....	44
3.4 Sistema de Aquisição dos Dados de Temperatura.....	46
3.5 Construção e Aferição dos Termopares.....	47
3.6 Túnel de Resfriamento com Ar Forçado.....	49
3.7 Monitoramento das Temperaturas no Interior da Caixa.....	51
3.8 Monitoramento das Temperaturas do Ar de Resfriamento.....	52
3.9 Distribuição da Velocidade do Ar na Câmara de Ensaio.....	52

3.10 Propriedades Termofísicas.....	53
3.10.1 Laranja.....	53
3.10.2 Produto-Modelo com 3% de Goma K-Carragena.....	54
3.10.3 Comparação entre a Laranja e o Produto-Modelo com 3% de Goma K-Carragena.....	54
4. Resultados e Discussão.....	55
4.1 Distribuição da Velocidade do Ar no Interior do Túnel de Resfriamento.....	56
4.2 Perfis de Temperatura no Interior do Túnel.....	58
4.3 Influência dos Caminhos Preferenciais do Ar no Tempo de Resfriamento.....	59
4.4 Produtos-Modelo Utilizados para Representação das Frutas.....	63
4.4.1 Produto-Modelo com 2% de Goma K-Carragena.....	63
4.4.2 Produto-Modelo com 3% de Goma K-Carragena.....	67
4.5 Comparação entre o Produto-Modelo com 3% de Goma K-Carragena e duas Variedades de Laranja.....	67
4.6 Distribuição da Temperatura no Leito.....	69
4.7 Determinação da Taxa de Resfriamento.....	73
5. Conclusões.....	86
6. Sugestões para Trabalhos Futuros.....	88
Apêndice A - Temperaturas Adimensionais de Resfriamento.....	89
Apêndice B – Parâmetros de Ajuste.....	103
Referências Bibliográficas.....	107

RESUMO

Estudou-se a influência de variáveis de operação como a velocidade e a temperatura do ar de resfriamento e diferentes disposições de produtos-modelo acondicionados em embalagens de papelão, utilizadas comercialmente para exportação de laranjas, em um processo de pré-resfriamento com ar-forçado. Os produtos-modelo, de formato esférico, foram elaborados com esferas ocas de policloreto de vinila (PVC) preenchidas com solução 3% de goma K-Carragena.

Um túnel de resfriamento com fluxo de ar vertical foi utilizado nos ensaios. As temperaturas do ar-forçado empregadas foram de 5,0 °C, 0,0 °C e - 5,0 °C, mantidas constantes durante cada ensaio. As velocidades do ar de resfriamento foram de 8,0 m/s, 5,0 m/s e 2,9 m/s e as esferas foram dispostas em diferentes arranjos no interior da caixa: triangular, alternado e aleatório.

Os dados experimentais de temperatura adimensional do produto-modelo foram graficados em função do tempo e ajustou-se funções exponenciais da forma

$$\frac{T - T_{ar}}{T_{in} - T_{ar}} = C_1 \exp(-K\theta)$$
. Os coeficientes de correlação obtidos variaram de 0,9807 a 0,9991. Os parâmetros de ajuste C_1 e K permitiram comparar o resfriamento nas diferentes condições de processo empregadas.

Mantendo constante a temperatura do ar de resfriamento e aumentando sua velocidade obtém-se um aumento significativo nas taxas de resfriamento (K).

Mantendo constante a velocidade do ar de resfriamento e diminuindo sua temperatura conclui-se que os valores das taxas de resfriamento (K) são crescentes, embora a variação seja pequena.

A disposição dos produtos-modelo em arranjos triangular, alternado e aleatório não produziu variações significativas nas taxas de resfriamento.

Palavras-chave: pré-resfriamento, ar-forçado, produtos-modelo, caixas de papelão.

ABSTRACT

The influence of operation variables like cooling air temperature and velocity, as well as different arrangements of model-products enclosed in a cardboard container used commercially for fruit export, in a forced air pre-cooling process was studied. The sphere-shaped model-products were manufactured with polyvinyl chloride (PVC) shells filled with a 3% K-carragenan gum solution.

The tests were conducted in a cooling tunnel with a vertical air flow. The forced air temperatures were 5.0 °C, 0.0 °C and – 5.0 °C, kept constant during each test. The cooling air velocity was fixed at 8.0 m/s, 5.0 m/s and 2.9 m/s with the spheres positioned in different arrangements inside the box: triangular, alternated and randomly.

The non-dimensional experimental temperature data of the model-product were plotted as function of time and fittings were made by means of the exponential equation of the type $\frac{T - T_{ar}}{T_{in} - T_{ar}} = C_1 \exp(-K\theta)$. The correlation coefficients obtained varied from 0.9807 to 0.9991. The adjustment parameters C_1 and K allowed for the comparison of the cooling process under different conditions.

Keeping constant the cooling air temperature and increasing its velocity, the cooling rates (K) show increasing values.

Keeping constant the cooling air velocity and decreasing its temperature, the cooling rates (K) show increasing values, although the variation is small.

The differences between triangular, alternated and randomly arrangements of the model-products inside the box are not significant on the cooling rates.

Key-words: pre-cooling, forced-air, model-products, cardboard boxes.

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O Brasil aproveita apenas 50% dos seus 400 milhões de hectares de solo cultivável, sendo que aproximadamente 2 milhões são destinados à fruticultura, mercado que cresce no mundo na ordem de US\$ 1 bilhão por ano, movimentando US\$ 19 bilhões no mercado internacional. No Brasil a indústria de frutas é responsável por US\$ 17 bilhões do Produto Interno Bruto (PIB), gerando 4 milhões de empregos diretos (BERTÃO, 1997).

Diante deste cenário, cabe destacar o Nordeste Brasileiro, que começa a despontar como um mercado promissor para a fruticultura, graças ao Vale do São Francisco, batizado como a Califórnia Brasileira. Abrangendo parte dos estados de Pernambuco, Bahia, Alagoas, Sergipe e Minas Gerais, tem o clima semi-árido tropical como seu maior trunfo. Segundo dados da Valexpor, associação que reúne 1430 produtores e exportadores locais, 780 mil toneladas de frutas são produzidas anualmente na região, sendo que deste total 42 mil seguem para o mercado externo. Recentemente o governo federal decidiu lançar o "Programa de Apoio ao Desenvolvimento da Fruticultura Irrigada do Nordeste", que prevê o cultivo de um milhão de hectares nos próximos anos. A meta dos fruticultores brasileiros é transformar o Brasil em líder mundial na produção de frutas e hortaliças tropicais irrigadas e levar a região do semi-árido nordestino a condição de maior exportador mundial de frutas em menos de 10 anos (BERTÃO, 1997).

Embora ano a ano aumente a produção e a demanda por frutas frescas, as

perdas continuam em níveis elevados. A Coordenadoria de Abastecimento da Secretaria de Agricultura do Estado de São Paulo elaborou em 1992 uma estimativa das perdas de grãos, frutas e hortaliças, com base em dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Fundação Getúlio Vargas, Fundação João Pinheiro e Cooperativa Agrícola de Cotia. Detectou-se que as maiores perdas ocorrem nas frutas e hortaliças, comprometendo 30% da produção. No caso da fruticultura, das 34,4 milhões de toneladas produzidas em 1992, 11 milhões foram desperdiçadas com prejuízos da ordem de US\$ 3 bilhões. A média de perdas por falta de tratamento pré e pós-colheita está entre 30 a 40%, valor este estimado entre a diferença do que é produzido e o adquirido pelo consumidor ou exportado. As causas que levam a estes índices de perdas são a dificuldade de acesso do produtor ao mercado, falta de tecnologia adequada, seja na colheita, embalagem e armazenagem, assim como ineficiência dos sistemas de transporte e comercialização (ANÔNIMO, 1993).

Na década de 80, as exportações do Brasil ficaram estacionadas no patamar de US\$ 50 milhões/ano; a partir de 1992 as exportações passaram a US\$ 100 milhões/ano e com excessão aos anos de 1993 e 1994 esta média manteve-se constante até 1996, conforme mostrado na Tabela 1. Mesmo considerando as perdas, este índice está longe do dos maiores exportadores mundiais: Espanha e Estados Unidos, cada um, US\$ 3,5 bilhões; Chile, US\$ 1,4 bilhão; África do Sul, US\$ 1 bilhão; Israel US\$ 700 milhões e México, US\$ 500 milhões (IBRAF, 1996).

TABELA 1. Exportações de Frutas Frescas.

Ano	Quantidade 1000 toneladas	Valor US\$ milhão
1982	150,0	38
1984	188,0	42
1986	234,0	50
1988	205,0	52
1990	190,0	54
1992	301,6	100
1993	362,6	132
1994	359,4	127
1995	228,3	103
1996	247,4	105

A solução para a redução dos altos níveis de perda, buscando assegurar a qualidade do produto, é o uso de tecnologias adequadas, desde a colheita até que este chegue à mesa do consumidor. O frio tem importante papel na conservação dos alimentos, já que a diminuição da temperatura retarda as transformações provocadas por reações bioquímicas, diminui a cinética de velocidade de maturação, o crescimento indevido de brotos, caules e a germinação de sementes, além de reduzir a deterioração, devido ao crescimento e disseminação de bactérias e fungos. A aplicação do processo de resfriamento a uma grande gama de produtos perecíveis permite a oferta de produtos de boa qualidade, inclusive em períodos sazonais, a custo competitivo, representando ganho tanto para o consumidor como para o produtor.

No Brasil, o resfriamento de frutas e hortaliças frescas começa a receber a atenção devida, tendo como exemplo a produção de maçãs, cujas exportações saltaram de US\$ 1,7 milhão em 1991 para US\$ 20,9 milhões em 1992. A incorporação de novas tecnologias ao processo produtivo, como a instalação de câmaras especiais, inclusive com atmosfera modificada, possibilitou dinamismo

neste setor, onde o Brasil não tinha tradição até poucos anos atrás, no qual a qualidade é ponto fundamental (NEVES et al., 1997).

O resfriamento das frutas e hortaliças pode ser realizado utilizando-se sistemas com vácuo, corrente de água, ar e gelo. Dentre os métodos de resfriamento a ar, destaca-se o realizado em túneis e câmaras, sendo que o resfriamento em túneis com ar-forçado tem se mostrado bastante eficiente. Cabe destacar que a embalagem utilizada para o acondicionamento dos produtos, quando se faz uso deste tipo de sistema de resfriamento, merece a devida atenção, uma vez que uma maior eficiência é conseguida com um adequado projeto da embalagem utilizada.

Hoje, no mercado nacional, existe uma forte tendência na substituição das embalagens de madeira por papelão, fato já observado em outros países, como por exemplo, Estados Unidos. Para se ter uma idéia da proporção entre estes dois tipos de embalagens, em dezembro de 1996, passaram pelo Ceasa-Campinas 1,6 milhões de caixas e desse total 85% eram de madeira e apenas 15% de papelão (SILVEIRA, 1997). Atenta ao crescimento do mercado de hortifrutis e a esta forte tendência de mercado, a segunda maior fabricante de embalagens de papelão do país, a empresa Rigesa Celulose, Papel e Embalagens, está cedendo gratuitamente, aos produtores rurais, equipamentos de montagem de embalagens de papelão para uso nas fazendas. Os projetos das embalagens são determinados em parceria entre a empresa e os produtores, obedecendo especificações que garantam a integridade das frutas e hortaliças embaladas (SILVEIRA, 1997). Não se observa, no entanto, por parte dos fabricantes ou produtores, a preocupação com parâmetros que certamente asseguram uma maior eficiência no resfriamento, quando sistemas com ar-forçado são usados.

O levantamento bibliográfico realizado indicou que apesar de uma crescente tendência na utilização da embalagem de papelão no Brasil, os trabalhos nacionais, correlacionando o efeito desta no resfriamento de frutas com ar-forçado estão se iniciando. A maioria dos artigos internacionais comparam, em termos de eficiência de resfriamento, a utilização da embalagem de papelão com as de madeira e muitas vezes embalagens específicas ao país de origem. Devido às diversas variáveis envolvidas no pré-resfriamento de frutas acondicionadas em embalagens de papelão, fez-se o estudo, considerando apenas uma caixa. Com o objetivo de obter uma melhor reprodutibilidade de dados e visando facilitar a análise destes, trabalhou-se com produtos-modelo, representando as frutas. Os produtos-modelo foram feitos com esferas plásticas e goma k-carragena.

Os objetivos do presente trabalho foram:

- Estudar o processo de pré-resfriamento com ar-forçado, quando se resfria um leito de esferas, acondicionadas em embalagens de papelão, utilizadas comercialmente para exportação.

- Analisar a distribuição de temperaturas através do leito de esferas, correlacionando os dados obtidos por meio de gráficos e equações que descrevam os perfis de temperatura.

- Analisar a influência de variáveis de operação como a temperatura e a velocidade do ar de resfriamento, assim como diferentes disposições dos produtos no interior da embalagem sobre a taxa de resfriamento, buscando desta forma a melhoria da eficiência destes sistemas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Pré-Resfriamento

O termo pré-resfriamento sugere a rápida remoção do calor sensível do produto recém-colhido, antes que este seja estocado ou transportado a longas distâncias para comercialização. Este processo é normalmente realizado em local separado da estocagem, em poucas horas ou até mesmo minutos e requer equipamentos especiais (ASHRAE, 1994; SPAGNOL & SIGRIST, 1988).

O pré-resfriamento tem como principal objetivo a inibição da deterioração, uma vez que o abaixamento da temperatura retarda o crescimento de microorganismos, restringindo as atividades enzimática e respiratória, preservando desta forma o frescor e o "flavour" do produto. Adicionalmente ele retarda a perda de umidade e o conseqüente enrugamento, além de reduzir a quantidade de energia gasta durante o armazenamento (BENNETT, 1971).

Alguns produtos bastante perecíveis, dentre os quais destacam-se vagem, brócolis, couve-flor, milho em espiga, tomate, vegetais folhosos, alcachofra, repolho, cenoura, ervilha e rabanete devem ser resfriados imediatamente após a colheita, preferencialmente ainda no campo. NOOMHORM & TING (1990) desenvolveram um pré-resfriador móvel projetado para utilização em fazendas, junto às plantações.

Frutas comercialmente importantes que necessitam ser resfriadas logo após a colheita incluem o abacate, morango, pêssego, nectarina, ameixa, frutas

tropicais e subtropicais como goiaba, manga, papaia e abacaxi. As frutas tropicais e subtropicais ainda apresentam a particularidade de serem susceptíveis a injúrias pelo frio e, portanto, necessitam de uma temperatura de resfriamento específica. Embora a uva, pera e as frutas cítricas tenham uma vida pós-colheita maior se comparadas com as tropicais e subtropicais, a retirada de calor sensível destes produtos, através do pré-resfriamento, justifica-se pela manutenção da qualidade e frescor durante o período de estocagem (ASHRAE, 1994).

A escolha do método de resfriamento mais adequado para determinado tipo de produto está associada a limitações do produto, a fatores econômicos, a própria conveniência do método, adequação entre o equipamento utilizado e a embalagem, grau de maturação, temperatura do produto no momento da colheita, entre outros. Caso mais de um método possa ser aplicado para um mesmo tipo de produto, o custo torna-se o fator a ser considerado.

Estudos econômicos foram realizados com o intuito de comparar os diferentes métodos de pré-resfriamento disponíveis, correlacionando sistemas contínuos ou em bateladas com a forma de acondicionamento do produto, se a granel ou em caixas de papelão (GAFFNEY & BOWMAN, 1971; BAIRD et al., 1985; BAIRD et al., 1988; GAFFNEY & BAIRD, 1991).

2.2 Métodos de Pré-Resfriamento

Dentre os métodos de pré-resfriamento destacam-se o resfriamento a vácuo, com água fria, gelo e ar-forçado.

O pré-resfriamento a vácuo baseia-se na rápida evaporação da água de produtos perecíveis, cuja área de superfície é grande em relação ao volume. O

princípio do método fundamenta-se no fato de que a pressões reduzidas a água evapora a temperaturas baixas, sendo o calor de vaporização requerido para evaporar a água fornecido pelo produto. A água ferve à temperatura de 100°C à pressão ao nível do mar de 760 mmHg (101,3 kPa). Quando a pressão é reduzida para 4,6 mmHg (0,6 kPa), como o que ocorre no resfriador a vácuo, a água passa a evaporar à temperatura de 0°C. A mudança de fase da água do estado líquido para o vapor requer energia da ordem de 514 kcal (2150,6 kJ) por quilograma de água evaporada (BENNETT, 1971).

Já o pré-resfriamento com água é obtido graças à aspersão ou pela própria imersão do produto em tanques com agitação. Graças à simplicidade do processo, rapidez, economia e eficácia, o pré-resfriamento com água é um método popular. A taxa de transferência de calor é proporcional ao coeficiente de transferência de calor convectivo, à área de exposição do produto ao fluido de resfriamento e à diferença de temperatura entre a superfície e o ambiente (ASHRAE, 1994).

Quando um filme de água fria entra em contato com o produto, a temperatura na superfície torna-se essencialmente igual a do fluido de resfriamento. A taxa de resfriamento é limitada pela relação entre o volume e a área de superfície do produto sendo resfriado, além, de suas propriedades térmicas. Se a velocidade do fluido sobre os produtos é suficientemente alta, como no fluxo gravitacional ou na convecção forçada, a resistência à retirada de calor da superfície é desprezível. Neste caso ideal, o calor é removido instantaneamente ao chegar à superfície e a diferença de temperatura através da camada limite é bastante pequena, com um coeficiente de transferência de calor convectivo de aproximadamente 700 W/m² K (ASHRAE, 1994).

Os equipamentos frigoríficos utilizados em sistemas de pré-resfriamento com água dispõe de uma serpentina onde o refrigerante é expandido (evaporador). Através do acúmulo de gelo nesta serpentina nos períodos durante o dia quando a energia elétrica é mais barata, é possível uma significativa redução nos custos do processo de resfriamento (VIGNEAULT & GOYETTE, 1994).

Mas, este tipo de pré-resfriamento tem-se mostrado insatisfatório em alguns casos específicos, principalmente para frutas cítricas, ocorrendo um aumento da deterioração depois que a fruta retorna à temperatura ambiente. HALL (1972) observou o aparecimento de danos fisiológicos e o autor atribuiu este fenômeno à compressão da água nos tecidos do produto, inicialmente à temperatura ambiente, quando submetido ao contato com a água resfriada.

Normalmente as frutas cítricas não são resfriadas por este método, uma vez que são susceptíveis ao aparecimento de injúrias na casca e diminuição e perda da qualidade e vitalidade após o resfriamento (ASHRAE, 1994).

Devido à recirculação da água nestes sistemas pode ocorrer a contaminação cruzada por microorganismos, causando efeitos patológicos (BENNETT, 1971). Alguns desinfetantes suaves como cloro ou compostos fenólicos aprovados reduzirão o acúmulo de bactérias e esporos de fungos, mas não acabarão com as infecções já presentes nos produtos e na água. O principal problema na utilização destas substâncias químicas é conseguir a manutenção de concentrações uniformes, particularmente em sistemas com acúmulo de gelo, devido às constantes diluições que ocorrem graças à fusão (ASHRAE, 1994).

Neste tipo de pré-resfriamento as frutas encontram-se geralmente

dispostas à granel, havendo a necessidade do remanuseio da carga de produtos, visando a embalagem ou a estocagem, aumentando desta forma os custos de produção (VIGNEAULT & GOYETTE, 1994).

Outro sério entrave citado por ZALDIVAR et al. (1984) reside no fato que, após o pré-resfriamento com água, as frutas são armazenadas úmidas, aumentando a incidência de podridões, comprometendo a qualidade dos produtos.

Gelo finamente moído é utilizado para retirar a carga térmica de produtos como brócolis, espinafre, raízes, alcachofras, couve de bruxelas, alho verde, alho poró, melões, milho doce, cenouras entre outros. O método consiste em introduzir nas embalagens gelo ou a mistura de gelo e água e tem como principal vantagem a manutenção da baixa temperatura associada a uma alta umidade do meio de resfriamento (VIGNEAULT et al., 1995).

Como citado anteriormente, existe uma grande tendência de mercado em utilizar-se caixas de papelão em substituição às de madeira. Uma camada de cera impermeabilizante deve ser aplicada às embalagens de papelão caso este processo de pré-resfriamento seja empregado (ASHRAE, 1994).

O pré-resfriamento com ar-forçado nada mais é que um método rápido de retirar calor sensível do produto recém colhido, submetendo-o a um fluxo de ar frio. Normalmente ventiladores são utilizados com esta finalidade, associados a um sistema de refrigeração que diminui a temperatura do ar a ser circulado. O ar-forçado deve envolver totalmente o produto, permitindo um contato eficiente entre o meio de resfriamento frio e o produto a maior temperatura, recém colhido, e a transferência de calor dá-se pelo processo convectivo forçado.

Experimentos revelam que este tipo de processo pode ser aplicado a vários produtos tais como maçãs, laranjas, tangerinas, morangos, *blueberries*, *raspberries*, aipo, couve de bruxelas, couve-flor, uvas, espinafre, vagens, ervilhas, abobrinhas, milho em espiga, cogumelos entre outros (KOPELMAN et al., 1966; SOULE et al., 1966; SMITH et al., 1970; ARIFIN & CHAU, 1987; OHLING, 1990).

O pré-resfriamento com ar-forçado normalmente é realizado em equipamentos denominados túneis e não deve ser confundido com o resfriamento lento realizado em câmaras frigoríficas, onde a transferência de calor dá-se nos produtos por condução.

O resfriamento em câmaras é vastamente utilizado graças a sua versatilidade e baixo custo em comparação com os outros métodos (VIGNEAULT & GOYETTE, 1994). É um método de resfriamento bastante ineficiente, embora proporcionando a vantagem de um mínimo manuseio da carga, já que o produto é resfriado e estocado no mesmo local. Trata-se de um resfriamento bastante lento, uma vez que o fluxo de ar não é direcionado ao produto, seguindo caminhos preferenciais que ofereçam menor resistência a sua passagem, não adentrando desta forma a embalagem. Dependendo do grau de perecibilidade do produto resfriado, este método poderá comprometer a qualidade do mesmo (GAFFNEY, 1977).

Além disso, a câmara frigorífica é projetada para a retirada da carga térmica referente à respiração, transmissão pelas paredes, teto e piso com isolamento, motores, aberturas de portas, além de outras fontes e não inclui a referente ao calor sensível (NEVES F°, 1991). Assim, pode ocorrer que a temperatura da câmara, durante o processo de pré-resfriamento, fique em um valor superior ao ideal para o armazenamento, acarretando com isso, um menor

tempo de vida-útil do produto.

Quando a câmara é utilizada simultaneamente como resfriador e local de estocagem, ocorre um efeito prejudicial ao produto, devido à variação da temperatura com a entrada de uma nova carga, podendo haver ainda a condensação de umidade sobre a superfície do produto anteriormente estocado (MITCHELL et al., 1972; NEVES F° et al., 1993).

No pré-resfriamento com ar-forçado os produtos são resfriados em um terço ou um quarto do tempo se comparados com o tradicional resfriamento realizado em câmaras, MITCHELL et al. (1972); mas ainda demanda duas a três vezes mais tempo que o resfriamento com água ou a vácuo (VIGNEAULT & GOYETTE, 1994).

FRASER (1991) realizou alguns experimentos comparando o resfriamento de um palete de morangos, utilizando um túnel com ar-forçado e uma câmara frigorífica. As temperaturas no centro do palete foram monitoradas e o autor constatou que 1,25 horas eram necessárias para resfriar com ar-forçado o palete da temperatura de 20°C para 2°C, enquanto que no resfriamento em câmaras, 3,75 horas foram necessárias para diminuir a temperatura somente até 14°C. Fazendo-se uma projeção para a situação na qual o palete, nos dois processos utilizados, alcança a mesma temperatura final, o autor concluiu que o resfriamento realizado em câmara é vinte e uma vezes mais lento que o realizado em túneis com ar-forçado.

GUILLOU (1960) comparou a velocidade de resfriamento de pêssegos através do uso de diferentes métodos de resfriamento: câmaras, ar-forçado e água. A diferença de temperatura entre a fruta e o meio de resfriamento em

função do tempo foram monitoradas e as curvas de resfriamento características obtidas estão representadas na Figura 2.1.

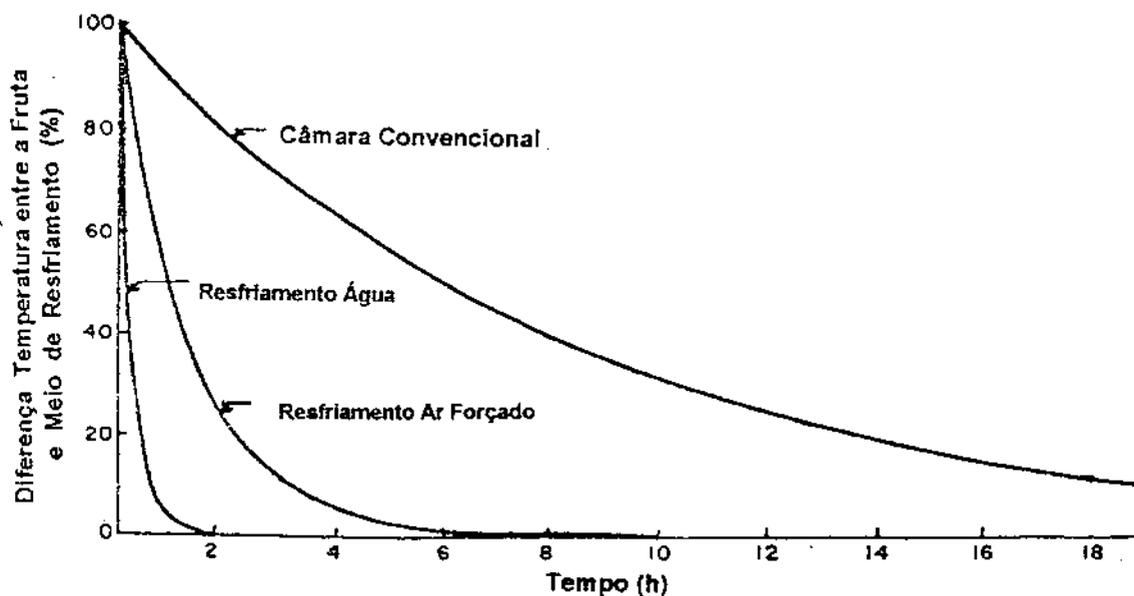


FIGURA 2.1 Comparação entre o resfriamento de pêssegos realizado através do uso de diferentes métodos: câmaras, ar-forçado e água (GUILLOU, 1960).

Como se pode observar através da Figura 2.1, o resfriamento com água é o mais eficiente, ou seja, o produto é resfriado num menor tempo. Em seguida se destaca o resfriamento realizado com ar frio e o mais ineficiente dos três tipos comparados é o resfriamento realizado em câmaras frigoríficas convencionais.

Devido às desvantagens do uso do pré-resfriamento nas próprias câmaras de estocagem, diferentes variações de sistemas com circulação forçada de ar têm sido desenvolvidas e estudadas, buscando-se melhorar a taxa de resfriamento da carga de produtos (MITCHELL et al.,1972; OHLING, 1990; NEVES F° et al., 1993; VIGNEAULT & GOYETTE, 1994).

2.3 Pré-Resfriamento com Ar-Forçado

Um eficiente resfriamento com ar-forçado é obtido através de uma adequada exposição do produto ao meio de resfriamento. A máxima área de superfície exposta possibilita um efetivo contato e torna possível a obtenção de um alto coeficiente de transferência de calor convectivo a aceitáveis taxas de fluxo de ar (FRASER, 1991).

Uma avaliação preliminar pode ser obtida considerando-se a clássica correlação de transferência de calor que relaciona os números de Nusselt-Reynolds-Prandtl (ASHRAE, 1994):

$$\frac{2hL}{k} = C \left(\frac{2LG'}{\mu} \right)^m \left(\frac{\mu C_p}{k} \right)^n \quad (2.1)$$

onde:

C = constante

C_p = calor específico do produto (J/kg°C)

k = condutividade térmica do produto (W/m°C)

μ = viscosidade dinâmica do ar (Pa.s)

L = comprimento característico do produto (m)

h = coeficiente de transferência de calor convectivo (W/m²°C)

G' = taxa mássica de fluxo de ar (kg/s.m²)

m, n = coeficientes

Através desta relação observa-se que, para uma temperatura do ar específica e comprimento característico do produto, o coeficiente de transferência de calor convectivo é proporcional à taxa mássica de fluxo de ar. Ou seja:

$$h = f(G') \quad (2.2)$$

No resfriamento com ar-forçado, os valores dos coeficientes de transferência de calor convectivos são menores se comparados com o resfriamento utilizando-se água e desta forma, a diferença de temperatura entre o produto e o meio de resfriamento deve ser, correspondentemente, maior para se conseguir um resfriamento eficiente. Isto é viabilizado, reduzindo-se a temperatura do ar substancialmente numa etapa inicial da operação e posteriormente aumentando-a. Este artifício, utilizado no processo de pré-resfriamento, é denominado resfriamento em multi-estágios.

PFLUG et al.(1965) mostraram que maçãs dispostas à granel num túnel de resfriamento, resfriam-se mais rapidamente com ar a $-6,7^{\circ}\text{C}$ à velocidade de $3,0\text{ m/s}$ do que se fossem expostas a um spray de água à $1,7^{\circ}\text{C}$. Os autores se limitaram a comparar a eficiência entre os resfriamentos com água e ar e não forneceram nenhuma informação a respeito da presença de injúrias nos produtos resfriados.

SOULE et al., (1969) citado em HALL (1972) e GRIERSON et al., (1970) desenvolveram na Flórida um sistema de resfriamento rápido com ar-forçado que operasse a temperaturas bastante baixas e que pudesse ser implementado nos *packing-houses*. Estes trabalhos sucederam aos estudos realizados por GUILLOU (1960) na Califórnia.

Utilizando-se temperaturas da ordem de -10°C e velocidades do ar entre $1,27$ e $1,52\text{ m/s}$, GRIERSON et al., (1970) realizaram o resfriamento de frutas cítricas acondicionadas em caixas abertas, possibilitando um eficiente fluxo de ar através da carga. As frutas inicialmente estavam à temperatura de 25°C e foram resfriadas até a temperatura final de 6°C , não apresentando injúrias, desde que a temperatura na superfície não ficasse abaixo do seu ponto de congelamento, em

torno de -2°C . As perdas de peso por evaporação, durante o resfriamento, segundo os autores, ficaram abaixo de 1%.

BAIRD et al. (1988) obtiveram curvas que correlacionam as temperaturas do ar, variando numa faixa de -7°C a 5°C , com o tempo de resfriamento, para produtos acondicionados em caixas de papelão e à granel. Através da observação das curvas obtidas, os autores concluíram que, quando o ar é insuflado a temperaturas negativas, o tempo de resfriamento é reduzido drasticamente. Somente como ilustração, a uma velocidade do ar constante e igual a $0,25\text{ m/s}$ e temperatura do ar de 4°C , produtos acondicionados em caixas de papelão necessitam de 7,8 horas para resfriarem até uma determinada temperatura final, ao passo que quando submetidos ao ar de resfriamento com temperatura de -7°C , o tempo de resfriamento passa a ser de aproximadamente 2 horas. Os autores também concluíram que quando a temperatura do ar aproxima-se da temperatura final desejada do produto, o tempo e o custo de resfriamento aumentam drasticamente. Estes resultados ilustram que a temperatura do ar de resfriamento deve ser o mais baixa possível, desde que não haja o risco do congelamento do produto.

GAFFNEY & BAIRD (1991) mostraram que temperaturas negativas do ar de resfriamento podem ser utilizadas durante a parte inicial do processo, sem congelar o produto. Uma vez que a superfície do produto aproxima-se do ponto de congelamento, a temperatura do ar pode ser aumentada gradualmente para evitar que o produto chegue a congelar.

Desta forma conclui-se que o conceito de pré-resfriamento com ar-forçado em multi-estágios, apresenta um grande potencial comercial para os *packing-houses*, aumentando a eficiência do pré-resfriamento com ar-forçado.

Se as frutas encontram-se dispostas em leito, submetidas a uma determinada taxa de fluxo de ar, a transferência de calor convectiva é menor se comparada com as obtidas por produtos simples, resfriados isoladamente, uma vez que menor área de superfície é exposta ao fluido de resfriamento (ASHRAE, 1994).

