

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

DOUGLAS FERNANDES BARBIN

AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE CONGELAMENTO EM
TÚNEL “PORTÁTIL” COM CONVECÇÃO FORÇADA
POR EXAUSTÃO E INSUFLAÇÃO EM PALETES

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia de Alimentos da Universidade
Estadual de Campinas para obtenção de título
de Mestre em Engenharia de Alimentos

Orientador: Prof. Dr. Vivaldo Silveira Junior

Campinas

2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA FEA – UNICAMP

B234a Barbin, Douglas Fernandes
Avaliação do processo de congelamento em túnel “portátil”
com convecção forçada por exaustão e insuflação em paletes /
Douglas Fernandes Barbin. – Campinas, SP: [s.n.], 2007.

Orientador: Vivaldo Silveira Júnior
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos.

1. Congelamento de alimentos. 2. Convecção forçada. 3.
Refrigeração. 4. Câmaras frigoríficas. I. Silveira Junior,
Vivaldo. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia de Alimentos. III. Título.

Titulo em ingles: Freezing process evaluation using a portable forced air tunnel with air
evacuation and air blowing in pallets

Palavras-chave em inglês (Keywords): Frozen foods, Forced convection, Refrigeration,
Cold storage

Titulação: Mestre em Engenharia de Alimentos

Banca examinadora: Eduardo Augusto Caldas Batista

Jaime Vilela de Resende

Rodrigo Aparecido Jordan

Vivaldo Silveira Júnior

Data de defesa: 24-08-2007

Programa de Pós-Graduação: Programa em Engenharia de Alimentos

DOUGLAS FERNANDES BARBIN

AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE CONGELAMENTO EM TÚNEL "PORTÁTIL" POR
EXAUSTÃO E INSUFLAÇÃO EM PALETES

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia de Alimentos da Universidade
Estadual de Campinas para obtenção de título de
Mestre em Engenharia de Alimentos.

Aprovado em

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Eduardo Augusto Caldas Batista
DEA/FEA - Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. Jaime Vilela de Resende
Universidade Federal de Lavras

Dr. Rodrigo Aparecido Jordan
Thompson Tecnologia LTDA.

Prof. Dr. Vivaldo Silveira Júnior
Orientador - DEA/FEA - Universidade Estadual de Campinas

A meus pais, *Arcilo e Helena*,
e ao meu irmão *Bruno*,
dedico.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Arcilo e Helena, por me ensinarem os valores da honestidade e humildade.

Ao professor Vivaldo pela orientação, pelo ensinamento e pelo apoio.

A Emy, por toda a ajuda técnica e pela atenção e carinho nos mais difíceis momentos.

Aos professores Eduardo A. Caldas Batista, Rodrigo Aparecido Jordan e Jaime Vilela de Resende, componentes da banca, pelas importantes correções e sugestões.

Aos professores Lincoln, pelas sugestões e por disponibilizar a câmara, e Cortez, pelas sugestões.

Aos professores da FEA pela formação, e do Departamento de Engenharia de Alimentos, pela oportunidade.

A todos os funcionários da secretaria de pós-graduação da FEA, da biblioteca e da secretaria do DEA, pela disponibilidade e ajuda.

Ao Hilário De Marchi, e à empresa DeMarchi Supergelados, por disponibilizar as máquinas de envase, caso contrário eu ainda estaria enchendo as embalagens com as soluções.

Ao Geraldo (Bozo), Daniel (Pitico) e Myron (Gordão), pelo auxílio técnico e pela amizade.

A toda minha família, em especial meus avós Lídia e Antônio.

Aos técnicos Carlão, pela ajuda, e Izaías por toda a ajuda e companheirismo.

A todos os amigos do laboratório de automação e controle, principalmente Lena, Klícia, pela ajuda e por compartilharem as alegrias e frustrações.

Aos colegas da graduação e a todos os companheiros que conheci em Campinas: Aninha, Alê, Abraão, Lizi, Márcia, Sandro, Dri, Luiz, Luisão, pela convivência.

Aos amigos da Merial, em especial Luiz, Fernanda e César.

Ao pessoal da república, pelas risadas, e ao Kuro, pela companhia.

Aos amigos de Pedreira, pela acolhida calorosa a cada retorno.

À CAPES pelo apoio financeiro.

A Deus.

"Trabalhar muitíssimo e viver a vida, fazer um passeio na montanha ou olhar uma bela mulher, ler um livro, ouvir um concerto; que tudo isso alimente meu espírito para que sua voz se torne mais forte. E, principalmente, queira Deus que não me falte a Santa Inquietude! Graças a ela os homens avançaram".

Joan Miró i Ferrá

RESUMO

A redução do tempo de congelamento de produtos alimentícios é um objetivo almejado, devido este processo ser caro e que envolve elevado gasto energético. Os produtos alimentícios são predominantemente congelados em túneis com convecção forçada por insuflação de ar; porém, é preferível realizar a exaustão de ar, ao invés de insuflação, pelo fato da exaustão promover uma circulação de ar mais uniforme ao redor do produto. Um túnel de ar forçado por exaustão é composto por um ventilador que circula de forma a retirar o ar, produzindo uma região de baixa pressão, onde se localiza o produto, buscando uniformizar a circulação do ar frio em contato com o mesmo. Desse modo, este trabalho se propôs à montagem experimental de um túnel “portátil” de congelamento por ar forçado, onde se pode estudar a utilização de insuflação e exaustão de ar. Este túnel foi construído e alocado no interior de uma câmara de armazenagem de produtos congelados, buscando melhorar a distribuição do ar, potencializando a troca térmica entre o ar e o produto a ser congelado. A montagem foi monitorada através de termopares para determinação das curvas de congelamento e eficiência do sistema. Durante o processo de congelamento, foi avaliada a transferência de calor através da montagem, comparando os processos de exaustão e insuflação e analisados os coeficientes de transferência de calor entre o ar de resfriamento e o produto em diferentes posições e camadas do palete, bem como a distribuição do ar de resfriamento em circulação ao redor do produto. Os resultados mostraram uma redução no tempo de congelamento das amostras com a utilização do túnel “portátil” em relação ao processo sem a utilização deste aparato dentro da câmara. O processo de exaustão apresentou uma redução de até quatro horas para o congelamento em relação à insuflação. Os valores de coeficiente de convecção foram maiores para a exaustão do que para a insuflação em todas as camadas da montagem, com exceção da superior, que recebia o ar diretamente do interior da câmara na insuflação. Um coeficiente de heterogeneidade foi proposto para avaliar a diferença de temperaturas no produto durante o congelamento. Estes valores, juntamente com a análise das temperaturas obtidas no processo, mostraram que a distribuição do ar, bem como a transferência de calor, ocorre de maneira mais homogênea no interior do palete na exaustão do que na insuflação.

Palavras-chave: Ar Forçado. Congelamento de Alimentos. Soluções Modelo. Convecção. Câmara.

ABSTRACT

The conditions necessary to keep the air temperature and movement at the product surface will determine the freezing process efficiency. Since the energy level could implement on the final cost, the reduction of the freezing process time was a major goal in the whole experiment. Food products are predominantly frozen in air blast freezing tunnels. Therefore, exhausting air is preferable than blowing it through, since it minimizes air short-circuiting and results in more uniform cooling. To produce an homogeneous refrigeration, the main configuration to be determined for pallets storing plastic packages in boxes are the package distribution and air orientation. The main components of an exhausting forced-air tunnel are a fan that causes the equipment inside air evacuation creating a low pressure region. The product is arranged on this spot creating uniform distribution of the cold air inside the equipment, around the product. Therefore, the objective of this work is to build an experimental portable forced-air freezing tunnel, and work on comparative studies with air exhausting and blowing. The tunnel was built and placed inside a freezing product storage chamber, and the objective was to improve the air circulation and the thermal distribution between the product and cold air, for a sample batch left inside the chamber. The batch was monitored using thermocouples for freezing variation and system efficiency graphic determination. It was also provided the heat transfer analysis, comparing the exhausting and blowing process, and the heat transfer coefficients of the cold air and the product as well as the air distribution around the product. The results have shown reduction of the freezing time of the samples when the portable tunnel was used comparing without the tunnel tests (reference). The air evacuation process reduced up to four hours with comparison to the blowing system the freezing process. Convective coefficient results were higher for air evacuation than air blowing in every part of the batch, except for the upper layer of products where the cold air of the chamber was directly in contact with the product. These results, with the temperature analysis obtained, indicated that the air distribution occurs more uniformly around the products in the exhausting process than blowing system, as well as the heat transfer.

Keywords: Forced Air. Frozen Foods. Model Solutions. Chamber. Convection

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Porcentagem de gelo em alimentos congelados em função da temperatura (Fonte: FELLOWS, 2000).....	47
Figura 2-2. Curva de congelamento e mudança de temperatura através da zona crítica (Fonte: FELLOWS, 2000).....	49
Figura 2-3. Variação da temperatura <i>versus</i> tempo de congelamento para água pura e alimento (Fonte: ZARITZKI, 2000).	53
Figura 2-4. Variação da temperatura durante o processo de congelamento de alimentos (Fonte: FELLOWS, 2000).	54
Figura 3-1. Esquema do sistema de aquisição de dados.....	67
Figura 3-2. Distribuição e identificação dos sensores utilizados na montagem industrial do palete com seis camadas de caixas.....	70
Figura 3-3. Distribuição e identificação dos sensores utilizados na nova montagem do palete (alternativa) com sete camadas de caixas.	71
Figura 3-4. Disposição das caixas sobre o palete com: (a) seis camadas de caixas e (b) sete camadas de caixas.	73
Figura 3-5. Caixa plástica comercial utilizada em processos de congelamento.....	74
Figura 3-6. Distribuição utilizada industrialmente para as embalagens de polietileno nas caixas: (a) vista superior (elevação); (b) vista de perfil.....	75
Figura 3-7. Distribuição alternativa proposta para as embalagens de polietileno nas caixas: (a) vista superior (elevação); (b) vista de perfil.....	75
Figura 3-8. Montagem do túnel portátil com o empilhamento das caixas cobertas com o plástico e posicionamento do ventilador durante a insuflação e exaustão.....	77
Figura 3-9. Esquema da câmara de congelamento: 1.Unidade condensadora, 2.Unidade Evaporadora, 3. Sensor de temperatura.	78
Figura 3-10. Esquema com a montagem para fixação do termopar no centro das embalagens.	80
Figura 3-11. Localização do corpo de prova de alumínio na caixa de produtos.	81
Figura 3-12. Localização dos sensores distribuídos para acompanhamento das temperaturas do ar de circulação: 1. evaporador da câmara; 2. sensor de temperatura do termostato da câmara (retorno do ar); 3. parte superior da montagem de caixas do palete; 4. parte inferior da montagem de caixas do palete.	82
Figura 3-13. Placas de poliestireno expandido e tapete de plástico e borracha para barreira térmica da montagem.	83
Figura 3-14. Esquema de construção do corpo de prova metálico com a direção do fluxo de ar (vertical) para ambos os ensaios de exaustão e insuflação.....	84
Figura 3-15. Posicionamento do sensor para leituras da velocidade do ar em múltiplos pontos da seção de fluxo do ar de congelamento, tanto na insuflação quanto na exaustão.....	88
Figura 4-1. Variação da temperatura inicial de congelamento obtida para vários recongelamentos, para as amostras de solução modelo com diferentes concentrações de sacarose e 0,5% de espessante (CMC).	91

Figura 4-2. Variação da temperatura inicial de congelamento obtida para vários recongelamentos, para as amostras de solução modelo com diferentes concentrações de sacarose e 1,0% de espessante (CMC).	92
Figura 4-3. Variação da temperatura inicial de congelamento obtida para vários recongelamentos, para as amostras de solução modelo com diferentes concentrações de sacarose e 1,5% de espessante (CMC).	92
Figura 4-4. Variação da temperatura inicial de congelamento para soluções contendo 15% e 30% sacarose e diferentes concentrações de espessante CMC.	93
Figura 4-5. Gráfico de eficiência do compressor Bock FK-3.	97
Figura 4-6. Distribuição da velocidade do ar normal à seção de escoamento na superfície do palete para o processo de insuflação.....	99
Figura 4-7. Distribuição da velocidade do ar normal à seção de escoamento na superfície do palete para o processo de exaustão.	99
Figura 4-8. Curva de resfriamento para os corpos de alumínio, teste de referência: polia de 11 cm, capacidade de refrigeração original, arranjo industrial.....	102
Figura 4-9. Curva linearizada do resfriamento dos corpos de alumínio, teste de referência: polia de 11 cm, capacidade de refrigeração original, arranjo industrial.....	102
Figura 4-10. Distribuição dos valores dos coeficientes de convecção para os cinco corpos de prova utilizados, comparando os arranjos das amostras nas caixas para os processos: de (a) insuflação, e (b) exaustão.	104
Figura 4-11. Valores médios do coeficiente de convecção para os ensaios de referência (branco), insuflação e exaustão.....	105
Figura 4-12. Gráficos de temperatura versus tempo de congelamento para o teste de referência (branco) com a montagem industrial: (a) camada inferior, (b) camada central, (c) camada superior e (d) pontos centrais das camadas.....	106
Figura 4-13. Comparação dos tempos de congelamento entre os arranjos industrial e alternativo proposto para os ensaios de: (a) insuflação e (b) exaustão.....	108
Figura 4-14. Comparação entre os tempos de congelamento para os ensaios de insuflação e exaustão com a distribuição alternativa proposta para as embalagens e maior capacidade do compressor (polia de 14,5 cm).....	110
Figura 4-15. Isotermas obtidas por ajuste não linear em função da localização no sistema de coordenadas no plano (xy) para o teste 01 de exaustão.....	111
Figura 4-16. Isotermas obtidas por ajuste não linear em função da localização no sistema de coordenadas no plano (xy) para o teste 01 de insuflação.	112
Figura 4-17. Teste de referência, arranjo alternativo, polia 14,5 cm: (a) curva de congelamento com os valores médios de temperatura para as camadas inferior, central e superior obtidas a partir de regressão não-linear, (b) variação dos valores de temperatura máxima e mínima em relação à temperatura média.	114
Figura B - 1. Gráficos para o resfriamento dos corpos de prova (T1 a T5) com: (a) resultados experimentais de temperatura adimensional média e (b) curvas linearizadas para determinação do parâmetro S_2 no cálculo do coeficiente de convecção para o ensaio de referência (branco) com capacidade de refrigeração original e arranjo industrial das amostras.	130

- Figura B - 2. Gráficos para o resfriamento dos corpos de prova (T1 a T5) com: (a) resultados experimentais de temperatura adimensional média e (b) curvas linearizadas para determinação do parâmetro S_2 no cálculo do coeficiente de convecção para o ensaio de referência (branco) com capacidade de refrigeração modificada e arranjo alternativo das amostras.....130
- Figura B - 3. Gráficos para o resfriamento dos corpos de prova (T1 a T5) com: (a) resultados experimentais de temperatura adimensional média e (b) curvas linearizadas para determinação do parâmetro S_2 no cálculo do coeficiente de convecção para o ensaio de insuflação com capacidade de refrigeração original e arranjo industrial das amostras.....131
- Figura B - 4. Gráficos para o resfriamento dos corpos de prova (T1 a T5) com: (a) resultados experimentais de temperatura adimensional média e (b) curvas linearizadas para determinação do parâmetro S_2 no cálculo do coeficiente de convecção para o ensaio de insuflação com capacidade de refrigeração original e arranjo alternativo das amostras.....131
- Figura B - 5. Gráficos para o resfriamento dos corpos de prova (T1 a T5) com: (a) resultados experimentais de temperatura adimensional média e (b) curvas linearizadas para determinação do parâmetro S_2 no cálculo do coeficiente de convecção para o ensaio de insuflação com capacidade de refrigeração modificada e arranjo alternativo das amostras (01).....131
- Figura B - 6. Gráficos para o resfriamento dos corpos de prova (T1 a T5) com: (a) resultados experimentais de temperatura adimensional média e (b) curvas linearizadas para determinação do parâmetro S_2 no cálculo do coeficiente de convecção para o ensaio de insuflação com capacidade de refrigeração modificada e arranjo alternativo das amostras (02).....132
- Figura B - 7. Gráficos para o resfriamento dos corpos de prova (T1 a T5) com: (a) resultados experimentais de temperatura adimensional média e (b) curvas linearizadas para determinação do parâmetro S_2 no cálculo do coeficiente de convecção para o ensaio de insuflação com capacidade de refrigeração modificada e arranjo alternativo das amostras (03).....132
- Figura B - 8. Gráficos para o resfriamento dos corpos de prova (T1 a T5) com: (a) resultados experimentais de temperatura adimensional média e (b) curvas linearizadas para determinação do parâmetro S_2 no cálculo do coeficiente de convecção para o ensaio de exaustão com capacidade de refrigeração original e arranjo industrial das amostras.....132
- Figura B - 9. Gráficos para o resfriamento dos corpos de prova (T1 a T5) com: (a) resultados experimentais de temperatura adimensional média e (b) curvas linearizadas para determinação do parâmetro S_2 no cálculo do coeficiente de convecção para o ensaio de exaustão com capacidade de refrigeração original e arranjo alternativo das amostras.....133
- Figura B - 10. Gráficos para o resfriamento dos corpos de prova (T1 a T5) com: (a) resultados experimentais de temperatura adimensional média e (b) curvas linearizadas para determinação do parâmetro S_2 no cálculo do coeficiente de convecção para o ensaio de exaustão com capacidade de refrigeração modificada e arranjo alternativo das amostras (01).....133
- Figura B - 11. Gráficos para o resfriamento dos corpos de prova (T1 a T5) com: (a) resultados experimentais de temperatura adimensional média e (b) curvas linearizadas para determinação do parâmetro S_2 no cálculo do coeficiente de convecção para o ensaio de exaustão com capacidade de refrigeração modificada e arranjo alternativo das amostras (02).....133
- Figura B - 12. Gráficos para o resfriamento dos corpos de prova (T1 a T5) com: (a) resultados experimentais de temperatura adimensional média e (b) curvas linearizadas para determinação do parâmetro S_2 no cálculo do coeficiente de convecção para o ensaio de exaustão com capacidade de refrigeração modificada e arranjo alternativo das amostras (03).....134

- Figura B - 13. Gráficos para o resfriamento dos corpos de prova (T1 a T5) com: (a) resultados experimentais de temperatura adimensional média e (b) curvas linearizadas para determinação do parâmetro S_2 no cálculo do coeficiente de convecção para o ensaio misto (insuflação-exaustão) com capacidade de refrigeração modificada e arranjo alternativo das amostras.....134
- Figura B - 14. Gráficos para o resfriamento dos corpos de prova (T1 a T5) com: (a) resultados experimentais de temperatura adimensional média e (b) curvas linearizadas para determinação do parâmetro S_2 no cálculo do coeficiente de convecção para o ensaio misto (exaustão-insuflação) com capacidade de refrigeração modificada e arranjo alternativo das amostras.....134
- Figura E - 1. Gradientes de temperatura obtidos por ajuste não-linear em função da localização das amostras monitoradas no sistema de coordenadas no plano (xy) das camadas de caixas da montagem para o processo de exaustão 01: (a) camada inferior, (b) camada central, (c) camada superior.....138
- Figura E - 2. Gradientes de temperatura obtidos por ajuste não-linear em função da localização das amostras monitoradas no sistema de coordenadas no plano (xy) das camadas de caixas da montagem para o processo de exaustão 01: (a) camada inferior, (b) camada central, (c) camada superior.....139
- Figura E - 3. Gradientes de temperatura obtidos por ajuste não-linear em função da localização das amostras monitoradas no sistema de coordenadas no plano (xy) das camadas de caixas da montagem para o processo de exaustão 01: (a) camada inferior, (b) camada central, (c) camada superior.....140
- Figura E - 4. Gradientes de temperatura obtidos por ajuste não-linear em função da localização das amostras monitoradas no sistema de coordenadas no plano (xy) das camadas de caixas da montagem para o processo de exaustão 01: (a) camada inferior, (b) camada central, (c) camada superior.....141
- Figura E - 5. Gradientes de temperatura obtidos por ajuste não-linear em função da localização das amostras monitoradas no sistema de coordenadas no plano (xy) das camadas de caixas da montagem para o processo de insuflação 01: (a) camada inferior, (b) camada central, (c) camada superior.142
- Figura E - 6. Gradientes de temperatura obtidos por ajuste não-linear em função da localização das amostras monitoradas no sistema de coordenadas no plano (xy) das camadas de caixas da montagem para o processo de insuflação 01: (a) camada inferior, (b) camada central, (c) camada superior.143
- Figura E - 7. Gradientes de temperatura obtidos por ajuste não-linear em função da localização das amostras monitoradas no sistema de coordenadas no plano (xy) das camadas de caixas da montagem para o processo de insuflação 01: (a) camada inferior, (b) camada central, (c) camada superior.144
- Figura E - 8. Gradientes de temperatura obtidos por ajuste não-linear em função da localização das amostras monitoradas no sistema de coordenadas no plano (xy) das camadas de caixas da montagem para o processo de insuflação 01: (a) camada inferior, (b) camada central, (c) camada superior.145
- Figura G - 1. Gráficos para o ensaio de referência (branco) com capacidade de refrigeração modificada e distribuição alternativa das amostras: (a) temperatura média das camadas *versus* tempo de congelamento, (b) diferenças de temperatura (ΔT).....154
- Figura G - 2. Gráficos para o ensaio de exaustão com capacidade de refrigeração modificada e distribuição alternativa das amostras (01): (a) temperatura média das camadas *versus* tempo de congelamento, (b) diferenças de temperatura (ΔT).....154

Figura G - 3. Gráficos para o ensaio de exaustão com capacidade de refrigeração modificada e distribuição alternativa das amostras (02): (a) temperatura média das camadas <i>versus</i> tempo de congelamento, (b) diferenças de temperatura (ΔT).	155
Figura G - 4. Gráficos para o ensaio de exaustão com capacidade de refrigeração modificada e distribuição alternativa das amostras (03): (a) temperatura média das camadas <i>versus</i> tempo de congelamento, (b) diferenças de temperatura (ΔT).	155
Figura G - 5. Gráficos para o ensaio de insuflação com capacidade de refrigeração modificada e distribuição alternativa das amostras (01): (a) temperatura média das camadas <i>versus</i> tempo de congelamento, (b) diferenças de temperatura (ΔT).	155
Figura G - 6. Gráficos para o ensaio de insuflação com capacidade de refrigeração modificada e distribuição alternativa das amostras (02): (a) temperatura média das camadas <i>versus</i> tempo de congelamento, (b) diferenças de temperatura (ΔT).	156
Figura G - 7. Gráficos para o ensaio de insuflação com capacidade de refrigeração modificada e distribuição alternativa das amostras (03): (a) temperatura média das camadas <i>versus</i> tempo de congelamento, (b) diferenças de temperatura (ΔT).	156
Figura G - 8. Gráficos para o ensaio misto (exaustão-insuflação) com capacidade de refrigeração modificada e distribuição alternativa das amostras: (a) temperatura média das camadas <i>versus</i> tempo de congelamento, (b) diferenças de temperatura (ΔT).	156
Figura G - 9. Gráficos para o ensaio misto (insuflação-exaustão) com capacidade de refrigeração modificada e distribuição alternativa das amostras: (a) temperatura média das camadas <i>versus</i> tempo de congelamento, (b) diferenças de temperatura (ΔT).	157
Figura A- 1. Gráfico de eficiência do compressor Bock FK-3.....	158

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1. Fração de água e ponto de congelamento de alguns alimentos (Fonte: FELLOWS, 2000).....	46
Tabela 2-2. Taxas de congelamento para alguns tipos de processamentos (Fonte: JOHNSTON et al., 1994).....	55
Tabela 3-1. Características da câmara de congelamento.....	79
Tabela 3-2. Parâmetros geométricos para a placa de alumínio	85
Tabela 3-3. Propriedades Termofísicas do Alumínio (WELTY et al., 1984)	86
Tabela 4-1. Propriedades térmicas do alumínio e do poliuretano (isolante) (Fonte: NEVES FILHO, 1991).	95
Tabela 4-2. Dados de operação do sistema de refrigeração da câmara fria, para o compressor operando com frequência de 1137 rpm.	96
Tabela 4-3. Valores para velocidade média e vazão do ar de escoamento no palete para os ensaios de exaustão e insuflação.....	100
Tabela 4-4. Valores do coeficiente de convecção calculados para os dois tipos de distribuição das amostras nas caixas.....	103
Tabela 4-5. Valores dos coeficientes de heterogeneidade (φ) para caracterização da distribuição da temperatura para as amostras nas camadas e para as camadas no palete.	114
Tabela C - 1. Valores de coeficiente angular, coeficiente linear (A) e R^2 para a equação $y = A \cdot e^{S_s \cdot x}$, onde y = Temperatura adimensional média e x é o tempo (h); para o processo de insuflação, comparando os dois tipos de arranjos das embalagens nas caixas	135
Tabela C - 2. Valores de coeficiente angular, coeficiente linear (A) e R^2 para a equação $y = A \cdot e^{S_s \cdot x}$, onde y = Temperatura adimensional média e x é o tempo (h); para o processo de exaustão, comparando os dois tipos de arranjos das embalagens nas caixas.	135
Tabela C - 3. Valores do coeficiente de convecção efetivos obtidos para os testes de exaustão e insuflação com dois arranjos das amostras nas caixas diferentes: disposição industrial e alternativa sugerida, com maior espaçamento para circulação de ar entre as embalagens.	135
Tabela D - 1. Valores de coeficiente angular, coeficiente linear (A) e R^2 para a equação $y = A \cdot e^{S_s \cdot x}$, onde y = Temperatura adimensional média, e x é o tempo (h); para os processos de exaustão e insuflação do ar.....	136
Tabela D - 2. Média e desvio padrão dos valores de coeficiente angular (S_2) $y = A \cdot e^{S_s \cdot x}$, onde y = Temperatura adimensional média, e x é o tempo (h); para os processos de exaustão e insuflação do ar.....	137
Tabela D - 3. Valores de h_{ef} para os processos de exaustão e insuflação no túnel portátil, e do teste branco de referência, sem o túnel.....	137

NOMENCLATURA

A	Área de transferência de calor	m^2
Bi	Número de Biot = hL/k	(adimensional)
c_p	Calor específico	$J/kg^\circ C$
c_{pm}	Calor específico corpo metálico	$J/kg^\circ C$
c_{pAl}	Calor específico do alumínio	$J/kg^\circ C$
D	Diâmetro do cilindro	m
e	Curso de deslocamento do pistão do compressor	m
h	Coefficiente de transferência de calor superficial convectivo	$W/m^2^\circ C$
h_c	Coefficiente de transferência de calor convectivo	$W/m^2^\circ C$
h_e	Coefficiente convectivo do ar na parte externa da câmara	$W/m^2^\circ C$
h_{ef}	Coefficiente de transferência de calor efetivo	$W/m^2^\circ C$
h_i	Coefficiente convectivo do ar no interior da câmara	$W/m^2^\circ C$
i	Número de cilindros	(adimensional)
k	Condutividade térmica	W/mK
k_{Al}	Condutividade térmica do alumínio	W/mK
k_{is}	Condutividade térmica do isolante da parede da câmara	$kJ/m^\circ C$
L	Dimensão característica paralela ao fluxo de ar	m
m	massa	kg
m_a	Massa de água congelada	kg
n	Frequência de rotações do pistão	rpm
m_r	Massa de refrigerante deslocada	kg
m_i	Massa infinitesimal de produto	kg
m_t	Massa total da amostra	kg
P_e	Pressão de evaporação do refrigerante no sistema	MPa
P_c	Pressão de condensação do refrigerante no sistema	MPa
Q	Calor total removido	J
\bar{S}	Área da superfície perpendicular ao escoamento do ar	m^2
S_2	Inclinação da linha da regressão linear	$^\circ C/h$
T_b	Temperatura do produto	$^\circ C$
T_∞	Temperatura do meio de resfriamento	$^\circ C$

T_i	Temperatura inicial do produto	$^{\circ}\text{C}$
T_f	Temperatura final do produto	$^{\circ}\text{C}$
\bar{T}	Temperatura média em uma região da montagem	$^{\circ}\text{C}$
T_c	Temperatura de condensação do refrigerante no sistema	$^{\circ}\text{C}$
T_e	Temperatura de evaporação do refrigerante no sistema	$^{\circ}\text{C}$
T_i	Temperatura numa porção infinitesimal da montagem	$^{\circ}\text{C}$
U	Coefficiente global de transferência de calor	$\text{W}/\text{m}^{20}\text{C}$
V	Volume do corpo	m^3
V_p	Volume do cilindro do pistão	m^3
V_t	Volume teórico de refrigerante deslocado pelo pistão	m^3
V_D	Volume de refrigerante deslocado	m^3
\dot{V}	Vazão de ar	m^3/s
\bar{v}	Velocidade media do ar de escoamento	m/s
t	Tempo	s
x_{Al}	Espessura da placa de alumínio da parede da câmara	m
x_i	Espessura do isolante das paredes	m
x, y	Variáveis matemáticas	

Símbolos gregos

ΔT	Diferença de temperatura do produto	K
$\Delta \hat{H}_s$	Calor latente de solidificação	kJ/kg
$\Delta \hat{H}$	Varição de entalpia específica do refrigerante	kJ/kg
ϕ	Coefficiente de determinação de heterogeneidade da distribuição da temperatura	(adimensional)
ρ_m	Densidade corpo metálico	kg/m^3
ρ_{Al}	Densidade do alumínio	kg/m^3
v	Volume específico do refrigerante	m^3/kg

Subscritos

∞	meio de resfriamento	
----------	----------------------	--

Al	alumínio
b	produto
cd	condensação
c	camada/convecção
D	deslocado
e	evaporação
ext	externo
ef	efetivo
in	inicial
i	amostra/local
int	interno
is	isolante
m	médio
max	máximo
min	mínimo
p	palete
P	pistão
r	refrigerante
ref	referência
t	total
x,y,z	eixos no espaço em coordenadas cartesianas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	37
1.1	OBJETIVOS.....	39
1.1.1	<i>Objetivos Gerais</i>	39
1.1.2	<i>Objetivos específicos</i>	39
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	40
2.1	RESFRIAMENTO E CONGELAMENTO DE ALIMENTOS	40
2.2	TEMPO DE RESFRIAMENTO PARA ALIMENTOS.....	41
2.3	COEFICIENTE CONVECTIVO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR (H_c)	42
2.3.1	<i>Medidas de temperatura em regime permanente</i>	43
2.3.2	<i>Medidas de temperatura em regime transiente</i>	43
2.4	PONTO INICIAL DE CONGELAMENTO (T_{ic})	45
2.5	FORMAÇÃO DOS CRISTAIS DE GELO.....	47
2.6	FATORES QUE AFETAM O TEMPO DE RESFRIAMENTO.....	49
2.7	SISTEMAS DE CONGELAMENTO.....	50
2.8	PROPRIEDADES TÉRMICAS DE ALIMENTOS	51
2.9	CONGELAMENTO	52
2.10	VELOCIDADE DE CONGELAMENTO	54
2.11	CONVECÇÃO DE AR.....	56
2.12	INSTRUMENTOS E MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADE E VAZÃO DO AR DE ESCOAMENTO.....	58
2.13	AVALIAÇÃO DA HETEROGENEIDADE DA DISTRIBUIÇÃO DO AR ATRAVÉS DO PRODUTO ..	60
2.14	ACONDICIONAMENTO E EMBALAGEM	61
2.15	CARGA TÉRMICA E VELOCIDADE DE RESFRIAMENTO	63
2.16	SOLUÇÕES MODELO	64
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	66
3.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	66
3.2	SISTEMA DE MONITORAÇÃO DAS TEMPERATURAS E AQUISIÇÃO DE DADOS	66
3.3	AFERIÇÃO E CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES.....	68
3.4	ESTUDO PARA AVALIAÇÃO DA REPETIBILIDADE DO PROCESSO DE CONGELAMENTO (ESTABILIDADE TÉRMICA).....	71
3.5	ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA DE CONGELAMENTO E MONTAGEM EXPERIMENTAL.....	72
3.6	DISTRIBUIÇÃO DAS CAIXAS E PRODUTOS	74
3.7	DISTRIBUIÇÃO DOS SENSORES NA CARGA	80
3.8	ESTABILIZAÇÃO DA TEMPERATURA INICIAL.....	82
3.9	MONTAGEM DO CORPO DE PROVA METÁLICO PARA A DETERMINAÇÃO DOS VALORES DE H_c E CÁLCULO DOS COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO.....	84
3.10	DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE CONGELAMENTO	86
3.11	DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DO AR DE ESCOAMENTO.....	87
3.12	DETERMINAÇÃO DA HETEROGENEIDADE DO RESFRIAMENTO.....	88
3.13	FATOR DE HETEROGENEIDADE.....	90
4	RESULTADOS.....	91
4.1	ESTABILIDADE TÉRMICA DO PRODUTO EM PROCESSOS DE RE-CONGELAMENTO	91

4.1.1	<i>Avaliação da estabilidade térmica pela temperatura de início de congelamento</i>	91
4.2	AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO E PROCESSO DE CONGELAMENTO	93
4.3	AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DA VELOCIDADE DO AR	98
4.4	AVALIAÇÃO DOS COEFICIENTES DE CONVECÇÃO EFETIVOS	101
4.4.1	<i>Comparação entre os dois arranjos de amostras nas caixas</i>	103
4.4.2	<i>Comparação entre os processos de exaustão e insuflação</i>	104
4.5	ANÁLISE DOS ESTUDOS DE EXAUSTÃO, INSUFLAÇÃO E MISTO NO PALETE	106
4.5.1	<i>Comparação entre os dois arranjos de amostras nas caixas</i>	107
4.5.2	<i>Teste de Referência (branco)</i>	109
4.5.3	<i>Localização do centro térmico</i>	109
4.5.4	<i>Comparação e avaliação da heterogeneidade da distribuição da temperatura entre os processos de exaustão, insuflação, branco e misto.</i>	113
4.5.5	<i>Testes Mistos</i>	115
5	CONCLUSÃO	117
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	120
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
	APÊNDICE A	128
	APÊNDICE B	130
	APÊNDICE C	135
	APÊNDICE D	136
	APÊNDICE E	138
	APÊNDICE F	146
	ANEXO A	158

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A refrigeração é uma das aplicações mais significativas para preservação de alimentos. Os processos de resfriamento e congelamento dos alimentos reduzem efetivamente reações químicas e biológicas desencadeadas pela atividade de microrganismos e enzimas, além do fato da cristalização da água livre nos alimentos inibir o crescimento microbiológico, retardando assim o processo de deterioração do alimento (ASHRAE, 2002, DELGADO & SUN, 2001, HELDMAN, 1992).

A produção e o consumo de alimentos congelados têm aumentado rapidamente, causando um interesse cada vez maior na determinação de propriedades térmicas de alimentos, simulação de processos de congelamento e no desenvolvimento de novos sistemas e equipamentos destinados à refrigeração e congelamento dos alimentos (SCOTT et al., 1992; SALVADORI et al., 1998).

Numerosos métodos para a predição dos tempos de resfriamento e congelamento de alimentos e bebidas têm sido propostos, incluindo alguns baseados em análises numéricas, analíticas e empíricas. Os projetistas devem escolher um método de estimativa apropriado dentre os muitos disponíveis.

Um outro fator determinante relacionado aos sistemas de resfriamento é o custo envolvido no processo. Estes custos podem ser reduzidos consideravelmente com a utilização de equipamentos mais baratos e de simples operação.

Para que as operações de resfriamento e congelamento realizadas sejam economicamente viáveis, os equipamentos de refrigeração devem atender às requisições específicas das aplicações do resfriamento ou congelamento. Os projetos de tais equipamentos de refrigeração requerem estimativa dos tempos de resfriamento e congelamento de alimentos e bebidas, bem como das respectivas cargas térmicas e uma predição de todas as etapas relacionadas à cadeia logística da distribuição do produto até o consumidor final, conhecida como cadeia do frio.

O termo cadeia do frio remete aos sistemas que visam garantir a qualidade dos produtos refrigerados ou congelados nos níveis aceitáveis para comercialização, desde a produção até o

consumo. Entre os componentes da cadeia do frio, estão as câmaras frigoríficas, sistemas de resfriamento rápido e armazenamento e transporte refrigerados.

Mesmo que um produto seja rapidamente resfriado ou congelado para evitar processos de deterioração do mesmo, este padrão deve ser mantido até o seu consumo final, sob pena de diminuição da qualidade do produto ou alterações indesejáveis, devido à quebra da cadeia do frio.

No sistema de resfriamento por ar forçado, é utilizado ar a baixa temperatura como meio de resfriamento, baseado no princípio de convecção. O ar é forçado através do produto, geralmente embalado em caixas, de forma a reduzir o tempo de congelamento (THOMPSON, 2004). Este processo pode ser aplicado em equipamentos de funcionamento contínuo ou em batelada. Entre os processos realizados em batelada estão os de congelamento de polpas de frutas embaladas em sacos plásticos de polietileno.

Os sistemas de refrigeração e congelamento são normalmente dimensionados para operação com uma carga máxima, ou seja, operando nas condições mais críticas da ambiente e que é superior à carga utilizada durante a maioria do tempo de operação (TALBOT & FLETCHER, 1996).

O produto deve permanecer no túnel o tempo necessário para que a temperatura no seu centro térmico seja reduzida até o patamar desejado, sendo então transferido para uma câmara de estocagem para manutenção desta condição até o momento da comercialização (FRASER, 1998; SANTOS, 2005). Porém, isto requer um alto investimento inicial, já que é necessária a utilização de dois ambientes ou equipamentos diferentes. Ainda, na prática, é comum a utilização somente da câmara de armazenamento para o resfriamento inicial, exigindo um funcionamento além das capacidades do equipamento, reduzindo a vida útil do produto por não ser rapidamente resfriado.

Os equipamentos por ar forçado podem solucionar muitas dificuldades no processo de resfriamento, por promover a circulação do ar entre os produtos embalados (TALBOT & CHAU, 1998).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos Gerais

Projeto, concepção e avaliação da viabilidade da utilização de um equipamento portátil do tipo "túnel de exaustão" (túnel californiano) como alternativa para o congelamento de produtos em câmaras de armazenamento, para promover o congelamento rápido de produto embalado e acondicionado em caixas comerciais dispostas em palete dentro de câmara de estocagem, de maneira que não se faça necessário um investimento complementar em equipamentos como um túnel de congelamento.

1.1.2 Objetivos específicos

Determinar a influência de repetidos processos de congelamento na temperatura inicial de congelamento de soluções modelo sacarose-CMC utilizadas em estudos de congelamento de alimentos.

Determinar o perfil de velocidade do ar no escoamento e utilizar uma metodologia sugerida para o cálculo da vazão, fornecendo subsídios para a comparação entre os processos de exaustão e insuflação.

Caracterizar a distribuição do ar no interior da montagem através da determinação dos coeficientes de transferência de calor e comparar as variações levando em consideração a localização entre as camadas de caixas no palete.

Propor um método de avaliação quantitativa da variação da temperatura entre diferentes posições do produto no palete.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RESFRIAMENTO E CONGELAMENTO DE ALIMENTOS

Com o rápido aumento na produção e consumo de alimentos congelados, existe um interesse crescente na determinação de propriedades térmicas destes e no estudo de processos de congelamento para o desenvolvimento de novos sistemas e equipamentos destinados à refrigeração e congelamento dos alimentos (SCOTT et al., 1992; SALVADORI et al., 1998).

O congelamento é uma operação unitária que visa a extensão da vida de prateleira de um alimento perecível. Os processos de resfriamento e congelamento estão relacionados à troca de calor entre o produto a ser resfriado e o meio de resfriamento (WELTI-CHANES et al., 2005).

Para que sistemas de congelamento de alimentos sejam eficientes e financeiramente viáveis, é necessário um estudo, a partir das informações de fabricantes e usuários, de forma a projetar o equipamento de refrigeração a ser utilizado de acordo com a aplicação. Alguns pesquisadores apresentaram modelos que podem ser utilizados para avaliar o custo de congelamento de alimentos por diferentes métodos (BECKER & FRICKE, 1999a; CHOUROT et al., 2003).

Entre os produtos alimentícios congelados estão as frutas e polpas de frutas, normalmente utilizadas como matéria-prima da indústria de processamento de sorvetes, iogurtes, geléias e outros. Tais produtos podem ser congelados em batelada ou em processamento contínuo (SALVADORI & MASCHERONI, 1996).

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

2.2 TEMPO DE RESFRIAMENTO PARA ALIMENTOS

Os processos de resfriamento e congelamento de alimentos são complexos. O congelamento de alimentos depende basicamente da quantidade de água que está presente no alimento e que vai congelar durante o processo (HELDMAN, 1992).

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

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

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

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

Quando o número de Biot é próximo de zero ($Bi \rightarrow 0$), a resistência interna é muito menor que a resistência externa, sendo, portanto a resistência à transferência de calor por condução menor que por convecção (HELDMAN, 1992). Neste caso a distribuição da temperatura no material é uniforme e um balanço global de energia fornece resultados satisfatórios quando aplicados em procedimentos experimentais.

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

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

2.3 COEFICIENTE CONVECTIVO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR (H_c)

A transferência de calor por convecção relaciona a quantidade de energia transferida entre uma superfície e um fluido, quando estes se encontram em contato direto (WELTY et al, 1984).

DINCER (1995b) determinou o coeficiente de transferência de calor experimental através de curvas obtidas durante o resfriamento de figo com ar forçado, utilizando a aplicação de correlações empíricas e propriedades termofísicas. Os experimentos foram desenvolvidos para avaliar o processo de transferência de calor durante o resfriamento de produtos esféricos. Os valores obtidos variaram de 21,1 a 32,1 $W/m^2\text{°C}$ para velocidades de ar de 1,1 a 2,5 m/s, com erros de ajuste de até 20%.

Valores de h_c de 20 a 35 $W/m^2\text{°C}$ foram encontrados por MOHSENIN (1980), para sistemas de ar forçado com velocidades de ar entre 1,5 a 5,0 m/s, correspondente a uma vazão de ar de 1 a 3 l/s por quilograma de produto no estudo realizado.

Experimentos realizados por DINCER & GENÇELI (1994) em uma câmara de ar forçado com velocidades de ar variando de 1 a 2 m/s forneceram valores de h_c que variaram de $28,02 \pm 1,20$ $W/m^2\text{°C}$ até $52,11 \pm 3,02$ $W/m^2\text{°C}$ para produtos cilíndricos (pepino) durante o resfriamento, com valores de erro na faixa de 12%.

TERUEL (2000) confirmou a existência de uma ampla faixa de valores para o coeficiente convectivo de transferência de calor, justificada pela complexidade da determinação deste coeficiente, que depende das características do fluxo do meio de resfriamento e dos produtos estudados.

Diversos métodos de medição de coeficientes efetivos de convecção são descritos na literatura. Os mais comuns são os que envolvem medidas de temperatura nos regimes permanentes e transientes (CLELAND, 1990).

Como foi encontrada uma ampla faixa de valores de coeficiente convectivo de transferência de calor (h_c) relatados na literatura que variavam de acordo com as relações específicas deste parâmetro com os detalhes de cada processo experimental analisado, considera-se a obtenção deste coeficiente no processo como uma etapa importante devido às diferentes condições de operação de todos os modelos encontrados, em relação ao túnel portátil de congelamento por ar forçado, objetivo deste trabalho.

2.3.1 Medidas de temperatura em regime permanente

Neste método, uma energia é gerada no sistema, como um aquecimento por uma resistência elétrica no centro do produto, por exemplo, e a temperatura deve ser mantida constante através da retirada desta energia na superfície de contorno. O coeficiente de transferência de calor superficial pode ser calculado, conhecendo-se a área superficial do produto, a quantidade de energia adicionada e a diferença entre as temperaturas do meio de resfriamento e do produto. Porém, os parâmetros de temperatura e velocidade do meio de resfriamento devem ser mantidos constantes em condições experimentais, o que torna mais complexo, limitando a utilização deste método.

2.3.2 Medidas de temperatura em regime transiente

Neste método, um corpo metálico ou de outro material com uma grande condutividade térmica é utilizado para minimizar o gradiente de temperatura formado durante a transferência de calor do meio de resfriamento para o produto ($Bi < 0,1$), permitindo uma temperatura praticamente uniforme a cada instante.

De acordo com WELTY et al (1984) e BROSANAN & SUN (2001), aplicando-se um balanço de energia em um sistema de condução de calor transiente em que se possa desprezar a resistência interna, pode-se obter as equações para o cálculo do coeficiente de transferência de calor efetivo.

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

$$\frac{dQ}{dt} = h_c A (T_b - T_\infty) \quad (2)$$

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

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

$$\frac{dQ}{dt} = \rho_m V c_{p_m} \frac{dT}{dt} \quad (3)$$

Combinando as equações 2 e 3 e integrando com a adoção da condição de contorno inicial $T_{(t=0)}=T_i$, obtém-se a solução para a variação de temperatura em função do tempo:

$$\frac{T_b - T_\infty}{T_i - T_\infty} = e^{\frac{-h_c A t}{\rho_m c_{p_m} V}} \quad (4)$$

Esse método consiste na utilização de um corpo de prova com material de alta condutividade térmica, de maneira que os ensaios de resfriamento ocorram sem mudança de fase e admitindo-se as propriedades térmicas constantes com a variação da temperatura.

Este método descrito foi utilizado por diversos autores. LE BLANC et al. (1990a,b) e RESENDE et al. (2002) relataram experimentos, onde utilizaram o método descrito para obtenção de h_c a partir de curvas de temperatura em função do tempo de resfriamento de produtos.

Segundo RESENDE et al. (2002), algumas precauções devem ser tomadas durante a utilização deste método. Se um corpo de prova é constituído de um bloco metálico, podem existir taxas de transferência de calor pelas bordas do material, influenciando significativamente nos valores de h_c determinados. Além disso, existe o fato dos coeficientes de transferência de calor serem dependentes do tamanho e forma da amostra, sendo que em experimentos com ar, pode ocorrer o efeito da radiação e/ou evaporação. Assim, deve-se atentar para o correto posicionamento do corpo de prova a fim de evitar que haja condensação de água durante os ensaios e isolar as bordas do corpo ou outras partes que possam interferir nos valores de temperatura durante o processo.

2.4 PONTO INICIAL DE CONGELAMENTO (T_{IC})

Os alimentos não congelam completamente a uma única temperatura, mas ao longo de uma faixa de temperatura. Primeiro é necessário o abaixamento da temperatura até a temperatura inicial de congelamento, seguida da retirada do calor latente de solidificação da água e novamente o abaixamento da temperatura até a temperatura de armazenagem.

Devido ao fato dos alimentos apresentarem uma alta fração de água em sua composição, a troca de calor durante o resfriamento é diferente tanto acima como abaixo do ponto de início de congelamento. Acima do ponto de congelamento, toda a água encontra-se na fase líquida e abaixo do ponto de congelamento, apenas parte da água está na forma congelada. O cálculo do calor sensível pode ser feito da mesma forma, com a exceção de que o gelo altera a condutividade térmica e o calor específico do produto (AIR-CONDITIONING AND REFRIGERATION INSTITUTE, 1979).

