

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS**

CLARICE DE ÁVILA SANTOS

**ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR DURANTE O
CONGELAMENTO DE CORTES DE AVES EM CAIXAS DE
PAPELÃO ONDULADO**

FLORIANÓPOLIS

2005

CLARICE DE ÁVILA SANTOS

**ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR DURANTE O
CONGELAMENTO DE CORTES DE AVES EM CAIXAS DE PAPELÃO
ONDULADO**

**Dissertação apresentada como requisito parcial à
obtenção do grau de Mestre em Engenharia de
Alimentos, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de
Alimentos, Centro Tecnológico, Universidade Federal de
Santa Catarina.**

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Haiko Hense

Co-orientador: Prof. Dr. Sc. João Borges Laurindo

FLORIANÓPOLIS

2005

CLARICE DE ÁVILA SANTOS

ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR DURANTE O CONGELAMENTO DE
CORTES DE AVES EM CAIXAS DE PAPELÃO ONDULADO

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Alimentos, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof. Dr.-Ing. Haiko Hense
Orientador

Profª. Dra. Gláucia M. Falcão Aragão
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos

Banca Examinadora:

Prof. Dr.-Ing. Haiko Hense

Prof. Dr. Vivaldo Silveira Júnior

Prof. Dr. Sc. José Carlos Cunha Petrus

Profª. Dra. Sandra R. S. Ferreira (suplente)

Florianópolis, 21 de março de 2005

A Deus
Aos meus queridos pais, por todo amor e dedicação

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, sempre, por ter me propiciado saúde e sabedoria para alcançar os meus objetivos e concluir com êxito mais uma etapa da minha vida.

Ao Professor Haiko Hense, pela orientação, disponibilidade, atenção prestada, total apoio e amabilidade demonstrada desde o início do curso. Professor, obrigada por todos os ensinamentos e pela compreensão.

Ao Professor João Borges Laurindo, pelo incentivo, pela disponibilidade à co-orientação e por me permitir a realização dos experimentos em seu laboratório. Professor, agradeço de coração por todo esse apoio, você não sabe o quanto as suas valiosas sugestões e críticas me motivaram. Você me fez enxergar além!!

Ao Alexandre Beló pelo companheirismo, participação e por toda a contribuição dada a este trabalho, e sem o qual muitos experimentos não teriam sido concretizados.

Às minhas queridas amigas do Laboratório de Extração Supercrítica (LATESC), companheiras incondicionais, parceiras para todos os momentos, sejam de alegria ou aflição. Gabi Jahn, Zi, Lu, Fê, vocês sabem o quanto adoro vocês!! Obrigada por tudo!!

A todos os colegas do Laboratório de Propriedades Físicas (PROFI), testemunhos das muitas dificuldades e limitações enfrentadas durante a realização de experimentos.

Ao meu pai Elzio e à minha mãe, Selma, pela dedicação, incentivo, reconhecimento, apoio, compreensão, por tudo!! Papi e Mami, eu não seria nada sem vocês!!! Vocês são a minha maior motivação!! Obrigada por me fazerem chegar até aqui, por me motivarem a ir muito além e por me proporcionarem uma vida tão maravilhosa!

Aos meus irmãos Cristiano, Ana Cristina e Cláudia, por estarem sempre presentes, se preocupando e apoiando a minha escolha. Amo muito vocês!

À minha amiga Camila, cujo exemplo de compreensão, amizade, dedicação e responsabilidade me fizeram crescer para encarar todas as dificuldades.

A todos os amigos que fiz durante essa caminhada.

Nada acontece por acaso...

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xii
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1 O Congelamento de Alimentos.....	3
2.2 Tempos de Congelamento e Influência sobre a Estrutura dos Produtos.....	4
2.3 Propriedades Termofísicas dos Alimentos Congelados.....	6
2.4 Produção do Frio.....	7
2.5 Sistemas de Congelamento.....	8
2.5.1 <i>Sistemas de contato indireto</i>	9
2.6 Perfil de Velocidades do Ar.....	10
2.7 Transferência de Calor.....	11
2.8 Congelamento de Cortes de Aves.....	13
3 ESTUDO EMPÍRICO DA INFLUÊNCIA DA CAIXA DE PAPELÃO ONDULADO NO TEMPO DE CONGELAMENTO DE CORTES DE AVES EM TÚNEIS COM CIRCULAÇÃO FORÇADA DE AR	16
3.1 Resumo.....	16
3.2 Introdução.....	16
3.3 Material e Métodos.....	18
3.3.1 <i>Escolha e padronização do produto</i>	18
3.3.2 <i>Caixas de papelão ondulado</i>	18
3.3.3 <i>Confecção das caixas teladas</i>	19
3.3.4 <i>Leitura e registro das temperaturas</i>	20
3.3.5 <i>Túneis de congelamento</i>	20
3.3.5.1 <i>Túnel de congelamento automático 1 (TCA-1)</i>	21
3.3.5.2 <i>Túnel de congelamento automático 2 (TCA-2)</i>	22
3.3.6 <i>Procedimento experimental</i>	23
3.3.7 <i>Análise das resistências térmicas</i>	25
3.4 Resultados e Discussão.....	27
3.4.1 <i>Túnel de congelamento automático 1 (TCA-1)</i>	28
3.4.2 <i>Túnel de congelamento automático 2 (TCA-2)</i>	33

3.5 Conclusão.....	39
4 DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA A DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DOS COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR CONVECTIVOS EM TÚNEIS DE CONGELAMENTO	40
4.1 Resumo.....	41
4.2 Introdução.....	41
4.3 Material e Métodos.....	43
4.3.1 <i>Montagem e instrumentação do dispositivo usado para a determinação de h</i>	43
4.3.2 <i>Obtenção de dados tempo/ temperatura.....</i>	45
4.3.3 <i>Túneis de congelamento.....</i>	46
4.3.3.1 <i>Túneis de congelamento semi-contínuos A, B, C, D, E e F</i>	48
4.3.3.2 <i>Túnel de congelamento semi-contínuo duplo (SD).....</i>	49
4.3.4 <i>Procedimento experimental</i>	49
4.3.5 <i>Determinação dos coeficientes convectivos de transferência de calor (h)</i>	52
4.4 Resultados e Discussão.....	54
4.5 Conclusão.....	63
5 ESTUDO EMPÍRICO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA EFETIVA DE EMBALAGENS DE PAPELÃO ONDULADO	65
5.1 Resumo.....	66
5.2 Introdução.....	66
5.3 Material e Métodos.....	67
5.3.1 <i>Montagem e instrumentação dos dispositivos usados para a determinação de R_{efet_pap}</i>	67
5.3.2 <i>Obtenção de dados tempo/ temperatura.....</i>	69
5.3.3 <i>Túneis de congelamento.....</i>	70
5.3.4 <i>Procedimento experimental.....</i>	70
5.3.5 <i>Determinação da resistência térmica efetiva do papelão ondulado.....</i>	72
5.4 Resultados e Discussão.....	79
5.5 Conclusão.....	88
6 CONCLUSÕES GERAIS E SUGESTÕES.....	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
ANEXOS.....	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Esquema do produto padronizado (asas de frango com interfolhamento e embalagem primária de PEBD), com as respectivas dimensões da caixa de papelão ondulado (embalagem secundária).....	19
Figura 3.2. Caixa confeccionada para os testes: telas de aço inoxidável.....	19
Figura 3.3. (a) Sensor de temperatura; (b) Interface para transferência dos dados para o computador.....	20
Figura 3.4. Diagrama esquemático do TCA-1, ilustrando a posição dos ventiladores, os fluxos de ar frio e dos produtos, além das posições das caixas de produtos nos níveis do túnel.....	22
Figura 3.5. Diagrama esquemático do TCA-2, , ilustrando a posição dos ventiladores, os fluxos de ar frio e dos produtos, além das posições das caixas de produtos nos níveis do túnel.....	23
Figura 3.6. Resistências térmicas envolvidas durante a etapa de congelamento do produto.....	25
Figura 3.7. Curvas de resfriamento e congelamento na caixa de papelão e na caixa telada, no nível inferior do TCA-1 (posição mais distante dos ventiladores).....	28
Figura 3.8. Curvas de resfriamento e congelamento na caixa de papelão e na caixa telada, no nível inferior do TCA-1 (posição intermediária).....	29
Figura 3.9. Curvas de resfriamento e congelamento na caixa de papelão e na caixa telada, no nível inferior do TCA-1 (posição mais próxima dos ventiladores).....	29
Figura 3.10. Curvas de resfriamento e congelamento na caixa de papelão e na caixa telada, no nível intermediário do TCA-1 (posição mais distante dos ventiladores).....	30
Figura 3.11. Curvas de resfriamento e congelamento na caixa de papelão e na caixa telada, no nível intermediário do TCA-1 (posição intermediária).....	31
Figura 3.12. Curvas de resfriamento e congelamento na caixa de papelão e na caixa telada, no nível intermediário do TCA-1 (posição mais próxima dos ventiladores).....	31
Figura 3.13. Curvas de resfriamento e congelamento na caixa de papelão e na caixa telada, no nível mais elevado do TCA-1 (posição mais distante dos ventiladores).....	32

Figura 3.14. Curvas de resfriamento e congelamento na caixa de papelão e na caixa telada, no nível mais elevado do TCA-1 (posição mais próxima dos ventiladores).....	33
Figura 3.15. Curvas de resfriamento e congelamento na caixa de papelão e na caixa telada, no nível inferior do TCA-2 (posição da primeira caixa).....	34
Figura 3.16. Curvas de resfriamento e congelamento na caixa de papelão e na caixa telada, no nível inferior do TCA-2 (posição da última caixa).....	35
Figura 3.17. Curvas de resfriamento e congelamento na caixa de papelão e na caixa telada, no nível mais elevado do TCA-2 (posição da primeira caixa a entrar).....	36
Figura 3.18. Curvas de resfriamento e congelamento na caixa de papelão e na caixa telada, no nível mais elevado do TCA-2 (posição da última caixa a entrar).....	36
Figura 3.19. Comparação entre as curvas de resfriamento e congelamento obtidas a partir do congelamento do produto em caixas de papelão e em caixas teladas metálica e influência na distribuição espacial dos tempos de congelamento no TCA-1.....	38
Figura 4.1. Tanque de aço galvanizado com o sensor de temperatura inserido no centro geométrico do sistema.....	44
Figura 4.2. (a) Sensor de temperatura; (b) Interface para transferência dos dados para o computador.....	46
Figura 4.3. Esquema de um carrinho de 9 níveis.....	47
Figura 4.4. Esquema da disposição e sentido de movimentação dos carrinhos (total de 25) nos túneis (vista superior).....	47
Figura 4.5. Esquema dos túneis semi-contínuos, vista frontal: (a) túneis A a E; (b) túnel F.....	48
Figura 4.6. Esquema do túnel semi-contínuo duplo (vista frontal).....	49
Figura 4.7. Disposição dos tanques e caixas no carrinho e dos sensores nos tanques.....	51
Figura 4.8. Valores de \bar{h} nas 4 diferentes posições analisadas no túnel A.....	55
Figura 4.9. Valores de \bar{h} nas 4 diferentes posições analisadas no túnel C.....	56
Figura 4.10. Valores de \bar{h} nas 4 diferentes posições analisadas no túnel D.....	57
Figura 4.11. Valores de \bar{h} nas 4 diferentes posições analisadas no túnel E.....	57

Figura 4.12. Valores de \bar{h} nas 4 diferentes posições analisadas no túnel F.....	59
Figura 4.13. Valores de \bar{h} nas 4 diferentes posições analisadas no túnel B.....	60
Figura 4.14. Valores de \bar{h} nas 4 diferentes posições analisadas no túnel SD1.....	61
Figura 4.15. Valores de \bar{h} nas 4 diferentes posições analisadas no túnel SD2.....	62
Figura 5.1. (a) Sensor de temperatura; (b) Interface para transferência dos dados para o computador.....	69
Figura 5.2. Tanque de aço galvanizado (tanque 3) totalmente recoberto com papelão ondulado (Sistema 2) e com o sensor de temperatura inserido em seu centro geométrico.....	70
Figura 5.3. Esquema geral da disposição dos tanques no carrinho dentro dos túneis, vista superior. (a) túneis E (1° e 2° teste) e SD1; (b) túnel SD2.....	72
Figura 5.4. Transferência de calor através de uma das faces do Sistema 1. Distribuição de temperaturas e circuito térmico equivalente.....	74
Figura 5.5. Transferência de calor através de uma das faces do Sistema 2 e a distribuição de temperatura.....	77
Figura 5.6. Evolução das temperaturas do ar e da solução alcoólica no decorrer do tempo, no experimento 1 do túnel E.....	80
Figura 5.7. Valores das resistências térmicas totais dos Sistemas 1 e 2 e da resistência térmica efetiva, no experimento 1 do túnel E.....	81
Figura 5.8. Evolução das temperaturas do ar e da solução alcoólica no decorrer do tempo útil para o experimento 1 do túnel E.	82
Figura 5.9. Valores das resistências térmicas totais dos Sistemas 1 e 2 e da resistência térmica efetiva para o experimento 1 do túnel E durante o tempo útil do experimento.....	83
Figura 5.10. Valores pontuais da resistência térmica efetiva. Comparação com as temperaturas da solução e do ar, para o experimento 1 do túnel E.....	84
Figura 5.11. Valores pontuais da resistência térmica efetiva. Comparação com as temperaturas da solução e do ar para o experimento 1 do túnel E.....	84
Figura A.1. Evolução das temperaturas do ar e da solução alcoólica no decorrer do tempo útil para o experimento 2 do túnel E.....	95

Figura A.2. Valores pontuais das resistências térmicas totais dos Sistemas 1 e 2 e da resistência térmica efetiva para o experimento 2 do túnel E durante o tempo útil do experimento.....	95
Figura A.3. Valores pontuais da resistência térmica efetiva. Comparação com as temperaturas da solução e do ar para o experimento 2 do túnel E.....	96
Figura A.4. Evolução das temperaturas do ar e da solução alcoólica no decorrer do tempo útil, no experimento 3, túnel SD2.....	96
Figura A.5. Valores pontuais das resistências térmicas totais dos Sistemas 1 e 2 e da resistência térmica efetiva no experimento 3, túnel SD2.....	97
Figura A.6. Valores pontuais das resistências térmicas totais dos Sistemas 1 e 2 e da resistência térmica efetiva para o experimento 3, túnel SD2, durante o tempo útil do experimento.....	97
Figura A.7. Valores pontuais da resistência térmica efetiva. Comparação com as temperaturas da solução e do ar para o experimento 3, túnel SD2.....	98
Figura A.8. Evolução das temperaturas do ar e da solução alcoólica no decorrer do tempo útil para o experimento 4, túnel SD1.....	98
Figura A.9. Valores pontuais das resistências térmicas totais dos Sistemas 1 e 2 e da resistência térmica efetiva para o experimento 4, túnel SD1, durante o tempo útil do experimento.....	99
Figura A.10. Valores pontuais da resistência térmica efetiva. Comparação com as temperaturas da solução e do ar para o experimento 4, túnel SD1.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1. Características dos tanques utilizados para os testes.....	44
Tabela 4.2. Características dos ventiladores nos túneis semi-contínuos.....	48
Tabela 4.3. Valores de \bar{h} obtidos experimentalmente.....	63
Tabela 5.1. Características dos tanques utilizados para os testes.....	66
Tabela 5.2. Valores experimentais estimados.....	86
Tabela 5.3. Comparação entre as resistências térmicas totais e os coeficientes convectivos de transferência de calor nos túneis estudados.....	87

RESUMO

O congelamento de produtos alimentícios é um processo complexo que envolve transferência de calor com mudança de fase e ocorre em uma faixa de temperaturas. É realizado, predominantemente, em túneis com convecção forçada de ar, onde o escoamento de ar ocorre em regime turbulento e a transferência de calor do produto para o ar em regime transiente. Quando se trata de produtos cárneos *in natura*, o congelamento pode provocar alterações na qualidade final do produto, dentre elas, o ressecamento da superfície do mesmo. Por esse motivo, faz-se necessário o uso de embalagens apropriadas, que minimizem essas alterações e que mantenham a sua integridade, sem interferir em seu tempo de processamento. No caso de cortes de aves, são utilizadas comercialmente as caixas de papelão ondulado, que permitem, além da proteção, o transporte por todo o túnel. O papelão ondulado é conhecidamente um material de condutividade térmica relativamente baixa, o que pode prolongar o tempo de congelamento do produto. Por esse motivo, este trabalho teve como objetivo estudar a transferência de calor ocorrida do produto para o ar durante o congelamento de cortes de aves embalados em caixas de papelão ondulado. Como são envolvidos processos condutivos e convectivos de transferência de calor, este trabalho foi dividido em três estudos. Inicialmente foi estudada empiricamente a influência da resistência oferecida pela caixa de papelão no tempo de congelamento do produto, através da comparação com o congelamento em caixas metálicas totalmente perfuradas. Foram verificadas reduções de 18 a 45% no tempo de congelamento. Além disso, o platô definido pela perda de calor latente de solidificação, bem como a heterogeneidade de temperaturas finais dos produtos congelados em diferentes posições dos túneis, foram drasticamente reduzidos através da utilização da embalagem alternativa. Em um segundo momento, a distribuição espacial do ar ao redor dos produtos nos túneis foi estudada, com a finalidade de se verificar se o processo de transferência de calor convectivo variava com a posição do produto no túnel. Para tanto, foi desenvolvida uma metodologia para a determinação experimental dos coeficientes convectivos de transferência de calor (\bar{h}), através da confecção de dispositivos de aço galvanizado contendo uma solução anticongelante, cuja evolução temporal das temperaturas foi monitorada em diferentes posições nos túneis. Foi possível fazer um mapeamento dos túneis de congelamento. Foram obtidas variações de até 40 a 281 W/m².°C em um mesmo túnel, o que permitiu inferir sobre as variações nas distribuições de velocidades do ar nos mesmos. A técnica desenvolvida mostrou-se uma alternativa ao uso de anemômetros quando se deseja obter o diagnóstico dos fluxos de ar em grandes plantas industriais. Em seguida, a mesma metodologia foi utilizada para a análise quantitativa da resistência térmica efetiva da embalagem de papelão. Para esse estudo, as taxas de transferência de calor durante o resfriamento da solução anticongelante nos tanques de aço foram comparadas àquelas em tanques recobertos com o papelão ondulado. Foram estimados valores de resistência térmica efetiva média da embalagem variando entre 0,226 e 0,328 °C/W, coerentes com aqueles calculados a partir de dados encontrados na literatura. Com todos esses resultados, foi possível avaliar globalmente o processo de transferência de calor do produto para o ar do túnel durante o congelamento de cortes de aves.

Palavras-chave: congelamento, transferência de calor, resistência térmica do papelão ondulado, túneis de congelamento, distribuição espacial do ar em túneis, cortes de frango.

ABSTRACT

The food freezing is a complex process that involves heat transfer with phase change and it occurs in a range of temperatures. This process is performed mainly in air blast freezers, where the airflow is turbulent and the heat transfer through the product to the air occurs in unsteady state. When treating with meat products, the freezing can promote alterations in the final quality of the product, among them, the drying of its surface. For that reason, it is necessary the use of appropriate packaging, that minimize those alterations and that maintain the product integrity, without interfering in the time of processing. In the case of chicken cuts, boxes of wavy cardboard are commercially used. They provide, besides the protection, the transport for the whole tunnel. The wavy cardboard is a material of relatively low thermal conductivity, which can to increase the food-freezing time. For that reason, the objective of this work is to study the heat transfer that occurs from the product to the cold air during the freezing of chicken cuts inside the cardboard boxes. Since conductive and convective heat transfer processes are involved, this work was divided in three studies. Initially, the influence of the resistance empirically offered by the cardboard box in the product freezing time was studied, through the comparison with the freezing time in metallic boxes totally screened. Reductions from 18 to 45% were verified in the freezing time. The plateau defined by the loss of heat latent of fusion, as well as the heterogeneity of final temperatures of the frozen products in different positions in the air blast freezers, were drastically reduced when using the alternative packaging. In a second moment, the air space distribution around of the products in the air blast freezers was studied, with the purpose to verify if the process of convective heat transfer varied with the position of the product in the tunnel. For that, a methodology was developed for the experimental measures of the convective heat transfer coefficients (\bar{h}), with the use of galvanized steel devices containing an antifreeze solution, whose temperatures temporary evolution was evaluated in different positions in the tunnels. It was possible to map the freezing tunnels. Variations since 40 to 281 W/m².°C in a same freezing tunnel were obtained, that allowed the estimation of variations in the rate distributions of the air in these. The developed technique showed an alternative for the use of anemometers, when the diagnosis of the air flows in great industrial plants is wanted. Then, the same methodology was used for the quantitative analysis of the effective thermal resistance of the cardboard packaging. For that study, the rates of heat transfer during the cooling of the antifreeze solution in the steel tanks were compared to those in tanks covered with the wavy cardboard. Values of mean effective thermal resistance of the packaging were estimated. These values varied from 0,226 to 0,328 °C/W, according to those calculated from data found in the literature. With all those results, it was possible to evaluate the global heat transfer process through the product for the cold air in the air blast freezers during the freezing of chicken cuts.

Key-words: freezing, heat transfer, wavy cardboard thermal resistance, air blast freezers, chicken cuts.

1 INTRODUÇÃO

O congelamento é uma operação unitária que visa a extensão da vida de prateleira de um alimento perecível. É uma etapa indispensável na manipulação e distribuição de alimentos em muitos países desenvolvidos. Trata-se de um processo extremamente complexo, em função de um grande número de variáveis, e por envolver numerosos aspectos de engenharia. Necessita de manutenção das condições ao redor do produto, o que é feito por um sistema de congelamento em um local fechado. São vários os tipos de sistemas de congelamento, classificados pela maneira na qual o produto se encontra em contato com o fluido refrigerante. As condições necessárias para manter a temperatura e movimento à superfície do produto determinam a eficiência do sistema de congelamento.

Os produtos cárneos *in natura* são predominantemente congelados em túneis de congelamento com convecção forçada de ar. Por se tratar de produtos com estrutura química mais complexa, podem sofrer alterações desagradáveis, com redução da qualidade final. Necessitam, dessa forma, do uso de embalagens apropriadas e de um tempo de congelamento rápido para que não ocorra o rompimento da estrutura celular e conseqüente formação de exsudado durante o descongelamento. Por ser um processo caro e que envolve elevado gasto energético, a redução do tempo de congelamento de produtos alimentícios é um objetivo almejado por muitos frigoríficos.

Motivados pelo interesse da indústria em minimizar os custos durante o processo de congelamento, mantendo-se a qualidade e integridade do produto final, optou-se por transformar esse complexo problema no tema de estudo deste trabalho. Para isso, selecionou-se como objeto de estudo o congelamento de cortes de aves envolvidos por uma camada de polietileno de baixa densidade e embalados em caixas de papelão ondulado, congelados em túneis com convecção de ar forçada. O congelamento desse produto envolve as transferências de calor condutiva e convectiva do produto para o ar do túnel. A estrutura desse produto em si já é bastante complexa, por se tratar do corte da asa do frango, que contém pele, osso e carne. Além disso, envolve a utilização de dois tipos de embalagens diferentes. Ocorre também que os coeficientes convectivos de transferência de calor, necessários ao conhecimento do processo de transferência de calor, podem variar de acordo com a posição do produto dentro do túnel. Dessa forma, este trabalho teve como objetivos o estudo das resistências térmicas oferecidas ao fluxo de calor durante o

congelamento e a análise empírica do perfil de velocidades do ar nos túneis através da obtenção de valores experimentais dos coeficientes de transferência de calor convectivos.

Visando facilitar o acompanhamento deste trabalho, os estudos realizados encontram-se divididos basicamente em três capítulos, 3, 4 e 5, que podem ser analisados independentemente. Esses capítulos são autoconsistentes e foram escritos na forma de artigos a serem publicados. No capítulo 3, a influência da caixa de papelão ondulado no tempo de congelamento dos cortes de aves é estudada empiricamente. No capítulo 4, é desenvolvida uma metodologia para o estudo da transferência de calor convectiva, através da determinação experimental dos coeficientes de transferência de calor convectivos em túneis de congelamento. Já no capítulo 5, a mesma metodologia desenvolvida no capítulo 4 é utilizada para a determinação quantitativa da resistência térmica oferecida pelo papelão ondulado. As conclusões gerais de todo o conteúdo do trabalho e as sugestões propostas são apresentadas no capítulo 6, enquanto as referências acerca de todo o material bibliográfico utilizado são oferecidas ao final do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O CONGELAMENTO DE ALIMENTOS

O congelamento é um método de conservação de alimentos bastante utilizado, uma vez que é capaz de manter mais próximas todas as características originais dos produtos. É um processo que tem como propósito reduzir a temperatura do produto tanto quanto economicamente possível, na tentativa de minimizar as atividades microbiana e enzimática. Dessa forma, retarda as taxas de reação de deterioração, promovendo uma extensão de sua vida de prateleira (ASHRAE, 1998).

Durante o congelamento, ocorre a conversão da maior parte de água contida no produto em gelo, fenômeno que depende da composição e estrutura do mesmo, forma física, temperatura e condições do meio empregado (HELDMAN e HARTEL, 1998; SINGH e HELDMAN, 1997).

Muitos tipos diferentes de alimentos podem ser preservados pelo congelamento. Frutas e vegetais são congelados e armazenados até o momento da preparação para o consumo. Vários produtos cárneos, aves e peixes são congelados para estender a sua vida de prateleira (ASHRAE, 1998; HELDMAN e HARTEL, 1998).

HELDMAN e LUND (1992) citam muitos documentos indicando que o congelamento como conservação surgiu nos últimos 160 anos, e o processo se tornou uma etapa indispensável na manipulação e distribuição de alimentos em muitos países desenvolvidos. SILVA (2000) lembra que a produção do frio em circuito fechado foi proposta por Olivier Evans em 1805. Entretanto, a produção mecânica do frio industrial teve o seu início somente na segunda metade do século XIX, juntamente com a circulação do ar forçado. Inicialmente, esse método de conservação era muito caro. Como o conhecimento de seus benefícios ainda não era de domínio popular, o consumidor resistiu à aquisição de alimentos conservados pelo frio. Só há relativamente pouco tempo, os alimentos conservados a temperaturas reduzidas ocuparam lugar de destaque no comércio dos gêneros alimentícios, crescendo a uma velocidade considerável em face ao crescimento populacional nos grandes centros urbanos e do afastamento gradativo dos locais de produção.

O congelamento é um processo que deve ser feito a uma temperatura 10 a 12 °C abaixo da temperatura em que o alimento será armazenado. A temperatura recomendada para o armazenamento é -18°C. Temperaturas inferiores a esse valor podem ser utilizadas, porém elevam bastante o custo de manutenção do produto. As flutuações de temperatura devem ser evitadas, uma vez que poderão provocar recristalizações, com o aumento do tamanho dos cristais de gelo, o que é muito prejudicial para a textura do produto (EVANGELISTA, 1989; PARDI et al, 2001).