Coefficientes de transferência de calor convectivos, variando entre 50 a 68 $W/m^2\text{°C}$, foram obtidos por SOULE et al. (1966) ao resfriar laranjas Hamlin e tangerinas Orlando dispostas à granel, utilizando-se fluxos de ar na faixa de velocidade entre 1,1 a 1,8 m/s.

BENNET et al., (1966) resfriaram 450 quilos de laranjas da variedade Hamlin, de aproximadamente 72 mm de diâmetro, com temperatura inicial de 27°C para uma temperatura final de 8°C, utilizando-se velocidade do ar de resfriamento de 1,7 m/s. O tempo necessário para o resfriamento foi de uma hora e os coeficientes de transferência de calor encontrados estavam na ordem de 62 $W/m^2\text{°C}$.

Correlacionando dados experimentais no resfriamento de laranjas à granel com um modelo matemático desenvolvido para esta situação, BAIRD & GAFFNEY (1976) encontraram coeficientes de transferência de calor por convecção de 8,15 $W/m^2\text{°C}$ e 55 $W/m^2\text{°C}$, para velocidades de fluxo de ar de 0,055 m/s e 2,1 m/s, respectivamente. Os autores chegaram a uma correlação de transferência de calor, relacionando os números de Nusselt e Reynolds, a partir de dados experimentais do resfriamento de laranjas de 70 mm de diâmetro e grapefruit de 107 mm. A correlação obtida apresentou um coeficiente de correlação de 0,996 e está representada na Equação 2.3.

$$Nu = 1,17 Re^{0,529} \quad (2.3)$$

A taxa de evaporação na superfície do produto também afeta significativamente a taxa de resfriamento. Em princípio, o resfriamento evaporativo ocorre quando o ar não se encontra no estado saturado e é insuflado através de uma superfície úmida (HALL, 1972). A medida que a água contida na superfície do produto evapora, o calor é removido e conseqüentemente ocorre uma diminuição da temperatura. Produtos que perdem umidade facilmente não devem ser resfriados com ar-forçado. Exemplos destes produtos são alface, espinafre e cogumelos, que tradicionalmente são resfriados em sistemas de resfriamento a vácuo, brócolis e milho doce que são resfriados com água fria ou gelo e aspargos e pêssegos que são resfriados com água fria (FRASER, 1991).

Devido às características físicas, mais especificamente da geometria, várias frutas e hortaliças respondem diferentemente a temperaturas e fluxos de ar semelhantes. PERRY et al. (1968) concluíram que pêssegos abaixam de temperatura mais rapidamente que batatas quando são resfriados em um leito sob condições semelhantes de fluxo de ar e temperatura.

Existem situações no processo de pré-resfriamento em que há uma grande resistência à passagem do ar através dos interstícios do leito de produtos disposto à granel, havendo a necessidade de desenvolver-se embalagens adequadas ou dispor o produto em um modelo de estocagem que permita uma efetiva circulação do ar. Um típico exemplo observado ocorre quando se faz o resfriamento de produtos de diâmetro pequeno, como é o caso dos morangos e uvas.

2.4 Variáveis que Influenciam na Taxa de Resfriamento

Para estudar o resfriamento com ar-forçado é necessário o conhecimento das variáveis que afetam a taxa de resfriamento, dentre as quais destacam-se: o tamanho, a forma e as propriedades térmicas do produto; seu acondicionamento, se em caixas de papelão ou à granel, assim como o arranjo das frutas nas caixas e a disposição destas últimas em paletes. Outros parâmetros importantes são: a área de abertura nas caixas para circulação de ar, a profundidade do leito, temperaturas inicial e final desejadas para o produto, além da temperatura, velocidade e umidade relativa do ar de resfriamento (BAIRD et al., 1988; GAFFNEY & BAIRD, 1991).

Desde que estes fatores afetam a taxa de resfriamento, eles tem uma direta influência em seu custo.

O tamanho, a forma e as propriedades térmicas são fatores intrínsecos ao produto e não podem ser alterados, mas as outras variáveis que afetam a taxa de resfriamento podem ser manipuladas, buscando-se a otimização dos sistemas de resfriamento.

2.4.1 Dimensões do Produto

KOPELMAN et al., (1966), estudaram a influência do diâmetro do produto no valor de " F ", um parâmetro definido por PFLUG & BLAISDELL (1963) correspondendo a 90% do tempo de resfriamento, ao resfriarem com ar-forçado maçãs individuais da variedade Jonathan. Os autores graficaram os dados de " F " obtidos experimentalmente em função do diâmetro da fruta, utilizando uma escala semilogarítmica e obtiveram que, para uma velocidade do ar constante, o valor de " F " aumenta linearmente com o aumento do diâmetro da fruta.

Conforme o diâmetro do produto varia, observa-se uma significativa influência no tempo de resfriamento. No caso de um produto resfriado individualmente e para um coeficiente de transferência de calor convectivo constante, o tempo de resfriamento é proporcional ao Número de Fourier (Fo), que relaciona o tempo com o quadrado do raio do produto. Desta maneira, para uma mesma condição convectiva, uma duplicação do tamanho leva a um aumento de quatro vezes no tempo de resfriamento.

A relação de Fourier é parcialmente válida para produtos dispostos em leitos como foi observado por GAFFNEY et al. (1991) ao resfriar frutas esféricas dispostas à granel e acondicionadas em caixas de papelão. Nestes dois casos em específico, os produtos que se encontravam mais próximos à entrada do ar seguiram a relação de Fourier, mas os produtos dispostos nas camadas inferiores não obedeceram esta relação entre o tempo de resfriamento e o diâmetro do produto, devido às mudanças na temperatura do ar ao mover-se através da carga.

2.4.2 Altura do Leito de Produtos

A altura dos produtos dispostos no leito ou altura das caixas nos paletes, na direção do fluxo de ar, tem um significativo efeito no desempenho dos sistemas de resfriamento com ar-forçado, sendo que a eficiência da circulação do ar é reduzida, conforme a altura do leito aumenta, acarretando um incremento tanto no tempo de resfriamento como na perda de pressão (BAIRD et al., 1988). Como consequência, ocorre um sensível aumento da carga térmica gerada pelo ventilador, sendo acrescida ao calor sensível que deve ser retirado das frutas (GAFFNEY & BAIRD, 1991).

BAIRD et al. (1988), estudaram a influência da altura do leito de produtos

esféricos dispostos à granel e acondicionados em caixas de papelão no tempo de resfriamento. Os autores concluíram que o tempo necessário para o resfriamento aumenta com a disposição das frutas no leito, devido ao gradiente de temperaturas que se estabelece na direção do fluxo de ar. Os autores concluíram também que o custo do processo de resfriamento, dos produtos dispostos à granel mantém-se constante se o leito apresentar altura entre 0,9 m e 2,4 m. Já com referência às caixas de papelão, a altura do leito que implica num menor custo deve variar entre 0,6 m e 0,9 m.

GAFFNEY (1977) analisou a influência da altura do leito na taxa de resfriamento, relacionando o tamanho do produto e sua posição no leito. As curvas foram obtidas a partir de um modelo desenvolvido por BAIRD & GAFFNEY (1976), para estudar a transferência de calor de produtos de forma esférica dispostos à granel. Observando-se as curvas de resfriamento para os produtos de menores dimensões, conclui-se que aqueles mais expostos ao ar de resfriamento são resfriados durante a primeira hora. No entanto, para a camada mais afastada da entrada do fluxo de ar, sete horas são necessárias para que se inicie seu resfriamento. Isto deve-se ao fato que, a baixas velocidades, a taxa de fluxo mássico do ar é pequena e sua capacidade térmica para absorver o calor sensível das frutas é o fator limitante. Desta forma, a temperatura do ar aumenta substancialmente, enquanto este se move através do leito de esferas, ocorrendo um resfriamento mais lento dos produtos dispostos nas camadas mais afastadas. Este efeito é mais pronunciado quando o diâmetro do produto é menor.

ARIFIN & CHAU (1987) relataram uma diferença de aproximadamente 80 minutos no tempo de resfriamento entre o primeiro e o último cesto de morangos, dispostos numa caixa de papelão e sujeitos ao resfriamento com fluxo de ar de $1,04 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ por quilo de carga.

2.4.3 Aberturas nas Caixas para Ventilação

Um dos mais importantes critérios para obter-se um resfriamento rápido é a utilização de aberturas para ventilação adequadamente dimensionadas e localizadas. Se uma área de abertura superior a 10% for fornecida à caixa de papelão, de forma a obter-se uma circulação do ar bastante uniforme através dos interstícios da carga de produtos, as taxas de resfriamento se aproximariam daquelas quando o produto está disposto à granel (BAIRD et al., 1988).

No pré-resfriamento a ar, o contato do meio de resfriamento com o produto deve ser o mais efetivo possível, sendo recomendada a utilização de embalagens que apresentem de 5 a 10 % de área de abertura através da face de entrada do ar (FRASER, 1991).

A percentagem de abertura para ventilação além de influenciar na taxa de resfriamento, ainda apresenta um grande impacto na resistência física da embalagem. BAIRD et al.(1988) afirmam que pelo menos 5% de área de abertura pode ser utilizada sem afetar significativamente a resistência da caixa de papelão.

Quanto maior a área disponível para entrada do ar de resfriamento na embalagem, menor a energia necessária para operar o ventilador e sistema frigorífico. BAIRD et al.(1988) correlacionam por meio de gráficos a percentagem de abertura de caixas de papelão e o custo de resfriamento, concluindo que abaixo de 3% de abertura, o custo de resfriamento aumenta significativamente. Os autores afirmam que uma caixa de papelão com 5% de abertura, submetida a uma velocidade do ar de 0,25 m/s necessita de 3,75 horas, em média, para resfriar, com custo equivalente a US\$ 0,13/kg de produto, enquanto que para resfriar uma caixa com 2% de área de abertura, a uma mesma velocidade do ar, 4,65 horas são necessárias a um custo equivalente de US\$ 0,18/kg. No caso

extremo da caixa apresentar 1% de área de abertura, o tempo de resfriamento passa a ser de 6,6 horas e o custo aumenta drasticamente para US\$ 0,43/kg.

Grande parte das embalagens de papelão utilizadas comercialmente para acondicionar frutas e hortaliças possuem menos que 3% de área de abertura e portanto não são indicadas para a utilização em sistemas de pré-resfriamento com ar. Em termos práticos não é difícil aumentar a área de abertura para 5% sem causar danos em sua resistência física (BAIRD et al., 1988). Infelizmente, no entanto, ainda não existe uma conscientização da necessidade de se alterar os projetos das embalagens que estão no mercado, visando otimizar o processo de resfriamento.

Se as caixas com os produtos estiverem dispostas em paletes, é importante a presença de aberturas nas faces laterais, superiores e inferiores, de forma que estas aberturas estejam alinhadas com as aberturas das caixas adjacentes. Além disso, a utilização de um modelo de estocagem adequado das caixas sobre o palete, irá atribuir à coluna de caixas um arranjo físico estável e contribuirá para maximizar o fluxo de ar através das aberturas.

ARIFIN & CHAU (1987) estudaram o pré-resfriamento de morangos, comparando o efeito de diferentes modelos de aberturas para ventilação propostos pelos autores com a caixa de papelão padrão comercialmente utilizada no pré-resfriamento destes produtos. Foram testadas caixas com três e quatro aberturas esféricas de 3,8 cm de diâmetro, perfazendo um total de 13,5 % e 18 % de área de abertura, respectivamente. Também foram testadas sete aberturas esféricas de 2,54 cm de diâmetro, representando 14% de área para ventilação. A caixa padrão possuía como abertura uma espécie de canal retangular na parte superior, correspondendo a 14% de área para ventilação. Os testes experimentais

foram conduzidos, utilizando-se quatro velocidades do ar: 0,32 m/s, 0,64 m/s, 1,27 m/s e 1,90 m/s. Houve um grande incremento na taxa de resfriamento, quando a taxa de fluxo de ar foi aumentada de 0,32 m/s para 0,64 m/s e um aumento relativamente pequeno para maiores velocidades do ar. O tempo de resfriamento também é uma função da localização da fruta na caixa de papelão com relação ao ar de entrada. Para todas as taxas de fluxo de ar testadas, a última caixa de morangos levou duas vezes o tempo necessário para alcançar uma temperatura final específica, quando comparada com a primeira caixa. Todos os novos modelos de aberturas testados melhoraram a eficiência do resfriamento se comparados com a caixa padrão e, através da análise estatística dos dados, os autores concluíram que as caixas com três e quatro aberturas são significativamente melhores para o resfriamento de morangos que a caixa padrão comercialmente utilizada. O aumento da eficiência no resfriamento foi mais pronunciado a menores taxas de fluxo de ar. A razão para esse resfriamento mais eficiente é a melhor distribuição do ar dentro da caixa no caso dos novos modelos propostos. No caso da caixa padrão, quando o ar é forçado através da abertura para ventilação, este tende a continuar através do caminho preferencial formado entre a parte superior da caixa e o fundo da embalagem imediatamente acima, não percorrendo portanto pela maioria das frutas.

A perda de pressão em um fluxo de ar através das aberturas para ventilação está diretamente relacionada com a percentagem de abertura, sendo pouco influenciada pelo tamanho, forma ou localização das aberturas (HASS et al., 1976).

2.4.4 Arranjos das Caixas sobre os Paletes e dos Produtos no Interior das Caixas

A influência de diferentes formas de arranjo das caixas sobre os paletes tem sido objeto de investigações. Avaliou-se também a disposição dos produtos no interior das caixas, na tentativa de melhorar a taxa de resfriamento.

GRIERSON et al.(1970) realizaram testes de pré-resfriamento de citrus acondicionados em caixas de papelão usadas comercialmente. Os autores utilizaram um túnel com ar-forçado, sendo a distribuição do ar de resfriamento realizada verticalmente sobre a carga e o retorno sob o piso. Três modelos de empilhamento das caixas nos paletes foram testados. O arranjo que apresentou uma maior eficiência na taxa de resfriamento foi o que mantinha as aberturas para ventilação da parte superior e inferior das caixas alinhadas e as aberturas laterais fechadas. Não havia espaçamento nenhum entre as colunas de caixas e o piso de ripas de madeira estava vedado com uma lona. O empilhamento em questão foi o que apresentou menores possibilidades de caminhos preferenciais, sendo o ar de resfriamento obrigado a passar pela carga de produtos, otimizando desta forma o pré-resfriamento.

Estudos realizados por Mc.DONALD et al.(1973) mostram que o modelo de estocagem proposto por GRIERSON & BROWN (1975) tem sido utilizado para o transporte de cargas em caminhões ou *containers* ventilados, obtendo uma grande eficiência, desde que as caixas disponham de suficiente área de abertura.

HALL (1972) estudou os efeitos do uso de diferentes tipos de embalagens, arranjos e percentagens de aberturas para ventilação ao realizar o pré-resfriamento com ar-forçado de maçãs e peras.

CHAU et al. (1985) realizaram o resfriamento de quatro diferentes tamanhos de laranja Valência dispostas em quatro diferentes arranjos à granel e acondicionadas em caixas de papelão. No “arranjo reto” as laranjas foram empilhadas diretamente umas sobre as outras, resultando em colunas retas. Já no “arranjo quadrado”, cada quatro frutas adjacentes formavam um quadrado e cada fruta da segunda camada apoia-se nos quatro produtos da camada anterior. No “arranjo alternado”, a fruta em cada camada foi disposta de forma que cada três frutas adjacentes formavam um triângulo equilátero e cada produto da próxima camada se apoiava em três frutos da camada anterior. No “arranjo randômico” as frutas encontravam-se dispostas de forma randômica. Os autores concluíram que o modelo de estocagem tem maior influência na resistência ao fluxo de ar do que o tamanho da fruta. Observaram também que quanto maior a porosidade do arranjo, menor a resistência ao fluxo de ar, independentemente do diâmetro do produto. Desta forma, a classificação em ordem decrescente dos arranjos, quanto à resistência ao fluxo de ar ficou: arranjo alternado > arranjo quadrado > arranjo randômico > arranjo reto.

2.5 Produto-Modelo

Existem muitas dificuldades associadas ao estudo de transferência de calor envolvendo alimentos e um sério problema encontrado consiste na mudança das propriedades térmicas em função do grau de maturação, variedade do produto, safra, além de variações no diâmetro, forma, espessura da casca entre outras.

Modelos para representar os produtos alimentícios tem sido extensivamente utilizados nos estudos de transferência de calor (DYNER & HESSELSCHWERDT, 1964; LIN, 1994; ALVAREZ & TRYSTAM, 1995).

DYNER & HESSELSCHWERDT (1964) utilizaram em seus estudos de transferência de calor um produto-modelo composto por 78% de água, 20% de açúcar e 2% de ágar-gel. Esta mistura era aquecida até o ponto de ebulição no qual permanecia por cinco minutos. Após a ebulição a mistura era resfriada e acondicionada nos moldes metálicos de forma e tamanho desejados. Após a solidificação, os modelos eram removidos dos moldes e estavam prontos para uso. A difusividade térmica obtida foi de $4.10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. A remoção dos modelos dos moldes era feita minutos antes do resfriamento, de forma a evitar a desidratação da superfície externa. Se este procedimento não fosse adotado, sérios erros seriam introduzidos no estudo de transferência de calor uma vez que as soluções de ágar formam uma película desidratada na superfície, quando exposta ao ar ambiente por um longo período de tempo.

ALVAREZ & TRYSTAM (1995) utilizaram esferas de gel de 0,075 m de diâmetro no estudo de transferência de calor em um leite. Uma solução de 3% de carragena foi injetada dentro dos moldes de alumínio, sendo posteriormente resfriados em água fria. Cada esfera foi equipada com três termopares de cobre-constantan, localizados no centro, na superfície e no ponto de estagnação, definido pelos autores como o ponto de contato entre duas esferas, local onde a intensidade do fluxo de ar no leite era baixa.

Esferas de alginato de cálcio foram congeladas por LIN (1994) com o objetivo de elaborar um modelo de transferência de calor. Os produtos-modelo foram preparados a partir da reação completa do alginato de sódio com o lactato de cálcio, formando o alginato de cálcio.

2.6 Transferência de Calor

2.6.1 Princípios Básicos

Segundo KERN (1987) existem três modos diferentes para a transmissão de calor de uma fonte para um receptor. Na maior parte das aplicações na engenharia ocorre combinações de dois ou três destes modos. Estes mecanismos denominam-se condução, convecção e radiação. Na condução ocorre a transmissão de calor através de um material macroscopicamente estagnado. Supondo que exista uma fonte de calor sobre uma face do objeto e que exista um receptor na face oposta, o fluxo de calor por unidade de tempo é proporcional à variação de temperatura através do corpo e à área transversal. A constante de proporcionalidade é peculiar aos processos de transmissão de calor por condução e é conhecida como condutividade térmica (k). Esta é determinada experimentalmente e possui uma grande faixa de valores numéricos, dependendo do sólido ser um bom condutor de calor tal como um metal ou um condutor pobre como um isolante. Já a convecção envolve uma interface e um fluido que estão a temperaturas diferentes e ocorre graças à transmissão de calor entre uma porção quente e uma quantidade fria de um fluido através do processo de mistura. A convecção natural ocorre graças a diferenças de densidade do fluido a diferentes temperaturas e caso o fluido seja agitado por meios mecânicos, seja através de uma bomba ou um ventilador, o fenômeno passa a ser denominado de convecção forçada. A constante de proporcionalidade h , denominada como coeficiente de transferência de calor convectivo, é um termo influenciado pela natureza do fluido, da agitação e da geometria e deve ser avaliado experimentalmente. A transferência de calor por radiação é particularmente significativa a maiores temperaturas e não requer nenhum fluido, sendo que uma parte da energia é absorvida e outra é refletida. Trata-se de uma forma de transferência de calor

pouco comum em situações envolvendo materiais biológicos. Uma vez que a transmissão de calor envolve a troca num sistema, a perda de calor por um corpo será igual ao calor absorvido pelo outro dentro dos limites do mesmo sistema.

No tratamento térmico de produtos agrícolas, no caso de frutas e outros vegetais, a transferência de calor dá-se raramente em um corpo com geometria simples, mas a análise desta situação mais simplificada pode ser aplicada como ponto de partida para descrição deste fenômeno na condição de multicorpos (MOHSEIN, 1980). No tratamento que segue, dar-se-á consideração especial ao sistema de coordenadas esféricas, aplicável a laranjas.

2.6.2 Critérios para Escolha de um Método de Solução dos Problemas de Transferência de Calor

Determinados grupos adimensionais que correlacionam as propriedades físicas e parâmetros de engenharia são frequentemente usados nos problemas de transferência de calor. Dentre estes pode-se destacar o Número de Fourier (F_o) e o Número de Biot (Bi) que são largamente aplicados nos problemas de resfriamento e/ou aquecimento de alimentos.

O Número de Fourier (F_o) é definido por HOLMAN (1986) como sendo um tempo adimensional:

$$F_o = \frac{\alpha \theta}{R^2} \quad (2.4)$$

onde:

α = difusividade térmica do produto (m²/s)

R = raio da "esfera" (m)

θ = tempo (s)

O Número de Biot (Bi) é definido por MOHSENIN (1980) como a relação entre a resistência externa e a resistência interna à transferência de calor, conforme explicitado a seguir:

$$Bi = \frac{hR}{k} \quad (2.5)$$

onde:

h = coeficiente de transferência de calor por convecção ($W/m^2\text{°C}$)

K = condutividade térmica do produto (W/mK)

E dependendo das propriedades do corpo e do fluido ambiente, assim como das condições de escoamento do fluido envolvendo o produto, o Número de Biot pode assumir um valor grande, pequeno ou intermediário. Os alimentos tem uma dimensão característica, R, da ordem de centímetros, de modo que, quando o Número de Biot é muito pequeno, ou seja, menor que 0,2, a temperatura do corpo é substancialmente uniforme. Esta condição é obtida quando a condutividade térmica, k, é grande, permitindo um rápido fluxo de calor através do corpo, com um gradiente de temperaturas próximo do zero. O coeficiente de transferência de calor por convecção assume valores bastante baixos. Por definição, tal condição não ocorre com alimentos sólidos sujeitos ao processo de pré-resfriamento, já que a condutividade térmica do corpo é relativamente pequena comparada com o coeficiente de transferência de calor convectivo (GOYETTE et al., 1997). No caso em que o Número de Biot é maior que 10, a diferença de temperaturas entre a superfície do corpo e o meio de resfriamento é desprezível, sendo que o maior gradiente de temperaturas ocorre entre a superfície e o centro do objeto. Ou seja, o coeficiente de transferência de calor convectivo é grande comparado com a condutividade térmica e esta torna-se o fator limitante para a transferência de calor. E o terceiro caso ocorre quando os

valores do Número de Biot estão entre 0,2 e 10. Sob tais condições existem resistências interna e externa finitas para a transferência de calor.

2.6.2.1 Sistemas Agregados: Resistência Interna Desprezível

Para situações em que $Bi < 0,2$, a resistência ao fluxo de calor pode ser considerada, devido somente, à resistência no fluido junto à superfície do corpo. Consequentemente, uma temperatura na superfície num determinado instante não é apreciavelmente diferente da temperatura interna média. Sob tais condições o fluxo de calor é dado por:

$$q = hA(T - T_f) \quad (2.6)$$

onde:

- q = taxa de transferência de calor (W)
- h = coeficiente de transferência de calor por convecção ($W/m^2\cdot C$)
- A = área da superfície do produto (m^2)
- T = temperatura uniforme do produto ($^{\circ}C$)
- Tf = temperatura do fluido ($^{\circ}C$)

Para o resfriamento de um produto de volume V_1 , colocado em um ambiente à temperatura constante, tem-se o seguinte balanço de energia, em um intervalo de tempo diferencial $d\theta$:

$$\int_{T_m}^T \frac{dT}{T - T_{ar}} = - \frac{hA}{C_p \rho V_1} \int_0^{\theta} d\theta \quad (2.7)$$

onde:

T_{in} = temperatura inicial do produto ($^{\circ}\text{C}$)

T_{ar} = temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)

C_p = calor específico do produto ($\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$)

ρ = densidade do produto (kg/m^3)

V_1 = volume do produto (m^3)

A solução desta equação diferencial resulta em:

$$\frac{(T - T_{ar})}{(T_{in} - T_{ar})} = \exp - \left(\frac{hA}{C_p \rho V_1} \right) \theta \quad (2.8)$$

Ou seja, a temperatura do produto diminui exponencialmente com o tempo. Além disso, a equação exponencial sugere que o intervalo de tempo requerido para que um produto sofra uma dada mudança de temperatura é diretamente proporcional a sua resistência térmica na superfície, $1/hA$, ao calor específico, à densidade e a relação entre o volume e a superfície (V/A).

2.6.2.2 Sistemas Distribuidos: Efeitos Espaciais

No caso geral do resfriamento de alimentos e produtos agrícolas, o coeficiente de transferência de calor convectivo, h , pode ser grande, quando comparado com a condutividade térmica, k , tal que a temperatura na superfície muda mais rapidamente que a temperatura no interior do corpo e estabelece-se um gradiente de temperaturas. Em tais casos a Lei de Fourier é mais aplicável. A Equação de Fourier, que estabelece um histórico de temperatura num corpo sólido, é derivada da conservação de energia para um elemento de espaço

infinitesimal. A taxa de condução de calor dentro do elemento mais a taxa de geração do calor é igual à taxa de aumento da energia interna. Para um corpo sem fonte de calor interna e condutividade térmica constante a equação de Fourier da condução em coordenadas esféricas é dada por (MOHSENIN, 1980):

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} = \frac{\alpha}{r^2} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{\sin \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\sin \phi \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{1}{\sin^2 \phi} \frac{\partial^2 T}{\partial \psi^2} \right) \right] \quad (2.9)$$

onde:

- α = difusividade térmica (m²/s)
- r = dimensão característica (m)
- ϕ = ângulo longitudinal
- Ψ = ângulo latitudinal

se a temperatura não varia com ϕ ou ψ a equação acima reduz-se à:

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} = \frac{\alpha}{r^2} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] = \frac{\alpha}{r^2} \left[2r \frac{\partial T}{\partial r} + r^2 \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right] \quad (2.10)$$

A solução analítica da equação, para condições de contorno constantes com o tempo, é dada por ARPACI (1966) como:

$$\frac{T - T_{ar}}{T_{in} - T_{ar}} = 2 \sum \frac{\sin M_n - M_n \cos M_n}{M_n - \sin M_n \cos M_n} \exp - \frac{M_n^2 \alpha \theta}{R^2} \frac{\sin M_n \frac{r}{R}}{M_n \frac{r}{R}} \quad (2.11)$$

Sendo que M_n são as sucessivas soluções da equação característica da Equação 2.12:

$$M_n = \frac{M_n}{\tan M_n} = 1 - Bi \quad (2.12)$$

Desde que as soluções analíticas destas equações levam a somas de séries infinitas, soluções são propostas na forma de gráficos ou cartas, como proposto por GURNIE & LURIE (1923), WILLIAMSON & ADAMS (1919) e HEISLER (1947), citados em MOHSENIN (1980).

Quando o Número de Fourier é maior do que 0,2, a solução em série pode ser aproximada para apenas um termo (INCROPERA & WITT, 1992):

$$\frac{T - T_{ar}}{T_{in} - T_{ar}} = C_1 \exp\left(-M_n^2 \frac{\alpha \theta}{R}\right) \left(\frac{1}{M_n \frac{r}{R}}\right) \text{sen}\left(M_n \frac{r}{R}\right) \quad (2.13)$$

onde C_1 é uma função do Número de Biot.

A temperatura de maior interesse é a do ponto central. Fazendo $r=0$ na Equação 2.13, tem-se:

$$\frac{T - T_{ar}}{T_{in} - T_{ar}} = C_1 \exp(-M_n^2 Fo) \quad (2.14)$$

Uma listagem dos valores de C_1 e M_n está na Tabela 2.1.

TABELA 2.1 Valores de C_1 e M_n em função do Número de Biot, para aproximação de um termo na solução em série da condução unidimensional transiente para esfera (INCROPERA & de WITT, 1992).

Bi	C_1	M_n
0,05	1,0149	0,3852
0,06	1,0179	0,4217
0,07	1,0209	0,4550
0,08	1,0239	0,4860
0,09	1,0268	0,5150
0,10	1,0298	0,5423
0,15	1,0445	0,6608
0,20	1,0592	0,7593
0,25	1,0737	0,8448
0,30	1,0880	0,9208

2.6.3 Análise dos Dados de Resfriamento

A equação geral de resfriamento de esferas é:

$$\frac{T - T_{ar}}{T_{in} - T_{ar}} = C_1 \exp(-K\theta) \quad (2.15)$$

Para sistemas com resistência interna desprezível, considera-se que:

$$C_1 \equiv 1,0 \quad (2.16)$$

$$K = \frac{hA}{C_p \rho V_1} \quad (2.17)$$

Já para situações nas quais as duas resistências são importantes, tem-se que:

$$C_1 \neq 1,0 \quad (2.18)$$

$$K = M_n^2 \frac{\alpha}{R^2} \quad (2.19)$$

Sendo que C_1 e M_n , dados na Tabela 2.1, dependem do Número de Biot, e portanto, do coeficiente de transferência de calor por convecção (h).

Locando os valores da temperatura versus tempo em um gráfico semi-logarítmico, deve-se, necessariamente, obter uma reta e os valores dos coeficientes darão uma indicação sobre os valores relativos das resistências.

O parâmetro K pode ser visto como um coeficiente de resfriamento. Altos valores de K indicam uma diminuição mais rápida da temperatura com o tempo.

2.6.4 Efeito da Variação de Temperatura do Ar com o Tempo

No resfriamento de leitos profundos, a temperatura do fluido responsável pelo resfriamento é função do tempo e da localização no leito, e não é conhecida "a priori", com exceção da primeira camada, que recebe o ar a uma temperatura que se mantém constante. Fica assim caracterizada uma situação de

transferência de calor em estado não estacionário, com a temperatura do ar variando de uma forma que não foi considerada na obtenção da Equação 2.11.

Durante o resfriamento, quando a temperatura do meio varia com o tempo de uma forma simples e conhecida, é possível obter uma expressão analítica através da superposição de soluções do problema fundamental, cada uma com condições de contorno constantes (ARPACI, 1966, MEYERS, 1971). O desenvolvimento teórico conduz ao Teorema de Duhamel e foi detalhado por NOVY (1985).

A solução da equação de Fourier pelo Teorema de Duhamel corrige a Equação 2.14 com um termo adicional, que compreende uma integral em relação ao tempo da variação da temperatura do ar. A equação, portanto, não tem a forma simples e geral da Equação 2.15.

2.6.5 Pré-Resfriamento de Laranjas

Durante o levantamento bibliográfico observou-se que existe um grande número de dados sobre propriedades térmicas de frutas e vegetais (ASHRAE, 1993; MOHSENIN, 1980). Cabe ressaltar que os dados publicados variam bastante, devido ao uso de diferentes técnicas nas determinações das propriedades físicas, assim como pela grande variedade existente para cada espécie de fruta.

Tendo em vista que o interesse deste estudo é determinar a influência de parâmetros como a velocidade, a temperatura do ar e o arranjo das frutas no interior da caixa na taxa de resfriamento, torna-se conveniente a utilização de propriedades térmicas médias. Desta forma pode-se citar os seguintes valores (ASHRAE, 1993):

- Condutividade térmica da casca (k) = 0,179 W/m°C
- Condutividade térmica do suco (k) = 0,435 W/m°C
- Calor Específico da laranja (C_p) = 3,85 kJ/kg°C
- Densidade aparente (ρ) = 640 kg/m³

Uma laranja típica, de diâmetro igual a 6,9 cm, pode ser considerada em situação de resistência interna desprezível se:

$$Bi = \frac{hR}{k} = \frac{h (3,45 \cdot 10^{-2})}{0,435} < 0,2 \quad (2.26)$$

o que corresponde a $h < 2,52 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Este valor serve apenas como referência, uma vez que é extremamente baixo e em situações normais de pré-resfriamento dificilmente alcançado, pois recomenda-se valores práticos de projeto em torno de 50 W/m²°C ou superiores (SOULE et al, 1966).

A laranja entretanto, tem uma estrutura composta, cuja a casca com o albedo formam uma proteção térmica e impermeabilizante que pode ser considerada uma resistência adicional à transferência de calor. Essa resistência, se incluída na resistência externa, implicaria em um coeficiente efetivo de transferência de calor mais baixo.

Um outro fator que aumenta a resistência externa, sobretudo em laranjas acondicionadas em caixas é a formação de “zonas mortas”. A presença destas implica em pouca renovação do ar e diminuição da área disponível para convecção.