O calor sensível a ser removido de um alimento pode ser calculado através da Equação 5:

$$Q = mc_p(\Delta T) \quad (5)$$

Onde:

$\Delta T = (T_f - T_i)$ – Diferença de temperatura do produto ($^{\circ}\text{C}$);

Q = Quantidade de calor a ser removido (kJ);

m = massa do produto (kg);

c_p = calor específico do produto (kJ/kg $^{\circ}\text{C}$);

T_f = Temperatura final do produto ($^{\circ}\text{C}$);

T_i = Temperatura inicial do produto ($^{\circ}\text{C}$).

Para o cálculo do calor a ser removido durante o congelamento, pode-se considerar que o calor latente de um produto é igual ao calor latente da água multiplicado pela quantidade de água a ser congelada na composição deste produto. O calor a ser retirado de um produto para o congelamento é então obtido pela Equação 6:

$$Q = m_a \Delta \hat{H}_s \quad (6)$$

onde:

$\Delta\hat{H}_s$ = calor latente de solidificação da água (kJ/kg);

m_a = massa de água a ser congelada (kg).

O ponto inicial de congelamento de um alimento é importante não apenas para determinação das melhores condições de estocagem, mas também para o cálculo das propriedades termofísicas. Durante o armazenamento de frutas e vegetais, por exemplo, a temperatura deve ser mantida o mais baixo possível, pois é inversamente proporcional ao tempo de vida de prateleira do produto; porém acima do ponto inicial de congelamento do produto para evitar danos ao mesmo.

Ainda, alimentos com alta quantidade de açúcares ou altamente concentrados podem nunca congelar completamente, mesmo a temperaturas de armazenamento de alimentos congelados. Assim, não há uma temperatura de congelamento definida para alimentos, mas um ponto inicial de congelamento no qual inicia o processo de cristalização (ASHRAE, 2002).

Além disso, devido à influência da concentração de sólidos, o ponto de início de congelamento de um alimento pode variar de acordo com a composição do alimento. O ponto de início de congelamento de sucos de frutas, por exemplo, é diferente do ponto de congelamento da polpa desta fruta (JIE et al., 2003).

Na Tabela 2-1 são apresentados a fração de água e o ponto de congelamento de alguns tipos de alimentos.

Tabela 2-1. Fração de água e ponto de congelamento de alguns alimentos (Fonte: FELLOWS, 2000).

Alimento	Fração de água (%)	Ponto de congelamento (°C)
Vegetais	78-92	-0,8 a -2,8
Frutas	87-95	-0,9 a -2,7
Carne	55-70	-1,7 a -2,2
Peixe	65-81	-0,6 a -2,0
Leite	87	-0,5
Ovo	74	-0,5

2.5 FORMAÇÃO DOS CRISTAIS DE GELO

O processo de congelamento ocorre com a troca de calor sensível do produto depois do congelamento, além do calor latente de solidificação da fase líquida que compõe o alimento. O ponto inicial de congelamento dos alimentos é menor que o ponto de congelamento da água pura, devido a outras substâncias presentes no alimento. Nos alimentos, uma parte da água cristaliza e o restante forma uma solução mais concentrada. Assim, o ponto de congelamento da parte não congelada é reduzido. Como a temperatura continua diminuindo, a formação de cristais de gelo aumenta a concentração dos solutos na solução e reduz ainda mais a temperatura em que ocorre esta retirada do calor latente do alimento. Este fenômeno é denominado “depressão da temperatura de congelamento”, fazendo com que o congelamento do alimento não ocorra a uma determinada temperatura fixa, mas através de uma faixa de temperaturas. As frações de gelo e de água no alimento congelado são dependentes da temperatura (SCHWARTZBERG, 1976; SCOTT et al., 1992; SAAD & SCOTT, 1996; CHEN & CHEN, 1996; BECKER & FRICKE, 1999; ASHRAE, 2002).

A Figura 2-1 mostra a relação de água congelada no alimento de acordo com a temperatura em que o produto se encontra.

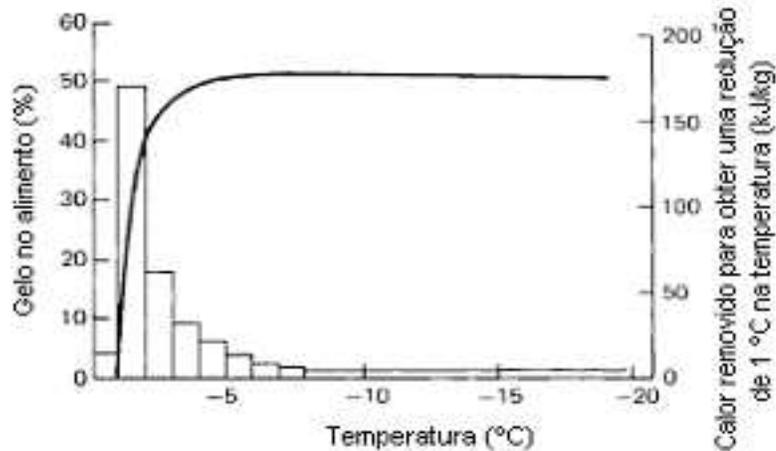


Figura 2-1. Porcentagem de gelo em alimentos congelados em função da temperatura (Fonte: FELLOWS, 2000).

O aumento da concentração de solutos durante o congelamento causa ainda alterações no pH, viscosidade, tensão superficial e outras características da parte líquida não congelada (FELLOWS, 2000).

Abaixo do ponto de início de congelamento, os alimentos continuam mudando sua composição, alterando a razão entre a fração de água líquida e gelo em sua composição (FIKIIN & FIKIIN, 1999).

SALVADORI & MASCHERONI (1996) utilizaram em experimentos de congelamento uma temperatura final de -18°C no centro geométrico do produto como alvo, visto que a esta temperatura praticamente inexistem reações enzimáticas e crescimento microbológico que possam causar danos ao produto.

Segundo HELDMAN (1992), o processo de congelamento de alimentos tem duas características particulares se comparado com o congelamento da água pura: a temperatura inicial de congelamento será sempre inferior à da água pura, devido à presença de sólidos na composição do alimento, provocando a redução desta temperatura. A segunda diferença ocorre após a formação dos cristais de gelo, quando a retirada do calor latente de solidificação altera gradualmente com a diminuição de temperatura do produto.

Durante o início do processo de congelamento, para que os cristais de gelo possam ser formados, devem estar presentes moléculas de água, que vão se agrupando com a redução da temperatura, formando núcleos. Este efeito de nucleação precede a formação dos cristais de gelo. FELLOWS (2000) descreve o ponto de congelamento de um alimento como correspondente à temperatura em que um minúsculo cristal de gelo se forma em equilíbrio com a água ao seu redor. Dentre os dois tipos de nucleação existentes (nucleação homogênea, onde ocorre a orientação casual das moléculas de água e heterogênea, onde a formação dos núcleos ocorre ao redor de partículas suspensas) a mais comum nos alimentos é a nucleação heterogênea.

O intervalo de duração do processo de retirada do calor latente de um alimento, ou seja, o tempo em que o processo leva para passar pela zona crítica (Figura 2-2) irá determinar a quantidade e o tamanho dos cristais de gelo formados durante o congelamento.

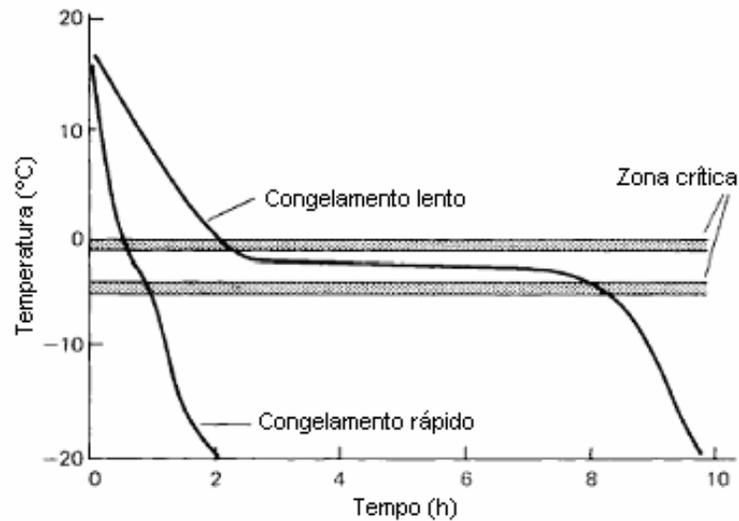


Figura 2-2. Curva de congelamento e mudança de temperatura através da zona crítica (Fonte: FELLOWS, 2000).

Além disso, devido às drásticas mudanças nas propriedades termofísicas durante o congelamento, o conhecimento do ponto inicial de congelamento é necessário para determinar de forma precisa as propriedades termofísicas do alimento em quaisquer condições de armazenamento (ASHRAE, 2002, MIKI & HAYAKAWA, 1996).

2.6 FATORES QUE AFETAM O TEMPO DE RESFRIAMENTO

De acordo com LEAL & CORTEZ (1998), o tempo de resfriamento para frutas é função das variáveis que estão envolvidas na transferência de calor entre o produto e o meio de resfriamento (dimensões e áreas de aberturas das embalagens) e das características do produto e do meio de resfriamento.

Porém, devido à complexidade do processo de congelamento dos alimentos, fica muito difícil obter soluções analíticas exatas para o tempo de congelamento, pois na prática, os alimentos geralmente têm formato irregular com propriedades termofísicas dependentes da temperatura. Assim, não se pode obter uma solução analítica exata para o tempo de congelamento de alimentos (BECKER & FRICKE, 1999b; TERUEL, 2000; ASHRAE, 2002).

De acordo com a revisão apresentada por BECKER & FRICKE (1999b), os métodos desenvolvidos para estimativa do tempo de congelamento de alimentos apresentaram resultados igualmente satisfatórios para produtos com formas de placas infinitas e cilindros infinitos.

Segundo BAIRD et al. (1988), o custo do processo de resfriamento está diretamente relacionado à taxa de resfriamento. Esta, por sua vez, é afetada diretamente pela área de abertura das embalagens para circulação de ar, profundidade do leito, temperatura final desejada e velocidade do ar de resfriamento.

2.7 SISTEMAS DE CONGELAMENTO

Os sistemas de congelamento podem ser descritos de acordo com os diferentes métodos de retirada de calor do produto. Dentre os métodos mais utilizados estão os congelamentos com ar estático ou forçado, congelamento por contato direto com superfícies super resfriadas e congelamento por imersão em líquidos refrigerantes (TERUEL, 2000). O último método apresenta diversas vantagens, desde a facilidade de montagem e operação e a eficiência do processo até a abrangência da variedade de produtos que podem ser resfriados neste sistema (TERUEL, 2000).

O sistema de congelamento por ar forçado utiliza fundamentalmente a convecção, onde o ar é resfriado pelo sistema de refrigeração e entra em contato com o produto para a troca de calor.

A seleção de um método específico de resfriamento é determinada por diversos fatores, incluindo: a taxa de resfriamento requerida, compatibilidade do método com o produto a ser resfriado, condições de armazenamento subseqüentes e custos iniciais de equipamentos e de operação, além da área da instalação. Sistemas corretamente dimensionados podem representar uma maior eficiência no processo e uma redução no custo de operação (TALBOT & CHAU, 1998; ASHRAE, 2002).

TALBOT & FLETCHER (1996) mostraram a eficiência de um sistema de resfriamento por ar forçado comparado a uma câmara de estocagem. Para o resfriamento de uvas, houve uma

diminuição de 6,7° C em uma hora e 14,6° C após 2,5 horas, comparado a uma diminuição de apenas 2° C em uma hora e 3,5° C em 2,5 horas numa câmara de estocagem.

As câmaras frigoríficas podem ser usadas ou adaptadas para realizar o resfriamento por ar forçado com um custo reduzido, aproveitando-se o superdimensionamento do sistema de refrigeração quando projetadas.

Até o momento não se tem conhecimento de pesquisas na literatura disponível que avaliem a eficiência de um túnel portátil utilizado em processos de congelamento.

2.8 PROPRIEDADES TÉRMICAS DE ALIMENTOS

As propriedades térmicas de alimentos e do meio de resfriamento, tais como condutividade térmica, difusividade, calor específico e densidade, devem ser conhecidas para os cálculos de transferência de calor envolvidos no desenvolvimento de equipamentos de refrigeração e armazenagem refrigerada e na estimativa de tempos de processos de resfriamento e congelamento. Em processos de congelamento, estas propriedades são essenciais para a simulação da variação de temperatura no interior dos alimentos e estimativas de tempo de congelamento e carga térmica do produto (ASHRAE, 2002, SAAD & SCOTT, 1996, BECKER & FRICKE, 1999a; RENAUD et al. 1992; RESENDE & SILVEIRA JR., 2002a; DUSSÁN SARRÍA et al., 2006).

As predições teóricas envolvem a utilização de modelos matemáticos para o estudo do problema físico que está sendo avaliado. A investigação experimental é a forma de obter dados reais dos processos analisados, comparando-se com o modelo teórico e avaliando sua validação.

Outro fator limitante está na aplicação destes modelos para processos em batelada, onde ocorre o aquecimento do meio de resfriamento (SADASHIVE GOWDA et al., 1997). Existem assim muito poucos modelos matemáticos para transferência de calor em processos de congelamento (DELGADO & SUN, 2001).

CHOI & OKOS (1986) desenvolveram modelos matemáticos para predição das propriedades térmicas em função dos componentes dos alimentos para uma faixa de temperaturas de -40° C a 150° C, além de modelos para predição de propriedades térmicas de

água e gelo. Os autores determinaram a fração de água não congelada em alimentos congelados através da depressão do ponto de congelamento.

Algumas propriedades térmicas, como difusividade e condutividade térmica de sistemas modelo de alimentos, foram calculadas por RENAUD et al. (1992), para uma faixa de temperaturas de -40°C a 20°C , em soluções binárias de água e gelatina, água e sacarose, água e ovalbumina e água e amido.

Segundo DUSAN SARRIA et al. (2006), as propriedades como a condutividade térmica e o calor específico são importantes por estarem relacionadas ao processo de troca de calor com o meio de resfriamento. Além destas, são importantes também as propriedades de transporte como o coeficiente convectivo de transferência de calor.

RESENDE & SILVEIRA JR. (2002a) determinaram experimentalmente a condutividade térmica e a difusividade térmica em função da temperatura durante o congelamento de sistemas modelo, comparando-as com propriedades estimadas através de modelos apresentados na literatura. Os autores obtiveram resultados compatíveis com a literatura para diversas propriedades termofísicas para solução de sacarose e carragena.

2.9 CONGELAMENTO

A Figura 2-3 ilustra a variação de temperatura da água pura (ASB) e de um alimento (AS'B'C') com o decorrer do tempo de exposição a um sistema de congelamento.

A primeira parte do gráfico (trecho AS ou AS') mostra a etapa de redução da temperatura inicial do produto através da retirada do calor sensível (onde ainda não ocorre mudança de fase) até o sub-resfriamento abaixo do ponto de solidificação do alimento, que ocorre, diferentemente da água, sempre abaixo de 0°C , devido à presença de sólidos dissolvidos no produto e antes do início da formação dos cristais de gelo. No ponto S, a água presente no alimento ainda encontra-se no estado líquido, apesar de estar abaixo do seu ponto de congelamento. Este fenômeno é conhecido como *super-resfriamento*. O super-resfriamento pode chegar a até 10°C abaixo do ponto de congelamento do alimento e varia de acordo com o tipo de composição do alimento e da taxa de resfriamento (FELLOWS, 2000; ZARITZKI, 2000).

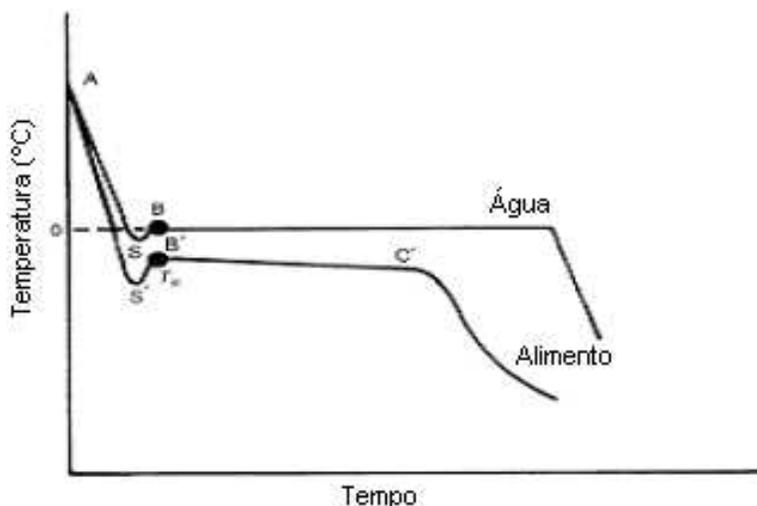


Figura 2-3. Variação da temperatura *versus* tempo de congelamento para água pura e alimento (Fonte: ZARITZKI, 2000).

A primeira parte do gráfico (trecho AS ou AS') mostra a etapa de redução da temperatura inicial do produto através da retirada do calor sensível (onde ainda não ocorre mudança de fase) até o sub-resfriamento abaixo do ponto de solidificação do alimento, que ocorre, diferentemente da água, sempre abaixo de 0 °C, devido à presença de sólidos dissolvidos no produto e antes do início da formação dos cristais de gelo. No ponto S, a água presente no alimento ainda encontra-se no estado líquido, apesar de estar abaixo do seu ponto de congelamento. Este fenômeno é conhecido como *super-resfriamento*. O super-resfriamento pode chegar a até 10 °C abaixo do ponto de congelamento do alimento e varia de acordo com o tipo de composição do alimento e da taxa de resfriamento (FELLOWS, 2000; ZARITZKI, 2000).

Os pontos S e S' representam o início da nucleação, quando os cristais de gelo começam a liberar o calor latente de solidificação mais rapidamente do que a perda de calor para o meio. Isto causa o aumento da temperatura até B ou B', que representa o ponto inicial de congelamento. Os alimentos apresentam uma temperatura menor que a água pura neste ponto, devido à presença de sólidos solúveis. Além disso, o trecho a partir de B representa o período em que ocorre o aumento dos cristais de gelo e a remoção do calor latente. A parte parcialmente congelada não reduzirá a temperatura até que toda a água disponível esteja congelada, apesar do calor ser removido nas mesmas condições. Nos alimentos, este patamar de temperatura (trecho B'C') não é constante, uma vez que ocorre o aumento da concentração dos sólidos da solução

durante o congelamento, reduzindo sutil e continuamente o ponto de congelamento da água que continua disponível. Após o congelamento, a temperatura continua a diminuir com a retirada do calor sensível abaixo do ponto de congelamento (após C') e até que a temperatura do alimento se aproxime ao valor da temperatura do meio de resfriamento (ZARITZKI, 2000).

O mesmo processo é descrito por FELLOWS (2000), porém com uma observação: existe uma pequena variação nos alimentos durante o processo de remoção do calor latente, onde os solutos tornam-se supersaturados e cristalizam. O calor latente de cristalização destes solutos é liberado e a temperatura aumenta até atingir o valor da temperatura eutética para o soluto, que é a temperatura onde o soluto está em equilíbrio com a solução não congelada. Ainda segundo o autor, após este processo, continua ocorrendo a cristalização da água e dos solutos, até o final da etapa de retirada do calor latente do produto. Este fenômeno é representado pelo trecho C-D na Figura 2-4.

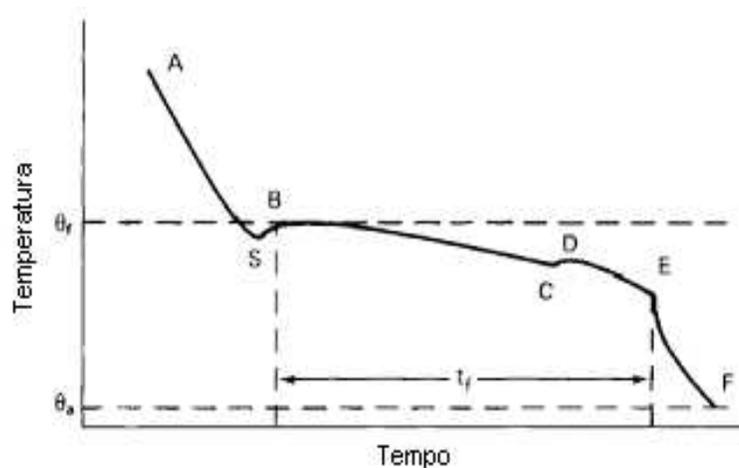


Figura 2-4. Variação da temperatura durante o processo de congelamento de alimentos (Fonte: FELLOWS, 2000).

2.10 VELOCIDADE DE CONGELAMENTO

É de conhecimento geral que uma rápida taxa de congelamento provoca a formação de muitos e pequenos cristais de gelo distribuídos igualmente na estrutura dos alimentos, ocasionando menores danos à estrutura dos alimentos; enquanto uma taxa de congelamento lenta provoca uma formação de cristais maiores e preferencialmente em regiões extracelulares, pois as moléculas de água tendem a migrar para núcleos já formados ao invés de iniciar a formação de

outros núcleos, sendo prejudicial à estrutura dos alimentos. Entretanto, podem ocorrer diferenças nos tamanhos de cristais em alimentos distintos ou do mesmo tipo, porém expostos a diferentes condições de congelamento (REID, 1992, citado por CHEVALIER et al., 2000; DELGADO & SUN, 2001; FELLOWS, 2000).

O tempo de congelamento efetivo é normalmente definido como o tempo total necessário para baixar a temperatura de um produto desde um valor de temperatura inicial até uma determinada temperatura abaixo do ponto de congelamento. Ele deve ser determinado em relação a uma posição no alimento, usualmente no centro térmico, onde a mudança de temperatura é mais lenta (DELGADO & SUN, 2001).

O tempo e a taxa de resfriamento podem ser determinados tanto de forma experimental como analítica. Para a determinação analítica, devem ser desenvolvidos modelos matemáticos que possam representar adequadamente o processo de transferência de calor que ocorre no produto, o que se torna uma tarefa complicada para alimentos, devido à sua composição complexa e formatos irregulares.

De acordo com PLANK (1941), citado por CHEVALIER et al. (2000) e BECKER & FRICKE (1999), a taxa de congelamento é definida como a velocidade do gradiente de mudança de fase, em unidade de espaço por unidade de tempo. Já o IIR (1986) define a taxa de congelamento como a diferença entre a temperatura inicial e a final do produto, dividida pelo tempo de congelamento. A taxa local é igual à diferença da temperatura final e a desejada dividida pelo tempo decorrido até que esta última fosse atingida.

A Tabela 2-2 apresenta, para efeito de comparação, taxas de congelamento obtidas em alguns tipos de processos.

Tabela 2-2. Taxas de congelamento para alguns tipos de processamentos (Fonte: JOHNSTON et al., 1994).

2 mm/h	Congelamento lento em câmara.
5 a 30 mm/h	Congelamento rápido em túnel ou congelador a placas.
50 a 100 mm/h	Congelamento rápido de pequenos produtos.
100 a 1000 mm/h	Congelamento ultrarápido em gases liquefeitos (N ₂ ou CO ₂).

A taxa de congelamento pode ser avaliada pela velocidade da frente de congelamento. Esta velocidade é maior na superfície do alimento e tende a reduzir enquanto avança em direção ao centro do produto. Assim, as velocidades de diferentes literaturas não são necessariamente comparáveis.

2.11 CONVECÇÃO DE AR

O ar é utilizado como meio de resfriamento em muitos processos. Num refrigerador, o ar em contato com o evaporador esfria e aumenta a densidade, movimentando-se para baixo. Neste processo, o ar a menor temperatura troca calor com as paredes e com os alimentos, e aquecendo, volta a subir, ocupando o lugar do ar que foi resfriado, formando um ciclo. Formam-se então as denominadas correntes de convecção natural, que normalmente compõem um fluxo lento. Na maioria dos equipamentos industriais, a convecção é acelerada com a utilização de ventiladores para a circulação forçada do ar de forma a aumentar a taxa de transferência de calor do ar que está a baixa temperatura para o produto a ser resfriado (AIR-CONDITIONING AND REFRIGERATION INSTITUTE, 1979).

O tempo de resfriamento em sistemas de refrigeração por ar forçado é determinado pelo fluxo de ar e dimensões do produto. Deve-se considerar o consumo energético para movê-lo e a distribuição do mesmo ao redor do produto. O sistema por ar forçado pode ser com exaustão ou insuflação de ar. Para o congelamento industrial de alimentos, é comum a utilização de túneis de insuflação direta de ar.

O fluxo de ar está relacionado à velocidade do ar que passa através dos produtos e é um importante parâmetro, pois sua variação significará um maior ou menor tempo de congelamento, influenciando diretamente a eficiência do sistema. Uma correta orientação do fluxo de ar dentro do equipamento e ao redor do produto pode reduzir consideravelmente os tempos de processo, representando um menor gasto energético e um processo mais eficaz. CORTBAOUI et al. (2006) obteve reduções do tempo de meio resfriamento com ar forçado de cerca de 90% em relação ao mesmo processo numa câmara de resfriamento convencional (convecção natural).

Dentre os fatores que influenciam a taxa de resfriamento por ar forçado, além do fluxo de ar, estão a área de superfície de contato do meio de resfriamento com o produto, velocidade do ar

de resfriamento e orientação da montagem e empilhamento do produto a ser resfriado (BAIRD et al., 1988, FRASER, 1998; LAGUERRE et al., 2006).

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

Promover a exaustão do ar, ao invés da insuflação, é mais adequado de forma a evitar que o ar passe por caminhos preferenciais, promovendo uma troca de calor mais uniforme (FRASER, 1998). O resfriamento convencional por ar forçado é uma alternativa eficiente na retirada do calor de campo de frutas e hortaliças, melhorando seu processo de conservação pós-colheita. (ANTONIALI & CORTEZ, 2000). Neste sentido, o túnel de resfriamento por ar forçado à exaustão, também conhecido como “túnel californiano”, é muito utilizado. Esta forma de operação altera um dos pontos críticos do processo, que é o controle do fluxo do ar, já que o mesmo determina a eficiência e homogeneidade dos tratamentos aos quais os produtos são submetidos.

A montagem mais comum deste tipo de sistema é a formação de duas colunas de caixas ou containeres montadas ao lado de um ventilador de exaustão, formando uma passagem para o ar. Esta passagem é então coberta de forma a constituir um túnel para a circulação do ar, evitando que o ar passe por caminhos preferenciais.

Este sistema é geralmente montado dentro de um equipamento de resfriamento, onde são ligados os equipamentos para monitoração. Com o ventilador em operação, forma-se uma diferença de pressão entre o interior do túnel e o lado externo do sistema. Esta diferença de pressão força a passagem do ar à baixa temperatura da câmara através dos pequenos espaços e aberturas entre o empilhamento do produto para a região de menor pressão no interior do túnel,

resfriando o produto durante este ciclo (TALBOT & FLETCHER, 1996; TALBOT & CHAU, 1998; FRASER, 1998; TERUEL, 2000).

O ventilador de exaustão pode ser um modelo portátil, sendo colocado de forma a direcionar o ar mais quente de exaustão para o evaporador da câmara; ou pode ser uma unidade fixa permanente, que circula o ar através da superfície do produto e retorna para a câmara fria (TALBOT & CHAU, 1998). A possibilidade de adaptação de uma câmara fria para utilização como um sistema por ar forçado representa uma vantagem econômica deste processo (TALBOT & FLETCHER, 1996).

BAIRD et al. (1988) demonstraram que a velocidade do ar de resfriamento influencia consideravelmente nos custos de operação de um sistema de resfriamento, sendo que o custo é diretamente proporcional ao aumento da velocidade do ar no sistema. Os menores custos foram obtidos com velocidades do ar entre 0,1 e 0,3 m/s, aproximadamente.

Para um estudo de resfriamento de esferas plásticas preenchidas com uma solução de carragena, ALLAIS et al. (2006) mostraram que o aumento da velocidade do ar de escoamento, variando de 0,25 m/s até 6 m/s, reduziu o tempo de meio resfriamento das amostras de 800 s para 500 s. Porém esta variação é exponencial e a redução tende a ser menor a partir de valores de velocidade de 2 m/s. Já os resultados obtidos por VIGNEAULT et al. (2004a,b), para o estudo do resfriamento de esferas plásticas sólidas utilizando ar forçado, mostram que fluxos de ar acima de 2 l/s.kg e velocidades do ar de insuflação maiores que 0,5 m/s praticamente não influenciaram no tempo de meio-resfriamento de esferas plásticas utilizadas no estudo.

2.12 INSTRUMENTOS E MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADE E VAZÃO DO AR DE ESCOAMENTO

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

De acordo com RESENDE & SILVEIRA JR. (2002b) e NUNES et al. (2003), o termoanemômetro é um dos aparelhos mais utilizados, por ser um dos mais sensíveis à direção

do escoamento, e, portanto, de uso mais conveniente. Devido a sua reduzida dimensão e curto tempo de resposta, os anemômetros de fio quente são especialmente adequados ao estudo detalhado de escoamento de fluidos, sendo comumente utilizado na medição do escoamento de ar em sistemas de ventilação e ar condicionado.

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

Métodos alternativos e práticos de medição de vazão utilizam estes anemômetros com esse fim. RESENDE & SILVEIRA JR. (2002b) e NUNES et al. (2003) sugerem que o local onde se deseja medir a vazão seja dividido em seções e obtida a velocidade média para cada uma dessas áreas, pois a vazão, através de uma superfície, pode ser determinada a partir de um campo de velocidades a partir da integração:

$$\dot{V} = \int_S \bar{v} \cdot d\bar{S} \quad (7)$$

Nesta equação, \dot{V} é a vazão (m^3/s), S é a superfície total (m^2) e \bar{v} é o vetor de velocidades (m/s). Neste estudo em particular, a superfície através da qual se deseja calcular a vazão é uma seção de um duto com superfície plana retangular. O vetor de velocidades é desconhecido, exceto por alguns pontos, onde a velocidade é determinada por um anemômetro. Quanto maior o número de medidas da velocidade, mais preciso será o resultado da vazão. Assim, a nova equação para o cálculo da vazão no túnel é:

$$\dot{V} = \int_{x_0}^{x_1} \int_{y_0}^{y_1} \bar{v}(x, y) \cdot dydx \quad (8)$$

onde x e y representam o plano da seção de escoamento do ar perpendicular ao fluxo, compreendido pelas dimensões da superfície formada pelas caixas do palete.

2.13 AVALIAÇÃO DA HETEROGENEIDADE DA DISTRIBUIÇÃO DO AR ATRAVÉS DO PRODUTO

A maioria dos estudos sobre resfriamento e congelamento de produtos não leva em consideração o fluxo de ar nas fronteiras do produto, dificultando assim a determinação da velocidade ótima do ar e da taxa de resfriamento do produto.

O fluxo de ar que passa pelo produto é um parâmetro importante, que envolve a velocidade do ar no processo. Alguns pesquisadores sugerem valores de fluxos de ar para alguns produtos no resfriamento, que serviram de referência para comparação com o sistema utilizado neste trabalho. FRASER (1998) propõe uma quantidade de ar a ser succionada pelo ventilador em torno de 0,5 a 3 l/s por quilograma de produto a ser resfriado, enquanto TERUEL (2000) cita valores máximos de fluxo de ar da ordem de 6 l/s por quilograma de produto.

DUSSÁN SARRIA et al. (2006) mostrou que altas velocidades do ar de escoamento causaram reduções na eficiência do processo de resfriamento, menor valores de taxa de resfriamento experimentais e maiores valores de tempo de processo, além de redução dos coeficientes convectivos. O aumento da velocidade do ar de 1,3 m/s para 2,0 m/s não apresentou diferença significativa para os resultados do tempo de resfriamento nem para os valores do coeficiente convectivo, que se mantiveram entre 23,2 W/m²°C e 23,8 W/m²°C. Ainda segundo DUSSÁN SARRIA et al. (2006), isto ocorre provavelmente devido à criação de fluxos preferenciais que não permitem o resfriamento adequado dos produtos.

MOHSENIN (1980) mostrou que, para velocidades do ar em torno de 1,5 a 5,0 m/s (1 a 3 l/s por kg de produto), o valor do coeficiente de transmissão superficial de calor está entre 20 e 35 W/m²°C e a queda de pressão entre 50 a 75 mmca, variando de acordo com as embalagens utilizadas e o empilhamento.

Um estudo para avaliar o efeito da embalagem e de filmes plásticos na taxa de resfriamento de pêras resfriadas num sistema convencional em paletes, desenvolvido por YOST et al. (1977), citado por TERUEL (2000), demonstrou que o tempo de resfriamento diminui à medida que a velocidade do ar aumenta. Nestes testes, o autor obteve uma redução de mais de 50% no tempo de resfriamento, de 28 horas, com o ar a uma velocidade de 0,05 m/s, para 12,5 horas com o ar a uma velocidade de 1,2 m/s.

Segundo DUSSÁN SARRIA et al. (2006), para dobrar a velocidade do ar em um sistema, necessita-se de um motor com cerca de seis a sete vezes mais potência, aumentando assim o custo de operação do mesmo. Em contrapartida, isto diminui consideravelmente o tempo de permanência do produto na câmara.

A diferença entre a temperatura da superfície e a temperatura do centro de um produto durante o resfriamento pode chegar a 20% para uma velocidade do ar em torno de 1 m/s. Além disso, existe a diferença de temperatura entre os produtos colocados na entrada do fluxo de ar (ponto mais 'frio') e os que estão posicionados na outra extremidade da distribuição montada (ponto mais 'quente') (ALVAREZ & LETANG, 1994).

VIGNEAULT et al. (2004c) propuseram uma ferramenta para o estudo da distribuição do ar em recipientes durante o resfriamento por ar forçado. Além disso, os autores desenvolveram um número adimensional para comparar a heterogeneidade da distribuição da velocidade do ar através de um meio poroso, denominado número “Vi”. Este número foi definido como a razão entre o desvio padrão e a média da velocidade do ar circulando através de uma massa de produto num recipiente, onde um valor de “Vi” igual a zero representa uma distribuição perfeita do ar no meio poroso. O método foi proposto pela realização de estudos com amostras esféricas em um túnel de circulação de ar forçado por insuflação.

2.14 ACONDICIONAMENTO E EMBALAGEM

Um ponto importante para um bom desempenho de um sistema de resfriamento por ar forçado é que a embalagem ou o palete deve possuir aberturas para permitir a passagem do ar através do produto embalado, de forma a promover uma rápida e uniforme transferência de calor entre o meio de resfriamento e o produto no interior da embalagem (VIGNEAULT et al. 2004, citado por VIGNEAULT et al. 2004a; ZOU et al., 2006a, b).

TALBOT & FLETCHER (1996) e TERUEL (2000) mostraram a importância de um correto dimensionamento do sistema, comprovando que quanto maior a área de abertura para circulação, menor a exigência dos sistemas de refrigeração e circulação de ar e mais uniforme a taxa de resfriamento.

VIGNEAULT et al. (2005) verificaram a influência da gravidade na distribuição de ar num fluxo horizontal através do produto em equipamento de resfriamento por ar forçado de insuflação, mostrando que baixos valores de fluxos de ar podem ser mais influenciados pela variação da temperatura ao entrar em contato com o produto, aumentando sua temperatura, reduzindo a densidade e fluindo para a parte superior da câmara.

MEANA et al. (2005) mostraram que os espaços vazios entre as embalagens plásticas que são utilizadas no resfriamento de morangos por ar forçado influenciam significativamente no tempo de resfriamento dos produtos. Os autores conseguiram uma redução de 82 min para 65 min no tempo de 7/8 de resfriamento quando preencheram os espaços entre as embalagens com isolantes. Porém não foi avaliado o gasto energético que a perda de carga gerada no sistema com a nova configuração causava.

De acordo com BAIRD et al. (1988), o custo do processo de resfriamento aumenta significativamente quando utilizadas caixas com áreas de abertura inferiores a 10%, e sugerem como mínimo uma abertura para ventilação de 5% da embalagem. Já CASTRO et al. (2003) sugerem que uma área de abertura de 14% é suficiente para um processo de resfriamento rápido e uniforme.

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

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

2.15 CARGA TÉRMICA E VELOCIDADE DE RESFRIAMENTO

Sistemas por ar forçado insuflado são comumente utilizados em grandes áreas de produção de frutas e vegetais *in natura*. Alguns produtos precisam ser resfriados mais rapidamente após a colheita que outros, portanto o dimensionamento do equipamento é importante para assegurar que o fluxo de ar por unidade de massa de produto esteja de acordo com as necessidades do produto (FRASER, 1998).

A eficiência do resfriamento rápido por ar forçado foi comprovada por BINOTTI & CORTEZ (2000) a partir de resultados obtidos na determinação da textura do produto. O tempo gasto para atingir 7/8 da temperatura inicial foi de aproximadamente 0,5 hora, para o resfriamento de morangos colhidos à temperatura ambiente. Produtos *in natura* tiveram a vida útil estendida de quatro para quinze dias com a qualidade do produto determinada através da avaliação da textura.

Para o resfriamento de alfaces, o resfriamento por ar forçado em túnel de exaustão reduziu o tempo de 7/8 de resfriamento de 28 horas e 23 minutos para 1 hora e 29 minutos, conseqüentemente reduzindo o tempo de utilização do sistema de resfriamento e o consumo energético no processo (ANTONIALI & CORTEZ, 2000). A redução neste tempo ainda aumentou significativamente a vida de prateleira. Alfaces resfriadas rapidamente após a colheita foram conservadas por 23 dias em condições de comercialização, enquanto as que foram resfriadas em câmara convencional não duraram mais do que 16 dias.

De acordo com TALBOT & FLETCHER (1996), a carga térmica a ser resfriada num túnel californiano de resfriamento não deve exceder a carga térmica para a qual a câmara foi projetada, pois isto implica num aumento no tempo de resfriamento.

Segundo BINOTTI & CORTEZ (2000), a função do resfriamento rápido é minimizar o tempo em que o produto perde para ser resfriado dentro de uma câmara convencional. Porém, até hoje, estes estudos foram realizados apenas com produtos hortícolas, os quais, em geral, são armazenados a temperaturas acima do ponto de congelamento.

Cada novo lote colocado na câmara provoca um aumento da temperatura. Se este aumento for grande, poderá comprometer o produto já estocado. Por este motivo, FRASER (1998) sugere a utilização de um sistema de resfriamento por ar forçado dedicado ao

resfriamento rápido, para depois transferir o produto para a câmara de estocagem, apesar desta operação exigir um maior investimento.

Normalmente sistemas comerciais de refrigeração e congelamento são dimensionados para uma capacidade operacional acima da capacidade nominal e em condições críticas (TALBOT E FLETCHER, 1996). Isto faz com que os equipamentos utilizados comercialmente estejam super dimensionados a maior parte do tempo de operação para a carga térmica variável, a partir da qual foram projetados.

2.16 SOLUÇÕES MODELO

Os alimentos geralmente são produtos que possuem um valor agregado com propriedades que podem variar entre os mesmos produtos, caracterizando uma certa heterogeneidade, dificultando sua utilização em grandes quantidades para testes ou ensaios destrutivos. Além disso, são, em geral, produtos perecíveis com uma vida de prateleira que, com exceção de produtos que sofreram algum tratamento como a secagem, não resistem muito tempo sem deteriorar.

Uma alternativa comumente utilizada em estudos de propriedades térmicas de alimentos é a utilização de soluções modelo para os testes experimentais. Estes modelos baseiam-se em assumir os alimentos como soluções ideais (SAAD & SCOTT, 1996).

As substâncias escolhidas como modelo em estudos de processos de congelamento devem ter suas propriedades térmicas definidas e composição semelhante à do sistema alimentício em estudo (DA SILVA, 1994).

DA SILVA (1994) utilizou soluções modelo com diferentes concentrações de sacarose para simulação de polpa de abacaxi. As concentrações estudadas variaram de 15° Brix a 25° Brix, ajustadas de acordo com o teor de sólidos do sistema real. O trabalho mostrou bons resultados para o sistema com concentração de 15° Brix abaixo do ponto de congelamento. O trabalho cita a possibilidade de influência da composição do soluto na entalpia e sugere estudos com soluções modelo com a adição de ácidos e espessantes de forma a assemelhar-se às polpas de frutas.

Já RESENDE & SILVEIRA JR. (2002a, b) e RESENDE et al. (2002) determinaram experimentalmente, a partir de equações de predição para soluções de carragena-sacarose-água, algumas propriedades térmicas de soluções modelo compostas de 10% de sacarose e 0,5% de goma “*k-carragenan*”, obtendo diferenças variando de 6% a 33%, de acordo com o método utilizado. As amostras foram posteriormente utilizadas na simulação de polpas de frutas durante o processo de congelamento em diversas condições.

A estabilidade térmica de uma solução de 65% de sacarose e 0,1% de goma carboximetilcelulose (CMC) tratada a 60° C durante 4 horas foi avaliada por BERTO et al. (2003). Os resultados indicaram, segundo os autores, a possibilidade de reprocessamento da solução analisada.

Não foram encontrados na literatura trabalhos que tenham avaliado a possibilidade da reutilização das soluções modelo para ensaios de congelamento. Não se sabe se, depois de repetidos ensaios de redução e elevação da temperatura, ocorrem alterações nas propriedades térmicas ou físico-químicas das mesmas, comprometendo sua reutilização.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para simulação da polpa de fruta, foi utilizada uma solução modelo de 15% (massa/massa da solução) de sacarose, de forma a simular a composição de sólidos solúveis e 0,5% (massa/massa da solução) de goma espessante carboximetilcelulose (Carbocel AM, Arinos, SP, Brasil), para conferir viscosidade à solução, simulando a consistência de polpas de frutas.

Para o preparo da solução, a carboximetil celulose em pó foi adicionada à sacarose, formando uma mistura granulada dos dois ingredientes. Em seguida, esta mistura foi adicionada lentamente em tanque com água fria sob agitação (agitador de três hélices, com motor de 0,5 cv e 1150 rpm) (Weg Equipamentos Elétricos S.A., SP, Brasil - modelo 07/00 FM45885) até a completa dispersão. Foram formulados 300 kg desta solução em dois lotes.

Além disso, foram adicionados à solução, sob agitação, 1000 ppm de benzoato de sódio (0,15 kg em cada batelada), com a função de evitar o surgimento de fungos ou outros microrganismos indesejáveis no produto durante o período dos ensaios.

A solução modelo foi formulada no Laboratório de Automação e Controle de Processos de Alimentos (LACPA) e então levada até a empresa de produtos congelados DeMarchi Indústria e Comércio de Frutas Ltda., onde as amostras foram envasadas em embalagens de polietileno de dimensões aproximadas de 9,5 cm x 7 cm x 1,5 cm, com 100 g de produto em cada uma, simulando polpas de frutas encontradas comercialmente no mercado, e acondicionadas nas caixas de plástico para o processo de congelamento.

3.2 SISTEMA DE MONITORAÇÃO DAS TEMPERATURAS E AQUISIÇÃO DE DADOS

O sistema de monitoração utilizado consiste de uma chave automática seletora de canais modelo Scanner 706 da Keithley Instruments Inc, OH, USA, com capacidade de varredura de 100 canais. Esta chave é composta de dez placas (slots), sendo que cada placa contém nove canais

bipolares para termopares, além de um canal que foi reservado para a junta de referência (junta fria). Os canais são operados por relés com função de comando de abertura e fechamento dos canais para efetuar as leituras através dos termopares. A abertura e o fechamento dos canais são comandados por comunicação GPIB (General Purpose Interface Bus – IEEE488) através de um controlador GPIB da STD (modelo STD8410), conectado em um microcomputador.

As temperaturas das amostras foram monitoradas através de termopares de cobre-constantan. O sinal é gerado pelo sensor, e após o fechamento do relé da chave seletora do respectivo canal, é enviado a um conversor analógico-digital (A/D) (Lynx Tecnologia Eletrônica LTDA, SP, Brasil, modelo CAD 12/32). O sinal é obtido na forma de tensão (V) e endereçado à respectiva porta do conversor que se comunica com o microcomputador usando saída serial RS232, conforme mostrado na Figura 3-1.

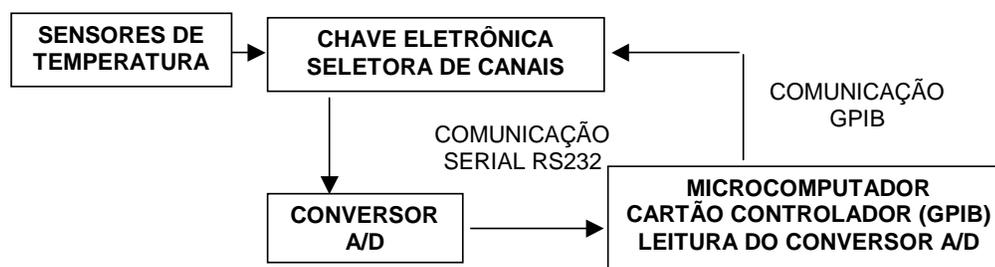


Figura 3-1. Esquema do sistema de aquisição de dados.

Foi utilizado um programa na linguagem Turbo Pascal versão 7.0, para sincronizar as operações de fechamento, leitura e abertura dos canais, intervalo entre leituras, geração de arquivos de dados e controle dos instrumentos ligados ao barramento do computador. De maneira geral, o programa é composto dos seguintes módulos:

Módulo de controle interativo para interfacear com o barramento GPIB, que inclui o atuador GPIB, a interface entre o controlador e a linguagem de programação e o cartão STD 8410. Contém as funções que permitem o controle na interface GPIB dos dispositivos e as palavras de comando que ativam as funções internas da chave seletora (Keithley), as quais possibilitam o controle remoto do aparelho. Os sinais de comando realizam as mesmas operações disponíveis através do painel frontal do equipamento.

Módulo de leitura dos sinais enviados pela chave seletora atuando durante o período em que o relé referente a um canal específico permanece fechado. É feito através da programação do conversor A/D pela leitura e escrita de seus registradores internos, recebidos pelo computador por

comunicação serial RS232. Nele estão contidos os endereços do barramento do computador. Apresenta rotinas de correção, seleção dos canais que contêm os valores dos sinais armazenados em seus registradores, as rotinas para registros de ganhos que definem a faixa de entrada dos sinais, a rotina da leitura dos valores armazenados e a sua conversão em valores de tensão.

Comandos de tempo, que determinam o intervalo de tempo entre as aquisições solicitadas pelo usuário e o tempo corrente de operação do sistema.

Comandos de gravação do arquivo de saída de dados.

3.3 AFERIÇÃO E CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES

Para as medições de temperatura foram utilizados termopares tipo T (cobre-constantan), construídos com cabos flexíveis AWG 24, revestidos de PVC e soldados em meio inerte (Nitrogênio), de acordo com as recomendações da literatura (ASTM, 1989).