A conservação dos alimentos pelo congelamento não se restringe apenas à manutenção do produto em uma câmara com temperaturas reduzidas. Esse processo inclui ainda transportes, armazenamentos intermediários e balcões de vendas, formando uma verdadeira cadeia de frio. Para que a qualidade dos produtos congelados seja mantida, essa cadeia não deve ser interrompida. O produto deve ser mantido a baixas temperaturas sem oscilações, desde a produção até o consumo (ASHRAE, 1998).

2.2 TEMPOS DE CONGELAMENTO E INFLUÊNCIA SOBRE A ESTRUTURA DOS PRODUTOS

O congelamento de alimentos é um processo extremamente complexo, em função do grande número de variáveis. A temperatura em que a água contida no produto começa a congelar depende do seu teor de sólidos solúveis (SINGH e HELDMAN, 1997). Ao contrário das substâncias puras, o congelamento de alimentos não se dá a uma temperatura determinada, mas em uma faixa de temperaturas. Inicialmente, há o estágio de resfriamento, compreendendo o período decorrido entre o início do processo, com o produto a uma temperatura relativamente alta, até que se atinja a temperatura na referida região onde se inicia a cristalização da água. Em seguida, ocorre o estágio de congelamento, fenômeno decorrente da liberação de calor latente de solidificação, período no qual a temperatura sofre pequena variação. Finalmente, há o período de redução de temperatura. O aumento da concentração de solutos na água que ainda não se encontra congelada provoca o abaixamento do ponto de congelamento e a temperatura cai rapidamente até próxima à temperatura do congelador. A quantidade de água que permanece sem congelar e as temperaturas de congelamento comercial dependem da composição do alimento e

da temperatura de armazenamento (ASHRAE, 1998; HELDMAN e HARTEL, 1998; HENSE, 1993).

O tempo de congelamento pode ser definido como o tempo decorrido desde o início do estágio de resfriamento até que a temperatura final seja atingida. O tempo necessário para o congelamento é inversamente proporcional à temperatura utilizada no processo. Dependendo dessa temperatura e de outras condições, o processo pode ser considerado lento ou rápido. O tempo de congelamento depende de vários fatores. Além da temperatura, pode-se citar o tamanho, a geometria do produto e a condutividade térmica do material da embalagem.

A velocidade de congelamento pode ser avaliada pela velocidade de deslocamento da frente do gelo através do produto. É maior próximo à superfície e mais lento próximo ao centro térmico do produto. No congelamento lento, a temperatura do produto vai decrescendo gradativamente até chegar ao valor desejado. Há formação de grandes cristais de gelo no interior das células e principalmente nos espaços intercelulares. Tais cristais atingem grandes dimensões devido à concentração de sólidos nos espaços intercelulares e do conseqüente deslocamento da água do interior para fora das células, fenômeno responsável por alterações irreversíveis. Além disso, pode ocorrer o rompimento das membranas celulares, o que irá colaborar ainda mais com estas alterações, assim como oferecer um produto, após o descongelamento, com textura inferior à desejada (BRENNAN, 1980; SINGH e HELDMAN, 1997).

No congelamento rápido ocorre um abaixamento brusco de temperatura, formando pequenas estruturas de gelo amorfo, principalmente no interior da célula, o que é menos prejudicial ao alimento. Dessa forma, para se obter produtos de boa qualidade, a redução de sua temperatura deve ser rápida, o que pode ser viabilizado utilizando-se equipamentos com alta capacidade de refrigeração. O gelo amorfo, dentro ou fora da célula, mesmo com o aumento distribuído de volume de aproximadamente 9% após o congelamento da água, não lesiona as células, mantendo os tecidos inalterados, não prejudicando a estrutura do alimento congelado (ASHRAE, 1998).

Segundo RAMAKRISHNAN et al. (2004), a determinação dos tempos de congelamento é crítica na operação e controle de sistemas criogênicos. Diferentes modelos termodinâmicos foram desenvolvidos para descrever o processo de congelamento e fornecer métodos para o cálculo do “tempo de residência” necessário para um produto ser congelado. Os dois modelos

termodinâmicos principais são o “modelo de condução de calor com temperatura dependente das propriedades térmicas” e o “modelo de frente de mudança de fase única”. O último modelo é baseado na hipótese de que todo o calor latente de solidificação é liberado a uma temperatura única de frente fria de mudança de fase, que se move do exterior para o centro térmico do produto congelado. O outro modelo assume que as propriedades termofísicas nas regiões antes e depois da frente são constantes, mas diferentes. Segundo RAMAKRISHNAN et al. (2004), o primeiro modelo é considerado mais realístico que o segundo.

Para a estimativa dos tempos de congelamento de alimentos processados industrialmente, já foram usados com limitado sucesso vários métodos analíticos e empíricos que assumiam a existência de estado estacionário e requerimento de propriedades constantes do produto. RAMAKRISHNAN et al. (2004) citam ainda que, independente do método adotado para calcular os tempos de congelamento, o controle do sistema de congelamento é um ponto crítico que precisa ser considerado. Dessa maneira, sugeriram que um controle de alimentação envolvendo a monitoração contínua da quantidade de produto que entra possa ser usado para controlar o congelamento em túneis e obter consideráveis economias de energia. Controlando-se também o fluxo de refrigerante e/ou a velocidade da esteira transportadora, o congelamento adequado de todos os produtos é garantido.

2.3 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DOS ALIMENTOS CONGELADOS

As propriedades de interesse quando se considera o processo de congelamento incluem a densidade, calor específico, condutividade térmica, entalpia e calor latente de solidificação. O conhecimento dessas propriedades é necessário para o desenvolvimento de cálculos de transferência de calor envolvidos nos projetos de equipamentos de congelamento e armazenamento de alimentos, além dos equipamentos de refrigeração. Essas propriedades devem ser consideradas também para o cálculo dos tempos de congelamento necessários para assegurar um adequado “tempo de residência” dos produtos nos sistemas de congelamento. As aproximações sugeridas na quantificação da magnitude das propriedades durante o processo de congelamento dependem diretamente da relação entre fração não congelada de água no produto e

a temperatura do mesmo (ASHRAE, 1998; HELDMAN e LUND, 1992; RESENDE e SILVEIRA JÚNIOR, 2002).

Geralmente, nas determinações experimentais das propriedades termofísicas dos alimentos, a maior dificuldade é atribuída à sua grande dependência com a temperatura e a suas grandes variações em relação às baixas temperaturas características dos processos de congelamento (HENSE, 1993). A temperaturas acima do ponto de início de congelamento, as propriedades termofísicas geralmente têm um comportamento bem definido. Entretanto, a temperaturas abaixo desse ponto, elas variam muito. Como estão intimamente relacionadas à composição química e temperatura do produto, é praticamente impossível determinar experimentalmente e tabular as propriedades dos alimentos para todas as possíveis condições e composições dos mesmos (HENSE, 1990). Devido a essas dificuldades, os esforços estão concentrados em construir modelos matemáticos baseados nas propriedades termodinâmicas de uma solução ideal. A correlação matemática das propriedades térmicas de alimentos como uma função de sua composição química básica e conteúdo de água tem sido uma alternativa para a realização experimental. Equações para a estimativa de propriedades termofísicas para sistemas com e sem mudanças de fase podem ser facilmente encontradas na literatura (ASHRAE, 1998).

RESENDE e SILVEIRA JÚNIOR (2002), por exemplo, determinaram experimentalmente a condutividade e difusividade térmica em função da temperatura de um sistema modelo durante o processo de congelamento e comparou-os com propriedades estimadas, usando modelos encontrados na literatura.

2.4 PRODUÇÃO DO “FRIO”

O “frio” industrial é geralmente produzido pela expansão de uma substância de baixo ponto de ebulição. Essa substância é mantida sob pressão em um circuito fechado e, ao se expandir, retira calor do ambiente e dos produtos nele contidos. Os mecanismos de produção de “frio” têm evoluído bastante. Porém, os princípios básicos continuam sendo a compressão, liquefação e expansão de uma substância em um sistema fechado (SILVA, 2000).

As principais propriedades exigidas para que uma substância possa ser utilizada como refrigerante são o baixo ponto de ebulição e elevado calor latente de vaporização; a elevada

densidade de vapor, permitindo a utilização de pequenos e econômicos compressores, a baixa toxicidade, a não inflamabilidade, a baixa capacidade de mistura com o óleo do compressor e o baixo custo (SILVA, 2000).

2.5 SISTEMAS DE CONGELAMENTO

Para a construção dos sistemas de congelamento, é necessário o conhecimento acerca das mudanças ocorridas na estrutura do produto durante o processo de redução da temperatura e a influência dessas mudanças em suas propriedades. Além disso, para alcançar as reduções de temperatura desejadas, exige-se o conhecimento da quantidade de calor sensível e latente de solidificação do produto removida durante o processo de resfriamento e congelamento. Segundo HELDMAN e LUND (1992), essas condições são necessárias para que se possa conservar a temperatura e movimento à superfície do produto. Elas determinam a eficiência do sistema de congelamento.

Existem vários métodos de congelamento, e a sua escolha depende de uma série de fatores. Os mais importantes são a composição do alimento, o custo do processo, a finalidade do congelamento, a qualidade do produto após o descongelamento e o tempo em que se deseja preservar o produto congelado (HELDMAN e HARTEL, 1998; SILVA, 2000).

Em geral, os sistemas de congelamento podem ser divididos em 2 classes: sistemas de contato indireto e sistemas de contato direto. Essa classificação é distinguida pela maneira na qual o produto se encontra em contato com o fluido refrigerante. A separação entre o produto e o refrigerante varia de acordo com o tipo de embalagem do produto e o tipo de refrigerante utilizado (HELDMAN e LUND, 1992).

Os métodos de congelamento mais utilizados são o congelamento por resfriamento com ar estático ou em circulação, congelamento por contato indireto com superfícies super resfriadas e o congelamento por imersão em líquidos refrigerantes (SILVA, 2000). Uma atenção maior será dada aos sistemas de congelamento de contato indireto por ter sido o tipo de sistema utilizado neste trabalho.

2.5.1 *Sistemas de contato indireto*

Neste tipo de sistema o alimento é separado do fluido refrigerante primário por meio de um tipo de barreira, podendo ser as superfícies da embalagem do produto, como também componentes estruturais do sistema de congelamento (HELDMAN e LUND, 1992).

De acordo com HELDMAN e HARTEL (1998), em muitos casos o meio utilizado para a redução da temperatura do produto é o ar “frio”. Os congeladores com circulação de ar são baseados no princípio de transferência de calor por convecção. Após o resfriamento do ar, o mesmo é insuflado em alta velocidade por meio de ventiladores. Dessa forma, curtos tempos de congelamento são possíveis pela manutenção de altas velocidades do ar (3 a 8 m/s) na câmara frigorífica, baixas temperatura do ar (-35 a -45°C) e bom contato entre a embalagem e a superfície do produto. Além de esteiras transportadoras, o produto pode ser transportado através de bandejas, esteiras espirais e esteiras rolantes (ASHRAE, 1998; HELDMAN e HARTEL, 1998; HELDMAN e LUND, 1992). Além disso, esse tipo de sistema pode ser construído das mais diferentes formas: gabinete fechado, seqüência de gabinetes ou túnel horizontal ou helicoidal (vertical). Embora esse sistema possa funcionar em batelada, o sistema contínuo é mais utilizado (ASHRAE, 1998).

As características de qualidade final do produto são refletidas pela eficiência do processo de congelamento. O tempo durante o qual o produto permanece no processo (“tempo de residência”) é um dos principais fatores para a sua preservação. Os processos industriais usam, na maioria dos casos, as mesmas condições de operação para diferentes tipos de produtos, e o tempo de congelamento é pré-estabelecido em acordo com a quantidade e propriedades de produtos a serem processados (HELDMAN e LUND, 1992).

O produto deve permanecer no túnel apenas o tempo necessário para que a temperatura no seu centro térmico seja reduzida a um nível desejável. A partir daí, o processo pode ser interrompido e o equilíbrio de temperatura é mantido na câmara de estocagem. Para se obter o melhor resultado, é necessário que o equipamento seja ocupado até sua capacidade teórica, o que significa que, no caso do túnel, a esteira deverá ser ocupada completamente onde o fluido é aspergido. Além disso, a operação não deverá ser interrompida, pois cada parada requer novo resfriamento com conseqüente aumento dos gastos (HELDMAN e HARTEL, 1998).

2.6 PERFIL DE VELOCIDADES DO AR

A direção do fluxo de ar é função do projeto do congelador, podendo fluir longitudinalmente ou transversalmente ao produto, oferecendo uma distribuição de temperaturas ao longo do trajeto.

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

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

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

Isso possibilitou a detecção e visualização de distúrbios, fenômenos e problemas inerentes do escoamento através de métodos estatísticos simples.

Em um outro estudo, RESENDE et al. (2002b) desenvolveram um método de predição dos tempos de congelamento de formas regulares levando-se em conta a presença de caminhos preferenciais do ar, vácuo e irregularidades que possam existir no produto ou em sua forma durante o seu processamento. Verificaram com os resultados obtidos experimentalmente, que o comportamento da taxa de resfriamento dos produtos nas caixas está diretamente relacionado à posição das caixas no empilhamento. Com isso, mostraram que a negligência da existência de canais preferenciais do ar pode levar a erros comuns na estimação de tempos de congelamento, já que os coeficientes de transferência de calor afetam fortemente a precisão dos métodos de determinação desses tempos. Dessa forma, constataram também que a transferência de calor ocorre em todas as direções e não é uniforme em toda a superfície.

2.7 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

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

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

O coeficiente de transferência de calor global entre a superfície do produto e o ar frio é um parâmetro importante. Em sistemas na qual o meio de transferência é o ar frio, como em túneis de congelamento, um dos fatores que controlam a taxa de congelamento é o coeficiente de transferência de calor convectivo. Em condições normais, esses coeficientes variam com a temperatura, umidade do ar e principalmente com a velocidade do mesmo (RESENDE et al., 2003).

KONDOYAN e DAUDIN (1997) lembram que o coeficiente de transferência de calor efetivo engloba, além do calor transferido por convecção, o calor transferido por condução entre os corpos em contato, por radiação ou aquele removido durante a mudança de fase, quando esta ocorre. De acordo com RESENDE et al. (2003), poucos valores experimentais de coeficientes de transferência de calor foram obtidos nos últimos anos e estes freqüentemente são relacionados a um tipo de operação específico.

Em situações industriais, o processo de congelamento de carnes dentro de caixas com grandes quantias de produto pode ser muito complexo, principalmente quando a estrutura do produto possui composição química muito variada. A temperatura inicial antes de ser submetido ao processo de congelamento pode ser uniforme ou não, a sua homogeneidade não é garantida, além de haver a possibilidade da existência de vácuo, bolsas de ar ou bolhas cheias de gás dentro do produto e das embalagens. Além disso, a forma e tamanho do produto são normalmente irregulares. A transferência de calor externa pode ser constante através da superfície inteira do produto, mas grandes variações nos coeficientes de transferência de calor, principalmente convectivos, podem ocorrer em diferentes posições do produto no sistema de congelamento (RESENDE et al., 2002b; RESENDE et al., 2003).

RESENDE et al. (2003) analisaram seus trabalhos anteriores, encontrando dados acerca da diferença significativa entre os coeficientes de transferência de calor efetivos para amostras colocadas em diferentes posições dentro das caixas. Isso sugere que em diferentes condições de processamento não seja possível obter uma transferência de calor uniforme em toda a superfície do produto e o centro térmico é modificado, certamente não coincidindo com o centro geométrico das formas consideradas.

Dessa forma, é necessário considerar a presença de canais preferenciais, zonas de baixas pressões e irregularidades que possam existir no produto ou em sua forma durante o processamento. Os mesmos autores verificaram experimentalmente que o comportamento da taxa de resfriamento em caixas colocadas em diferentes posições varia muito, e que a transferência de calor ocorre em todas as direções e não é uniforme em toda a superfície. Quando os detalhes acerca do fluxo de ar não são levados em conta, erros comuns na estimação de tempos de congelamento ocorrem em 100% dos casos. Por outro lado, a configuração utilizada no trabalho de RESENDE et al. (2003), que considera a existência de canais preferenciais no leito, rendeu

bons resultados em todos os níveis de temperatura testados, resultando em erros médios de valores preditos abaixo de 10%.

2.8 CONGELAMENTO DE CORTES DE AVES

Nos últimos 20 anos, a avicultura brasileira passou por extraordinárias transformações, tornando o Brasil um dos maiores produtores e exportadores de aves do mundo. São utilizadas modernas técnicas em toda cadeia produtiva. Dispõe-se também de um moderno parque industrial para efetuar o abate e processamento dos produtos avícolas, sendo a maioria dos frigoríficos habilitados para exportar carne de aves e seus derivados para os mais exigentes mercados internacionais.

Acompanhando as mudanças no estilo de vida na sociedade no exterior e no Brasil, as necessidades e preferências dos consumidores foram se modificando e a indústria teve que se adaptar a elas. Maiores volumes de frangos em corte ou desossados passaram a ser requeridos pelos consumidores em substituição às aves comercializadas inteiras. Na industrialização houve a necessidade de minimizar defeitos causados pelo processamento, que se tornam evidentes quando a ave é comercializada na forma com osso ou desossada (DICKEL,2004).

Durante o abate de aves e seu processamento, as funções vitais dos animais são interrompidas, tendo-se início uma série de transformações que adquirem características de fenômenos putrefativos. Tais processos sucedem-se rapidamente à temperatura ambiente, com a conseqüente inutilização do produto. O abaixamento da temperatura da matéria-prima deve ser feito imediatamente após a morte dos animais. Algumas horas de atraso no abatedouro poderão ocasionar perdas na qualidade dos produtos. À medida que se provoca o abaixamento da temperatura, retardam-se consideravelmente os fenômenos promovidos pela ação de agentes deteriorantes, como microrganismos e também por enzimas e reações químicas (DICKEL,2004).

Convém lembrar que o “frio” não é um agente de esterilização. Quando o produto já resfriado ou congelado tem sua temperatura elevada, os microrganismos aí existentes e que estavam em estado de latência, passam a se desenvolver mais rapidamente, à medida que se aproximam da temperatura ótima de crescimento. Acredita-se que a letalidade do método de congelamento ocorre em função da desnaturação e precipitação de proteínas e enzimas

indispensáveis ao metabolismo celular dos microrganismos, possivelmente em função do aumento da concentração de solutos, após o congelamento da água. Outra parte pode sofrer lesões físicas ocasionadas pelos cristais de gelo que se formam no interior de suas células. O congelamento rápido dos microrganismos, abaixo da temperatura ótima de crescimento, para temperaturas abaixo de 0°C, também pode provocar sua morte, em virtude do choque térmico que esse procedimento provoca, modificando a permeabilidade da membrana celular com liberação de enzimas inibidoras do restabelecimento da célula (PARDI et al., 2001).

Os produtos cárneos devem ser embalados para evitar a desidratação durante o congelamento e armazenamento congelado. Caso isso não seja feito, poderá ocorrer o ressecamento da superfície do produto, além de alterações da cor, textura, sabor e valor nutricional do mesmo (HELDMAN e HARTEL, 1998). O papel, papelão e materiais plásticos têm sido usados com bastante eficiência na embalagem dos alimentos conservados pelo congelamento (LAWRIE, 1985; SILVA, 2000).

O congelamento de carnes embaladas em caixas de papelão é uma característica da indústria da carne há muitos anos. Vem sendo realizado desde o início da era da refrigeração. Porém, segundo BOWATER (2004), o congelamento de tais produtos começou a ser desenvolvido no Brasil somente nas décadas de 60 e 70, quando os países do hemisfério sul começaram a desossar carcaças de carne em cortes primitivos para exportação. Dessa forma, a indústria da refrigeração ainda projeta túneis de congelamento ineficientes e que não promovem o uso final a que se destinam. Geralmente o processo é realizado em túneis com convecção forçada de forma empírica e não possui controle sistemático dos parâmetros de operação, que podem contribuir diretamente com a redução do tempo de congelamento e podem influenciar aspectos econômicos do processo e da qualidade e segurança do produto (RESENDE et al., 2002b).

CAPÍTULO 3

Este capítulo apresenta-se sob a forma de artigo. A influência das embalagens de papelão no tempo de congelamento de cortes de aves é avaliada. Aqui constam dados e resultados dos experimentos realizados para a análise qualitativa da resistência térmica do papelão e a sua influência no tempo de congelamento dos produtos.

TÍTULO: ESTUDO EMPÍRICO DA INFLUÊNCIA DA CAIXA DE PAPELÃO ONDULADO NO TEMPO DE CONGELAMENTO DE CORTES DE AVES EM TÚNEIS COM CIRCULAÇÃO FORÇADA DE AR

3.1 RESUMO

As variações de temperatura de cortes de aves embalados em polietileno de baixa densidade (embalagem primária) e em caixas de papelão ondulado (embalagem secundária) durante o congelamento em túneis contínuos com convecção de ar forçada foram estudadas através da aquisição de dados de tempo/temperatura. O congelamento feito em caixas de papelão, normalmente utilizada em frigoríficos, foi comparado ao congelamento em caixas teladas confeccionadas de material metálico, com a finalidade de se verificar a influência das caixas de papelão nessa etapa do processo produtivo. Dois túneis de congelamento automáticos (ou contínuos - TCA) de diferentes dimensões, diferentes números e disposição de ventiladores, nos quais os produtos eram arranjados de maneira diversa, foram avaliados. Os resultados demonstraram que a redução do tempo de congelamento através da utilização da embalagem alternativa é bastante significativa, variando de 18 a 45% nos dois túneis estudados. Além disso, a utilização dessa embalagem metálica promoveu uma expressiva redução na heterogeneidade de temperaturas finais dos produtos congelados em diferentes posições dos túneis.

Palavras chaves: caixas de papelão, caixas teladas, tempos de congelamento, túneis de congelamento automáticos, asa de frango.

3.2 INTRODUÇÃO

O congelamento é uma operação unitária que visa a conservação de um alimento por um grande período de tempo, mantendo-se grande parte das características originais do produto. O congelamento de alimentos envolve um problema complexo de transferência de calor com mudança de fase e conseqüente variação das propriedades termofísicas, ocorrendo a conversão da

maior parte da água contida no produto em gelo. Esse fenômeno não se dá a uma temperatura determinada, mas em uma faixa de temperaturas, que depende da composição e estrutura do produto, de sua forma física, da temperatura inicial e das condições do meio de resfriamento/congelamento empregado (ASHRAE, 1998).

Quando se trata de produtos cárneos, a composição química é bastante complexa e o congelamento do produto *in natura* pode provocar a perda de água por exudação quando é descongelado, com conseqüente alteração da qualidade. Durante o congelamento, a formação de gelo provoca a concentração dos solutos, fato que pode promover a migração da água para fora da célula através da membrana celular, e até o rompimento da mesma. Em função disso, parte da água após o descongelamento não permanece em sua posição original, podendo ocasionar as perdas por exsudação. O exsudado contém componentes responsáveis pelo sabor e aroma, nutrientes, e contribui para a suculência do produto. Para que o congelamento de produtos cárneos *in natura* seja eficiente e sem alterações significativas na qualidade do produto final, faz-se necessária a utilização de embalagens apropriadas, que protejam a camada superficial do produto, impedindo o seu ressecamento e a conseqüente aparência “cadavérica” (EVANGELISTA, 1989; LAWRIE, 1985). Além disso, quanto menor o tempo de congelamento, definido como o tempo decorrido desde o início do estágio de resfriamento até que a temperatura final (-18°C ou menos) seja atingida, menores serão os cristais de gelo formados e as perdas de água por exudação serão minimizadas, tendo o produto final uma aparência uniforme (BRENNAN, 1980; PARDI et al., 2001; SINGH, 1997).

O congelamento de aves e outros produtos cárneos é predominantemente realizado em túneis de ar forçado. O método de circulação de ar é baseado no princípio da transferência de calor por convecção, utilizando ar a alta velocidade (3 a 8 m/s) e baixa temperatura (-35 a -45°C). Os túneis de congelamento são construídos nas mais diferentes formas, sendo o escoamento do ar em regime turbulento e a transferência de calor do produto para o ar em regime transiente (PARDI et al., 2001; RESENDE et al., 2002a). Para que a estrutura do produto não fique alterada após o congelamento, é necessário que ele tenha, além de uma embalagem primária, uma embalagem de material firme, que suporte o produto e o transporte por todo o túnel sem ser danificada (ASHRAE, 1998; SILVA, 2000). Além disso, é desejável que o material dessa

embalagem permita uma rápida transferência de calor (alta condutividade térmica), para que o tempo de congelamento seja o menor possível.

Devido à complexidade da interface entre o produto e as embalagens primária e secundária, por onde ocorre a transferência de calor durante o congelamento, este trabalho teve como objetivo a análise da influência das embalagens secundárias comercialmente utilizadas, feitas de papelão ondulado, no processo de congelamento de cortes de aves em túneis contínuos com convecção forçada de ar. Para isso, investigou-se a utilização de caixas metálicas perfuradas (teladas) como acondicionamento, a fim de se reduzir drasticamente a resistência térmica das mesmas.

3.3 MATERIAL E MÉTODOS

3.3.1 Escolha e padronização do produto

Para a realização dos testes fez-se a padronização do produto a ser congelado, a fim de se obter reprodutibilidade nos resultados. O corte escolhido foi a asa do frango, sendo o peso de cada peça entre 80 e 120 g. Essas asas eram divididas em duas camadas dentro da caixa, separadas por uma folha de polietileno de baixa densidade (PEBD) com 0,6 mm de espessura, e totalmente recobertas com outra folha de PEBD com 0,3 mm de espessura, evitando-se o contato das peças com o ar ambiente. Após o recobrimento, o produto era colocado em uma caixa de papelão ondulado com aproximadamente 15 kg de produto.

3.3.2 Caixas de papelão ondulado

As caixas de papelão ondulado utilizadas possuíam as dimensões de 570x365x100 mm. Essas caixas eram colocadas sem a parte superior (tampa) nos túneis de congelamento, para uma melhor transferência de calor entre o ar do túnel e o produto. Na Figura 3.1. mostra-se um esquema representativo do produto utilizado, com as respectivas dimensões da caixa.

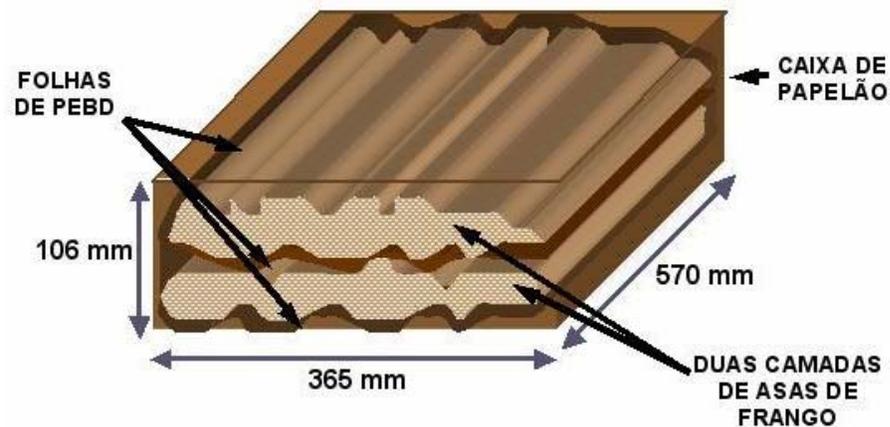


Figura 3.1. Esquema do produto padronizado (asas de frango com interfolhamento e embalagem primária de PEBD), com as respectivas dimensões da caixa de papelão ondulado (embalagem secundária).