Pode-se afirmar, portanto, que, no estudo do resfriamento de laranjas colocadas em caixas de papelão, o modelo do sistema agregado pode ser aplicado.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Produtos-modelo Utilizados para Representação das Frutas Esféricas

Dois produtos-modelo foram testados em ensaios preliminares para avaliar o sólido que melhor representaria as frutas esféricas. Um deles elaborado com solução 2% de goma K-Carragena e o outro obtido a partir de esferas ocas preenchidas com solução 3% do mesmo hidrocolóide.

3.1.1 Produto-modelo com 2% de Goma K-Carragena

O primeiro produto-modelo testado foi preparado através de adaptação do método proposto por DYNER & HESSELSCHWERDT (1964). Este consistia de gel preparado a partir de uma solução de 85% de água, 11,5% de açúcar, 2% de goma K-Carragena, (Carrageenan CL 381), fornecida pela empresa Danisco Ingredients e 1,5% de sorbato de potássio. Este produto-modelo tentava repetir a composição de uma fruta, sendo que o sorbato de potássio era adicionado com o intuito de evitar o crescimento de fungos.

Para formar as esferas de gel, a solução era preparada adicionando o sorbato de potássio à água até total dissolução. Posteriormente, promovia-se a dispersão da mistura do hidrocolóide e do açúcar na água a frio, por meio de uma intensa agitação até obter-se um produto uniforme. Após esta etapa prosseguia o aquecimento, até a temperatura de ebulição, onde permanecia por dez minutos. A solução era então mantida em repouso por três minutos com o objetivo de eliminar

o máximo possível de bolhas formadas durante o aquecimento sem, no entanto, tornar o produto muito viscoso com o resfriamento. Em seguida o gel era injetado no interior de moldes plásticos, com o auxílio de uma seringa, e deixado resfriar em repouso por algumas horas e posteriormente desmoldado. Os termopares eram então inseridos para ler a temperatura no centro geométrico das esferas.

As esferas de goma, quando não utilizadas durante os experimentos, eram armazenadas sob refrigeração, acondicionadas em embalagens plásticas, protegidas por filmes de polietileno de alta densidade, a fim de evitar a perda excessiva de umidade através da superfície, característica inerente aos géis. No dia anterior ao ensaio, as esferas de goma eram retiradas da geladeira e deixadas à temperatura ambiente, de forma que entrassem no túnel de resfriamento para o teste, a aproximadamente 25 °C. Mesmo quando deixadas à temperatura ambiente, os produtos-modelo permaneciam protegidos com embalagens de polietileno.

A durabilidade média destes produtos-modelo era de uma semana, devido ao crescimento de fungos e a perda de umidade através da superfície durante os experimentos, havendo a necessidade de refazê-los com frequência.

A cada ensaio, o arranjo das esferas na caixa era montado e desmontado. Os termopares utilizados no monitoramento dos dados de temperatura eram inseridos e no fim de cada ensaio eram retirados.

3.1.2 Produto-modelo com 3% de Goma K-Carragena

O segundo produto-modelo testado para simulação das frutas foi feito com esferas ocas de 6,9 cm de diâmetro externo. A parede das esferas era de

Policloreto de Vinila (PVC) e apresentava 4,0 mm de espessura. Estas eram preenchidas com gel, obtido a partir de solução de 3% de goma K-carragena, com a mesma especificação utilizada no preparo do produto-modelo anterior. Estes foram elaborados segundo adaptação dos produtos-modelo estudados por ALVAREZ & TRYSTAM (1995) e de acordo com orientação recebida do Pesquisador Clément Vigneault, do "Centre de Recherche et de Développement en Horticulture", Canadá. O referido pesquisador já havia trabalhado com este tipo de esferas como sensores para medida da distribuição da temperatura no interior de caixas, em trabalhos de pré-resfriamento de brócolis em sistemas que associam gelo e água (MAUL et al, 1997).

Antes de receber o gel, fixava-se o termopar no centro da esfera. Para tanto foram feitas duas pequenas aberturas na esfera de PVC, em extremidades opostas. Um dos fios do termopar, no caso o Constantan, por apresentar maior resistência física, foi inserido por estas aberturas, puxando-se então a junta (ponto de solda) e o cabo de cobre. Através da marcação do raio da esfera nos dois cabos, de cada lado da junta, conseguiu-se colocar o ponto de leitura no centro geométrico da esfera. Os dois cabos do termopar eram então fixos na superfície da esfera minimizando desta forma problemas devido a deslocamentos.



FIGURA 3.1. Desenho esquemático da fixação do termopar na esfera.

Materials e Métodos

Dois pequenos orifícios foram feitos na esfera, um para a entrada da solução, já que o enchimento foi feito à quente, e o outro para o escape de bolhas de ar.

A solução foi preparada de forma semelhante à descrita no primeiro modelo, apenas omitindo-se os componentes como o açúcar e o sorbato de potássio. O gel era injetado no interior da esfera, através do auxílio de uma seringa e agulha hipodérmica. As esferas eram mantidas em recipiente com água em ebulição de forma a manter uma uniformidade do gel injetado, durante o enchimento. Posteriormente eram deixadas resfriar por algumas horas e como acabamento às aberturas feitas, tanto para a inserção dos cabos dos termopares como para a saída do ar e entrada do gel, foram vedadas com cola de silicone, evitando a entrada de ar e a possível contaminação por microorganismos. Os produtos-modelo eram mantidos então à temperatura ambiente por dois dias, garantindo uma efetiva gelificação da solução.

A Figura 3.2 apresenta um corte transversal do produto-modelo.

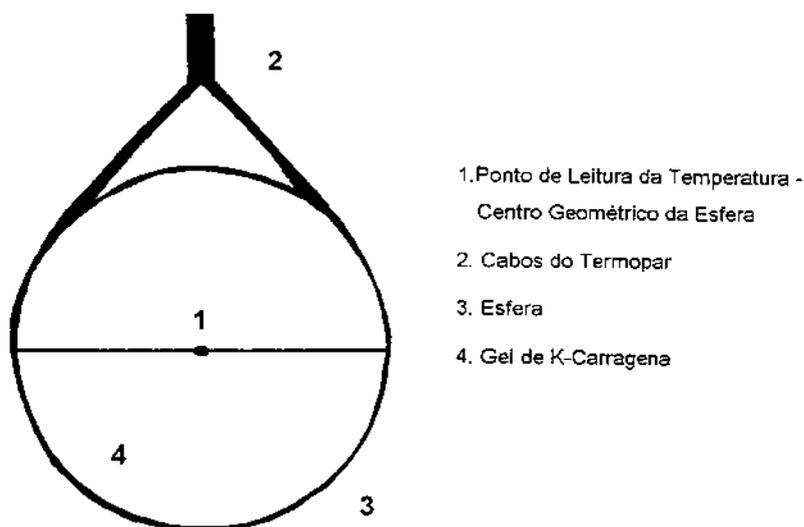


FIGURA 3.2. Corte transversal do produto-modelo elaborado para a simulação das frutas.

Este produto-modelo apresentou grande durabilidade, não se verificando o crescimento de fungos ou de outros microorganismos, assim como perda de umidade para o ambiente.

3.2 Embalagem Comercial de Papelão

Nos ensaios de pré-resfriamento com ar forçado, as esferas foram acondicionadas em embalagens de papelão, utilizadas comercialmente para exportação de laranjas, cedidas pela empresa Igaras Papéis e Embalagens LTDA, localizada em Jundiaí, São Paulo. As dimensões da embalagem eram 43 cm de comprimento, 28 cm de largura e 28 cm de altura.

As faces superior e inferior, eram dotadas de 4 aberturas para ventilação de formato circular, enquanto que nas laterais as aberturas eram aproximadamente elípticas. As aberturas laterais não tinham participação no processo de resfriamento pois o fluxo de ar frio utilizado nos testes era dirigido verticalmente sobre a caixa, e no campo de provas a caixa era prensada entre placas de poliestireno expandido, de forma a evitar caminhos preferenciais do ar pelo lado externo. A área total das aberturas na face superior era equivalente à 3,95%. Maiores detalhes da embalagem utilizada podem ser observados através da Figura 3.3.



FIGURA 3.3 Embalagem comercial de papelão.

3.3 Disposição dos Produtos-modelo em Diferentes Arranjos

Em cada caixa eram colocadas 88 esferas.

Três diferentes formas de disposição no interior da embalagem foram testados: o arranjo alternado, o triangular e o aleatório.

No arranjo alternado, as esferas foram dispostas em 4 camadas, sendo que cada camada era formada por quatro fileiras, sendo duas com seis produtos-modelo e outras duas, com cinco. O produto-modelo em cada camada formava com os dois produtos-modelo adjacentes, um triângulo equilátero e cada esfera

da camada superior se apoiava em dois produtos-modelo da camada inferior.

No arranjo triangular, as esferas foram dispostas em 5 camadas, sendo 3 camadas compostas por 18 modelos e 2 camadas por 17 modelos. As esferas eram espaçadas entre si, de forma que a segunda camada se sobrepunha sobre a primeira, formando um arranjo bastante simétrico.

E no terceiro arranjo testado, os produtos-modelo estavam dispostos aleatoriamente no interior da embalagem.

Através das Figuras 3.4 e 3.5 é possível uma visualização mais detalhada dos arranjos alternado e triangular.

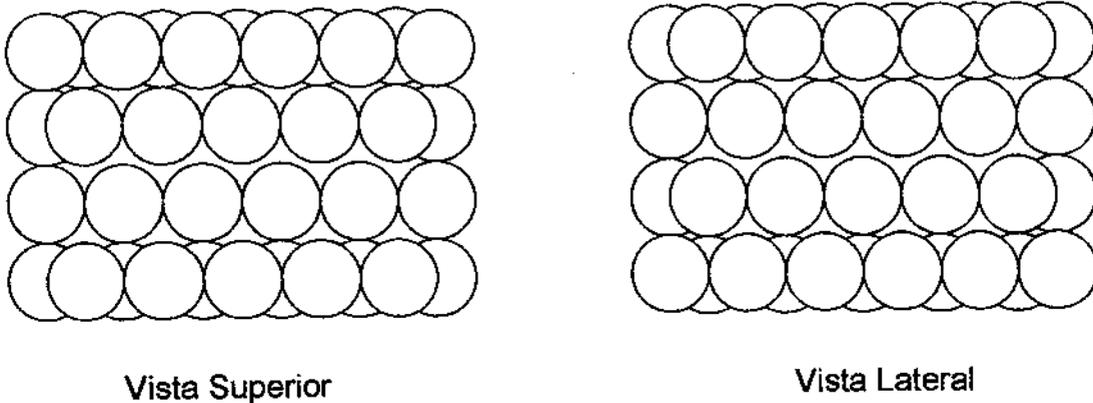


FIGURA 3.4. Vista superior e lateral das esferas dispostas no arranjo alternado.

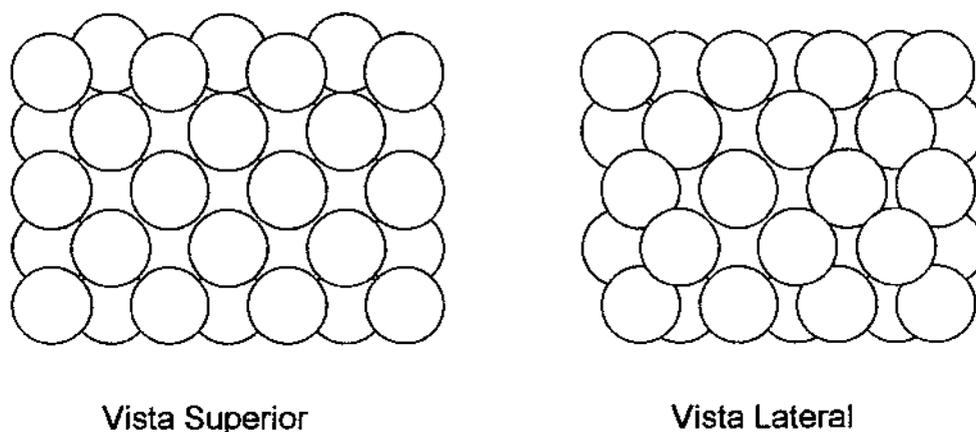


FIGURA 3.5. Vista superior e lateral das esferas dispostas no arranjo triangular.

Com o objetivo de se obter um perfeito ajuste do arranjo no interior da embalagem, evitando que os produtos-modelo se deslocassem das posições inicialmente estabelecidas, placas de poliestireno expandido de 0,5 cm de espessura foram dispostas no interior da caixa, entre o arranjo de esferas e a caixa, assegurando uma melhor reprodutibilidade dos dados de temperatura versus tempo obtidos.

3.4 Sistema de Aquisição dos Dados de Temperatura

Para o monitoramento das leituras de temperatura, um sistema de aquisição de dados da marca Lynx, São Paulo, foi instalado no Laboratório de Refrigeração da FEA. Este sistema era constituído por uma placa de condicionamento de sinais analógicos PCX 0802 e um conversor de sinais CAD 12/16 com 16 canais. Este

dispositivo trabalhava em conjunto com um computador AT 386, de modo que os termopares utilizados fossem conectados nos canais do conversor. Com o auxílio de um software fornecido pela empresa Lynx, os dados durante os experimentos foram coletados em disco rígido para posterior análise.

O sistema foi calibrado com o auxílio de uma fonte geradora de tensões em milivolts, marca HP, no CEMEC da UNICAMP.

3.5 Construção e Aferição dos Termopares

Os termopares tipo T, de cobre-constantan, utilizados no monitoramento das temperaturas dos ensaios, tanto nos produtos-modelo como no ar, foram construídos a partir de cabos flexíveis AWG 24 e posteriormente soldados com estanho.

A aferição do sistema empregado na obtenção dos dados de temperatura dos produtos-modelo, ou seja, termopares mais placa de aquisição Lynx, foi realizada, utilizando-se um banho ultracriostato, com sistema de aquecimento e resfriamento e excelente controle de temperatura (precisão de 0,05 °C). Os termopares foram imersos em álcool, juntamente com termômetros padrão da marca Incotherm, a aproximadamente 8 centímetros da superfície e fundo da cuba e o banho regulado de modo a cobrir a faixa de temperaturas empregadas nos experimentos, ou seja, entre + 30 °C e 0 °C, em intervalos de 5 °C.

O sistema de monitoramento das temperaturas do ar de resfriamento, composto por termopares mais indicador manual com chave seletora de canais, foi aferido do mesmo modo, alterando-se apenas a faixa de temperaturas empregadas, de + 20 °C a - 10 °C, em intervalos de 5 °C.

Para cada termopar, uma regressão linear foi feita, a partir dos dados da aferição, correlacionando os valores lidos nos respectivos sistemas de aquisição e os lidos nos termômetros padrão. Equações matemáticas para correção das temperaturas foram obtidas e, juntamente com os coeficientes de correlação, estão apresentadas nas Tabelas 3.1. e 3.2.

TABELA 3.1 Equações matemáticas para correção das temperaturas dos termopares utilizados no ar e os respectivos coeficientes de correlação.

Termopar	Equação	R ²
1	$Y = 1,0174X - 0,5492$	0,9999
2	$Y = 1,0185X - 0,5958$	0,9999
3	$Y = 1,0187X - 0,6211$	0,9999
4	$Y = 1,0195X - 0,6707$	0,9999

onde: X = temperatura lida no indicador de temperatura manual (° C); Y = temperatura corrigida (° C) e R² = coeficiente de correlação da regressão linear.

TABELA 3.2 Equações matemáticas para correção das temperaturas dos termopares utilizados nos produtos-modelo e os respectivos coeficientes de correlação.

Termopar	Equação	R ²
1	$Y = 0,9999X - 0,5537$	0,9989
2	$Y = 1,0012X - 0,5566$	0,9994
3	$Y = 0,9983X - 0,0269$	0,9991
4	$Y = 0,9985X - 0,1661$	0,9997
5	$Y = 0,9984X - 0,1782$	0,9995
6	$Y = 0,9988X - 0,1310$	0,9992
7	$Y = 0,9988X - 0,1224$	0,9995

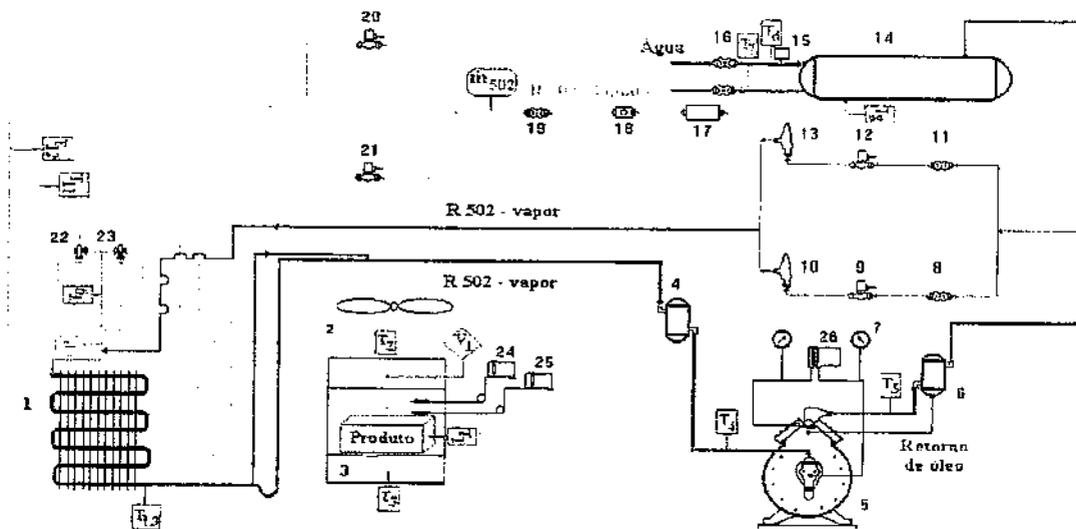
onde: X = temperatura lida no sistema de aquisição de dados (° C); Y = temperatura corrigida (° C) e R² = coeficiente de correlação da regressão linear.

3.6 Túnel de Resfriamento com Ar-Forçado

O túnel de resfriamento com ar-forçado, marca Radio Frigor, utilizado nos experimentos, localiza-se no Laboratório de Refrigeração (FEA) da UNICAMP e está esquematizado na Figura 3.6.

Através desta figura é possível identificar as partes mais importantes do sistema de resfriamento, como o compressor do tipo semi-hermético, marca Bitzer Frigor, modelo BHS-1900 NS, o condensador a água tipo casco e tubo, o separador de óleo, após a descarga do compressor e o separador de líquido, antes da sucção.

Os ensaios foram realizados com o ar de resfriamento em três diferentes temperaturas, + 5,0 °C, 0,0 °C e - 5,0 °C, mantidas constantes em cada experimento, e o controle de temperaturas do sistema era feito através de um conjunto de válvulas solenóides e válvulas controladoras de pressão, dispostas na linha de vapor da instalação frigorífica. Conforme a carga térmica ia sendo retirada do campo de provas, existia uma diminuição da temperatura de evaporação do refrigerante e a função deste conjunto de válvulas era injetar refrigerante na forma de vapor, da descarga do compressor, na entrada do evaporador, possibilitando a manutenção da temperatura em uma faixa de valores pré-definidos. Com o auxílio deste dispositivo foi possível manter as temperaturas do ar de resfriamento variando na ordem de $\pm 0,6$ °C.



1 - Evaporador	14 - Condensador
2 - Ventilador	15 - Sensor de Vazão de Água
3 - Câmara de Congelamento	16 - Válvulas Manuais de entrada/saída de Água
4 - Separador de Líquido	17 - Filtro Desumidificador de Refrigerante
5 - Compressor	18 - Visor de Líquido Refrigerante
6 - Filtro de Óleo	19 - Válvula de Serviço
7 - Manômetros	20 - Válvula Solenóide (Resfriador)
8 - Válvula de Serviço	21 - Válvula Solenóide (Congelador)
9 - Válvula Solenóide (Resfriador)	22 - Válvula de Expansão Termostática
10 - Válvula Reguladora de Pressão	23 - Válvula de Expansão Termostática
11 - Válvula de Serviço	24 - Termostato (Resfriador)
12 - Válvula Solenóide (Congelador)	25 - Termostato (Congelador)
13 - Válvula Reguladora de Pressão	26 - Regulador de Pressão

FIGURA 3.6. Túnel de resfriamento com ar-forçado

3.7 Monitoramento das Temperaturas no Interior da Caixa

Os produtos-modelo contendo os termopares foram distribuídos em 7 pontos no interior da embalagem de papelão, conforme explicitado pela Figura 3.7. Como o número de camadas variou de um arranjo para outro, procurou-se dispor as esferas aproximadamente nos mesmos locais.

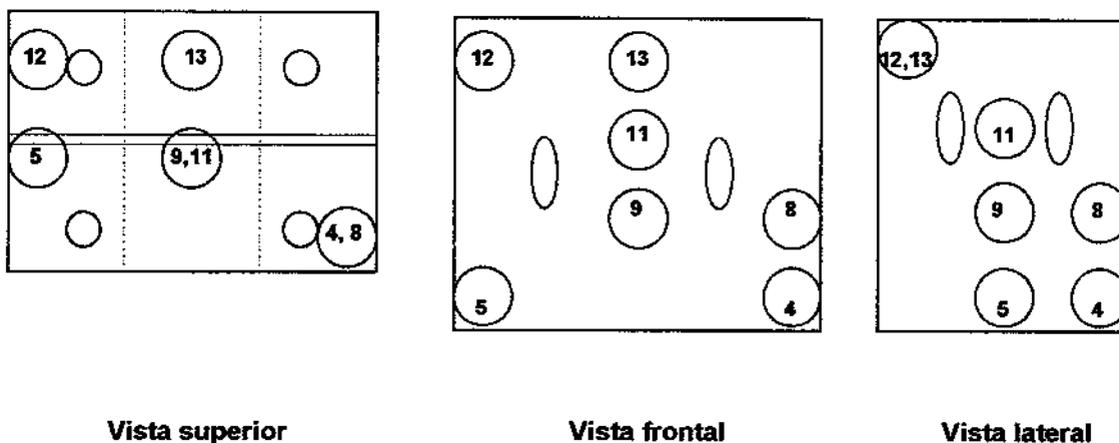


FIGURA 3.7. Localização dos produtos-modelo no interior da caixa de papelão.

O critério adotado para o posicionamento das esferas instrumentadas foi o de distribuí-las em distintas alturas no leito, considerou-se a maior ou menor proximidade destas com as aberturas para entrada do ar frio.

No arranjo triangular e no aleatório, as esferas 4 e 5 foram colocadas na primeira camada inferior, sendo que a primeira posicionava-se no canto direito junto à face externa da caixa, enquanto a segunda situava-se junto à lateral esquerda, no centro. Na terceira camada, de baixo para cima, estavam dispostas as esferas 8 e 9, de forma que a primeira estava no canto direito junto à face externa e a segunda, praticamente no centro da camada. No centro da quarta

camada estava posicionada a esfera 11 e na camada superior estava a esfera 12, localizada abaixo da abertura esquerda e junto a face interna da caixa. A esfera 13 estava disposta no centro da fileira junto à face interna da caixa.

No arranjo alternado, as esferas foram distribuídas em quatro camadas, sendo que as esferas 4 e 5 estavam dispostas na primeira camada inferior, a 8 e 9 na segunda, a 11 na terceira e a 12 e 13 na quarta e última camada. Cabe destacar que os posicionamentos das esferas em cada camada permaneceram os mesmos detalhados no arranjo triangular.

Os termopares das esferas foram conectados à placa de aquisição de dados, passando pela parede lateral do túnel de resfriamento, através de aberturas que posteriormente foram vedadas antes da realização dos ensaios, com o intuito de evitar o escape do ar.

3.8 Monitoramento das Temperaturas do Ar de Resfriamento

As temperaturas de entrada e saída do ar da embalagem de papelão foram monitoradas durante os ensaios. Na parte superior da caixa, imediatamente acima de duas aberturas para ventilação, foram dispostos os termopares para leitura da temperatura de entrada do ar de resfriamento na caixa. E imediatamente abaixo de duas aberturas para saída do ar da caixa foram colocados os termopares que permitiram o monitoramento das temperaturas de saída do ar da caixa, após este ter percorrido todo o leito de produtos-modelo.

3.9 Distribuição da Velocidade do Ar na Câmara de Ensaio

A distribuição da velocidade do ar no interior da câmara de ensaios foi medida por meio de um anemômetro de fio quente. O sensor de medida do

equipamento era disposto perpendicularmente à corrente de ar de resfriamento.

Tendo em vista que as medidas de velocidade do ar feitas pelo anemômetro de fio quente indicam a velocidade do ar em apenas um ponto, um eixo transversal foi traçado para estabelecer a velocidade média. Foram tomados 4 pontos de leitura sobre a caixa no campo de provas, pontos coincidentes com as aberturas da embalagem para o resfriamento.

O campo de provas onde foi disposta a caixa com os modelos para o resfriamento foi totalmente revestido com placas de poliestireno expandido, nas laterais e parte frontal junto à porta, de forma que o ar insuflado no sentido vertical descendente sobre a caixa passasse obrigatoriamente pelo produto, evitando os caminhos preferenciais.

Nos experimentos realizados, três velocidades médias do ar foram empregadas, 8,0 m/s, 5,0 m/s e 2,9 m/s, sendo o ajuste destas obtidos variando a abertura do *dumper*, localizado 30 cm acima da caixa. A fim de obter-se uma distribuição de ar a mais uniforme possível em toda a seção transversal do campo de provas, instalou-se um filtro de aço inoxidável imediatamente abaixo do *dumper*.

3.10 Propriedades Termofísicas

3.10.1 Laranja

As propriedades termofísicas da laranja foram apresentadas no Ítem 2.6.5 do Capítulo de Revisão Bibliográfica.

3.10.2 Produto-modelo com 3% de Goma K-Carragena

A condutividade térmica (k) do policloreto de vinila (PVC), material da parede da esfera, é de $0,160 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, à temperatura de 20°C (COLLINS et al., 1989).

Já a condutividade térmica (k) de um alimento com 97% de água, à temperatura de 20°C , é de $0,600 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ (ASHRAE, 1993).

3.10.3 Comparação entre a Laranja e o Produto-modelo com 3% de Goma K-Carragena

Tendo em vista que a condutividade térmica (k) da casca da laranja é de $0,179 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ e a da parede do produto-modelo é de $0,160 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, pode-se afirmar que os valores são próximos.

Já com referência à condutividade térmica (k) do suco de laranja, $0,435 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, e a de um alimento com 97% de água, $0,600 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, pode-se afirmar que estes valores são relativamente próximos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Alguns ensaios preliminares foram efetuados com o objetivo de adequar o equipamento frigorífico às condições requeridas para a realização dos experimentos.

Através destes ensaios buscou-se, inicialmente, uma distribuição homogênea da velocidade do ar no interior do campo de provas do túnel, assim como um controle adequado de temperaturas, que permitisse a manutenção deste parâmetro em valores uniformes. A partir da obtenção destas condições, estabeleceu-se três diferentes faixas de velocidade do ar, 8,0 m/s, 5,0 m/s e 2,9 m/s e três diferentes temperaturas, 5,0°C, 0,0°C e -5,0°C.

Curvas de resfriamento foram traçadas com o intuito de analisar a influência dos caminhos preferenciais do ar no tempo de resfriamento, bem como a distribuição da temperatura no leito de esferas.

Dois tipos de produtos-modelo para a simulação das frutas foram empregados, sendo um deles elaborado a partir de uma adaptação do produto-modelo descrito por DYNER & HESSELSCHWERDT (1964) e o outro obtido a partir de esferas ocas preenchidas com solução 3% de goma K-Carragena. Apenas o último produto-modelo citado possibilitou a obtenção de uma boa reprodutibilidade dos resultados.

São apresentados a seguir maiores detalhes dos experimentos realizados, assim como discussões, a partir das observações dos resultados obtidos.

4.1 Distribuição da Velocidade do Ar no Interior do Túnel de Resfriamento

Foram realizadas medidas de velocidade do ar em um plano horizontal imaginário, localizado 58 cm abaixo do direcionador de ar (*dumper*). Este plano, estabelecido sobre uma grade metálica perfurada, cuja área de secção transversal medindo (51×50) cm² coincide com a da câmara de ensaios, foi dividido em seis áreas de $(8,5 \times 8,3)$ cm² e o sensor do anemômetro disposto no centro de cada uma destas áreas.

Com o túnel vazio foram utilizadas diferentes aberturas do *dumper* e as pás deste dispostas em diferentes posições, a fim de determinar quais as configurações que promoveriam uma distribuição mais uniforme da velocidade do ar. Analisando os perfis de velocidade nestes seis pontos foram feitos ajustes nas aberturas das pás e instalou-se, imediatamente abaixo destas, um filtro de aço inoxidável, cujo objetivo era diminuir a turbulência do fluxo de ar durante os experimentos, além de melhorar a distribuição.

Observou-se que variações na temperatura do ar levaram a alterações na densidade deste e portanto a modificações nas leituras de velocidade. Sendo assim, para se obter dados confiáveis da distribuição deste parâmetro, a temperatura do ar durante as medidas foi mantida constante e igual à 4,5 °C.

Três diferentes referências da velocidade do ar no interior do campo de provas foram estabelecidas. Numa etapa posterior do desenvolvimento experimental e que será detalhada no Ítem 4.3, observou-se que a utilização de direcionadores de fluxo de ar no campo de provas melhora o processo de pré-resfriamento, já que obriga o ar a passar pelo leito de esferas. Portanto, um novo

perfil de velocidades foi estabelecido ao acondicionar-se a caixa no interior do túnel revestido com placas de poliestireno expandido, tanto nas laterais como no espaçamento entre a caixa e a porta do túnel de resfriamento. Nesta nova disposição, as leituras de distribuição da velocidade do ar foram obtidas dispondo-se o sensor do anemômetro sobre as quatro aberturas esféricas para passagem do ar de resfriamento, na parte superior da caixa.

As melhores posições das pás do *dumper*, determinadas sem a carga, foram mantidas e as distribuições de velocidade do ar reavaliadas, chegando-se a valores médios de 8,07 m/s, 5,01 m/s e 2,92 m/s para a velocidade do ar e coeficientes de variação de 1,05%, 0,80% e 1,30%, respectivamente. Na Tabela 4.1 estão apresentadas as velocidades médias obtidas para cada distribuição e os respectivos desvios padrões.

TABELA 4.1. Velocidades médias obtidas sobre as aberturas da caixa de papelão e seus respectivos desvios padrões.

<i>Posição</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>Velocidade Média (m/s)</i>	<i>Desvio Padrão</i>
<i>Disposição 1</i> Veloc. (m/s)	8,03	8,03	8,03	8,20	8,07	0,085
<i>Disposição 2</i> Veloc. (m/s)	5,03	5,03	5,03	4,95	5,01	0,040
<i>Disposição 3</i> Veloc. (m/s)	2,89	2,97	2,89	2,92	2,92	0,038

4.2 Perfis de Temperatura no Interior do Túnel

Os ensaios de pré-resfriamento deste trabalho foram realizados utilizando ar-forçado mantido a temperaturas constantes de + 5,0°C, 0,0°C e - 5,0°C.

O controle de temperaturas do sistema frigorífico era feito através de um conjunto de válvulas solenóides e válvulas controladoras de pressão, dispostas na linha de vapor do sistema frigorífico, conforme anteriormente detalhado no Ítem 3.6 do Capítulo Materiais e Métodos. Com a finalidade de testar a eficiência deste dispositivo no controle da temperatura do sistema e analisar os perfis de temperatura em quatro pontos no interior do campo de provas, foi instalada uma resistência elétrica aletada, usada para aquecer o ar, com potência de 346 Watts e colocada um metro abaixo do *dumper*. Quatro termopares foram distribuídos no interior da câmara de ensaios, na secção transversal, 65 cm abaixo do *dumper*, sobre uma grade metálica perfurada, em quatro diferentes posições, no centro de áreas simétricas de (25,5x25,0) cm², de forma a permitir delinear os perfis de temperatura.

Na Figura 4.1 estão representadas as variações de temperatura em função do tempo nas quatro posições na câmara de ensaios. Os dados experimentais de temperatura obtidos foram corrigidos com as equações dos respectivos termopares. Cabe ressaltar que durante todo o período do teste, 80 minutos, a máxima variação da temperatura detectada foi de 0,6°C, e a distribuição de temperaturas nos diferentes pontos mostrou uma diferença máxima de 5,10%.