Os termopares foram aferidos juntamente com o sistema de aquisição de dados por computador, sendo cada um numerado com dois dígitos, onde o primeiro representa a placa na qual foi ligado (0 a 9) e o segundo, o canal correspondente (2 a 10). O primeiro canal em cada placa foi reservado para utilização como junta de referência (junta fria).

Os termopares foram então inseridos num banho de água no ponto de ebulição (98,1 °C), num banho de água e gelo (0,2 °C) e num banho de propileno-glicol com temperaturas controladas de -10 °C e -19 °C. Como referência foi usado um termômetro padrão de mercúrio com precisão de $\pm 0,05$ °C e divisão de 0,1 °C, onde foram feitas as leituras para aferição dos resultados obtidos pelos termopares.

Foram realizadas as médias aritméticas de dez leituras de tensão fornecida pelos termopares para cada valor de temperatura previamente definido (ASTM, 1989).

Através da regressão linear da curva de tensão *versus* temperatura, obtiveram-se as equações de calibração para cada um dos termopares utilizados. Para facilitar a distribuição dos termopares na montagem, foi feita uma lista com novos códigos, indicando a localização de cada

termopar na montagem do palete, em correspondência com o número de identificação da localização no equipamento.

Uma lista com as identificações dos termopares na aquisição de dados, seu número correspondente à localização na montagem e as equações de calibração e os valores de R^2 obtidos estão apresentados no APÊNDICE A.

Os números apresentados no trabalho referem-se a esta nova designação, onde os códigos apresentam dois dígitos, sendo que o primeiro representa a camada onde estava a amostra monitorada, variando de 1 até 7. A camada inferior foi nomeada como 1, a camada imediatamente superior a esta foi a de número 2, e assim sucessivamente, até a camada superior que foi a sétima; e o segundo, a posição da amostra na camada, variando de 1 a 5, onde 5 é o centro da camada, e as amostras 1 a 4 estão localizadas nas extremidades (cantos) das camadas.

Apesar da primeira montagem testada (configuração industrial) possuir apenas 6 camadas de caixas, a designação dos termopares desta camada foi mantida como 7 (71, 72, ..., 75) para facilitar a identificação e efeito de comparação com os testes posteriores.

A numeração dos termopares, bem como sua posição na montagem, é apresentada na Figura 3-2 e Figura 3-3.

O sistema de aquisição de dados foi ligado juntamente com o acionamento do sistema de refrigeração da câmara em todos os ensaios, para acompanhamento da evolução da temperatura das amostras antes da ligação do túnel portátil.

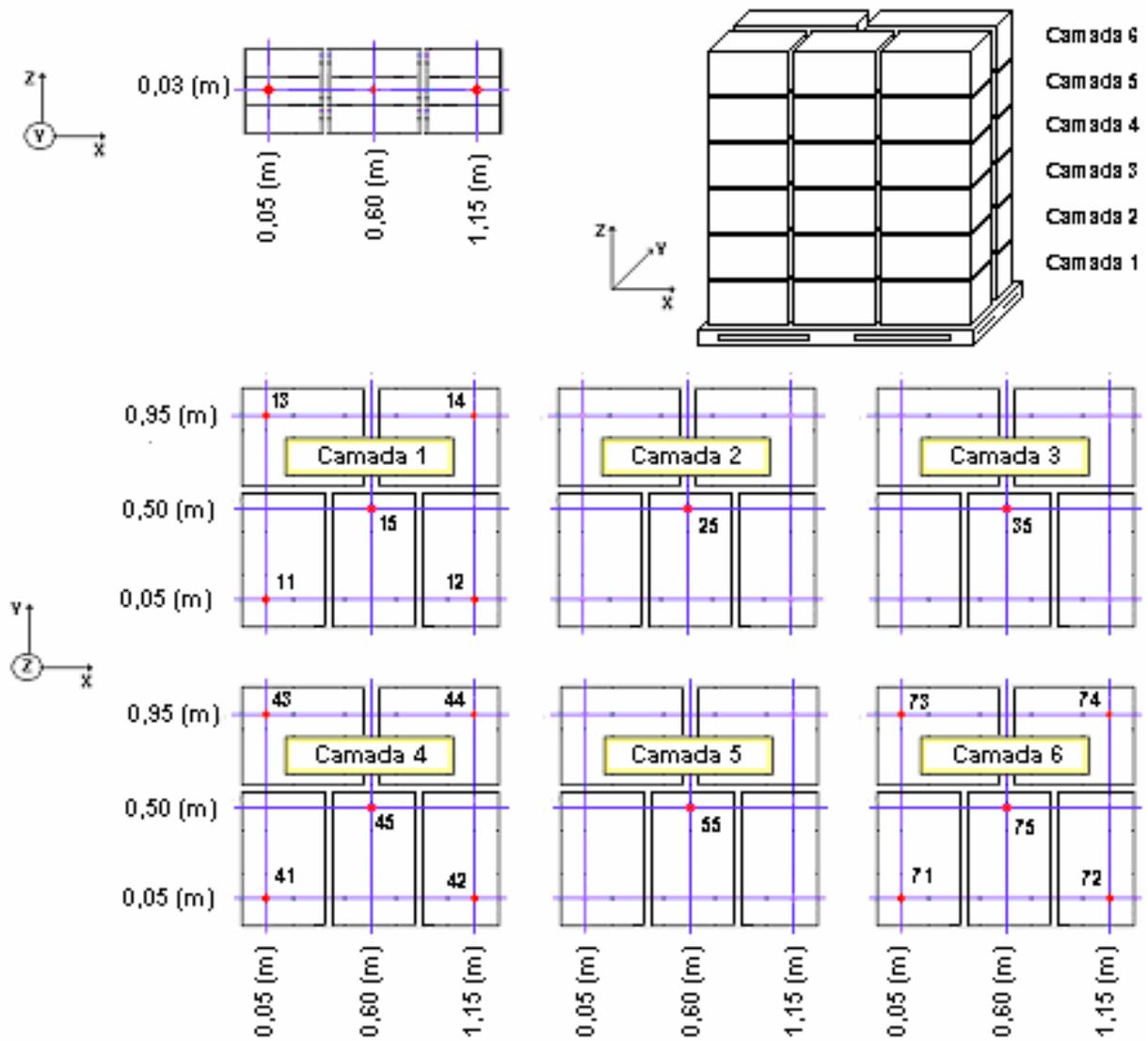


Figura 3-2. Distribuição e identificação dos sensores utilizados na montagem industrial do palete com seis camadas de caixas.

A Figura 3-3 ilustra a montagem para a nova distribuição das amostras nas caixas, onde foi necessário o aumento do número de caixas de trinta para trinta e cinco, representando uma camada de caixas a mais. A camada seis não apresentava pontos de monitoração nesta configuração, já que os termopares foram mantidos na camada superior de caixas da montagem, que neste caso passou a ser a camada sete, para efeito de comparação da influência do ar de escoamento na camada superior da montagem.

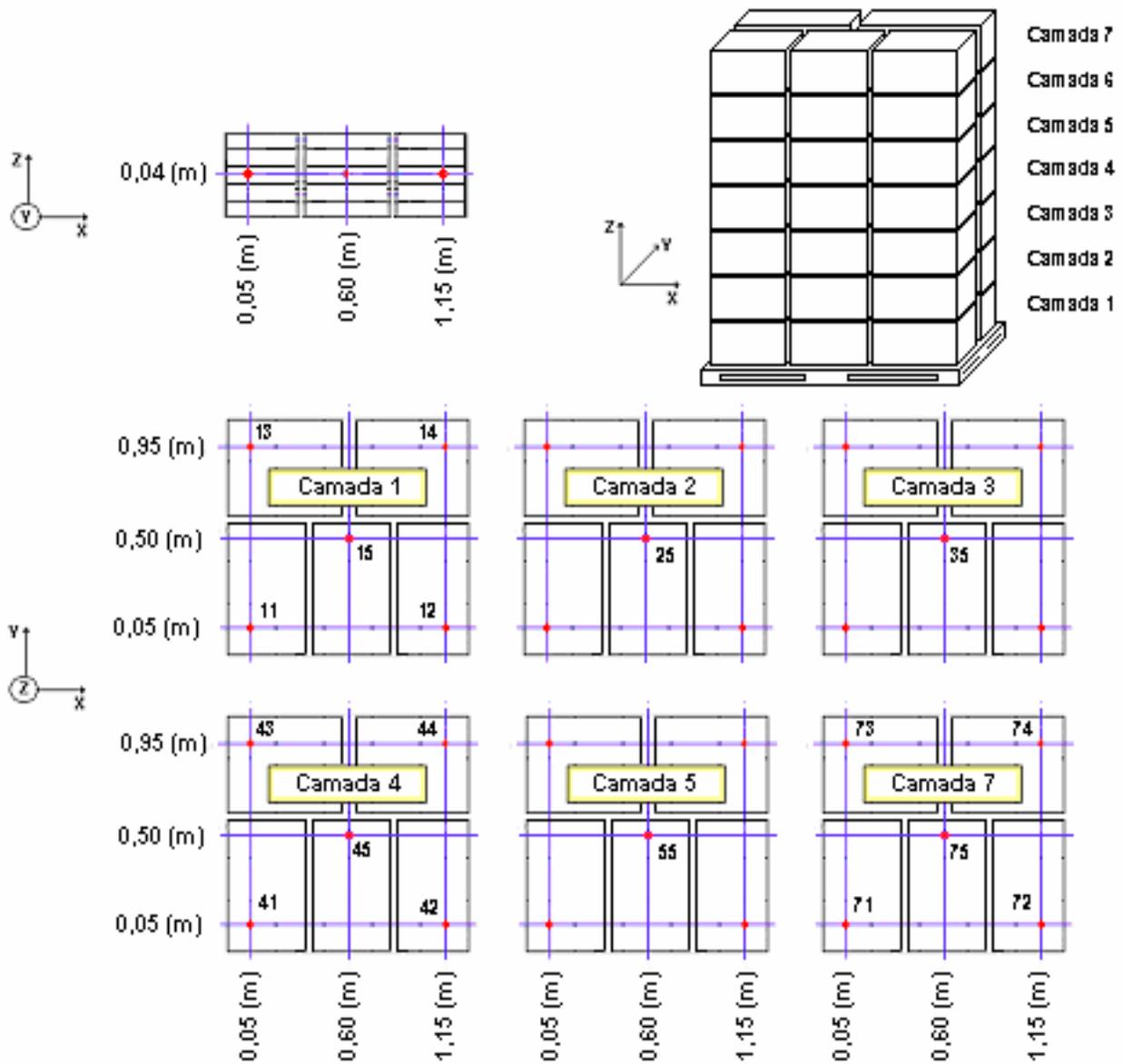


Figura 3-3. Distribuição e identificação dos sensores utilizados na nova montagem do palete (alternativa) com sete camadas de caixas.

3.4 ESTUDO PARA AVALIAÇÃO DA REPETIBILIDADE DO PROCESSO DE CONGELAMENTO (ESTABILIDADE TÉRMICA)

Um ensaio preliminar foi realizado para determinação da possibilidade de reutilização da solução modelo durante os testes na câmara de estocagem de produtos congelados. Foram preparadas triplicatas de amostras de 100 g da solução modelo. Para avaliação dos efeitos do

espessante (CMC) na estabilidade durante os processos de recongelamento foram preparadas triplicatas das soluções com 0,5%, 1,0% e 1,5% de espessante e com 15 e 30% de sacarose; totalizando 6 combinações diferentes de concentrações de CMC e sacarose.

Estas amostras foram acondicionadas em embalagens de polietileno e colocadas na câmara de estocagem para que fosse possível obter o perfil de temperatura *versus* tempo de congelamento, para determinar a temperatura inicial de congelamento das amostras. A câmara foi utilizada para a avaliação da cinética de congelamento das amostras, devido à baixa velocidade do congelamento, possibilitando a determinação da temperatura inicial de congelamento para os seguintes congelamentos do produto.

As amostras foram resfriadas a partir da temperatura ambiente até -20 °C e em seguida descongeladas. Este processo de congelamento e descongelamento foi realizado por seis vezes para cada solução, permitindo a avaliação da estabilidade térmica das soluções modelo utilizadas através de possíveis alterações nos pontos iniciais de congelamento das amostras em estudo. Estas alterações determinaram o número de ensaios possíveis de serem realizados para cada lote de solução modelo preparado, minimizando as alterações provocadas por repetidos processos de congelamento e descongelamento.

3.5 ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA DE CONGELAMENTO E MONTAGEM EXPERIMENTAL

Segundo VIGNEAULT et al. (2004), citado por VIGNEAULT et al. (2004a), TALBOT & FLETCHER (1996) e TERUEL (2000), não adianta projetar um bom sistema de resfriamento por ar forçado com parâmetros eficientes, se as embalagens forem inadequadas para o processo. Assim sendo, as embalagens utilizadas foram caixas plásticas empregadas comercialmente para congelamento de polpas, que possuem áreas de abertura tanto no fundo quanto nas laterais de forma a permitir o contato direto do ar com o produto a ser congelado.

As soluções modelo preparadas foram acondicionadas no interior da câmara de congelamento e sob o equipamento de circulação de ar para estudo do processo de congelamento.

Foram utilizadas 30 e 35 caixas plásticas em duas montagens diferentes das embalagens nas caixas. As caixas foram empilhadas sobre um palete padronizado de 1,00 x 1,20 m, em seis camadas na primeira montagem, e sete camadas na segunda configuração, com cinco caixas em cada camada, encostadas lateralmente umas às outras, conforme Figura 3-4.

As caixas foram encostadas exatamente conforme a montagem utilizada industrialmente, além de, desta maneira, impedir a formação de caminhos preferenciais para a circulação de ar sem que este entre em contato com o produto.

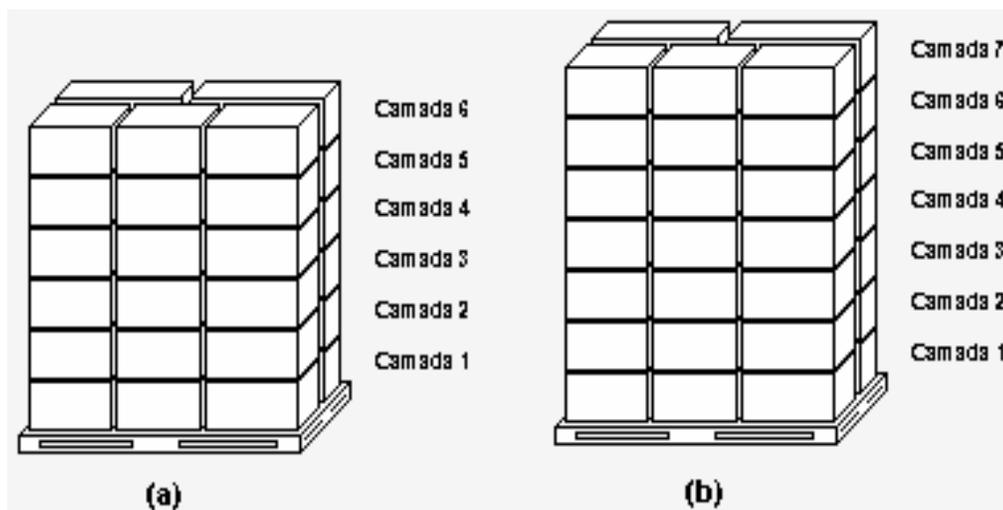


Figura 3-4. Disposição das caixas sobre o palete com: (a) seis camadas de caixas e (b) sete camadas de caixas.

Testes de resfriamento de frutas em paletes com ar forçado foram realizados por GRIERSON & BROWN (1975) para diferentes arranjos de empilhamento das caixas cobertas com uma lona. Os melhores resultados foram obtidos para o arranjo, onde se mantinham as laterais fechadas e as faces superior e inferior da montagem abertas, sem espaçamento entre as colunas de caixas. Esta montagem é similar à montagem utilizada comercialmente para o congelamento de polpas de frutas em túneis, a qual foi o tipo de arranjo dos produtos escolhido neste estudo.

Como os princípios de resfriamento são os mesmos, a alternativa de utilização de um sistema chamado de “túnel portátil”, do tipo “túnel californiano”, no processo de congelamento de alimentos, pode representar uma alternativa mais econômica de operação para o congelamento em batelada, direcionando o fluxo de ar diretamente em contato com o produto.

3.6 DISTRIBUIÇÃO DAS CAIXAS E PRODUTOS

O experimento foi conduzido com soluções modelo envasadas em embalagens plásticas de polietileno e acondicionadas em caixas de plástico produzidas pela Linpac Pisani Ltda., próprias para congelamento de alimentos, ilustrada na Figura 3-5. A caixa possui as seguintes dimensões externas: 60 cm de comprimento, 40 cm de largura e 12 cm de altura. A área de abertura da base da caixa corresponde a uma porcentagem superior a 21% da área total da base da caixa, cuja região foi perpendicular à direção do fluxo de ar. Este percentual de abertura está acima dos valores considerados mínimos e necessários a um bom escoamento do ar entre o produto, de acordo com os trabalhos encontrados na literatura.



Figura 3-5. Caixa plástica comercial utilizada em processos de congelamento.

Em cada caixa foram acondicionados inicialmente noventa e seis pacotes (saches) de solução modelo, distribuídas em três camadas (superior, central e inferior) de trinta e dois sachês, com 4 x 8 embalagens, todas encostadas entre si, correspondendo a aproximadamente 9,6 kg de produto, representando a quantidade utilizada no processo industrial. Esta montagem está apresentada na Figura 3-6.

As caixas foram dispostas em seis camadas com cinco caixas por camada, totalizando trinta caixas, simulando uma montagem de um palete comercial utilizado regularmente no processo.

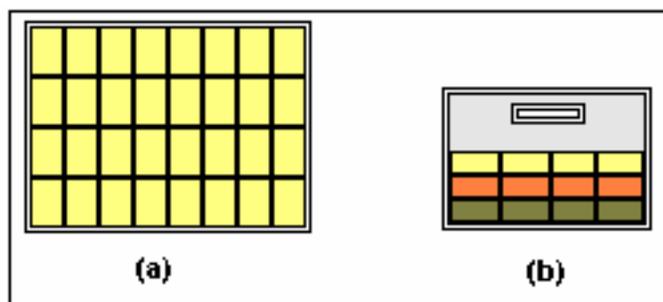


Figura 3-6. Distribuição utilizada industrialmente para as embalagens de polietileno nas caixas: (a) vista superior (elevação); (b) vista de perfil.

Uma segunda configuração das embalagens nas caixas foi testada após os primeiros ensaios, visando uma distância maior de espaçamento entre as embalagens no interior das caixas, de forma a melhorar a distribuição do ar ao redor do produto.

Nesta montagem, foram colocadas oitenta e quatro embalagens por caixa, distribuídas em cinco camadas (superior, centrais e inferior), sendo três camadas com vinte unidades, e duas camadas com doze unidades, intercaladas e com espaços para a passagem do ar, totalizando 8,6 kg de produto por caixa. A Figura 3-7 mostra a nova distribuição das embalagens nas caixas.

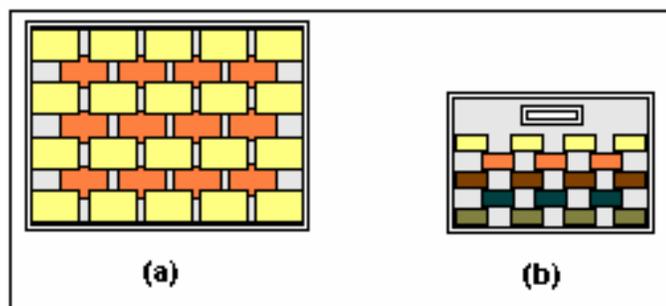


Figura 3-7. Distribuição alternativa proposta para as embalagens de polietileno nas caixas: (a) vista superior (elevação); (b) vista de perfil.

Na montagem total do palete, devido à diminuição do número de sachês da solução por caixa, foi adicionada uma camada de caixas, totalizando sete camadas com cinco caixas em cada uma das camadas, mantendo a mesma quantidade de produtos em ambas as configurações.

O sistema de congelamento projetado é constituído por um equipamento de ar forçado piloto, onde foi analisado o comportamento das amostras durante o processo de congelamento por convecção de ar forçado tanto com exaustão quanto com insuflação. O sistema foi montado com uma cobertura plástica conectada a um ventilador, através de um duto, que promove a

movimentação do ar através do produto. Esta cobertura plástica envolve as caixas contendo o produto, empilhadas sobre um palete de transporte comercial.

O ar promove o resfriamento do produto ao passar pelas áreas de abertura da caixa e através do produto. Na exaustão, o sistema é montado de forma que o duto é conectado à sucção do ventilador, direcionando o fluxo de ar do produto através do ventilador para o evaporador no interior da câmara. Na insuflação, a conexão é invertida e conectada à saída do ventilador, que insufla o ar frio do interior da câmara diretamente para as amostras. A circulação do ar forçado no interior da montagem tem direção vertical, tanto na insuflação como na exaustão, diferentemente de outros túneis encontrados comercialmente e na literatura. Na exaustão o sentido é da base do palete para a parte superior, enquanto na insuflação o ar é forçado da parte superior do palete até a base.

Também foram realizados experimentos mistos, onde foram utilizados os dois sentidos de circulação do ar num mesmo ensaio com cada um deles realizado durante aproximadamente metade do tempo de processo. Dois ensaios deste tipo foram testados, um iniciado com a exaustão do ar e após aproximadamente 24 horas invertido para insuflação e outro iniciado com insuflação e alterado para exaustão.

O ventilador utilizado no túnel portátil é do tipo de hélices axiais com motor de indução trifásico da Weg, modelo 71586 e 0,5 cv, acoplado ao duto de alumínio flexível, que por sua vez foi conectado à estrutura metálica do difusor que realizará a sustentação da cobertura plástica sobre o palete. Todo o equipamento foi montado no Laboratório de Refrigeração da FEA/Unicamp, conforme esquema mostrado na Figura 3-8.

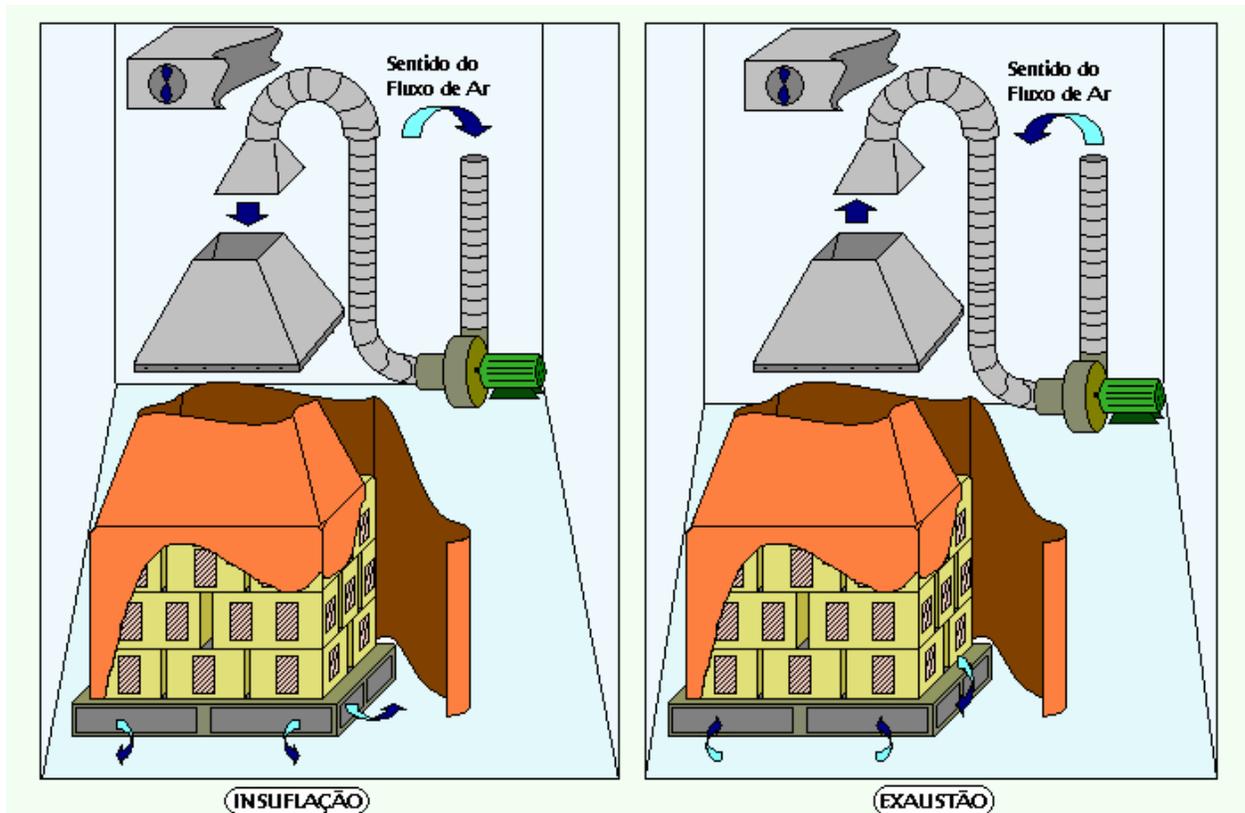


Figura 3-8. Montagem do túnel portátil com o empilhamento das caixas cobertas com o plástico e posicionamento do ventilador durante a insuflação e exaustão.

Foi utilizado um difusor conectado ao final do duto de alumínio de escoamento do ar, que foi colocado na parte superior do palete. Para o encaixe do duto metálico no difusor, foi instalado um tubo de PVC para fazer a transição da seção circular do duto para a seção retangular do difusor.

O difusor foi construído com cantoneiras de alumínio estruturadas de forma trapezoidal, sendo que a base maior da estrutura tinha as dimensões do palete (1,00 x 1,20 m) e a parte superior foi serrada e estruturada no formato circular para conectar ao PVC ligado ao duto de alumínio. Nas laterais da estrutura, fios de cobre foram colocados de forma a preencher a área livre na face da estrutura, formando a sustentação para a lona plástica que teve a função de fazer a vedação da estrutura conectada ao palete e evitando que a mesma fosse succionada durante a exaustão.

A disponibilidade de espaço foi decisiva na determinação do comprimento e inclinação deste difusor, uma vez que o fluxo de ar foi na direção vertical, sendo, portanto a altura da

câmara um fator limitante. Não foi possível, assim, construir esta peça com os parâmetros considerados ideais, conforme o procedimento descrito em ASHRAE HANDBOOK (1977) para o fluxo difusor, no caso para a insuflação, já que na exaustão o fluxo seria convergente e exigiria uma altura menor da peça para uma adequada distribuição do ar.

Todo o conjunto de equipamentos foi alocado no interior de uma câmara de estocagem de produtos congelados, marca Recrusul, e que está instalada no Laboratório de Refrigeração da FEA/Unicamp, montada segundo o esquema da Figura 3-9.

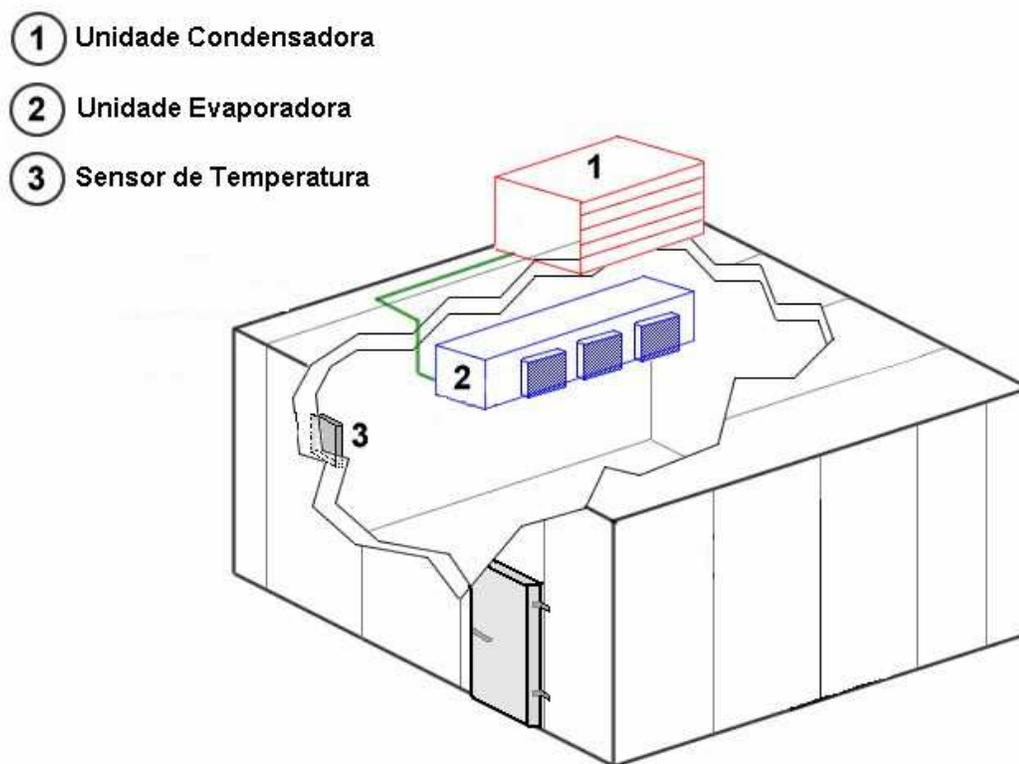


Figura 3-9. Esquema da câmara de congelamento: 1.Unidade condensadora, 2.Unidade Evaporadora, 3. Sensor de temperatura.

A câmara de estocagem de congelados é constituída de painéis pré-fabricados revestidos de chapa galvanizada e isolada termicamente com espuma rígida de poliuretano injetado com espessura de 0,30 m. Possui dimensões internas de 3,06 m x 3,06 m x 2,30 m de altura. O sistema de refrigeração da câmara é composto de um compressor aberto (Bock Compressores® modelo FK3), operando com refrigerante R-12, sistema de condensação a ar e expansão direta do refrigerante no evaporador. As especificações técnicas da câmara de congelamento são apresentados na Tabela 3-1.

Tabela 3-1. Características da câmara de congelamento

Compressor		Evaporador	
Marca	Bock	Marca	Recrusul
Modelo	FK3	Modelo	16.06.74.0600
Refrigerante	R-12	Superfície de troca de calor	25,18 m ²
Regime de Trabalho	-25/45 °C	Vazão de ar	5683 m ³ /h
Capacidade (no regime)	2000 kcal/h	Número de ventiladores	1
Potência do motor	4 cv	Potência do motor	0,5 cv
		Área de face	0,374 m ²

O controle de temperatura do ar na câmara é feito por meio de termostato, atuando sobre válvulas solenóides que são fechadas na entrada do evaporador, promovendo a redução da pressão de sucção no compressor, que é desligado (*pump-down*) quando a temperatura no interior da câmara atingir o valor que foi ajustado no termostato.

Como o compressor é do tipo aberto, foi possível realizar um ajuste para operar em dois regimes, de acordo com o tamanho da polia do motor. Para a alteração da capacidade do compressor, foi traçada a sua curva de eficiência, para avaliar a possibilidade e o ponto ideal, da temperatura de evaporação e a capacidade do sistema. As rotações do motor e do compressor foram medidas com tacômetro a laser LT modelo DT-2236, com fundo de escala de 2,5 a 99999 rpm e erro de 0,05% (na leitura).

Foi realizada a avaliação da capacidade do equipamento de refrigeração, a fim de comparar com a carga térmica estimada do produto e verificar os efeitos com os parâmetros utilizados, por exemplo, vazão de ar, temperatura, capacidade do sistema frigorífico, atuando no equipamento do túnel portátil desenvolvido.

O sistema do túnel portátil montado para o desenvolvimento dos testes tem dimensões reais utilizadas em processos industriais de congelamento. A câmara, porém, por ser dimensionada para armazenamento de produtos e não para o processo de congelamento propriamente dito, não possuía capacidade suficiente para congelar todo o produto utilizado nos testes num período adequado. Por isto o sistema foi testado aproveitando-se o máximo de sua capacidade, de maneira a ser utilizado para uma rápida retirada de calor sem a utilização de um túnel de congelamento.

Foram efetivados testes preliminares do congelamento das amostras para verificar possíveis dificuldades que poderiam surgir na montagem experimental definitiva.

3.7 DISTRIBUIÇÃO DOS SENSORES NA CARGA

Foi monitorada uma amostra em cada uma das cinco caixas componentes das camadas inferior, central e superior da montagem. Para ambas as configurações de amostras nas caixas, foram instrumentadas aquelas localizadas nos vértices da montagem, na camada central das amostras na caixa, além da amostra no centro da camada. Nas outras camadas, foi monitorada apenas uma amostra na posição geometricamente central do palete, totalizando assim 18 pontos de monitoração de temperaturas nas amostras. As localizações dos sensores são apresentadas na Figura 3-2 e Figura 3-3, mostradas anteriormente (item 3.3), para ambas as configurações de 6 e 7 camadas.

Os sensores foram posicionados no centro de cada amostra monitorada. Para conseguir a fixação da extremidade do termopar no centro da embalagem, foram utilizados pequenos cilindros plásticos de polipropileno, com a base fechada e o topo aberto, os quais foram perfurados na base para o encaixe e fixação do corpo do termopar, que ficava com a ponta no interior do cilindro. Este por sua vez, por ter o topo aberto, permitia o contato da solução com a extremidade do termopar. A sua base e as laterais impediam que a ponta do termopar entrasse em contato com a embalagem, assegurando que a medida fosse realizada no centro do produto (Figura 3-10).

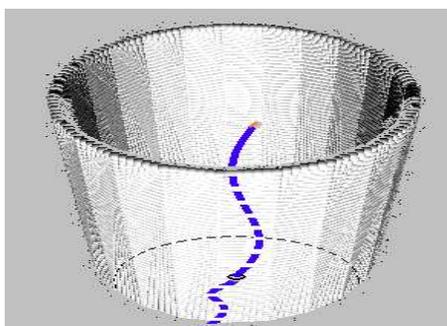


Figura 3-10. Esquema com a montagem para fixação do termopar no centro das embalagens.

Além das amostras, cinco corpos de prova de alumínio para o cálculo do valor de h_c , foram monitorados, com 3 sensores em cada um. O corpo de prova foi posicionado sobre a camada superior das embalagens do produto, de forma que uma das faces exposta entrasse em contato direto com o ar de resfriamento em circulação (Figura 3-11).

Os 5 corpos de prova foram identificados (T1 a T5) e distribuídos nas camadas 1, 3, 4, 5 e 7, respectivamente. Para a montagem inicial do palete, onde havia seis camadas de caixas, o corpo de prova T5 foi alocado na camada 6.

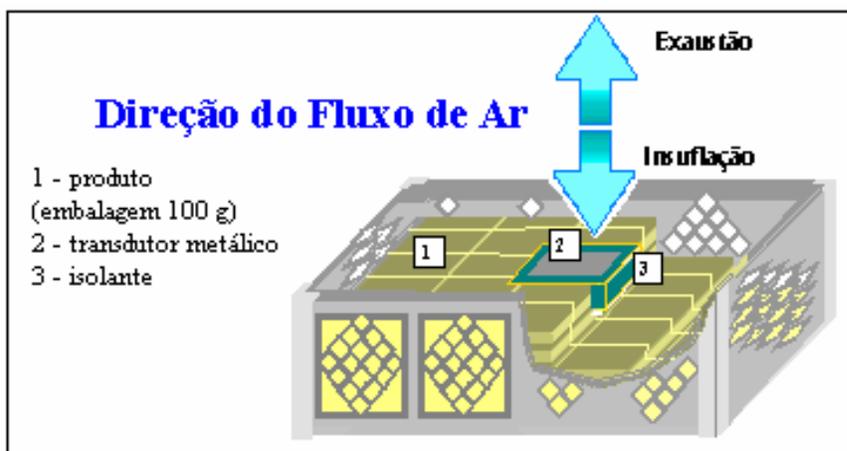


Figura 3-11. Localização do corpo de prova de alumínio na caixa de produtos.

Também foram distribuídos outros quatro sensores para monitoração das temperaturas do ar de circulação no interior da câmara e no palete (Figura 3-12).

O sensor localizado junto ao sensor de temperatura da câmara, no retorno do ar, forneceu os valores de temperatura do ar interno utilizados nos gráficos de cinética de congelamento das amostras.

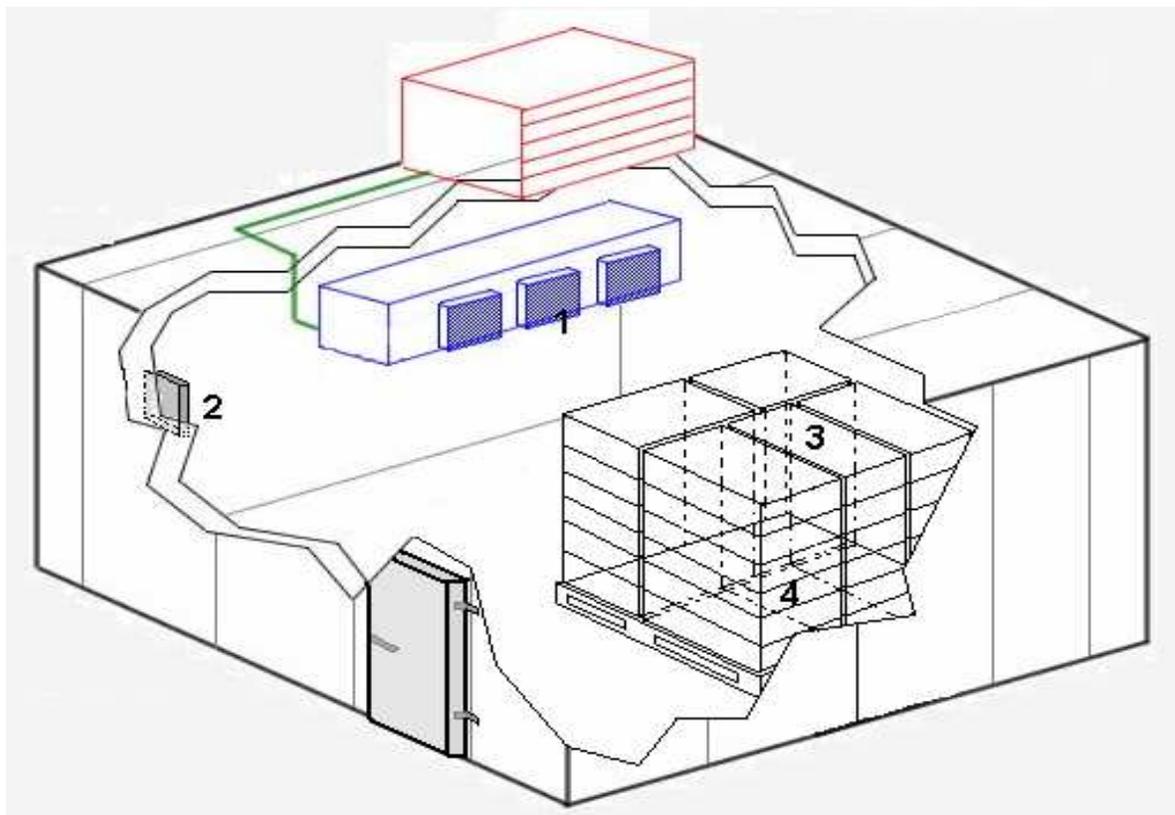


Figura 3-12. Localização dos sensores distribuídos para acompanhamento das temperaturas do ar de circulação: 1. evaporador da câmara; 2. sensor de temperatura do termostato da câmara (retorno do ar); 3. parte superior da montagem de caixas do palete; 4. parte inferior da montagem de caixas do palete.

3.8 ESTABILIZAÇÃO DA TEMPERATURA INICIAL

Para cada ensaio de congelamento realizado, existia a dificuldade de movimentação do produto para entrada e retirada da câmara ao início e final de cada ensaio, já que se tornou impossível deixar o produto fora da câmara aguardando a estabilização da temperatura interna no equipamento para depois colocar todas as amostras dentro da câmara sem alterar a temperatura.

Para minimizar os efeitos da diferença de temperatura inicial do produto e o problema de estabilização e manutenção da temperatura do ar no interior da câmara, decidiu-se deixar o palete dentro da câmara e mantê-lo isolado termicamente da melhor forma possível, para que o sistema de refrigeração fosse ligado e não houvesse alteração significativa na temperatura do produto.

Assim, foram utilizadas placas de poliestireno expandido montadas ao redor do palete, dispostas de maneira a formar uma barreira térmica e um tapete de borracha e plástico foi

colocado na base da câmara, sob o palete, para manter a temperatura do produto sem influência da temperatura do ar interno, conforme mostrado na Figura 3-13.

Esta metodologia foi adotada para que os ensaios tivessem início com as amostras a uma temperatura comum e homogênea, de forma a simular a entrada do produto na câmara num processo real. Este procedimento foi devido à impossibilidade de retirada e realocação do sistema na câmara a cada novo ensaio.

Em seguida, o conjunto de aquisição de dados e o sistema de resfriamento da câmara foram ligados, aguardando que a temperatura do ar no interior atingisse $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. As amostras foram monitoradas desde o instante em que o sistema da câmara foi ligado, para acompanhamento da temperatura do produto antes do acionamento do ventilador do túnel.

Após um determinado período, que variou entre 5 e 7 horas conforme a capacidade do compressor, quando a temperatura do ar no interior da câmara aproximava-se de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, as placas de poliestireno expandido eram retiradas e o túnel portátil era acionado para iniciar o processo de congelamento.

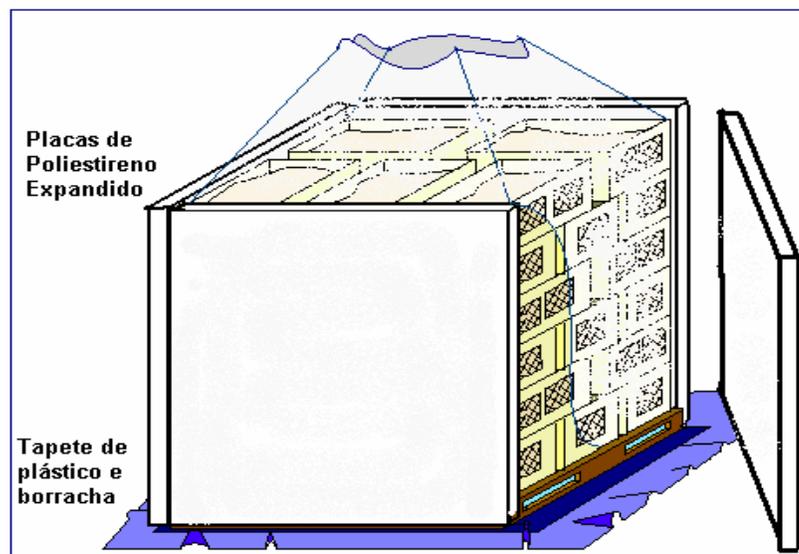


Figura 3-13. Placas de poliestireno expandido e tapete de plástico e borracha para barreira térmica da montagem.

3.9 MONTAGEM DO CORPO DE PROVA METÁLICO PARA A DETERMINAÇÃO DOS VALORES DE H_c E CÁLCULO DOS COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO

Os experimentos para a determinação dos coeficientes de transferência de calor por convecção durante o congelamento das amostras de solução modelo embaladas em sacos de polietileno e acondicionadas em caixas foram realizados segundo procedimento semelhante ao descrito por LE BLANC et al. (1990a, b) e RESENDE et al. (2002), usando um corpo de prova metálico de alta condutividade térmica.

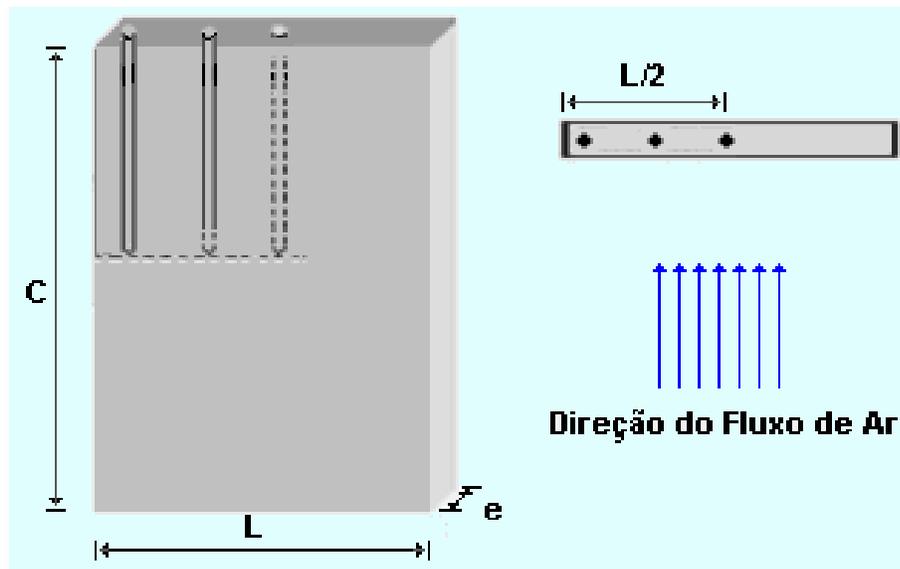


Figura 3-14. Esquema de construção do corpo de prova metálico com a direção do fluxo de ar (vertical) para ambos os ensaios de exaustão e insuflação.

O corpo de prova, conforme esquema apresentado na Figura 3-14, consiste de uma placa de alumínio com dimensões aproximadamente semelhantes às dimensões das amostras, perfurado em espaçamentos e profundidades iguais, na face formada pela largura e espessura da placa, do centro em direção à superfície lateral. Nestas perfurações foram inseridos os termopares tipo T (cobre-constantan), com os espaços vazios em volta dos termopares preenchidos com pasta térmica para evitar formação de bolsas de ar dentro das perfurações.

Os parâmetros geométricos da placa estão apresentados na Tabela 3-2.

Tabela 3-2. Parâmetros geométricos para a placa de alumínio

Comprimento (m)	$(10,15 \pm 0,05) \times 10^{-2}$
Largura (m)	$(6,95 \pm 0,05) \times 10^{-2}$
Espessura (m)	$(2,55 \pm 0,05) \times 10^{-2}$
Área do plano comp. x larg.(m ²)	$(7,0917 \pm 0,0025) \times 10^{-3}$
Volume (m ³)	$1,8084 \times 10^{-4}$

O corpo de prova foi revestido com isolante térmico de espuma elastomérica em todos os lados da placa, exceto as faces com maior área superficial, perpendiculares ao escoamento do fluxo de ar, para garantir um fluxo de calor unidirecional.

O processo de resfriamento rápido apresenta um comportamento exponencial, verificado por diversos autores para produtos hortícolas (MOHSENIN, 1980 e DINCER, 1995a). A curva de resfriamento rápido pode ser descrita pela Equação 9:

$$\frac{(T - T_{\infty})}{(T_i - T_{\infty})} = e^{-S_2 \cdot t} \quad (9)$$

que é simplesmente uma simplificação da Equação 4 apresentada, onde T é o valor médio obtido a partir dos valores das leituras dos três termopares localizados no interior do corpo de prova metálico ao longo do tempo de resfriamento, T_i é a temperatura inicial da placa de alumínio e T_∞ é a temperatura do meio de resfriamento.