3.3.3 Confeção das caixas teladas

As caixas teladas foram confeccionadas especialmente para os testes, nas mesmas dimensões das caixas de papelão para efeito de comparação dos resultados. Foram utilizadas por terem resistência térmica próxima de zero, eliminando assim o efeito da embalagem secundária. Cada furo da placa tinha 20 mm de diâmetro, o que significa que cerca de 81% da superfície da caixa telada era vazada. Em cada caixa era colocado o produto na mesma disposição que na caixa de papelão. A Figura 3.2 a seguir apresenta uma das caixas de tela de aço utilizadas nos testes.



Figura 3.2. Caixa confeccionada para os testes: telas de aço inoxidável.

3.3.4 *Leitura e registro das temperaturas*

Para a medida das temperaturas foram utilizados sensores do tipo PT-100 providos de memória (marca Temprecord International Limited, modelo Multi-Trip, Nova Zelândia). Esses instrumentos foram previamente programados para registrar e armazenar as temperaturas em intervalos de tempo pré-definidos, para posterior leitura através de uma interface que se conecta a um microcomputador. A programação dos sensores e posterior leitura foi feita com o auxílio do software *TempRecord for Windows* versão 3.11. O intervalo de tempo escolhido foi de 2 minutos entre cada leitura. Na Figura 3.3a apresenta-se a foto de um dos sensores utilizados, enquanto na Figura 3.3b apresenta-se a interface que se conecta ao microcomputador para a aquisição e leitura dos dados das evoluções temporais de temperatura.

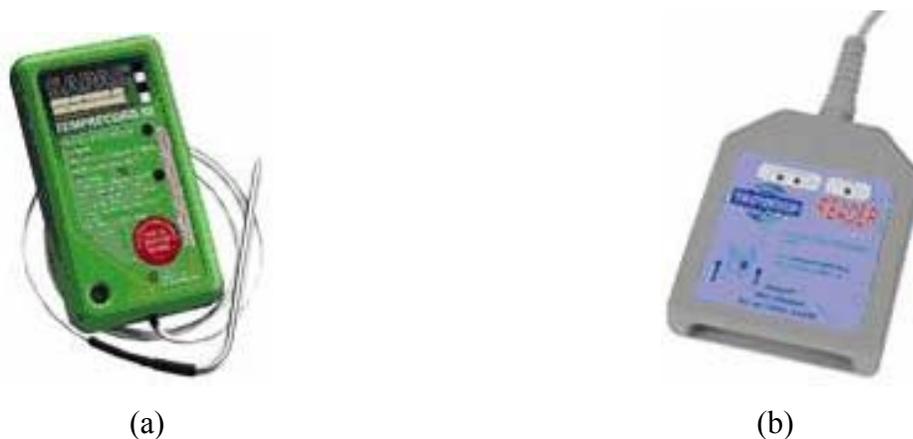


Figura 3.3. (a) Sensor de temperatura; (b) Interface para transferência dos dados para o computador.

Após a programação de cada sensor de temperatura, fez-se a inserção e fixação do mesmo no centro geométrico do produto (da caixa). Foi utilizado um sensor para cada caixa de produto.

3.3.5 *Túneis de congelamento*

O congelamento do produto em questão foi monitorado em dois 2 túneis de congelamento com capacidades, disposição dos ventiladores e modo de operação diferentes. Os dois túneis em questão eram do tipo contínuos, ou seja, alimentados por uma esteira.

3.3.5.1 Túnel de congelamento automático 1 (TCA-1)

O TCA-1 era constituído de 10 níveis (10 andares) nos quais as caixas de produto se movimentavam através das esteiras transportadoras. A cada alimentação, 9 caixas de produto entravam em cada nível. Essas caixas ficavam muito próximas umas das outras, quase não permitindo a circulação de ar entre elas em um mesmo nível. A altura de cada nível era de aproximadamente 200 mm.

O fluxo dos produtos durante o processo de congelamento ocorria somente na horizontal, formando um ângulo teórico de 90° com o fluxo do ar frio.

O TCA-1 era composto por 35 ventiladores, todos situados em apenas uma das laterais do túnel, conforme esquematizado na Figura 3.4. Esses ventiladores possuíam diâmetro de 900 mm e potência de 3 cv (total de 105 cv de potência). O fluxo de ar frio ocorria perpendicularmente ao fluxo de produtos, com o ar fluindo acima e abaixo, mas não lateralmente a cada caixa. A área dos evaporadores era de 6000 m², distribuídos por todo o comprimento do túnel, em 10 blocos, em sua parte superior. A temperatura de trabalho do túnel era de -38°C e o tempo de residência dos produtos no mesmo era de aproximadamente 13,8 horas.

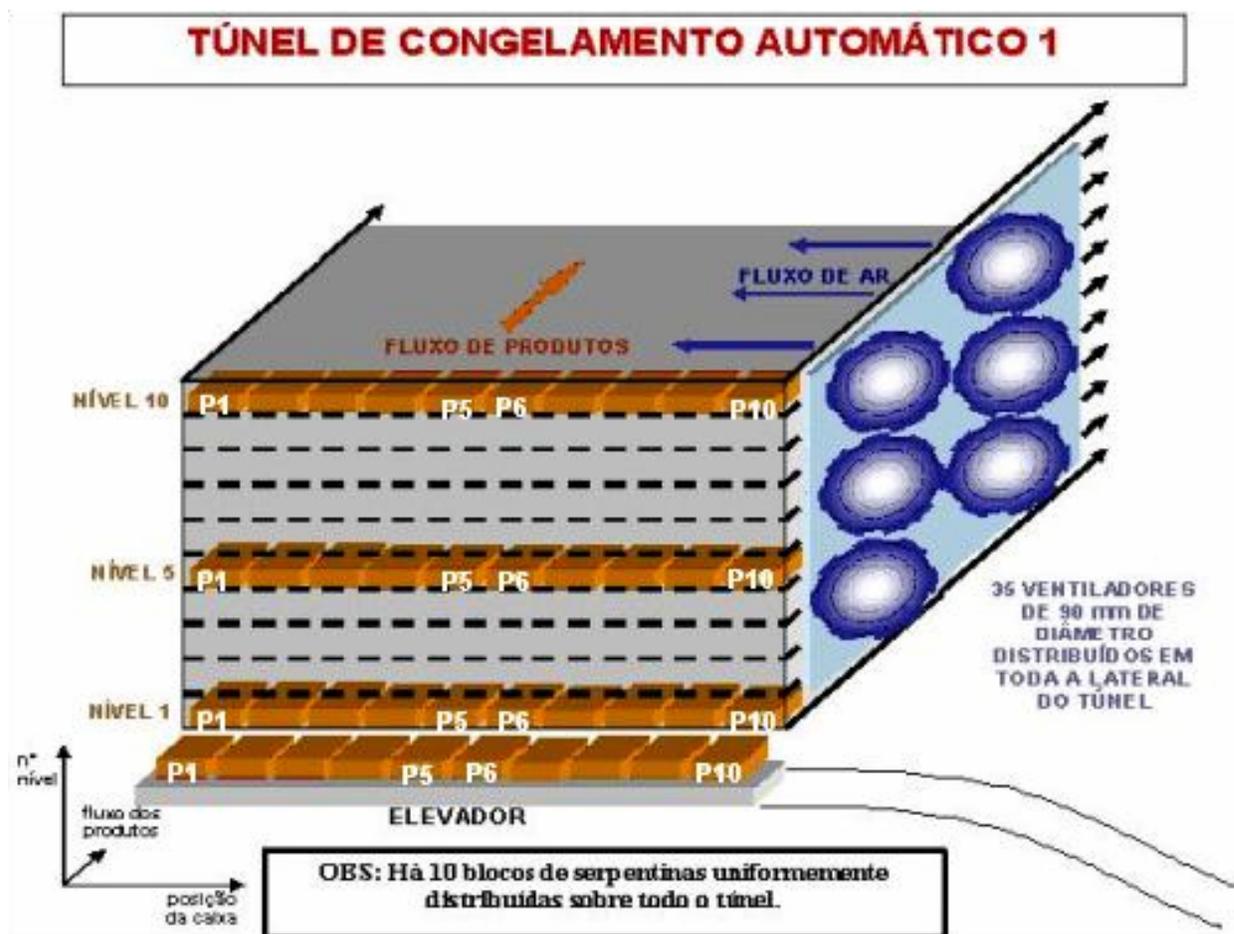


Figura 3.4. Diagrama esquemático do TCA-1, ilustrando a posição dos ventiladores, os fluxos de ar frio e dos produtos, além das posições das caixas de produtos nos níveis do túnel.

3.3.5.2 Túnel de congelamento automático 2 (TCA-2)

O TCA-2 era constituído de 14 níveis. Entravam em cada nível cerca de 15 caixas de produto a cada alimentação, também muito próximas umas das outras, sendo a altura de cada nível de aproximadamente 230 mm.

O fluxo dos produtos durante o processo de congelamento ocorria somente na horizontal, em contra-corrente com o fluxo do ar frio, diferentemente do ocorrido com o TCA-1, onde os fluxos de ar frio e de produtos eram perpendiculares.

O TCA-2 era constituído de 9 ventiladores, todos situados ao fundo do túnel, próximo à saída dos produtos, conforme esquematizado na Figura 3.5. Esses ventiladores possuíam diâmetro de 1200 mm e potência de 10 cv, num total de 90 cv de potência.

A área dos evaporadores era de 9324 m², sendo os blocos de serpentinas situados próximos ao fundo do túnel, em sua parte superior, ocupando o espaço de retorno do ar. A temperatura de operação do túnel era de -38°C e o tempo de residência dos produtos era de aproximadamente 15,6 horas.

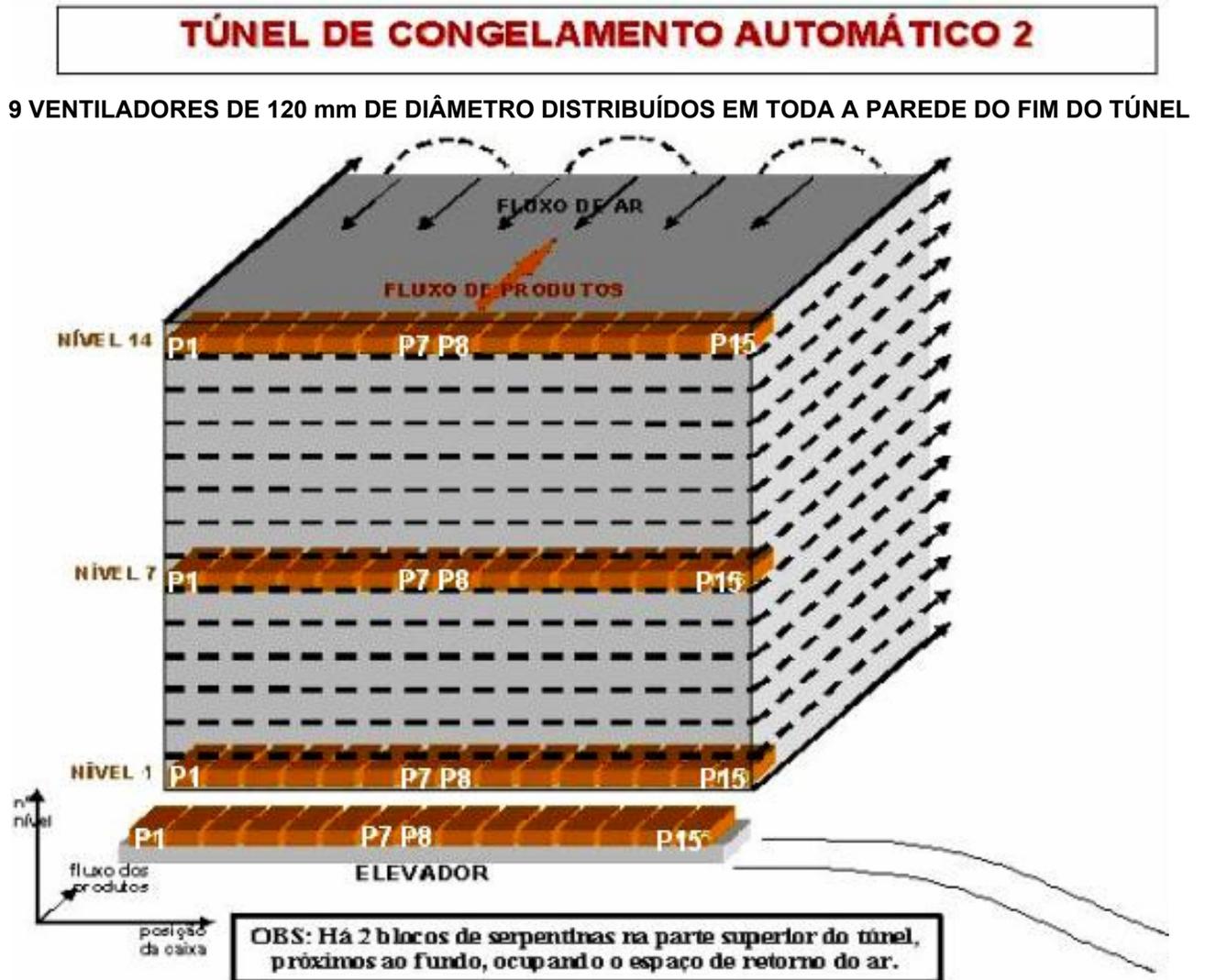


Figura 3.5. Diagrama esquemático do TCA-2, ilustrando a posição dos ventiladores, os fluxos de ar frio e dos produtos, além das posições das caixas de produtos nos níveis do túnel.

3.3.6 Procedimento experimental

Para a realização dos testes foram necessários alguns cuidados iniciais, como a padronização dos sensores de temperatura e das caixas metálicas, para diminuir ao máximo a

probabilidade de ocorrência de erros experimentais. Os sensores foram numerados e posteriormente programados para a leitura das temperaturas a cada intervalo de tempo de 2 minutos. As caixas teladas também foram numeradas e identificadas. Para cada caixa telada havia um sensor correspondente. Para cada teste eram utilizadas três caixas teladas. As dimensões e as massas dessas caixas vazias também foram conferidas.

Após a programação de cada sensor de temperatura, fez-se a inserção e fixação do mesmo no centro geométrico do produto. Ao mesmo tempo, três caixas de papelão com o produto, já prontas para serem congeladas, foram numeradas e identificadas. Essas caixas foram utilizadas para a comparação com as caixas teladas. A numeração foi feita de acordo com a numeração dos sensores e das caixas teladas com as quais foram comparadas. Fez-se também a inserção e fixação dos sensores de temperatura, sendo um sensor para cada caixa de papelão.

O procedimento seguinte foi adotado para a realização dos ensaios. Foram colocadas, primeiramente, as 3 caixas de aço inoxidável nos níveis e nas posições desejadas. Assim que a esteira retornava aos mesmos níveis, colocaram-se as 3 caixas de papelão nas mesmas posições das caixas teladas. Essas caixas ficavam logo atrás das respectivas caixas teladas com as quais foram comparadas. Os horários de início de cada teste foram registrados.

Quando as caixas de papelão e de aço saíram do túnel, retirou-se os sensores para a aquisição dos dados das temperaturas obtidas pelos sensores. Isso foi realizado com o auxílio do software *TempRecord for Windows*. A data de cada teste, seus horários inicial e final, o número do teste e o túnel utilizado foram registrados para o controle dos dados, que depois foram repassados para o programa *Microsoft Excell*, com o qual foram feitos os tratamentos e a análise dos resultados.

No TCA-1 foram feitos testes com a finalidade de comparar os tempos de congelamento entre cada dupla de caixas situadas em um mesmo nível (mesma altura), variando-se as posições das caixas com relação à distância dos ventiladores, que se situavam em apenas uma das laterais do túnel, conforme a Figura 3.4, caracterizando um fluxo cruzado. Colocando-se as caixas no nível mais inferior do túnel (nível 1), comparou-se o tempo de congelamento entre as caixas de papelão e as caixas teladas em 3 posições diferentes: posição 1 (P1), considerada a posição das caixas mais distantes dos ventiladores, posição intermediária (P5 ou P6) e posição 10 (P10), sendo esta última a posição das caixas situadas mais próximas aos ventiladores. O tempo de

residência de todas as caixas no TCA-1 foi aproximadamente o mesmo, cerca de 13,8 h. Houve repetição dos testes para se observar a reprodutibilidade dos resultados.

3.3.7 Análise das resistências térmicas

Para a avaliação das diferentes resistências à transferência de calor, fez-se a comparação entre os tempos de congelamento do produto congelado em caixas de aço inoxidável teladas e em caixas de papelão ondulado (usadas como embalagem secundária). As aberturas de aproximadamente 20 mm de diâmetro em toda a superfície das caixas de aço fazem com que a resistência térmica dessa embalagem seja quase nula, pois o ar frio pode entrar em contato direto com o produto protegido por sua embalagem primária. Além disso, o material que constitui a caixa metálica possui condutividade térmica relativamente elevada ($k_{\text{aço inoxidável}} = 13,8 \text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ a 0°C , GEANKOPLIS, 1993). As variações de temperatura durante o congelamento foram avaliadas para as duas situações. Com isso, verificou-se globalmente a resistência oferecida pelo papelão à transferência de calor.

Estudando-se isoladamente cada caixa de papelão contendo o produto submetido ao congelamento nos túneis, pôde-se identificar as diferentes resistências térmicas à transferência de calor do produto para o ar frio. Essas resistências estão esquematizadas na Figura 3.6.

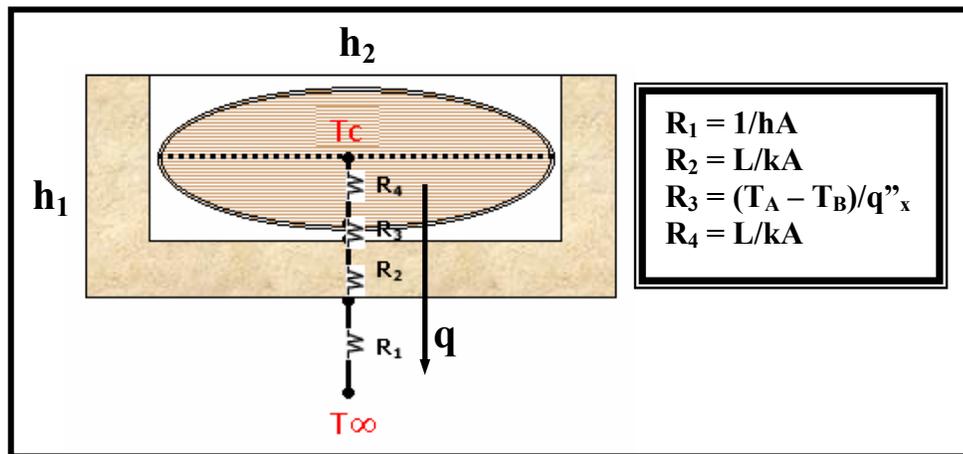


Figura 3.6. Resistências térmicas envolvidas durante a etapa de congelamento do produto.

A resistência R_1 relaciona-se à transferência de calor convectiva entre o produto e o ar do túnel, sendo que A é a área da parede normal à direção da transferência de calor. R_1 varia de

acordo com a posição da caixa dentro do túnel (valores de coeficientes convectivos de transferência de calor, h , diferentes, devido à heterogeneidade na distribuição de velocidades do ar no túnel). A resistência R_2 se deve à espessura (L) e ao material da caixa, sendo uma resistência condutiva, sendo k a condutividade térmica do material. A resistência R_3 é a resistência térmica média de contato, que engloba as resistências de contato caixa-filme plástico e filme plástico-produto, sendo relacionada à rugosidade das superfícies de contato entre esses materiais e à presença de ar ocluso entre o produto e a embalagem primária ou entre esta e a embalagem secundária. T_A e T_B são as temperaturas das superfícies em contato e q''_x é o fluxo de calor da região de temperatura mais alta para a de temperatura mais baixa (INCROPERA e DEWITT, 2003). Essa resistência é de difícil determinação. A resistência condutiva R_4 relaciona-se ao produto, constituído de pele, osso e carne, além do material plástico separando as camadas (interfolhamento). Verifica-se aí que, apesar da tentativa de se minimizar o número de resistências envolvidas, através de simplificações, trata-se de um problema bastante complexo. Então, para a avaliação da resistência térmica devida somente à caixa de papelão ondulado (R_2), deve-se fazer uma comparação entre a resistência total à transferência de calor ocorrida através do produto embalado na caixa de papelão ($R_{total\ com\ papelão}$) com a resistência total através da caixa telada ($R_{total\ com\ tela}$), onde a resistência à transferência de calor oferecida pela superfície telada é desprezível. Isso está representado na Equação 3.1.

$$R_{total\ com\ papelão} - R_{total\ com\ tela} = R_2 \quad (3.1)$$

Neste trabalho a resistência R_2 foi analisada através da comparação entre os tempos de congelamento dos produtos nas duas diferentes caixas, sob as mesmas condições nos túneis, durante um mesmo período de tempo. Os testes foram feitos em diferentes posições dos túneis, para minimizar a influência da heterogeneidade na distribuição de velocidades do ar. Não houve aqui a pretensão de se calcular os valores da resistência térmica da caixa de papelão a partir da determinação dos valores das outras resistências existentes. Pretendeu-se apenas avaliá-la qualitativamente. Isso porque a presença de um produto de estrutura muito complexa dentro da caixa dificulta a determinação do valor da resistência R_4 . Os valores das propriedades termofísicas dos cortes, valores estes necessários aos cálculos, além de serem de difícil estimativa

devido à presença de pele, osso e carne no produto, mudam drasticamente a temperaturas perto ou abaixo do ponto inicial de congelamento do mesmo, devido à influência que a mudança de fase da água tem sobre as propriedades individuais (HELDMAN e LUND, 1992). Segundo RESENDE e SILVEIRA JÚNIOR (2002), nas determinações experimentais das propriedades térmicas de alimentos, a maior dificuldade é atribuída à grande variação destas propriedades com a temperatura e às suas grandes variações a temperaturas próximas do congelamento. Como o conhecimento das propriedades termofísicas do produto é necessário para o desenvolvimento de cálculos de transferência de calor, não faz parte dos objetivos destes experimentos o cálculo da resistência térmica da caixa.

O parâmetro utilizado para a comparação entre o tempo de congelamento da asa interfolheada (caixa de 15 kg) embalada em caixas de papelão e o tempo de congelamento do mesmo produto em telas de aço inoxidável foi a temperatura final no centro térmico, ou seja, -18°C . Essa temperatura foi escolhida por ser a temperatura máxima que os produtos devem ter ao término da etapa de congelamento. Em outras palavras, é a temperatura na qual mais de 85% da água do produto já se encontra congelada, retardando e praticamente impedindo a deterioração de origem microbiana e o desenvolvimento de atividades metabólicas. É a temperatura crítica do produto destinado à comercialização (ASHRAE, 1998; EVANGELISTA, 1989; PARDI et al., 2001). Produtos que saem dos túneis com temperatura muito acima de -18°C devem ser retornados aos mesmos. Perde-se, com isso, tempo e espaço útil no túnel, diminuindo a produção industrial. Com os testes realizados, pretendeu-se demonstrar quantitativamente os ganhos relativos que se pode obter com a modificação do material da embalagem.

3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados referentes aos ensaios realizados para a análise da influência do papelão ondulado no tempo de congelamento do produto, bem como o estudo da embalagem alternativa, foram divididos de acordo com o túnel de congelamento em que foram realizados os testes.

3.4.1 Túnel de congelamento automático 1 (TCA-1)

A seguir são apresentados, seguidamente, os resultados mais interessantes de cada série de experimentos referentes aos túneis TCA-1 e TCA-2, através das Figuras 3.7, 3.8 e 3.9.

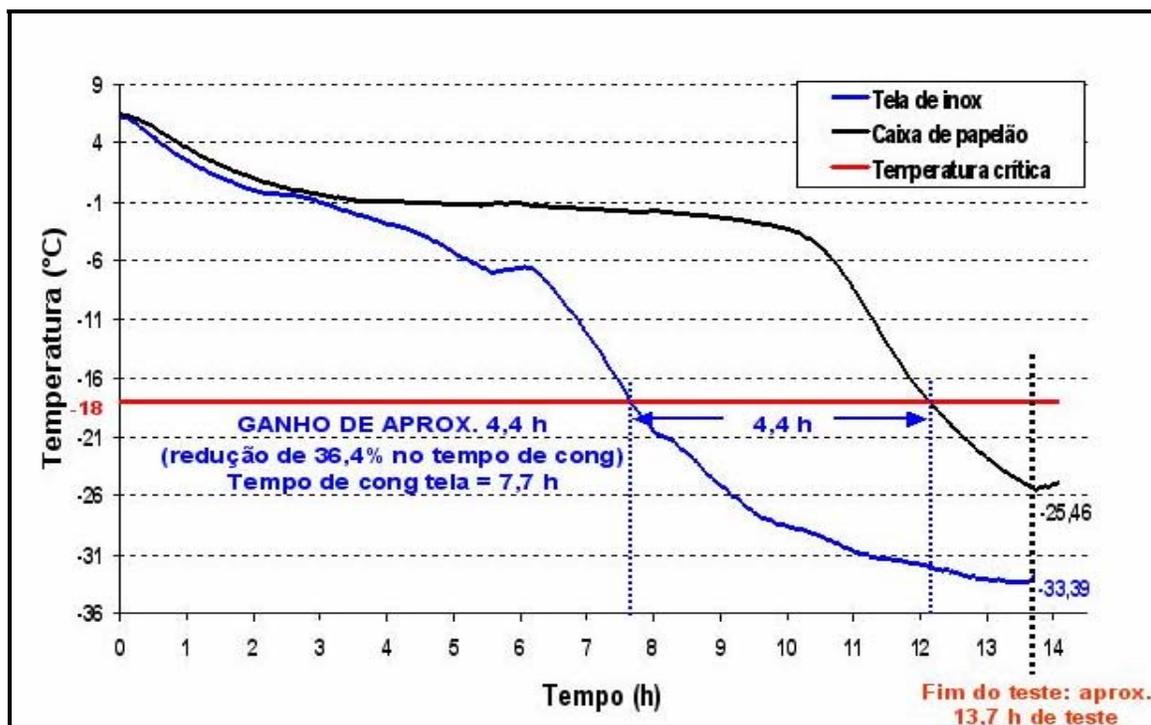


Figura 3.7. Curvas de resfriamento e congelamento do produto na caixa de papelão e na caixa telada, no nível inferior do TCA-1 (posição mais distante dos ventiladores).