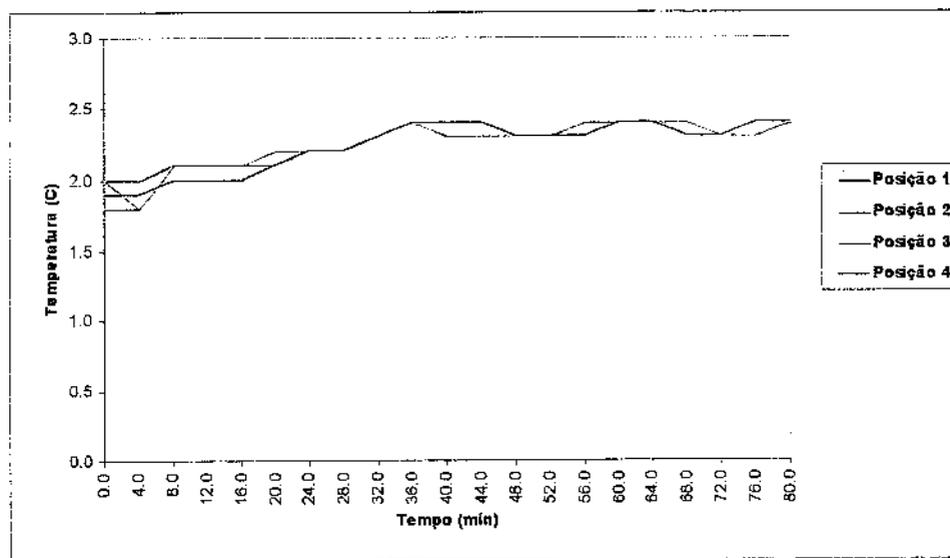


FIGURA 4.1 Histórico de temperatura em quatro posições no interior do campo de provas do túnel de resfriamento.

Conclui-se, portanto, que o controle de temperatura através do sistema de válvulas é eficiente e que a distribuição de temperaturas no campo de provas do túnel nos quatro diferentes pontos monitorados está dentro de uma faixa de desvio aceitável.

4.3 Influência dos Caminhos Preferenciais do Ar no Tempo de Resfriamento

Dois experimentos foram realizados com o intuito de avaliar a influência dos caminhos preferenciais do ar no tempo de resfriamento. Para tanto, uma caixa com produtos-modelo dispostos no arranjo aleatório foi acondicionada no interior da câmara de ensaios e submetida ao ar de resfriamento com velocidade de 8,0 m/s e temperatura de -5,0 °C. Os produtos-modelo inicialmente encontravam-se à temperatura de 25 °C. Num primeiro teste, nenhum anteparo foi utilizado

para direcionar o fluxo de ar, de forma que o ar de resfriamento entrava na caixa pelas aberturas superiores e laterais. Havia um espaço vazio, na câmara de ensaios, de aproximadamente 20 cm, entre a lateral da caixa e a porta fechada do túnel de resfriamento.

No segundo experimento, a câmara de ensaios foi revestida com placas de poliestireno expandido, de maneira que a caixa tivesse um perfeito encaixe. Outras placas de poliestireno foram utilizadas para vedar a abertura de 20 cm entre a lateral da caixa e a porta do túnel.

Através da observação das curvas de resfriamento obtidas nestes testes e representadas pelas Figuras 4.2 e 4.3, é possível constatar-se que ocorre um resfriamento mais rápido das esferas quando da utilização dos direcionadores de ar, se confrontados com a ausência destes.

Embora uma maior percentagem de aberturas esteja disponível para a entrada do ar de resfriamento, tanto na superfície quanto nas laterais da caixa, no primeiro teste, o ar segue o caminho que lhe proporciona menor resistência, ou seja, flui pela abertura disposta entre a lateral da caixa e a porta do equipamento frigorífico, não contribuindo para o resfriamento dos produtos-modelo.

Já no segundo experimento, o ar de resfriamento obrigatoriamente tinha que entrar pelas aberturas superiores, resfriar os produtos-modelo e sair pelas aberturas inferiores da caixa.

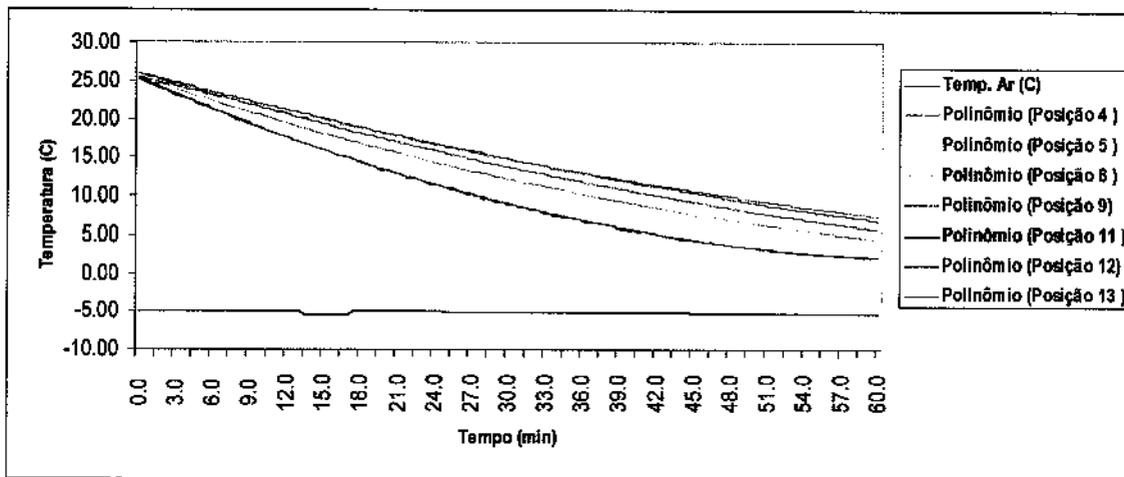


FIGURA 4.2 Curva de resfriamento das esferas dispostas no arranjo aleatório, submetidas ao ar com velocidade de 8,0 m/s e temperatura de -5,0°C, sem direcionador.

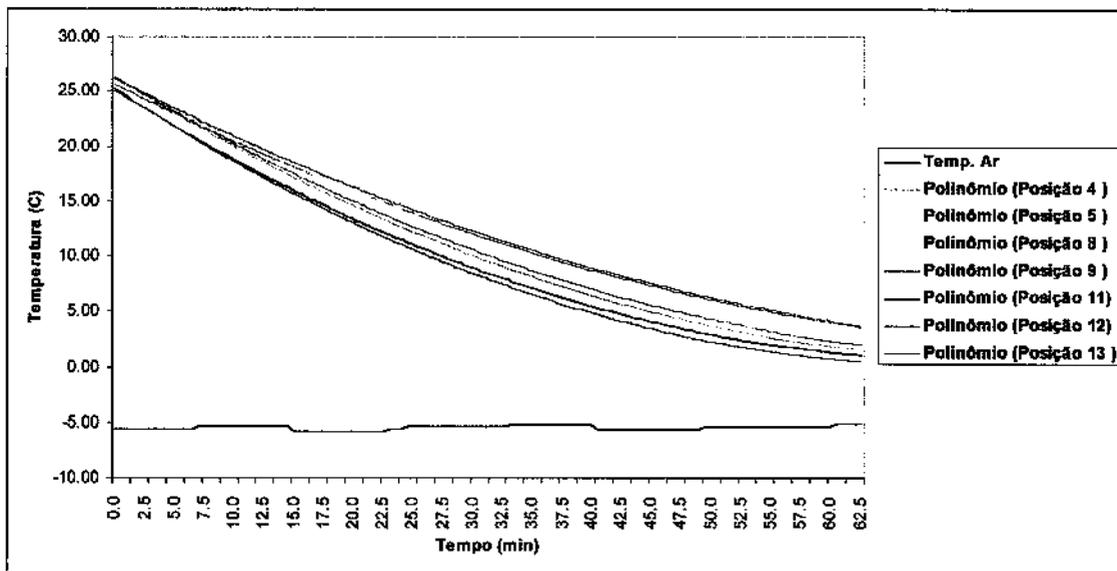


FIGURA 4.3 Curva de resfriamento das esferas dispostas no arranjo aleatório, submetidas ao ar de resfriamento de 8,0 m/s e temperatura de -5°C, com direcionador.

GRIERSON et al (1975) obtiveram resultados semelhantes ao resfriarem citrus acondicionados em caixas de papelão utilizadas comercialmente, dispostas em paletes. A disposição das caixas que resultou numa maior eficiência no resfriamento foi a que mantinha as aberturas para ventilação superiores e inferiores alinhadas e as aberturas laterais fechadas, apresentando desta forma menores possibilidades de caminhos preferenciais para o fluxo de ar.

Cabe destacar que a utilização dos direcionadores de poliestireno expandido estabelecem um menor gradiente de temperaturas entre o “ponto mais frio” e o “ponto mais quente” no interior da caixa, possibilitando uma maior uniformidade das temperaturas durante o processo de pré-resfriamento. Entende-se por “ponto mais frio” a posição no leito onde o produto-modelo resfria-se mais rapidamente e por “ponto mais quente” a posição onde a esfera demora mais tempo para resfriar.

Ao observar as curvas de resfriamento obtidas sem o emprego dos direcionadores de ar (Figura 4.2) e infocar-se a esfera na posição 4, ou seja, o produto-modelo disposto no ponto da caixa, onde a transferência de calor dá-se de maneira mais ineficiente, para esta situação de ensaio particular, concluí-se que, através da extrapolação da curva, aproximadamente 76 minutos seriam necessários para que o centro da referida esfera atingisse a temperatura de 5°C, enquanto que, caso os direcionadores fossem empregados, 54 minutos seriam suficientes para alcançar-se a mesma temperatura. Tratam-se de 22 minutos de diferença, ou seja, 29% a mais de tempo de funcionamento do equipamento frigorífico, implicando em gastos de energia elétrica desnecessários.

4.4. Produtos-modelo Utilizados para Representação das Frutas

4.4.1. Produto-modelo com 2% de Goma K-Carragena

Os termopares de cobre-constantan eram inseridos no centro e na superfície das esferas quando da montagem do arranjo que usava esferas fabricadas, conforme detalhado no Ítem 3.1.1 do Capítulo Materiais e Métodos. A cada experimento estes eram retirados e inseridos nos produtos-modelo.

Vários problemas foram detectados quando da utilização deste tipo de produto-modelo, assim como nos procedimentos experimentais utilizados, refletindo na não reprodutibilidade dos dados obtidos. Aproximadamente 5 repetições foram feitas nas mesmas condições de temperatura e velocidade do ar assim como a disposição num mesmo tipo de arranjo.

O fato de não se manter fixo o arranjo de produtos-modelo no interior da caixa a cada experimento foi uma das fontes de erro detectadas. Idealmente, o arranjo deveria ser preparado e mantido intacto, evitando modificações nas posições das esferas, já que este procedimento implicaria em alterações nos caminhos seguidos pelo fluxo de ar no interior da caixa, na transferência de calor estabelecida entre as esferas e o meio de resfriamento e conseqüentemente nos perfis de temperatura versus tempo obtidos.

O fato da superfície deste tipo de produto-modelo ser bastante úmida levou a uma desidratação externa, principalmente quando submetida a fluxos de ar intensos, como o que ocorre no caso do pré-resfriamento com ar-forçado. Notou-se, através dos perfis de temperatura obtidos, um resfriamento causado pela evaporação da água presente na superfície do produto-modelo, sendo possível,

portanto, afirmar que a transferência de calor neste caso ocorre associada com a transferência de massa. Na verdade quando a superfície do produto apresenta-se úmida e o ar de resfriamento não se encontra no estado saturado, estabelece-se um diferencial de pressão de vapor no sistema, de forma que água é evaporada da superfície e uma maior quantidade de calor é retirada deste. Trata-se de calor latente, associado com mudança de fase de líquido para vapor e não apenas calor sensível sendo retirado do produto.

Através da Figura 4.4 é possível observar que a temperatura do ar de resfriamento apresenta valores superiores às temperaturas dos produtos-modelo, sendo que após 60 minutos de resfriamento, este fato pode ser observado para todas as posições no leite, exceto no centro da posição 5. Trata-se do resfriamento causado pela evaporação da água da superfície do produto-modelo.

DYNER & HESSELSCHWERDT (1964) já haviam detectado problemas de ressecamento na superfície ao trabalharem com produtos-modelo preparados com géis. Segundo os autores, este fenômeno implicou em erros nos dados de transferência de calor obtidos, já que o estudo realizado não considerava a contribuição da transferência de massa.

Mesmo envolvendo os produtos-modelo com filmes de polietileno bastante flexíveis, na tentativa de minimizar o problema de perda de umidade, observou-se que este produto-modelo apresentava mais outra desvantagem. Como as esferas eram preparadas a base de goma e dispostas em leite, as camadas inferiores deformavam-se com facilidade, devido ao peso das camadas superiores, já que o leite tinha aproximadamente 28 cm de altura, havendo alterações no formato dos modelos, influenciando desta forma na obtenção de dados reprodutíveis .

Embora autores citados na literatura como é o caso de DYNER & HESSELSCHWERDT (1964) e ALVAREZ & TRYSTAM (1995) tenham utilizado este tipo de produto-modelo para o estudo de transferência de calor, através da parte experimental neste trabalho desenvolvido, observou-se uma grande dificuldade na obtenção de dados reprodutíveis quando da utilização destes dispostos em leitos, principalmente no que se refere a determinação dos perfis de temperatura na superfície. Através das Figuras 4.4 e 4.5 apresentam-se curvas de resfriamento obtidas com a utilização destes tipos de produtos-modelo dispostos no arranjo alternado e submetidos ao ar de resfriamento a $5,0^{\circ}\text{C}$ e $-5,0^{\circ}\text{C}$.

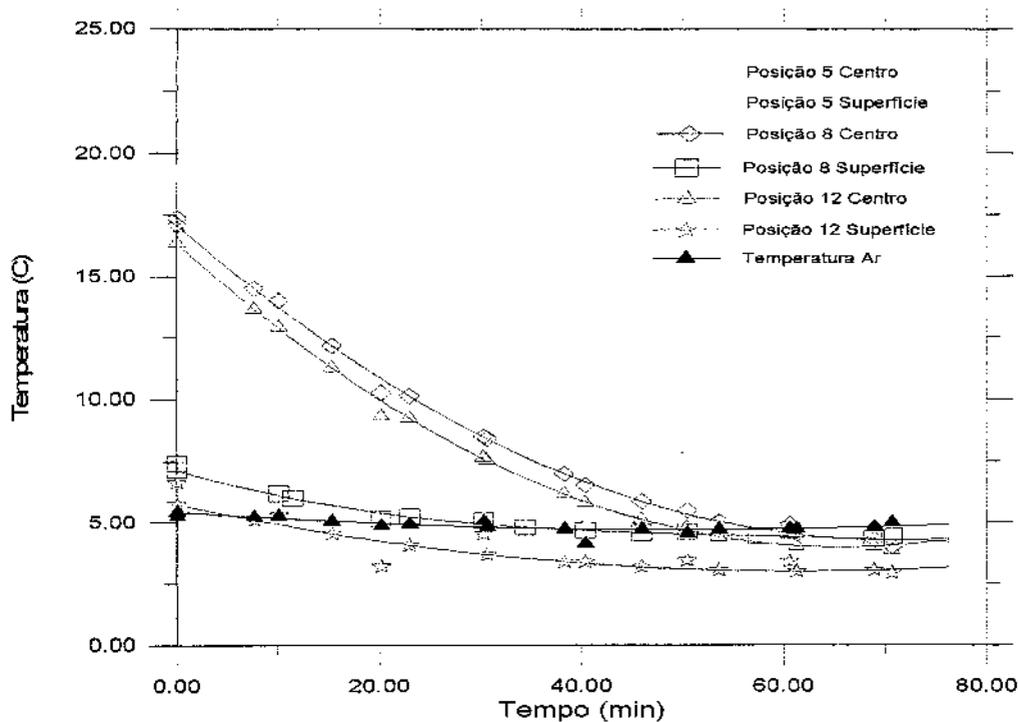


FIGURA 4.4. Curva de resfriamento utilizando-se produtos-modelo elaborados com solução 2% de goma K-Carragena, dispostos em arranjo alternado e submetidos a ar de resfriamento de 5°C .

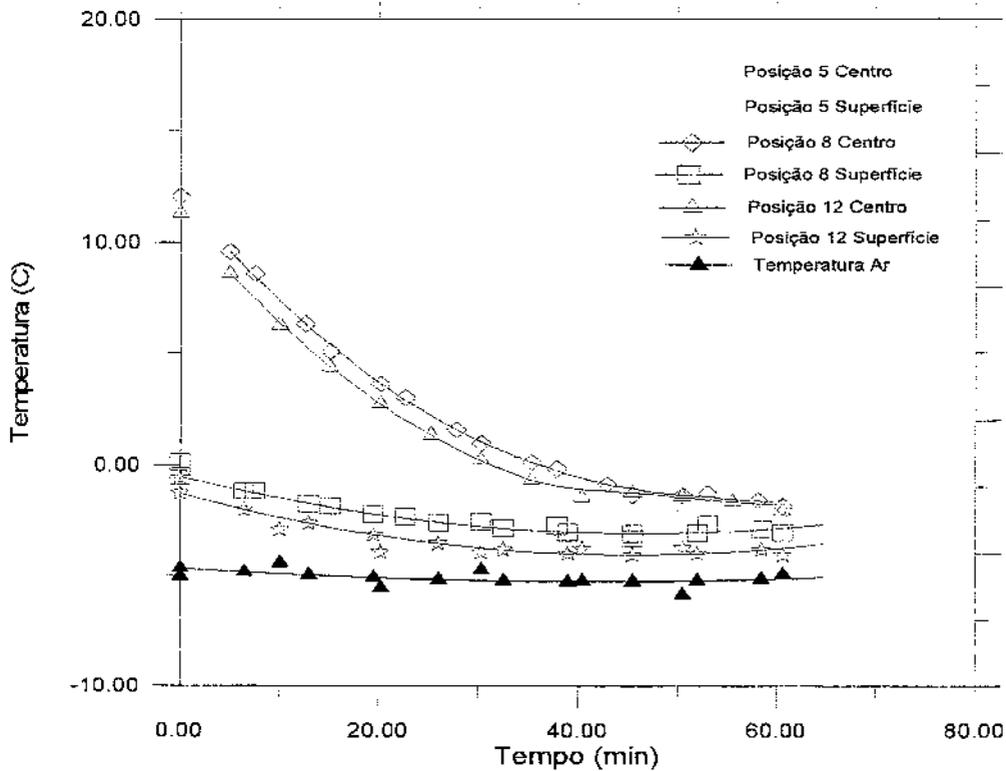


FIGURA 4.5. Curva de resfriamento utilizando-se produtos-modelo elaborados com solução 2% de goma K-Carragena, dispostos em arranjo alternado e submetidos a ar de resfriamento de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Mesmo havendo grandes dificuldades na obtenção de dados reprodutíveis, um resultado observado a partir das curvas de resfriamento resultantes dos testes utilizando este tipo de produto-modelo, Figuras 4.4 e 4.5, é que conforme ocorre a diminuição da temperatura do ar de resfriamento, verifica-se uma diminuição do gradiente estabelecido entre a pressão de vapor de saturação na superfície do produto e a pressão de vapor do ar de resfriamento, implicando numa menor perda de umidade do produto para o ambiente.

4.4.2. Produto-modelo com 3% de goma K-Carragena

Os produtos-modelo elaborados a partir de esferas ocas preenchidas com solução 3% de goma K-Carragena mostraram-se bastante eficientes, sendo possível a obtenção de dados reprodutíveis.

Os arranjos passaram a ficar fixos no interior da caixa a cada ensaio, e como os produtos-modelo já haviam sido preparados com os termopares em seu interior, evitou-se problemas, devido ao deslocamento da posição, além de erros nas leituras de temperatura, devido à resistência térmica de um filme de ar entre o termopar e o gel solidificado, caso o termopar fosse retirado e inserido na esfera a cada experimento.

A parede destes produtos-modelo, embora representando uma resistência à transferência de calor na superfície, evitou a perda de umidade durante a exposição ao ar forçado e possibilitou resistência mecânica às esferas, não mais ocorrendo problemas de alteração de formato ou deformação das dispostas nas camadas inferiores.

Concluí-se, portanto, que este produto-modelo seria o mais adequado para representar as frutas, passando a ser utilizado em todos os ensaios realizados.

4.5 Comparação entre o Produto-modelo com 3% de Goma K-Carragena e duas Variedades de Laranja

Curvas de resfriamento foram levantadas experimentalmente com o objetivo de comparar o produto-modelo elaborado com 3% de goma K-Carragena e duas variedades de laranja (Lima e Pera). As frutas escolhidas para o ensaio apresentavam o mesmo diâmetro que o produto-modelo.

O ensaio foi realizado com o produto-modelo e as duas laranjas suspensas, sob a ação de um fluxo de ar a 12 °C e com velocidade do ar constante e igual a 5 m/s.

Através da Figura 4.6 é possível concluir que o produto-modelo em questão apresenta uma curva de resfriamento bastante próxima a das laranjas, validando sua utilização como modelo para representação das frutas esféricas durante os experimentos neste trabalho realizados.

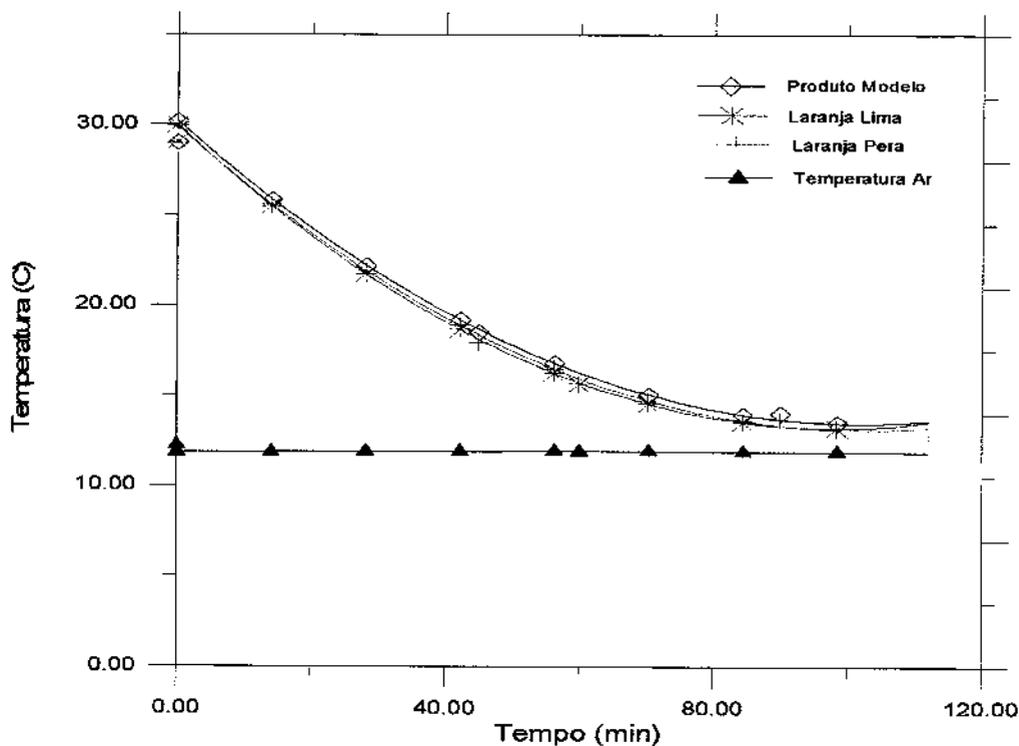


FIGURA 4.6 Curvas de resfriamento comparativas entre o produto-modelo elaborado com 3% de goma K-carragena e laranjas lima e pera.

4.6 Distribuição da Temperatura no Leito

Através das curvas de resfriamento obtidas experimentalmente é possível observar a distribuição da temperatura nas diferentes camadas no leito de esferas disposto no interior da caixa. Os produtos-modelo utilizados foram os elaborados com 3% de goma K-Carragena, dispostos nos arranjos triangular, alternado e aleatório, submetidos ao ar de resfriamento de 8,0 m/s e temperatura de 0 °C. As curvas de resfriamento estão representadas nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9.

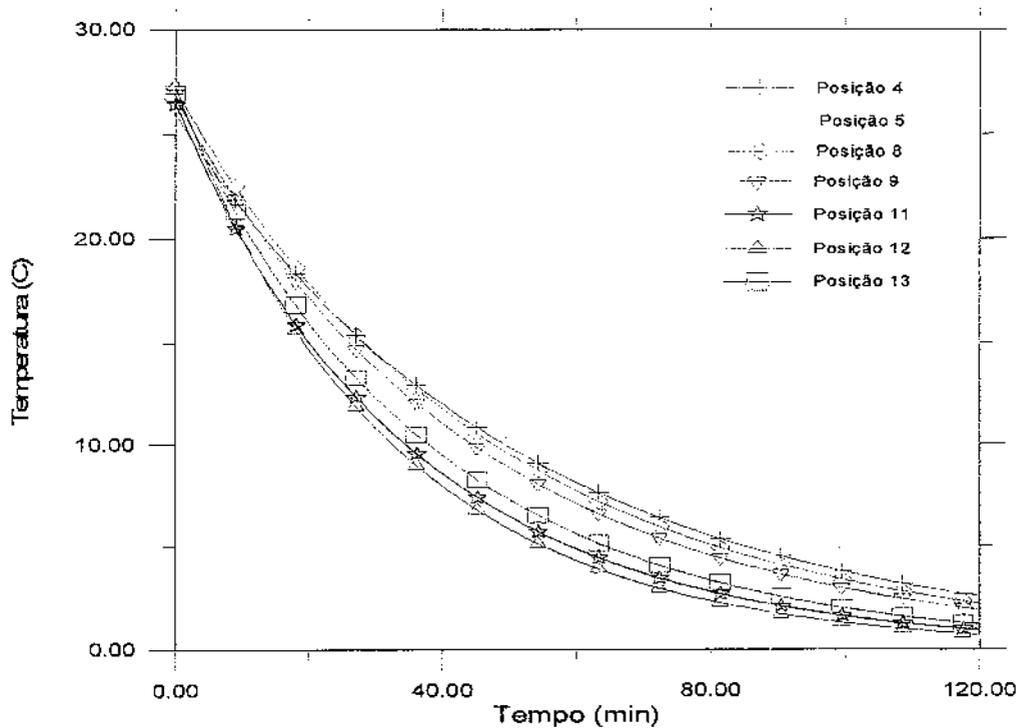


FIGURA 4.7 Curvas de resfriamento em sete posições no interior da caixa de papelão utilizando produtos-modelo elaborados com solução 3% de goma K-carragena, dispostos em arranjo triangular e submetidos a ar de resfriamento de 8,0 m/s e temperatura de 0°C.

Através da Figura 4.7 é possível observar que no arranjo triangular, a camada inferior (posições 4 e 5) apresenta um resfriamento bastante lento se comparado com outras posições no leito. Nas camadas intermediárias (posições 8 e 9) o resfriamento é um pouco mais rápido se comparado com as camadas inferiores. Cabe destacar a posição 11, localizada abaixo de uma pequena fresta da caixa, como pode ser observado através da Figura 3.7 em Materiais e Métodos. Neste posição o produto-modelo resfria-se mais rapidamente que na posição 13, situada na camada superior, porém afastada de qualquer abertura para entrada do ar de resfriamento. Já a posição 12, situada imediatamente abaixo de uma abertura para entrada do ar, é a que apresenta o resfriamento mais rápido no leito.

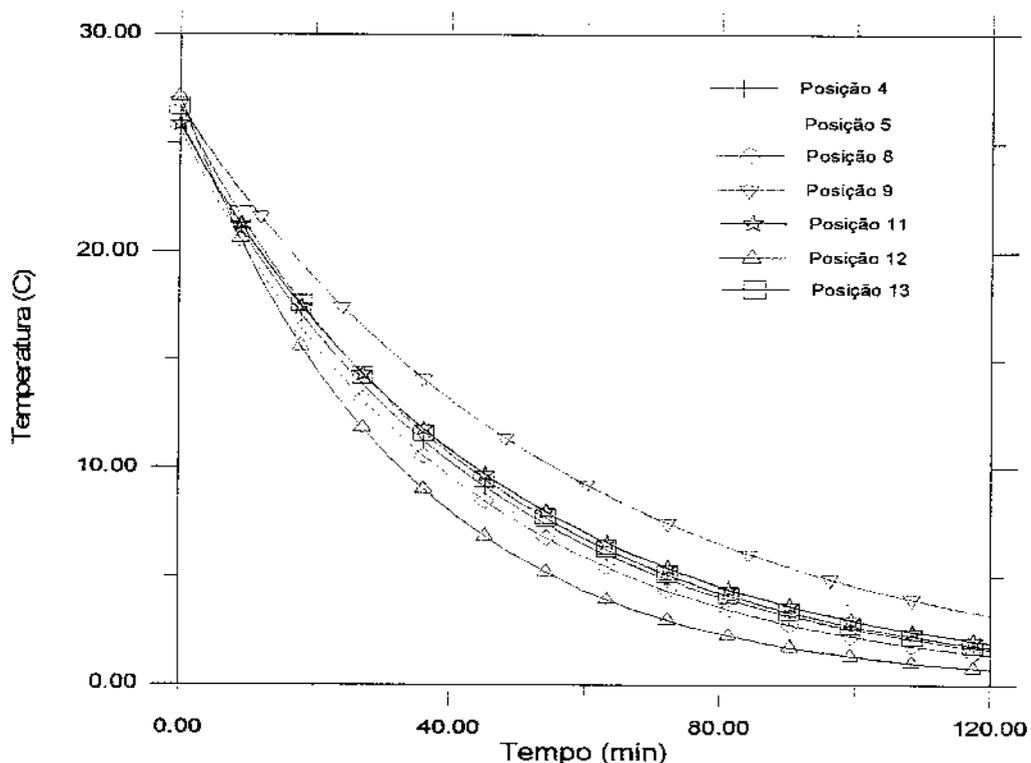


FIGURA 4.8 Curvas de resfriamento em sete posições no interior da caixa de papelão utilizando produtos-modelo elaborados com solução 3% de goma K-carragena, dispostos em arranjo alternado e submetidos a ar de resfriamento de 8,0 m/s e temperatura de 0°C.

Na Figura 4.8 estão representadas as curvas de resfriamento para o arranjo alternado e através destas é possível observar que as posições 5 e 9, localizadas nas camadas inferior e intermediária, respectivamente, são as que resfriam mais lentamente. Já as posições 4, 11 e 13, localizadas nas camadas inferior, intermediária e superior, respectivamente, apresentam resfriamento intermediário. As esferas localizadas nas posições 8 e 12, dispostas abaixo de aberturas para entrada do ar de resfriamento, resfriaram mais rapidamente.

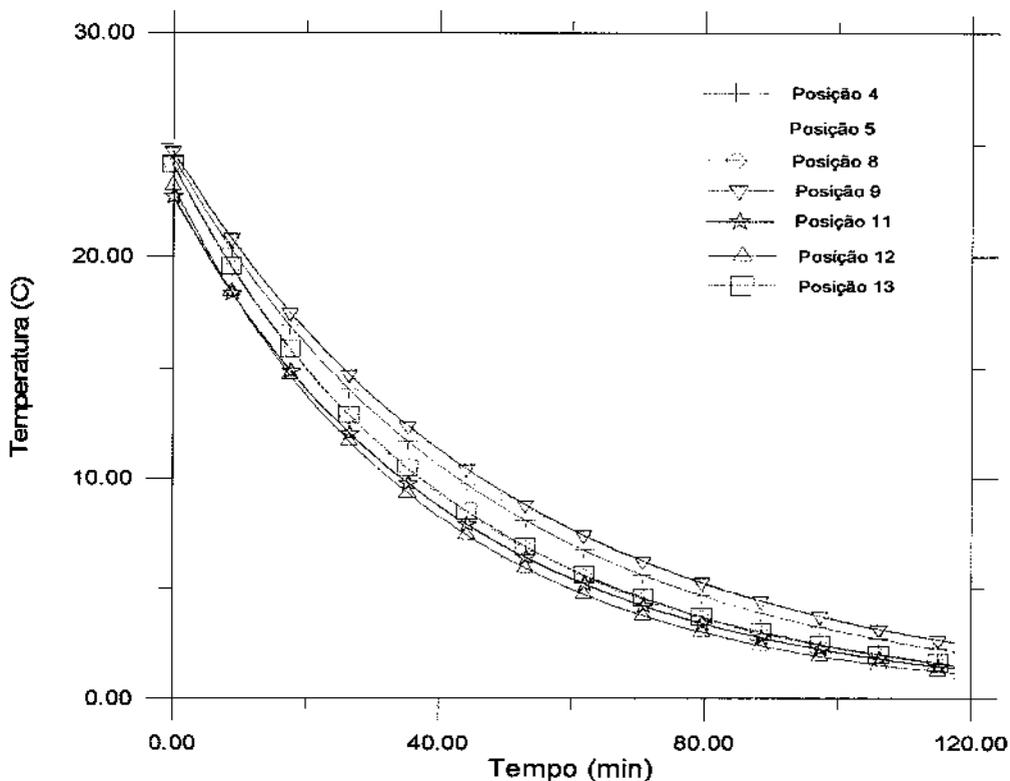


FIGURA 4.9 Curvas de resfriamento em sete posições no interior da caixa de papelão utilizando produtos-modelo elaborados com solução 3% de goma K-carragena, dispostos em arranjo aleatório e submetidos a ar de resfriamento de 8,0 m/s e temperatura de 0°C.