O parâmetro S₂ representa o coeficiente de resfriamento, definido como a mudança de temperatura do produto ou material (neste caso o corpo de prova de alumínio) por unidade de tempo para cada grau de diferença de temperatura entre o produto e o meio de resfriamento. Inicialmente é expressa em h⁻¹ e posteriormente transformada em s⁻¹ para adequação às unidades do coeficiente de convecção.

Uma amostra de material metálico foi monitorada juntamente com as amostras de solução modelo durante os ensaios de congelamento para estimativa do coeficiente de película em cada posição.

Através da obtenção dos valores de S_2 , foram calculados os coeficientes de transferência de calor efetivos para a parte de retirada do calor sensível das amostras, durante o processo de resfriamento, através da Equação 10:

$$h_{efetivo} = \frac{-\rho_{Al} V C_{p,Al} S_2}{A} \quad (10)$$

As propriedades termofísicas para o corpo de prova de alumínio utilizados para o cálculo do coeficiente de convecção estão apresentadas na Tabela 3-3.

Tabela 3-3. Propriedades Termofísicas do Alumínio (WELTY et al., 1984)

Densidade ρ_{Al} (kg/m ³)	Calor Específico $C_{p,Al}$ (J/kg °C)	Condutividade Térmica k_{Al} (W/mK)
2701,1	904	229

Assim, o objetivo desta etapa foi avaliar o coeficiente de convecção local de transferência de calor, aplicado para a montagem sugerida neste projeto, levando em consideração a localização entre as camadas de produtos na montagem.

3.10 DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE CONGELAMENTO

Nesta etapa, foi determinado o tempo de congelamento total, sendo o tempo necessário para reduzir a temperatura do produto desde a temperatura de equilíbrio do palete de 10 a 15 °C, passando pelo ponto de início de congelamento, até que o centro térmico atingisse -18 °C. Esta temperatura foi escolhida por ser a mais comumente utilizada comercialmente, e por representar um parâmetro, onde já se encontram poucas atividades enzimáticas e microbiológicas no alimento.

Foram monitoradas as temperaturas do lote de produtos durante o congelamento e da temperatura interna da câmara para determinar as condições de operação sobre o produto que estava armazenado a temperatura de equilíbrio. Desta maneira também foi possível acompanhar as alterações de temperatura do sistema de controle da câmara. Este foi o fator escolhido para análise do processo de congelamento, comparando a eficiência entre os métodos de insuflação e exaustão de ar.

Para o início do processo, o produto foi mantido dentro da câmara já em funcionamento. As amostras, depois de estabilizadas em temperatura constante em torno de 10 a 15 °C, foram congeladas e monitoradas até que a temperatura do centro térmico atingisse -18 °C.

Nesta etapa foi possível analisar o perfil de temperatura durante o processo de congelamento das amostras monitoradas, verificando a diferença existente entre as amostras relativas à sua localização na montagem e comparar com o coeficiente de transferência de calor por convecção obtido para a camada monitorada.

3.11 DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DO AR DE ESCOAMENTO

Para as medidas de velocidade do ar, foi utilizado um anemômetro de fio quente (Tri-Sense®, modelo EW-37000-00 da Fabricante Cole-Parmer Instrument Company, IL, USA), que segundo NUNES et al. (2003), é, juntamente com o “flowhood”, o método mais indicado para leituras de velocidade do ar em túneis de escoamento.

O sensor do anemômetro foi inserido através de aberturas no difusor de ar para medição da velocidade do ar em diferentes pontos da área perpendicular ao escoamento. As aberturas foram alinhadas e espaçadas em intervalos regulares. O sensor foi introduzido para medição da velocidade do ar variando-se a profundidade da inserção do mesmo, fornecendo pontos fixos no plano perpendicular ao fluxo de ar, de forma a realizar uma varredura das velocidades do ar medidas através desta área, conforme apresentado na Figura 3-15.

Foram medidas as velocidades para comparação entre os ensaios de exaustão e insuflação de ar com o ventilador operando em regime constante, sem obstruções na linha de escoamento do ar.

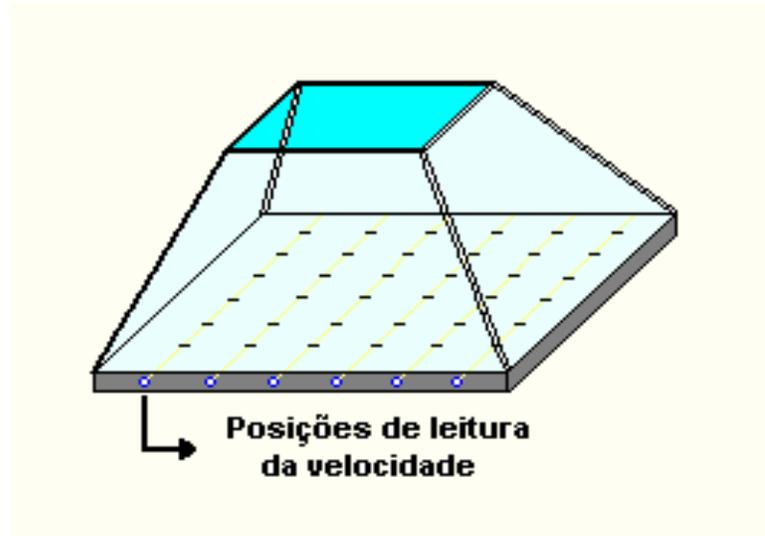


Figura 3-15. Posicionamento do sensor para leituras da velocidade do ar em múltiplos pontos da seção de fluxo do ar de congelamento, tanto na insuflação quanto na exaustão.

A vazão do ar de escoamento foi calculada através da Equação 7, utilizando-se os valores de velocidade obtidos nas medidas do anemômetro e calculando a velocidade média. Para a área de escoamento, foi considerado o espaço retangular compreendido pelas superfícies das cinco caixas que formavam a camada no palete com os valores das laterais da superfície variando no plano cartesiano de $0 \leq y (D1) \leq 1,2$ (m) e $0 \leq x (D2) \leq 1,0$ (m).

Também foi medida a velocidade de circulação do ar no interior da câmara, já que pode ser considerado como o ar de circulação no ensaio de referência, para comparação dos valores de velocidade do ar obtidos com o túnel portátil.

3.12 DETERMINAÇÃO DA HETEROGENEIDADE DO RESFRIAMENTO

O processo de congelamento com a utilização do túnel envolveu razoável complexidade de fatores exercendo influência nos ensaios. Assim, para avaliar a eficiência dos processos de circulação de ar no túnel, foram analisados diversos parâmetros além do tempo de congelamento. Um método foi desenvolvido para comparação da distribuição da temperatura no interior do palete. Este método teve como objetivo avaliar a heterogeneidade da temperatura nas diferentes posições do palete ao longo do processo.

Para obtenção deste parâmetro, partiu-se da equação de transferência de calor entre o meio de resfriamento e o produto (Equação 11):

$$Q = mc_p \Delta T \quad (11)$$

onde Q é a energia do produto em um determinado instante (J), m é a massa de produto (kg), c_p é o calor específico do produto (J/kg°C), e ΔT a diferença de temperatura no resfriamento do produto com relação a uma temperatura de referência (°C).

Sabe-se que a quantidade de energia total do palete é equivalente à soma das energias do produto de todas as partes do palete. Este cálculo é representado pela Equação 12:

$$m_t c_p \bar{T}_c = \frac{\int m_i c_p T_{(x,y,z)} dV}{\int dV} \quad (12)$$

onde m_t é a massa total do produto no palete, \bar{T}_c é a temperatura média representativa do produto na camada, m_i é a massa local de uma parte infinitesimal de produto, $T_{(x,y,z)} = T_i - T_{ref}$ é a temperatura desta massa local e T_{ref} é igual a 0 °C.

Assim, a temperatura média representativa do produto na camada num dado momento é:

$$\bar{T}_c = \frac{\Sigma(m_i T_i)}{m_t} \quad (13)$$

Partindo dos valores de \bar{T}_c obtidos, foi calculada a diferença de temperaturas entre os valores de temperatura média representativa (\bar{T}_c), obtidos para cada camada de caixas na montagem, e as temperaturas mínimas e máximas do produto ao longo do processo de congelamento. Assim a variação da temperatura de cada ponto na camada é determinada pela diferença da distribuição de temperatura das camadas na montagem.

$$\Delta T_c = \bar{T}_c - T_{\min} \quad \text{ou} \quad \Delta T_c = \bar{T}_c - T_{\max}$$

Este cálculo pode ser aplicado para avaliar a variação da temperatura média entre as camadas no palete, sendo

$$\Delta T_p = \bar{T}_p - \bar{T}_{c_{\min}} \quad \text{ou} \quad \Delta T_p = \bar{T}_p - \bar{T}_{c_{\max}}$$

Foram traçados os gráficos com os perfis de congelamento a partir dos valores obtidos da regressão não-linear para a temperatura média das camadas inferior, central e superior. Também foram feitos os gráficos com os valores da diferença entre as temperaturas máxima e mínima em relação à temperatura média (ΔT) obtidos ao longo do processo. Estes gráficos possibilitam visualizar a variação da temperatura entre as amostras monitoradas.

3.13 FATOR DE HETEROGENEIDADE

Um fator adimensional de heterogeneidade foi sugerido para avaliar a dispersão das temperaturas em comparação com a temperatura média, a fim de demonstrar o desempenho do resfriamento obtido pelos diferentes processos de circulação do ar forçado através do produto, a partir dos valores de \bar{T}_c e ΔT calculados, avaliando a dispersão dos valores de temperatura na montagem em relação à temperatura média.

Este fator foi definido como a razão entre a raiz quadrada do somatório dos quadrados dos valores de ΔT_c e dividido pelo número de leituras realizado, pelos valores de \bar{T}_c obtidos durante o congelamento, conforme mostrado na Equação 14:

$$\phi = \frac{\sqrt{\frac{\sum (\Delta T_c)^2}{n}}}{\bar{T}_c} \quad (14)$$

Os valores das diferenças de temperaturas foram ponderados para reduzir a influência de valores com grande discrepância entre as temperaturas máxima ou mínima e a temperatura média da camada (ou do palete).

O valor mínimo do fator de heterogeneidade é 0 (zero), que representa uma distribuição perfeita da temperatura no interior da montagem, sem a existência de diferenças entre as amostras. Quanto maior o valor de ϕ , maior a diferença da temperatura entre os diferentes pontos de amostragem considerados.

4 RESULTADOS

4.1 ESTABILIDADE TÉRMICA DO PRODUTO EM PROCESSOS DE RE-CONGELAMENTO

Com o objetivo de utilizar as mesmas amostras em diferentes ensaios de congelamento, foi necessário avaliar a estabilidade térmica em repetidos processos de congelamento/recongelamento, avaliando os parâmetros de temperatura de início de congelamento para demonstrar a não interferência estrutural da amostra remanescente.

4.1.1 Avaliação da estabilidade térmica pela temperatura de início de congelamento

Os resultados de temperatura inicial de congelamento para as mesmas amostras com 0,5, 1,0 e 1,5% de CMC; e 15% e 30% de sacarose, para seis ensaios de congelamentos subsequentes, são apresentados na Figura 4-1, Figura 4-2 e Figura 4-3.

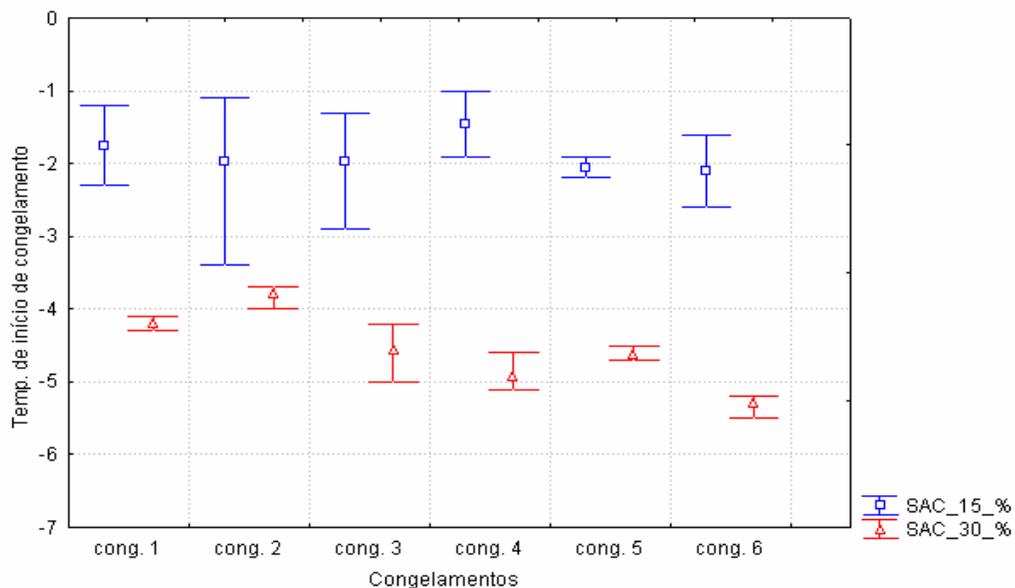


Figura 4-1. Variação da temperatura inicial de congelamento obtida para vários recongelamentos, para as amostras de solução modelo com diferentes concentrações de sacarose e 0,5% de espessante (CMC).

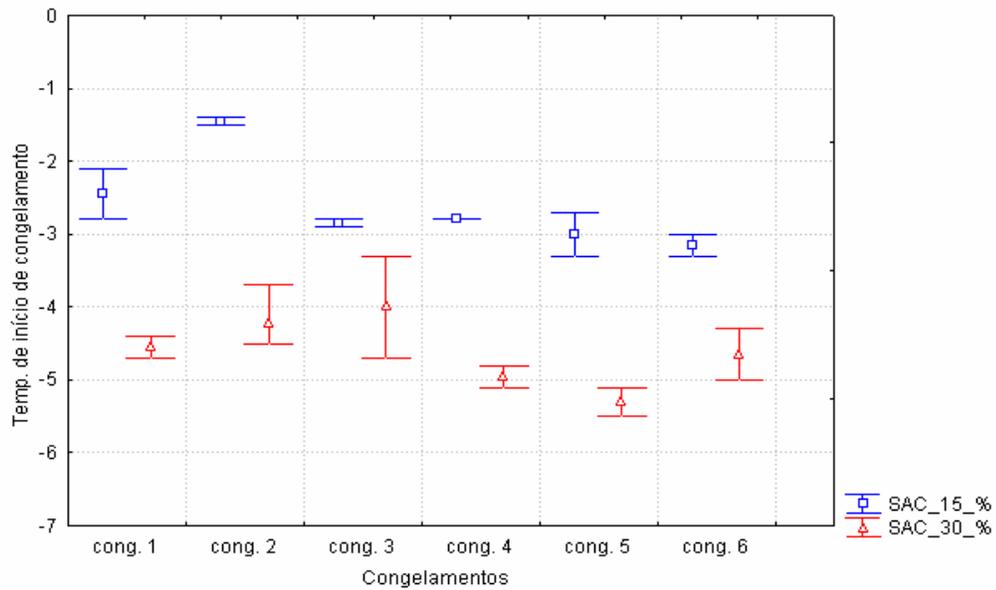


Figura 4-2. Variação da temperatura inicial de congelamento obtida para vários recongelamentos, para as amostras de solução modelo com diferentes concentrações de sacarose e 1,0% de espessante (CMC).

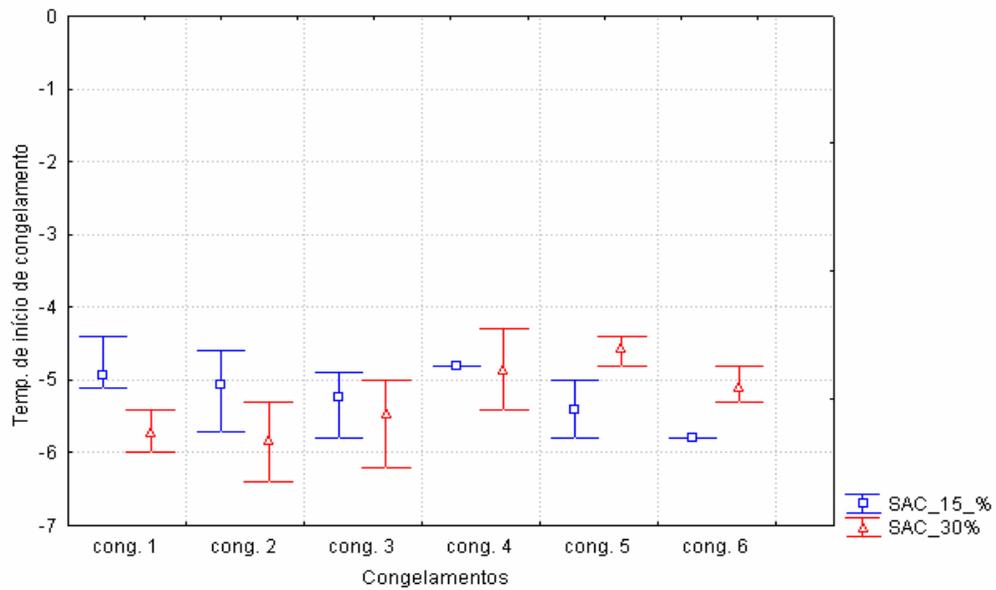


Figura 4-3. Variação da temperatura inicial de congelamento obtida para vários recongelamentos, para as amostras de solução modelo com diferentes concentrações de sacarose e 1,5% de espessante (CMC).

Estes gráficos mostram que existe uma variação do ponto de congelamento das amostras com o aumento da concentração de sólidos. Para as amostras com mesma concentração de sacarose, os valores das temperaturas iniciais de congelamento apresentaram uma redução, com

o aumento da concentração de CMC (Figura 4-4) e as amostras com mesma concentração de CMC apresentaram redução do ponto de congelamento com o aumento da concentração de sacarose.

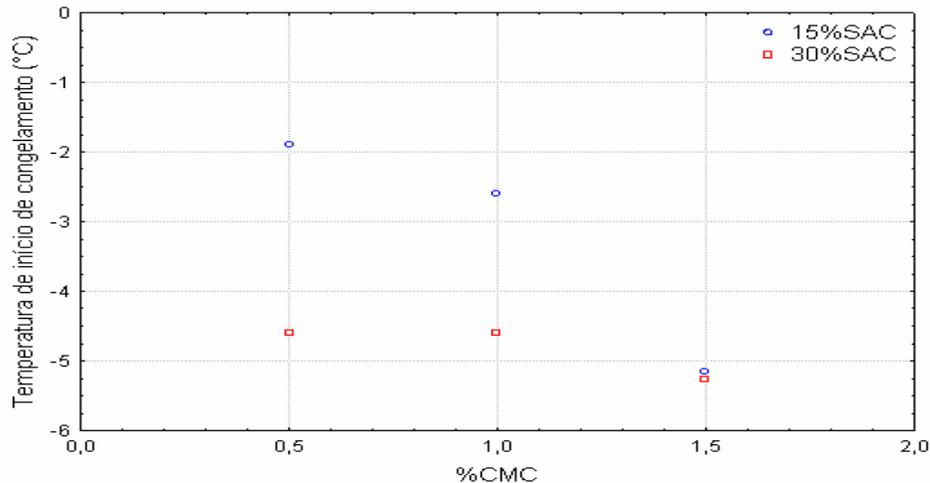


Figura 4-4. Variação da temperatura inicial de congelamento para soluções contendo 15% e 30% sacarose e diferentes concentrações de espessante CMC.

Porém, não foi observada diferença representativa da temperatura de início de congelamento, devido aos processos de recongelamento e nem existe uma tendência de diminuição desta temperatura com o aumento dos processos de congelamento/recongelamento. Além disso, baixas concentrações apresentaram menor variação desta propriedade nas repetições e maior estabilidade nos resultados das soluções, sendo, portanto, escolhidas para o trabalho desenvolvido.

4.2 AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO E PROCESSO DE CONGELAMENTO

Os cálculos da capacidade térmica do sistema de refrigeração da câmara de armazenamento-congelamento foram feitos para projeção do tempo de congelamento da solução modelo utilizada nos ensaios.

O gráfico de capacidade de refrigeração do compressor (anexo B) fornecido pelo representante da empresa (Bock Kältemaschinen GmbH, Frickenhausen, Alemanha) indica uma

capacidade frigorífica da câmara de 2000 kcal/h no regime de operação com temperatura de condensação (T_c) a 45° C e temperatura de evaporação (T_e) a -25° C a uma rotação do compressor de 950 rpm e com uma rotação nominal do motor de 1767 rpm.

Porém, o que foi encontrado na prática com o tacômetro foi um motor operando a 1720 rpm, e o compressor, com uma polia de 11 cm de diâmetro, operando a 860 rpm, o que causava uma redução de capacidade frigorífica do sistema para aproximadamente 1700 kcal/h.

Pela equação do volume teórico deslocado pelo compressor, tem-se:

$$V_t = V_p \cdot n \cdot i \quad (15)$$

onde:

V_p = volume do cilindro do pistão (m^3);

n = frequência de rotações do pistão (rpm);

i = número de cilindros.

E expandindo a equação para o volume do cilindro do pistão:

$$V_t = \frac{D^2 \cdot \pi}{4} \cdot e \cdot n \cdot i \cdot 60 \quad (16)$$

onde:

D = diâmetro do cilindro (m);

e = curso do pistão (m).

Segundo informações do fabricante, o compressor possui dois cilindros de 55 mm de diâmetro e curso de elevação de 49 mm. Com estas informações, chega-se a um volume teórico do compressor de 12 m^3/h . Este valor servirá como referência para avaliar o desempenho do compressor no caso de substituição de alguma peça, como foi feito neste trabalho, com o objetivo de variar a capacidade do sistema.

Foram feitos testes com o túnel portátil nestas condições, e os resultados obtidos para estes ensaios são apresentados no APÊNDICE F.

Para efeito de comparação, foi realizado também o cálculo da carga térmica para a qual o sistema foi projetado, representadas pela perda de calor do sistema através de transmissão,

infiltração e do motor dos ventiladores, bem como da manutenção da temperatura do produto em seu interior.

Para a estimativa da quantidade de transferência de calor por transmissão pelas paredes laterais, teto e piso da câmara, foi calculado o coeficiente global de transferência de calor U (Equação 17):

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{\text{int}}} + \frac{2 \cdot x_{\text{Al}}}{k_{\text{Al}}} + \frac{x_{\text{is}}}{k_{\text{is}}} + \frac{1}{h_{\text{ext}}} \quad (17)$$

onde h_{int} é o coeficiente convectivo do ar no interior da câmara ($\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$), h_{ext} é o valor deste coeficiente na parte externa da câmara ($\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$), x_{Al} é a espessura da placa de alumínio da parede da câmara (m), x_{is} é a espessura do isolante das paredes (m), k_{Al} é a condutividade térmica do alumínio ($\text{kcal}/\text{hm}^{\circ}\text{C}$), e k_{is} é a condutividade térmica do isolante ($\text{kcal}/\text{hm}^{\circ}\text{C}$). Os valores utilizados nesta equação são apresentados na Tabela 4-1.

Tabela 4-1. Propriedades térmicas do alumínio e do poliuretano (isolante) (Fonte: NEVES FILHO, 1991).

h_{ext} ($\text{kcal}/\text{hm}^2\text{°C}$)	h_{int} ($\text{kcal}/\text{hm}^2\text{°C}$)	k_{Al} ($\text{kcal}/\text{hm}^{\circ}\text{C}$)	k_{is} ($\text{kcal}/\text{hm}^{\circ}\text{C}$)	x_{Al} (m)	x_{is} (m)
15	7	180,3	0,02	0,002	0,14

A transferência de calor por infiltração pela porta da câmara foi desprezada, uma vez que o equipamento não foi aberto durante os ensaios. Considerando a porta como superfície lateral da câmara, a troca de calor por transmissão pode ser estimada pela equação 18:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (18)$$

onde A representa a área total das faces da câmara (m^2), U é o coeficiente global de transferência de calor, ΔT é a diferença entre as temperaturas do ar externo e do ar no interior da câmara ($^{\circ}\text{C}$), consideradas fixas e nos valores de 30°C e -20°C , respectivamente. Com estes valores, obtém-se uma perda total da ordem de 400 kcal/h através de transmissão no sistema.

Ainda, deve ser considerada a quantidade de calor que os motores dos ventiladores do evaporador e do túnel portátil geravam no sistema. Os dois ventiladores têm a mesma potência, $0,5 \text{ cv}$ ou $0,75 \text{ W}$, o que representava uma quantidade de 645 kcal/h que o sistema de refrigeração deveria retirar. Como estas perdas representariam uma parcela relativamente alta da

carga térmica da câmara, algumas alterações foram planejadas para melhorar o desempenho frigorífico das instalações.

Como existia a possibilidade de aumentar a capacidade do sistema de refrigeração com pequenas alterações, foi efetuada a troca da polia do motor do compressor, para aumentar o número de rotações no eixo deste, aumentando a quantidade de refrigerante em circulação.

Assim, uma alternativa encontrada foi a substituição da polia do motor do compressor. A polia original de 11 cm de diâmetro foi substituída por uma de 14,5 cm (5½ pol), o que aumentou a rotação efetiva do compressor de 860 rpm para 1137 rpm. Isto possibilitou um aumento da capacidade da câmara, que passou a atingir menores valores de temperatura do ar interno em um reduzido intervalo de tempo. Antes da alteração o equipamento trabalhava por 7 horas, após o seu acionamento, para que a temperatura do ar no interior da câmara atingisse -18 °C; após a modificação, este tempo foi reduzido para 5 horas.

Para avaliação do desempenho do compressor nesta nova condição de operação, foram calculados os parâmetros de funcionamento do sistema (Tabela 4-2) com base no diagrama de pressão em função da entalpia do refrigerante 12 (diclorodifluoroetano).

Tabela 4-2. Dados de operação do sistema de refrigeração da câmara fria, para o compressor operando com frequência de 1137 rpm.

T_{ed} (°C)	P_{cd} (MPa)	P_e (MPa)	u (m ³ /kg)	ΔH_e (kcal/kg)	Q_e (kcal/kg)	T_{cd} (°C)	m_r (kg/h)	V_D (m ³ /h)
-40	1,1	0,065	0,24	22,7	450	45	19,8	4,75
-30	1,1	0,095	0,17	23,4	1050	45	44,9	7,63
-25	1,1	0,125	0,14	23,9	1600	45	66,9	9,37
-20	1,1	0,15	0,11	24,8	2100	45	84,7	9,32
-10	1,1	0,225	0,08	25,8	3500	45	135,7	10,86
0	1,1	0,3	0,057	26,8	5500	45	205,2	11,7

T_{ed} : Temperatura de evaporação; P_{cd} : Pressão no condensador; P_e : Pressão na evaporação; u : volume específico; ΔH_e : variação de entalpia na evaporação; Q_e , capacidade frigorífica; T_{cd} : temperatura de condensação; m_r : massa de refrigerante deslocado no ciclo; V_D : volume de refrigerante deslocado no ciclo.

A partir da Tabela 4-2 e do valor do volume teórico deslocado de refrigerante pelo compressor, obtido da Equação 15, foi traçado o gráfico de eficiência do compressor V_d/V_t (λ) versus P_c/P_0 , (Figura 4-5), onde V_t é o volume teórico de capacidade do compressor (m³), V_d é o volume efetivo de refrigerante deslocado, P_c e P_0 são as pressões do refrigerante na condensação e na evaporação. Pela Figura 4-5, com uma redução aproximada da temperatura de evaporação

na câmara de $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ para $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, tem-se uma redução na eficiência do compressor em torno de 20%.

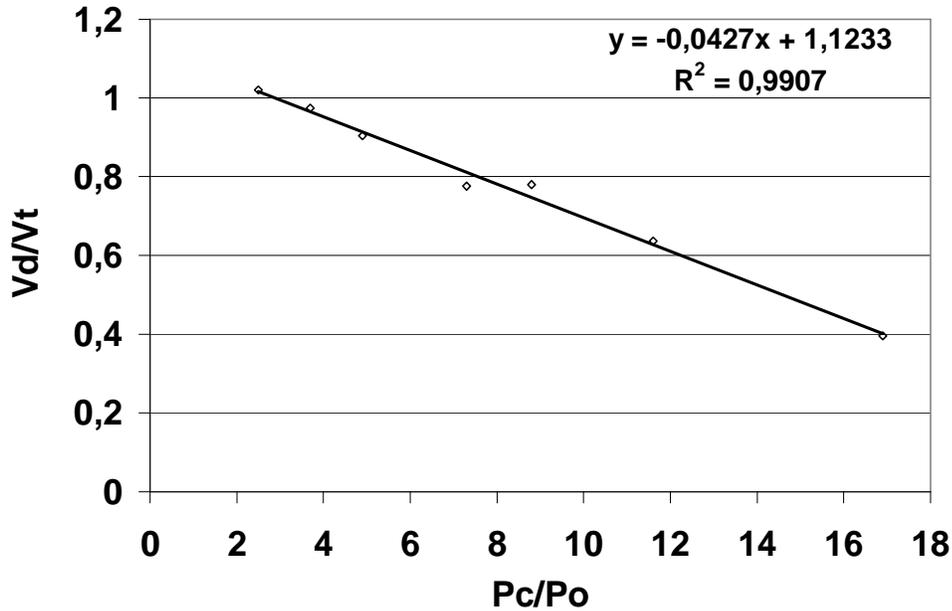


Figura 4-5. Gráfico de eficiência do compressor Bock FK-3.

Os resultados obtidos no tempo de congelamento das amostras apresentados no anexo F permitem comparar o desempenho do sistema antes e depois das alterações efetuadas. No anexo F estão apresentados os resultados das curvas de congelamento das amostras antes da substituição da polia do motor do compressor; e, no mesmo anexo encontram-se as curvas para as mesmas amostras após a substituição da polia.

Nos gráficos observa-se a ocorrência da redução do tempo de congelamento das amostras nos dois tipos de ensaios realizados, exaustão e insuflação. O tempo de congelamento para a insuflação ficou em 43 horas, e o de exaustão, em 40 horas, para a menor capacidade da câmara.

Com o aumento da capacidade frigorífica, este tempo foi de 33 horas para o ar forçado por insuflação e de 30 horas para a exaustão.

4.3 AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DA VELOCIDADE DO AR

Conforme citado no item 2.11, é comum trabalhar com a média das velocidades do ar medidas em vários pontos do escoamento. Conforme procedimento descrito no item 2.11, para se obter uma representação consistente do perfil do escoamento, foi realizado a medida da velocidade em vários pontos ao longo da seção normal ao sentido da passagem do ar, devido à grande variabilidade dos valores do escoamento no plano na seção.

Os gráficos mostrados na Figura 4-6 e Figura 4-7 ilustram os resultados das medidas de velocidade do ar no escoamento. A Figura 4-6 apresenta os valores experimentais para as velocidades do ar medidas durante o processo de insuflação, enquanto a Figura 4-7 mostra os resultados para a exaustão, em função da posição no plano compreendido pela área da superfície do palete, tendo como coordenadas as medidas de comprimento (y (cm)) e da largura (x (cm)). As leituras das velocidades estão apresentadas no eixo vertical z (m/s). Para facilitar a visualização da distribuição dos pontos experimentais das leituras, foi traçada uma superfície unindo estes resultados.

No processo de insuflação, observou-se a presença de valores altos para a velocidade, acima de 15 m/s, registradas na parte central da região de tomadas de medidas, enquanto nas regiões periféricas do plano as velocidades são mais moderadas, variando entre 1 e 2 m/s. Esta diferença, ou a falta de uniformidade nesta distribuição das velocidades, não é observada na exaustão, apresentada na Figura 4-7.

Este fenômeno pode ser causado pelo fato da sucção do ar ser realizada de maneira mais homogênea, promovendo a distribuição e circulação do ar de maneira mais uniforme dentro do túnel, além de existir uma maior perda de carga quando a exaustão é realizada no palete de produtos, e não no ar interior da câmara.

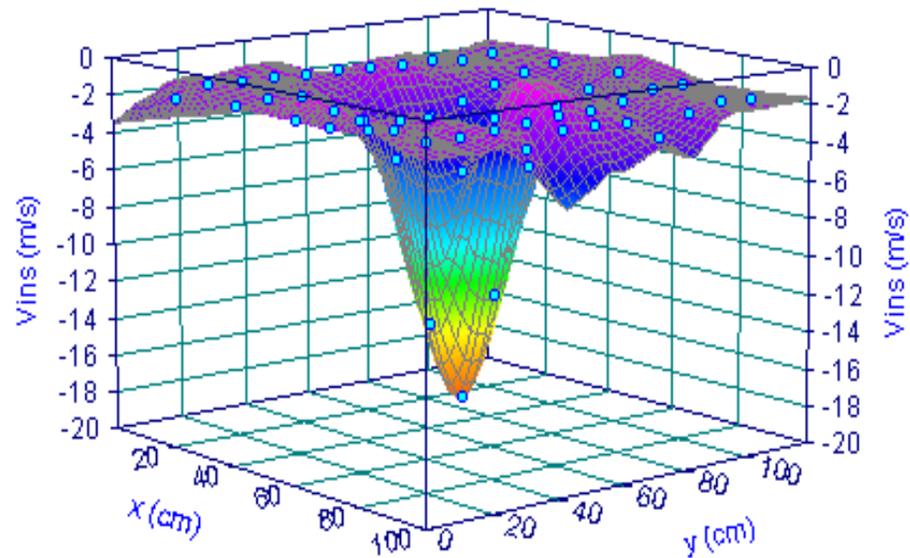


Figura 4-6. Distribuição da velocidade do ar normal à seção de escoamento na superfície do palete para o processo de insuflação

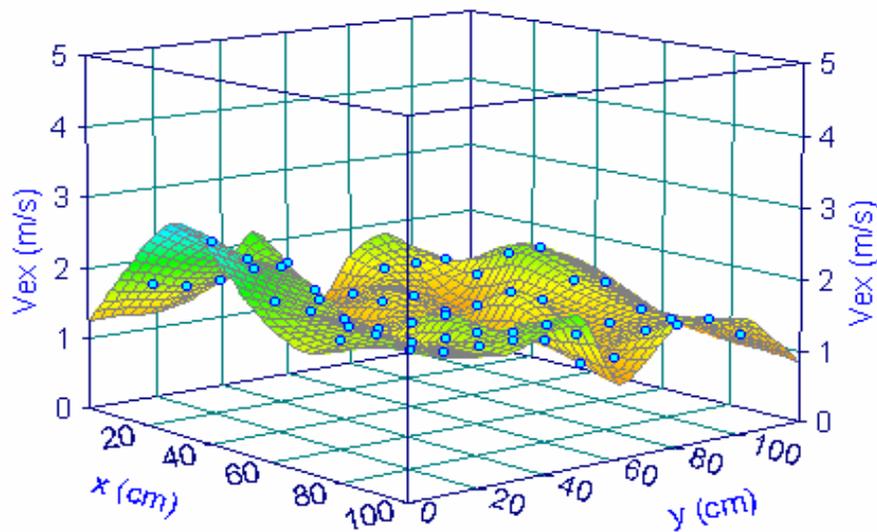


Figura 4-7. Distribuição da velocidade do ar normal à seção de escoamento na superfície do palete para o processo de exaustão.

Além disso, isto mostra que o ar não tinha uma distância suficiente para percorrer entre a parte superior da coifa, na conexão com o duto de escoamento, e a parte inferior, em contato com a camada mais alta das caixas, impossibilitando que ocorresse a distribuição de maneira

uniforme. Isto pode ter ocorrido pelo fato da altura da coifa não ser a mais adequada, conforme a ASHRAE HANDBOOK (1977), que apresenta a técnica para o dimensionamento de sistemas de escoamento de ar. Porém, dadas as dimensões da câmara e do conjunto de caixas com produto, a montagem foi feita com o máximo permitido pelas limitações dos equipamentos. Estas observações podem ser comparadas com os resultados dos próximos testes de medidas dos coeficientes de convecção para comparação dos processos.

Outro fator que pode causar interferência nas medidas neste local da montagem é o fato do anemômetro não indicar a direção ou sentido do fluxo durante a tomada de medida. Assim, na insuflação, como o ar está a uma velocidade maior no centro e não tem espaço suficiente para distribuir igualmente esta velocidade, pode existir uma mudança do sentido de deslocamento do ar nas extremidades da área do plano de tomada de medidas, influenciando no cálculo de velocidade média.

A tabela apresenta os valores da velocidade média obtidos e vazão do ar calculada para cada escoamento.

Tabela 4-3. Valores para velocidade média e vazão do ar de escoamento no palete para os ensaios de exaustão e insuflação.

Ensaio	\bar{v}_{ar} (m/s)	\dot{V} (l/s.kg)
Insuflação	- 3,05 ± 0,2	3,7
Exaustão	1,88 ± 0,2	2,3

O sinal negativo para o valor da velocidade na insuflação representa o sentido do fluxo, inverso ao da exaustão, conforme o eixo z do gráfico apresentado na Figura 4-6. Para o cálculo da vazão, foi utilizado o valor em módulo das velocidades do ar em ambos os processos.

Para o teste de referência (branco), como não havia o direcionamento do fluxo de ar diretamente para o produto, foram realizadas medidas em diversos pontos ao redor do palete para comparação com os resultados de velocidade do ar com a utilização do túnel portátil. Os valores encontrados para a velocidade do ar neste tipo de configuração foram de 1,5 m/s.

4.4 AVALIAÇÃO DOS COEFICIENTES DE CONVECÇÃO EFETIVOS

Os valores de temperatura do corpo de alumínio foram obtidos durante o processo de resfriamento do palete após o acionamento do ventilador do túnel portátil. Foram então traçados os gráficos tempo-temperatura para cada um dos cinco corpos de prova durante os ensaios de insuflação, exaustão e os ensaios mistos.

Observou-se certo grau de uniformidade para as leituras de temperatura obtidas pelos termopares inseridos em diferentes posições no interior das placas de alumínio, como já era esperado, devido ao alto coeficiente de condução térmica do alumínio, reduzindo a existência de gradientes de temperatura no interior do corpo de prova. Mesmo assim, optou-se por utilizar como resultado das temperaturas um valor médio entre as leituras feitas pelos termopares inseridos no mesmo corpo de prova, sendo que os valores de temperatura médios (T_m) foram utilizados na construção dos gráficos para determinação do coeficiente de convecção (h_{ef}).

Nos ensaios de insuflação, os corpos de alumínio localizados nas camadas superiores de caixas (camadas 5 e 7) recebem o ar diretamente do ventilador, a uma velocidade muito maior que o ar que chega até as camadas inferiores da montagem (camadas 1 e 3), conforme pôde ser observado no item 4.3.

Isto gera uma rápida redução dos valores de temperatura até os valores próximos da temperatura do ar que é forçado no interior do palete, tendendo a uma estabilização da variação de temperatura e causando então distúrbios nos resultados da temperatura adimensional.

Este fenômeno pode ser mais facilmente entendido, observando-se os resultados de temperatura adimensional versus tempo de resfriamento apresentados no anexo A.

Assim, foram ajustadas as curvas, considerando apenas a redução dos valores de temperatura adimensional até uma diferença de três graus entre o corpo de prova e o ar, sendo que a partir deste ponto as curvas tendiam à estabilidade.

Foram utilizados os valores das leituras de temperatura para o período de resfriamento de cada corpo de prova, até o início do congelamento das amostras, ou o momento em que a diferença entre a temperatura do corpo e a do meio de resfriamento fosse igual a 3 °C. Em seguida foi traçado o gráfico do logaritmo neperiano da temperatura adimensional média $[(T - T_\infty)/(T_i - T_\infty)]$ para os corpos de prova em função do tempo de resfriamento.

A Figura 4-8 apresenta o gráfico obtido para o processo de resfriamento experimental dos corpos de prova de alumínio no ensaio de referência (branco) com a montagem inicial; e a Figura 4-9 apresenta o gráfico linearizado para o mesmo ensaio. Os gráficos obtidos para as demais configurações da montagem do túnel estão apresentados no Anexo A.

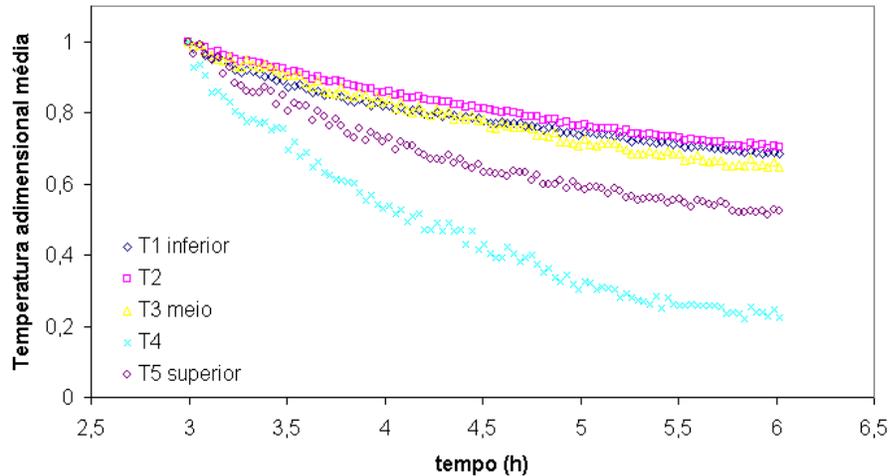


Figura 4-8. Curva de resfriamento para os corpos de alumínio, teste de referência: polia de 11 cm, capacidade de refrigeração original, arranjo industrial.

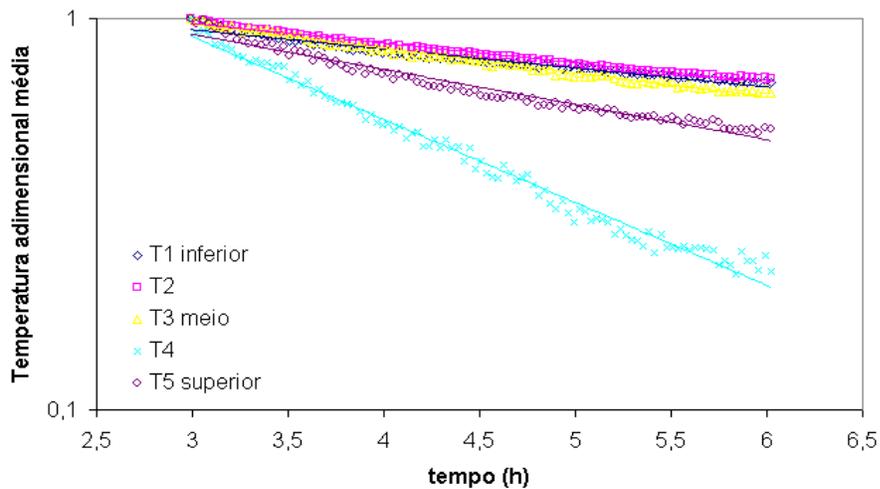


Figura 4-9. Curva linearizada do resfriamento dos corpos de alumínio, teste de referência: polia de 11 cm, capacidade de refrigeração original, arranjo industrial.

A partir destas curvas, foram obtidos os valores do coeficiente angular (S_2) e do coeficiente linear (A) para a equação $y = Ae^{S_2x}$. O coeficiente angular foi utilizado para as

obtenções dos valores de h_{ef} , conforme procedimento descrito no item 3.11. Estes valores de h_{ef} serviram de base para a avaliação das diferentes distribuições das amostras nas caixas testadas e dos processos de insuflação e exaustão.

Os valores de V , A , c_{pAI} e ρ_{AI} utilizados no cálculo de h_{ef} estão apresentados na Tabela 3-2 e Tabela 3-3 do item 3.9. Os valores do coeficiente angular, do coeficiente linear e do R^2 da regressão estão apresentados nas tabelas do APÊNDICE C e do APÊNDICE D, bem como o desvio padrão da média dos ensaios realizados em triplicata para a exaustão e insuflação. Os valores dos coeficientes de convecção estão apresentados na Tabela C - 3 e Tabela D - 3 e dos mesmos apêndices. Com base nestes valores, são discutidos os resultados para as duas configurações de embalagens nas caixas, e os dois processos de circulação de ar, nos itens 4.4.1 e 4.4.2.

4.4.1 Comparação entre os dois arranjos de amostras nas caixas

Na Tabela 4-4 são apresentados os valores obtidos experimentalmente para os testes com os dois arranjos e com as condições iniciais da câmara.

Tabela 4-4. Valores do coeficiente de convecção calculados para os dois tipos de distribuição das amostras nas caixas.

Corpo de prova	Coeficiente de convecção ($W/m^2\text{°C}$)			
	Disposição industrial		Disposição "alternativa"	
	Exaustão	Insuflação	Exaustão	Insuflação
T1 inferior	5,79	3,58	10,74	9,90
T2	5,25	6,13	12,88	9,92
T3 meio	10,41	5,77	10,76	6,38
T4	14,97	15,41	11,06	13,04
T5 superior	5,92	29,46	7,73	31,72

Os resultados da Tabela 4-4 podem ser melhor visualizados nos gráficos da Figura 4-10.

Analisando os gráficos da Figura 4-10, observa-se o aumento dos valores do coeficiente de convecção efetivo para os corpos de prova distribuídos nas camadas de caixas do palete, à exceção do corpo de prova 4, localizado na segunda camada a partir do topo da montagem.

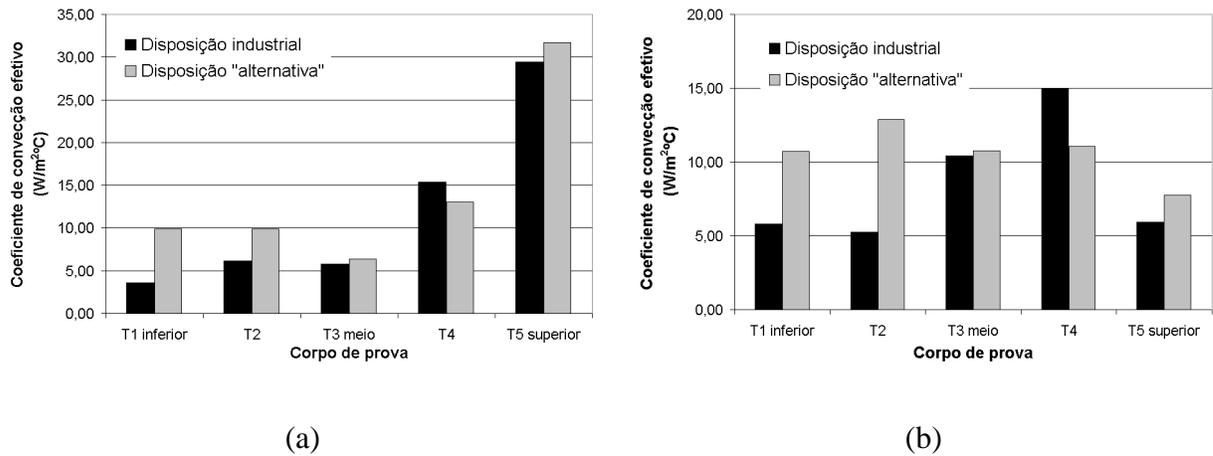


Figura 4-10. Distribuição dos valores dos coeficientes de convecção para os cinco corpos de prova utilizados, comparando os arranjos das amostras nas caixas para os processos: de (a) insuflação, e (b) exaustão.