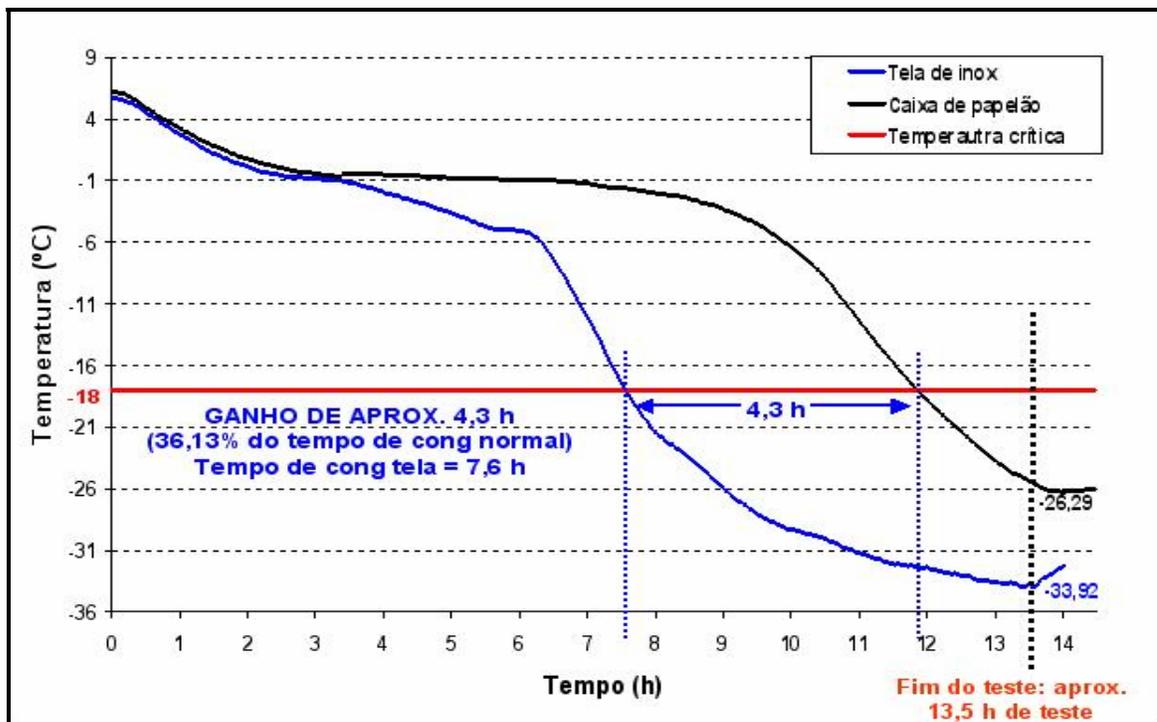


Figura 3.8. Curvas de resfriamento e congelamento do produto na caixa de papelão e na caixa telada, no nível inferior do TCA-1 (posição intermediária).

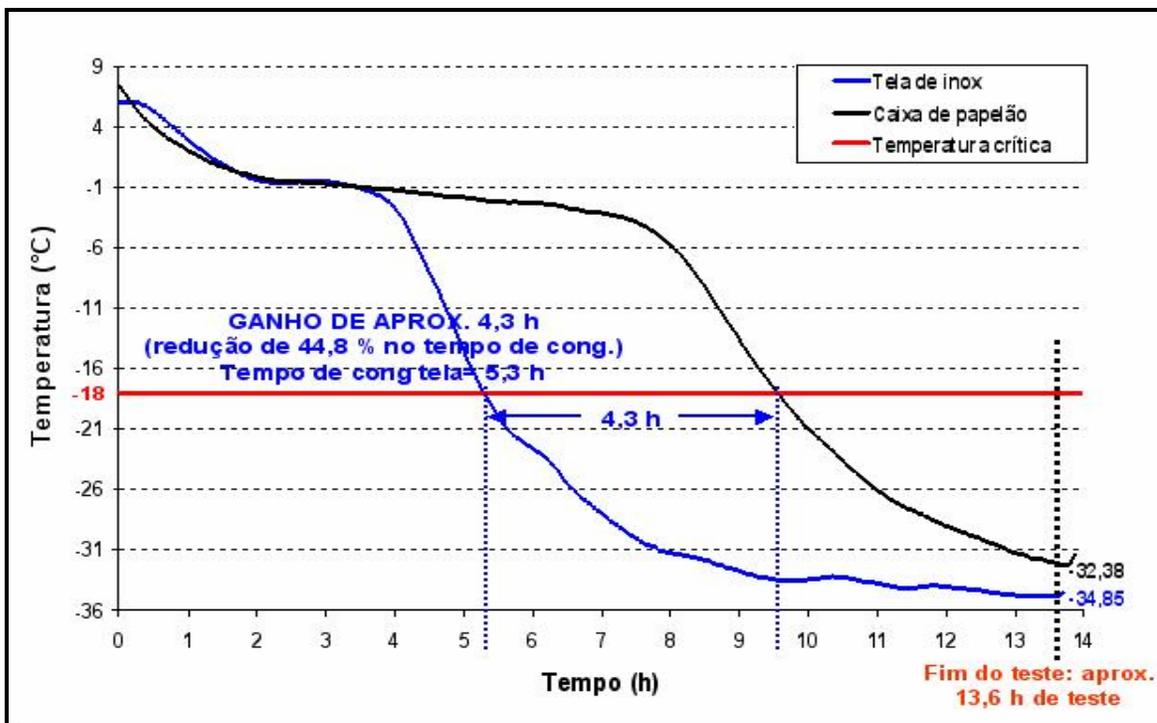


Figura 3.9. Curvas de resfriamento e congelamento do produto na caixa de papelão e na caixa telada, no nível inferior do TCA-1 (posição mais próxima dos ventiladores).

Analisando-se as curvas dos ensaios realizados no nível 1, pôde-se verificar que mesmo na posição mais próxima dos ventiladores, os produtos congelados nas caixas teladas tiveram o seu tempo de congelamento reduzido em quase 45% quando se comparou o congelamento entre as diferentes embalagens. Além disso, o congelamento nas caixas teladas fez com que o platô definido pela perda de calor latente de fusão do produto diminuísse drasticamente (quase 70% em algumas posições), o que provocou a redução do tempo total de congelamento, com provável redução do tamanho dos cristais de gelo formados e manutenção da integridade do tecido muscular (HENSE, 1990). Dessa maneira, a perda de água por exudação deve ser menor, aumentando a qualidade do produto final. Observou-se também que o tempo de residência dos produtos no TCA-1, praticado industrialmente (cerca de 13,8 horas), é maior do que o necessário, o que leva a crer que esse tempo foi estipulado levando-se em consideração uma margem de 10% de segurança.

Analisando-se o nível intermediário do túnel, comparou-se também as 3 diferentes posições, conforme é apresentado nas Figuras 3.10, 3.11 e 3.12.

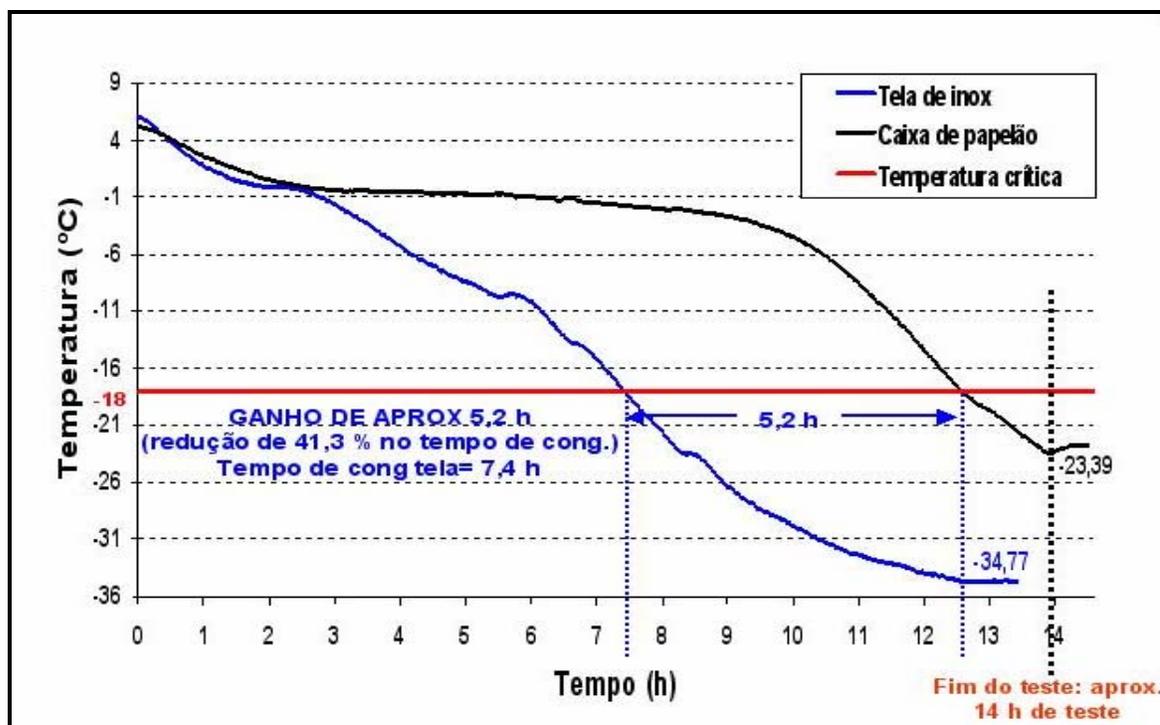


Figura 3.10. Curvas de resfriamento e congelamento do produto na caixa de papelão e na caixa telada, no nível intermediário do TCA-1 (posição mais distante dos ventiladores).

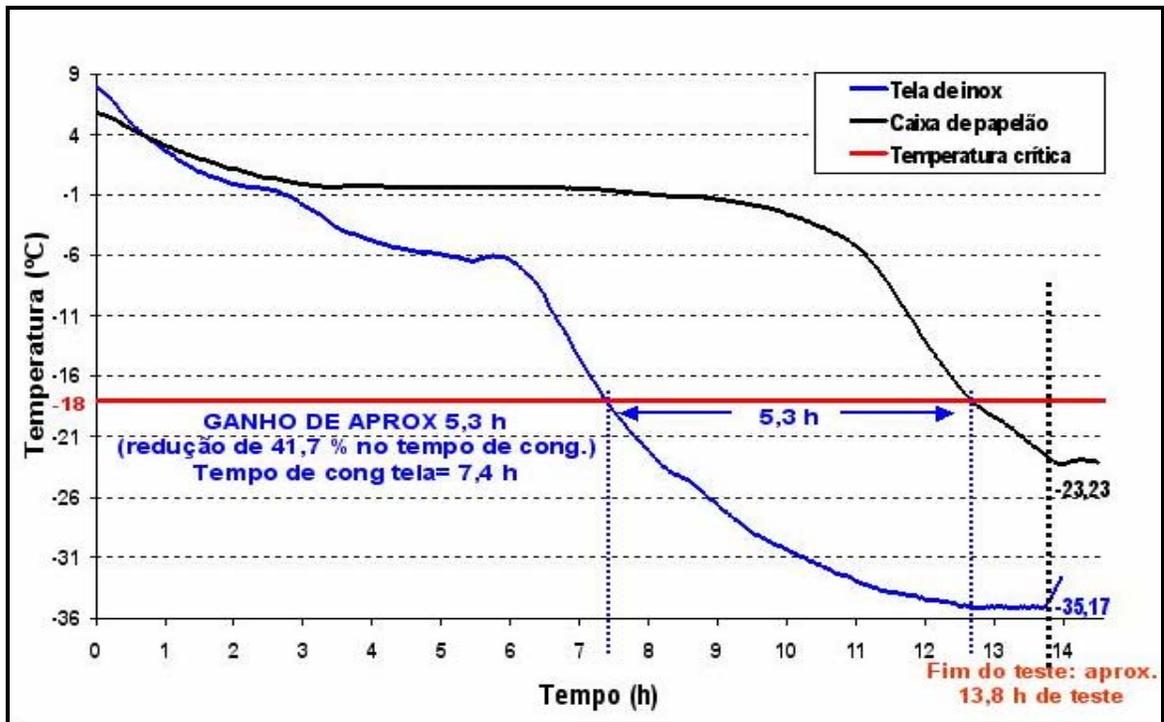


Figura 3.11. Curvas de resfriamento e congelamento do produto na caixa de papelão e na caixa telada, no nível intermediário do TCA-1 (posição intermediária).

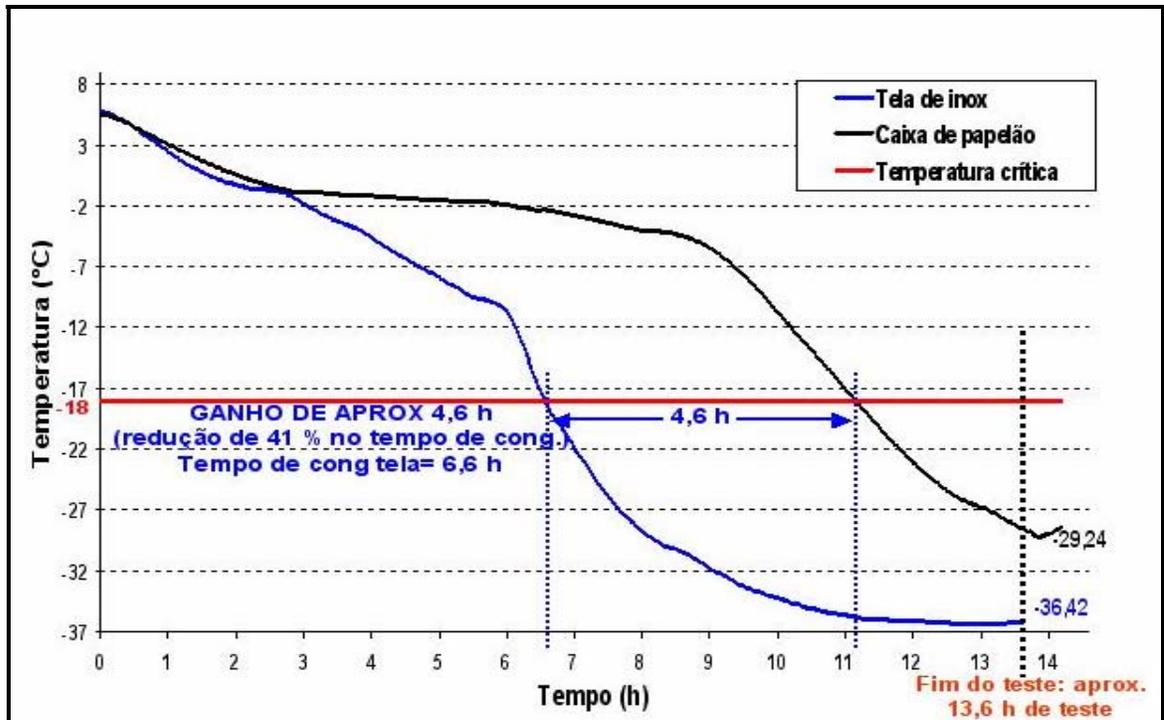


Figura 3.12. Curvas de resfriamento e congelamento do produto na caixa de papelão e na caixa telada, no nível intermediário do TCA-1 (posição mais próxima dos ventiladores).

Como pode ser observado nas figuras anteriores, a redução do tempo de congelamento fica próximo aos 40% nas três diferentes posições do nível intermediário do TCA-1. Observou-se também que a percentagem média de redução do tempo de congelamento com a utilização das caixas teladas nesse mesmo nível é ainda maior que no nível inferior do túnel.

No nível mais elevado do túnel, as caixas foram colocadas nas posições mais distante (P1) e mais próxima (P10) dos ventiladores, e também foram comparados os tempos de congelamento e as variações de temperatura entre as caixas teladas e as caixas de papelão. Verificou-se que a redução do tempo de congelamento chegou a 42% na posição mais próxima dos ventiladores, conforme é apresentado nas Figuras 3.13 e 3.14.

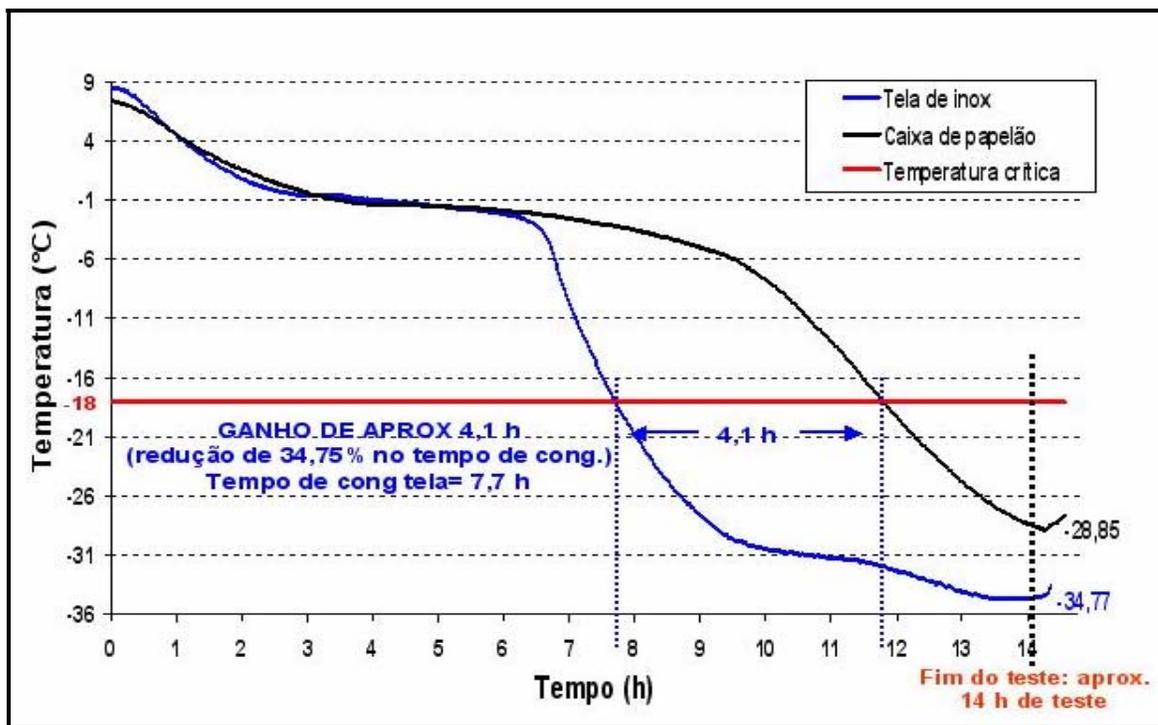


Figura 3.13. Curvas de resfriamento e congelamento do produto na caixa de papelão e na caixa telada, no nível mais elevado do TCA-1 (posição mais distante dos ventiladores).

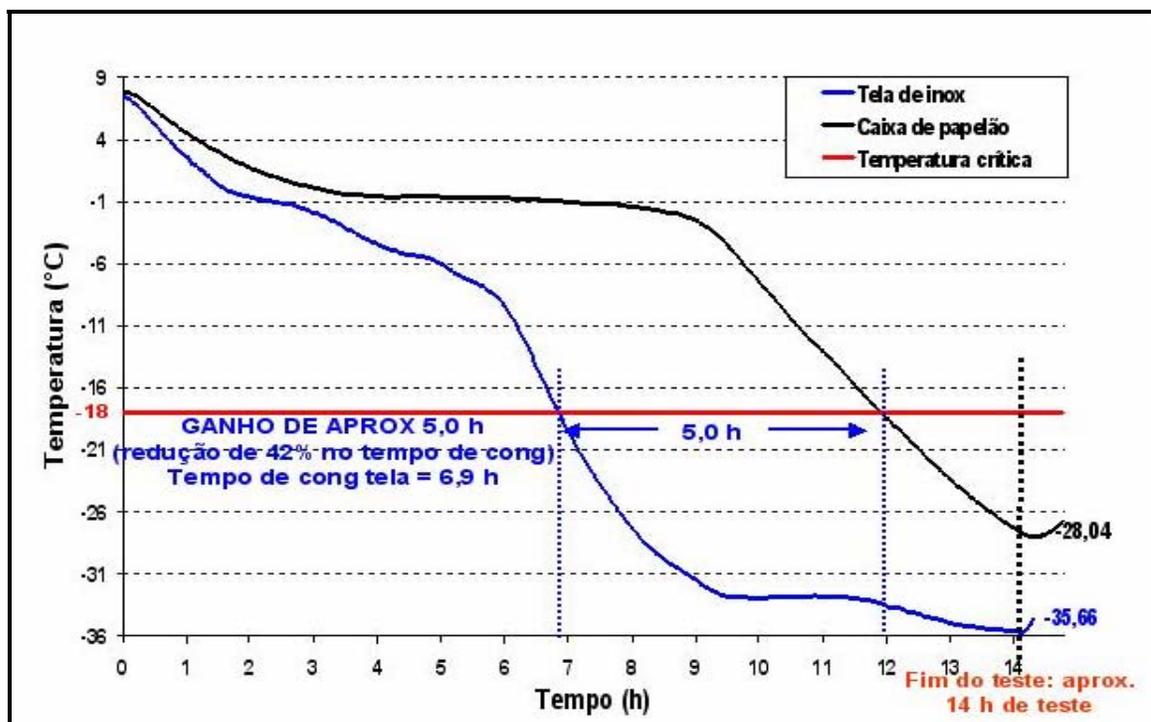


Figura 3.14. Curvas de resfriamento e congelamento do produto na caixa de papelão e na caixa telada, no nível mais elevado do TCA-1 (posição mais próxima dos ventiladores).

Verificou-se assim, com os testes realizados no TCA-1, que o tempo de congelamento do produto (tempo para que o produto atingisse -18°C) ao se substituir as caixas comercialmente utilizadas pelas caixas teladas de aço inoxidável, pôde ser reduzido em mais de 44 %.

3.4.2 Túnel de congelamento automático 2 (TCA-2)

Da mesma maneira que no TCA-1, os testes realizados no TCA-2 tiveram como objetivo a comparação entre os tempos de congelamento dos mesmos produtos nas duas diferentes embalagens citadas. Iniciando-se a comparação, foi fixado o nível mais inferior do túnel (N1) e as caixas foram colocadas em duas diferentes posições. A diferença do TCA-2 com relação ao TCA-1 está na disposição dos ventiladores, de maneira que as posições dos testes não serão aqui mencionadas como próximas ou distantes dos ventiladores e sim pela ordem em que as caixas foram colocadas, posto que se deslocam em contra-corrente com o fluxo de ar frio. Se a distribuição de ar dentro do TCA-2 fosse comprovadamente homogênea, não seria necessária a realização de testes em posições diferentes, já que a localização dos ventiladores deveria influenciar da mesma maneira o tempo de congelamento dos produtos nas diferentes posições.

As Figuras 3.15 e 3.16 apresentam os resultados dos testes realizados nesse primeiro nível (N1).

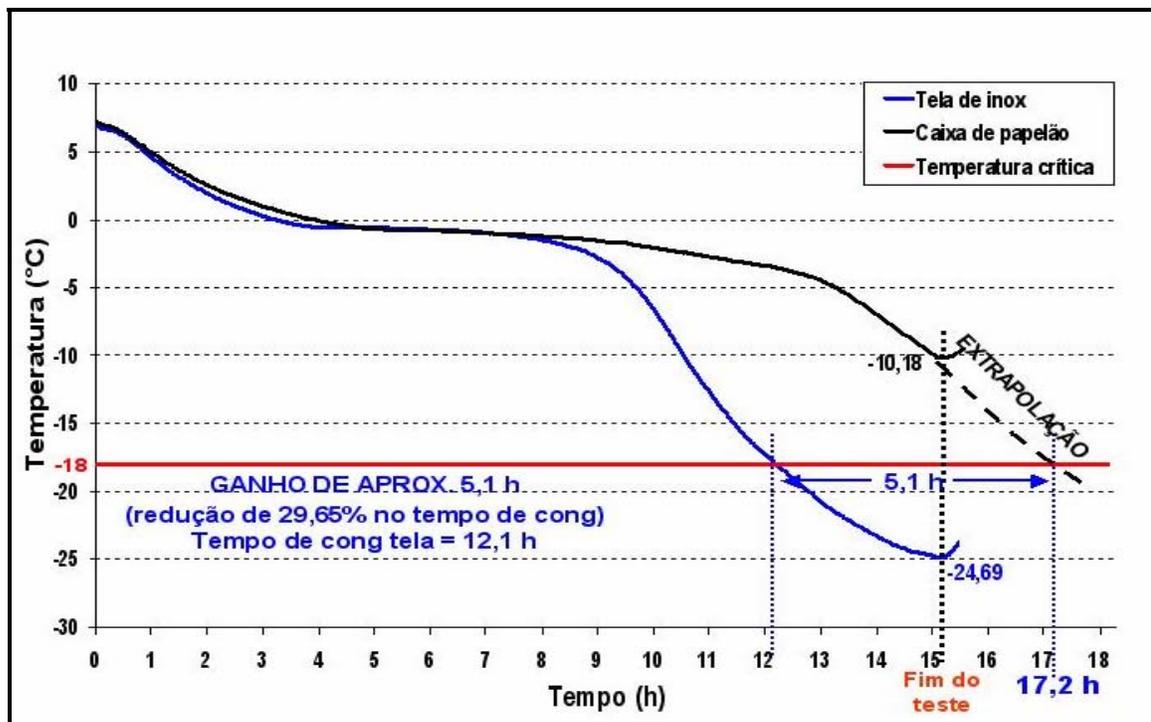


Figura 3.15. Curvas de resfriamento e congelamento do produto na caixa de papelão e na caixa telada, no nível inferior do TCA-2 (posição da primeira caixa).

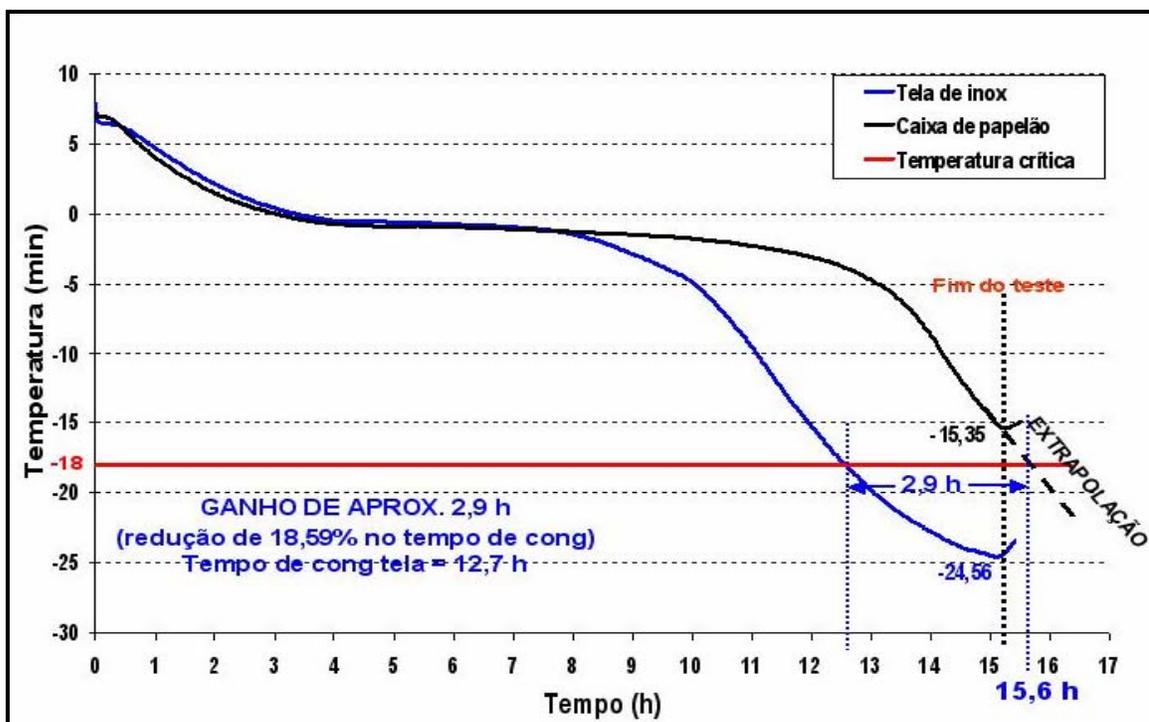


Figura 3.16. Curvas de resfriamento e congelamento do produto na caixa de papelão e na caixa telada, no nível inferior do TCA-2 (posição da última caixa).