O arranjo aleatório pode ser observado através da Figura 4.9 sendo que as posições 4, 5 e 9 resfriam mais lentamente se comparadas com outras posições do leito. As posições 8 e 13 apresentam resfriamento um pouco mais rápido e as posições 11 e 12 são as posições no leito que se resfriam mais rapidamente.

No caso de frutas acondicionadas em caixas, com percentagem de abertura limitada para ventilação, deve-se levar em conta que as esferas mais próximas às aberturas para ventilação na caixa estão expostas ao ar de resfriamento mais frio. Conforme o ar passa pelo leito, vai se aquecendo e se estabelece um menor gradiente de temperaturas entre a esfera e o meio de resfriamento. Desta forma, através da Equação 2.6 é possível concluir que a taxa de transferência de calor diminui com o aumento da altura do leito, sendo que esta assume valores maiores junto às camadas superiores e junto às aberturas, ao passo que nas camadas inferiores e nas posições afastadas das aberturas, as taxas de transferência de calor são menores. Individualmente, o produto também não se resfria de maneira uniforme.

A taxa de troca de calor entre o produto e o ar em cada camada varia com o tempo por dois motivos de atuação opostos: a taxa de transferência de calor tende a diminuir com o tempo à medida em que as temperaturas do produto e do ar se aproximam, e tende a aumentar porque a temperatura do ar que entra na camada seguinte vai abaixando com o tempo, pois a troca térmica nas camadas superiores vai diminuindo. O predomínio de uma tendência sobre a outra depende da vazão de ar, da posição no leito e tempo decorrido do resfriamento, mas normalmente a primeira tendência prevalece.

Devido à resistência interna à transferência de calor, a temperatura no interior do produto diminui mais lentamente do que as regiões próximas à superfície.

Devido à heterogeneidade de distribuição de temperaturas observada no leite torna-se essencial uma boa localização dos sensores de temperaturas. Estes devem estar localizados nos pontos mais críticos do leite, ou seja, onde o resfriamento é mais rápido ("ponto frio") e onde o resfriamento é mais lento ("ponto quente"). Caso isto não ocorra, ao realizar-se o pré-resfriamento com a utilização de ar-forçado, com temperaturas próximas ou inferiores a 0 °C, pode ocorrer o congelamento dos produtos, levando à perda da qualidade destes. E quando a temperatura do ar de resfriamento empregada for igual ou superior a 5,0 °C, pode ocorrer que a temperatura no "ponto mais frio" já tenha atingido o valor desejado e no "ponto mais quente" esta ainda apresente-se bastante alta.

Apesar de não ser objetivo do presente trabalho o estudo da transferência de massa no leite de esferas, cabe ressaltar que a heterogeneidade de temperaturas estabelecida no leite implica em diferentes níveis de perda de umidade por parte dos produtos, já que maiores temperaturas do produto acarretam em maiores diferenças nas pressões de vapor entre este e o ar de resfriamento.

4.7 Determinação da Taxa de Resfriamento

Os dados de temperatura adimensional do produto-modelo, em escala logarítmica, versus tempo, em escala aritmética, foram graficados e, a partir dos pontos experimentais obtidos, realizou-se um ajuste por meio de uma função exponencial (Equação 2.15).

As temperaturas no centro do produto-modelo (T) e do ar de resfriamento (T_{ar}) foram medidas experimentalmente em intervalos de 30 segundos e a temperatura inicial da esfera, também medida experimentalmente, foi constante e aproximadamente igual à 25 °C.

Para a montagem dos gráficos foram escolhidas as posições mais críticas do leite, localizadas na camada superior e inferior da caixa. As temperaturas do ar junto à camada superior (posições 12 e 13) foram consideradas como sendo iguais às temperaturas do ar de entrada na caixa, enquanto que as temperaturas na camada inferior (posições 4 e 5) foram consideradas como sendo iguais à temperatura do ar de saída da caixa. As temperaturas de entrada e saída do ar na caixa foram medidas experimentalmente durante a realização dos ensaios, conforme detalhado no Ítem 3.8 em Materiais e Métodos.

Através da Figura 4.10 é possível observar os perfis das temperaturas médias do ar na entrada e na saída da caixa no resfriamento de esferas dispostas no arranjo triangular e submetidas ao ar de resfriamento de 8,0 m/s e 5,0 °C.

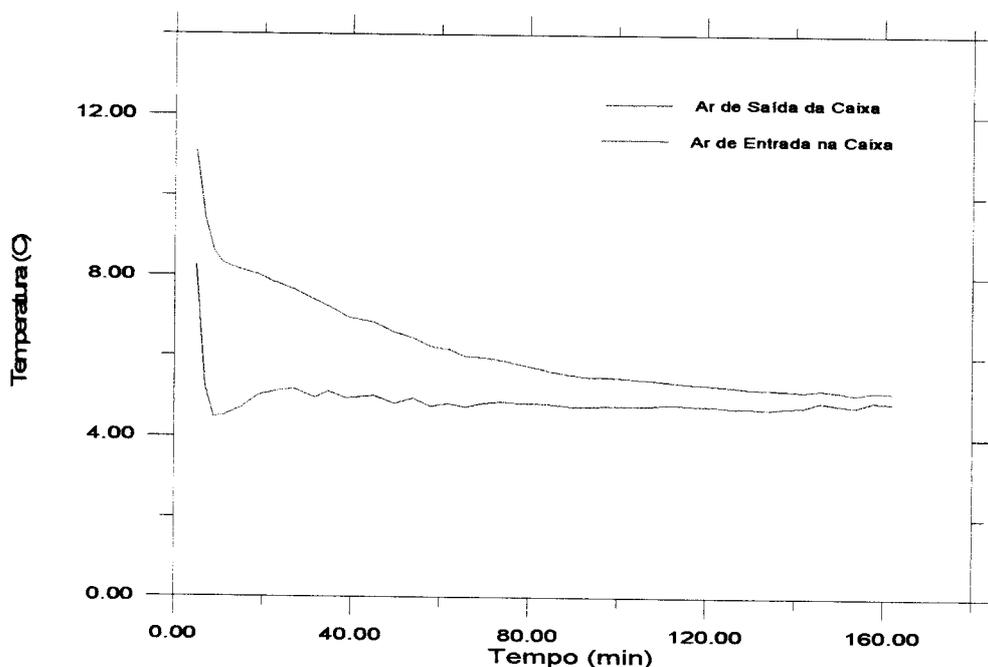


FIGURA 4.10 Perfis das temperaturas médias do ar na entrada e na saída da caixa para o resfriamento de esferas dispostas no arranjo triangular e submetidas ao ar de resfriamento de 8,0 m/s e 5,0 °C.

Através da observação da Figura 4.10 é possível constatar que, aproximadamente dez minutos foram necessários para que se iniciasse uma estabilização da temperatura do ar de entrada na caixa de papelão. Isto ocorreu devido à necessidade de abertura da porta do túnel de resfriamento para retirada das placas de poliestireno expandido, que estavam dispostas sobre a caixa de papelão e que isolavam a caixa com os produtos-modelo do ar-forçado, na etapa inicial do processo de resfriamento.

Através da Figura 4.10 também se pode concluir que, com a passagem do ar de resfriamento pelo leito, o ar vai se aquecendo, e se estabelece um menor gradiente de temperaturas entre as esferas e o meio de resfriamento. Este menor gradiente de temperaturas é o responsável pelo resfriamento lento dos produtos-modelo dispostos nas camadas inferiores da caixa de papelão. Conforme o processo de resfriamento ocorre, a diferença entre a temperatura do ar de entrada e saída da caixa vai diminuindo, tendendo ao equilíbrio.

Após o ajuste dos dados experimentais com a função exponencial e utilizando a Equação 2.15 da Revisão Bibliográfica, os parâmetros C_1 e K foram determinados. O parâmetro C_1 apresenta valores próximos à unidade enquanto o parâmetro K é igual ao coeficiente angular da curva de ajuste e portanto, quanto maior o valor de K mais rápido e eficiente o resfriamento. Através do parâmetro K foi possível avaliar o processo de resfriamento em função da velocidade e temperatura do ar.

Na Figura 4.11 é apresentado um gráfico com os dados experimentais da temperatura adimensional do produto-modelo, em escala logarítmica, versus tempo, em escala aritmética e o ajuste por meio de função exponencial para produtos-modelo dispostos no arranjo triangular e submetidos à velocidade do ar de resfriamento de 8,0 m/s e temperatura de resfriamento de 5,0 °C.



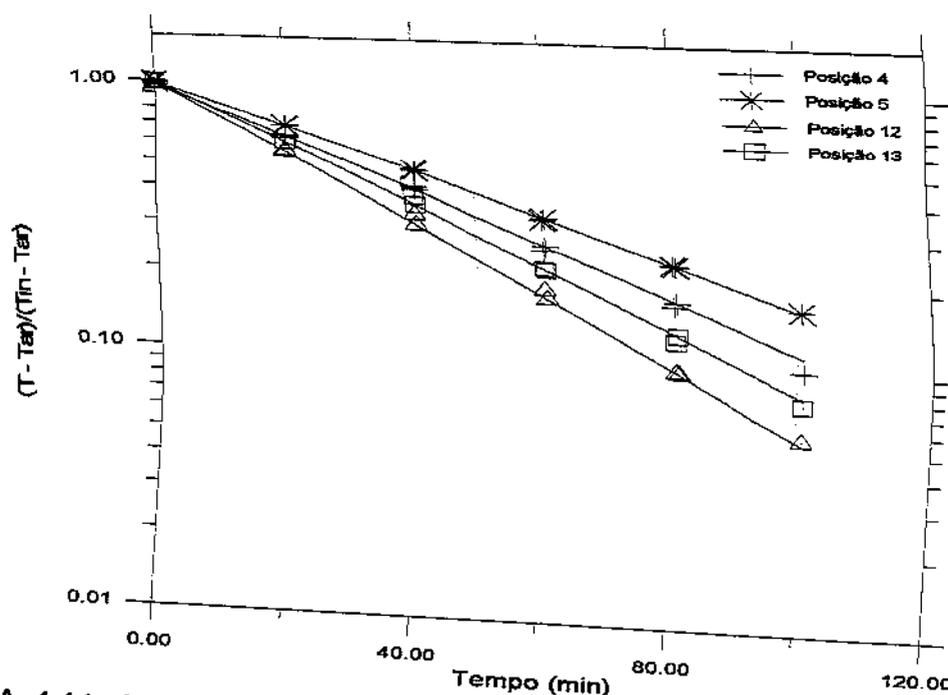


FIGURA 4.11 Temperatura adimensional em função do tempo para leito de produtos-modelo dispostos no arranjo triangular e submetidos ao ar de resfriamento de 8,0 m/s e 5,0 °C.

Os demais gráficos dos produtos-modelo dispostos nos arranjos triangular, alternado e aleatório, submetidos às velocidades do ar de resfriamento de 8,0 m/s, 5,0 m/s e 2,9 m/s e temperaturas de resfriamento de 5,0 °C, 0,0 °C e -5,0 °C, são apresentados no Apêndice A.

Conforme as Equações 2.15 a 2.19, o adimensional da temperatura elimina o efeito de diferenças na temperatura do ar e as retas deveriam se sobrepor, caso as condições de transferência de calor se mantivessem as mesmas durante o escoamento do ar em todas as posições da caixa. As diferenças encontradas confirmam que a ventilação deficiente ao redor de algumas esferas do leito afetam negativamente o coeficiente de transferência de calor, h , (Equação 2.17 e 2.19), pois os demais parâmetros termofísicos permanecem constantes. Conforme já discutido no Ítem 4.6, essa observação é evidenciada ao comparar entre si as retas obtidas para as posições 4 e 5 e as posições 12 e 13.

Um outro fator importante que não foi considerado nessa análise dos resultados é a variação da temperatura do ar com o tempo, pois a Equação 2.15 foi derivada assumindo a temperatura do ambiente (T_{ar}) constante. As curvas da Figura 4.10 deixam claro que esse não é o caso, sobretudo com relação ao ar de saída, e exigindo uma solução analítica em termos do Teorema de Duhamel.

No presente trabalho, a temperatura do ar de saída a cada instante foi usada para calcular o adimensional $\frac{T - T_{ar}}{T_{in} - T_{ar}}$ das posições 4 e 5, o que não corresponde a uma solução exata, e pode também ter contribuído para o defasamento entre as retas.

Nas Tabelas B.1, B.2 e B.3, do Apêndice B, são apresentados os parâmetros de ajuste (C_1 e K) da equação $\frac{T - T_{ar}}{T_{in} - T_{ar}} = C_1 \exp(-K\theta)$ para os produtos-modelo dispostos no arranjo triangular, alternado e aleatório, respectivamente, nas diferentes condições de velocidade e temperatura do ar utilizadas.

Os coeficientes de correlação obtidos nos ajustes dos dados experimentais, através de funções exponenciais, variaram de 0,9807 (produto-modelo na posição 12, arranjo triangular, velocidade do ar de 5,0 m/s e temperatura do ar de 5,0° C) a 0,9991 (posição 5 no arranjo alternado, velocidade do ar de 5,0 m/s e temperatura do ar de 5,0° C). Isto demonstra um adequado ajuste dos dados experimentais com as funções exponenciais.

O parâmetro C_1 apresentou em todos os ensaios valores maiores que 1,0, uma indicativa de que o resfriamento é influenciado pela condução térmica no interior dos produtos-modelo, conforme a Equação 2.14, e não apenas pelo fenômeno convectivo.

Através da determinação do parâmetro K foi possível comparar a eficiência do processo de resfriamento, considerando-se as variáveis de operação velocidade e temperatura do ar. Nas Figuras 4.12 a 4.23 são apresentadas as variações do parâmetro K em função da velocidade e temperatura do ar de resfriamento, para os produtos-modelo dispostos nas posições 4, 5, 12 e 13 e nos arranjos triangular, alternado e aleatório.

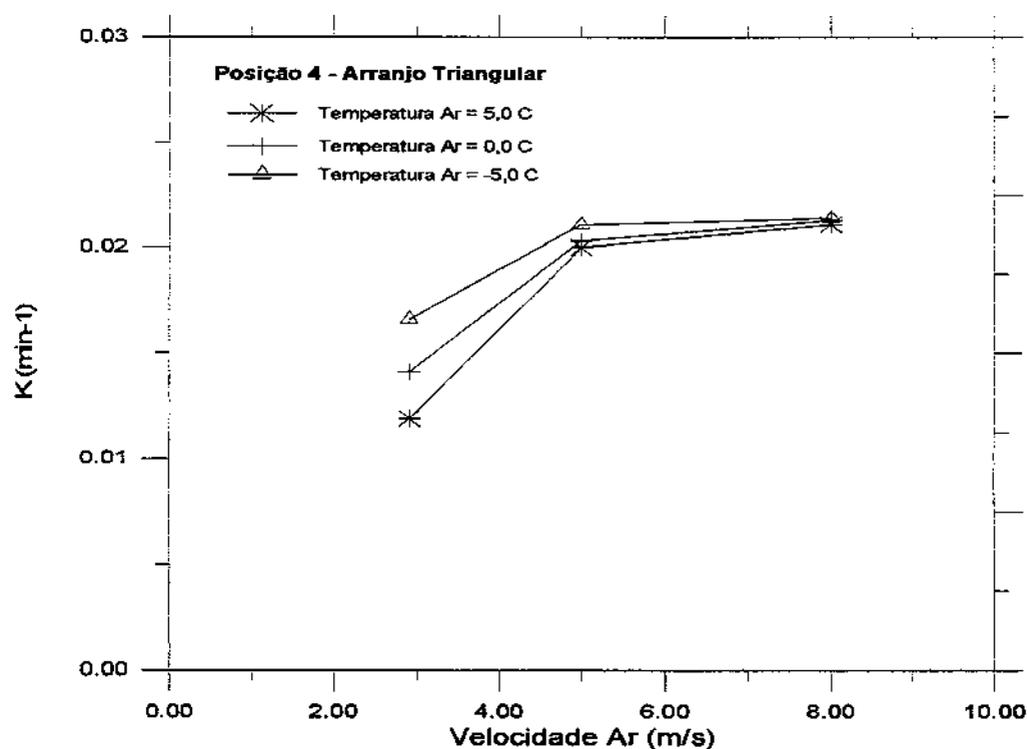


FIGURA 4.12. Variação do parâmetro K em função da velocidade e temperatura do ar de resfriamento, para produto-modelo na posição 4, arranjo triangular.

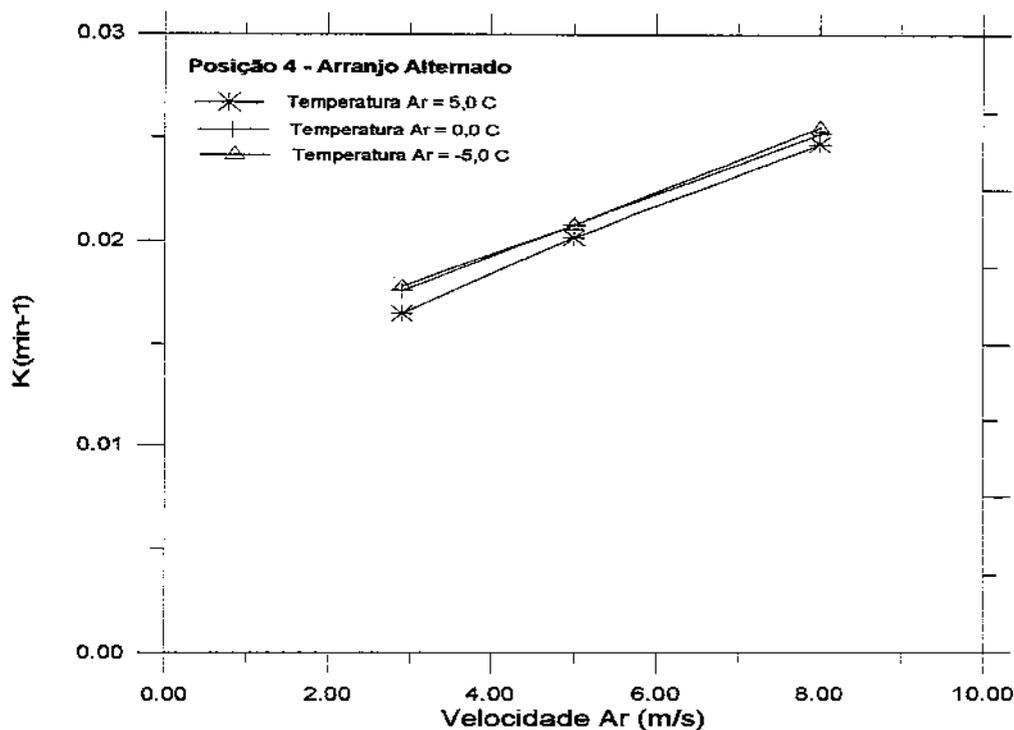


FIGURA 4.13. Variação do parâmetro K em função da velocidade e temperatura do ar de resfriamento, para produto-modelo na posição 4, arranjo alternado.

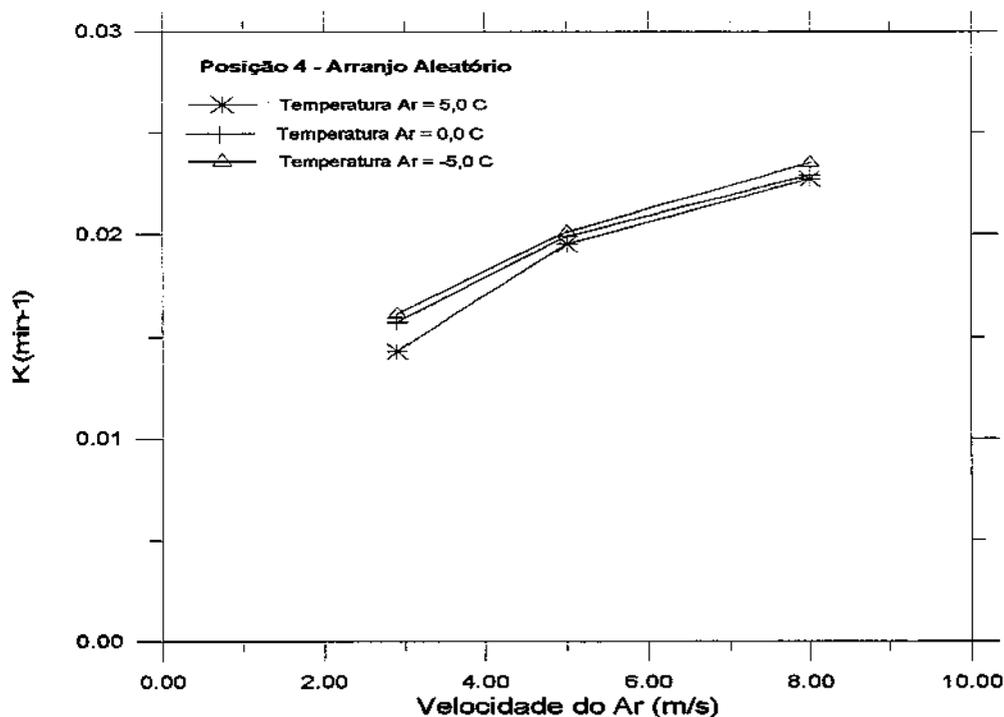


FIGURA 4.14. Variação do parâmetro K em função da velocidade e temperatura do ar de resfriamento, para produto-modelo na posição 4, arranjo aleatório.

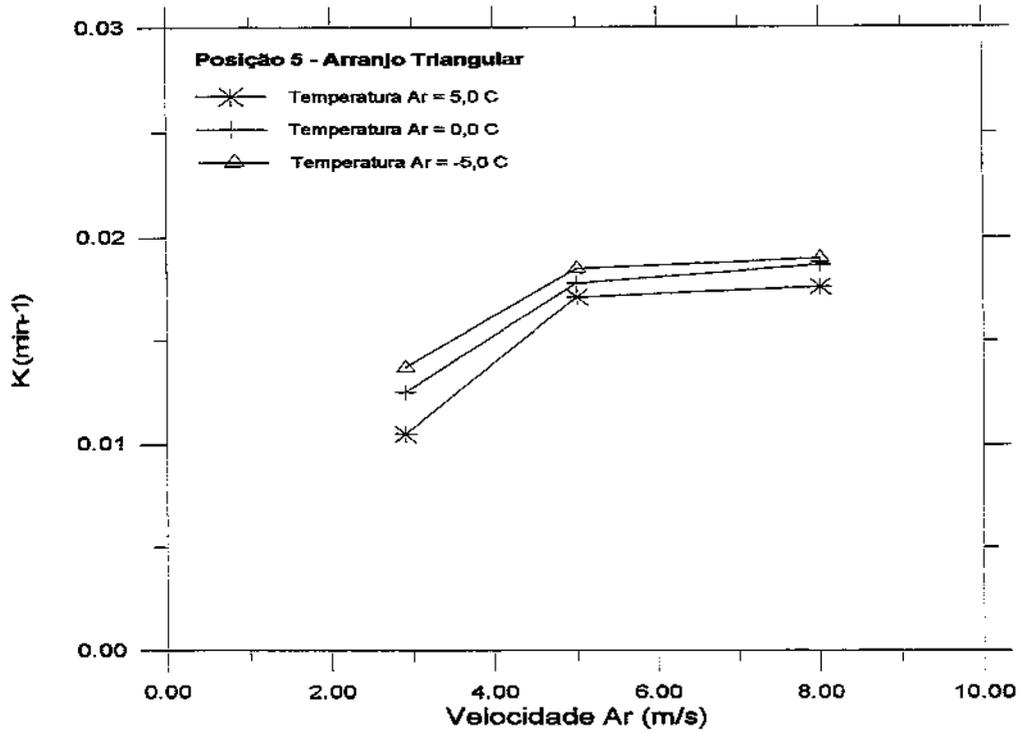


FIGURA 4.15. Variação do parâmetro K em função da velocidade e temperatura do ar de resfriamento, para produto-modelo na posição 5, arranjo triangular.

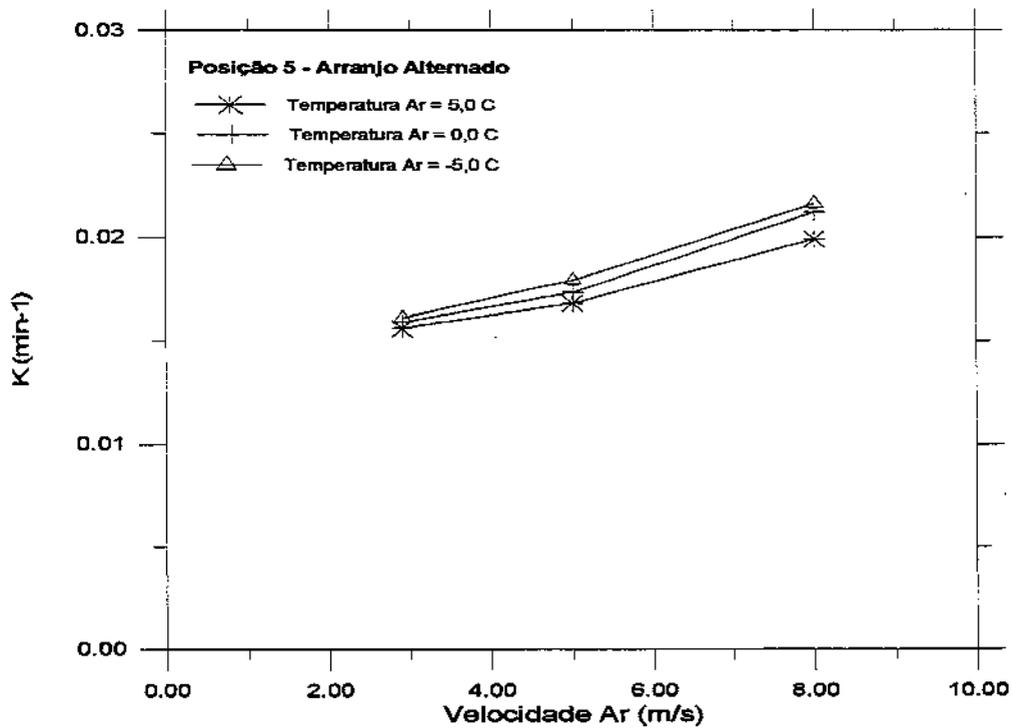


FIGURA 4.16. Variação do parâmetro K em função da velocidade e temperatura do ar de resfriamento, para produto-modelo na posição 5, arranjo alternado.

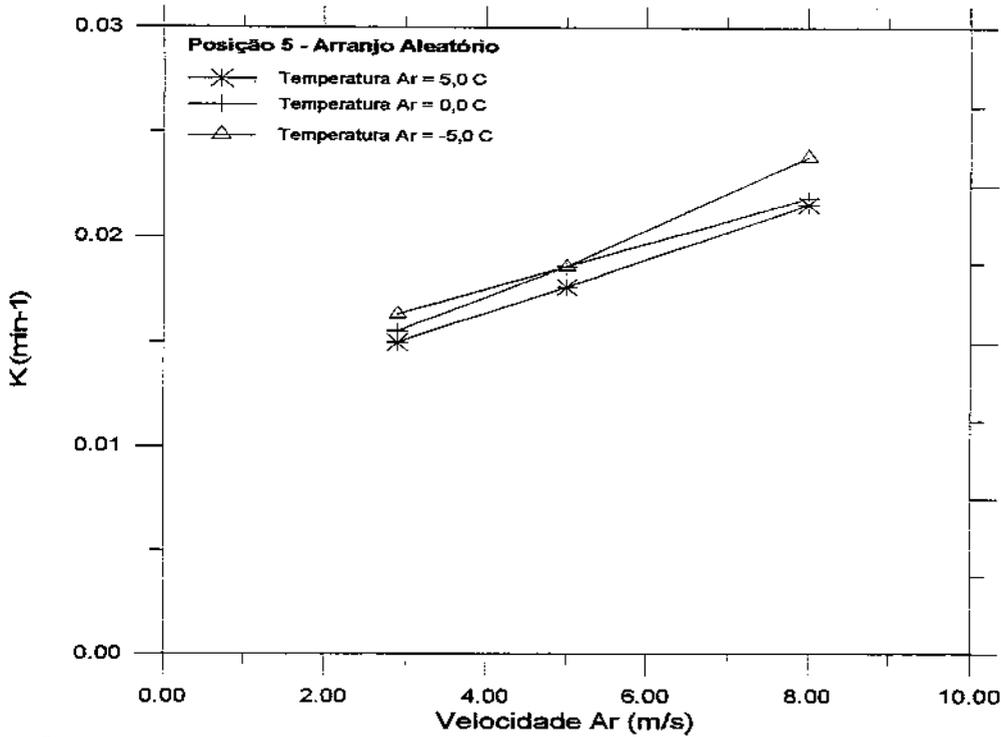


FIGURA 4.17. Variação do parâmetro K em função da velocidade e temperatura do ar de resfriamento, para produto-modelo na posição 5, arranjo aleatório.

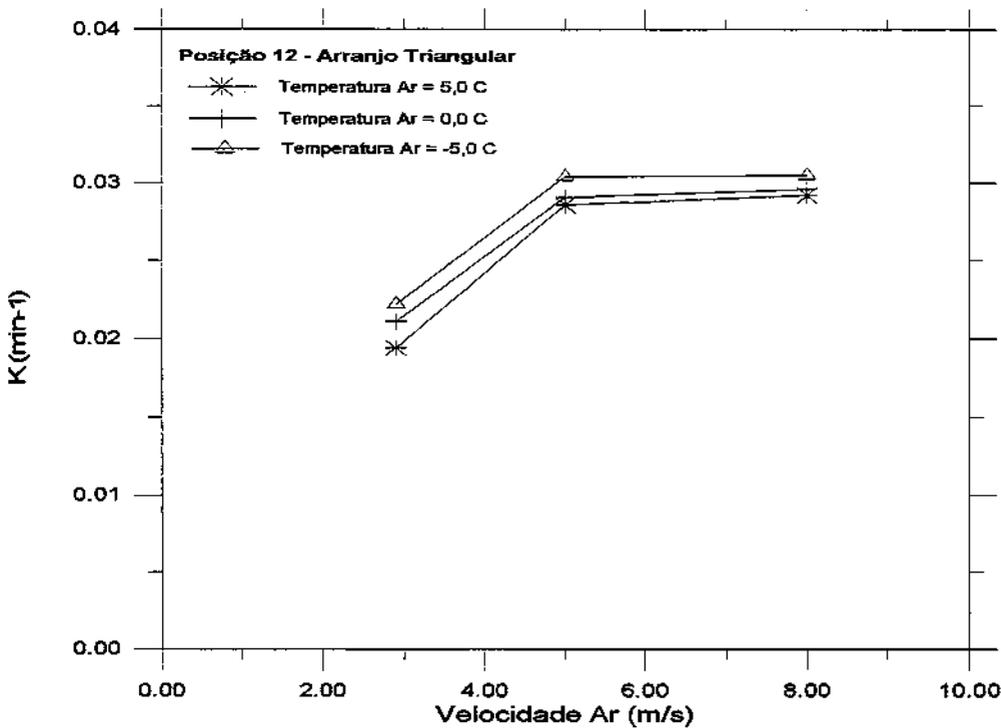


FIGURA 4.18. Variação do parâmetro K em função da velocidade e temperatura do ar de resfriamento, para produtos-modelo na posição 12, arranjo triangular.