Na insuflação os valores para o arranjo industrial oscilaram próximo de $5 \text{ W/m}^2\text{°C}$ para os três corpos de prova, aumentando para $15 \text{ W/m}^2\text{°C}$ para o corpo de prova 4 e chegando a $30 \text{ W/m}^2\text{°C}$ na camada superior. Os valores para o arranjo proposto chegaram a $10 \text{ W/m}^2\text{°C}$ para os dois primeiros corpos e foi superior a $30 \text{ W/m}^2\text{°C}$ na camada superior.

Na exaustão, os valores praticamente dobraram para os dois primeiros corpos de prova, entre os arranjos. Para a camada central, foram semelhantes, de cerca de $10 \text{ W/m}^2\text{°C}$ e reduziram para valores de $6 \text{ W/m}^2\text{°C}$ a $7 \text{ W/m}^2\text{°C}$ na camada superior.

Assim, fica evidente a melhor distribuição do ar ao redor do produto quando utilizada uma montagem onde as amostras estão mais distantes, permitindo a passagem do ar ao redor das embalagens, aumentando a transferência de calor entre o ar de resfriamento e o produto, mesmo com o aumento do número de camadas, de seis na montagem industrial para sete na montagem alternativa proposta.

4.4.2 Comparação entre os processos de exaustão e insuflação

Também foram obtidos os valores de h_{ef} para os processos de exaustão e insuflação, em triplicata, com o novo arranjo de amostras, conforme descrito no item 3.6, com a nova capacidade do sistema de refrigeração. Estes resultados foram comparados com um ensaio de

referência, sem o túnel portátil. Os resultados são apresentados na Tabela D - 1, localizada no anexo D.

Os dados da Tabela D - 1 podem ser melhor visualizados na Figura 4-11.

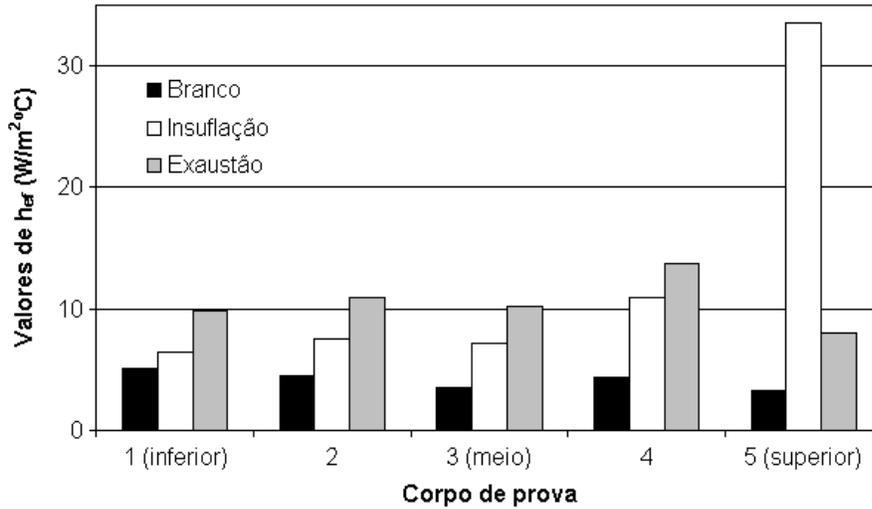


Figura 4-11. Valores médios do coeficiente de convecção para os ensaios de referência (branco), insuflação e exaustão.

Neste gráfico, observa-se o aumento dos valores do coeficiente convectivo que o túnel portátil proporciona em relação ao processo sem sua utilização. Todos os valores de h_{ef} foram maiores com a utilização do túnel, tanto no processo de insuflação quanto no de exaustão, em relação ao teste branco, que não foram superiores a $5,1 W/m^2\text{°C}$ em nenhuma das camadas.

Em relação aos processos, pode-se ver também que a exaustão proporciona melhores valores de h_{ef} para todas as camadas do palete, desde a inferior até a camada 6; com exceção da camada superior, que recebia o ar direto na insuflação. Todos os valores de h_{ef} da exaustão foram superiores a $10 W/m^2\text{°C}$, com exceção do corpo 5.

Conforme visto no item 4.3, a camada superior de caixas recebe o ar diretamente da câmara, a uma velocidade muito superior em relação ao ar que circula no restante do palete, justificando assim este alto valor de h_{ef} para este corpo metálico.

4.5 ANÁLISE DOS ESTUDOS DE EXAUSTÃO, INSUFLAÇÃO E MISTO NO PALETE

Nesta parte, como no item anterior, serão apresentadas as comparações nos tempos de congelamento das amostras distribuídas em duas configurações das embalagens nas caixas para os dois sentidos de circulação do ar.

Os tempos de congelamento dos ensaios foram analisados quanto às condições de temperatura e velocidade do ar de processo. Através da análise destes resultados foi determinada a eficiência dos três tipos de operação (insuflação, exaustão e misto) do sistema de ventilação, assim como a viabilidade do túnel portátil utilizado para o processo de congelamento. A seguir são apresentados os gráficos de temperatura *versus* tempo de congelamento de diferentes posições dos produtos para o ensaio de referência (branco) da câmara (Figura 4-12).

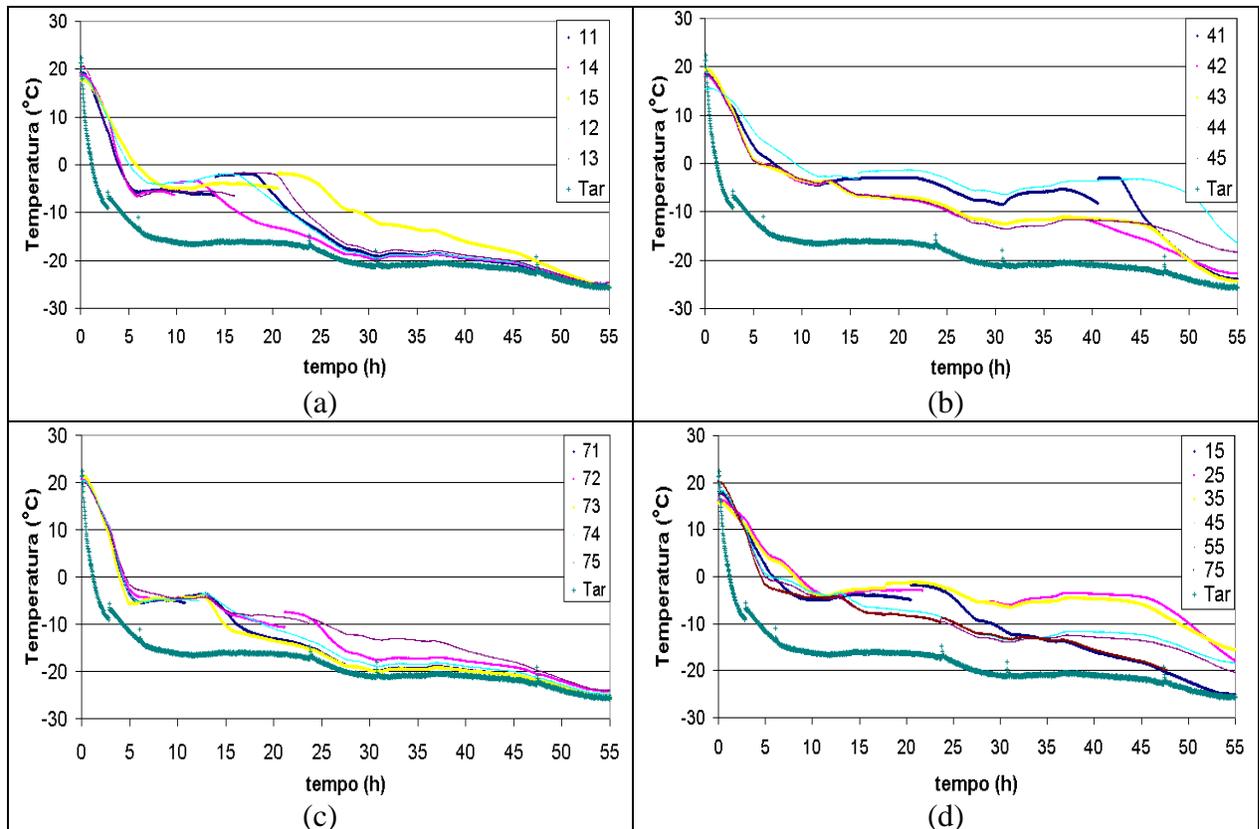


Figura 4-12. Gráficos de temperatura versus tempo de congelamento para o teste de referência (branco) com a montagem industrial: (a) camada inferior, (b) camada central, (c) camada superior e (d) pontos centrais das camadas.

Todos os demais gráficos gerados com os resultados dos ensaios de congelamento estão apresentados no Anexo F. Os tempos foram monitorados desde o momento em que o sistema de refrigeração foi acionado (tempo = 0) até que todas as amostras atingissem o mínimo de -18°C . Porém, para avaliação da eficiência do equipamento ou comparação com o teste de referência, o tempo de congelamento foi considerado a partir do momento da retirada dos painéis de poliestireno laterais do palete, que pode ser visualizado no gráfico pelos valores de temperatura do ar de resfriamento da câmara, quando atingiu o valor de -18°C .

Podem ser observados pontos de aumento da temperatura após o congelamento, provavelmente ocorrido devido ao ponto eutético dos sólidos presentes nas soluções, como o da sacarose, por volta de -14°C . Este valor foi indicado por FELLOWS (2000) e mostrado experimentalmente por RESENDE & SILVEIRA JR. (2002a)

4.5.1 Comparação entre os dois arranjos de amostras nas caixas

Para avaliação dos processos de circulação do ar através do produto, as amostras foram inicialmente distribuídas, conforme o esquema apresentado na Figura 3-6. Foram colocadas três camadas de embalagens da solução distribuídas em quatro linhas de oito embalagens.

O tempo de congelamento para o palete com esta configuração foi de 47 horas, para o teste branco sem a utilização do túnel portátil, que pode ser considerado um tanto elevado comparando-se a carga térmica da montagem com a capacidade de resfriamento da câmara. Também se observou a falta de uniformidade do processo, onde as amostras localizadas nas camadas inferior e superior atingiram -18°C em cerca de 42 horas e as da camada central, 47 horas, sendo que duas amostras não atingiram este patamar mesmo após 52 horas de processo.

Para o teste de insuflação, a camada superior de caixas (camada 7) foi rapidamente congelada, sendo que todas as amostras monitoradas atingiram -18°C após 35 horas da ligação do túnel. Nas camadas inferior e central, as amostras congelaram após cerca de 45 horas, confirmando assim a distribuição da velocidade do ar reduzida para as camadas inferiores da montagem.

Na exaustão foi observada uma diferença entre os tempos de congelamento entre as camadas central e periféricas de aproximadamente 1 a 2 horas; porém após 40 horas de processo, todas as amostras monitoradas já se encontravam em temperaturas próximas de -18°C .

Como ocorreu esta grande diferença no tempo de congelamento entre as camadas, tanto na insuflação quanto no teste de referência, esta montagem mostrou-se inconveniente ao processo, conforme discutido no item 1.4, por bloquear a passagem do ar na camada central, impedindo a transferência de calor por convecção em 1/3 das amostras, localizadas nas camadas centrais das caixas, que só seriam resfriadas pela perda de calor por condução pelas embalagens vizinhas. As curvas de congelamento para os testes realizados com esta configuração de embalagens estão apresentadas no anexo F.

Com base nestes resultados, foi realizada uma nova distribuição das amostras, conforme mostra a Figura 3-7, para avaliar a influência dos espaços para circulação do ar entre as embalagens nas caixas. Esta nova distribuição permitiu um maior espaço para a circulação do ar entre o produto, o que foi confirmado pelos resultados dos coeficientes de convecção efetivos apresentados.

Com a nova configuração, o processo de exaustão forneceu um tempo de congelamento de 38 horas para os pontos que demoraram mais a congelar. Já na insuflação este tempo foi de 43 horas. A comparação entre os tempos de congelamento das montagens industrial e alternativa para os ensaios de insuflação e exaustão pode ser visualizada na Figura 4-13.

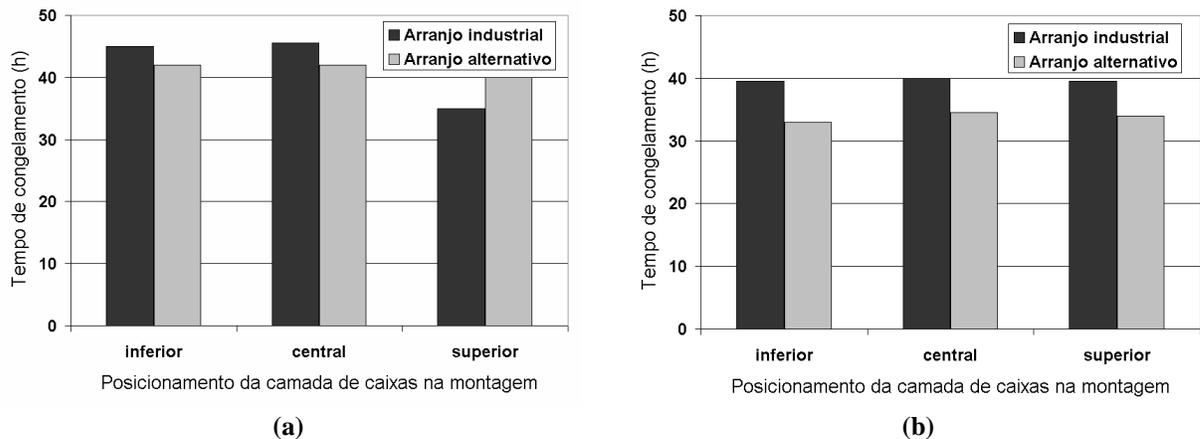


Figura 4-13. Comparação dos tempos de congelamento entre os arranjos industrial e alternativo proposto para os ensaios de: (a) insuflação e (b) exaustão.

A camada superior da montagem apresentou um aumento no tempo de congelamento com a nova configuração das amostras para o ensaios de insuflação (Figura 4-13a). Isto pode ter ocorrido pelo fato da configuração industrial dificultar a circulação do ar para as outras camadas, reduzindo a eficiência da troca térmica entre o ar e as demais camadas de produto da montagem.

Os testes realizados com o arranjo industrial das amostras nas caixas foram preliminares, já que a nova distribuição sugerida como alternativa apresentou melhores resultados nos ensaios realizados, mesmo com a introdução de uma camada a mais de caixas na montagem. Assim, os testes mistos não foram realizados para a antiga configuração de amostras. Além disso, estes ensaios foram realizados com a capacidade reduzida da câmara, com o motor do compressor operando com a polia menor, de 11 cm de diâmetro.

4.5.2 Teste de Referência (branco)

A partir desta etapa, os ensaios foram realizados com a capacidade alterada da câmara, com o motor operando com a polia maior (14,5 cm) e com as amostras distribuídas nas caixas conforme o arranjo alternativo sugerido na Figura 3-7.

Como no estudo das distribuições das embalagens nas caixas, foi realizado um teste sem a utilização do túnel portátil, com a nova capacidade da câmara com a polia de 14,5 cm e rotação de 1137 rpm, para servir de referência aos ensaios com a utilização do túnel.

Neste ensaio, as caixas foram montadas sobre o palete, protegidas na parte superior com o túnel e na lateral com as placas de poliestireno expandido. A câmara foi ligada e a temperatura monitorada até que o ar interno atingisse $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$; quando o palete foi então descoberto, registrando a partir deste momento o tempo de congelamento.

No ensaio de referência, mais uma vez houve pontos que não atingiram a temperatura de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ na camada central, mostrando a desigualdade do processo quando não foi utilizado o túnel. Todos os pontos desta camada atingiram $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ após 37 horas, com exceção de uma das extremidades, que não chegou a congelar após 37 horas de processo. As camadas superior e inferior, porém, tinham todos os pontos monitorados congelados após 35 horas de processo.

4.5.3 Localização do centro térmico

Os testes de insuflação e exaustão, considerados o escopo principal do trabalho, foram realizados em triplicatas. Os resultados dos valores de temperatura durante o processo estão nos gráficos do Anexo F.

A Figura 4-14 apresenta uma comparação entre os tempos de congelamento para os ensaios de referência, exaustão e insuflação, com valores médios das triplicatas e nas condições

finalis de operação (distribuição alternativa das amostras sugerida e motor do compressor com polia de 14,5 cm).

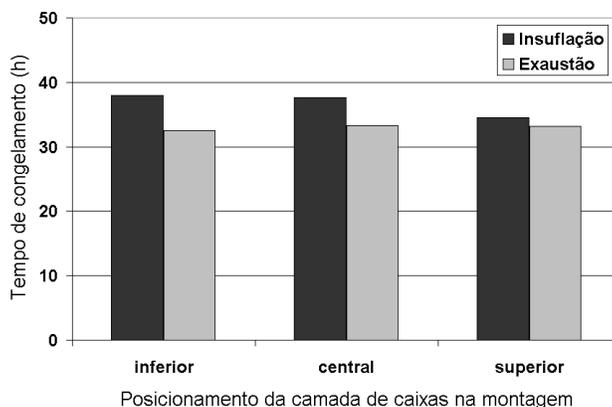


Figura 4-14. Comparação entre os tempos de congelamento para os ensaios de insuflação e exaustão com a distribuição alternativa proposta para as embalagens e maior capacidade do compressor (polia de 14,5 cm).

O tempo de congelamento do palete oscilou entre 34 e 40 horas para a insuflação. Já na exaustão, o tempo de congelamento para os três ensaios foi de 30 horas, 33 horas e 32 horas. A falta de uniformidade pode ser observada também nesta análise, onde, quando a primeira amostra atingiu $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$, o ponto mais quente, monitorado ainda estava em $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$. Já na exaustão, a temperatura do ponto mais quente no momento em que o mais frio atingiu $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$, não foi em nenhum ensaio superior a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Estas observações encontram-se mais detalhadas no item 4.5.4.

A Figura 4-15 e a Figura 4-16 mostram as isotermas em função da localização no sistema de coordenadas obtidas nos testes experimentais de temperatura ao longo do tempo, ajustados através de regressão não linear, durante o processamento.

A partir dos resultados obtidos para a variação da temperatura do produto ao longo do processo de congelamento, em função de sua posição na camada monitorada ($T(x,y,z,t)$), uma regressão foi feita utilizando recursos do software TableCurve 2D[®], que faz uma varredura, utilizando várias equações e seleciona a que melhor ajusta ao modelo a partir dos resultados obtidos experimentalmente, com o maior valor de R^2 . Estes ajustes foram feitos para os ensaios de triplicata de exaustão e de insuflação, para comparação entre os processos.

A partir dos resultados gerados pelas regressões foram construídas as figuras representando a variação da temperatura nas camadas monitoradas com a utilização do software

SigmaPlot®. As figuras mostram o gradiente de temperatura nas camadas durante o processo de congelamento.

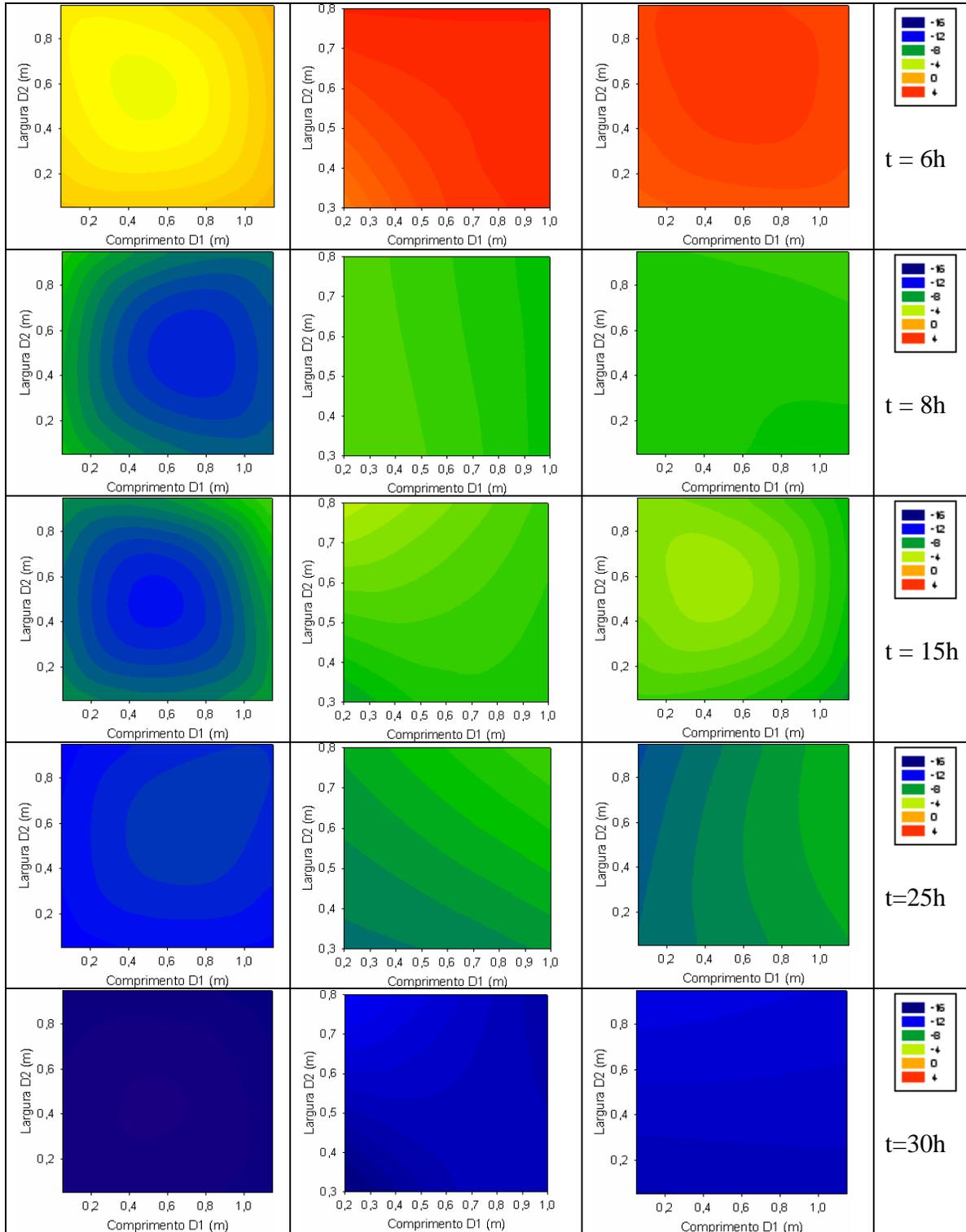


Figura 4-15. Isothermas obtidas por ajuste não linear em função da localização no sistema de coordenadas no plano (xy) para o teste 01 de exaustão.

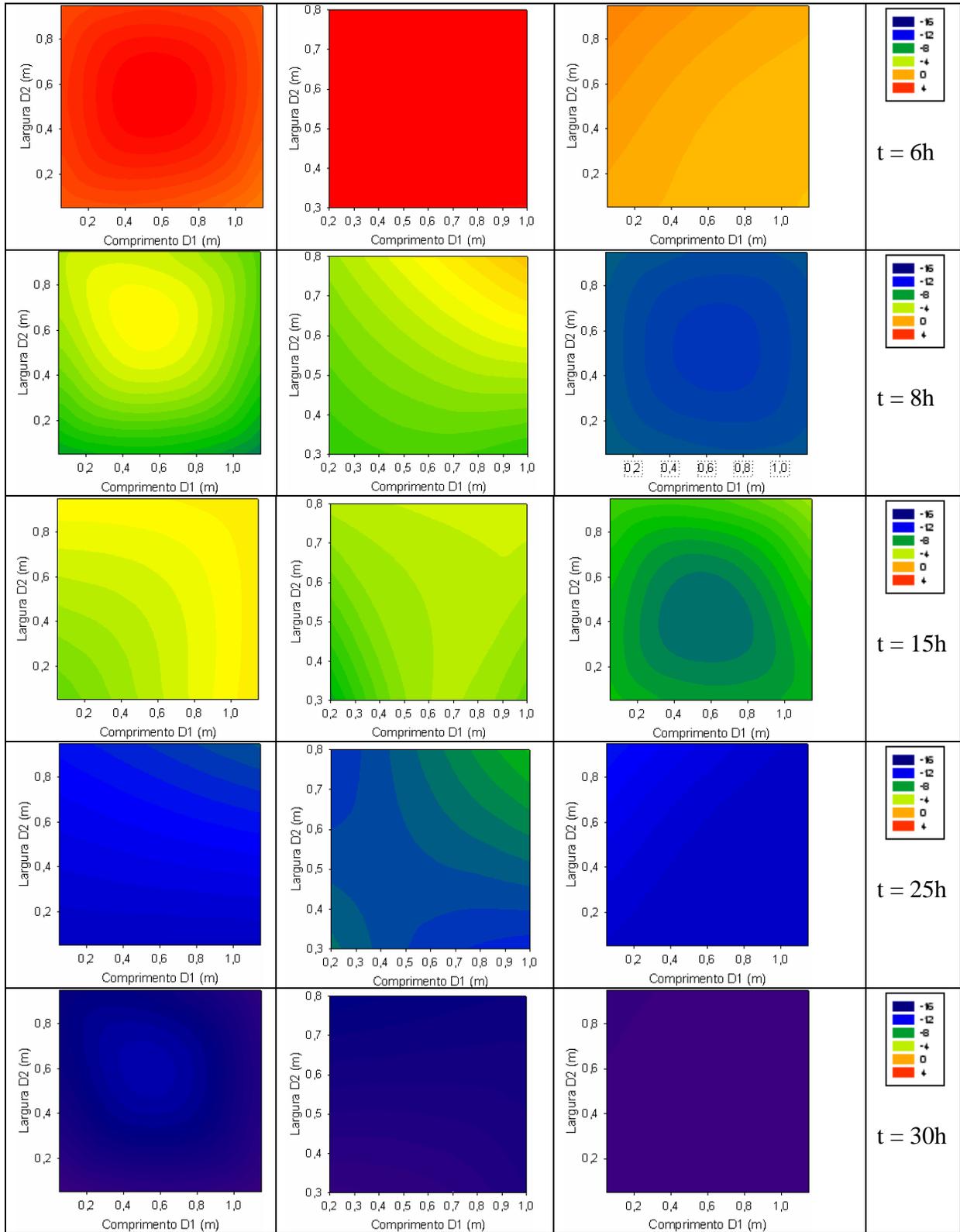


Figura 4-16. Isotermas obtidas por ajuste não linear em função da localização no sistema de coordenadas no plano (xy) para o teste 01 de insuflação.

Em cada linha estão apresentadas três figuras, representando, da esquerda para a direita, as camadas inferior, central e superior da montagem do palete. A evolução das temperaturas representadas nos gráficos encontra-se mais detalhada no Anexo E, com menores intervalos de tempos entre as figuras, para os ensaios de exaustão e insuflação'.

Na Figura 4-15 e na Figura 4-16, pode-se observar que, na exaustão, a camada inferior reduziu mais rapidamente a temperatura que as outras. Isto ocorreu de forma semelhante nos outros ensaios, devido à existência de transferência de calor entre o fundo da câmara e as amostras das camadas inferiores. Na insuflação, este resfriamento acelerado ocorre na camada superior, porém devido ao ar que entra em contato direto com esta camada no processo. Para os testes de referência e mistos não foram construídas as figuras com a localização do centro térmico.

As figuras confirmam os resultados obtidos nos testes de velocidade do ar e de coeficiente de convecção, constatando que o resfriamento ocorre primeiro nas camadas superiores para a insuflação, enquanto na exaustão ela ocorre de forma mais uniforme ao longo da altura do palete.

4.5.4 Comparação e avaliação da heterogeneidade da distribuição da temperatura entre os processos de exaustão, insuflação, branco e misto.

Uma vez obtido o ajuste da temperatura para as amostras monitoradas ao longo do tempo de processo nas diferentes localizações, obteve-se uma temperatura média (\bar{T}) para cada uma das camadas, representada pela média das entalpias dos produtos de cada camada em função do tempo.

A partir destes resultados, foram calculadas e apresentadas em gráficos, para cada ensaio, a comparação das diferenças de temperaturas entre a média e a mínima ou máxima, para quantificação da heterogeneidade do congelamento. As diferenças de temperaturas para as camadas representam a uniformidade entre as amostras monitoradas na camada. Analogamente foi realizado para o palete, onde representa a uniformidade entre as camadas (Figura 4-17).

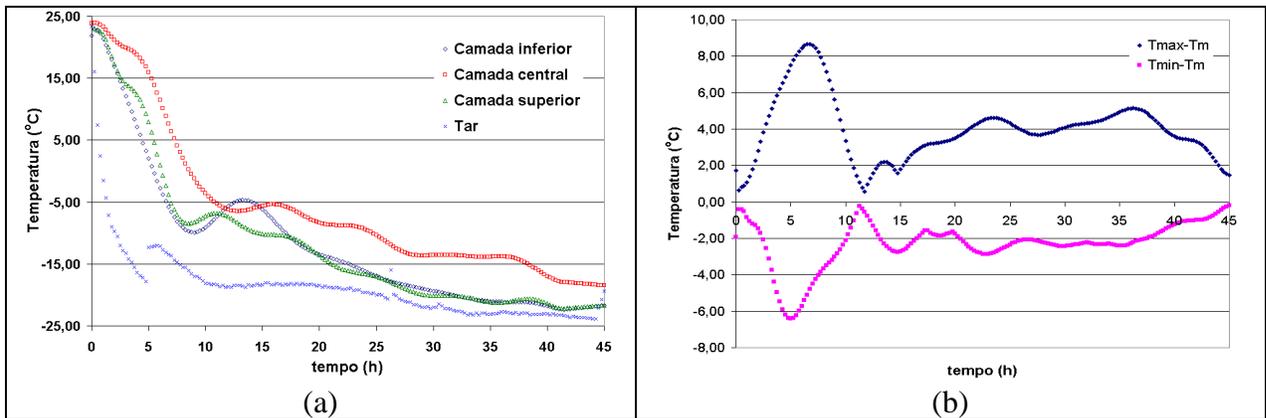


Figura 4-17. Teste de referência, arranjo alternativo, polia 14,5 cm: (a) curva de congelamento com os valores médios de temperatura para as camadas inferior, central e superior obtidas a partir de regressão não-linear, (b) variação dos valores de temperatura máxima e mínima em relação à temperatura média.

Os gráficos para os demais ensaios estão apresentados no APÊNDICE G.

A partir destas diferenças, foi calculado o fator de heterogeneidade ϕ para os ensaios, conforme descrito no item 3.13. Estes resultados são apresentados na Tabela 4-5.

Tabela 4-5. Valores dos coeficientes de heterogeneidade (ϕ) para caracterização da distribuição da temperatura para as amostras nas camadas e para as camadas no palete.

Ensaio	Fator de heterogeneidade (ϕ)				
	Camada inferior	Camada central	Camada superior	palete	
Referência (Branco)	-0,12	-0,21	-0,10	-0,18	
Exaustão	média	-0,06	-0,05	-0,05	-0,02
	desv. pad.	0,006	0,010	0,015	0,010
Insuflação	média	-0,14	-0,12	-0,05	-0,09
	desv. pad.	0,015	0,020	0,010	0,006
Misto Exaustão-Insuflação	-0,09	-0,09	-0,02	-0,04	
Misto Insuflação-Exaustão	-0,08	-0,09	-0,05	-0,10	

Os resultados dos ensaios de exaustão e insuflação, realizados em triplicata, foram submetidos a um teste estatístico com análise de variância de um fator (*one-way ANOVA*).

Pela Tabela 4-5, pode-se observar que no processo de insuflação, os valores obtidos de ϕ são significativamente maiores que para a exaustão ($p < 0,05$). Os valores não diferem para a

camada superior, onde a circulação do ar teve menos obstáculos. Porém, para as camadas central e inferior, as diferenças foram maiores.

O mesmo fato pode ser observado na análise das camadas em relação ao palete. Os valores de ϕ que caracterizam a heterogeneidade foram maiores para o processo de exaustão em relação a insuflação, mostrando que a distribuição da temperatura entre as camadas foi mais uniforme para o processo de exaustão, comparado com o de insuflação.

O teste de referência apresentou uma heterogeneidade semelhante à do processo de insuflação para a camada inferior; porém, para as camadas central e superior, os valores foram maiores que os valores obtidos para os dois processos de circulação do ar analisados. Para a análise do palete, a heterogeneidade do teste de referência foi muito maior que as obtidas para os testes com a utilização do túnel portátil, mostrando que a circulação do ar na câmara é deficiente devido à existência de obstáculos próprios dos produtos armazenados.

Os ensaios mistos apresentaram resultados semelhantes entre si, e intermediários entre os valores obtidos para a exaustão e insuflação. O ensaio misto iniciado com a insuflação apresentou, porém, um valor de ϕ maior que o ensaio iniciado com a exaustão para a heterogeneidade do palete.

Estes resultados podem ser comparados aos valores dos coeficientes de convecção (h_{ef}) obtidos para a camada superior, onde o ar esteve em contato com o produto a uma alta velocidade, diretamente do interior da câmara com uma temperatura inferior em comparação com o ar que chegava no processo, à camada inferior, que já estava mais aquecido por ter entrado em contato com as outras amostra no palete.

4.5.5 Testes Mistos

Os ensaios mistos foram realizados para comparação com os ensaios que foram realizados com circulação plena. A idéia foi inverter o fluxo de ar no meio do processo para verificar a eficiência dos métodos combinados.

Os gráficos com os resultados apresentados no Anexo F mostram que os processos tiveram uma tendência de resultados próximos aos processos plenos. O ensaio que foi iniciado com a exaustão e depois alterado para insuflação, não teve grande diferença do que foi realizado totalmente com exaustão, tendo como tempo final de congelamento 35 horas; resultado

semelhante ao que foi iniciado com a insuflação. Nota-se, porém, a mesma diferença de uniformidade que existiu nos processos de circulação de insuflação: enquanto algumas amostras estão próximas ou até em temperaturas inferiores a -18°C , outras ainda estão na fase de perda do calor latente.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho houve diferentes conclusões nos seguintes itens:

Estabilidade térmica das soluções

Para a concentração de espessante de 0,5%, com ambas as concentrações de sacarose (15% e 30%), não houve alteração da capacidade de retenção de água, devido à não significância dos resultados de alterações da temperatura inicial de congelamento nos repetidos processos, possibilitando a reutilização da solução nestas concentrações em estudos posteriores. Porém, as amostras com 1,0% e 1,5% de espessante, para ambas as concentrações de sacarose (15 e 30%), apresentaram uma tendência de aumento da temperatura de início de congelamento depois de repetidos processos, possivelmente alterando de forma irreversível as ligações da água na estrutura do espessante nos subseqüentes recongelamentos, causando uma redução da retenção de água ligada.

Capacidade frigorífica

Por ser um equipamento destinado ao armazenamento de produtos congelados e não ao processo de congelamento, a capacidade frigorífica da câmara de armazenamento utilizada estava abaixo da considerada ideal para o processo, o que causava um aumento na temperatura do ar no interior da câmara quando o palete era descoberto para o início do processo.

Esta interferência não é esperada num caso industrial, já que com o dimensionamento da capacidade frigorífica de uma câmara maior existe uma capacidade de recuperação da temperatura do ar interior superior à do equipamento em estudo. Porém, o equipamento se mostrou adequado, atendendo aos objetivos de comparação dos processos com a utilização do túnel portátil, para o estudo do congelamento em uma câmara destinada ao armazenamento.

Escoamento do ar e coeficiente de convecção

Uma distribuição alternativa sugerida com maior espaço para circulação do ar entre as amostras mostrou-se mais conveniente ao processo, com aumentos de até 100% dos valores de coeficiente de convecção nas camadas inferiores do palete e redução de 2 a 3 horas no processo de congelamento com a utilização do túnel portátil. Maiores diferenças foram observadas nas

temperaturas da camada central da montagem, devido a pouca circulação do ar nestas camadas por bloqueio das amostras na distribuição industrial.

O processo de exaustão apresentou uma maior homogeneidade para a velocidade do ar na superfície do palete e uma distribuição mais uniforme também nas camadas inferiores de caixas do palete, como mostram os valores do coeficiente de convecção obtidos.

A exaustão oferece, assim, um aproveitamento melhor da capacidade da câmara, já que força a passagem do ar de resfriamento igualmente por todas as embalagens em todas as camadas da montagem, pois alcança todas as amostras igualmente em qualquer ponto do empilhamento, promovendo o resfriamento uniforme, de forma a reduzir o tempo de funcionamento do sistema, além de facilitar a monitoração das condições da montagem, já que se podem considerar todas as amostras na mesma condição de temperatura no regime transiente.

Tempo de congelamento e heterogeneidade da distribuição de temperatura para os processos de exaustão, de insuflação, misto e sem o equipamento de direcionamento de ar forçado.

O propósito foi direcionar o fluxo de ar para o produto de forma a reduzir o custo energético de operação dos equipamentos buscando uma maior uniformidade de processo. Além disso, os resultados obtidos para o teste branco, onde o produto foi congelado sem a utilização do túnel portátil, mostram que a uniformidade e a eficiência do processo são potencializadas com a utilização do equipamento desenvolvido.

Os resultados obtidos para os dois sentidos de circulação do ar através do conjunto de amostras mostram que não existem grandes diferenças no tempo de congelamento da montagem, já que é um parâmetro majoritariamente dependente da capacidade frigorífica da câmara, e em menor escala do equipamento de ar forçado.

As diferenças encontram-se na uniformidade do congelamento, onde as diferenças entre os valores do coeficiente de heterogeneidade proposto apresentaram diferenças significativas ($p < 0,05$) para as camadas localizadas no centro e na parte inferior da montagem; sendo que para a insuflação, as diferenças de temperatura entre as amostras no regime transiente são mais explícitas, o que pode acarretar falhas no processo, uma vez que o tempo de congelamento para um produto pode ser superestimado, gerando custos desnecessários, ou subestimados, se o processo for terminado quando algumas amostras ainda não atingiram o patamar de congelamento, afetando a qualidade final do produto.

Comparando o processo de congelamento em uma câmara sem o direcionamento do ar forçado para o produto no túnel portátil, o uso do túnel mostrou-se viável, reduzindo consideravelmente o tempo de congelamento das amostras na câmara de armazenamento. Além disso, pode auxiliar na redução do consumo energético, uma vez que o tempo de processo foi reduzido em até 5 horas no processo com a utilização do túnel portátil. Isto representa uma redução de 5 horas no funcionamento de um compressor com motor de 4 cv, porém com a utilização de um motor de 0,5 cv do ventilador do túnel por 30 a 35 horas.

Um estudo energético mais detalhado poderia fornecer uma conclusão mais precisa sobre a relação de custo-benefício da utilização do túnel.

Porém, o uso do túnel portátil mostrou-se útil para redução do tempo de processo, com o direcionamento do ar na exaustão promovendo distribuição mais homogênea da temperatura na montagem.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Variar a quantidade, disposição e volume de produto processado utilizando o túnel portátil, para verificar a relação de eficiência do equipamento estabelecendo um valor de eficiência em relação à quantidade de produto.

Avaliação do custo energético para o processo de congelamento numa câmara sem a utilização do túnel portátil, comparado ao mesmo processo com sua utilização e em câmaras com diferentes capacidades frigoríficas.

Realizar uma análise econômica do processo e comparar os custos de utilização do equipamento com os valores agregados de vários produtos a serem congelados para avaliar a utilização do túnel portátil.

Avaliar a uniformidade da distribuição da temperatura utilizando a ferramenta desenvolvida neste trabalho em outros tipos de processos de congelamento, comparando-se os resultados com os obtidos para o túnel portátil.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIR-CONDITIONING AND REFRIGERATION INSTITUTE. **Refrigeration and Air Conditioning**. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc., 1979.

ALLAIS, I.; ALVAREZ, G.; FLICK, D. Modelling cooling kinetics of spheres during mist chilling. **Journal of Food Engineering**. V. 72, p. 197-209, 2006.

ALVAREZ, G.; LETANG, G. Transferts de chaleur et de matiere au sein d'un échangeur de type 'palette'. **Revue du Froid**, v. 47, p. 47-49, 1994.

ALTHOUSE, A. D.; TURNQUIST, C. H.; BRACCIANO, A. F.; **Modern Refrigeration and Air Conditioning**. Tinley Park, Illinois: The Goodheart-Willcox Company, Inc., 1996.

ANTONIALI, S.; CORTEZ, L. A. B. Resfriamento rápido com ar forçado para conservação pós-colheita de alface "crespa". In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3, 2000, Campinas. **Proceedings online...** Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000002200000100010&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 03 Out 2005.

ASHRAE HANDBOOK. **Fundamentals**. Atlanta, Georgia: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., 1977.

ASHRAE. **Refrigeration**. Atlanta, Georgia: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., 2002.

ASTM. **Manual on the use of thermocouples in temperature measurement**. American society for testing and materials. 1989.

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

BECKER, B. R.; FRICKE, B. A. Food Thermophysical Property Models. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v.26, n.5, p.627-636, 1999a.

BECKER, B. R.; FRICKE, B. A. Freezing Times of Regularly Shaped Food Items. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v.26, n.5, p.617-626, 1999b.

BERTO, M. I.; GRATÃO, A. C. A.; SILVEIRA JR, V.; VITALI, A. A. Solução modelo de Sacarose e CMC: análise do tempo de hidratação, caracterização reológica e estabilidade térmica. **Brazilian Journal of Food Technology – ITAL**, v.6, n.107, p.9-14, 2003.

BINOTTI, C. S.; CORTEZ, L. A. B. Verificação da eficiência do sistema de refrigeração para aumentar a vida útil dos produtos. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2000, Campinas. **Proceedings online...** Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000000100013&lng=en&nrm=abn>. Acess on: 03 Oct. 2005.

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

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

CHEN, X. D.; CHEN, P. Freezing of aqueous solution in a simple apparatus designed for measuring freezing point. **Food Research International**, v.29, n.8, p.723-729, 1996.

CHEVALIER, D.; LE BAIL, A.; GHOUL, M. Freezing and ice crystals formed in a cylindrical food model. Part I: Freezing at atmospheric pressure. **Journal of Food Engineering**, v.46, p.277-285, 2000.

CHOI, Y.; OKOS, M. R. Effects of Temperature And Composition on the Thermal Properties of Foods. **Food Engineering and Process Applications**, v.1, p.93-101, London: Elsevier, 1986.

CHOUROT, J. M. et al. Technical and economical model for the freezing cost comparison of immersion, cryomechanical and air blast freezing processes. **Energy Conversion and Management**, n.44, p.559-571, 2003.

CLELAND, A. C. **Food Refrigeration Process. Analysis, Design and Simulation**. Elsevier Applied Science. London and New York. 1990. 284p.

CORTBAOUI, P.; GOYETTE, B.; GARIEPY, Y.; CHARLES, M. T.; RAGHAVAN, V. G. S.; VIGNEAULT, C. Forced air cooling system for Zea mays. **Journal of Food Agriculture and Environment**. V. 4, p. 100-104, 2006.

DA SILVA, S. B. **Propriedades Termofísicas de Polpa de Abacaxi**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 1996, 94p.

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

DINCER, I. Thermal cooling data for figs exposed to air cooling. **International Communications Heat Mass Transfer**. v.22, n.4. p.559-566. 1995a.

DINCER, I. Transient heat transfer analysis in air cooling of individual spheric products. **Journal of Food Engineering**, v. 26, p. 453-467, 1995b.

DINCER, I.; GENÇELI, F. Cooling process and heat transfer parameters of cylindrical products cooled both in water and air. **International Journal Heat Transfer**, v. 37, n. 4, p. 625-633, 1994.

DUSSÁN SARRIA, S. HONÓRIO, S.L. NOGUEIRA, D.H. Precooling parameters of 'Roxo de Valinhos' figs (*Ficus carica* L.) packed in a carton box. **Fruits**. v. 61, Issue 6, Nov. 2006, p 401-406.

FELLOWS, P. J. **Food Processing Technology - Principles and Practice**. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK, 2000. 575 p.

FIKIIN, K. A.; FIKIIN, A. G. Predictive equations for thermophysical properties and enthalpy during cooling and freezing of food materials. **Journal of Food Engineering**, v.40, p.1-6, 1999.

FRASER, H. **Tunnel Forced-Air Coolers for Fresh Fruits & Vegetables**. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Government of Ontario, Canada, 1998. Disponível em: <<http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/98-031.htm>>. Acesso em 01 Abr. 2007.

GRIERSON, W.; BROWN, B. Vertical air distribution for cooling fruit in cartons. **Florida Horticultural Society**, v. 88, 1975.

HELDMAN, D.R. Food Freezing. In: HELDMAN, D. R.; LUND, D. B. **Handbook of Food Engineering**. New York: Dekker, 1992. 277-315.

INTERNATIONAL INSTITUTE OF REFRIGERATION. **Recommendations for the processing and handling of frozen foods**. 3rd ed. Ceuterick s.a. Paris, France, 1986. 418p.

JIE, W.; LITE, L.; YANG, D. The correlation between freezing point and soluble solids of fruits. **Journal of Food Engineering**, v.60, p.481-484, 2003.

JOHNSTON, W. A.; NICHOLSON, F. J.; ROGER, A.; STROUD, G. D. **Freezing and refrigerated storage in fisheries**. Series title: FAO Fisheries Technical Papers – T340, 1994. 143p.

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

LEAL, P. A. M.; CORTEZ, L. A. B. **Métodos de Pré-Resfriamento de Frutas e Hortaliças. In: II Curso de Atualização em Tecnologia de Resfriamento de Frutas e Hortaliças**. Campinas: Faculdade de Engenharia Agrícola (UNICAMP). p.81-91. 1998.

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

LE BLANC, D. I.; KOK, R.; TIMBERS, G. E. Freezing of a parallelepiped food product. Part 2: Comparison of Experimental and Calculated Results. **International Journal of Refrigeration**, v.13, p.379-392, 1990b.

MEANA, M. B.; CHAU, K. V.; EMOND, J. P.; TALBOT, M. T. Forced-air cooling of strawberries in reusable plastic containers. **Proceedings of Florida State Horticultural Society**. V. 118, p. 379-382, 2005.

MIKI, H.; HAYAKAWA, K. An Empirical Equation for Estimating Food Enthalpy in a Freezing Temperature Range. **Lebensmittel Wissenschaft und Technologie**, v.29, p.659-663, 1996.

MOHSENIN, N. N. **Thermal properties of foods and agricultural materials**. New York: Gordon and Breach. p. 198-224. 1980.

NEVES FILHO, L. C. **Resfriamento, congelamento e estocagem de alimentos**. IBF / ABRAVA / SINDRATAR, 1991. 176p.