Nos testes realizados no TCA-2, a temperatura do produto congelado na caixa de papelão na saída do túnel (fim do teste) não chegou a atingir os -18°C . Fazendo-se uma extrapolação dos resultados, observa-se que o ganho aproximado foi de aproximadamente 5,0 horas no caso dos resultados apresentados na Figura 3.15 e de 2,9 horas no caso dos resultados amostrados na Figura 3.16. Assim como no TCA-1, o período do teste (tempo de residência do produto no túnel) não foi modificado (15,6 horas). O que fixou esse tempo foram as condições de operação do túnel, como a velocidade das esteiras transportadoras. Dessa maneira, a expressão “Fim do teste”, presente nas figuras que apresentam os resultados dos testes realizados no TCA-2, refere-se ao horário de saída do produto do túnel (tempo de residência).

Os testes foram realizados também no nível mais elevado do túnel, tomando-se as posições da primeira e da última caixa a entrar. Nesses dois casos também o produto contido na caixa de papelão não atingiu a temperatura crítica no período do teste. As Figuras 3.17 e 3.18 apresentam os resultados desses ensaios.

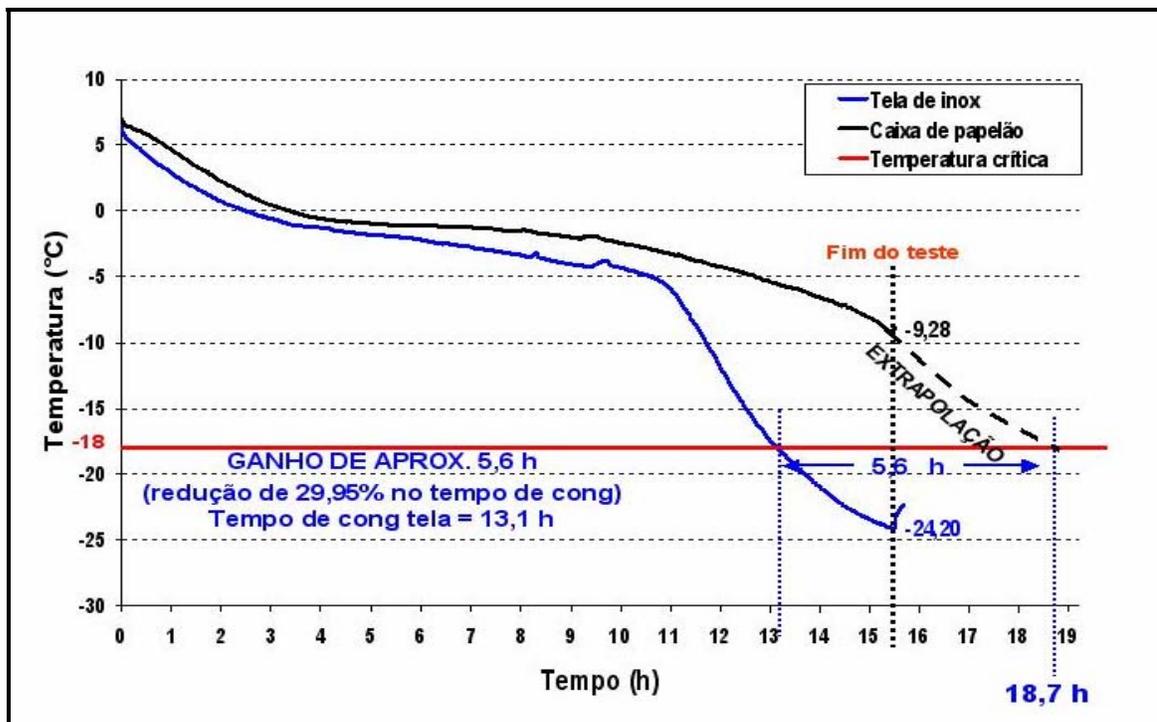


Figura 3.17. Curvas de resfriamento e congelamento do produto na caixa de papelão e na caixa telada, no nível mais elevado do TCA-2 (posição da primeira caixa a entrar).

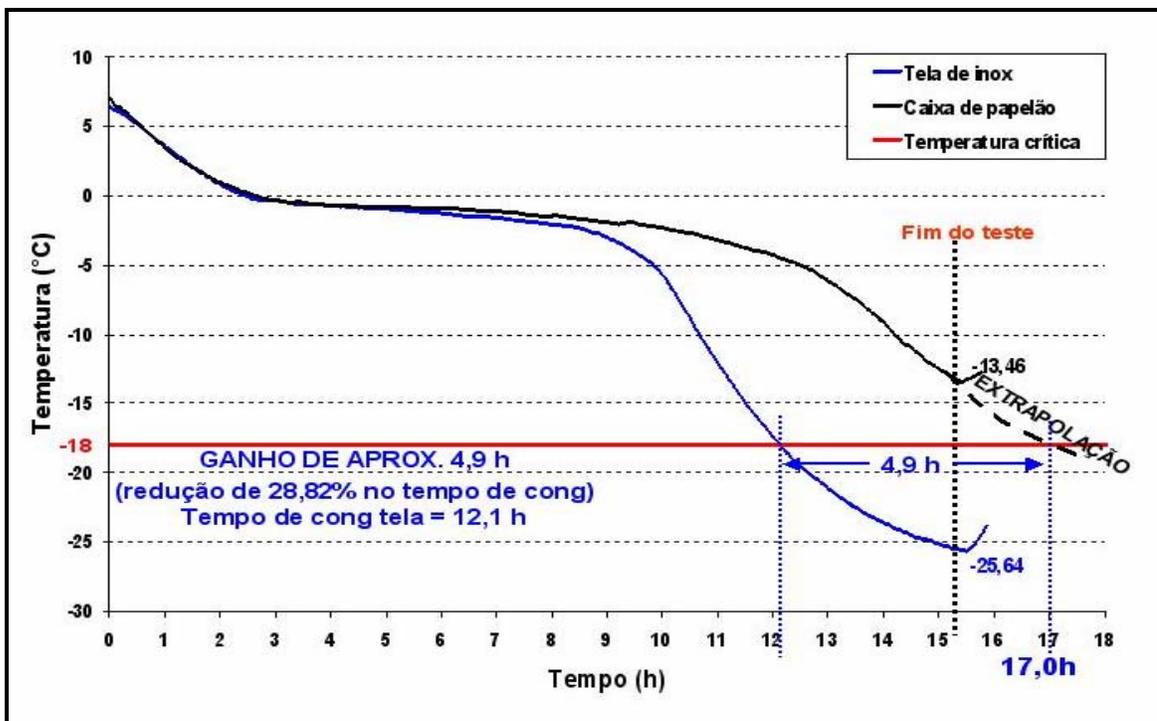


Figura 3.18. Curvas de resfriamento e congelamento do produto na caixa de papelão e na caixa telada, no nível mais elevado do TCA-2 (posição da última caixa a entrar).

Outros ensaios similares foram realizados também nas posições centrais do túnel contínuo 2, mas os seus resultados apenas repetem o que já foi verificado até aqui. Os resultados obtidos a partir de mais de trinta testes nos túneis contínuos 1 e 2, entendendo-se que cada teste equivale a uma posição dentro do túnel, demonstraram reduções do tempo de congelamento de até 45 % com a utilização das caixas teladas de aço inoxidável. Em alguns casos, o ganho foi de mais de 5 horas, ou seja, somente 5 horas após atingir -18°C na caixa telada, o produto contido na caixa de papelão atingiu a mesma temperatura, sob as mesmas condições. Com esses dados pôde-se também verificar qualitativamente a influência da resistência oferecida pela embalagem de papelão à transferência de calor, já que essa embalagem foi comparada àquela em que o valor dessa resistência é quase nulo. Isso significa ganhos consideráveis de produtividade industrial, além da redução de reprocessamento de produtos. Ressalta-se que em grande parte dos testes o produto contido nas caixas de papelão não atingiu a temperatura crítica (-18°C) durante o tempo de retenção no túnel, ao contrário daqueles congelados nas telas.

Outro resultado importante foi a diminuição do platô de temperatura constante proporcionado pelo uso das caixas teladas. O platô é definido pela liberação do calor latente de fusão/solidificação do produto durante a mudança de fase. O tamanho do platô está diretamente relacionado ao tamanho dos cristais de gelo formados. Quanto mais rápida essa fase de liberação do calor latente de solidificação, ou seja, quanto menor o platô, menores serão as dimensões dos cristais de gelo formados. Conseqüentemente, menores serão os danos causados ao tecido muscular da carne (LAWRIE, 1985).

Verificou-se também que a utilização das caixas teladas em substituição às caixas de papelão fez com que a amplitude de tempos de congelamento dos produtos em diferentes posições, amplitude esta devida à heterogeneidade de distribuição de velocidades do ar no túnel, diminuísse sensivelmente. A Figura 3.19 ilustra essa diferença.

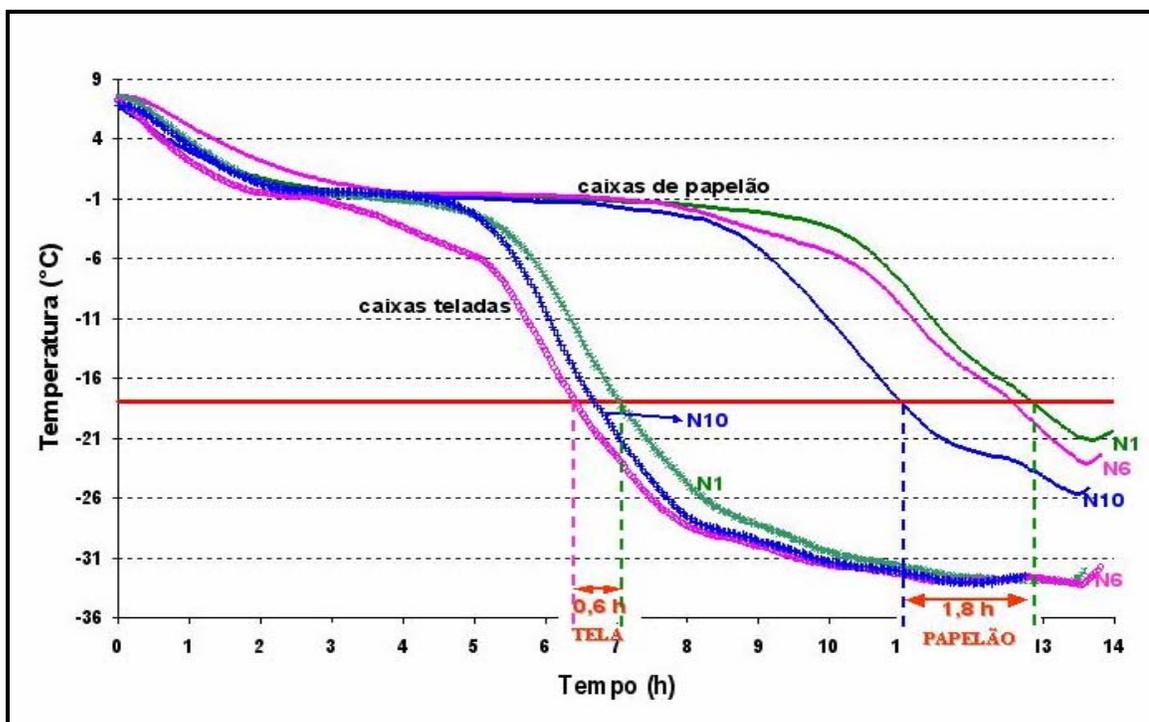


Figura 3.19. Comparação entre as curvas de resfriamento e congelamento obtidas a partir do congelamento do produto em caixas de papelão e em caixas teladas metálica e influência na distribuição espacial dos tempos de congelamento no TCA-1.

As curvas apresentadas na Figura 3.19 foram construídas a partir da comparação entre os tempos de congelamento de produtos em diferentes níveis (N1, N6 e N10), em uma mesma posição (posição intermediária - P6) do TCA-1. Com a utilização das caixas de papelão, os tempos de congelamento foram de 11 a 12,8 horas (diferença/amplitude de 1,8 horas), enquanto com a utilização das caixas teladas, essa diferença foi reduzida a 0,6 horas (6,4 a 7 horas de congelamento) nas mesmas posições.

Todos os resultados obtidos só confirmaram que a troca do material da embalagem utilizada durante o congelamento traz benefícios qualitativos e quantitativos para a operação de congelamento. As caixas teladas, se confeccionadas do mesmo tamanho das caixas já utilizadas, permitem uma perfeita movimentação nas esteiras e nos níveis dos túneis contínuos.

3.5 CONCLUSÃO

Os estudos realizados comprovaram empiricamente que as caixas de papelão, utilizadas comercialmente como embalagens secundárias de carnes, apresentam elevada resistência à transferência de calor. O congelamento realizado nessas caixas é um processo muitas vezes demorado, e o tempo de residência dos produtos nos túneis pode não ser suficiente para o congelamento dos mesmos. A substituição dessas embalagens pelas caixas teladas estudadas neste trabalho apresentou resultados de grande impacto tecnológico e econômico, com ganhos de tempo e produtividade para a empresa produtora de alimentos. Nos experimentos realizados, conseguiu-se, com a utilização da embalagem alternativa, uma redução de quase 45% do tempo de congelamento do produto em um dos túneis testados. O platô definido pela perda de calor latente de solidificação também foi drasticamente reduzido com a utilização das caixas teladas, o que implica em maior qualidade do produto após o descongelamento. Além disso, a utilização das caixas teladas como embalagem alternativa promoveu a redução da heterogeneidade de temperaturas dos produtos na saída dos túneis de congelamento. Esses produtos, por estarem totalmente protegidos pela embalagem primária (PEBD), permaneceram com sua aparência inalterada, sem ressecamento superficial. Os estudos foram feitos com produtos cárneos, mas são perfeitamente aplicáveis também ao congelamento de outros gêneros alimentícios.

CAPÍTULO 4

Neste capítulo, também escrito sob a forma de artigo científico, é apresentada uma nova metodologia para a determinação experimental dos coeficientes de transferência de calor convectivos em túneis de congelamento. Através dos coeficientes estimados, é possível analisar a heterogeneidade da distribuição espacial do ar nesses túneis e apontar a presença de zonas de estagnação e de canais preferenciais de escoamento do ar, o que influencia no tempo de congelamento dos produtos localizados em diferentes posições dos túneis.

TÍTULO: DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA A DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DOS COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR CONVECTIVOS EM TÚNEIS DE CONGELAMENTO

4.1 RESUMO

Foi desenvolvida uma metodologia para a determinação experimental dos coeficientes convectivos de transferência de calor (h) em túneis de congelamento semi-contínuos com convecção forçada de ar. Para isso, tanques de aço galvanizado preenchidos com solução de álcool etílico a 93,1% em massa foram usados como meio modelo para o estudo da transferência de calor nos túneis. O uso da referida solução é justificado pelo fato de a mesma possuir ponto de fusão próximo a -112°C e não solidificar nas temperaturas de operação dos túneis, próximas de -38°C . Através de medidas da evolução temporal da temperatura do sistema tanque-solução e da aplicação do Método da Capacitância Térmica Concentrada, pôde-se determinar valores médios para os coeficientes de transferência de calor por convecção. Os resultados mostraram a presença de zonas preferenciais de escoamento do ar, através da existência de grandes variações nos valores dos coeficientes de transferência de calor convectivos em diferentes posições de um mesmo túnel de congelamento. Foram verificadas, por exemplo, variações de 40 a $281 \text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ em um mesmo túnel.

Palavras chaves: túneis semi-contínuos , transferência de calor, coeficientes convectivos, distribuição espacial do ar em túneis.

4.2 INTRODUÇÃO

O ar é usado como meio de resfriamento em muitas situações, como nos túneis de congelamento com circulação forçada. Deve-se analisar se o sistema permite uma distribuição espacial uniforme das velocidades do ar ao redor do produto e uma distribuição espacial uniforme do ar no interior do túnel de resfriamento/congelamento. Dentro deste contexto, qualquer que seja

o ramo de atividade, o controle do fluxo de ar é um ponto crítico em grandes plantas industriais (RESENDE et al., 2002a).

Os túneis de congelamento com circulação forçada de ar são baseados no princípio da transferência de calor por convecção, utilizando ar a alta velocidade (3 a 8 m/s) e baixa temperatura (-35 a -45°C), sendo construídos nas mais diferentes formas (PARDI et al., 2001; RESENDE et al., 2002a).

No congelamento de alimentos, o perfil de velocidade do ar ao redor do produto determina a eficiência e a homogeneidade dos tratamentos aos quais o produto está sendo submetido. O escoamento do ar é geralmente turbulento, com a transferência de calor do produto para o mesmo ocorrendo em regime transiente. Devido à forte variabilidade da velocidade do ar no espaço e no tempo, a sua medida é tida como um grande problema, mas indispensável na determinação da vazão e cálculos de transferência de calor (RESENDE et al., 2002a). Por esse motivo, é necessária a medida da velocidade média em numerosas regiões do túnel, o que é uma operação demorada e incompatível com a precisão necessária. O anemômetro a laser, utilizado para determinar o fluxo de ar em plantas industriais, é capaz de medir simultaneamente a magnitude e a direção dos vetores de velocidade, mas é muito caro, de utilização extremamente complexa e acima de tudo inadequada para grandes plantas (MIRADE e DAUDIN, 1998).

MIRADE e DAUDIN (1998) desenvolveram um método experimental rápido, preciso e barato para visualizar o fluxo de ar e a distribuição espacial das velocidades médias do ar em grandes plantas industriais de resfriamento de carnes através da utilização de um anemômetro medindo as velocidades do ar a intervalos de tempo regulares. Este método torna possível analisar com precisão o fluxo de ar e desenvolver diagnósticos para o funcionamento da planta estudada, mas a necessidade da utilização de anemômetros torna o mesmo limitado, como será discutido a seguir.

DAUDIN e VAN GERWEN (1996) resumiram as dificuldades relacionadas à medida de velocidade de ar em plantas produtoras de alimentos, como segue:

- A) o fluxo de ar é muito turbulento devido à presença de ventiladores e de obstáculos. Isto significa que a direção do ar e a velocidade variam rapidamente com o tempo e seus valores médios em um local são de difícil medição;

- B) a direção do fluxo de ar varia com a posição espacial do produto no túnel. Por conseguinte, anemômetros que são dependentes da direção do fluxo de ar não podem ser usados;
- C) a velocidade média do ar também varia rapidamente com a posição espacial no túnel. Conhecer o valor da velocidade em um ou vários pontos têm pouco significado, particularmente se não foi calculada a média em um longo período de tempo. Além disso, a velocidade do ar é, em algumas regiões do túnel, muito baixa e abaixo do limiar sensível de anemômetros comuns.

RESENDE et al. (2002a) citam ainda outra dificuldade. As baixas temperatura do ar são, em geral, muito diferentes daquela utilizada pelo fabricante para calibrar os anemômetros, que freqüentemente está em torno de 20°C.

O conhecimento dos coeficientes de transferência de calor ar-produto é absolutamente necessário para o projeto de equipamentos de congelamento, refrigeração e estocagem, ou para adaptar ou modificar condições de operação em unidades já existentes. Além disso, é essencial para predizer o tempo de processo e a perda de massa provocada pela evaporação ou sublimação da água na superfície do alimento (TOCCI e MASCHERONI, 1995). Dadas as dificuldades mencionadas acima, este trabalho teve como objetivos (i) o desenvolvimento de uma metodologia para a determinação de coeficientes de transferência de calor convectivos médios (\bar{h}) em túneis de congelamento semi-contínuos e (ii) a análise qualitativa e indireta da distribuição de velocidades do ar em cada um dos túneis através da determinação experimental de \bar{h} em diferentes posições dos mesmos.

4.3 MATERIAL E MÉTODOS

4.3.1 Montagem e instrumentação do dispositivo usado para a determinação de \bar{h}

O dispositivo consistia de um tanque de aço galvanizado completamente preenchido por uma solução anticongelante, na qual eram inseridos sensores de temperatura do tipo PT100. A montagem desse dispositivo foi realizada com a confecção de tanques de aço galvanizado: caixas fechadas e ocas com abertura central na superfície superior, para entrada de um sensor de temperatura, e no canto da caixa, também na superfície superior, para entrada do fluido anticongelante, como ilustrado na Figura 4.1.

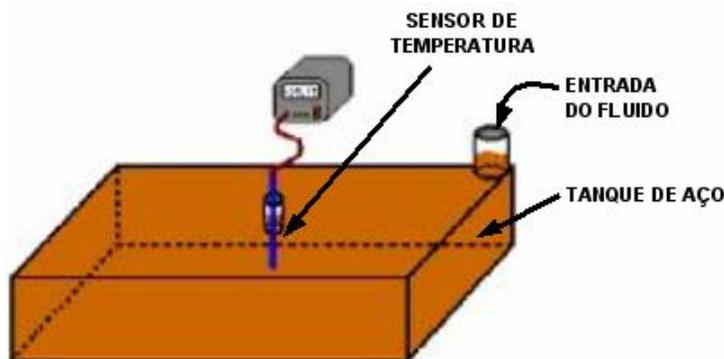


Figura 4.1. Tanque de aço galvanizado com o sensor de temperatura inserido no centro geométrico do sistema.

O aço foi o material escolhido por ter elevada condutividade térmica e facilidade de obtenção e manuseio ($k \simeq 43\text{W/m.K}$ a 27°C , INCROPERA e DEWITT, 2003). Por ser galvanizado, há a presença de uma fina película de zinco, cujo $k = 116\text{W/m.K}$ a 27°C (INCROPERA e DEWITT, 2003). Apesar de existirem materiais de condutividade térmica maior, optou-se pela utilização do aço galvanizado devido a questões econômicas e à facilidade de manuseio. Ainda segundo INCROPERA e DEWITT (2003), o calor específico do aço (c_{Ptq}) é de aproximadamente $0,444\text{ kJ/kg.K}$. Foram confeccionados 4 tanques com espessura da placa de aço de 2.10^{-3} m e volume interno de aproximadamente 7 litros (7.10^{-3} m^3). A Tabela 4.1 apresenta as dimensões e as características de cada tanque. Os tanques eram quase idênticos, mas algumas pequenas variações não puderam ser evitadas.

Tabela 4.1. Características dos tanques utilizados para os testes.

Nº DO TANQUE	DIMENSÕES (m)	ÁREA SUPERFICIAL EXTERNA TOTAL (m ²)	MASSA DO TANQUE VAZIO (kg)	MASSA DO TANQUE COM A SOLUÇÃO ALCOÓLICA (kg)
1	0,430x0,340x0,054	0,376	4,750	9,210
2	0,410x0,340x0,056	0,363	4,745	9,005
3	0,440x0,340x0,053	0,382	4,765	8,945
4	0,430x0,350x0,055	0,369	4,740	9,145

A solução alcoólica foi colocada nesses tanques, preenchendo-os completamente. Sua temperatura foi monitorada durante a permanência nos túneis e os dados registrados. A solução alcoólica utilizada foi o álcool etílico hidratado a 93,1 % (grau INPM), encontrado em postos de

combustível da Petrobrás. Essa solução foi escolhida porque se desejava uma solução que se mantivesse no estado líquido durante todo o teste. A solução alcoólica utilizada possui calor específico $c_p = 2,27 \pm 0,0981$ kJ/kg.K, o qual foi determinado experimentalmente através do Método Calorimétrico de Mistura (HENSE, 1990), e ponto de solidificação muito baixo ($T_{solidificação} \simeq -112^\circ\text{C}$, segundo PERRY e CHILTON, 1980). As mudanças nas propriedades termofísicas desse fluido a essa concentração podem ser consideradas desprezíveis quando este é submetido às temperaturas utilizadas em câmaras industriais de congelamento (aproximadamente -38°C), como foi verificado experimentalmente. Assim, pôde-se verificar a variação da temperatura da solução durante o seu resfriamento nos túneis.

A temperatura de todo o volume do tanque foi considerada homogênea e igual à temperatura medida pelo sensor. Assumiu-se que essa homogeneização foi provocada pelo movimento dos carrinhos que transportavam as embalagens dentro dos túneis. A confirmação dessa homogeneização poderá ser feita analisando-se a evolução da temperatura da solução durante o seu resfriamento, nos testes realizados. Os carrinhos sofriam movimentos bruscos a intervalos de tempos determinados. Como não foram verificadas variações bruscas na temperatura da solução, medida pelo sensor, considerar-se-á homogênea. Os dados necessários para a realização dos cálculos e determinação dos valores médios dos coeficientes convectivos de transferência de calor (\bar{h}) em cada posição do túnel foram as temperaturas do ar, da superfície externa do dispositivo e da solução nele contida, tendo-se conhecimento dos valores das massas e das propriedades termofísicas do fluido e do aço galvanizado, assim como as dimensões do tanque. Destes dados foi inferido o coeficiente convectivo médio de transmissão de calor para cada uma das posições dos tanques no interior dos túneis.

O Método da Capacitância Térmica Concentrada foi utilizado baseado no fato de a solução alcoólica sofrer uma mistura com o movimento dos carrinhos dentro do túnel. Com essa mistura, os gradientes internos de temperatura são eliminados, implicando em números de Biot próximos de zero.

4.3.2 *Obtenção de dados tempo/ temperatura*

Sensores portáteis do tipo PT-100 (marca Temprecord International Limited, modelo Multi-Trip, Nova Zelândia) foram utilizados para a medida das temperaturas da solução, do ar ao

redor de cada tanque e da superfície dos mesmos. Antes de serem utilizados, eles eram identificados e programados para registrar e armazenar os dados a cada intervalo de tempo de 2 minutos, para posterior leitura através de uma interface ligada a um microcomputador. A programação desses sensores e posterior leitura foi feita com o auxílio do software *TempRecord for Windows*. Na Figura 4.2 são apresentadas as fotos de um sensor e de uma interface.