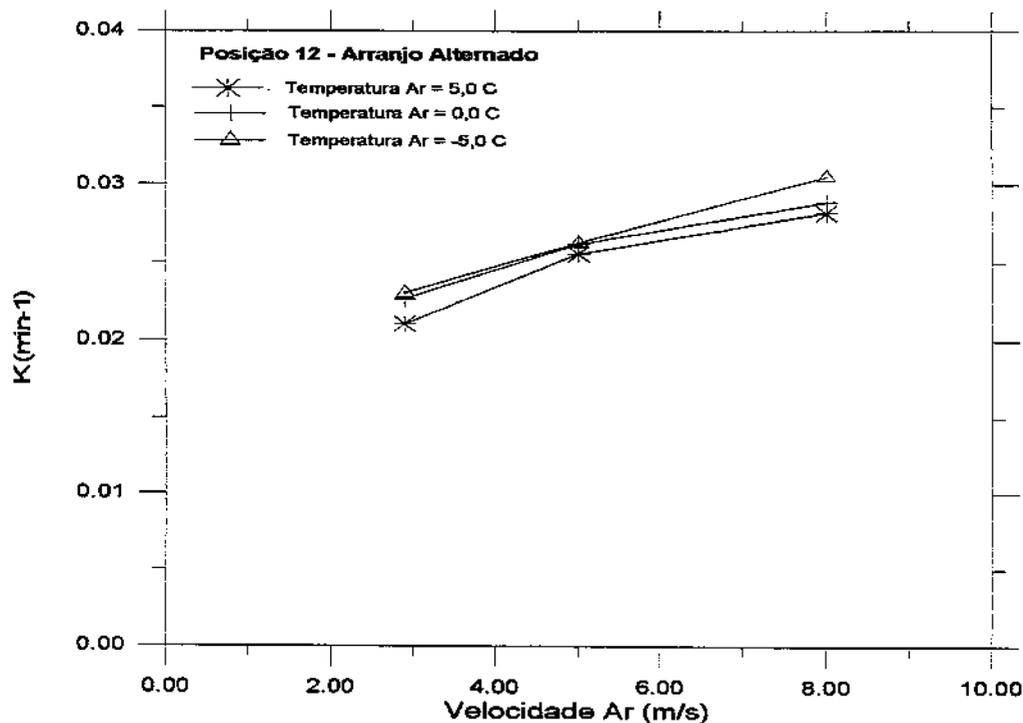


FIGURA 4.19. Variação do parâmetro K em função da velocidade e temperatura do ar de resfriamento, para produtos-modelo na posição 12, arranjo alternado.

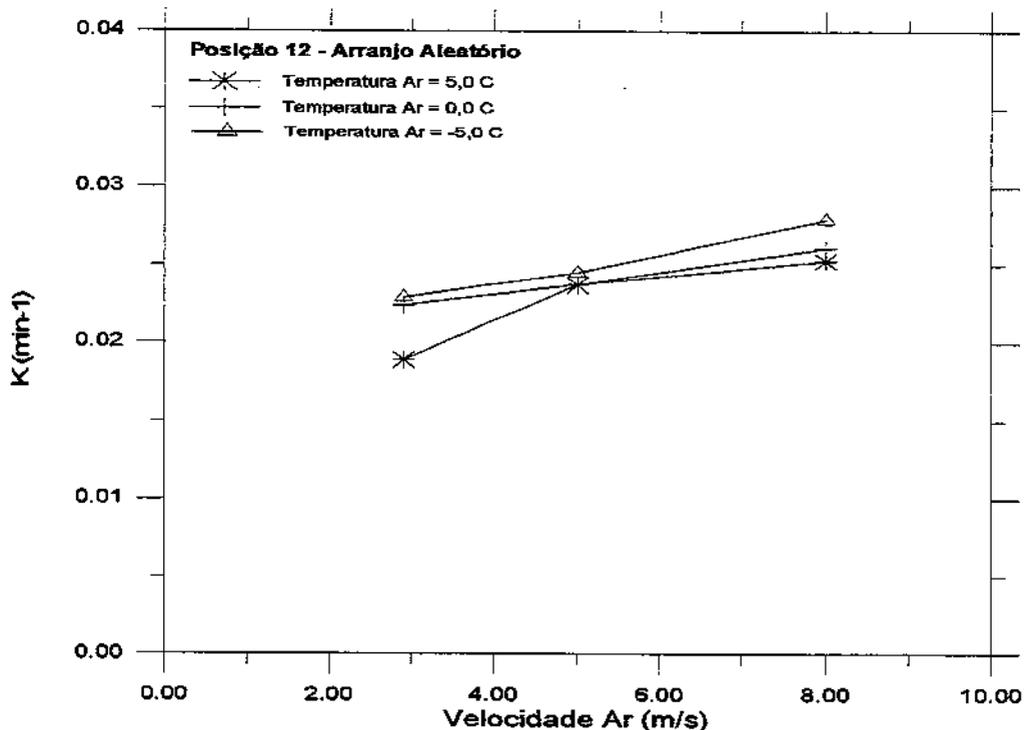


FIGURA 4.20. Variação do parâmetro K em função da velocidade e temperatura do ar de resfriamento, para produtos-modelo na posição 12, arranjo aleatório.

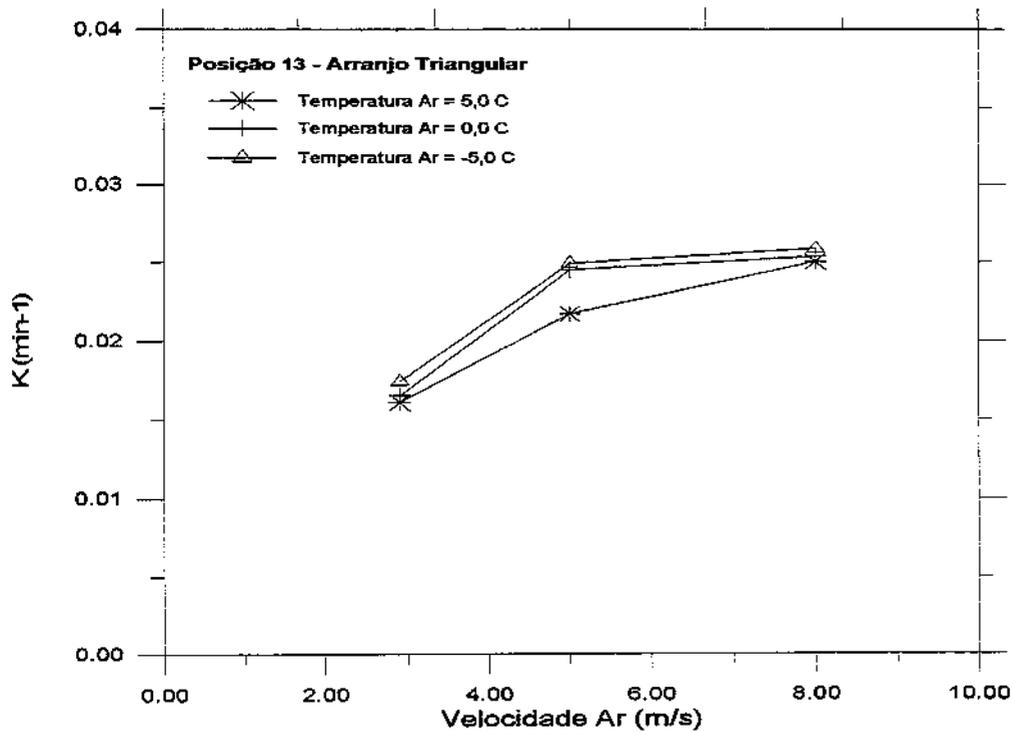


FIGURA 4.21. Variação do parâmetro K em função da velocidade e temperatura do ar de resfriamento, para produtos-modelo na posição 13, arranjo triangular.

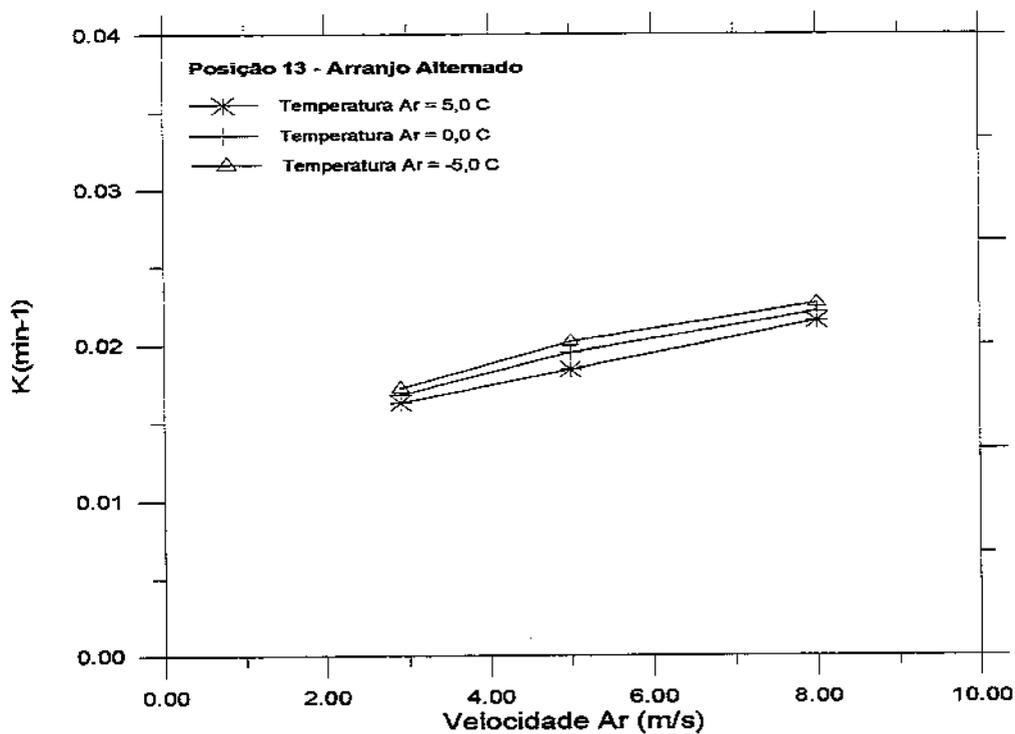


FIGURA 4.22. Variação do parâmetro K em função da velocidade e temperatura do ar de resfriamento, para produtos-modelo na posição 13, arranjo alternado.

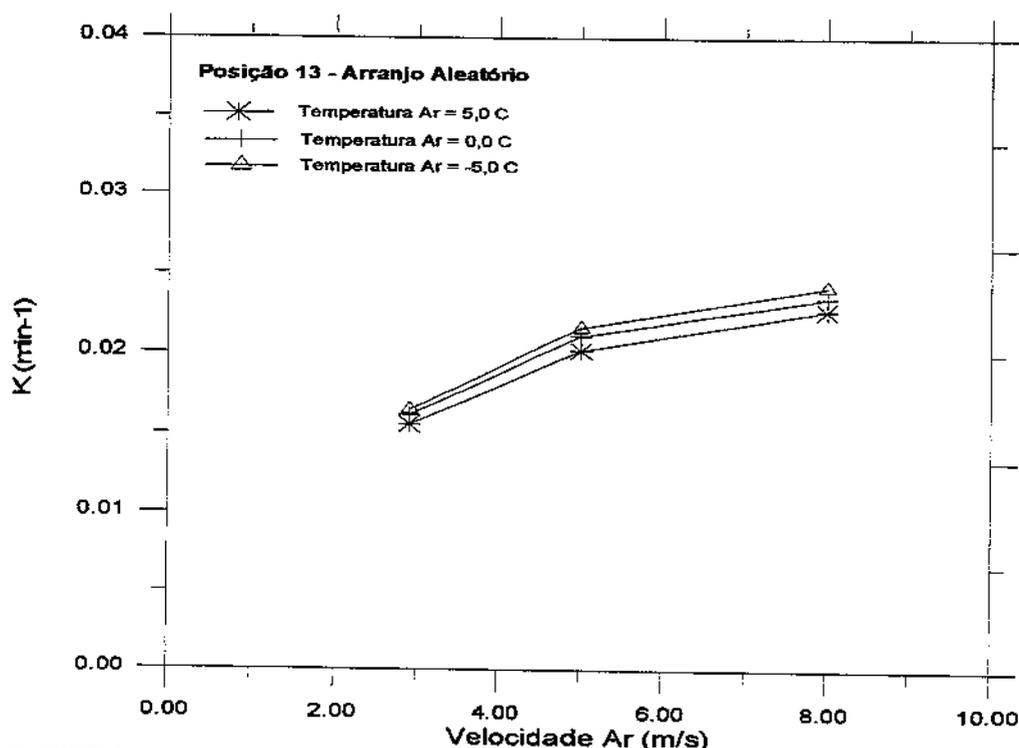


FIGURA 4.23. Variação do parâmetro K em função da velocidade e temperatura do ar de resfriamento, para produtos-modelo na posição 13, arranjo aleatório.

Através da análise das Figuras 4.12 a 4.23 é possível constatar que, ao manter constante a velocidade do ar de resfriamento e diminuir a temperatura deste, a taxa de resfriamento (K) mostra valores próximos, porém crescentes. Este fato pode ser observado para os três arranjos estudados e não tem fundamento nos princípios de transferência de calor, pois tanto a condutividade térmica, k , como o coeficiente de transferência de calor por convecção, h , diminuem com o abaixamento da temperatura.

Através da análise das Figuras 4.12 a 4.23 é possível afirmar que, ao se manter constante a temperatura do ar de resfriamento e aumentar a sua velocidade, os valores das taxas de resfriamento (K) aumentam. Esta constatação é válida para todos os arranjos testados e é um resultado esperado, já que o aumento da velocidade aumenta a turbulência, e portanto, o coeficiente de transferência de calor por convecção, h .

No arranjo triangular, em todos os casos estudados, o aumento da velocidade até 5,0 m/s é vantajoso, já que implica num aumento da taxa de resfriamento (K), mas acima desta velocidade não observa-se praticamente aumento neste parâmetro. Nos arranjos alternado e aleatório há uma crescente melhora da taxa de resfriamento (K) com a velocidade.

O efeito da variação da velocidade do ar é mais pronunciado que o efeito da variação da temperatura.

Determinou-se, utilizando-se todos os valores do parâmetro de ajuste (K), expressos nas Tabelas B.1, B.2 e B.3, do Apêndice B, uma taxa de resfriamento média (\bar{K}) para cada arranjo. Constatou-se que, o arranjo alternado apresenta um (\bar{K}) igual à 0,0211 ($\pm 0,0040$), o arranjo triangular igual a 0,0208 ($\pm 0,0054$) e o arranjo aleatório igual a 0,0206 ($\pm 0,0036$). Aplicando avaliações estatísticas, como o Teste de Tukey, por exemplo, observa-se que as diferenças não são significativas em um intervalo de confiança de 95% e que os valores médios de K são dependentes da velocidade do ar (NETER et al., 1990).

5. CONCLUSÕES

- 1- O produto-modelo obtido a partir de esferas de policloreto de vinila (PVC) preenchidas com solução 3% de goma K-carragena mostrou-se bastante eficiente na representação das frutas esféricas, especialmente laranjas, possibilitando o estudo da transferência de calor através do leite. O uso destes produtos-modelo permitiu uma boa reprodutibilidade dos dados experimentais obtidos.
- 2- Embora a embalagem de papelão testada disponha de uma maior percentagem de área de abertura para entrada do fluxo de ar através das partes superior e lateral, uma maior eficiência no resfriamento foi obtida ao utilizar-se direcionadores para o fluxo de ar, de maneira que este flua em um único sentido.
- 3- As aberturas dispostas na face superior e inferior da caixa de papelão, e portanto, perpendiculares ao fluxo de ar, contribuíram efetivamente no processo de pré-resfriamento dos produtos-modelo.
- 4- No caso específico de produtos-modelo dispostos em leite e acondicionados em caixas com aberturas para entrada do ar de resfriamento, conclui-se que as esferas mais próximas a estas aberturas estão expostas ao ar de resfriamento mais frio. Conforme o ar passa pelo leite vai se aquecendo e se estabelece uma menor diferença de temperaturas entre a esfera e o meio de resfriamento. Ficou comprovada que, de forma geral, a taxa de transferência de calor é maior nas camadas superiores do leite e junto às aberturas, diminuindo nas camadas inferiores e nas posições afastadas das aberturas.

- 5- Uma grande heterogeneidade de distribuição de temperaturas no leito de esferas, tornam essencial uma boa localização dos sensores de temperaturas, para o controle do processo de pré-resfriamento. Estes sensores devem ser distribuídos nos pontos mais críticos do leito, ou seja, onde o resfriamento é mais rápido ("ponto frio") e onde o resfriamento é mais lento ("ponto quente"). Cabe destacar que, o ponto de controle mais importante é o do "ponto frio", e o sensor deve estar disposto o mais próximo possível às aberturas para entrada do fluxo de ar na caixa, evitando-se o congelamento do produto, caso temperaturas próximas ou inferiores a 0 °C sejam utilizadas no processo de pré-resfriamento.

- 6- Os dados de temperatura adimensional do produto-modelo em função do tempo podem ser ajustados através de funções exponenciais, sendo que a taxa de resfriamento obtida a partir do ajuste mostrou ser um parâmetro adequado para comparar diferentes condições de processo.

- 7- Mantendo constante a temperatura do ar de resfriamento e aumentando a sua velocidade obtém-se um aumento significativo nas taxas de resfriamento.

- 8- Mantendo constante a velocidade do ar de resfriamento e diminuindo a sua temperatura concluiu-se que os valores das taxas de resfriamento são crescentes embora a variação seja pequena.

- 9- Através da determinação da taxa de resfriamento média (\bar{K}) concluiu-se que não existe diferença significativa entre os arranjos triangular, alternado e aleatório.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho realizado, a percentagem, formato e distribuição das aberturas foram mantidos fixos, mas em futuros estudos poderiam ser otimizados, buscando determinar as condições que resultassem numa taxa de transferência de calor eficiente, sem prejudicar a resistência física da caixa.

Sugere-se também ampliar o estudo das variáveis que afetam a transferência de calor usando caixas de papelão dispostas em paletes. Nesta condição, provavelmente as aberturas das faces superior, inferior e lateral das caixas terão importância no processo de pré-resfriamento.

Como em todo trabalho tecnológico, torna-se necessária uma avaliação econômica, considerando a contribuição de diferentes condições de processo (velocidade e temperatura do ar de resfriamento, aberturas para entrada do ar, altura do leito de esferas, entre outras) no custo de pré-resfriamento.

Recomenda-se que seja feito um estudo sobre a influência das melhores condições de resfriamento, sobre a qualidade ou vida-de-prateleira de laranjas. Em termos de transferência de calor, concluiu-se que a temperatura de $-5,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ é a que resulta num resfriamento mais rápido, mas ao trabalhar com frutas, pode ser que esta baixa temperatura ocasione injúrias ao produto resfriado.

APÊNDICE A

TEMPERATURAS ADIMENSIONAIS DE RESFRIAMENTO

Nas Figuras A.1 a A.26 são apresentadas as curvas com os dados experimentais da temperatura adimensional do produto-modelo, em escala logarítmica, versus tempo, em escala aritmética e o ajuste por meio de função exponencial para produtos-modelo dispostos no arranjo triangular, alternado e aleatório, submetidos às velocidades do ar de resfriamento de 8,0 m/s, 5,0 m/s e 2,9 m/s e temperaturas de resfriamento de 5,0 °C, 0,0 °C e -5,0 °C.

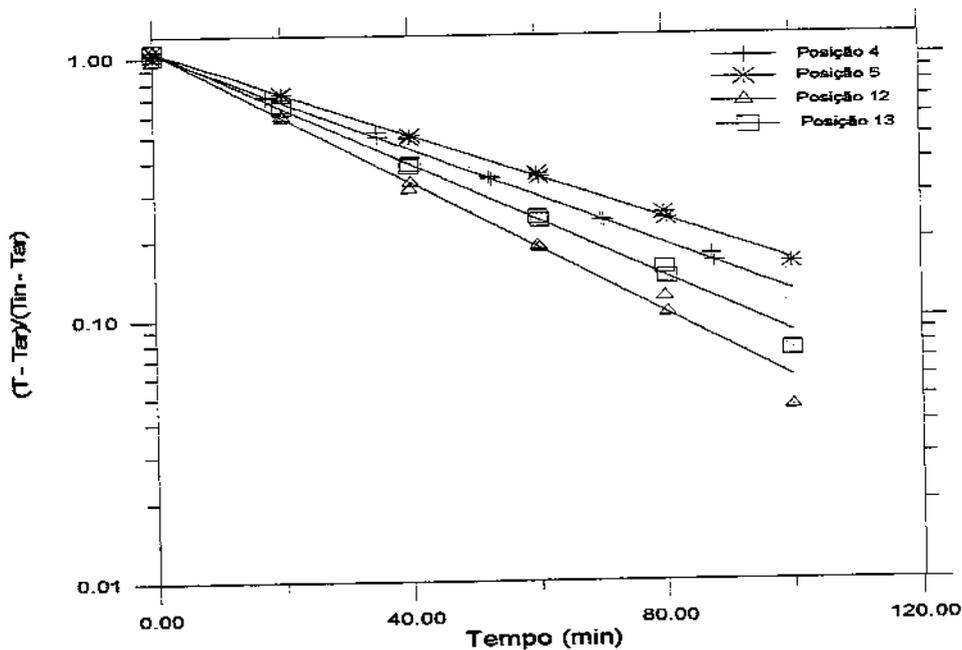


FIGURA A.1. Temperatura adimensional em função do tempo para leito de produtos-modelo dispostos no arranjo triangular e submetidos ao ar de resfriamento de 8,0 m/s e 0,0 °C.

Apêndice A

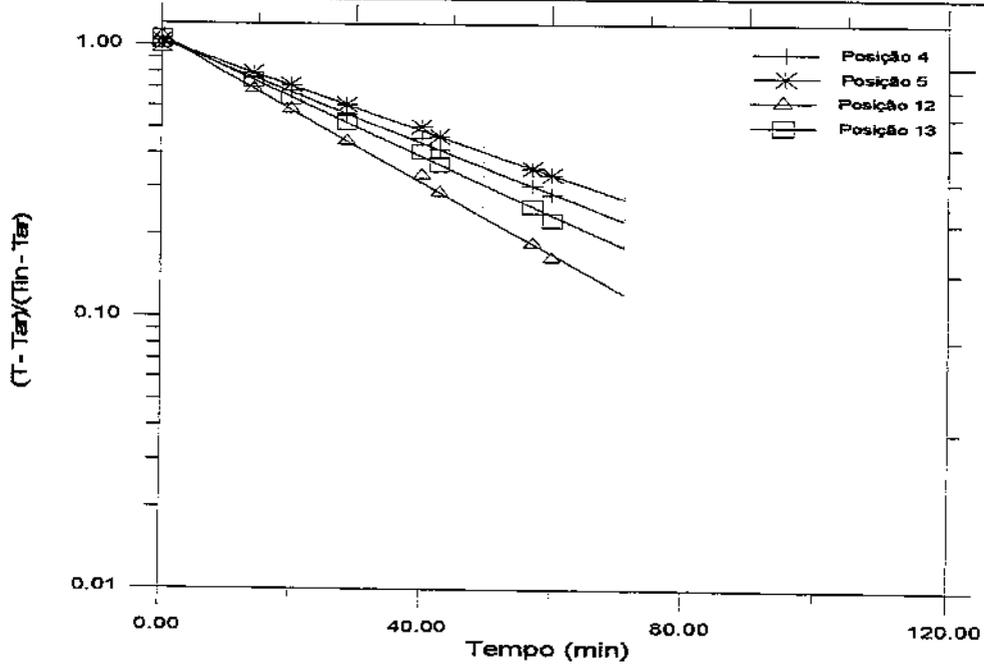


FIGURA A.2. Temperatura adimensional em função do tempo para leito de produtos-modelo dispostos no arranjo triangular e submetidos ao ar de resfriamento de 8,0 m/s e - 5,0 °C.

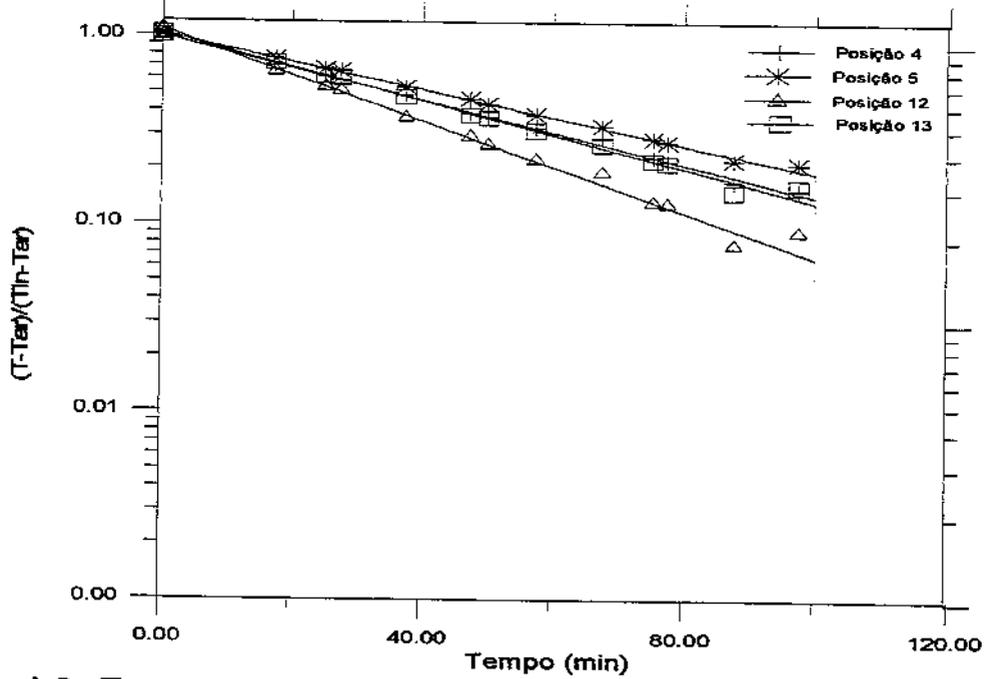


FIGURA A.3. Temperatura adimensional em função do tempo para leito de produtos-modelo dispostos no arranjo triangular e submetidos ao ar de resfriamento de 5,0 m/s e 5,0 °C.

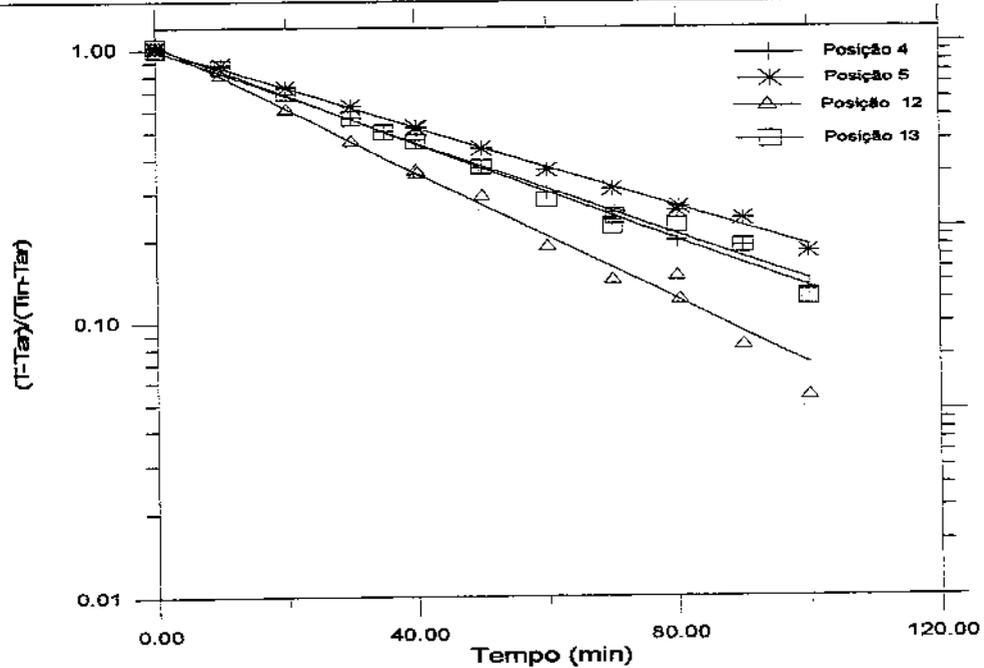


FIGURA A.4. Temperatura adimensional em função do tempo para leito de produtos-modelo dispostos no arranjo triangular e submetidos ao ar de resfriamento de 5,0 m/s e 0,0 °C.

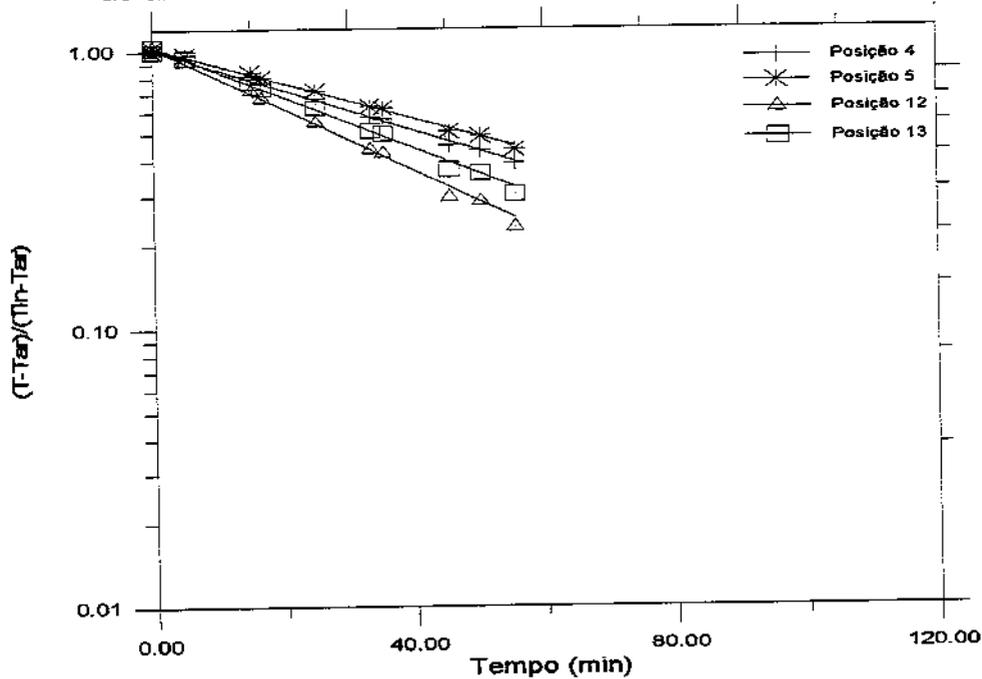


FIGURA A.5. Temperatura adimensional em função do tempo para leito de produtos-modelo dispostos no arranjo triangular e submetidos ao ar de resfriamento de 5,0 m/s e -5,0 °C.

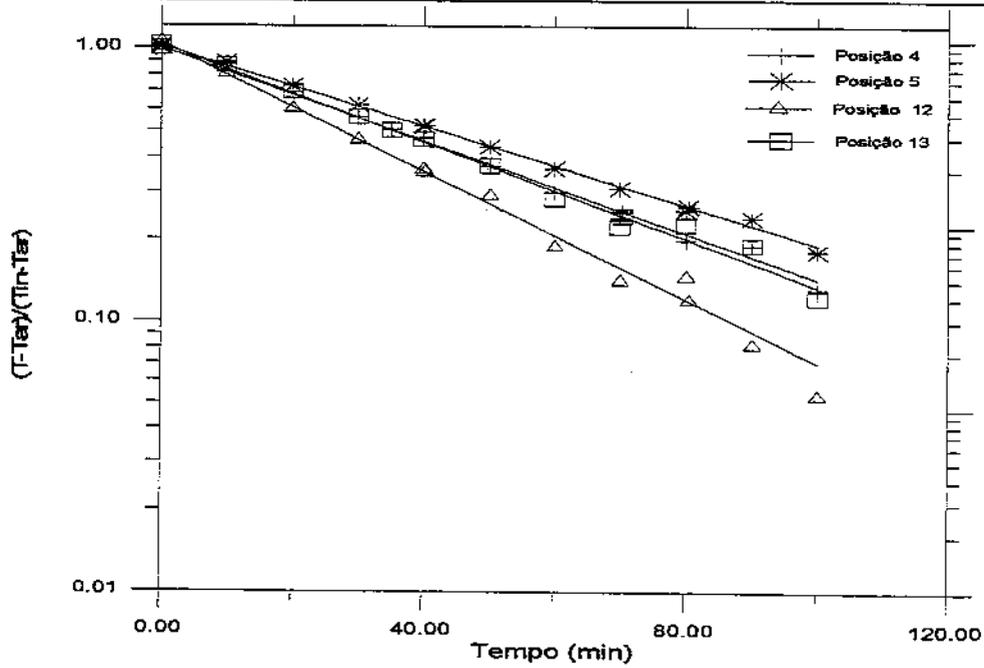


FIGURA A.4. Temperatura adimensional em função do tempo para leito de produtos-modelo dispostos no arranjo triangular e submetidos ao ar de resfriamento de $5,0\text{ m/s}$ e $0,0\text{ °C}$.