NUNES, M.; NADER, G.; JESUS, F. B. G.; CARDOSO, M.; JABARDO, P. J. S.; PEREIRA, M. T. **Estudo sobre técnicas de medição de vazão em bocas de insuflamento e de exaustão de ar**. Metrologia-2003 – Metrologia para a Vida Sociedade Brasileira de Metrologia (SBM) Setembro 01 –05, 2003, Recife, Pernambuco - BRASIL

RENAUD, T. et al. Thermal Properties of Model Foods in the Frozen State. **Journal of Food Engineering**, v.15, p.83-97, 1992.

RESENDE, J. V.; SILVEIRA JR, V. Medidas da Condutividade Térmica Efetiva em Modelos de Polpas de Frutas no Estado Congelado. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.22, n.2, p.177-183, 2002a.

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

RESENDE, J. V.; NEVES FILHO, L. C.; SILVEIRA JR, V. Coeficientes de Transferência de Calor Efetivos no Congelamento com Ar Forçado de Modelos de Polpas de Frutas em Caixas Comerciais. **Brazilian Journal of Food Technology**, v.5, p.33-42, 2002.

SAAD, Z.; SCOTT, E. P. Estimation of Temperature Dependent Thermal Properties of Basic Food Solutions During Freezing. **Journal of Food Engineering**, v.28, p.1-19, 1996.

SADASHIVE GOWDA, B. S.; NARASIMHAM, G. S. V. L.; KRISHNA MURTHY, M. V. Forced-air precooling of spherical foods in bulk: A parametric study. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v.18, p.613-624, 1997.

SALVADORI, V. O. et al. **Storage of Frozen Foods. Effect of Operation Conditions of the Cold Store on Food Quality and Energy Costs**. Com. C2, E1, D2/3, IIF/IIR, 1998.

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

SANTOS, C. A. **Estudo da Transferência de Calor Durante o Congelamento de Cortes de Aves em Caixas de Papelão Ondulado**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2005, 99p.

SCHWARTZBERG, H. G.; Effective heat capacities for the freezing and thawing of food. **Journal of Food Science**, v.41, p.152-156, 1976.

SCOTT, E. P.; BECK, J. V.; HELDMAN, D. R. Estimation of Time Variable Heat Transfer Coefficients in Frozen Foods during Storage. **Journal of Food Engineering**, v.15, p.99-121, 1992.

TALBOT, M. T.; CHAU, K. V. **Precooling Strawberries**. Agricultural and Biological Engineering Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, pub.CIR942/AE136, 1998. Disponível em: <<http://edis.at.ufl.edu/AE136>>. Acesso em: 04 Out. 2005.

TALBOT, M. T.; FLETCHER, J. H. **A Portable Demonstration Forced-Air Cooler**. Agricultural and Biological Engineering Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, pub.CIR1166/AE096, 1996. Disponível em: <<http://edis.at.ufl.edu/AE096>>. Acesso em: 12 Set. 2005.

TERUEL, M. B. **Estudo teórico-experimental do resfriamento de laranja e banana com ar forçado**. Campinas: Faculdade de Engenharia mecânica/UNICAMP, 2000. 300p. (Tese de Doutorado).

THOMPSON, J. F. Pre-cooling and Storage Facilities. In: USDA. **Agriculture Handbook Number 66 – DRAFT**. United States Department of Agriculture. Revisado em 2004.

VIGNEAULT, C. et al. Plastic container opening area for optimum hydrocooling. **Canadian Biosystems Engineering**, v.46, p.41-44, 2004a.

VIGNEAULT, C.; de CASTRO, L. R.; GAUTRON, G. Effect of open handles on packages during precooling process of horticultural produce. **ASAE Annual International Meeting**. p. 6901-6908, 2004b.

VIGNEAULT, C.; de CASTRO, L. R.; GOYETTE, B.; MARKARIAN, N. R.; CHARLES, M. T.; BOURGEOIS, G.; CORTEZ, L. A. B. Indirect airflow measurement for horticultural crop package. Part II: Verification of the research tool applicability. **ASAE Annual International Meeting**. p. 7331-7344, 2004c.

VIGNEAULT, C.; de CASTRO, L. R.; CORTEZ, L. A. B. Effect of Gravity on Forced-air Precooling. **IASME Transactions** Vol. 2(3):459-463, 2005.

WELTY, J. R.; WICKS, C. E. e WILSON, R. E. **Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer**. 3th Edition, John Wiley & Sons: New York, 1984.

WELTY-CHANES, J.; VERGARA-BALDERAS, F.; BERMUDEZ-AGUIRRE, D. Transport phenomena in food engineering: Basic concepts and advances. **Journal of Food Engineering** Volume 67, Issue 1-2, March 2005, Pages 113-128.

ZARITZKI, N. E. Factors affecting the stability of frozen foods. In: KENNEDY, C. J. **Managing frozend foods**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2000.

ZOU, Q; OPARA, L. U.; MCKIBBIN, R. A CFD modeling system for airflow and heat transfer in ventilated packaging for fresh foods: I. Initial analysis and development of mathematical models. **Journal of Food Engineering**. v. 77, Issue 4, p. 1037-1047. 2006a.

ZOU, Q; OPARA, L. U.; MCKIBBIN, R. A CFD modeling system for airflow and heat transfer in ventilated packaging for fresh foods: II. Computational solution, software development, and model testing. **Journal of Food Engineering**. v. 77, Issue 4, p. 1048-1058. 2006b.

APÊNDICE A

Equações de calibração dos termopares ($y=ax+b$), onde y é a temperatura, e x é o valor de tensão lida no programa.

Identificação do termopar	Localização na montagem**	Equação de calibração	R ²
12	11	$y = 31,901x + 21,948$	0,9993
13	44	$y = 31,917x + 22,106$	0,9993
14	41	$y = 31,471x + 21,793$	0,9992
15	12	$y = 31,616x + 21,983$	0,9994
16	25	$y = 31,627x + 21,856$	0,9993
17	14	$y = 31,522x + 21,793$	0,9993
18	15	$y = 32,646x + 22,384$	0,9984
19	35	$y = 31,505x + 21,93$	0,9993
110	13	$y = 32,029x + 21,955$	0,9992
82	75	$y = 31,713x + 22,662$	0,999
83	73	$y = 31,716x + 22,804$	0,9988
84	45	$y = 31,615x + 22,749$	0,9991
85	55	$y = 31,61x + 22,686$	0,9991
86	72	$y = 31,694x + 22,672$	0,9991
87	74	$y = 31,65x + 22,682$	0,9992
88	43	$y = 31,682x + 22,694$	0,9992
89	42	$y = 31,634x + 22,702$	0,9992
810	71	$y = 31,721x + 22,594$	0,9991
42	T1	$y = 32,874x + 16,414$	0,9982
43	4*	$y = 34,47x + 16,532$	0,9997
44	3*	$y = 34,227x + 16,492$	0,9997
45	2*	$y = 34,252x + 16,645$	0,9998
46	1*	$y = 34,223x + 16,785$	0,9997
47	T2	$y = 34,096x + 16,736$	0,9996
48	T2	$y = 34,229x + 16,83$	0,9995
49	T2	$y = 34,036x + 16,759$	0,9996
22	T1	$y = 36,126x + 20,817$	0,9997
23	T1	$y = 35,886x + 20,757$	0,9996
24	T5	$y = 34,931x + 20,219$	0,9994

25	T5	$y = 35,32x + 20,128$	0,9992
27	T4	$y = 36,592x + 20,408$	0,9988
28	T3	$y = 36,539x + 20,253$	0,9987
29	T3	$y = 34,802x + 20,031$	0,9983
210	T3	$y = 37,406x + 20,108$	0,9986
*vide Figura 3-12			
**vide Figura 3-2 e Figura 3-3			

APÊNDICE B

Resultados experimentais e curvas linearizadas para determinação da inclinação utilizada no cálculo dos coeficientes de convecção para o resfriamento do corpo de prova metálico posicionado nas camadas de caixas montadas sobre o palete para os testes nas condições descritas sob as figuras.

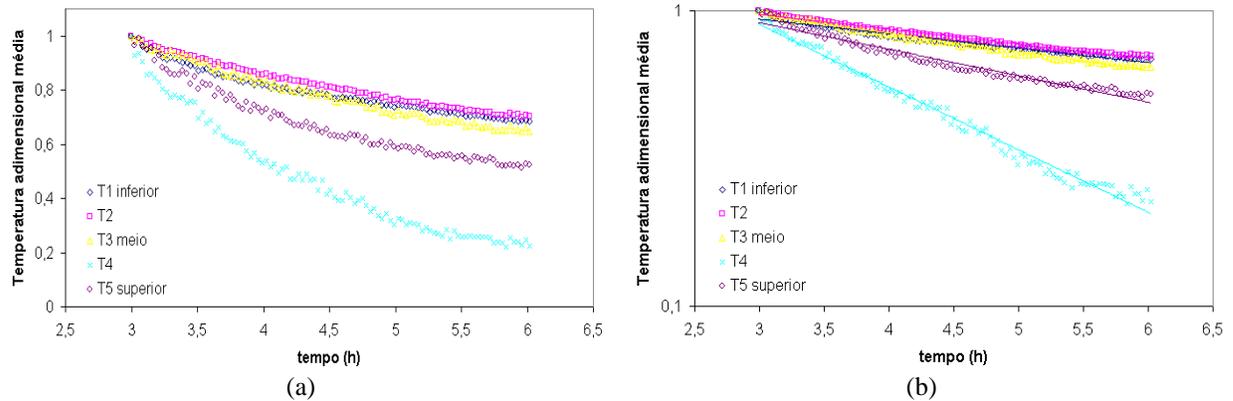


Figura B - 1. Gráficos para o resfriamento dos corpos de prova (T1 a T5) com: (a) resultados experimentais de temperatura adimensional média e (b) curvas linearizadas para determinação do parâmetro S_2 no cálculo do coeficiente de convecção para o ensaio de referência (branco) com capacidade de refrigeração original e arranjo industrial das amostras.

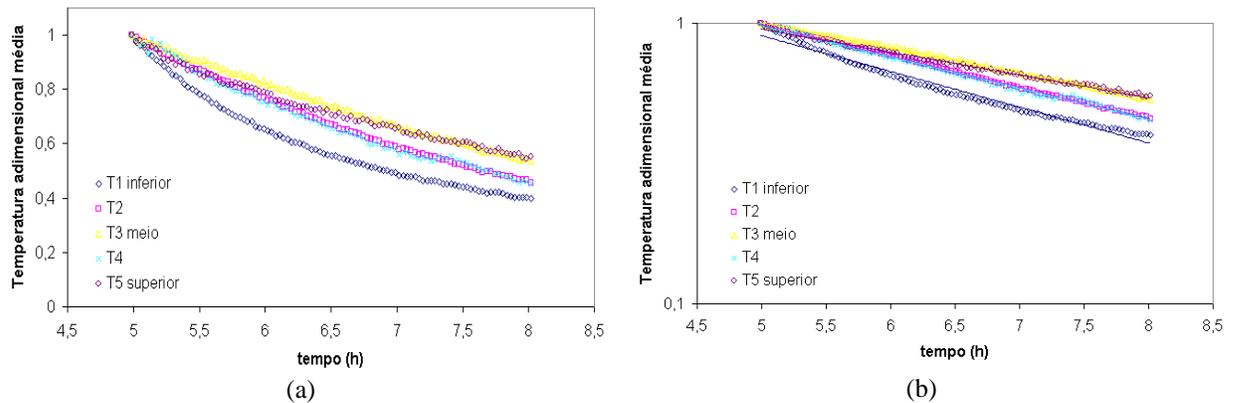


Figura B - 2. Gráficos para o resfriamento dos corpos de prova (T1 a T5) com: (a) resultados experimentais de temperatura adimensional média e (b) curvas linearizadas para determinação do parâmetro S_2 no cálculo do coeficiente de convecção para o ensaio de referência (branco) com capacidade de refrigeração modificada e arranjo alternativo das amostras.

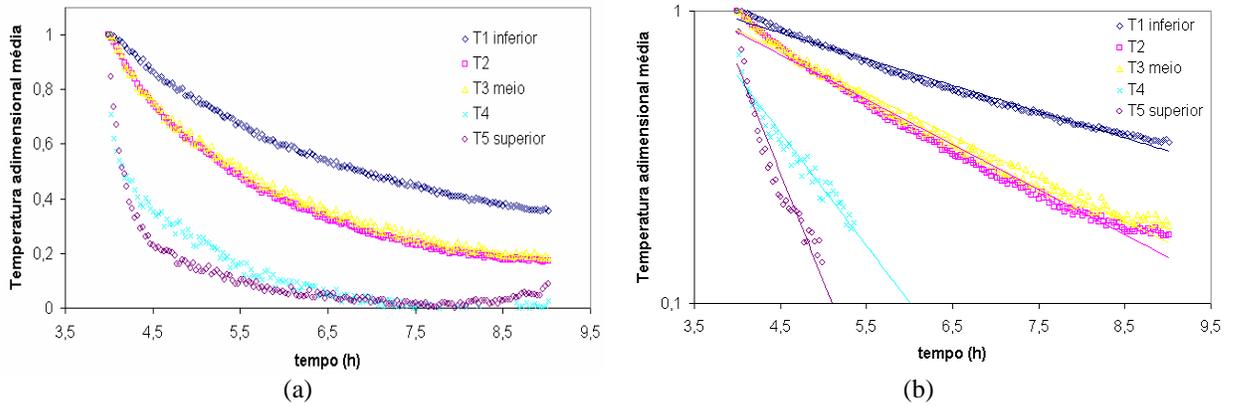


Figura B - 3. Gráficos para o resfriamento dos corpos de prova (T1 a T5) com: (a) resultados experimentais de temperatura adimensional média e (b) curvas linearizadas para determinação do parâmetro S_2 no cálculo do coeficiente de convecção para o ensaio de insuflação com capacidade de refrigeração original e arranjo industrial das amostras.

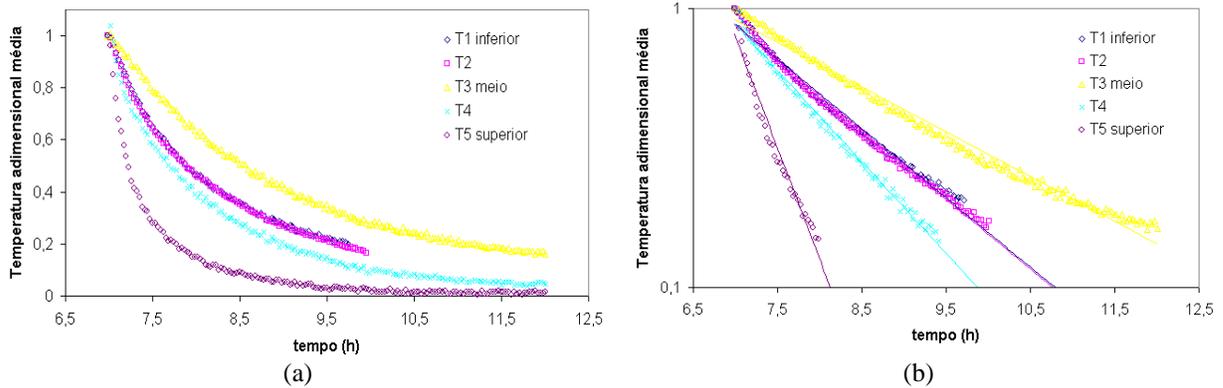


Figura B - 4. Gráficos para o resfriamento dos corpos de prova (T1 a T5) com: (a) resultados experimentais de temperatura adimensional média e (b) curvas linearizadas para determinação do parâmetro S_2 no cálculo do coeficiente de convecção para o ensaio de insuflação com capacidade de refrigeração original e arranjo alternativo das amostras.

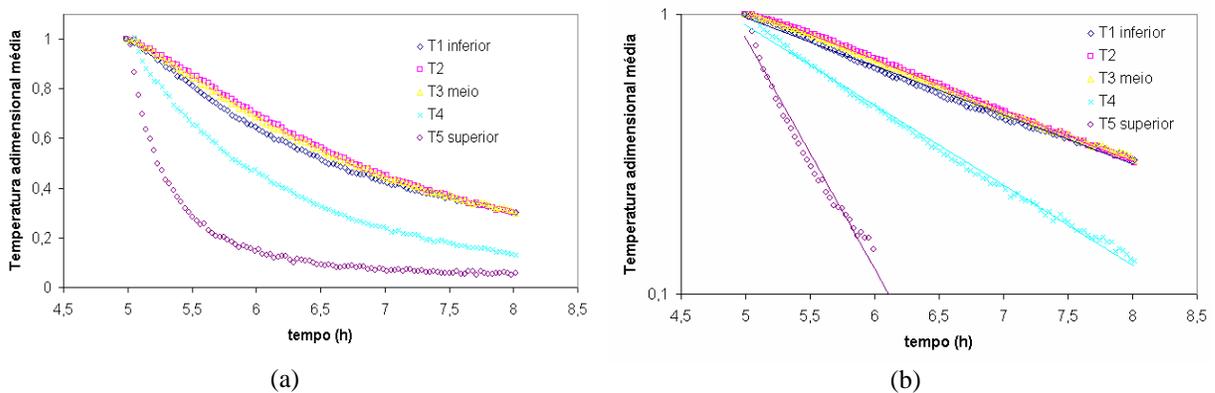


Figura B - 5. Gráficos para o resfriamento dos corpos de prova (T1 a T5) com: (a) resultados experimentais de temperatura adimensional média e (b) curvas linearizadas para determinação do parâmetro S_2 no cálculo do coeficiente de convecção para o ensaio de insuflação com capacidade de refrigeração modificada e arranjo alternativo das amostras (01).

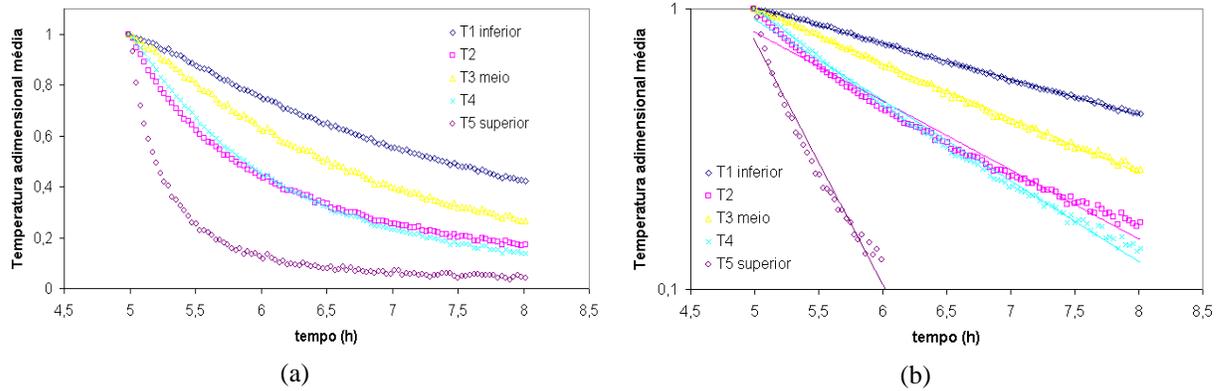


Figura B - 6. Gráficos para o resfriamento dos corpos de prova (T1 a T5) com: (a) resultados experimentais de temperatura adimensional média e (b) curvas linearizadas para determinação do parâmetro S_2 no cálculo do coeficiente de convecção para o ensaio de insuflação com capacidade de refrigeração modificada e arranjo alternativo das amostras (02).

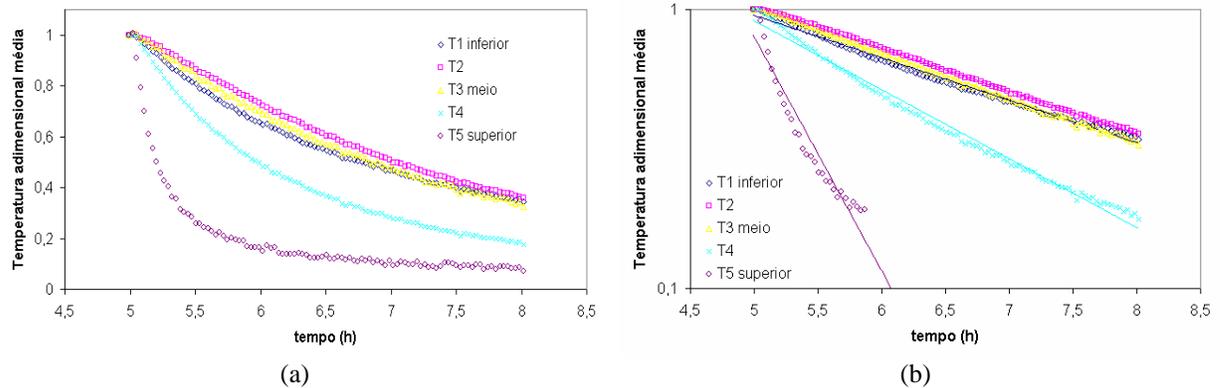


Figura B - 7. Gráficos para o resfriamento dos corpos de prova (T1 a T5) com: (a) resultados experimentais de temperatura adimensional média e (b) curvas linearizadas para determinação do parâmetro S_2 no cálculo do coeficiente de convecção para o ensaio de insuflação com capacidade de refrigeração modificada e arranjo alternativo das amostras (03).

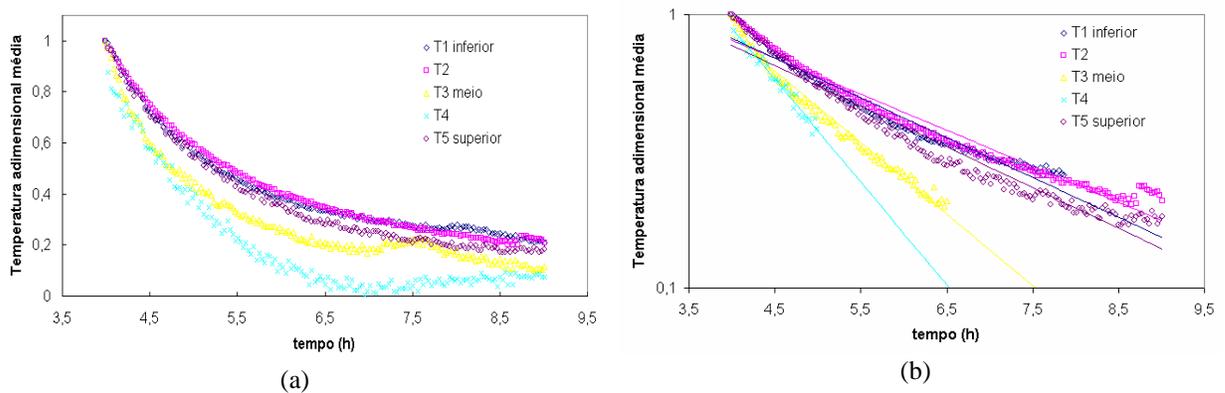


Figura B - 8. Gráficos para o resfriamento dos corpos de prova (T1 a T5) com: (a) resultados experimentais de temperatura adimensional média e (b) curvas linearizadas para determinação do parâmetro S_2 no cálculo do coeficiente de convecção para o ensaio de exasutão com capacidade de refrigeração original e arranjo industrial das amostras.

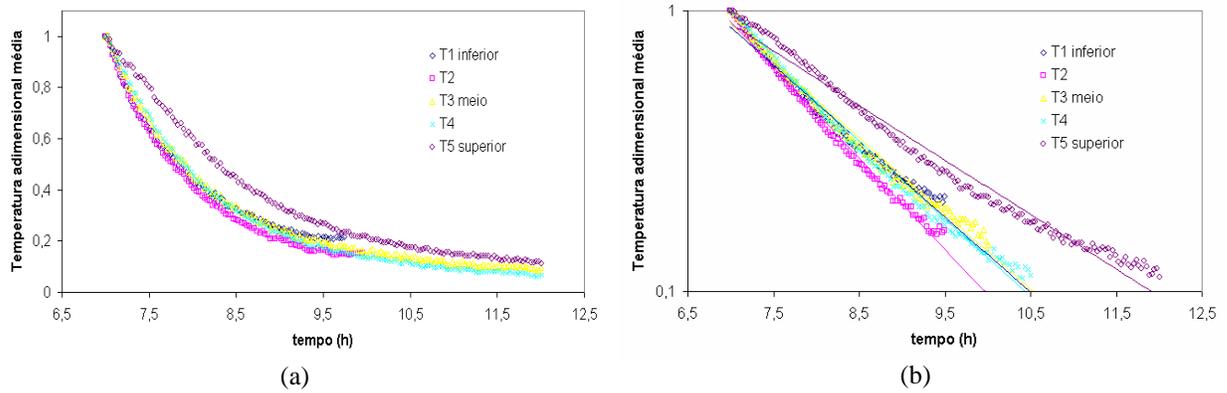


Figura B - 9. Gráficos para o resfriamento dos corpos de prova (T1 a T5) com: (a) resultados experimentais de temperatura adimensional média e (b) curvas linearizadas para determinação do parâmetro S_2 no cálculo do coeficiente de convecção para o ensaio de exaustão com capacidade de refrigeração original e arranjo alternativo das amostras.

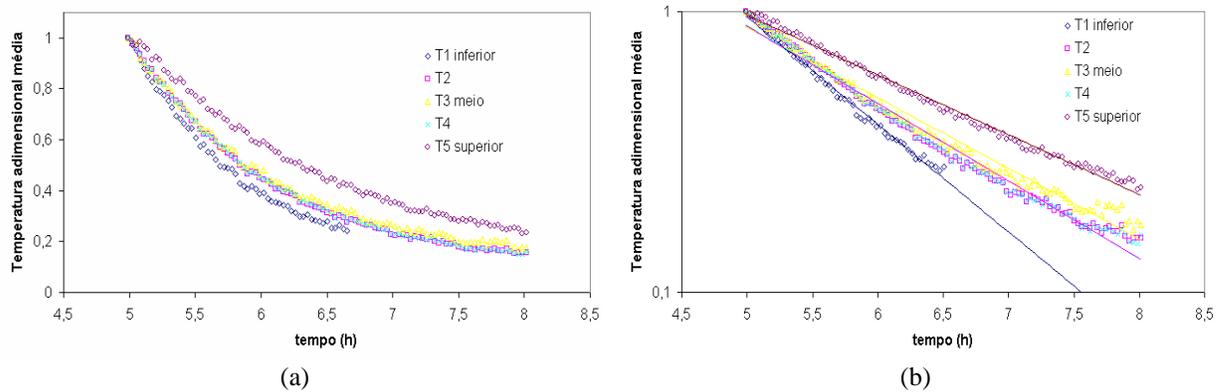


Figura B - 10. Gráficos para o resfriamento dos corpos de prova (T1 a T5) com: (a) resultados experimentais de temperatura adimensional média e (b) curvas linearizadas para determinação do parâmetro S_2 no cálculo do coeficiente de convecção para o ensaio de exaustão com capacidade de refrigeração modificada e arranjo alternativo das amostras (01).

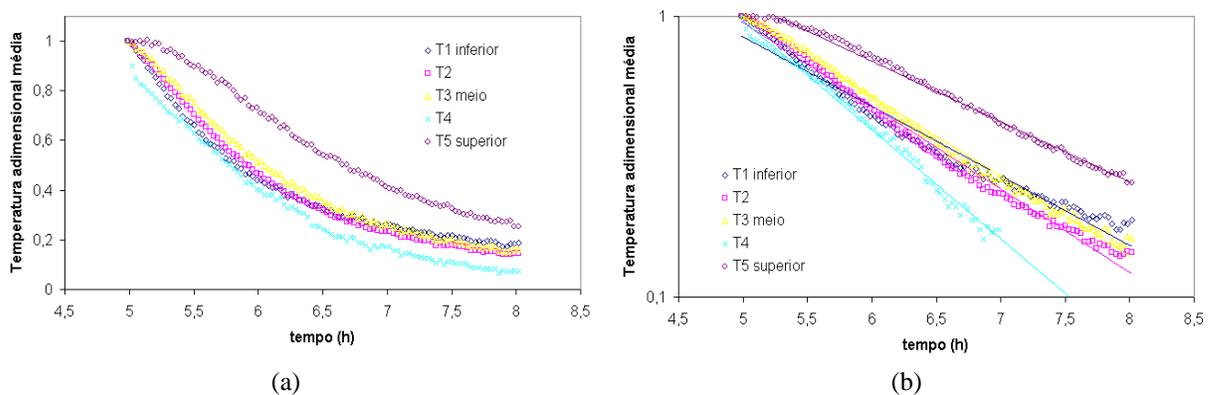


Figura B - 11. Gráficos para o resfriamento dos corpos de prova (T1 a T5) com: (a) resultados experimentais de temperatura adimensional média e (b) curvas linearizadas para determinação do parâmetro S_2 no cálculo do coeficiente de convecção para o ensaio de exaustão com capacidade de refrigeração modificada e arranjo alternativo das amostras (02).

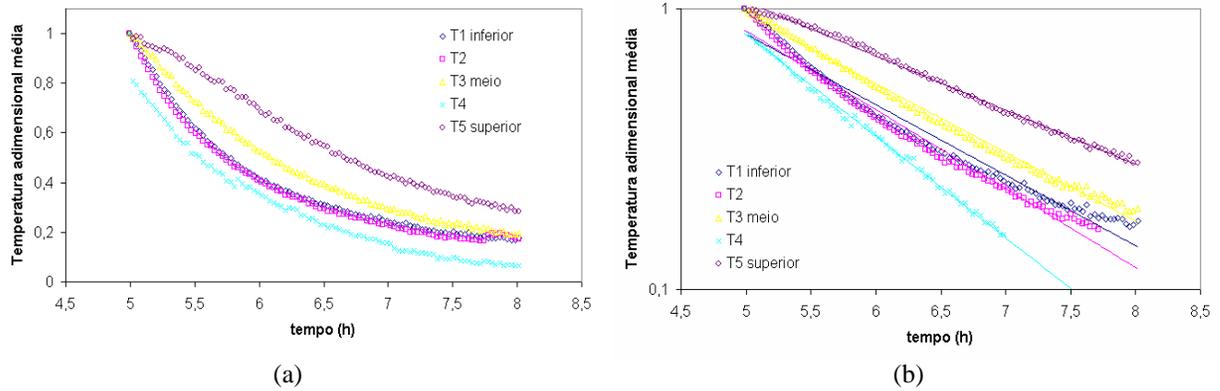


Figura B - 12. Gráficos para o resfriamento dos corpos de prova (T1 a T5) com: (a) resultados experimentais de temperatura adimensional média e (b) curvas linearizadas para determinação do parâmetro S_2 no cálculo do coeficiente de convecção para o ensaio de exaustão com capacidade de refrigeração modificada e arranjo alternativo das amostras (03).

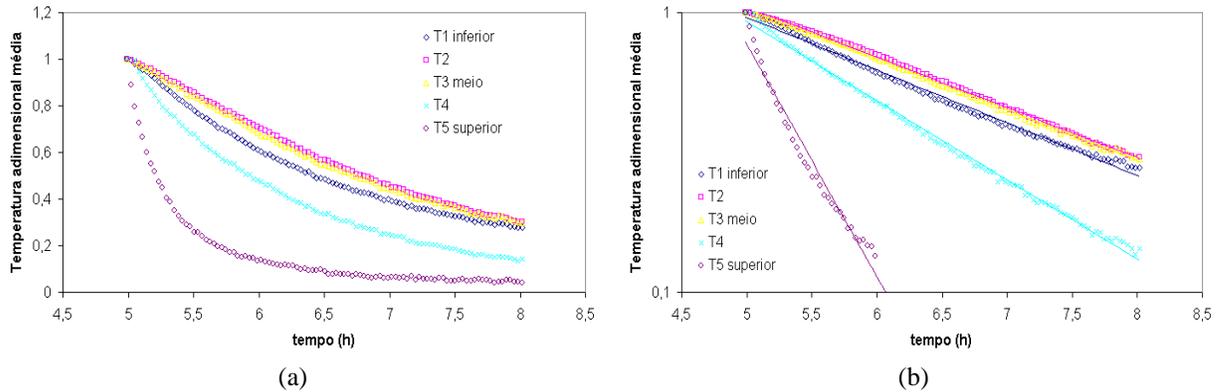


Figura B - 13. Gráficos para o resfriamento dos corpos de prova (T1 a T5) com: (a) resultados experimentais de temperatura adimensional média e (b) curvas linearizadas para determinação do parâmetro S_2 no cálculo do coeficiente de convecção para o ensaio misto (insuflação-exaustão) com capacidade de refrigeração modificada e arranjo alternativo das amostras.

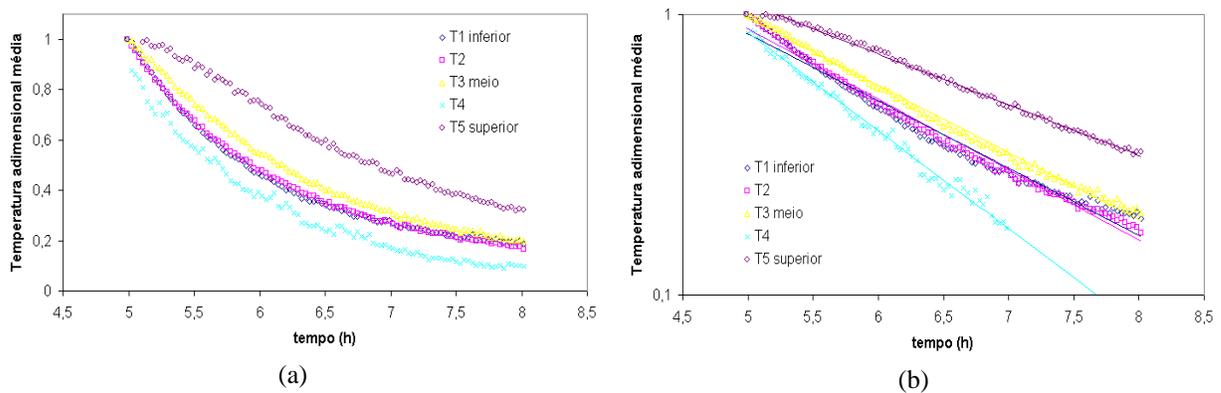


Figura B - 14. Gráficos para o resfriamento dos corpos de prova (T1 a T5) com: (a) resultados experimentais de temperatura adimensional média e (b) curvas linearizadas para determinação do parâmetro S_2 no cálculo do coeficiente de convecção para o ensaio misto (exaustão-insuflação) com capacidade de refrigeração modificada e arranjo alternativo das amostras.

APÊNDICE C

Valores obtidos da regressão linear para o cálculo dos coeficientes de convecção para os ensaios de exaustão e insuflação, com a capacidade original da câmara.

Tabela C - 1. Valores de coeficiente angular, coeficiente linear (A) e R^2 para a equação $y = A \cdot e^{S_2 \cdot x}$, onde y = Temperatura adimensional média e x é o tempo (h); para o processo de insuflação, comparando os dois tipos de arranjos das embalagens nas caixas

Corpo de prova	Disposição industrial			Disposição "alternativa"		
	S_2	A	R^2	S_2	A	R^2
T1 inferior	-0,2068	2,1368	0,9876	-0,5722	48,109	0,9862
T2	-0,3545	3,4989	0,9816	-0,5734	47,993	0,9907
T3 meio	-0,3337	3,261	0,9832	-0,3689	12,019	0,9877
T4	-0,8910	21,166	0,9182	-0,7540	171,24	0,9915
T5 superior	-1,7033	593,69	0,9116	-1,8339	297557	0,9674

Tabela C - 2. Valores de coeficiente angular, coeficiente linear (A) e R^2 para a equação $y = A \cdot e^{S_2 \cdot x}$, onde y = Temperatura adimensional média e x é o tempo (h); para o processo de exaustão, comparando os dois tipos de arranjos das embalagens nas caixas.

Corpo de prova	Disposição industrial			Disposição "alternativa"		
	S_2	A	R^2	S_2	A	R^2
T1 inferior	-0,3348	3,1252	0,9538	-0,6210	67,565	0,9810
T2	-0,3036	2,7164	0,9612	-0,7449	167,5	0,9921
T3 meio	-0,6019	9,3108	0,9825	-0,6223	69,981	0,9860
T4	-0,8655	28,489	-0,9669	-0,6393	78,756	0,9866
T5 superior	-0,3423	3,0375	-0,9510	-0,4471	20,535	0,9806

Tabela C - 3. Valores do coeficiente de convecção efetivos obtidos para os testes de exaustão e insuflação com dois arranjos das amostras nas caixas diferentes: disposição industrial e alternativa sugerida, com maior espaçamento para circulação de ar entre as embalagens.

Corpo de prova	Disposição industrial		Disposição "alternativa"	
	Exaustão	Insuflação	Exaustão	Insuflação
T1 inferior	5,79	3,58	10,74	9,90
T2	5,25	6,13	12,88	9,92
T3 meio	10,41	5,77	10,76	6,38
T4	14,97	15,41	11,06	13,04
T5 superior	5,92	29,46	7,73	31,72

APÊNDICE D

Valores obtidos da regressão linear para o cálculo dos coeficientes de convecção para os ensaios de exaustão e insuflação, com a capacidade modificada da câmara.

Tabela D - 1. Valores de coeficiente angular, coeficiente linear (A) e R^2 para a equação $y = A \cdot e^{S_2 \cdot x}$, onde y = Temperatura adimensional média, e x é o tempo (h); para os processos de exaustão e insuflação do ar.

Corpo de prova	Exaustão			Insuflação			Branco		
	S_2	A	R^2	S_2	A	R^2	S_2	A	R^2
T1 inferior	-0,881	78,468	0,9939	-0,4029	7,3176	0,9948			
	-0,570	14,619	0,9710	-0,2941	4,3962	0,9990			
	-0,578	14,631	0,9685	-0,3504	5,4944	0,992			
	-0,552	13,447	0,9746	-0,434	8,4137	0,9942			
média	-0,567			-0,3957			-0,2934	3,9131	0,9795
DP	0,014			0,0422					
T2	-0,634	21,432	0,9843	-0,4186	8,5017	0,9987			
	-0,683	28,886	0,9903	-0,5662	14,018	0,9805			
	-0,647	21,163	0,9819	-0,3521	5,99	0,9993			
	-0,578	15,963	0,9903	-0,414	8,3128	0,9984			
média	-0,635			-0,3950			-0,2578	3,5936	0,9995
DP	0,044			0,0372					
T3 meio	-0,579	15,861	0,9795	-0,4092	7,9606	0,9986			
	-0,656	26,575	0,9934	-0,4487	9,4074	0,9977			
	-0,563	15,852	0,9932	-0,3737	6,5629	0,9984			
	-0,550	15,154	0,9950	-0,415	8,2019	0,9987			
média	-0,587			-0,4116			-0,2065	2,8229	0,9982
DP	0,047			0,0307					
T4	-0,637	21,571	0,9862	-0,6582	24,573	0,9950			
	-0,895	84,486	0,9921	-0,6628	25,209	0,9923			
	-0,834	52,281	0,9945	-0,5687	15,634	0,9894			
	-0,805	48,17	0,9881	-0,652	24,155	0,9966			
média	-0,844			-0,6354			-0,2557	3,5161	0,9934
DP	0,046			0,0447					
T5 superior	-0,489	11,201	0,9932	-1,8999	11004	0,9732			
	-0,496	13,547	0,9927	-2,0013	17084	0,9684			
	-0,444	9,7591	0,9963	-1,9316	12480	0,93			
	-0,416	8,7609	0,9959	-1,918	11300	0,9700			
média	-0,461			-1,9378			-0,1879	2,4371	0,9923
DP	0,038			0,0443					

Tabela D - 2. Média e desvio padrão dos valores de coeficiente angular (S_2) $y = A \cdot e^{S_2 \cdot x}$, onde $y =$ Temperatura adimensional média, e x é o tempo (h); para os processos de exaustão e insuflação do ar.

Corpo de prova	Exaustão		Insuflação		Branco
	Média S_2	DP	Média S_2	DP	
T1 inferior	-0,5666	0,014	-0,3957	0,042	-0,2934
T2	-0,6546	0,025	-0,3950	0,037	-0,2578
T3 meio	-0,5640	0,014	-0,4116	0,031	-0,2065
T4	-0,8444	0,046	-0,6576	0,006	-0,2557
T5 superior	-0,4765	0,028	-1,9378	0,044	-0,1879

Tabela D - 3. Valores de h_{ef} para os processos de exaustão e insuflação no túnel portátil, e do teste branco de referência, sem o túnel.

	Exaustão		Insuflação		Branco
	média	DP	média	DP	
1 (inferior)	9,80	0,24	6,41	1,06	5,08
2	10,99	0,75	7,57	1,57	4,46
3 (meio)	10,15	0,82	7,12	0,53	3,57
4	13,71	1,90	10,99	0,77	4,42
5 (superior)	7,98	0,66	33,52	0,77	3,25

APÊNDICE E

Gradientes de temperatura obtidos por ajuste não-linear em função da localização das amostras monitoradas no sistema de coordenadas no plano (xy) das camadas de caixas da montagem para o processo de exaustão 01 e insuflação 01. Para referência das coordenadas, vide Figura 3-3. As colunas representam, da esquerda para a direita, as camadas inferior, central e superior, respectivamente.

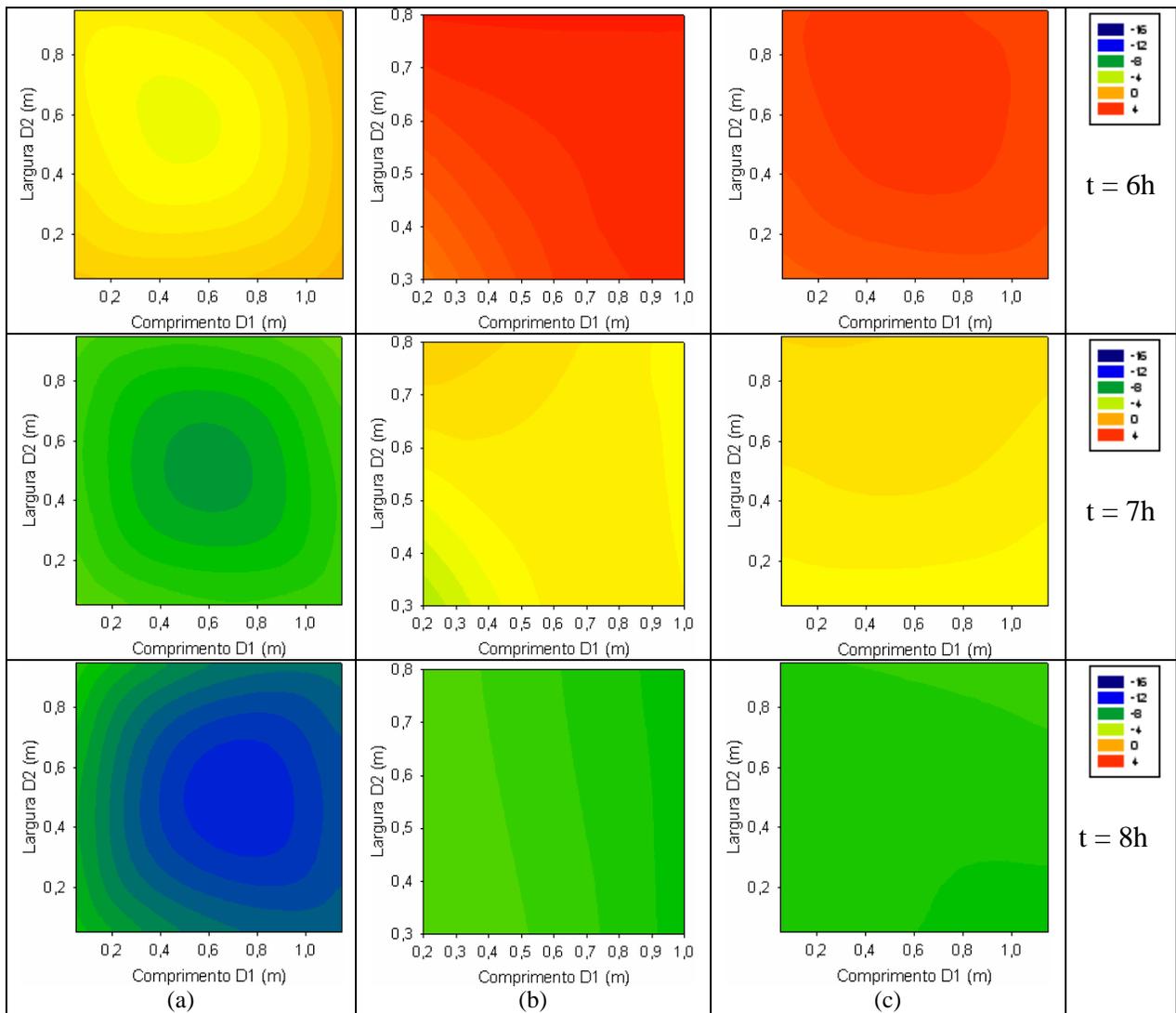


Figura E - 1. Gradientes de temperatura obtidos por ajuste não-linear em função da localização das amostras monitoradas no sistema de coordenadas no plano (xy) das camadas de caixas da montagem para o processo de exaustão 01: (a) camada inferior, (b) camada central, (c) camada superior.

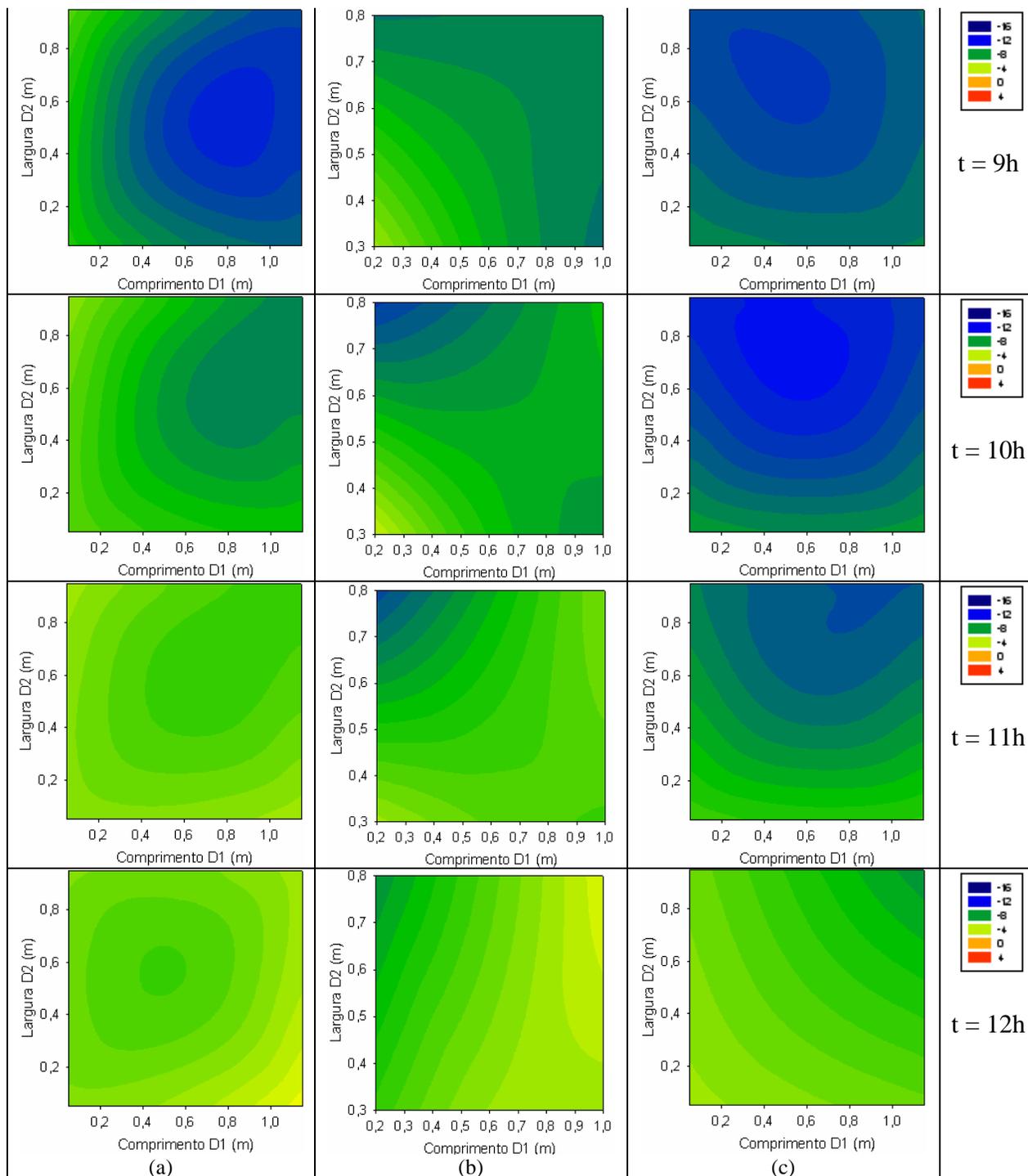


Figura E - 2. Gradientes de temperatura obtidos por ajuste não-linear em função da localização das amostras monitoradas no sistema de coordenadas no plano (xy) das camadas de caixas da montagem para o processo de exaustão 01: (a) camada inferior, (b) camada central, (c) camada superior.