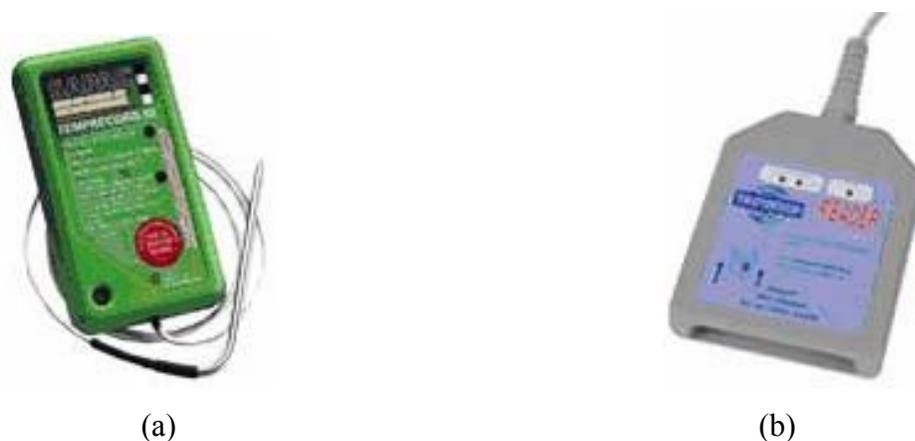


Figura 4.2. (a) Sensor de temperatura; (b) Interface para transferência dos dados para o computador.

Após a programação de cada sensor de temperatura, fez-se a fixação dos mesmos em 3 diferentes pontos do tanque. Foram utilizados três sensores de temperatura para cada tanque: um para a tomada da temperatura da solução alcoólica, outro para a verificação da variação da temperatura da placa (superfície externa do tanque) e outro para a tomada das temperaturas do ar.

4.3.3 Túneis de congelamento

Os testes foram realizados em sete túneis de congelamento com convecção de ar forçada, utilizados para congelamento de cortes de aves. Tratavam-se de túneis de congelamento semi-contínuos, onde o transporte dos produtos era feito com o auxílio de carrinhos. A disposição e a quantidade de ventiladores variava de túnel para túnel.

Os carrinhos utilizados para promover o transporte dos produtos dentro dos túneis eram feitos de material metálico, cujas grades serviam de apoio às diversas caixas de produtos a serem congelados. Cada carrinho possuía 9 níveis de altura, nos quais eram colocados os produtos. As dimensões dos carrinhos eram de 1,00 x 1,05 x 1,66 m, sendo a altura de 1,90 m quando se

consideram as rodas. A altura entre cada nível era de aproximadamente 0,18 m. Na Figura 4.3 é apresentado um esboço dos carrinhos usados para os testes, enquanto na Figura 4.4 é apresentado um esquema mostrando o sentido de movimentação dos mesmos nos túneis. Cabe lembrar que esses carrinhos eram completamente gradeados, ou seja, o ar poderia circular também na direção vertical.

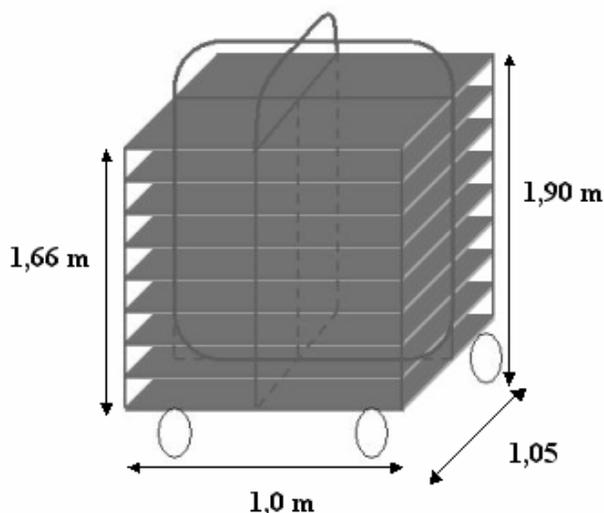


Figura 4.3. Esquema de um carrinho de 9 níveis.

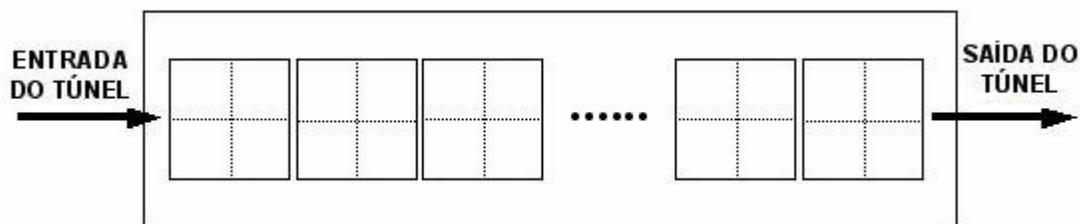


Figura 4.4. Esquema da disposição e sentido de movimentação dos carrinhos (total de 25) nos túneis (vista superior).

O movimento dos carrinhos ocorria sempre que se colocava um novo carrinho dentro do túnel, sendo que cada novo carrinho era responsável pela movimentação mecânica de todos os outros.

A cada carrinho que entrava no túnel, um era retirado com o produto congelado. Não havia espaço entre eles dentro dos túneis, pois estes sempre operavam em sua capacidade máxima, que era de 25 carrinhos, o que foi rigorosamente monitorado durante a realização dos testes. A velocidade média dos carrinhos era de aproximadamente 2,5 m/h, sendo o seu tempo de

residência nos túneis próximo a 10 horas. Como explicado anteriormente, a homogeneização da solução contida nos tanques era promovida pelos abalos sofridos a cada entrada de um novo carrinho no túnel.

Os túneis de congelamento possuíam temperatura de trabalho de -38°C .

4.3.3.1 Túneis de congelamento semi-contínuos A, B, C, D, E e F

Os túneis semi-contínuos A, B, C, D, E e F possuíam 25 metros de comprimento, nos quais se movimentavam os 25 carrinhos. Os dados referentes à localização, número e características principais dos ventiladores em cada um desses túneis podem ser visualizados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Características dos ventiladores nos túneis semi-contínuos.

TÚNEL SEMI-CONTÍNUO	NÚMERO	LOCALIZAÇÃO (VISTA FRONTAL)	DIÂMETRO (m)	POTÊNCIA (cv)
A	14	Lateral superior direita	0,90	3
B	21	Parte superior e lateral superior direita	0,90	3
C	14	Lateral superior direita	0,90	3
D	14	Lateral superior esquerda	0,90	3
E	14	Lateral superior esquerda	0,90	3
F	15	Lateral direita	0,70	2 e 3

Na Figura 4.5 são apresentados os desenhos esquemáticos dos túneis A a E e do túnel F, com a disposição dos ventiladores e dos carrinhos.

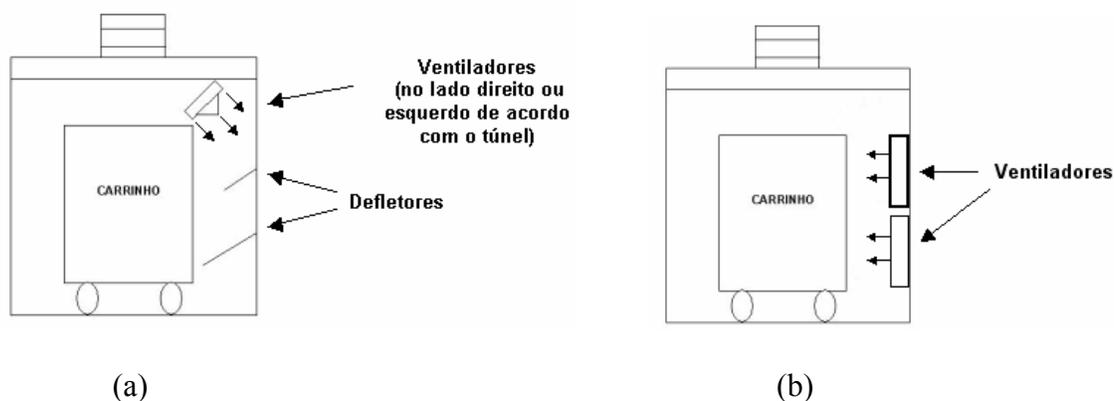


Figura 4.5. Esquema dos túneis semi-contínuos, vista frontal: (a) túneis A a E; (b) túnel F.

A área dos evaporadores era de 2210 m² nos túneis A, B, C e D; de 2491 m² no túnel E; e de 2027 m² no túnel F.

4.3.3.2 Túnel de congelamento semi-contínuo duplo (SD)

O túnel de congelamento duplo também tinha comprimento de 25 metros, mas sua capacidade era para 50 carrinhos, divididos em 2 grupos de 25 carrinhos, conforme esquematizado na Figura 4.6. Esses carrinhos eram dispostos da mesma maneira que nos outros túneis, ou seja, cada um em contato direto com o seu subsequente. Nesse túnel duplo cada trilho de carrinhos trabalhava independentemente, ou seja, cada metade do túnel tinha as suas portas de entrada e saída independentes. Por esse motivo, esse túnel foi dividido em dois. O trilho com carrinhos situados mais distantes dos ventiladores foi chamado de túnel SD1 e o situado mais próximo dos ventiladores foi denominado túnel SD2. Era chamado de duplo porque a circulação do ar em ambas as partes (metades) era provocada por 15 ventiladores localizados em apenas uma de suas laterais. Os ventiladores ali situados possuíam diâmetro de 0,90 m e potência de 3 e 4 cv.

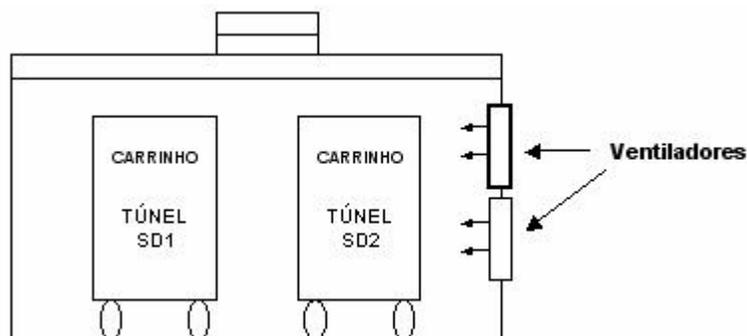


Figura 4.6. Esquema do túnel semi-contínuo duplo (vista frontal).

O túnel duplo também possuía temperatura de trabalho de -38°C e temperatura máxima de -28°C . A área dos evaporadores era de 2757 m².

4.3.4 Procedimento experimental

Para a realização dos experimentos os quatro tanques foram pesados e identificados. A massa de cada tanque é dada na Tabela 4.1. Em seguida, os tanques foram completamente

preenchidos com a solução alcoólica e novamente pesados para o cálculo da massa de solução. Os bocais de entrada do fluido no tanque foram posteriormente fechados e efetuou-se a inserção/fixação dos sensores de temperatura (já identificados e programados para leitura) no orifício central dos tanques. Outros dois sensores foram fixados de tal forma a medir e registrar as temperaturas do ar frio e da superfície externa do tanque.

Os quatro tanques foram colocados em um mesmo carrinho de nove níveis de altura (Figura 4.3), sendo dois dos tanques colocados no nível mais superior (altura mais elevada, N9) e os outros dois no nível mais inferior do carrinho (N1), de maneira a captar as variações de temperaturas em quatro condições/posições diferentes e específicas do túnel. O movimento dos carrinhos ocorria somente no eixo x, ilustrado na Figura 4.7. Em cada nível do carrinho cabiam quatro caixas. Os tanques foram colocados de uma forma que ficassem intercalados, em um mesmo nível, com as caixas de papelão contendo os produtos submetidos ao congelamento. Os níveis mais elevado (N9) e mais baixo (N1) de cada carrinho utilizado para o teste continham juntos um total de oito caixas, sendo quatro delas de aço galvanizado (tanques) com a solução alcoólica e quatro de produto. O produto em questão foi padronizado, sendo os outros níveis dos carrinhos preenchidos com o mesmo produto, para simular uma condição de congelamento próxima à real naqueles túneis. Escolheu-se como padrão o mesmo produto descrito no capítulo anterior deste trabalho, a asa de frango interfolhada com polietileno de baixa densidade (PEBD). Cada peça de asa tinha cerca de 120-180 g. As peças eram acomodadas em duas camadas dentro de cada caixa, num total de aproximadamente 15 kg por caixa. A altura de cada caixa era de 0,106 m, sendo de aproximadamente 0,074 m o espaço vazio entre a caixa e o nível superior do carrinho.

As posições dos tanques nos carrinhos (eixo z) e a posição dos sensores nos tanques são ilustradas na Figura 4.7, que mostra também o esquema da parte interna de um túnel semi-contínuo, onde os ventiladores se situam inclinados na lateral superior, voltados para os defletores, do lado direito (túneis A, B e C).

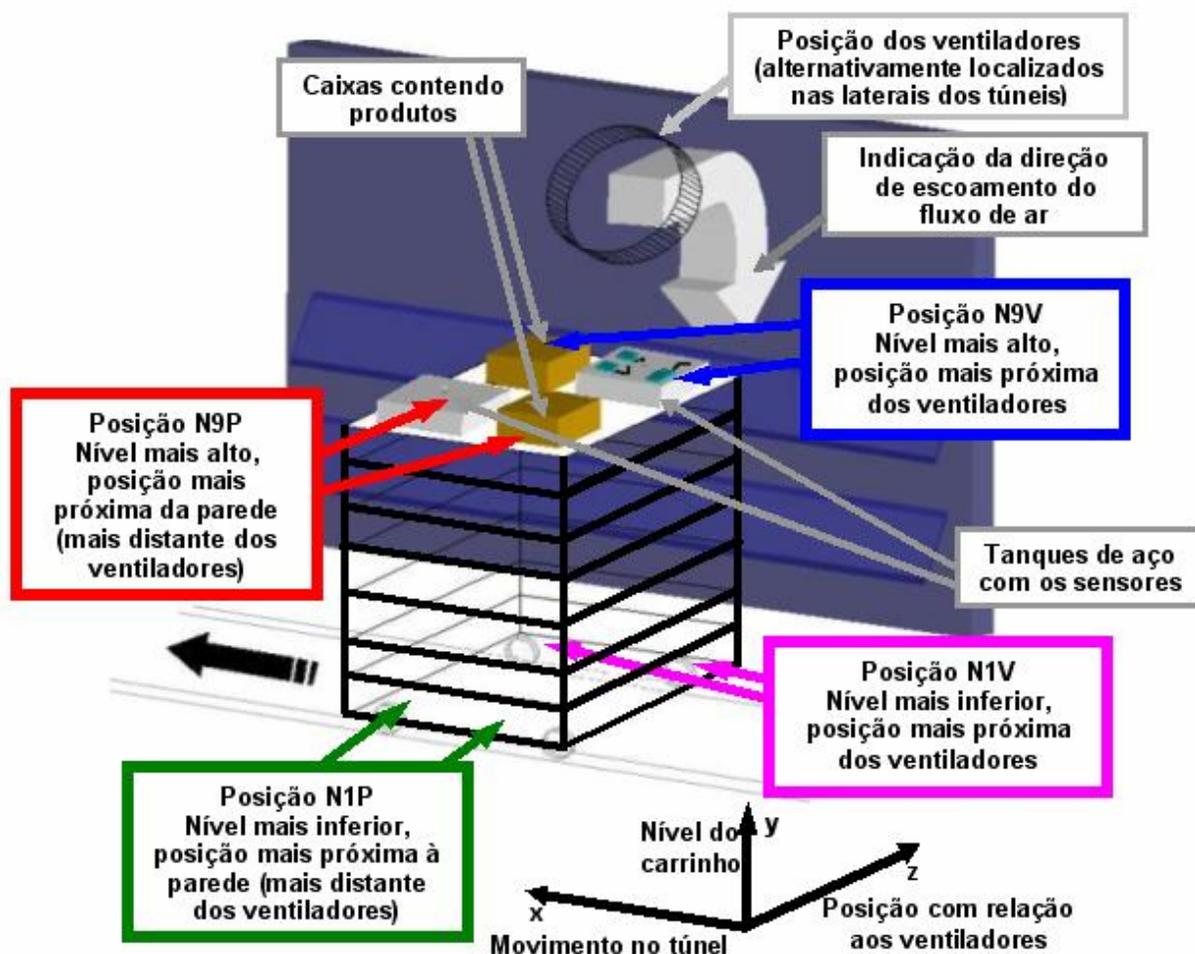


Figura 4.7. Disposição dos tanques e caixas no carrinho e dos sensores nos tanques.

Os carrinhos totalmente cheios foram colocados nos túneis, dando-se início às leituras das evoluções temporais das temperaturas. Os horários de entrada e saída dos testes foram monitorados.

As posições avaliadas para a leitura das variações de temperaturas foram escolhidas por representarem as posições, onde se pode obter os supostos valores máximo e mínimo dos coeficientes de transferência de calor convectivos (h) dentro desse tipo de túnel de congelamento, levando-se em conta as posições dos produtos. Com isso, calculou-se e estimou-se os valores de h médios (\bar{h}) obtidos em cada uma das quatro posições de cada túnel. O túnel semi-contínuo duplo foi analisado como se fossem dois túneis independentes, apesar da localização dos ventiladores

apenas de um lado do túnel. Após o término do teste, procedeu-se à leitura dos sensores e à análise dos resultados.

4.3.5 Determinação dos coeficientes convectivos de transferência de calor (h)

O Método da Capacidade Térmica Concentrada é aplicável quando a temperatura de um sistema é espacialmente uniforme em qualquer instante durante o processo de transferência de calor. Embora essa condição não seja nunca completamente satisfeita, ela é bem aproximada se a resistência à condução no interior do sólido for pequena comparada à resistência à transferência de calor entre o sólido e sua vizinhança (INCROPERA e DEWITT, 2003). Partindo desse princípio, algumas considerações foram feitas neste trabalho, com a finalidade de se aplicar esse método. A temperatura da placa (superfície do tanque) foi considerada homogênea em qualquer ponto de sua superfície. As propriedades termofísicas do ar e da solução alcoólica também foram consideradas constantes durante a realização dos ensaios.

Para a aplicação do Método da Capacidade Térmica Concentrada, a resistência térmica no interior do tanque deve ser desprezível, quando comparada com a resistência à transferência de calor entre o ar do túnel e a superfície externa do tanque. Isso é representado pelo número de Biot, dado pela Equação 4.1

$$\frac{T_{alc} - T_{tq}}{T_{tq} - T_{\infty}} = \frac{(L_c / kA)}{(1 / hA)} = \frac{R_{cond}}{R_{conv}} = \frac{hL_c}{k} = Bi < 0,1 \quad (4.1)$$

Os valores T_{alc} , T_{tq} e T_{∞} correspondem às temperaturas da solução alcoólica, da superfície do tanque e do ar, respectivamente. L_c é o comprimento característico do tanque (metade da sua menor espessura); k é a condutividade térmica correspondente à solução e ao tanque e h é o coeficiente convectivo de transferência de calor do tanque para o ar. O valor de R_{cond} corresponde à resistência à transferência de calor condutiva e R_{conv} à resistência à transferência de calor convectiva.

Se o número de Biot for inferior a 0,1, considera-se que praticamente toda a diferença de temperatura ocorre entre o tanque e o ar que o circunda (ASHRAE, 1998; GEANKOPLIS, 1993; INCROPERA e DEWITT, 2003). Assim, considerou-se que durante os ensaios de resfriamento,

as temperaturas do tanque e da solução nele contida evoluíram de modo homogêneo, o que também foi confirmado experimentalmente.

Realizando-se um balanço de energia no tanque, pode-se determinar experimentalmente os valores do coeficiente convectivo médio de transferência de calor (\bar{h}) em cada posição dentro do túnel. Assim, pode-se escrever que:

$$q_{tq} + q_{álc} = \bar{h}A_s(T_{tq} - T_{\infty}) \quad (4.2)$$

Na Equação 4.2, q_{tq} e $q_{álc}$ são as taxas de transferência de calor perdidas pelo tanque e pela solução alcoólica, respectivamente, e A_s é a área de superfície de troca térmica do tanque. Os valores de q_{tq} e $q_{álc}$ podem ser obtidos pelas Equações 4.3 e 4.4.

$$q_{tq} = \frac{m_{tq}c_{p_{tq}}(T_f - T_i)_{tq}}{\Delta t} \quad (4.3)$$

$$q_{álc} = \frac{m_{álc}c_{p_{álc}}(T_f - T_i)_{álc}}{\Delta t} \quad (4.4)$$

Os valores de m_{tq} e $m_{álc}$ correspondem às massas do tanque vazio e da solução alcoólica; $c_{p_{tq}}$ e $c_{p_{álc}}$ são os calores específicos do material constituinte do tanque e da solução alcoólica; T_f e T_i são as temperaturas final e inicial, respectivamente, para um dado intervalo de tempo de ensaio (10 min). Esse intervalo foi escolhido de modo a ser suficiente para se medir uma variação de temperatura com precisão. Por outro lado, o mesmo não deve ser muito grande, de modo a modificar significativamente o valor da força motriz ($T_{tq} - T_{\infty}$). O valor médio dessa diferença foi usado no cálculo de \bar{h} pela Equação 4.6. Substituindo-se as Equações 4.3 e 4.4 na Equação 4.2, tem-se:

$$\frac{(mc_p \Delta T)_{tq}}{\Delta t} + \frac{(mc_p \Delta T)_{álc}}{\Delta t} = \bar{h}A_s(T_{tq} - T_{\infty}) \quad (4.5)$$

ou, explicitando \bar{h} ,

$$\bar{h} = \frac{m_{tq} c_{p_{tq}} \Delta T_{tq} + m_{alc} c_{p_{alc}} \Delta T_{alc}}{A_s (T_{tq} - T_{\infty}) \Delta t} \quad (4.6)$$

A disposição dos sensores após a fixação nos tanques fez com que uma parte da área superficial do tanque (equivalente a 3 vezes a área de face de cada sensor) ficasse praticamente indisponível para a troca térmica durante o teste. Dessa maneira, o valor da área de superfície de troca térmica (A_s) de cada tanque utilizado nos cálculos foi obtido descontando-se a área de 3 faces do sensor de temperatura (total de 0,03 m²).

4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados de temperaturas utilizadas para os cálculos de \bar{h} foram aqueles obtidos a partir do momento em que as portas dos túneis já se encontravam fechadas e a temperatura do ar ao redor do tanque, lida pelo sensor, já era constante ou sofria apenas pequenas flutuações. As temperaturas foram lidas em intervalos de 2 minutos, até que a temperatura da solução se tornasse constante e igual à temperatura do ar. Os valores de h foram calculados para cada intervalo de 10 minutos, suficientes para se verificar variações sensíveis na temperatura da solução alcoólica. Os testes foram feitos em duplicata para cada uma das 4 posições analisadas em cada túnel, e os valores de \bar{h} foram obtidos a partir da média aritmética de todos os valores de h dos experimentos realizados em duplicata.

O tempo de cada teste era limitado pela taxa de resfriamento da solução contida no tanque. Quando T_{tq} se aproximava muito de T_{∞} , as variações de T_{tq} eram muito pequenas, assim como os valores da diferença ($T_{tq} - T_{\infty}$). Os dados obtidos nessas condições não foram usados nos cálculos de h . Dessa forma, o mapeamento dos valores experimentais dos coeficientes convectivos de transferência de calor nas diferentes posições dos túneis pôde ser feito somente em uma parte inicial do comprimento total do mesmo. Esse comprimento avaliado variou com cada túnel.

Analisando-se os túneis de acordo com a semelhança entre si na disposição e características dos ventiladores, pôde-se agrupá-los para realizar a comparação entre os resultados. Os túneis A, C, D e E eram semelhantes, pois possuíam 14 ventiladores de 0,9 m de diâmetro e 3 cv, dispostos de forma inclinada em uma das laterais superiores dos mesmos, onde havia também 2 defletores por todo o comprimento dos túneis. Primeiramente foram analisados os túneis A e C, com ventiladores na lateral superior direita. Os gráficos contendo os respectivos valores de \bar{h} são dados nas Figuras 4.8 e 4.9. Os valores de \bar{h} foram calculados pela média aritmética dos valores de h determinados nos diferentes períodos dos ensaios. As dispersões observadas podem estar associadas com as considerações de meio completamente misturado ($Bi = 0$) e com o uso de diferenças médias de temperatura para a transferência de calor por convecção. Além disso, observou-se a ocorrência de flutuações macroscópicas na circulação de ar nos túneis. Isso implica que os coeficientes convectivos de transferência de calor locais também variam com o tempo, em uma dada posição fixa no interior dos túneis. Assim, a comparação dos valores de h deve ser realizada através dos valores médios.

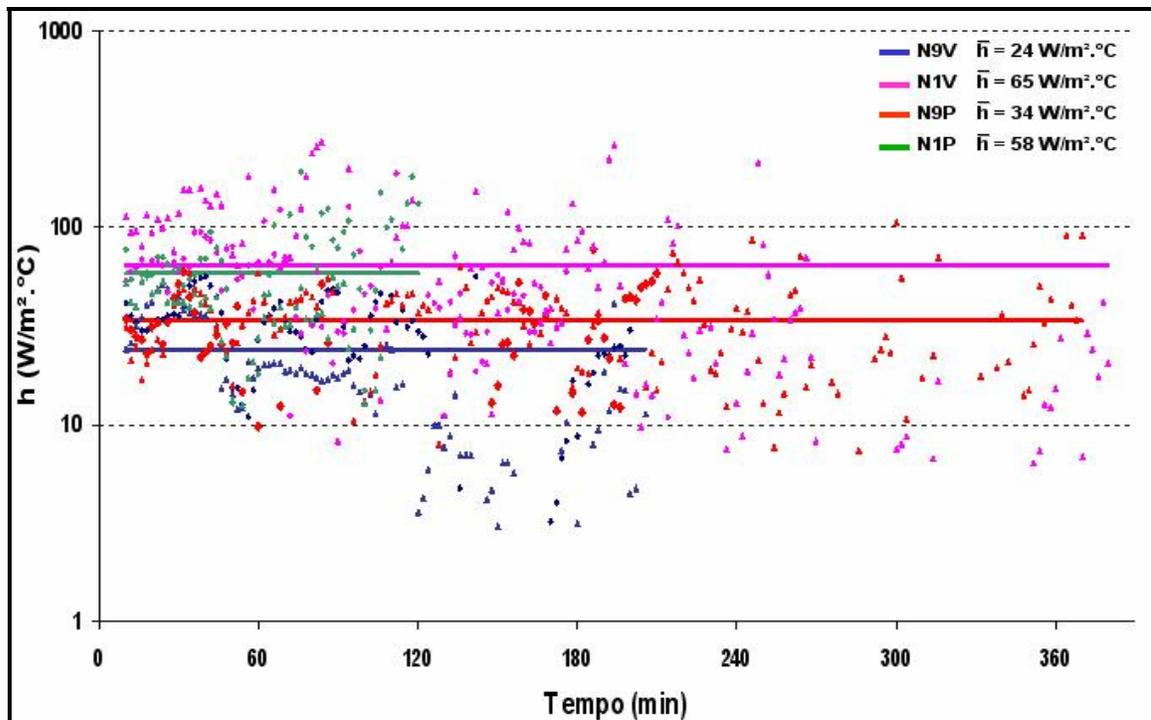


Figura 4.8. Valores de \bar{h} nas 4 diferentes posições analisadas no túnel A.