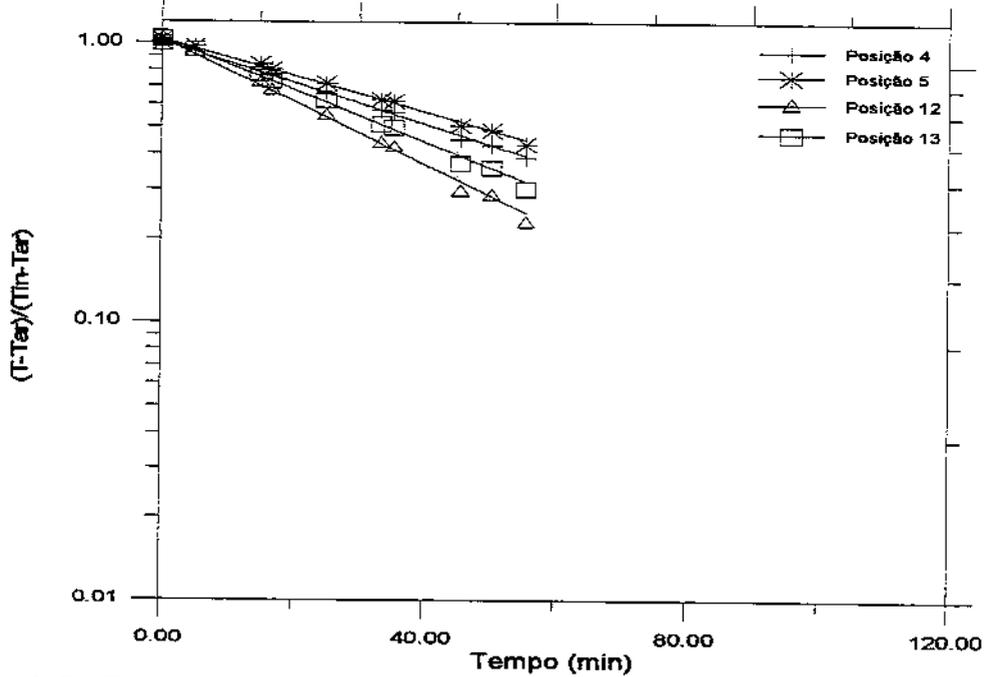


FIGURA A.5. Temperatura adimensional em função do tempo para leito de produtos-modelo dispostos no arranjo triangular e submetidos ao ar de resfriamento de $5,0\text{ m/s}$ e $-5,0\text{ °C}$.

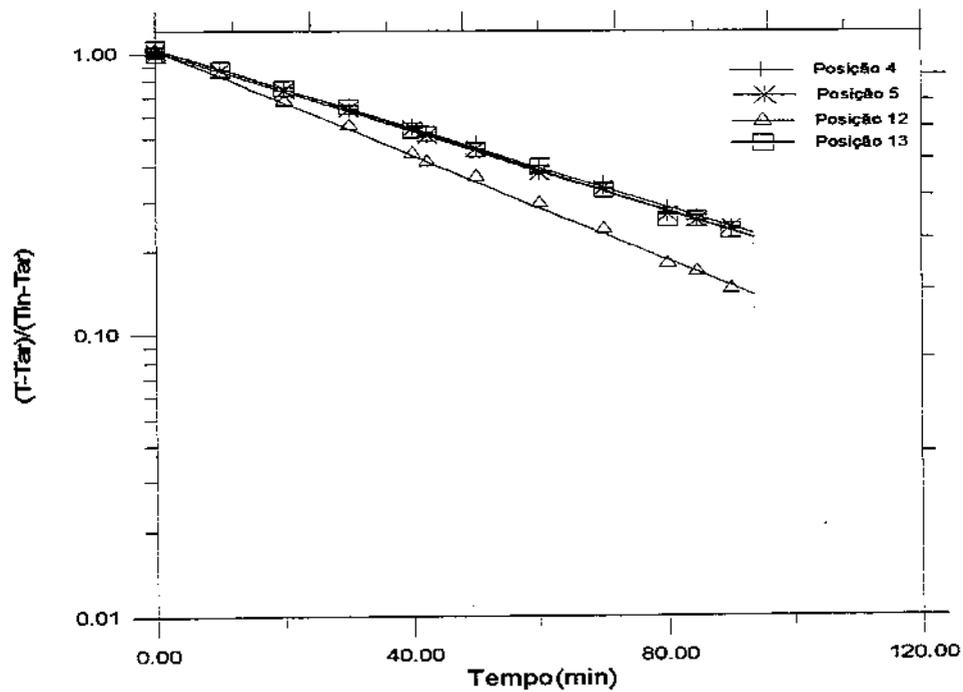


FIGURA A.8. Temperatura adimensional em função do tempo para leito de produtos-modelo dispostos no arranjo triangular e submetidos ao ar de resfriamento de 2,9 m/s e - 5,0 °C.

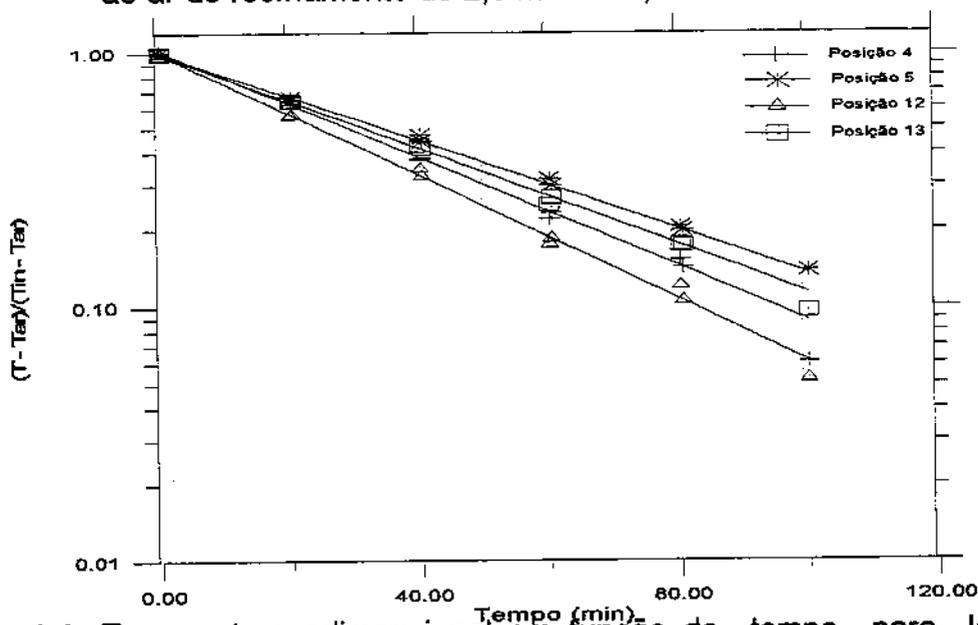


FIGURA A.9. Temperatura adimensional em função do tempo para leito de produtos-modelo dispostos no arranjo alternado e submetidos ao ar de resfriamento de 8,0 m/s e 5,0 °C.

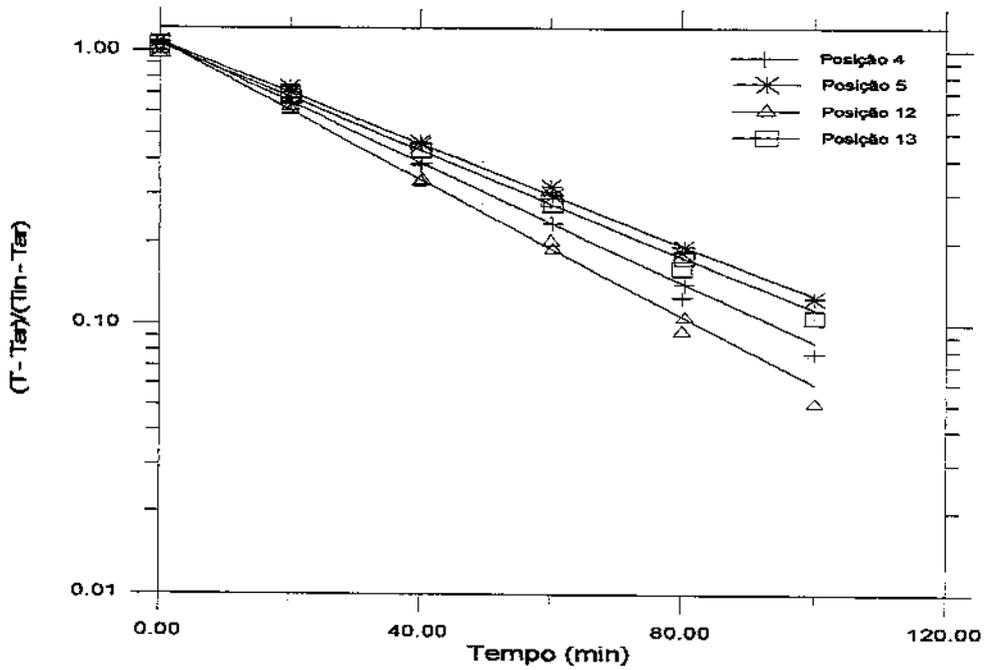


FIGURA A.10. Temperatura adimensional em função do tempo para leito de produtos-modelo dispostos no arranjo alternado e submetidos ao ar de resfriamento de 8,0 m/s e 0,0 °C.

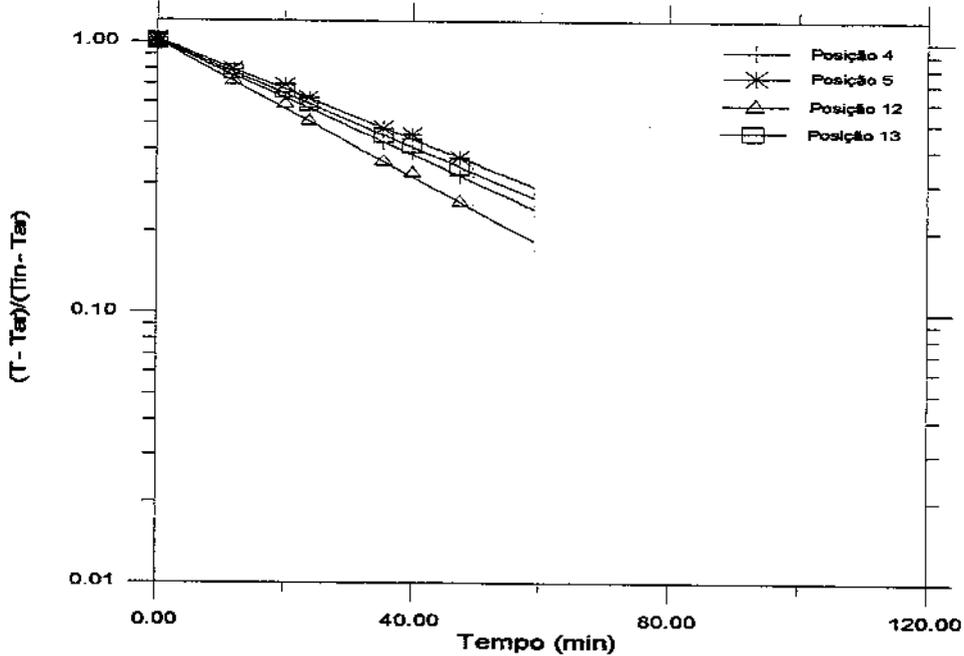


FIGURA A.11. Temperatura adimensional em função do tempo para leito de produtos-modelo dispostos no arranjo alternado e submetidos ao ar de resfriamento de 8,0 m/s e -5,0 °C.

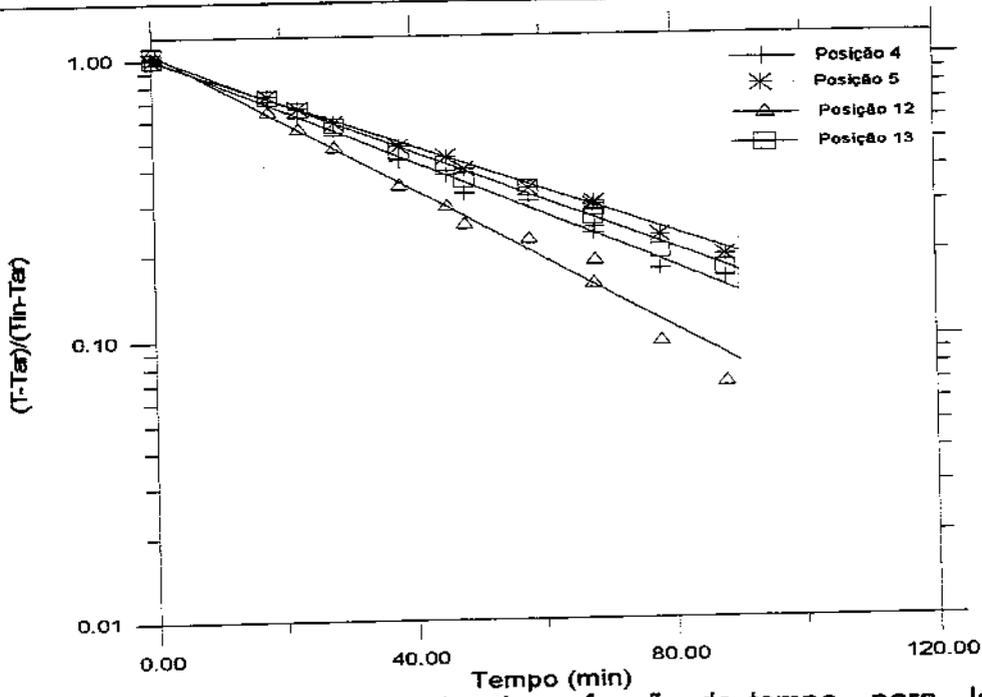


FIGURA A.12. Temperatura adimensional em função do tempo para leito de produtos-modelo dispostos no arranjo alternado e submetidos ao ar de resfriamento de 5,0 m/s e 5,0 °C.

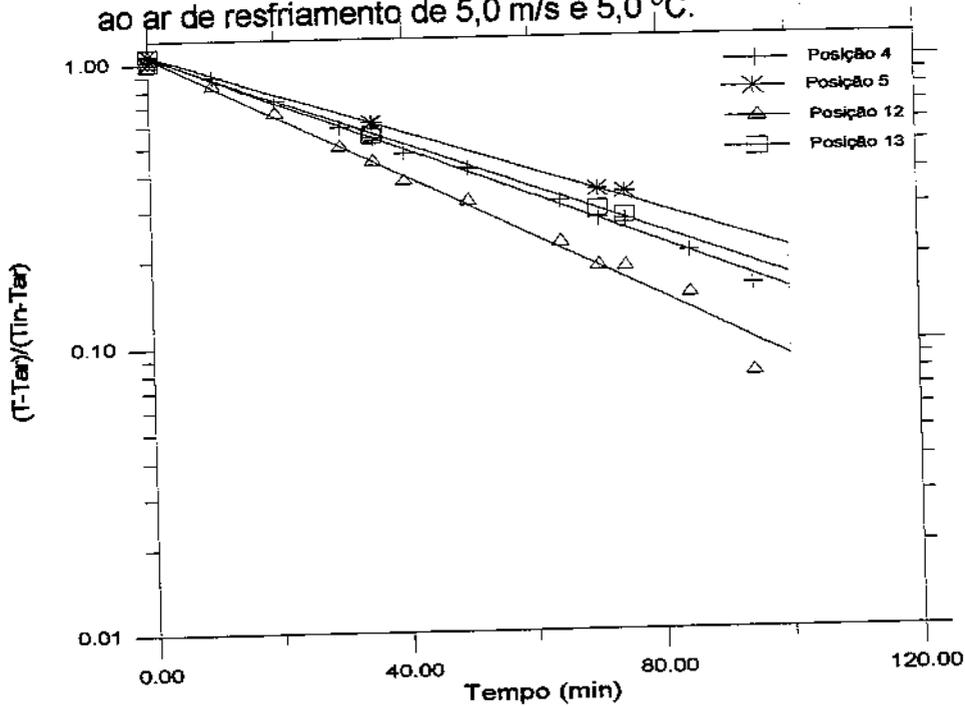


FIGURA A.13. Temperatura adimensional em função do tempo para leito de produtos-modelo dispostos no arranjo alternado e submetidos ao ar de resfriamento de 5,0 m/s e 0,0 °C.

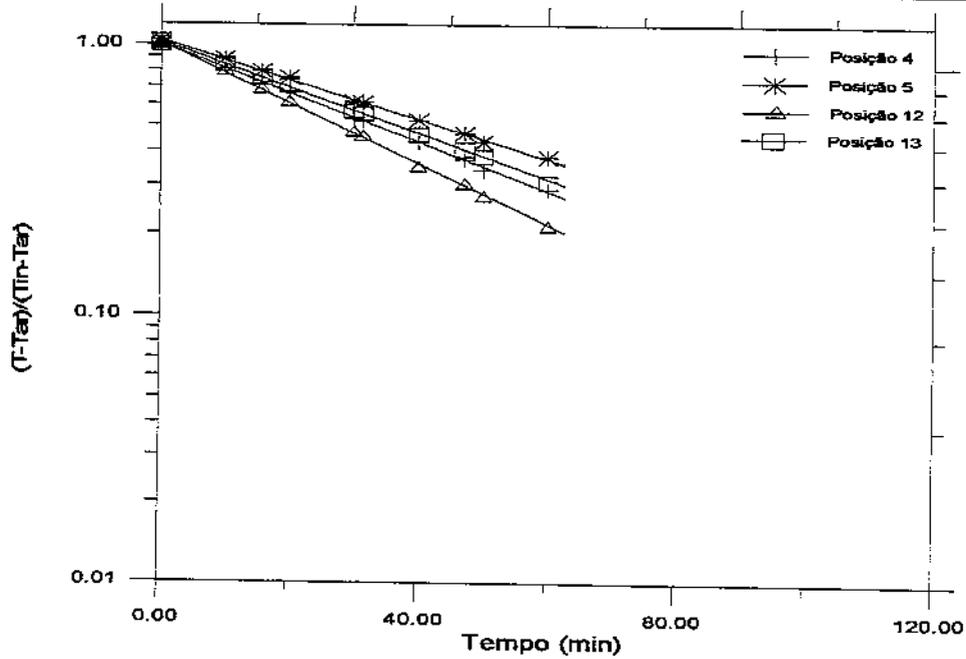


FIGURA A.14. Temperatura adimensional em função do tempo para leito de produtos-modelo dispostos no arranjo alternado e submetidos ao ar de resfriamento de 5,0 m/s e -5,0 °C.

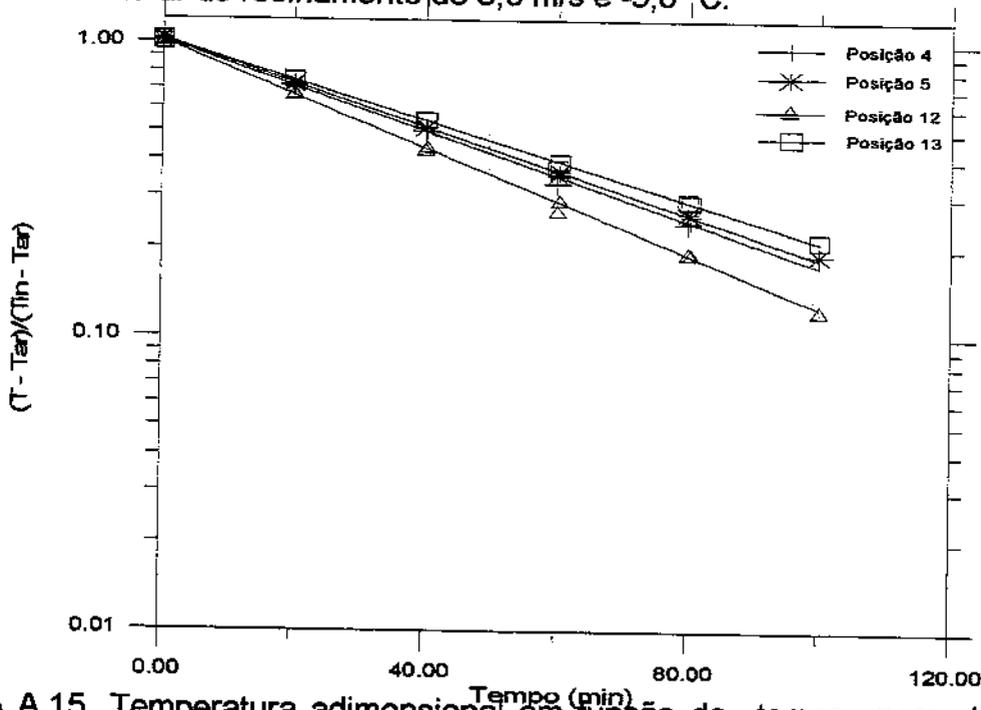


FIGURA A.15. Temperatura adimensional em função do tempo para leito de produtos-modelo dispostos no arranjo alternado e submetidos ao ar de resfriamento de 2,9 m/s e 5,0 °C.

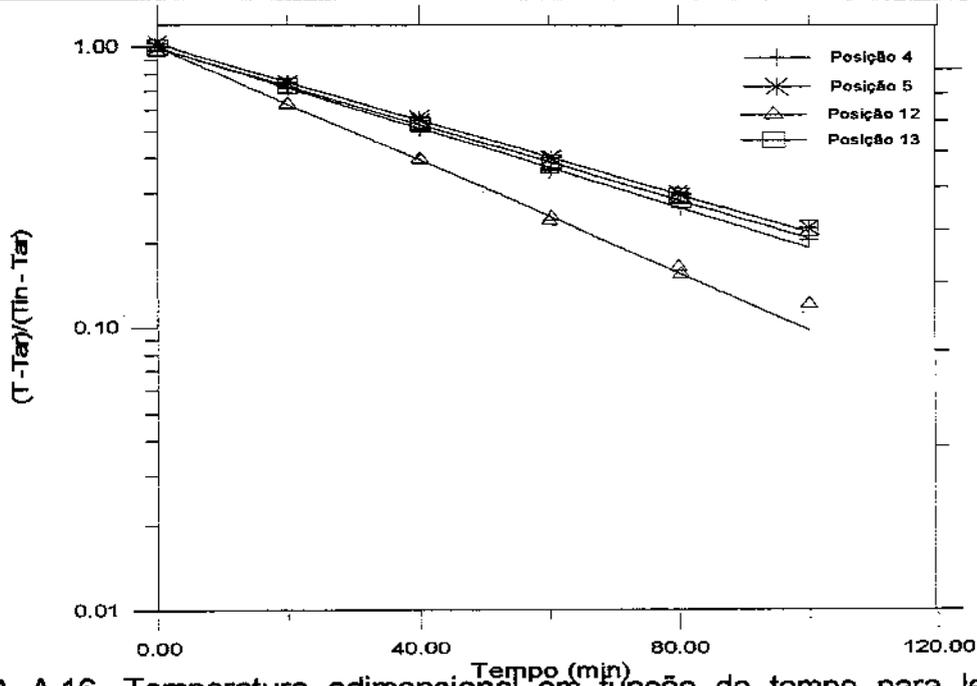


FIGURA A.16. Temperatura adimensional em função do tempo para leito de produtos-modelo dispostos no arranjo alternado e submetidos ao ar de resfriamento de 2,9 m/s e 0,0 °C.

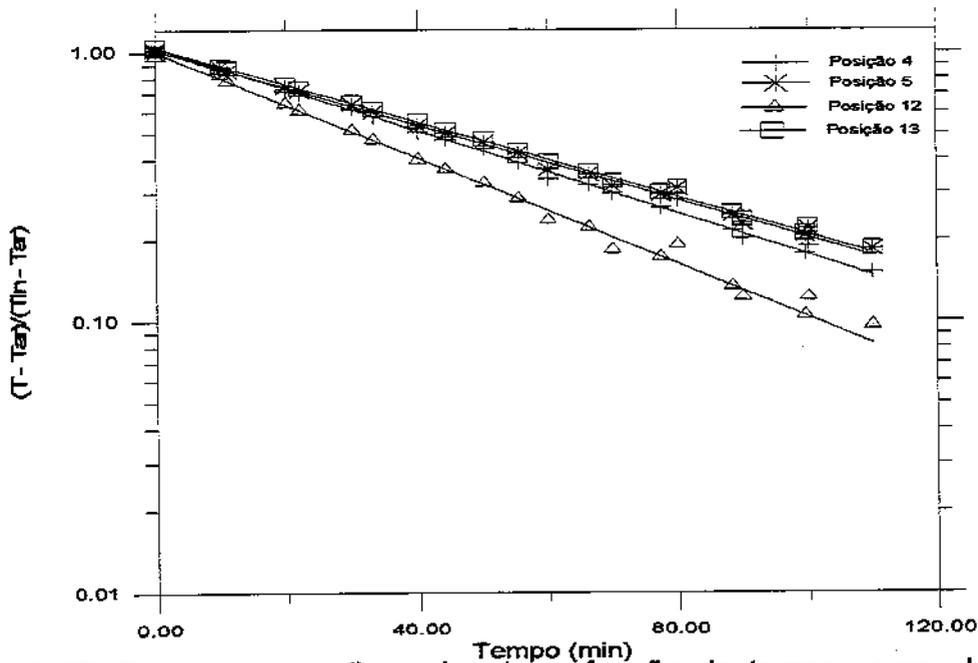


FIGURA A.17. Temperatura adimensional em função do tempo para leito de produtos-modelo dispostos no arranjo alternado e submetidos ao ar de resfriamento de 2,9 m/s e -5,0 °C.

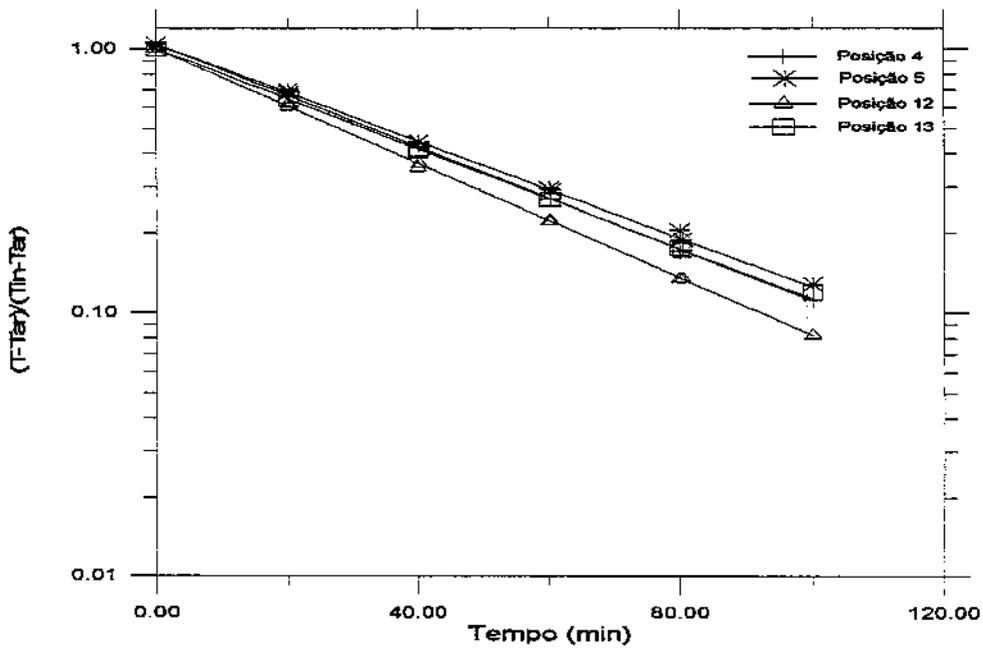


FIGURA A.18. Temperatura adimensional em função do tempo para leito de produtos-modelo dispostos no arranjo aleatório e submetidos ao ar de resfriamento de 8,0 m/s e 5,0 °C.

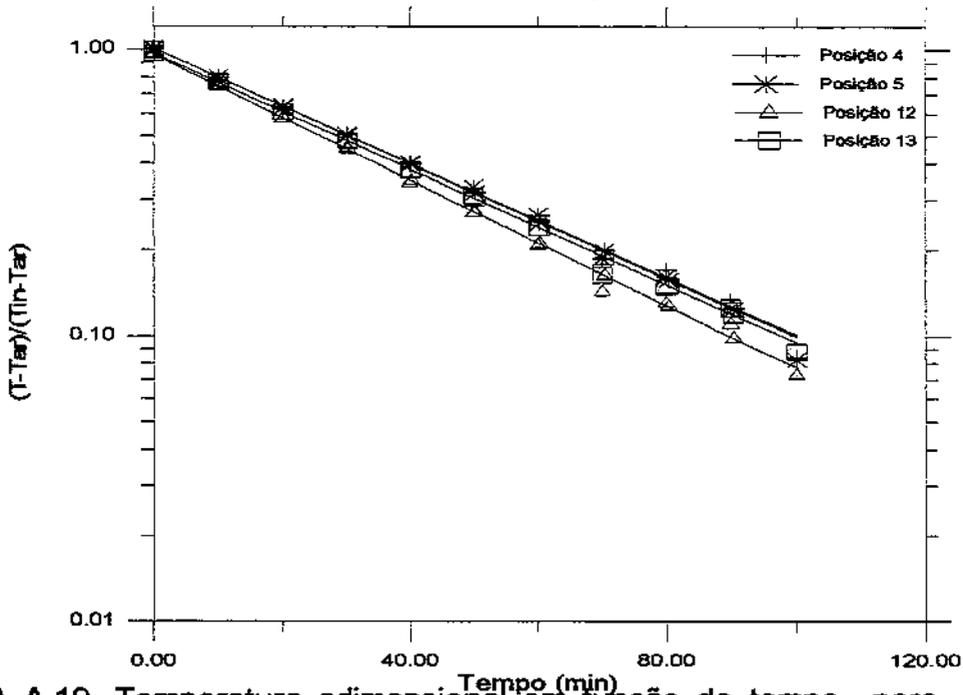


FIGURA A.19. Temperatura adimensional em função do tempo para leito de produtos-modelo dispostos no arranjo aleatório e submetidos ao ar de resfriamento de 8,0 m/s e 0,0 °C.

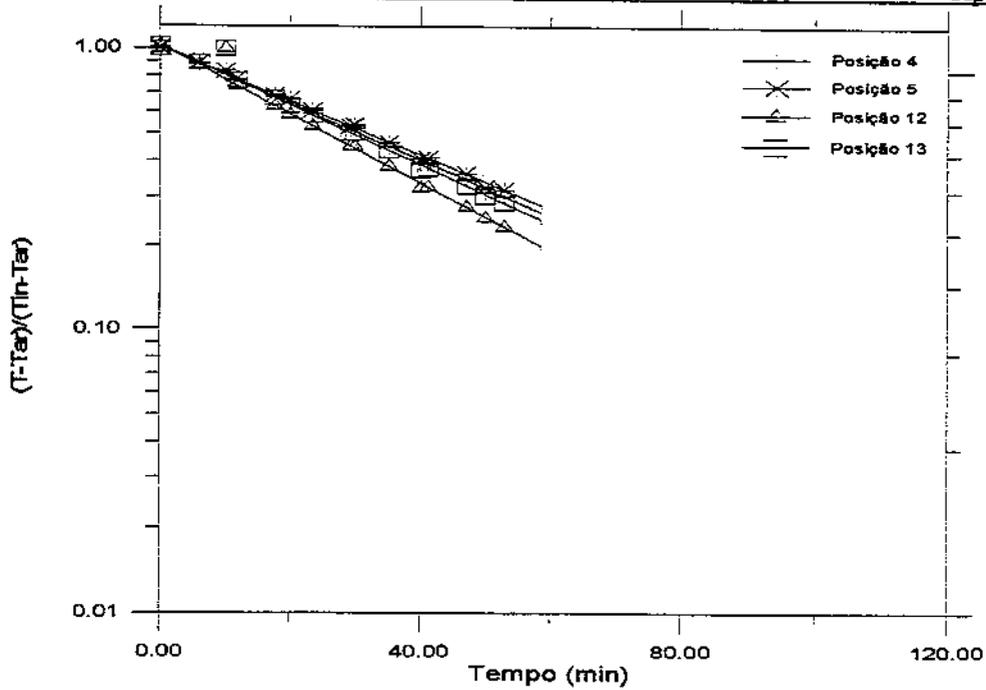


FIGURA A.20. Temperatura adimensional em função do tempo para leito de produtos-modelo dispostos no arranjo aleatório e submetidos ao ar de resfriamento de 8,0 m/s e - 5,0 °C.