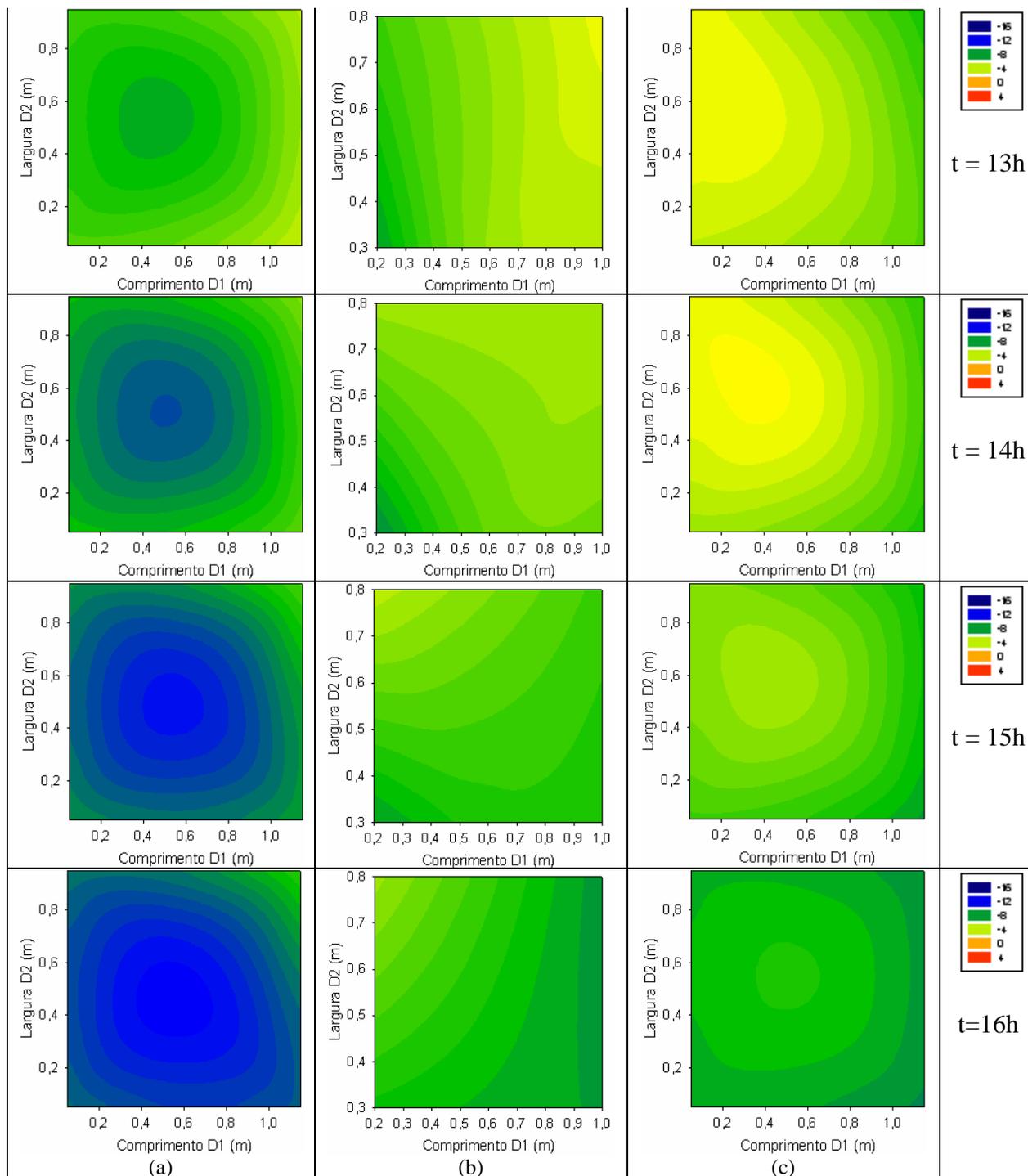


Figura E - 3. Gradientes de temperatura obtidos por ajuste não-linear em função da localização das amostras monitoradas no sistema de coordenadas no plano (xy) das camadas de caixas da montagem para o processo de exaustão 01: (a) camada inferior, (b) camada central, (c) camada superior.

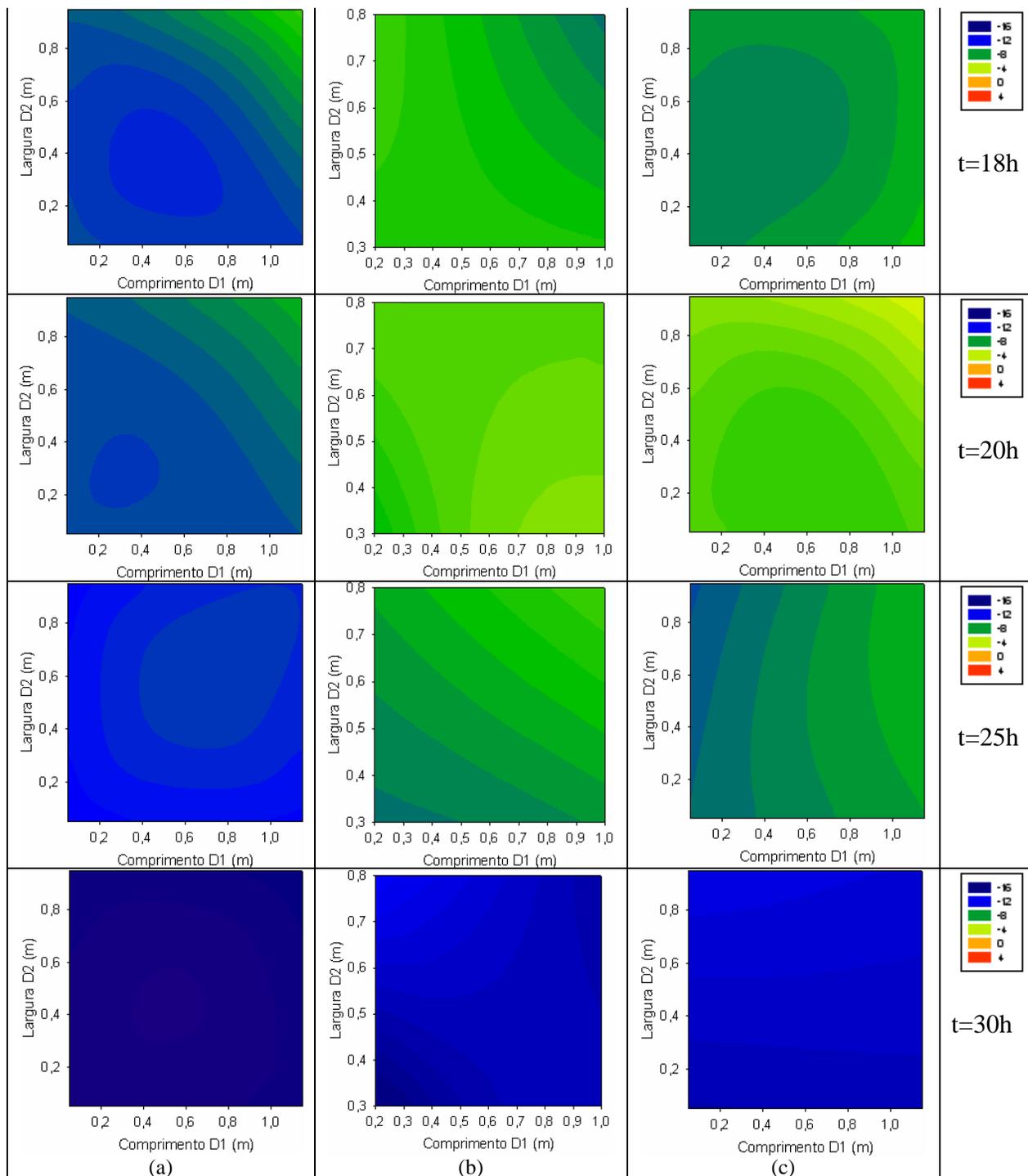


Figura E - 4. Gradientes de temperatura obtidos por ajuste não-linear em função da localização das amostras monitoradas no sistema de coordenadas no plano (xy) das camadas de caixas da montagem para o processo de exaustão 01: (a) camada inferior, (b) camada central, (c) camada superior.

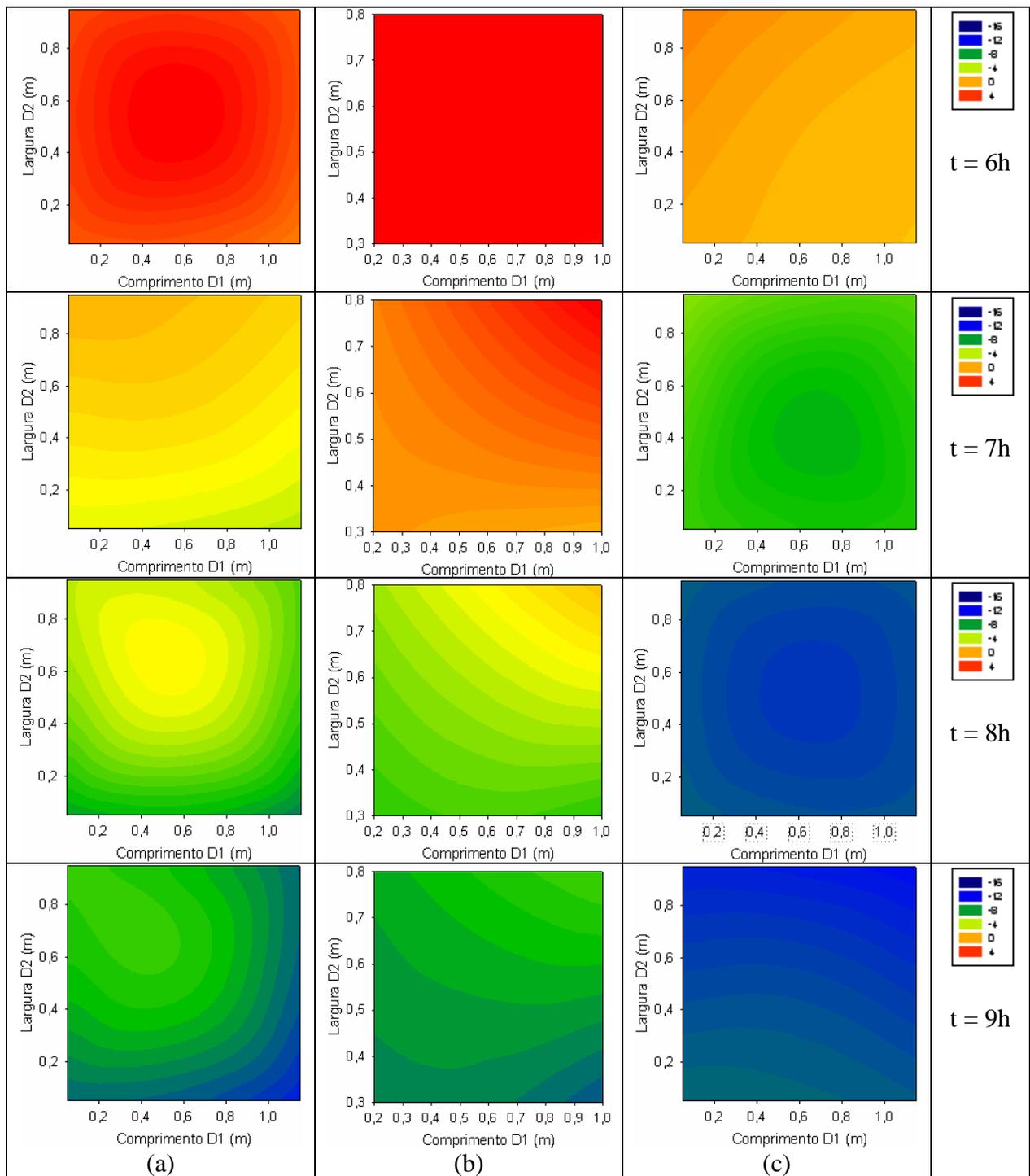


Figura E - 5. Gradientes de temperatura obtidos por ajuste não-linear em função da localização das amostras monitoradas no sistema de coordenadas no plano (xy) das camadas de caixas da montagem para o processo de insuflação 01: (a) camada inferior, (b) camada central, (c) camada superior.

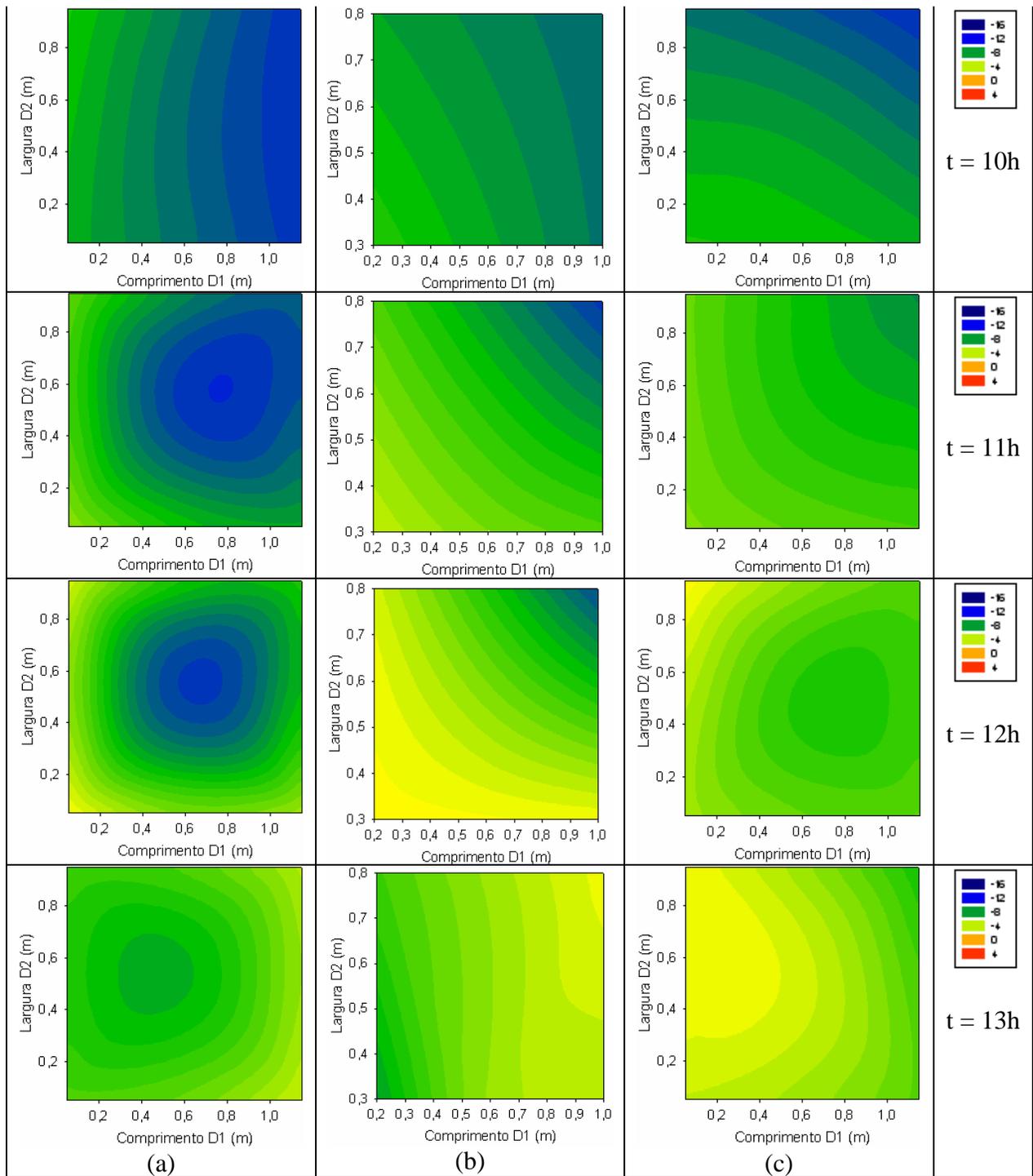


Figura E - 6. Gradientes de temperatura obtidos por ajuste não-linear em função da localização das amostras monitoradas no sistema de coordenadas no plano (xy) das camadas de caixas da montagem para o processo de insuflação 01: (a) camada inferior, (b) camada central, (c) camada superior.

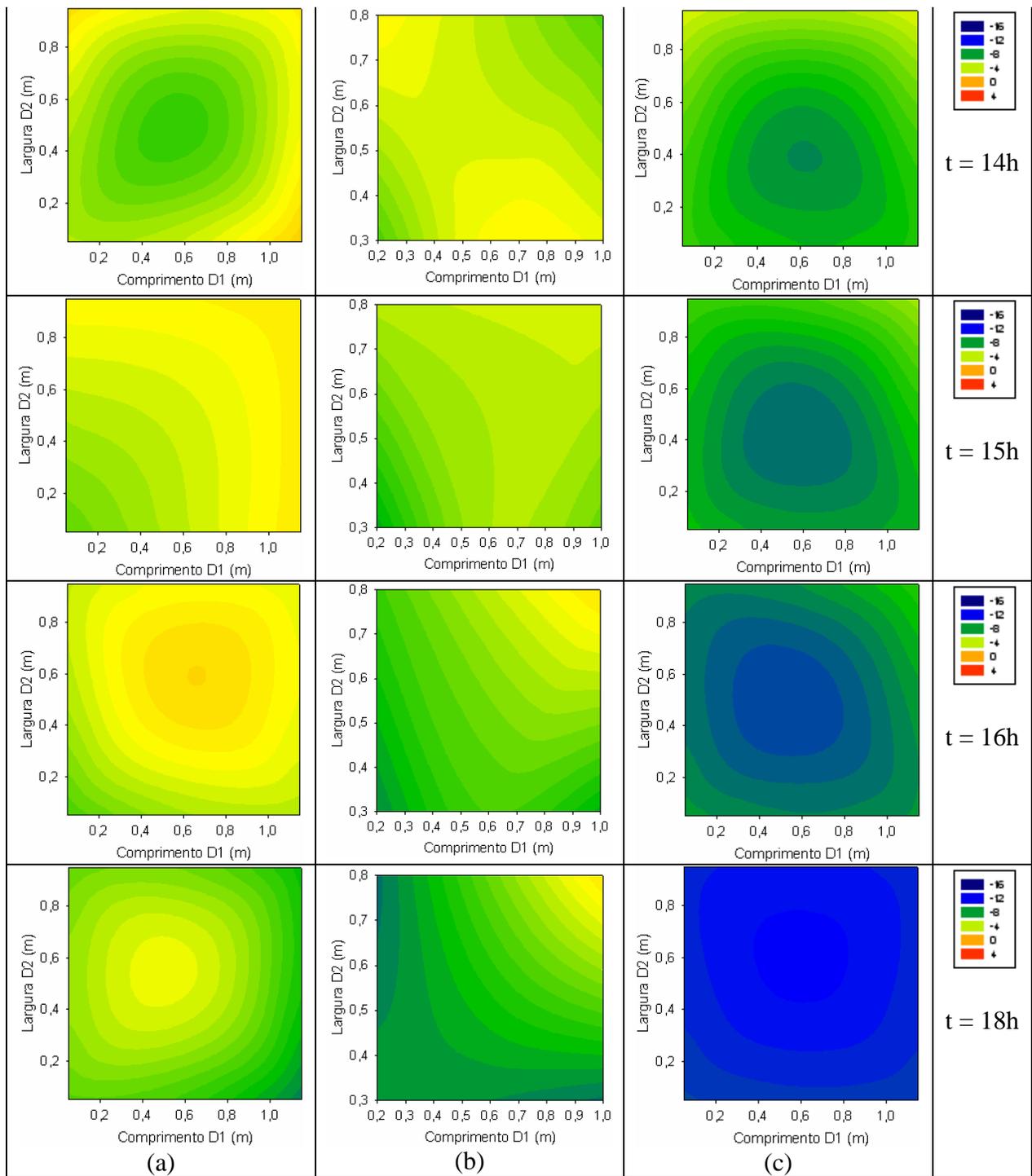


Figura E - 7. Gradientes de temperatura obtidos por ajuste não-linear em função da localização das amostras monitoradas no sistema de coordenadas no plano (xy) das camadas de caixas da montagem para o processo de insuflação 01: (a) camada inferior, (b) camada central, (c) camada superior.

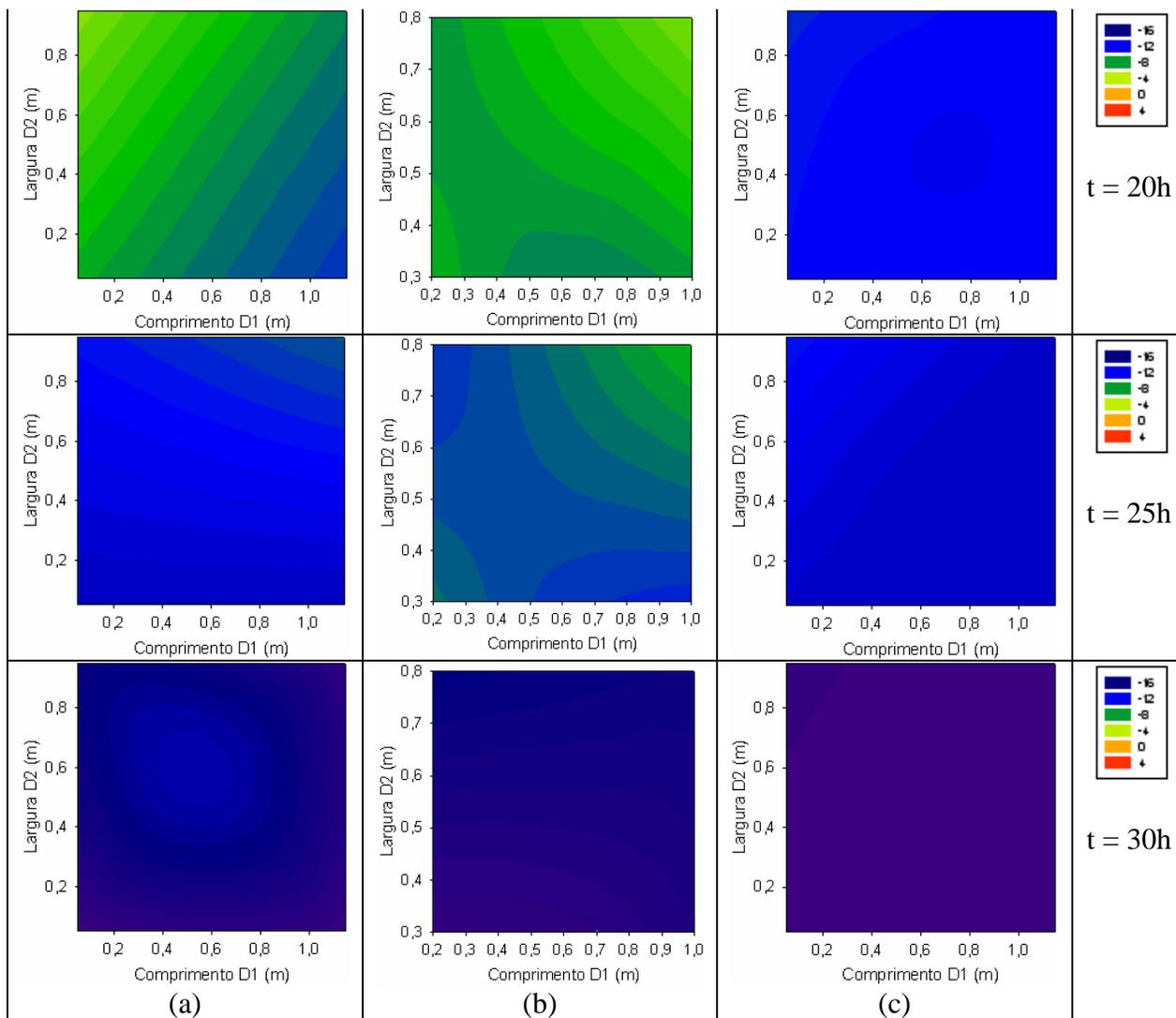


Figura E - 8. Gradientes de temperatura obtidos por ajuste não-linear em função da localização das amostras monitoradas no sistema de coordenadas no plano (xy) das camadas de caixas da montagem para o processo de insuflação 01: (a) camada inferior, (b) camada central, (c) camada superior.

APÊNDICE F

Curvas de temperatura *versus* tempo obtidas para os processos de congelamento.

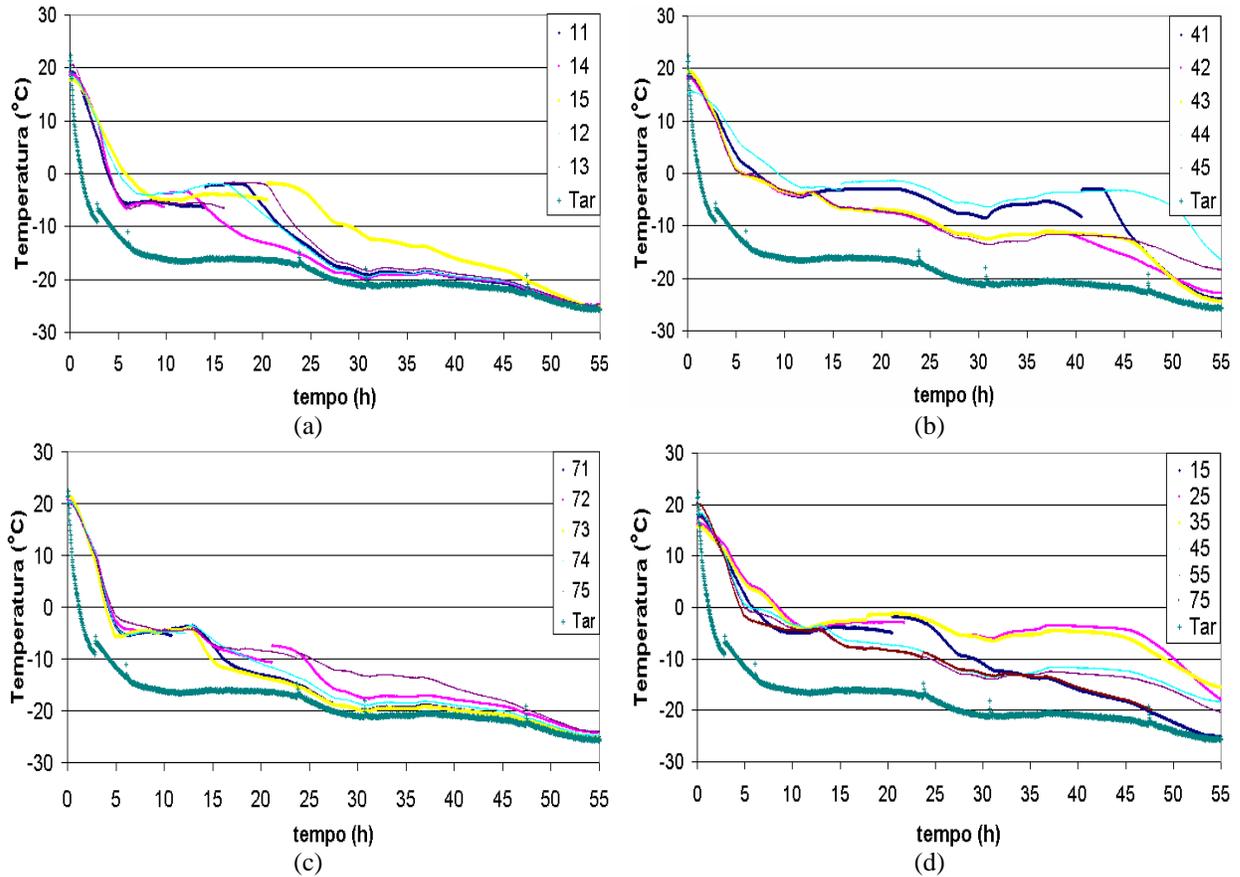


Figura F - 1. Curvas de temperatura versus tempo de congelamento para o teste de referência (branco) com capacidade de refrigeração original e arranjo industrial das amostras para as camadas: (a) inferior, (b) central, (c) superior, (d) pontos centrais das camadas.

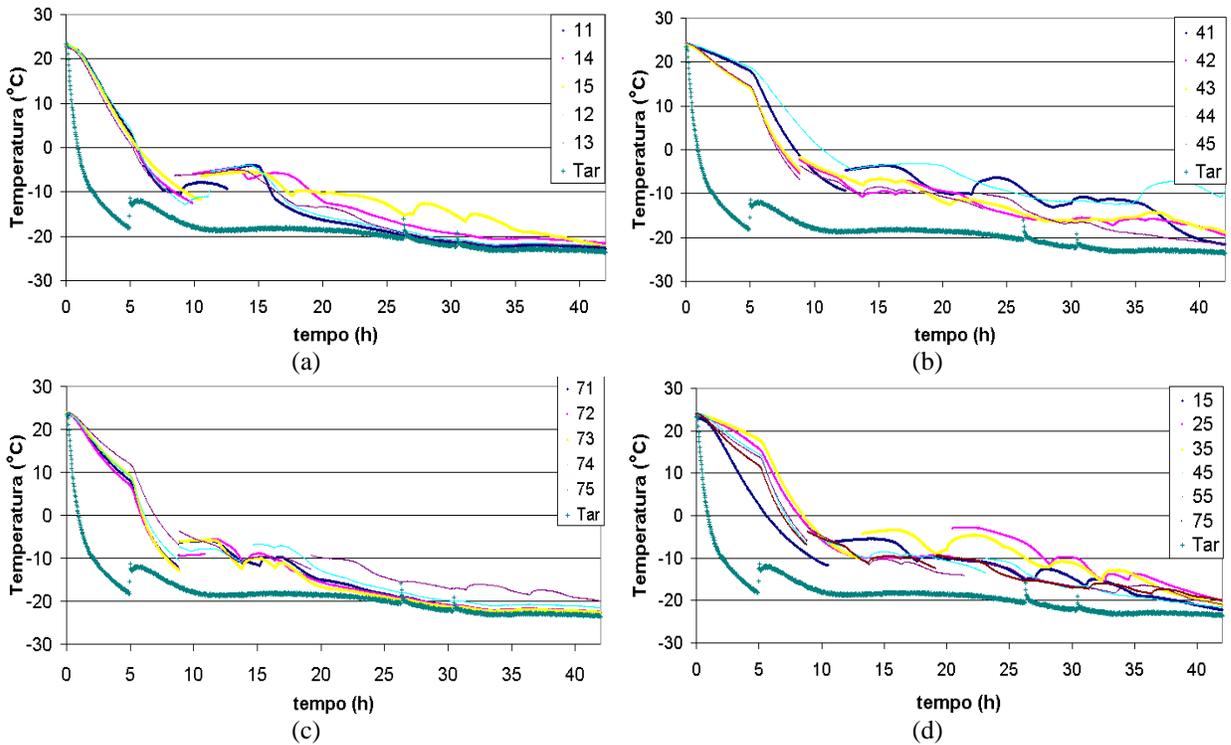


Figura F - 2. Curvas de temperatura versus tempo de congelamento para o teste de referência (branco) com capacidade de refrigeração modificada e arranjo alternativo das amostras para as camadas: (a) inferior, (b) central, (c) superior, (d) pontos centrais das camadas.

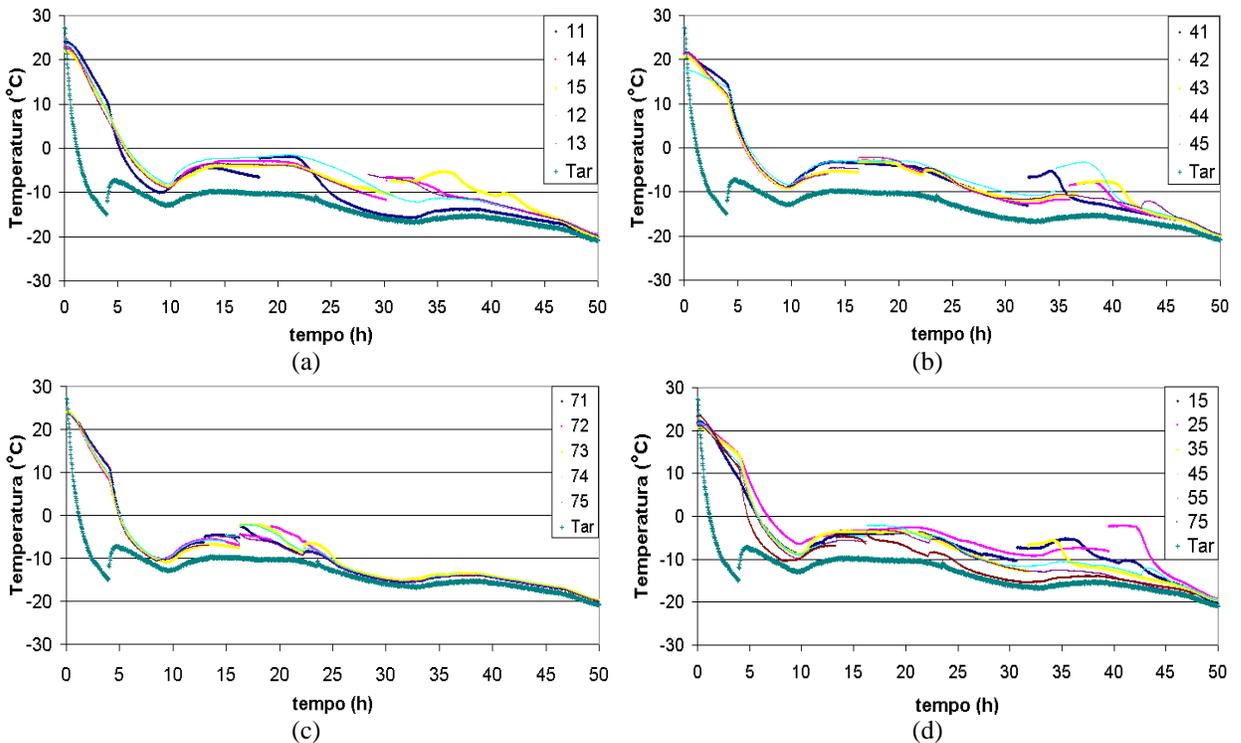


Figura F - 3. Curvas de temperatura versus tempo de congelamento para o teste de insuflação com capacidade de refrigeração original e arranjo industrial das amostras para as camadas: (a) inferior, (b) central, (c) superior, (d) pontos centrais das camadas.

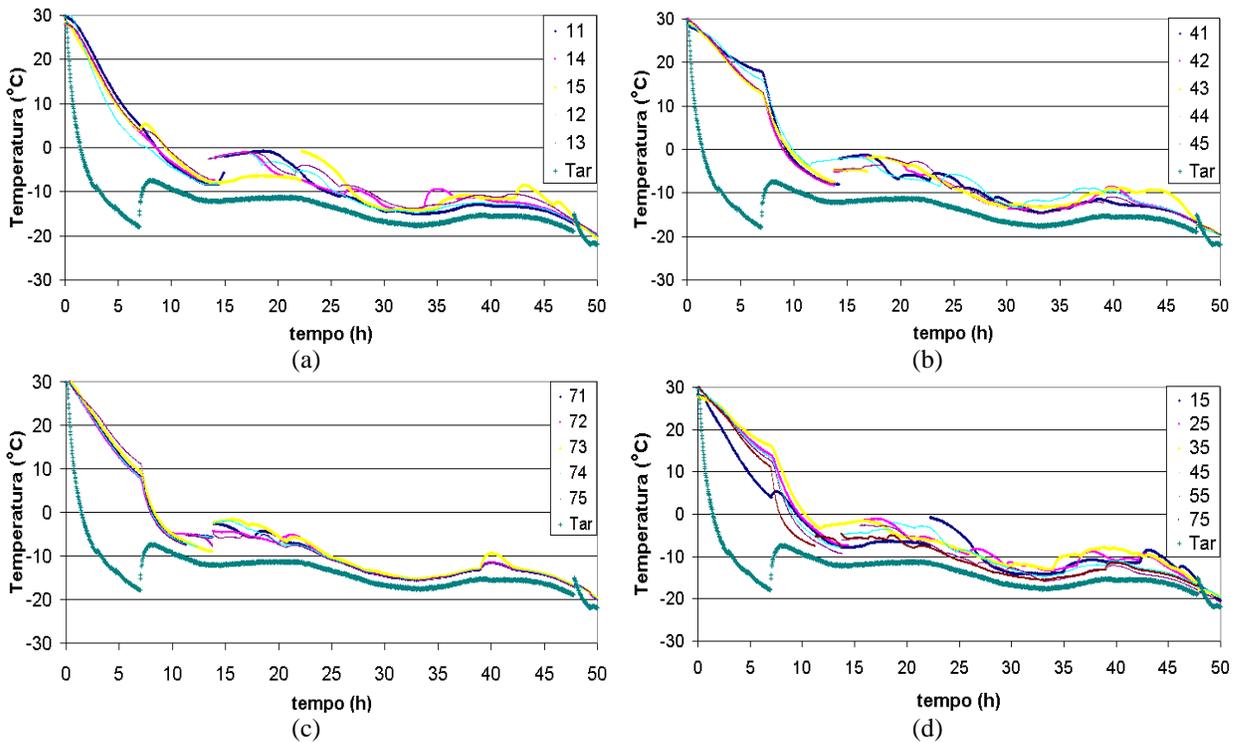


Figura F - 4. Curvas de temperatura versus tempo de congelamento para o teste de insuflação com capacidade de refrigeração original e arranjo alternativo das amostras para as camadas: (a) inferior, (b) central, (c) superior, (d) pontos centrais das camadas.

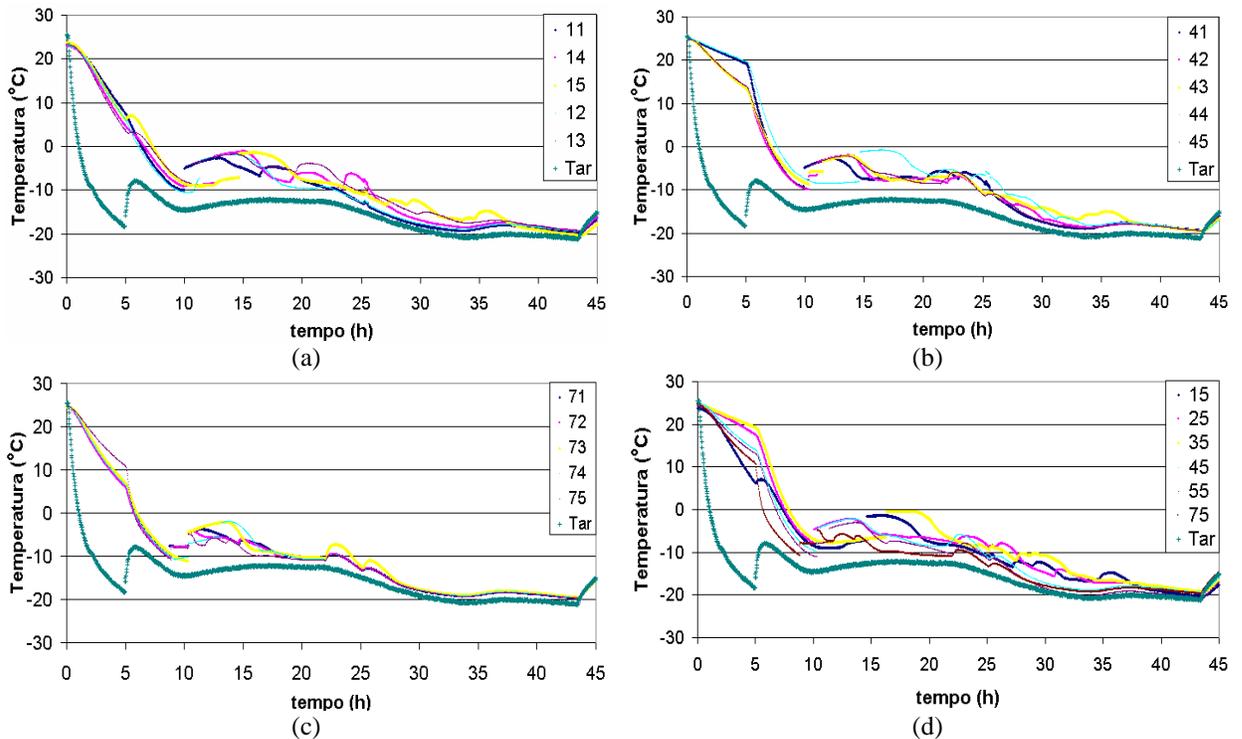


Figura F - 5. Curvas de temperatura versus tempo de congelamento para o teste de insuflação com capacidade de refrigeração modificada e arranjo alternativo das amostras (01) para as camadas: (a) inferior, (b) central, (c) superior, (d) pontos centrais das camadas.

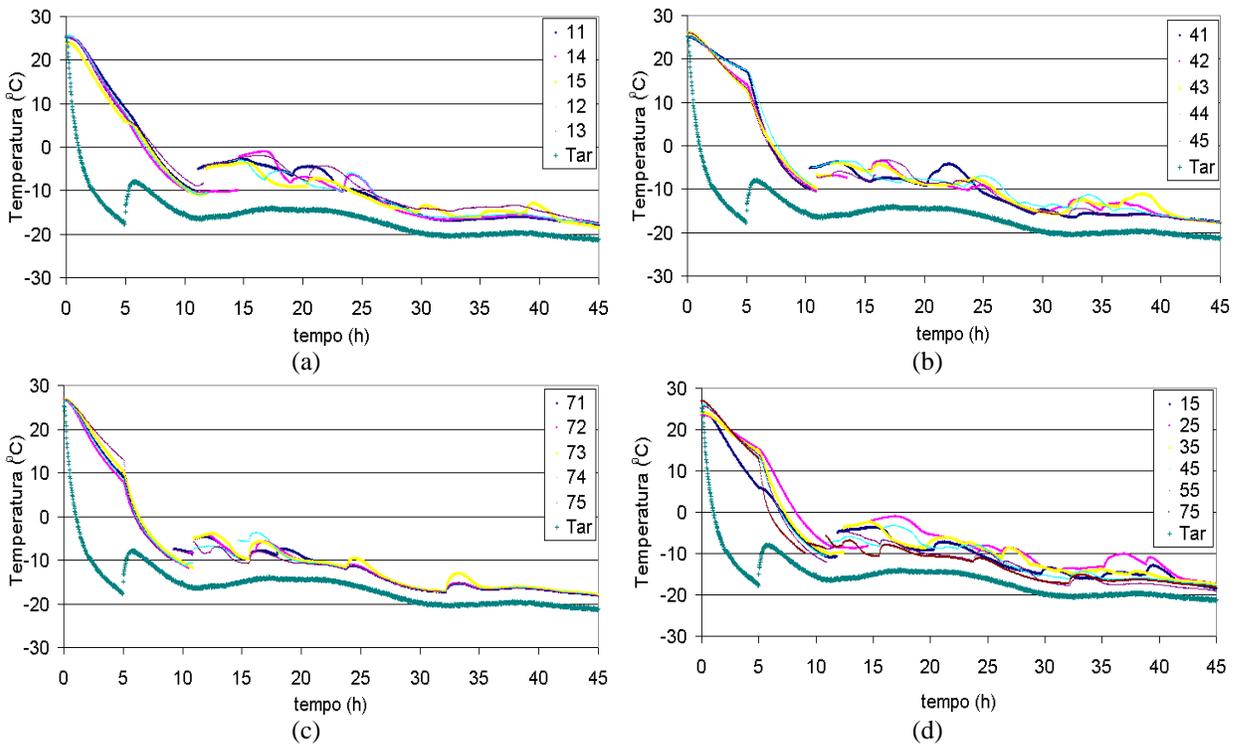


Figura F - 6. Curvas de temperatura versus tempo de congelamento para o teste de insuflação com capacidade de refrigeração modificada e arranjo alternativo das amostras (02) para as camadas: (a) inferior, (b) central, (c) superior, (d) pontos centrais das camadas.