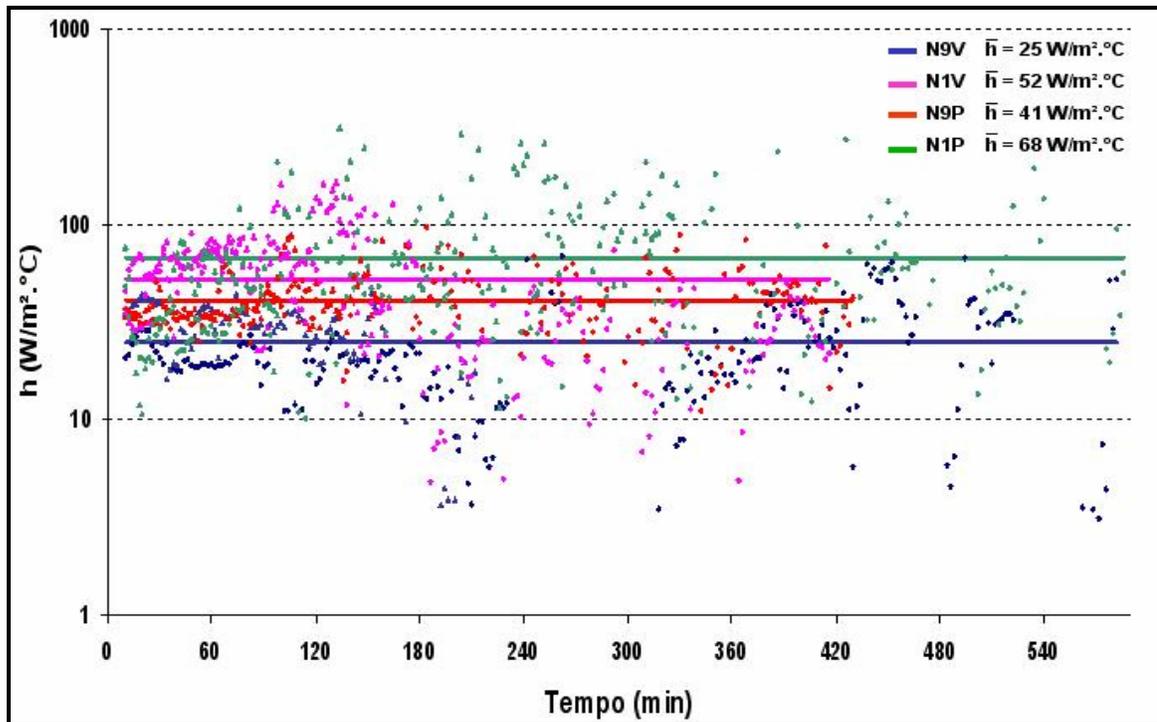


Figura 4.9. Valores de \bar{h} nas 4 diferentes posições analisadas no túnel C.

Os túneis semi-contínuos A e C não demonstraram ter problemas com a distribuição de velocidades do ar, ou seja, os valores de \bar{h} não tiveram grandes variações com a posição dentro dos mesmos. No túnel A foram obtidos valores que variaram de 24 W/m².°C na posição N9V (Figura 4.8) a 65 W/m².°C na posição N1V, enquanto no túnel C, os valores de \bar{h} variaram de 25 W/m².°C na posição N9V a 68 W/m².°C na posição N1P. Apesar da pequena amplitude dos \bar{h} obtidos em um mesmo túnel, observou-se que as duas posições situadas no nível mais elevado do carrinho (N9V e N9P) nos túneis A e C foram relativamente prejudicadas pela formação de caminhos preferenciais de escoamento do ar na parte inferior do mesmo. Supõe-se que isso possa ter ocorrido devido à incorreta inclinação dos ventiladores ou à presença de defletores com ângulos de inclinação inadequados.

Analisando-se os túneis D e E, com ventiladores dispostos na lateral superior esquerda, pôde-se verificar variações de até 1 ordem de grandeza nos valores de \bar{h} . Os resultados podem ser visualizados nas Figuras 4.10 e 4.11.

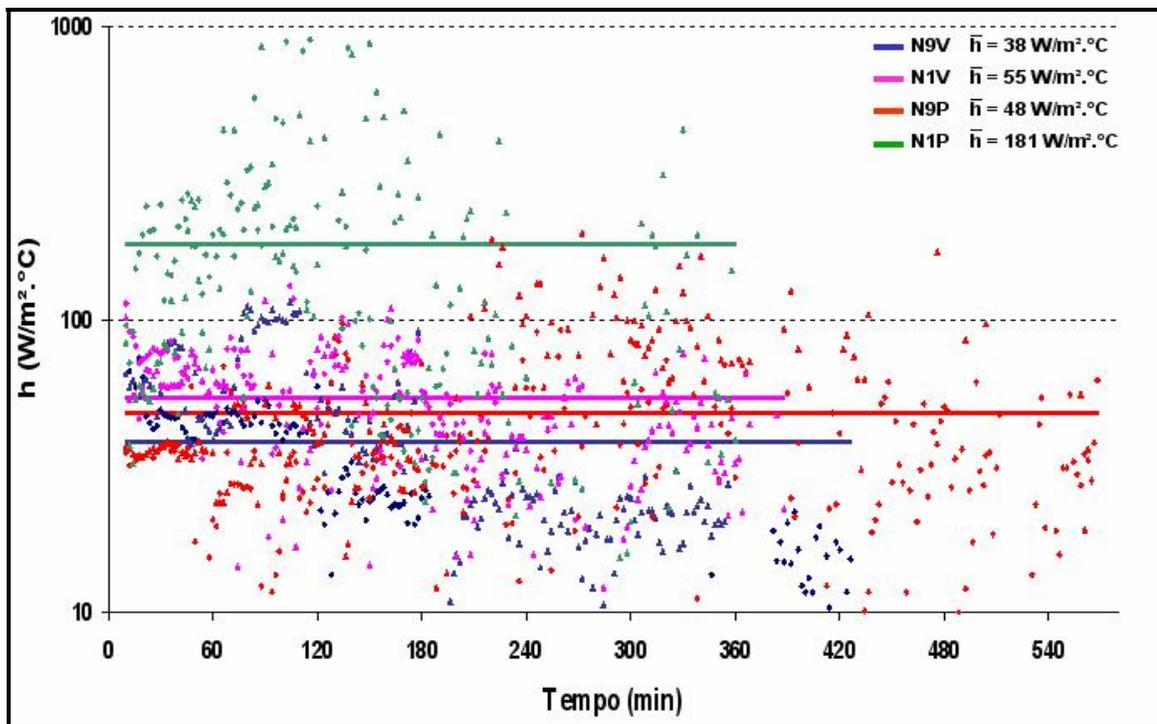


Figura 4.10. Valores de \bar{h} nas 4 diferentes posições analisadas no túnel D.

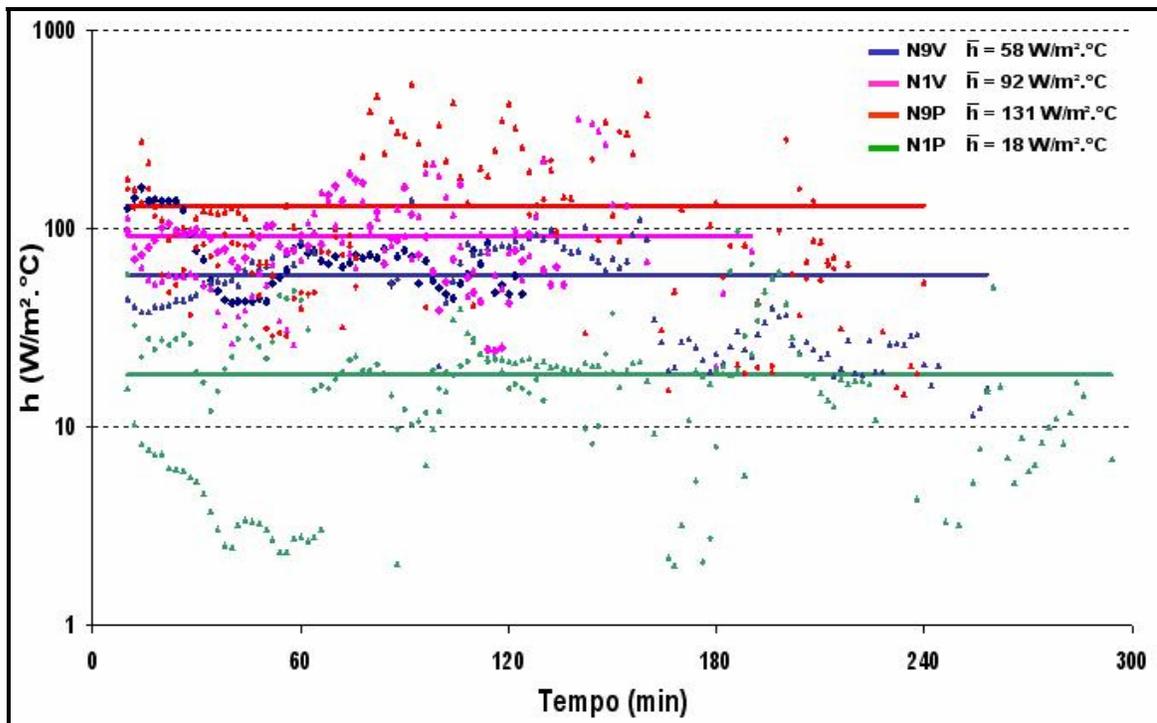


Figura 4.11. Valores de \bar{h} nas 4 diferentes posições analisadas no túnel E.

No túnel D, a posição mais beneficiada pela existência de canais preferenciais de escoamento do ar foi a posição N1P, com valor de \bar{h} igual a 181 W/m².°C, conforme pode ser observado na Figura 4.10. Os valores de \bar{h} calculados a partir dos dados obtidos nas outras posições foram semelhantes entre si, mas bem inferiores, variando de 38 W/m².°C na posição N9V a 55 W/m².°C na posição N1V. Supõe-se, através da análise das Figuras 4.7 e 4.10, que a direção do fluxo de ar no túnel D possa ter promovido a sua passagem pelos ventiladores e defletores, incidindo preferencialmente sobre o tanque na posição N1P devido à posição dos defletores nas paredes laterais. Soma-se a isso uma suposta inclinação incorreta dos mesmos, resultando na grande variação dos valores de \bar{h} encontrados.

Por outro lado, a mesma posição beneficiada no túnel D (N1P) foi a que teve o menor valor de \bar{h} no túnel E, conforme se observa na Figura 4.11. O valor de \bar{h} nessa posição foi de 18 W/m².°C, mais de 7 vezes menor que na posição mais beneficiada pela formação de canais preferenciais do ar no mesmo túnel (N9P). Os 4 valores de \bar{h} tiveram variações consideráveis no túnel E. Na posição N1P, o \bar{h} calculado foi cerca de 3 vezes menor que na posição N9V, e 5 vezes menor que na posição N1V.

No túnel F, com ventiladores situados em uma de suas laterais, conforme Figura 4.5b, o valor de \bar{h} na posição N1V foi consideravelmente maior (281 W/m².°C) que nas outras posições, chegando a quase 8 vezes o valor de \bar{h} nas outras posições, que não variaram muito entre si (Figura 4.12). Apesar disso, os valores encontrados em todas as 4 posições estão dentro do intervalo citado por autores como HOLMAN (1983), INCROPERA (2003) e TOLEDO (1999) para gases sob convecção forçada. Uma hipótese que pode explicar os resultados obtidos é a de que os ventiladores não estavam bem distribuídos ao longo da parede, localizando-se preferencialmente na metade inferior da altura da mesma. Dessa forma, o fluxo de ar incidia diretamente sobre o tanque experimental localizado na posição mais inferior do carrinho, próxima aos ventiladores (N1V).

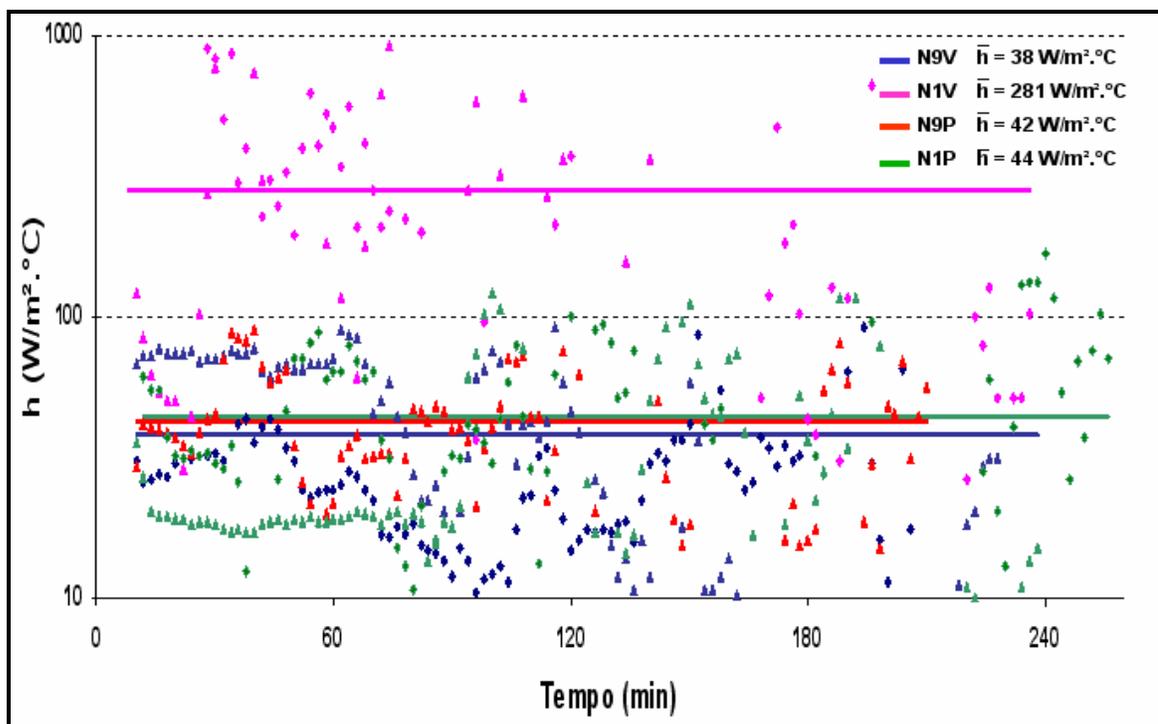


Figura 4.12. Valores de \bar{h} nas 4 diferentes posições analisadas no túnel F.

No túnel B, os valores experimentais de \bar{h} variaram pouco nas 4 posições, como mostra a Figura 4.13. As posições situadas do lado oposto dos ventiladores, N1P e N9P, estão relacionados aos maiores valores de \bar{h} . Esses valores foram próximos entre si (63 e 69 W/m².°C, respectivamente), da mesma forma que aqueles encontrados nas posições mais próximas dos ventiladores (37 W/m².°C em N9V e 40 W/m².°C em N1V). Apesar da presença de 21 ventiladores situados lateralmente e na parte superior do túnel, os valores de \bar{h} foram semelhantes aos obtidos nos outros túneis. Isso significa que o aumento do número de ventiladores e a variação de sua disposição ao longo do túnel reforçam a distribuição de velocidades do ar, o que diminui a heterogeneidade das temperaturas dos produtos ao final do processo de congelamento.

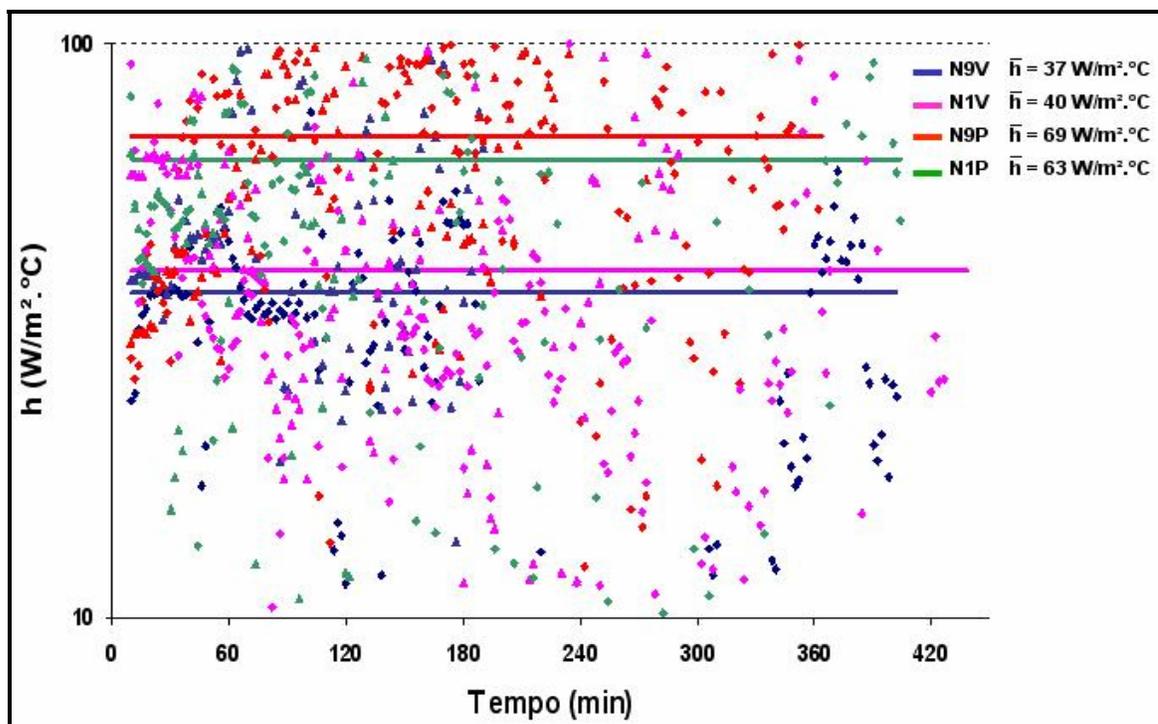


Figura 4.13. Valores de \bar{h} nas 4 diferentes posições analisadas no túnel B.

O túnel SD1, que faz parte do túnel semi-contínuo duplo (SD), foi analisado separadamente do túnel SD2, já que o fluxo de carrinhos no mesmo independe do fluxo no SD2. Convém lembrar que os ventiladores que geram a circulação forçada de ar no túnel SD1 localizam-se na parede lateral do túnel SD2, não havendo nenhuma divisória entre as duas partes do túnel, conforme esquematizado na Figura 4.6. Os resultados obtidos para o túnel SD1 demonstraram um possível caminho preferencial do ar (relativo ao mesmo túnel) na localização N9V, ou seja, na parte central (entre os dois trilhos de carrinhos) e superior do túnel duplo. Os valores obtidos para cada posição podem ser visualizados na Figura 4.14. Conforme se observa, na posição superior mais próxima do centro do túnel duplo o valor de \bar{h} chegou a ser quase 5 vezes maior que nas outras 3 posições.

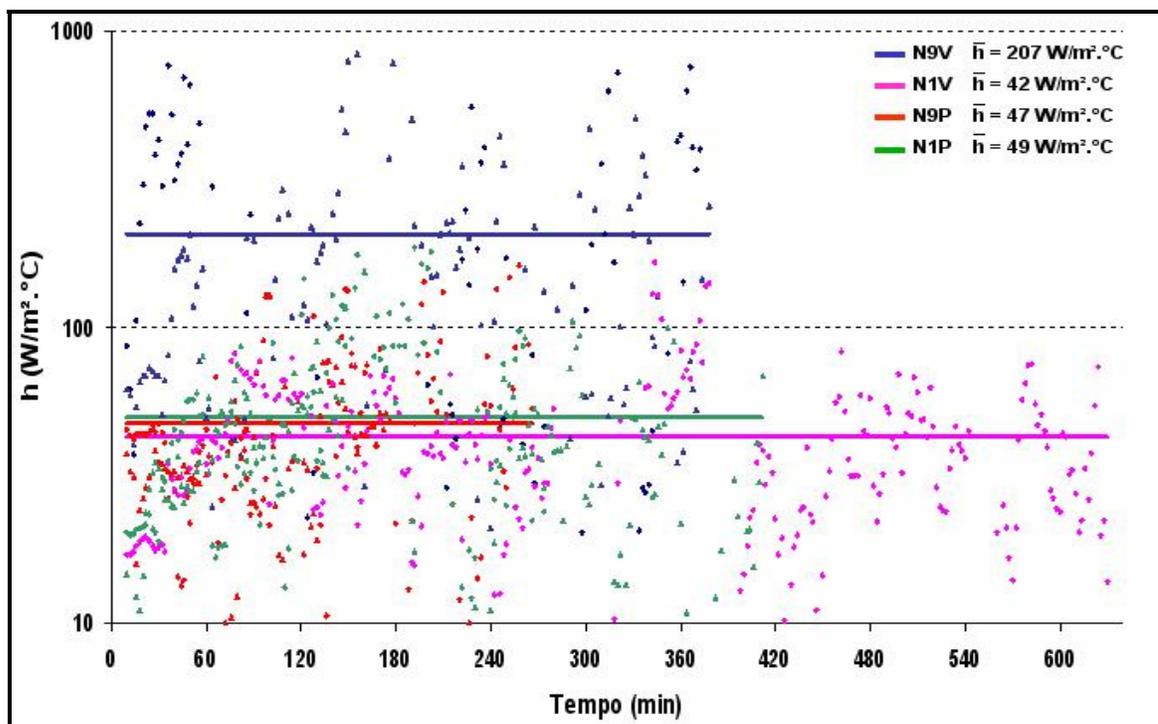


Figura 4.14. Valores de \bar{h} nas 4 diferentes posições analisadas no túnel SD1.

No túnel SD2 (Figura 4.15), a posição mais beneficiada pela presença de caminhos preferenciais do ar foi a posição superior, lado oposto dos ventiladores (N9P). Os resultados confirmaram o que já foi observado na análise do túnel SD1, apesar de que neste, o valor de \bar{h} (207 W/m².°C) foi cerca de 3 vezes maior que no túnel SD2 (66 W/m².°C), na posição mais beneficiada (parte central e superior do túnel duplo). Os 4 valores dos coeficientes obtidos experimentalmente no túnel SD2 mostraram que a distribuição de velocidades do ar é homogênea nessa parte (metade) do túnel duplo, já que a variação dos coeficientes foi relativamente pequena, diferentemente do que ocorre em SD1.

Pode-se concluir que, no túnel duplo, os ventiladores situados em uma das laterais promovem uma adequada distribuição de velocidades do ar em SD2, mas não são eficientes o suficiente para impedir a formação de canais preferenciais de escoamento de ar em SD1.

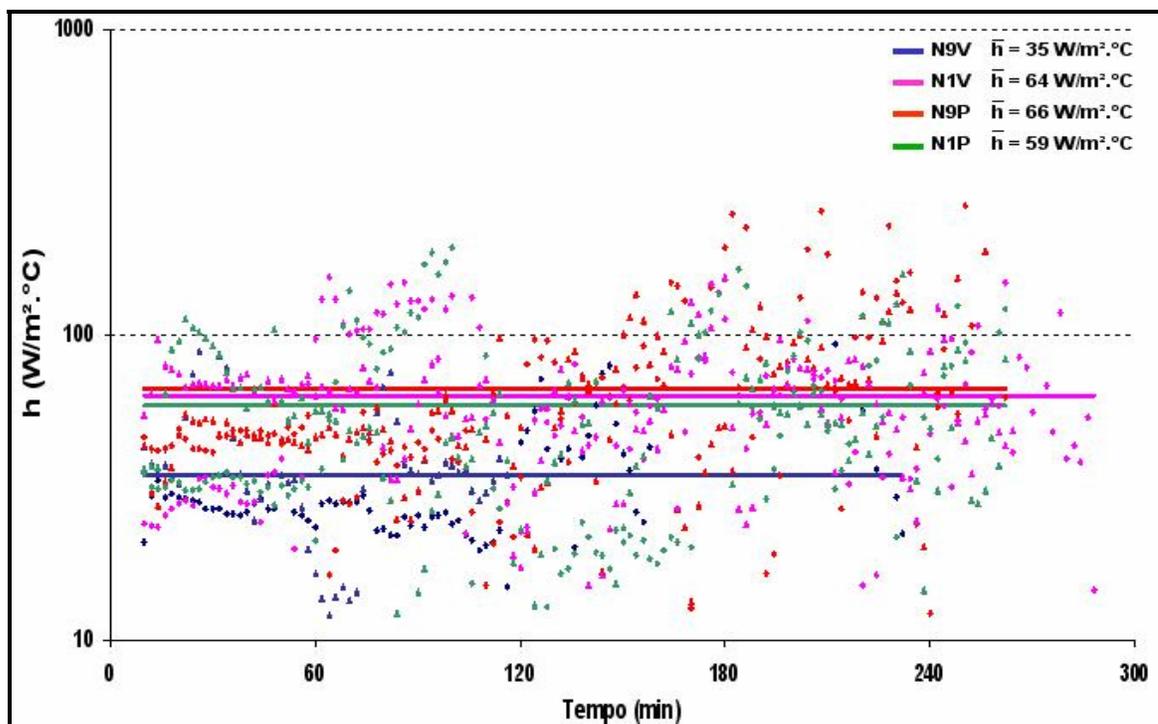


Figura 4.15. Valores de \bar{h} nas 4 diferentes posições analisadas no túnel SD2.

Os resultados obtidos para os valores de \bar{h} em cada túnel podem ser vistos na Tabela 4.3. Eles foram coerentes com os dados existentes na literatura. A variação desses valores, existente dentro de um mesmo túnel e quando se comparou dois ou mais túneis, ocorreu devido à formação de canais preferenciais de escoamento do ar. Isso é acarretado pela incorreta disposição e inclinação dos defletores, pelo inadequado ângulo de inclinação de ventiladores e pelo excesso de produtos nos carrinhos, impedindo o fluxo de ar entre os produtos. Vale enfatizar que os dados obtidos sobre a heterogeneidade de distribuição de velocidades do ar a partir da utilização da metodologia desenvolvida neste trabalho foram comparados com as taxas de congelamento de produtos alimentícios (padronizados para os testes) nas mesmas posições, com a finalidade de se verificar esses resultados. Naquelas posições onde o \bar{h} obtido era muito menor do que nas outras, o produto levava mais tempo para congelar, ocorrendo o contrário nas posições onde \bar{h} era maior, como era de se esperar.

Tabela 4.3. Valores de \bar{h} obtidos experimentalmente.