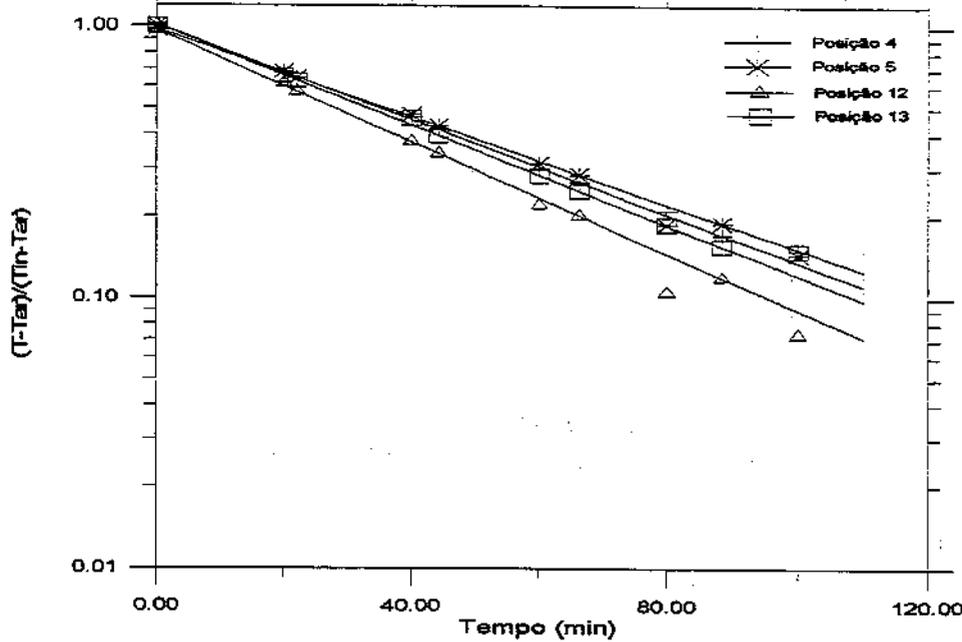


FIGURA A.21. Temperatura adimensional em função do tempo para leito de produtos-modelo dispostos no arranjo aleatório e submetidos ao ar de resfriamento de 5,0 m/s e 5,0 °C.

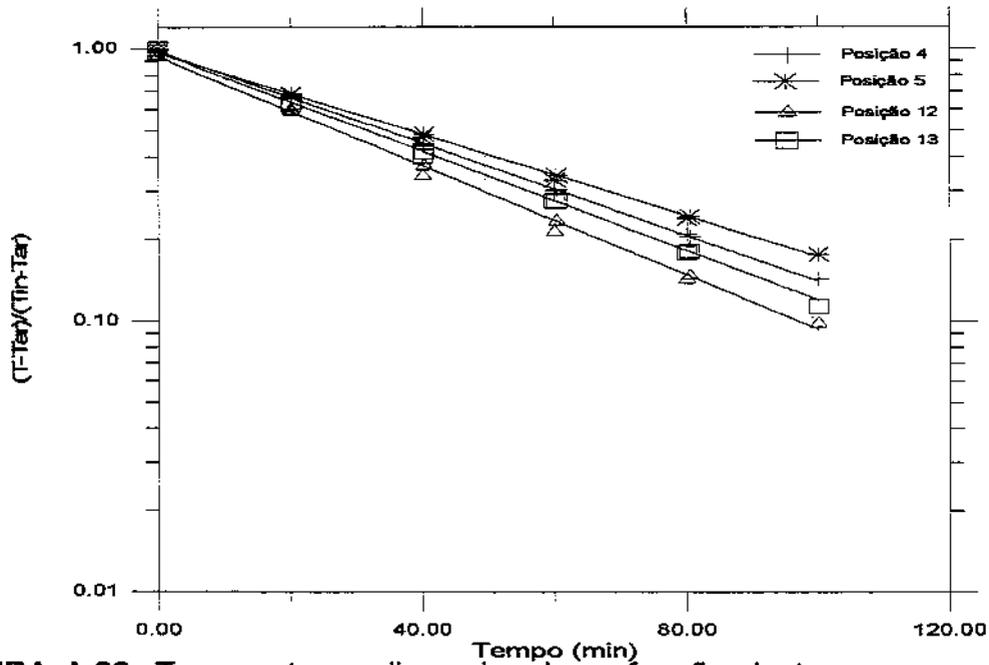


FIGURA A.22. Temperatura adimensional em função do tempo para leito de produtos-modelo dispostos no arranjo aleatório e submetidos ao ar de resfriamento de 5,0 m/s e 0,0 °C.

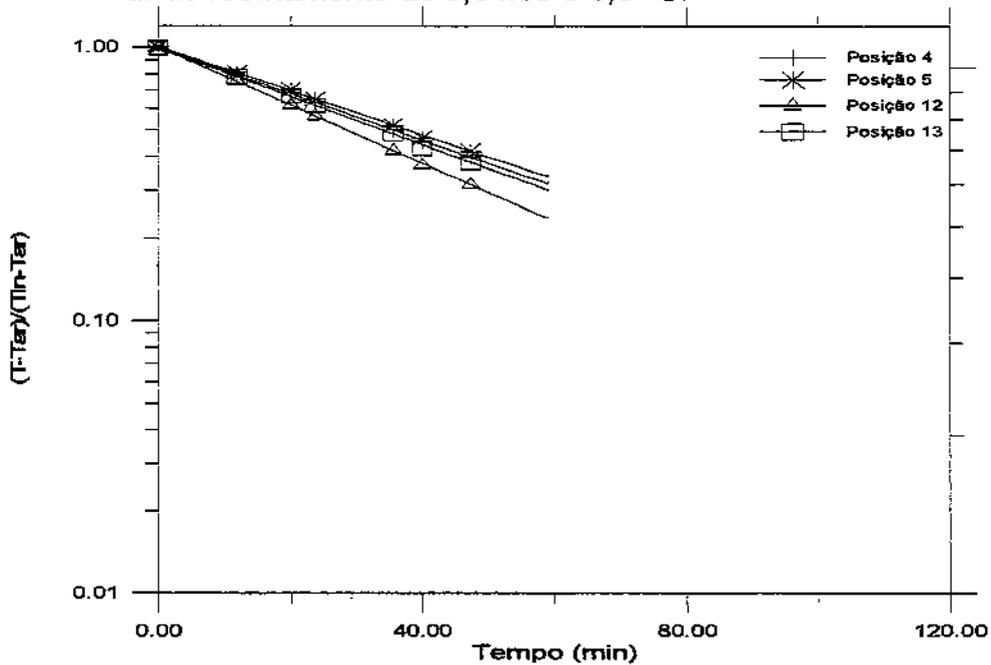


FIGURA A.23. Temperatura adimensional em função do tempo para leito de produtos-modelo dispostos no arranjo aleatório e submetidos ao ar de resfriamento de 5,0 m/s e -5,0 °C.

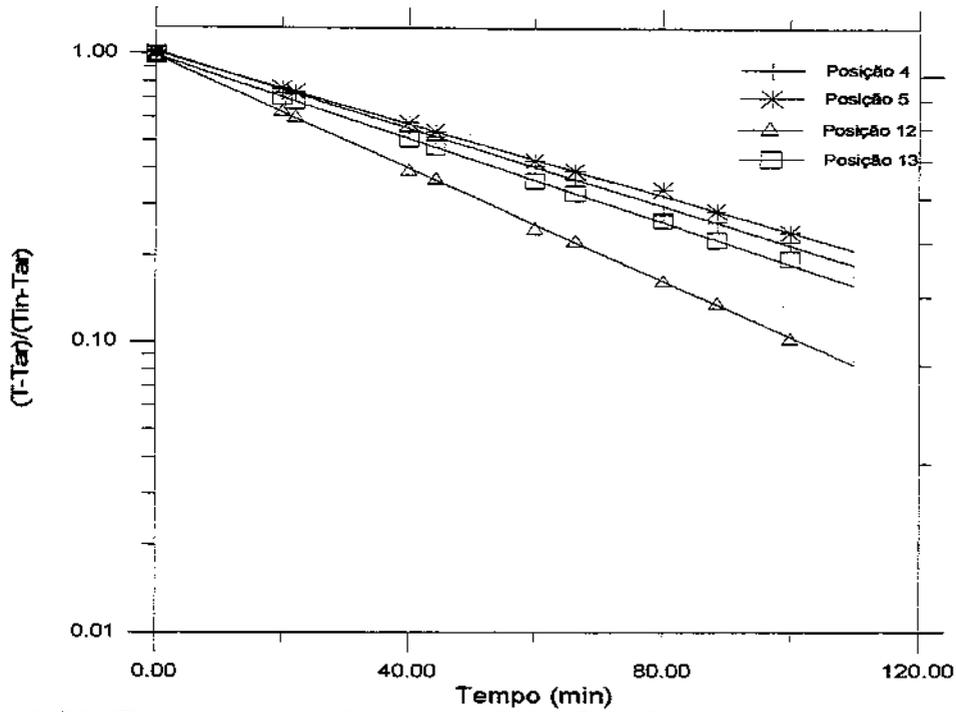


FIGURA A.24. Temperatura adimensional em função do tempo para leito de produtos-modelo dispostos no arranjo aleatório e submetidos ao ar de resfriamento de 2,9 m/s e 5,0 °C.

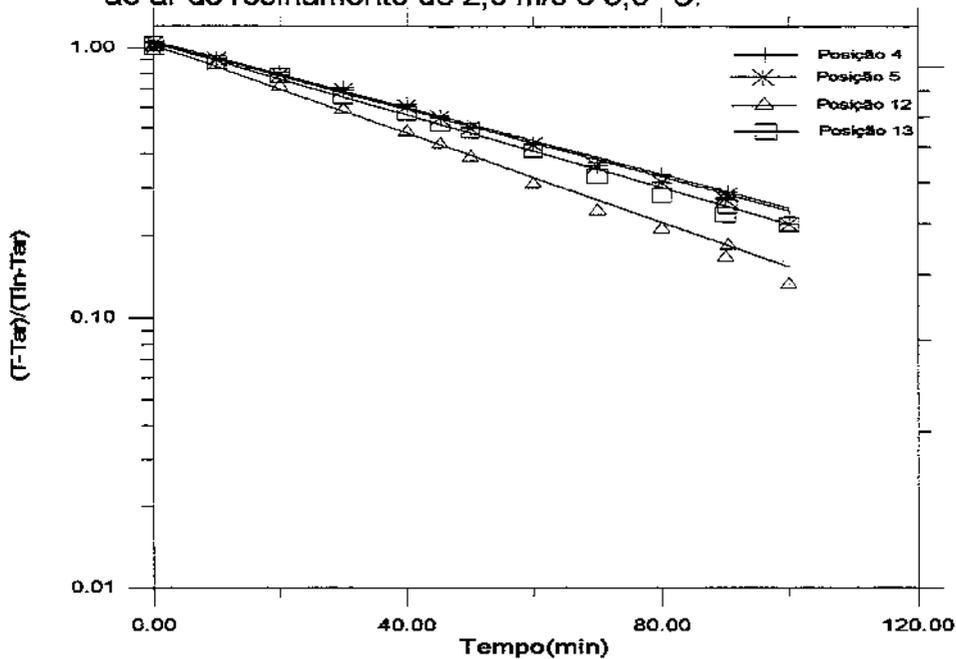


FIGURA A.25. Temperatura adimensional em função do tempo para leito de produtos-modelo dispostos no arranjo aleatório e submetidos ao ar de resfriamento de 2,9 m/s e 0,0 °C.

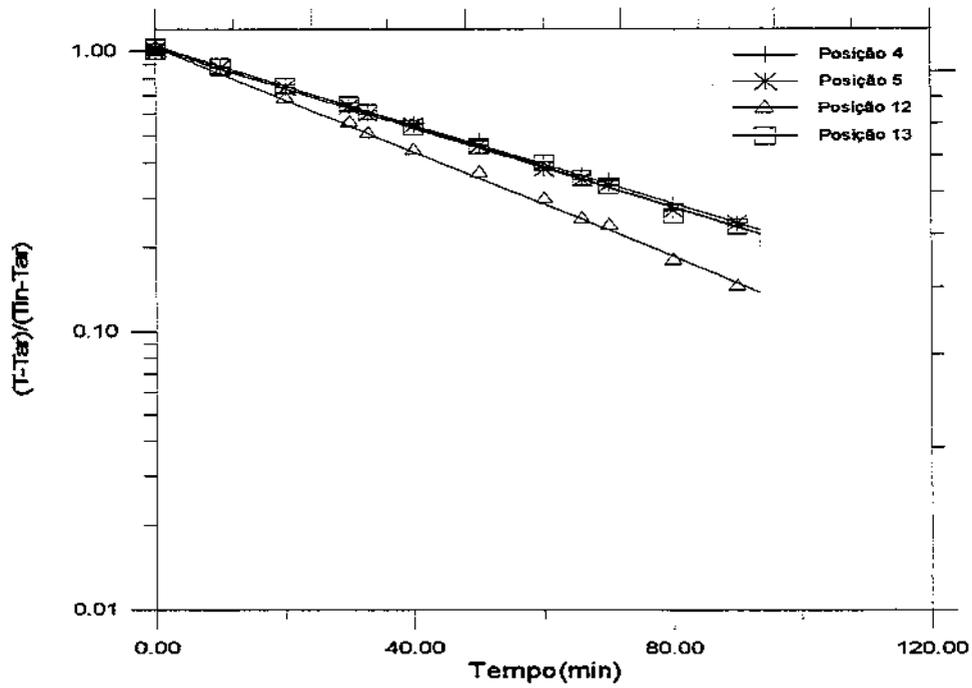


FIGURA A.26. Temperatura adimensional em função do tempo para leito de produtos-modelo dispostos no arranjo aleatório e submetidos ao ar de resfriamento de 2,9 m/s e -5,0 °C.

APÊNDICE B

PARÂMETROS DE AJUSTE

Nas Tabelas B.1, B.2 e B.3 são apresentados os parâmetros de ajuste da equação $\frac{T - T_{ar}}{T_{in} - T_{ar}} = C_1 \exp(-K\theta)$ para os produtos-modelo dispostos no arranjo triangular, alternado e aleatório, respectivamente, submetidos às velocidades do ar de resfriamento de 8,0 m/s, 5,0 m/s e 2,9 m/s e temperaturas de resfriamento de 5,0 °C, 0,0 °C e -5,0 °C.

TABELA B.1 Valores dos parâmetros de ajuste da equação

$$\frac{T - T_{ar}}{T_{in} - T_{ar}} = C_1 \exp(-K\theta), \text{ para produtos modelo dispostos no arranjo triangular.}$$

Temperatura Ar (°C)	5,0			0,0			- 5,0		
	C ₁	K	R ²	C ₁	K	R ²	C ₁	K	R ²
Velocidade Ar 2,9 m/s									
Posição 5	1,0146	0,0105	0,9908	1,0285	0,0125	0,9974	1,0578	0,0137	0,9926
Posição 4	1,0480	0,0119	0,9874	1,0956	0,0141	0,9946	1,0192	0,0166	0,9929
Posição 13	1,0229	0,0161	0,9862	1,0023	0,0165	0,9913	1,0296	0,0174	0,9899
Posição 12	1,0380	0,0194	0,9856	1,0315	0,0211	0,9844	1,0210	0,0222	0,9864
Velocidade Ar 5,0 m/s									
Posição 5	1,0313	0,0171	0,9939	1,0783	0,0178	0,9918	1,1048	0,0185	0,9910
Posição 4	1,0256	0,0200	0,9875	1,0624	0,0203	0,9930	1,0899	0,0211	0,9930
Posição 13	1,0795	0,0217	0,9876	1,0902	0,0245	0,9961	1,1493	0,0249	0,9908
Posição 12	1,1560	0,0286	0,9807	1,0403	0,0291	0,9852	1,1575	0,0304	0,9920
Velocidade Ar 8,0 m/s									
Posição 5	1,0487	0,0176	0,9946	1,0673	0,0187	0,9968	1,0341	0,0190	0,9963
Posição 4	1,0283	0,0211	0,9952	1,0489	0,0213	0,9923	1,0353	0,0214	0,9958
Posição 13	1,0097	0,0250	0,9937	1,0799	0,0253	0,9856	1,0665	0,0258	0,9983
Posição 12	1,0371	0,0292	0,9860	1,0910	0,0296	0,9887	1,0711	0,0305	0,9916

TABELA B.2 Valores dos parâmetros de ajuste da equação $T - T_{ar} = C_1 \exp - (K\theta)$, para produtos modelo dispostos no arranjo alternado.

Temperatura Ar (°C)	5,0			0,0			- 5,0		
	C ₁	K	R ²	C ₁	K	R ²	C ₁	K	R ²
Velocidade Ar 2,9 m/s									
Posição 5	1,0290	0,0156	0,9961	1,0319	0,0159	0,9971	1,0458	0,0161	0,9960
Posição 13	1,0296	0,0163	0,9942	1,0547	0,0168	0,9944	1,0198	0,0172	0,9932
Posição 4	1,0158	0,0165	0,9917	1,0016	0,0176	0,9949	1,0418	0,0178	0,9946
Posição 12	1,0202	0,0211	0,9903	1,0059	0,0227	0,9883	1,0043	0,0231	0,9855
Velocidade Ar 5,0 m/s									
Posição 5	1,0037	0,0168	0,9991	1,1812	0,0173	0,9895	1,0358	0,0179	0,9972
Posição 13	1,0417	0,0184	0,9928	1,1815	0,0195	0,9950	1,0222	0,0202	0,9972
Posição 4	1,0203	0,0202	0,9958	1,1965	0,0208	0,9903	1,0039	0,0208	0,9965
Posição 12	1,1181	0,0256	0,9917	1,2153	0,0262	0,9879	1,0121	0,0263	0,9969
Velocidade Ar 8,0 m/s									
Posição 5	1,0322	0,0199	0,9894	1,0788	0,0212	0,9945	1,0231	0,0216	0,9962
Posição 13	1,0021	0,0215	0,9854	1,0492	0,0221	0,9932	1,0137	0,0226	0,9952
Posição 4	1,0245	0,0247	0,9808	1,0724	0,0252	0,9927	1,0059	0,0255	0,9953
Posição 12	1,0062	0,0282	0,9901	1,0665	0,0289	0,9927	1,0088	0,0305	0,9949

TABELA B.3 Valores dos parâmetros de ajuste da equação $T - T_{ar} = C_1 \exp - (K\theta)$, para produtos modelo dispostos no arranjo aleatório.

Temperatura Ar (°C)	5,0			0,0			- 5,0		
	C ₁	K	R ²	C ₁	K	R ²	C ₁	K	R ²
Velocidade Ar 2,9 m/s									
Posição 5	1,0095	0,0150	0,9917	1,0455	0,0155	0,9949	1,0197	0,0163	0,9964
Posição 4	1,0023	0,0143	0,9917	1,0590	0,0157	0,9953	1,0359	0,0161	0,9956
Posição 13	1,0059	0,0156	0,9914	1,0430	0,0162	0,9943	1,0450	0,0165	0,9960
Posição 12	1,0380	0,0189	0,9863	1,0205	0,0224	0,9913	1,0301	0,0229	0,9952
Velocidade Ar 5,0 m/s									
Posição 5	1,0457	0,0176	0,9921	1,0097	0,0186	0,9905	1,0013	0,0186	0,9955
Posição 4	1,0127	0,0195	0,9921	1,0609	0,0199	0,9938	1,0566	0,0201	0,9977
Posição 13	1,0094	0,0202	0,9874	0,9726	0,0211	0,9890	1,0104	0,0216	0,9953
Posição 12	1,0029	0,0237	0,9903	1,0558	0,0237	0,9978	1,0064	0,0245	0,9950
Velocidade Ar 8,0 m/s									
Posição 5	1,0587	0,0216	0,9914	1,0389	0,0219	0,9945	1,0115	0,0239	0,9969
Posição 4	1,0519	0,0227	0,9869	1,0279	0,0229	0,9945	1,0121	0,0235	0,9978
Posição 13	1,0339	0,0227	0,9898	1,0580	0,0235	0,9918	1,0271	0,0242	0,9848
Posição 12	1,0126	0,0253	0,9877	1,0307	0,0261	0,9917	1,0270	0,0279	0,9841

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANÔNIMO. Agricultura perde por ano 23,8 milhões de toneladas. Caderno Especial Fome. **Folha de São Paulo**. Publicado em 19 de dezembro de 1993.

ALVAREZ, G.; TRYSTAM, G. Design of a new strategy for the control of the refrigeration process: fruit and vegetables conditioned in a pallet. **Food Control**, v. 6, n° 6, p. 347-355, 1995.

ARIFIN, B.B.; CHAU, K.V. Forced air cooling of strawberries. Artigo escrito para apresentação no Summer Meeting of American Society of Agricultural Engineers (ASAE), USA. Paper n° 87-6004, 1987.

ARPACI, V.S.; Conduction heat transfer. Addison-Wesley Publ.Co., Reading, Massachussets, 1966.

ASHRAE. Methods of precooling fruits, vegetables and cut flowers. **In: Refrigeration Systems and Applications Handbook**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, Georgia, USA, cap. 10, p. 10.1 – 10.10, 1994.

ASHRAE; Thermal Properties of Foods. **In: Refrigeration Systems and Applications Handbook**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, USA, cap. 30, p. 30.1-30.26, 1993.

- BAIRD, C.D.; CHAU, K.V.; GAFFNEY, J.J. An engineering/economic Model for evaluating forced-air cooling systems for fruits and vegetables. **Refrigeration Science and Tecnology**. International Institute of Refrigeration, p. 259 – 266, USA, 1985.
- BAIRD, C.D.; GAFFNEY, J.J. A numerical procedure for calculating heat transfer in bulk loads of fruits or vegetables. **ASHRAE Transactions**, vol. 82, nº 2, p. 525-540, USA, 1976.
- 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**, vol. 94, p. 1434 – 1453, USA, 1988.
- BENNETT, A. H. Principles and equipment for precooling fruits and vegetables. **ASHRAE Symposium Bulletin SF-4.70**, U.S.Department of Agriculture, USA, 1971.
- BENNETT, A.H.; SOULE, J.; YOST, G.G. Forced air precooling of citrus to forced-air precooling. **ASHRAE Journal**, vol. 8, nº 4, p. 48, 1966.
- BERTÃO, M.V. Uma terra ideal para a fruticultura. **Gazeta Mercantil**. Edição de 6 a 12 de outubro de 1997, p. 9.
- CHAU, K.V.; GAFFNEY, J.J.; BAIRD, C.D.; CHURCH, G.A. Resistance to air flow of oranges in bulk and in cartons. **Transactions of ASAE**, vol. 28, nº 6, p. 2083-2088, 1985.

DYNER, H.; HESSELSCHWERDT, A.L., Temperature-time characteristics during food precooling. **ASHRAE Transactions**, vol.70, p. 249-254, 1964.

COLLINS, E. A., DANIELS, C.A., WITENHATER, D.E.; Physical constants of Polyvinyl Chloride. In: **Polymer Handbook. Wiley-Interscience Publication**. John Wiley & Sons, New York, cap. V, p. V.61 - V.75, 1989.

FRASER, H.W. Forced air rapid cooling of fresh Ontario fruits and vegetables. **AGDEX 202-736**. Ontario Ministry of Agriculture and Food, Toronto, Canada, 1991.

FRASER, H. W.; OTTEN, L. Predicting of 7/8 cooling times for peaches by comparing heat transfer modelling and field measurement methods. **ASAE Paper n° 92-6016**. 14 p., 1992.

GAFFNEY, J.J. Engineering principles related to the design of systems for air cooling of fruits and vegetables in shipping containers. **29° International Conference on Handling Perishable Agricultural Commodities**, Michigan State University, USA, 1977.

GAFFNEY, J.J.; BAIRD, C.D. Factors affecting the costs of forced air cooling of fruits and vegetables. **ASHRAE Journal**, p. 40 – 49, 1991.

GAFFNEY, J.J.; BOWMAN, E.K. An engineering/economic evaluation of different concepts for precooling citrus fruits. **ASHRAE Symposium Bulletin, SF-4.70**, U.S.Department of Agriculture, 1971.

GOYETTE, B.; VIGNEAULT, C.; PANNETON, B.; RAGHAVAN, G.S.V.
Method to evaluate temperature at the surface of horticultural crop.
Canadian Agriculture Engineering, vol. 38, nº 4, p. 291-295, 1997.

GRIERSON, W.; BENNETT, A.H.; BOWMAN, E.K. Forced-Air precooling of
citrus fruits on a moving conveyor. **United States Department of
Agriculture. ARS 52.40**, USA, 1970.

GRIERSON, W.; BROWN, B. Vertical air distribution for cooling fruit in
Cartons. **Florida Horticultural Society**, vol.88, p. 229-332, 1975.

GUILLOU, R. Some engineering aspects of cooling fruits and vegetables.
Transaction of the ASAE. vol. 1, nº 1, p. 38-42, 1958.

GUILLOU, R. Collars for fruits and vegetables. **California Agricultural
Experiment Station Bulletin 73**. University of California, Berkeley, USA,
1960.

HALL, E.G. Cooling of apples and pears in cartons. **CSIRO Food Research
Quartely**, vol. 22, nº 4, p. 89-91, 1962.

HALL, E.G. Precooling and container shipping of citrus fruits. **CSIRO Food
Research Quartely**, vol. 32, nº 1, p. 1 – 10, 1972.

HASS, E.; FELSENSTEIN, G.; SHITZER, A.; MANOR, G. Factors affecting
resistance to air flow through packed fresh fruit. **ASHRAE
Transactions**, vol. 82, part 2, p. 548-554, 1976.

HOLMAN, J.P. **Heat Transfer**. Mc Graw-Hill Book Company. Toronto. Ontario.
675 p., 1986.

INCROPERA, F.P.; de WITT, D.P. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 3^a ed LTC Editora AS, Rio de Janeiro, 455 p, 1992.

IBRAF - Instituto Brasileiro de Frutas - **Boletim Informativo**, ano 3, edição nº 13, jun/jul/ago de 1996.

KERN, D.Q. **Processos de Transmissão de Calor**. Editora Guanabara.
Rio de Janeiro, 671 p., 1987.

KOPELMAN, I.; BLAISDELL, J.L.; PFLUG, I.J. Influence of fruit size and coolant velocity on the cooling of Jonathan apples in wather and air. **ASHRAE Transactions**, vol. 72, part I, p. 209 – 216, 1966.

LIN, S.H. A Mathematical model for freezing of calcium alginate gel balls. **Journal of Food Engineering** vol. 21, nº 3, p. 305-313, 1994.

MAUL, F.; VIGNEAULT, C.; SARGENT, S.A.; CHAU, K.V. ; CARON, J.; Nondestructive Sensor System For Evaluation Of Cooling Efficiency. Proceeding From The Sensors For Nondestructive Testing. **International Conference**, USA, February 18-21. p.351-360, 1997.

MYERS, G.E.; **Analytical Method in Conduction Heat Transfer**. Mc Graw Hill Book Company, 1971.

- Mc DONALD; ROY, E.; THOMAS, H.C. Effectiveness of three types of ventilation opening in full-telescope corrugated citrus cartons. United States Department of Agriculture. **ARS-S-25.**, USA, p.1-6, 1973.
- MITCHELL, F.G.; GUILLOU, R.; PARSONS, R.A. Commercial cooling of fruits and vegetables. **Manual 43. Division of Agricultural Sciences, University of California**, Berkeley, USA, 1972.
- MOHSENIN, N.N. **Thermal properties of foods and agricultural materials.** Gordon and Breach. New York, U.S.A., 405 p., 1980.
- NETER, J. WASSERMAN, W.; KUTNER, M.H. **Applied Linear Statistical Models.** 3^a ed., IRWIN Co., Boston, U.S.A., 1181 p., 1990.
- NEVES, F^o, L.C. Resfriamento e congelamento de alimentos. **Apostila de Refrigeração na Indústria de Alimentos, FEA/UNICAMP**, Campinas, S.P., p. 334 – 371, 1991.
- NEVES, F^o, L.C.; VIGNEAULT, C.; CORTEZ, L. A cadeia do frio no Brasil e sua importância para frutas e hortaliças. Artigo referente ao curso “Resfriamento de frutas e Hortaliças”, UNICAMP/FEAGRI/FEA, 20 a 23 de janeiro de 1997.
- NEVES, F^o, L.C.; VISSOTTO, F.Z.; GUTIERRES, C.R. Resfriamento rápido de frutas e hortaliças. **Suplemento Técnico, Revista ABRAVA**, nº 133, 1993.

NOOMHORM, A.; TING, C.C. On farm mobile precooling system for tropical fruits and vegetables. **Artigo escrito para apresentação no International Winter Meeting – American Society of Agricultural Engineers (ASAE)**, Chicago, Illinois, USA, December, 1990.

NOVY, M.G.; Avaliação do Tempo de Pré-Resfriamento por Ar Forçado de Frutas Esféricas Colocadas em Leito. Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola, 1985, 128 p. Tese Mestrado Universidade Estadual de Campinas.

OHLING, R.S. Rapid Air Precooling of fruits and vegetables. **ASHRAE Journal**, p. 60 – 65, 1990.

PERRY, J.S.; BENNETT, A.H.; MINH, T.V. Experiments with a prototype commercial forced-air precooler on peaches, potatoes, apples and strawberries. **University of Georgia**, USA, 1968.

PFLUG, I.J.; BLAISDELL, J.L. Methods of analysis of precooling data. **ASHRAE Journal**, nov. 1963.

PFLUG, I.J. BLAISDELL, J.L.; KOPELMAN, I.J. Developing temperature-time curves for objects that can be approximated by a sphere, infinite plate or infinite cylinder. **ASHRAE Transactions**, vol. 71, part I, p. 238-248, 1965.

SILVEIRA, A.C. Rigesa vai embalar fruta no campo. **Gazeta Mercantil**. Edição de 3 a 5 de outubro de 1997, p. c-7.

SMITH, R.E.; BENNETT, A.H.; VACINEK, A.A. Convection film coefficients related to geometry for anomalous shapes. **Transactions of the ASAE**, paper nº 69-373, 1970.

SMITH, R.E.; BENNETT, A.H. Mass average temperature of fruits and vegetables during transient cooling. **Transaction of the ASAE**. vol.8, nº 2, p. 249, 1972.

SOULE, J.; YOST G.E.; BENNETT, A.H. Certain heat characteristics of oranges, grapefruits and tangelos during forced-air precooling. **Transactions of the ASAE**, vol. 9, nº 3, p. 355, 1966.

SOULE, J.; YOST, G.E.; BENNETT, A.H. Experimental forced-air precooling of Florida citrus fruit. **United States Department of Agriculture**, USA, nº 845, 1969.

SPAGNOL, A.W., SIGRIST, J.M. **Tecnologia Pós – Colheita de Frutas Tropicais**. Manual Técnico nº 9 – Instituto de Tecnologia de Alimentos, Campinas, 199 p., 1988.

VIGNEAULT, C.; GOYETTE, B. Fruit and vegetable precooling. **Training Seminar of the NB Fruit Growers Association Inc.** Fredericton, Canada, february, 1994.

VIGNEAULT, C.; GOYETTE, B.; RAGHAVAN, G.S.V. Continuous flow liquid-ice system tested on broccoli. **Canadian Agricultural Engineering**, vol. 37, nº 3, 1995.

ZALDÍVAR, C.P.; GARCIA, E.P.; ROQUEÑI, G.; MARTÍNEZ, A.; SILVA, E.; ROMERO, G.G.; ALVAREZ, D.M.; BARQUET, G.S.; ANIMAS, D.C. Cosecha y acondicionamiento de frutas y hortalizas. Sistema National para el abasto. Secretaria de Educacion Publica. Comission National de Fruticultura. Secretaria de Comércio Y Fomento Industrial, Mexico, 147 p. , 1984.