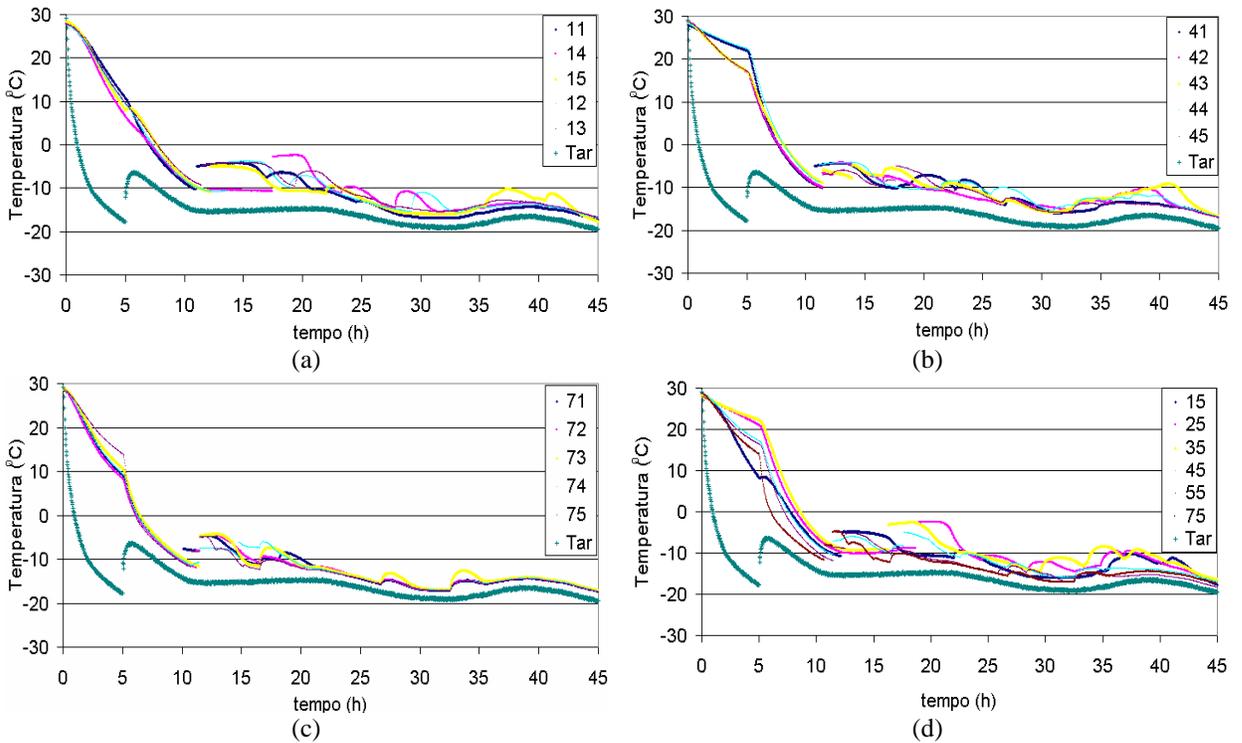


Figura F - 7. Curvas de temperatura versus tempo de congelamento para o teste de insuflação com capacidade de refrigeração modificada e arranjo alternativo das amostras (03) para as camadas: (a) inferior, (b) central, (c) superior, (d) pontos centrais das camadas.

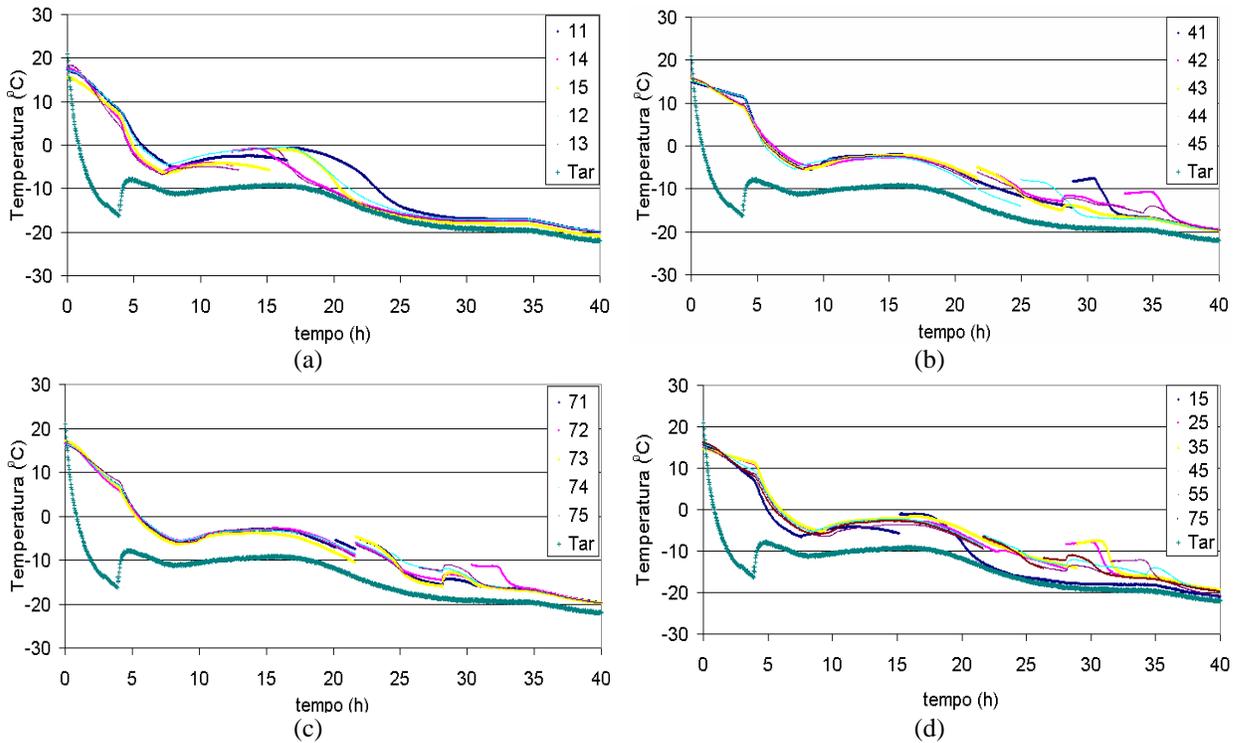


Figura F - 8. Curvas de temperatura versus tempo de congelamento para o teste de exaustão com capacidade de refrigeração original e arranjo alternativo das amostras para as camadas: (a) inferior, (b) central, (c) superior, (d) pontos centrais das camadas.

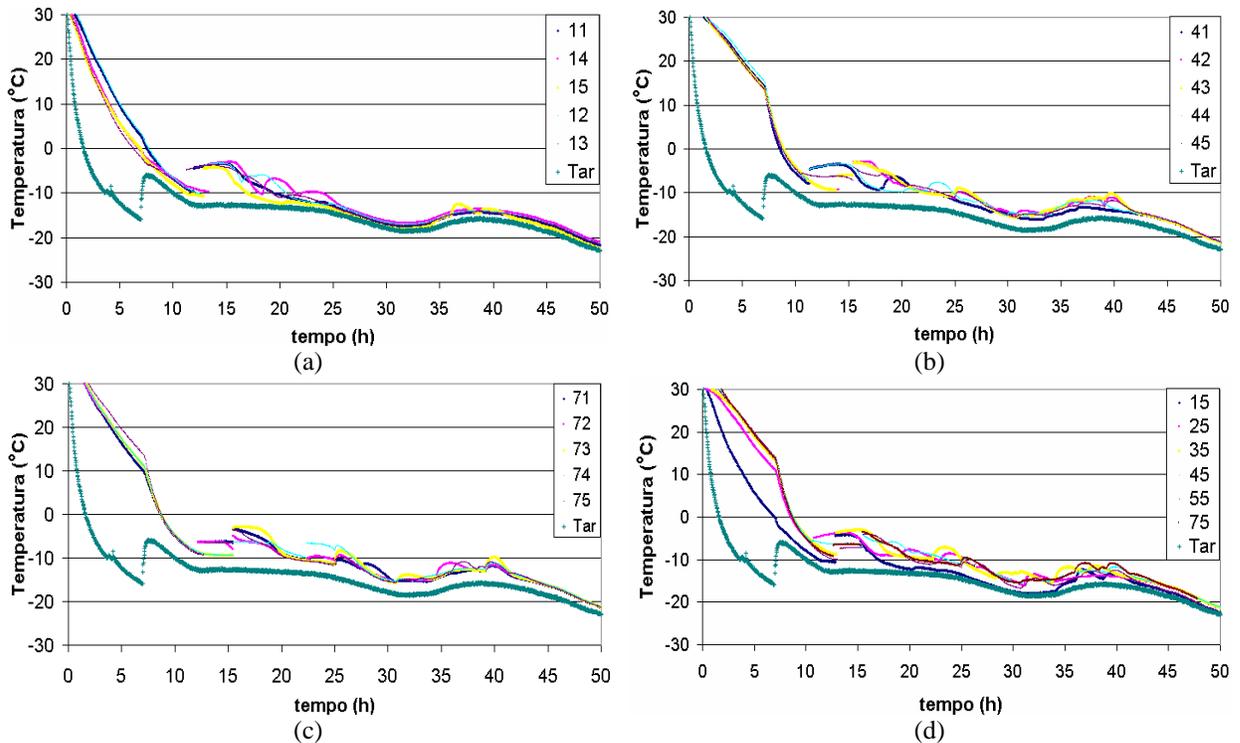


Figura F - 9. Curvas de temperatura versus tempo de congelamento para o teste de exaustão com capacidade de refrigeração original e arranjo industrial das amostras para as camadas: (a) inferior, (b) central, (c) superior, (d) pontos centrais das camadas.

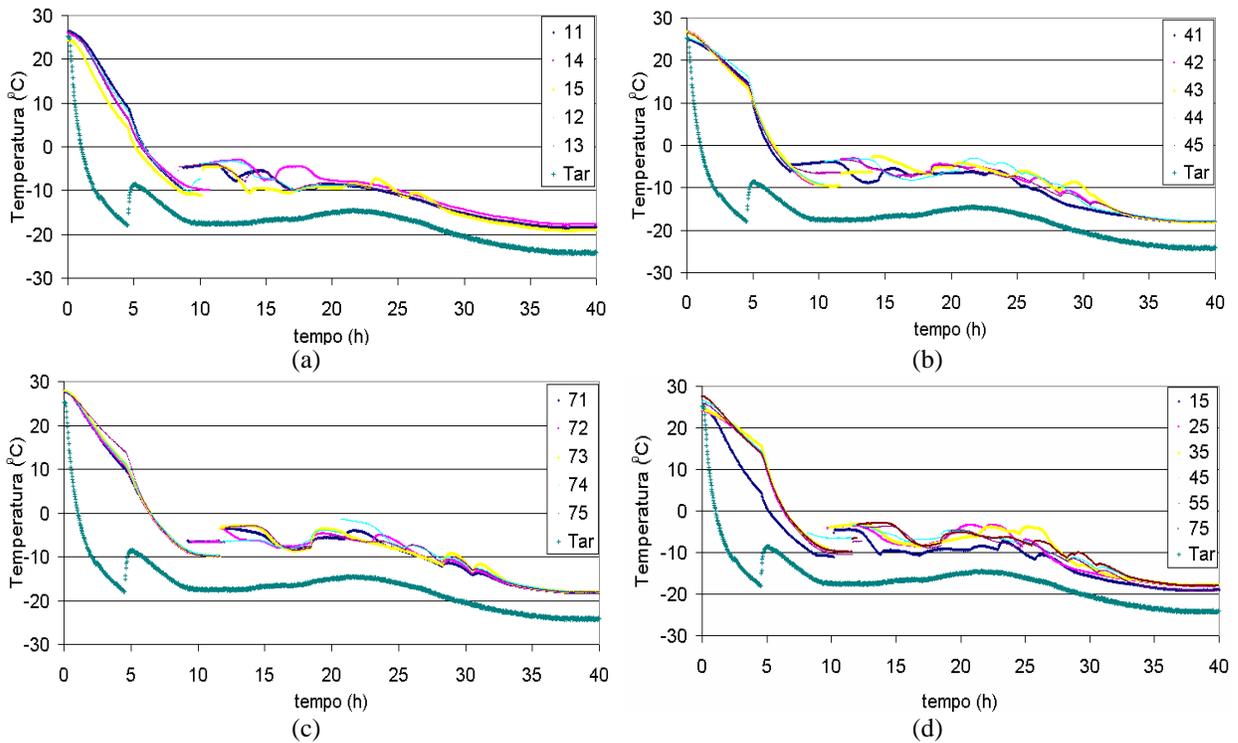


Figura F - 10. Curvas de temperatura versus tempo de congelamento para o teste de exaustão com capacidade de refrigeração modificada e arranjo alternativo das amostras (01) para as camadas: (a) inferior, (b) central, (c) superior, (d) pontos centrais das camadas.

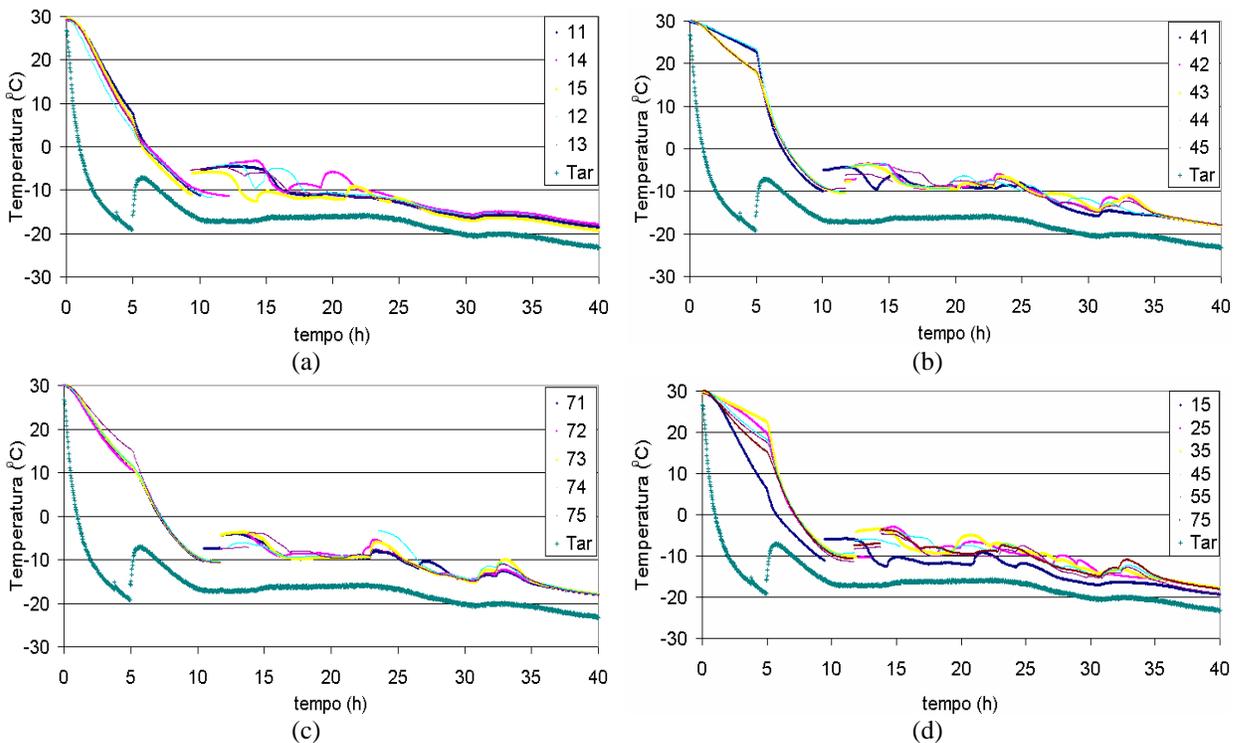


Figura F - 11. Curvas de temperatura versus tempo de congelamento para o teste de exaustão com capacidade de refrigeração modificada e arranjo alternativo das amostras (02) para as camadas: (a) inferior, (b) central, (c) superior, (d) pontos centrais das camadas.

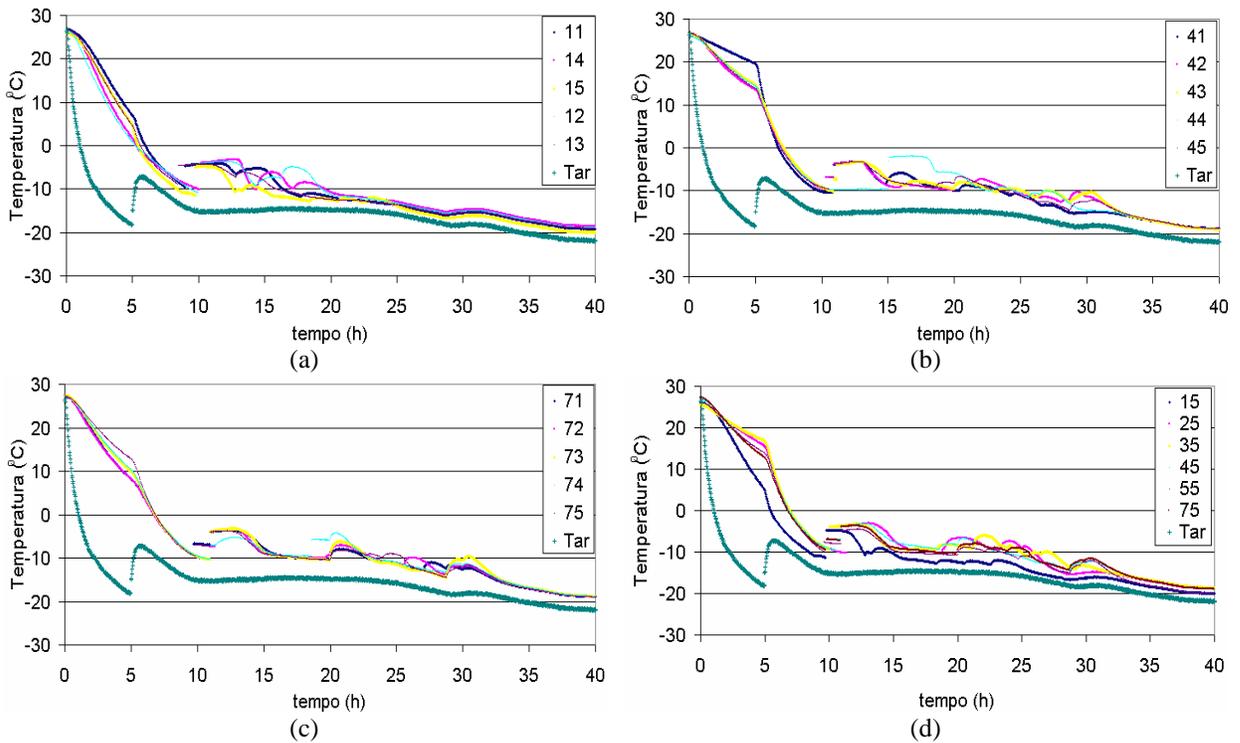


Figura F - 12. Curvas de temperatura versus tempo de congelamento para o teste de exaustão com capacidade de refrigeração modificada e arranjo alternativo das amostras (03) para as camadas: (a) inferior, (b) central, (c) superior, (d) pontos centrais das camadas.

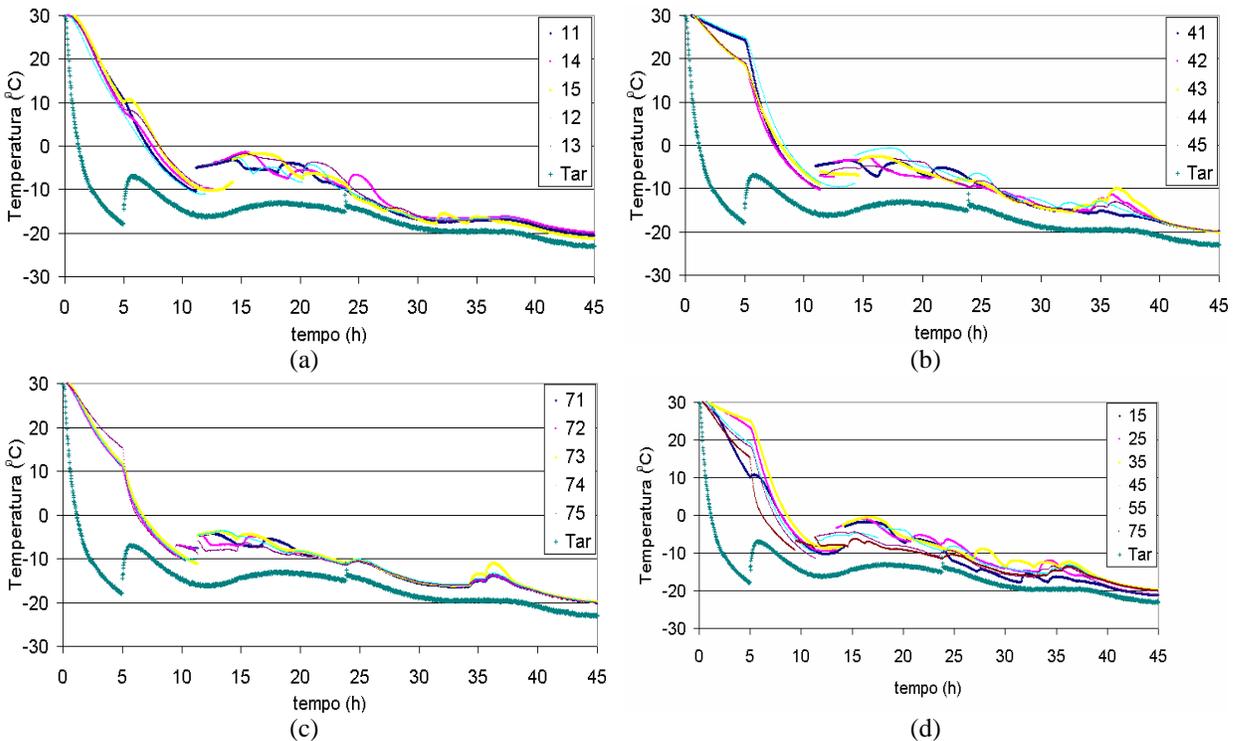


Figura F - 13. Curvas de temperatura versus tempo de congelamento para o teste misto (insuflação-exaustão) com capacidade de refrigeração modificada e arranjo alternativo das amostras para as camadas: (a) inferior, (b) central, (c) superior, (d) pontos centrais das camadas.

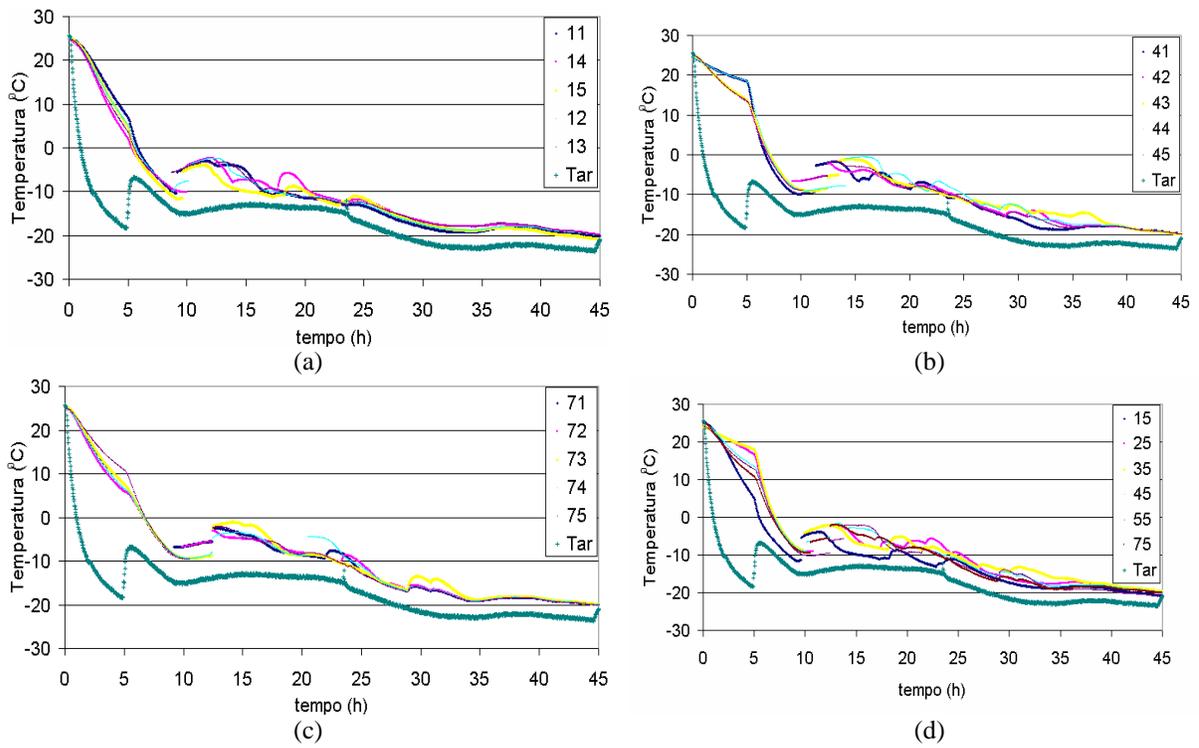


Figura F - 14. Curvas de temperatura versus tempo de congelamento para o teste misto (exaustão-insuflação) com capacidade de refrigeração modificada e arranjo alternativo das amostras para as camadas: (a) inferior, (b) central, (c) superior, (d) pontos centrais das camadas.

APÊNDICE G

Gráficos da temperatura média das camadas *versus* tempo de congelamento, e das diferenças de temperatura (ΔT).

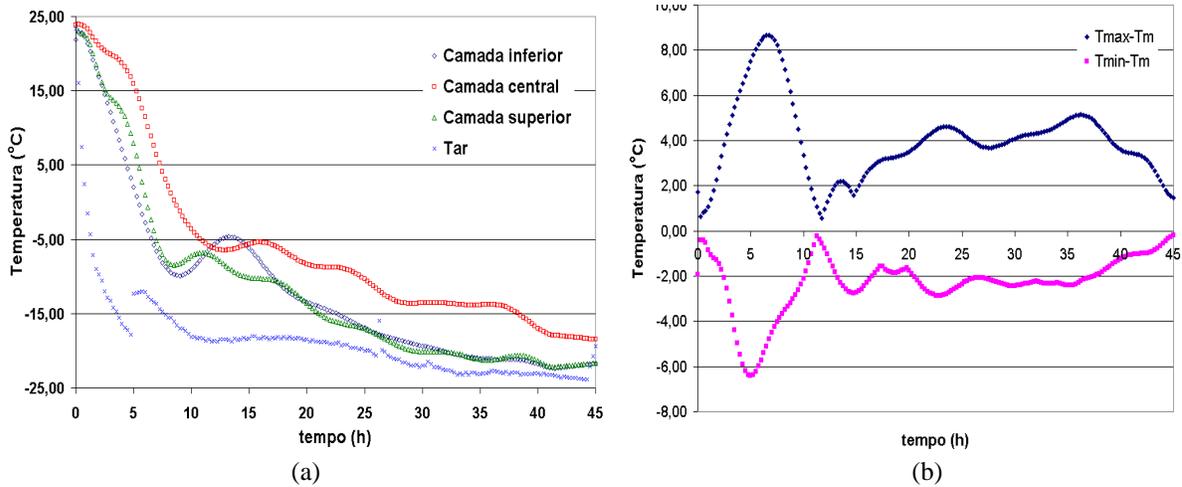


Figura G - 1. Gráficos para o ensaio de referência (branco) com capacidade de refrigeração modificada e distribuição alternativa das amostras: (a) temperatura média das camadas *versus* tempo de congelamento, (b) diferenças de temperatura (ΔT).

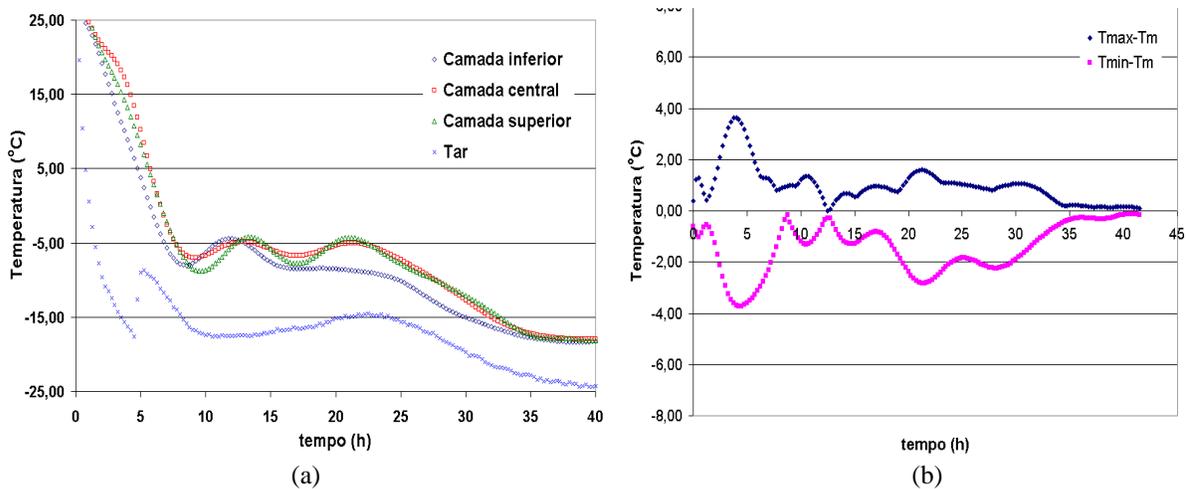


Figura G - 2. Gráficos para o ensaio de exaustão com capacidade de refrigeração modificada e distribuição alternativa das amostras (01): (a) temperatura média das camadas *versus* tempo de congelamento, (b) diferenças de temperatura (ΔT).

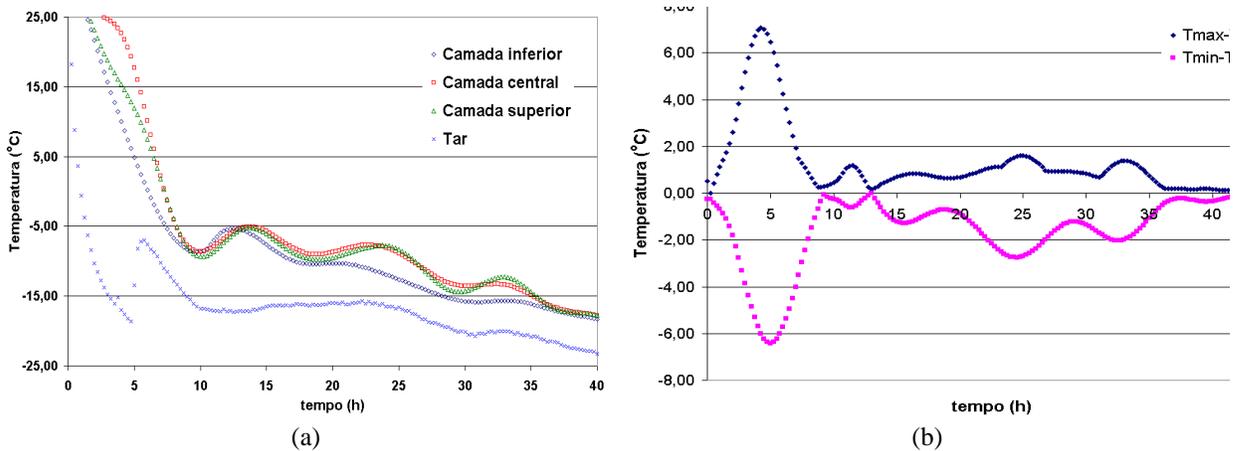


Figura G - 3. Gráficos para o ensaio de exasustão com capacidade de refrigeração modificada e distribuição alternativa das amostras (02): (a) temperatura média das camadas *versus* tempo de congelamento, (b) diferenças de temperatura (ΔT).

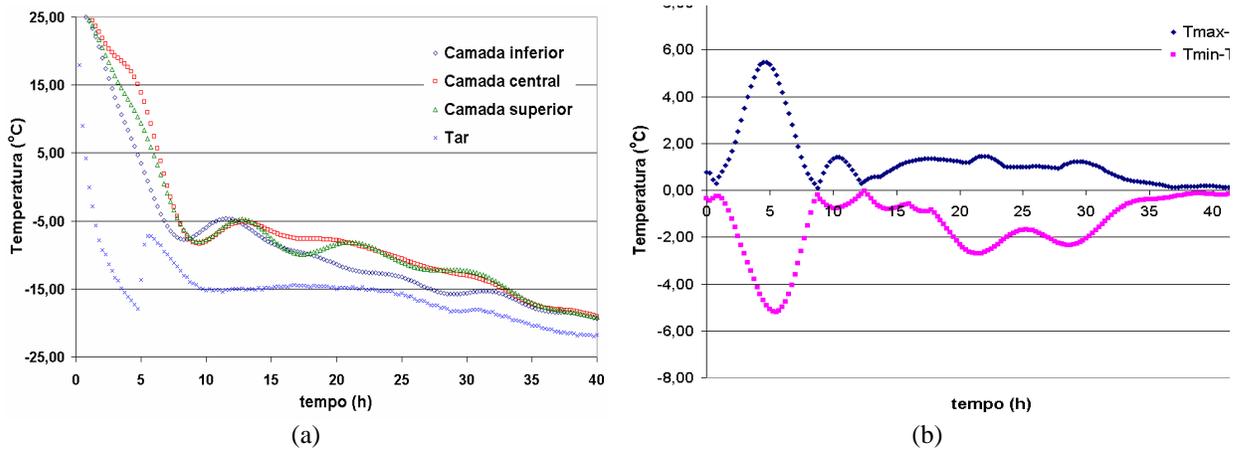


Figura G - 4. Gráficos para o ensaio de exasustão com capacidade de refrigeração modificada e distribuição alternativa das amostras (03): (a) temperatura média das camadas *versus* tempo de congelamento, (b) diferenças de temperatura (ΔT).

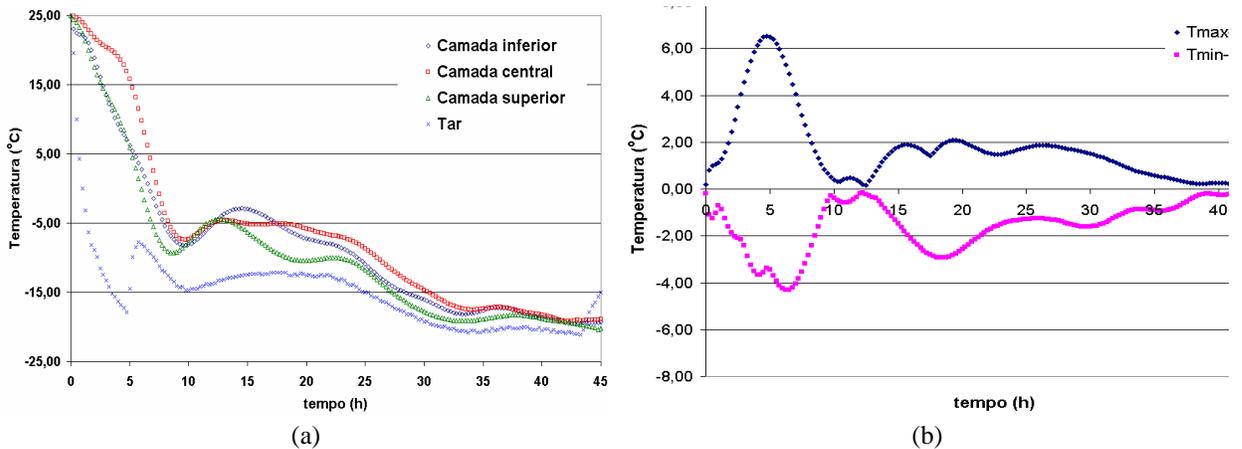


Figura G - 5. Gráficos para o ensaio de insuflação com capacidade de refrigeração modificada e distribuição alternativa das amostras (01): (a) temperatura média das camadas *versus* tempo de congelamento, (b) diferenças de temperatura (ΔT).

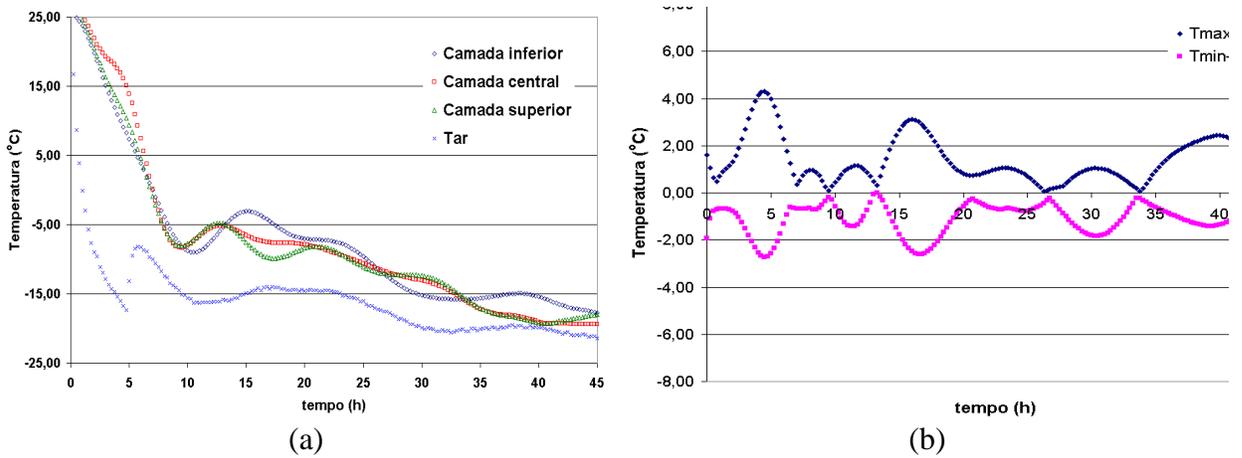


Figura G - 6. Gráficos para o ensaio de insuflação com capacidade de refrigeração modificada e distribuição alternativa das amostras (02): (a) temperatura média das camadas *versus* tempo de congelamento, (b) diferenças de temperatura (ΔT).

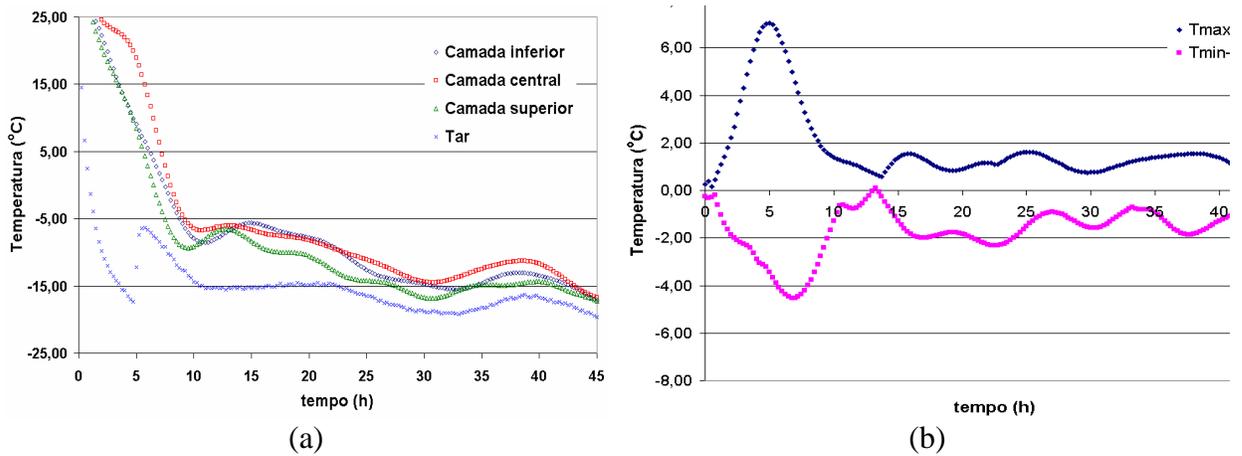


Figura G - 7. Gráficos para o ensaio de insuflação com capacidade de refrigeração modificada e distribuição alternativa das amostras (03): (a) temperatura média das camadas *versus* tempo de congelamento, (b) diferenças de temperatura (ΔT).

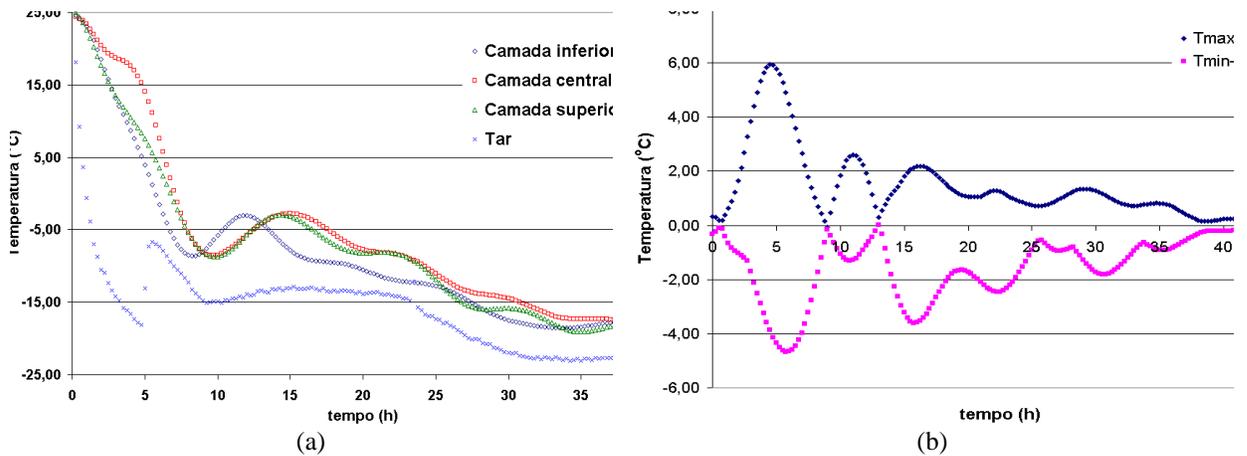


Figura G - 8. Gráficos para o ensaio misto (exaustão-insuflação) com capacidade de refrigeração modificada e distribuição alternativa das amostras: (a) temperatura média das camadas *versus* tempo de congelamento, (b) diferenças de temperatura (ΔT).

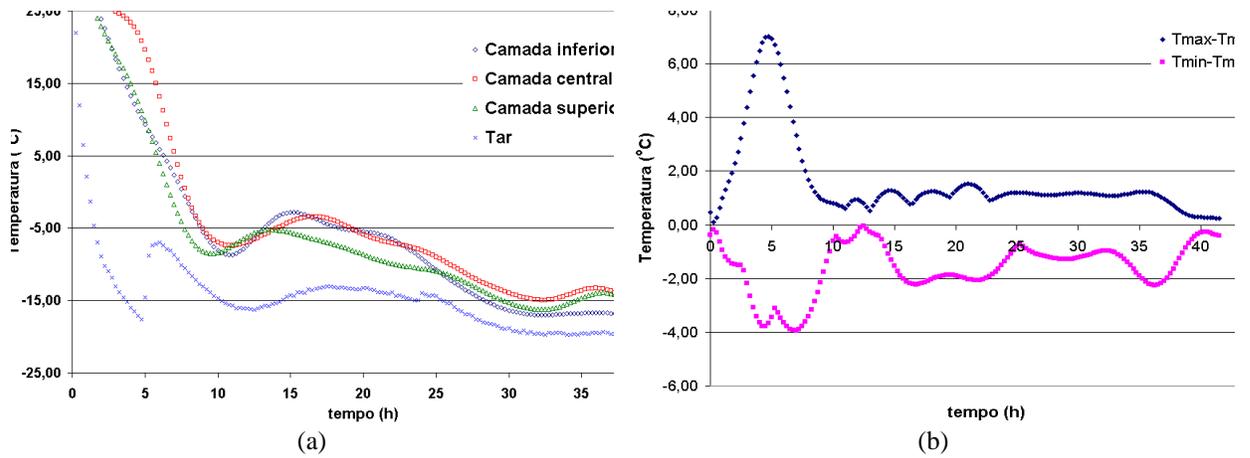


Figura G - 9. Gráficos para o ensaio misto (insuflação-exaustão) com capacidade de refrigeração modificada e distribuição alternativa das amostras: (a) temperatura média das camadas *versus* tempo de congelamento, (b) diferenças de temperatura (ΔT).

ANEXO A

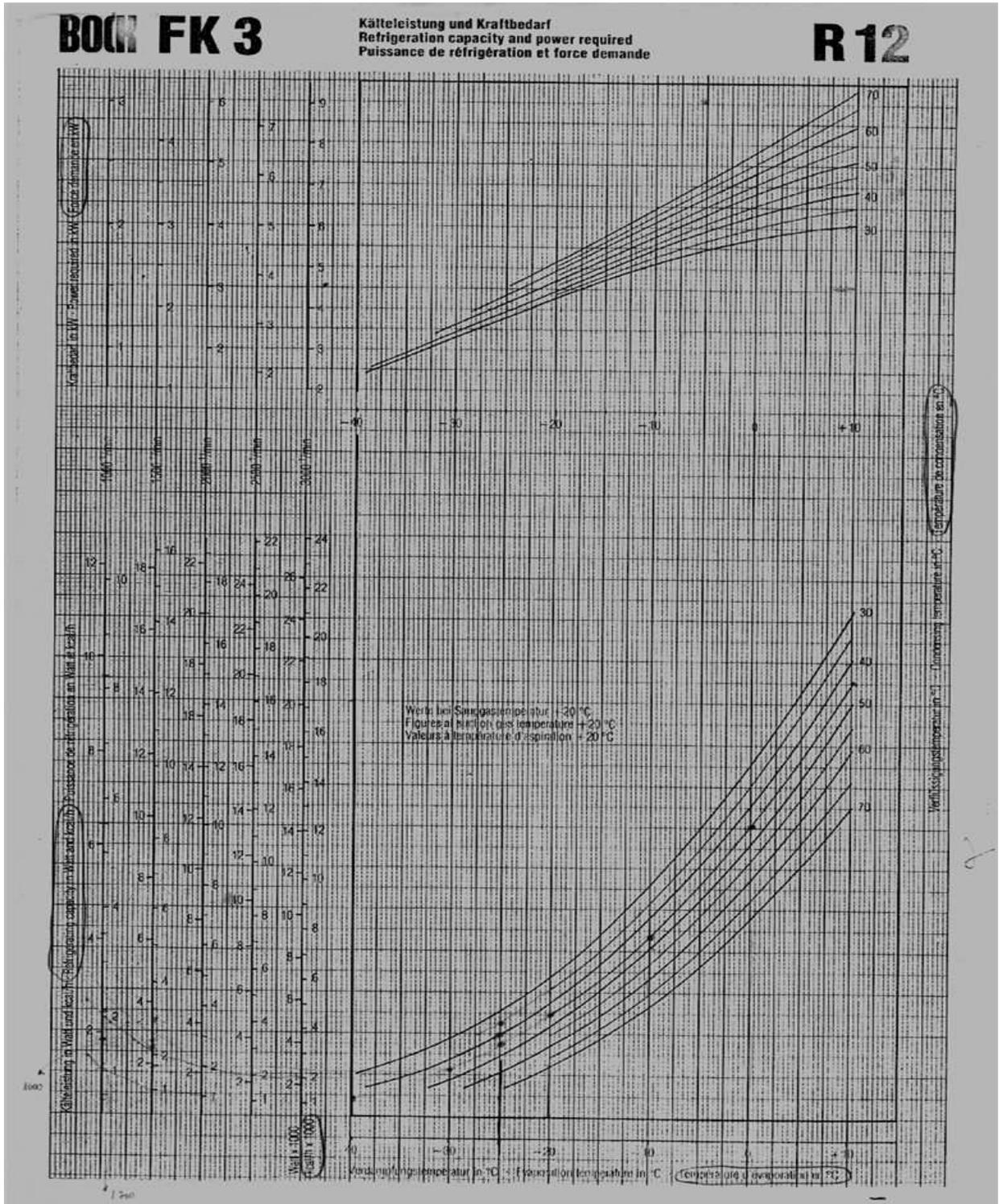


Figura A- 1. Gráfico de eficiência do compressor Bock FK-3.