TÚNEIS	VALORES DE \bar{h} (W/m ² .°C)			
	POSIÇÃO PRÓXIMA AOS VENTILADORES		POSIÇÃO OPOSTA AOS VENTILADORES	
	NÍVEL SUPERIOR	NÍVEL INFERIOR	NÍVEL SUPERIOR	NÍVEL INFERIOR
A	24	65	34	58
B	37	40	69	63
C	25	52	41	68
D	38	55	48	181
E	58	92	131	18
F	38	281	42	44
SD1	207	42	47	49
SD2	35	64	66	59

Ressalta -se que não foi possível a verificação indireta da distribuição do fluxo do ar ao longo de todo o comprimento do túnel, devido à não colocação dos tanques a partir de um ponto intermediário do mesmo. Para este estudo, a distribuição dos valores de \bar{h} foi considerada constante ao longo do comprimento, o que certamente poderia ocorrer se os ventiladores tivessem uma distribuição homogênea e as serpentinas e defletores estivessem sempre limpas e bem distribuídas ao longo do túnel. Como se tratou de um trabalho desenvolvido em uma planta industrial, os resultados obtidos foram utilizados para o mapeamento dos túneis. Várias mudanças já foram implementadas, através do aumento do número de ventiladores e da modificação da disposição dos mesmos em alguns túneis, com resultados muito satisfatórios. Porém, com essa metodologia pode-se apenas constatar valores de \bar{h} , sem, entretanto, predizer o seu valor com a modificação dos parâmetros do túnel.

4.5 CONCLUSÃO

A metodologia empregada neste trabalho, cujo princípio é a utilização de um dispositivo montado para a aplicação do Método da Capacidade Térmica Concentrada, mostrou ser uma técnica alternativa ao procedimento tradicional para a avaliação das medidas dos coeficientes de transferência de calor convectivos e para o estudo da homogeneidade do escoamento do ar. A técnica permitiu uma estimativa da distribuição das velocidades do ar em túneis de congelamento semi-contínuos, por meio de experimentos simples, o que possibilitou a detecção de problemas

existentes provavelmente devido à má disposição dos ventiladores. Analisou-se as distribuições dos valores experimentais dos coeficientes convectivos de transferência de calor, \bar{h} , nas diferentes posições dos túneis, o que permitiu inferir sobre as variações nas distribuições de velocidades do ar nos mesmos. Os túneis de congelamento SD1, D, E e F possuíam heterogeneidades relativamente grandes em seu interior, quanto à capacidade de resfriamento/congelamento, com valores de \bar{h} variando, em alguns casos, em mais de 7 vezes.

Os resultados dos testes serviram para fazer um mapeamento dos túneis e para verificar se havia algum problema no que diz respeito à disposição dos ventiladores e à formação de caminhos preferenciais de escoamento do ar. Dessa forma, a metodologia aqui desenvolvida demonstrou ser adequada à avaliação e quantificação dos valores experimentais dos coeficientes convectivos de transferência de calor em túneis de congelamento semi-contínuos, estendendo-se também a túneis automáticos. O dispositivo desenvolvido demonstrou ser uma alternativa ao uso de anemômetros, já que se trata de uma maneira diferente de se qualificar as “velocidades do ar”, podendo ajudar especialistas a obter o diagnóstico dos fluxos de ar em grandes plantas industriais.

CAPÍTULO 5

Este capítulo é apresentado sob a forma de artigo científico. A análise da resistência térmica de embalagens de papelão utilizadas durante o congelamento industrial de cortes de aves e outros produtos é realizada de forma empírica. Valores de resistência térmica efetiva foram obtidos com boa reprodutibilidade através da realização de quatro experimentos.

TÍTULO: ESTUDO EMPÍRICO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA EFETIVA DE EMBALAGENS DE PAPELÃO ONDULADO

5.1 RESUMO

Utilizando-se do dispositivo apresentado no capítulo 4 para a determinação experimental dos coeficientes de transferência de calor convectivos em túneis de congelamento com convecção de ar forçada, foi possível determinar e quantificar experimentalmente a resistência térmica efetiva de embalagens de papelão ondulado utilizadas comercialmente (R_{efet_pap}). Para isso, foram utilizados dois tanques de aço galvanizado preenchidos com solução de álcool etílico a 93,1% em massa. Um deles teve a sua superfície totalmente recoberta com papelão ondulado, utilizado como embalagem secundária de cortes de aves submetidos ao congelamento. Os dois tanques, inicialmente à mesma temperatura, foram colocados em um túnel de congelamento semi-contínuo com convecção de ar forçada. Através da comparação entre as medidas da evolução temporal da temperatura do sistema tanque-solução (Sistema 1) com as do sistema papelão-tanque-solução (Sistema 2), pôde-se determinar experimentalmente os valores médios da resistência térmica efetiva do papelão ondulado. Os resultados foram reprodutíveis e demonstraram que a metodologia utilizada foi adequada para a determinação das resistências térmicas totais de cada sistema e da resistência térmica efetiva do papelão ondulado estudado. O valor estimado desta última foi de 0,277 °C/W, com desvio padrão de 0,042 °C/W.

Palavras chaves: resistência térmica, papelão ondulado, taxa de resfriamento.

5.2 INTRODUÇÃO

A embalagem dos alimentos durante o processo de congelamento faz-se necessária para evitar a desidratação pelo frio, com conseqüentes alterações na cor, textura, sabor e valor nutricional do produto (SILVA, 2000). Conforme citam RESENDE et al. (2003), o processo de congelamento de alimentos dentro de caixas com grandes quantias de produto pode ser muito

complexo em situações industriais. Durante o congelamento de cortes de aves interfolhadas embaladas em caixas de papelão ondulado, por exemplo, observa-se a presença de várias “barreiras” que interferem no tempo de congelamento do produto, como já foi discutido no capítulo 3. Estudando-se isoladamente cada caixa, pode-se identificar as diferentes resistências térmicas à transferência de calor do produto para o ar frio, como mostra a Figura 3.6 do capítulo 3. Para a avaliação qualitativa da resistência térmica devida somente à espessura e ao material da embalagem secundária, pode-se realizar uma comparação entre a evolução temporal das temperaturas no centro térmico do produto embalado em caixas de papelão com a evolução temporal das temperaturas no centro térmico do mesmo produto embalado em caixa teladas de aço inoxidável, como foi feito nos experimentos do capítulo 3. O valor da resistência térmica da caixa, neste caso, é de difícil determinação. A uniformidade da temperatura inicial do produto antes de ser submetido ao processo de congelamento, bem como a homogeneidade da composição do mesmo, não é totalmente garantida. Além disso, há a possibilidade da existência de bolsas de ar ou bolhas cheias de gás dentro do produto e das embalagens, e os produtos podem ter forma e tamanho irregulares (RESENDE et al., 2003). Há ainda o fato de que grandes variações nos coeficientes de transferência de calor convectivos possam ocorrer em diferentes posições do produto no túnel, como já foi discutido no capítulo 4. Faz-se necessária, então, uma avaliação sobre a interferência da embalagem de papelão no tempo de congelamento dos produtos sem que haja a interferência da composição desses produtos e de sua localização nos túneis. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo a avaliação quantitativa da resistência térmica efetiva da embalagem de papelão ondulado através da comparação entre as resistências térmicas totais de dois sistemas montados com base nos dispositivos desenvolvidos no capítulo 4 deste trabalho.

5.3 MATERIAL E MÉTODOS

5.3.1 Montagem e instrumentação dos dispositivos usados para a determinação de R_{efet_pap}

O dispositivo esquematizado na Figura 4.1 do Capítulo 4 foi utilizado neste estudo, sendo chamado de Sistema 1. Um segundo dispositivo, Sistema 2, foi montado da mesma forma, mas a área superficial externa do tanque foi totalmente recoberta por uma camada de papelão ondulado.

A espessura (L) do papelão ondulado utilizado era de 2.10^{-3} m. Os dados sobre o calor específico (c_p) e a condutividade térmica (k) do papelão foram encontrados na literatura disponível, sendo o $c_p=1,254$ kJ/kg.K (ASHRAE, 1989), e o valor do $k=0,064$ W/m.K (HOLMAN, 1983). A massa (m) de papelão necessária para o recobrimento do tanque foi de 0,199 kg.

Foram utilizados os tanques 1 e 3, os mesmos empregados nos testes do capítulo 4, sendo este último o que recebeu o recobrimento de papelão ondulado. Ambos tinham espessura de placa de aço de 2.10^{-3} m e volume interno de aproximadamente 7,17 litros ($7,17.10^{-3}$ m³). As dimensões e as características de cada tanque são apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Características dos tanques utilizados para os testes.

Nº DO TANQUE	DIMENSÕES (m)	ÁREA SUPERFICIAL EXTERNA TOTAL DO TANQUE (m ²)	MASSA DO TANQUE VAZIO (kg)	MASSA DE SOLUÇÃO ALCOÓLICA (kg)
1	0,430x0,340x0,054	0,376	4,750	4,460
3	0,440x0,340x0,053	0,382	4,765	4,180

O calor específico (c_p) do aço galvanizado usado na confecção dos tanques era de 0,444 kJ/kg.K (INCROPERA e DEWITT, 2003).

Os tanques tiveram os seus volumes internos totalmente preenchidos pela solução alcoólica, cuja temperatura deveria ser monitorada durante a permanência dos tanques nos túneis. Foi utilizado álcool etílico hidratado a 93,1 % (grau INPM), mesma solução utilizada nos experimentos descritos no capítulo 4. Como a sua temperatura de solidificação era muito abaixo da temperatura de trabalho dos túneis ($T_{solidificação} \simeq -112^{\circ}\text{C}$, segundo PERRY e CHILTON, 1980), as propriedades termofísicas desse fluido foram consideradas constantes. O seu calor específico, determinado experimentalmente através do Método Calorimétrico de Mistura (HENSE, 1990), foi de $2,27 \pm 0,0981$ kJ/kg.K.

A temperatura de todo o volume dos dispositivos foi considerada homogênea e igual à temperatura medida pelo sensor no centro térmico da solução. Essa homogeneização foi provocada pelo movimento dos carrinhos que transportavam as embalagens dentro dos túneis, desconsiderando-se, dessa forma, os gradientes internos de temperatura. As evoluções temporais das temperaturas da referida solução em cada um dos tanques durante o seu resfriamento nos

túneis foram usadas para o cálculo da resistência térmica total de cada um dos sistemas montados.

Os dados necessários para a realização dos cálculos e determinação dos valores médios das resistências térmicas totais foram as temperaturas do ar, da superfície externa do dispositivo e da solução nele contida, tendo-se como conhecidos as massas e as propriedades termofísicas do fluido, do aço galvanizado e do papelão, bem como as dimensões do tanque. Destes dados foi inferida a resistência térmica total de cada sistema, através do qual pôde ser obtida a resistência térmica efetiva do papelão ondulado.

5.3.2 Obtenção de dados tempo/ temperatura

Sensores portáteis do tipo PT-100 (marca Temprecord International Limited, modelo Multi-Trip, Nova Zelândia) foram utilizados. Os sensores eram previamente identificados e programados para registrar e armazenar os dados a cada intervalo de tempo de 2 minutos, para posterior leitura através de uma interface ligada a um microcomputador. A programação desses sensores e posterior leitura foi feita com o auxílio do software *TempRecord for Windows*. Na Figura 5.1 são apresentadas as fotos de um sensor e de uma interface.

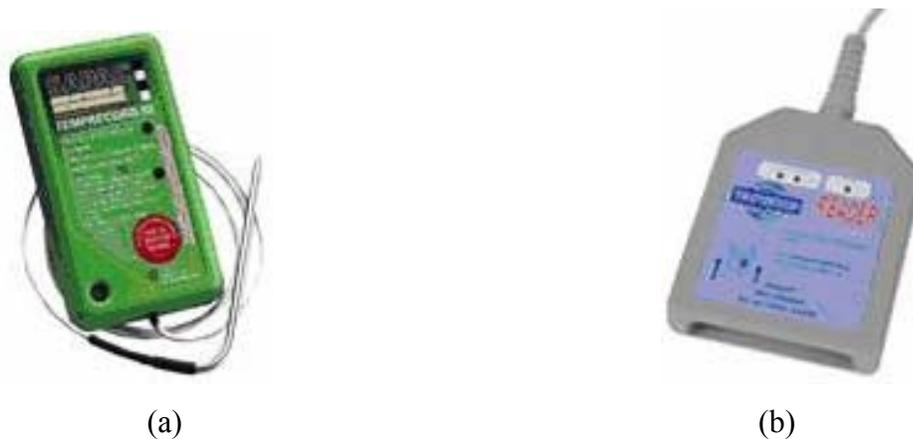


Figura 5.1. (a) Sensor de temperatura; (b) Interface para transferência dos dados para o computador.

Após a programação de cada sensor de temperatura, fez-se a fixação dos mesmos em 3 diferentes pontos do tanque, de modo a captar as variações de temperatura do fluido, da superfície do sistema e do ar.

5.3.3 Túneis de congelamento

Os testes foram realizados em túneis de congelamento semi-contínuos, onde o transporte dos produtos era feito com o auxílio de carrinhos, como já foi discutido no capítulo 4. Foram usados os túneis E, SD1 e SD2.

Os testes foram realizados no nível mais elevado dos carrinhos, nível 9 (N9). A posição de cada dupla de tanques variou: nos túneis E e SD1, os dois sistemas foram colocados na posição mais próxima dos ventiladores (N9V), enquanto no túnel SD2 foram posicionados mais distantes dos mesmos (N9P).

5.3.4 Procedimento experimental

Os tanques 1 e 3 foram pesados e identificados, sendo suas massas dadas na Tabela 5.1. O tanque 3 foi totalmente recoberto com papelão ondulado, deixando-se à mostra somente o bocal de entrada do fluido e o orifício para a inserção do sensor de temperatura, conforme esquematizado na Figura 5.2..

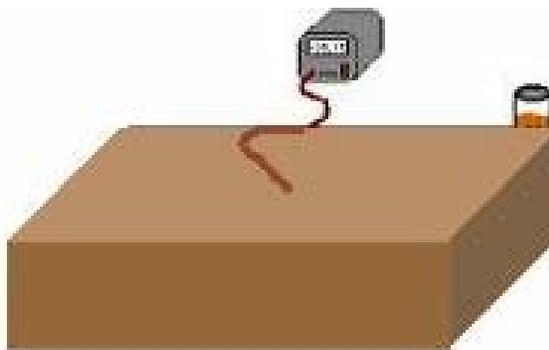


Figura 5.2. Tanque de aço galvanizado (tanque 3) totalmente recoberto com papelão ondulado (Sistema 2) e com o sensor de temperatura inserido em seu centro geométrico.

Esse tanque foi novamente pesado, obtendo-se assim a massa de papelão utilizada.

Em seguida, os tanques foram completamente preenchidos com a solução alcoólica e novamente pesados para o cálculo da massa de solução. Os bocais no tanque foram posteriormente fechados e efetuou-se a inserção/fixação dos sensores de temperatura (já identificados e programados para leitura) no orifício central dos tanques. Outros dois sensores foram fixados de tal forma a medir e registrar as temperaturas do ar frio e da superfície externa de cada sistema.

Diferentemente dos testes realizados para a determinação dos valores experimentais de h (capítulos 4), os carrinhos necessários para o transporte dos tanques dentro dos túneis já se encontravam no interior dos mesmos antes do início de cada teste. Os dois dispositivos foram colocados, um a um, em um mesmo carrinho de nove níveis de altura (Figura 4.3 do capítulo 4), no nível mais elevado, em uma mesma posição. Todos os outros níveis e posições já continham caixas de asa de frango interfolhada, mesmo produto padronizado e utilizado nos experimentos dos capítulos 3 e 4. De um total de 25 carrinhos em 25 metros de comprimento, foi escolhida a posição do oitavo carrinho a partir da entrada do túnel, a aproximadamente 8 metros da mesma. Isso garantiu uma maior homogeneidade da temperatura do ar, que não sofreria tantas oscilações decorrentes da abertura de portas e da elevada carga térmica inicial dos produtos. Isso permitiu resultados mais rápidos e precisos.

Foram realizados quatro experimentos, em datas diferentes, em três túneis de congelamento semi-contínuos. Os dois primeiros experimentos foram efetuados no túnel E, enquanto os outros dois foram feitos nos túneis SD2 e SD1, respectivamente. A posição dos tanques nos carrinhos é esquematizada na Figura 5.3.

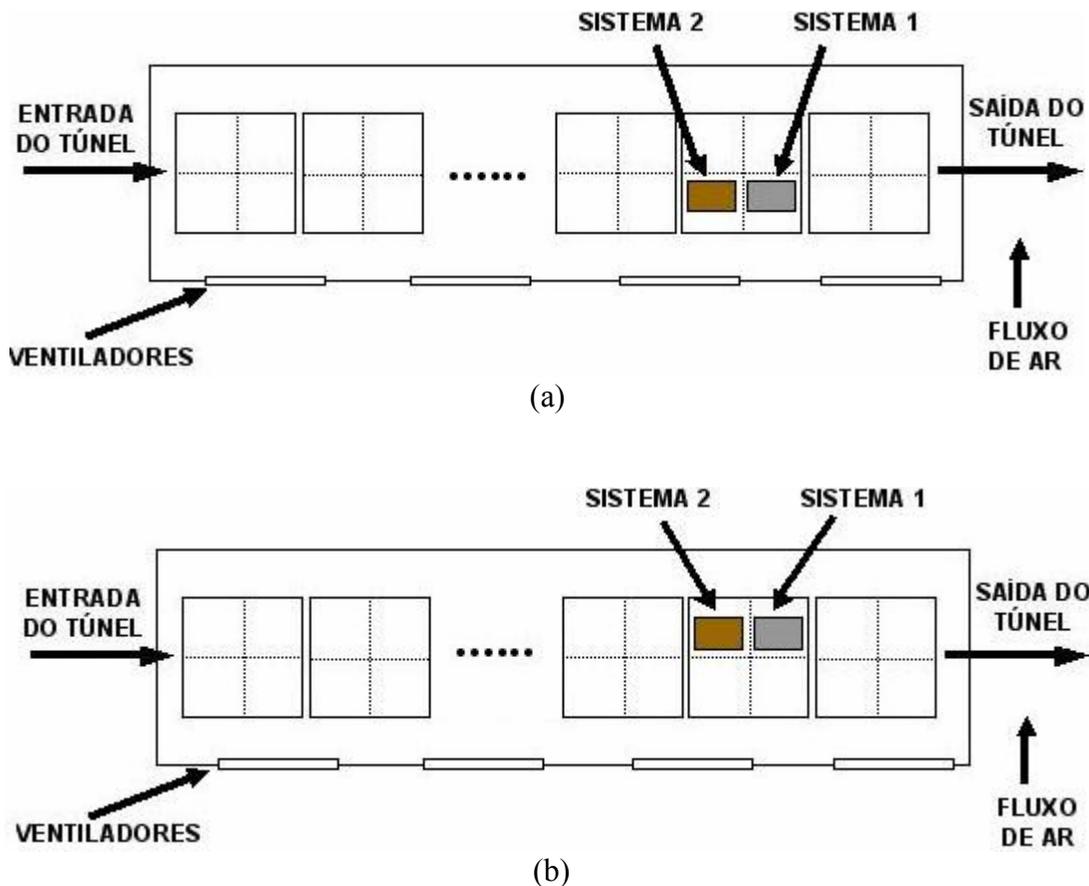


Figura 5.3. Esquema geral da disposição dos tanques no carrinho dentro dos túneis, vista superior. (a) túneis E (1º e 2º teste) e SD1; (b) túnel SD2.

Os horários de entrada e saída dos tanques foram monitorados. O tempo total de cada experimento era determinado pelo tempo de retenção dos produtos nos 17 metros de comprimento restantes dos túneis, cerca de 7 horas.

Após o término do teste, procedeu-se à leitura dos sensores e à análise dos resultados.

5.3.5 Determinação da resistência térmica efetiva do papelão ondulado

A taxa de transferência de calor através dos sistemas estudados pode ser obtida em termos da diferença de temperatura total ($T_{alc} - T_{ar\ frio}$) e da resistência térmica total do mesmo ($\sum R$), como segue

$$q = \frac{T_{\acute{a}lc} - T_{arfrio}}{\sum R} \quad (5.1)$$

Partindo-se desse princípio, tendo-se como conhecidos as evoluções temporais das temperaturas das soluções alcoólicas dentro dos tanques, da superfície externa dos dois sistemas e do ar em torno dos mesmos, foi possível estimar valores da resistência térmica total de cada um dos sistemas a partir de cálculos da taxa de transferência de calor através dos mesmos. Explicitando $\sum R$, tem-se

$$\sum R = \frac{T_{\acute{a}lc} - T_{arfrio}}{q} \quad (5.2)$$

Com os valores da resistência térmica total de cada sistema, pôde-se determinar a resistência térmica efetiva do papelão ondulado. Todos os cálculos envolvidos nessa determinação são detalhados a seguir. Cabe ressaltar que o fluxo de calor através dos dispositivos utilizados foi considerado, para simplificar os cálculos, como unidimensional em uma parede plana. Isso pode ser justificado pelo fato de que a área de uma das superfícies dos tanques usados nos experimentos era cerca de 6,3 vezes maior do que a área das outras duas superfícies, e o comprimento do tanque era aproximadamente 8 vezes maior do que a espessura do mesmo, o que pode ser verificado pelos dados contidos na Tabela 5.1.

O circuito térmico equivalente representa o número de resistências térmicas envolvidas em um sistema, tais como paredes compostas, sendo que essas resistências podem estar associadas tanto em série quanto em paralelo. O fluxo de calor através do Sistema 1, bem como o circuito térmico equivalente a ele relacionado, podem ser visualizados na Figura 5.4.

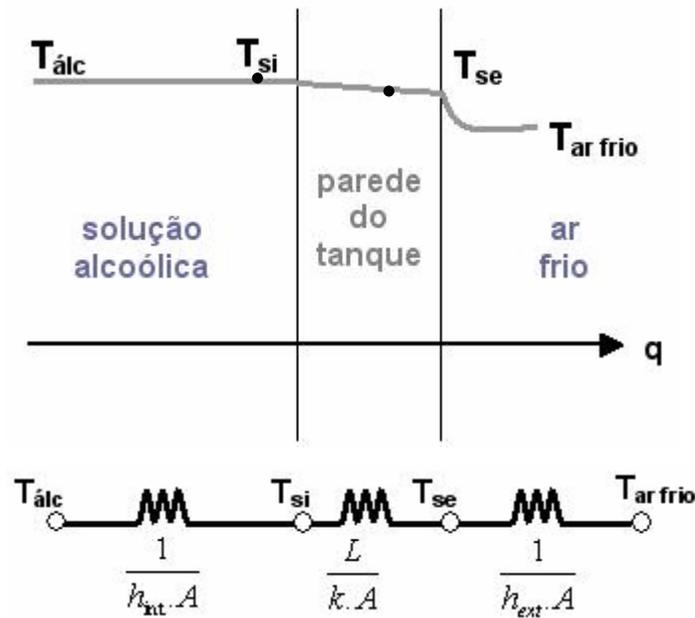


Figura 5.4. Transferência de calor através de uma das faces do Sistema 1. Distribuição de temperaturas e circuito térmico equivalente.

A transferência de calor neste sistema ocorre por convecção da solução alcoólica ($T_{\text{álc}}$) para a superfície interna do tanque (T_{si}), por condução através da parede do mesmo e por convecção da parede externa do tanque (T_{se}) para o ar frio ($T_{\text{ar frio}}$). Considerou-se (confirmando-se posteriormente) que a solução alcoólica era constantemente homogeneizada, ou seja, completamente misturada, não havendo gradientes de temperatura internos, como já foi discutido anteriormente. Dessa forma, a temperatura da superfície interna do tanque, bem como em qualquer outro ponto dentro do tanque foi considerada igual à temperatura medida pelo sensor no centro da solução ($T_{\text{álc}}$).

Como as resistências térmicas envolvidas (convectiva e condutiva) estão associadas em série, a resistência térmica total pode ser obtida através do somatório das resistências individuais, como segue

$$R_{\text{total1}} = \sum R_i = \left(\frac{1}{h_{\text{int}} A} + \frac{L}{k A_{\text{tq}}} + \frac{1}{h_{\text{ext}} A} \right)_1 \quad (5.3)$$

Os termos k e h são a condutividade térmica do tanque (aço) e o coeficiente de transferência de calor convectivo, respectivamente, L é a espessura da parede do tanque e A é a área normal à direção do fluxo de calor. A resistência térmica total através do Sistema 1 também pode ser obtida em termos da taxa de transferência de calor através da parede e da diferença de temperatura total ($T_{\acute{a}lc} - T_{ar\ frio}$),

$$\sum R_1 = \frac{(T_{\acute{a}lc} - T_{ar\ frio})_1}{q_1} \quad (5.4)$$

Como a solução contida no tanque foi apenas resfriada, houve variação da temperatura da solução sem mudança de fase. Dessa forma, tem-se

$$q_1 = \frac{m_1 c_{p1} \Delta T_1}{\Delta t} \quad (5.5)$$

em que q_1 é a taxa de transferência de calor do Sistema 1, m é a massa do sistema, c_p o seu calor específico e ΔT a variação da temperatura. Como se trata de um sistema composto pelo tanque e pela solução, a Equação 5.5 fica na forma

$$q_1 = \frac{\left[(m_{tq} c_{p_{tq}} \Delta T_{tq})_1 + (m_{\acute{a}lc} c_{p_{\acute{a}lc}} \Delta T_{\acute{a}lc})_1 \right]}{\Delta t} \quad (5.6)$$

Devido ao fato de a espessura da placa de aço que constitui o tanque ser muito pequena (2.10^{-3} m) e de o aço ser um material altamente condutivo ($k \simeq 43$ W/m.K a 27°C , segundo INCROPERA e DEWITT, 2003, e HOLMAN, 1983), desconsiderou-se os gradientes de temperatura através da espessura da parede. Dessa forma, a variação da temperatura da placa (ΔT_{tq}) no intervalo de tempo Δt foi considerada como a variação da temperatura da superfície externa do tanque (ΔT_{se}), medida pelo sensor. A Equação 5.6 fica então

$$q_1 = \frac{\left[\left(m_{iq} c_{p_{iq}} \Delta T_{se} \right)_1 + \left(m_{\acute{a}lc} c_{p_{\acute{a}lc}} \Delta T_{\acute{a}lc} \right)_1 \right]}{\Delta t} \quad (5.7)$$

Como os cálculos foram realizados para intervalos de tempo pré-definidos, tem-se

$$\Delta T_{\acute{a}lc1} = \left(T_{(t=0)} - T_{(t=\Delta t)} \right)_{\acute{a}lc1} \quad (5.8)$$

e

$$\Delta T_{se1} = \left(T_{(t=0)} - T_{(t=\Delta t)} \right)_{se1} \quad (5.9)$$

Substituindo-se a Equação 5.7 na Equação 5.4 e considerando-se uma força motriz média para a transferência de calor, no intervalo de tempo Δt ,

$$\left(T_{\acute{a}lc} - T_{ar} \right)_1 = \frac{\left(T_{\acute{a}lc} - T_{ar} \right)_{1(t=0)} + \left(T_{\acute{a}lc} - T_{ar} \right)_{1(t=\Delta t)}}{2} \quad (5.10)$$

pôde-se calcular os valores da resistência térmica total do Sistema 1 para cada experimento.

O Sistema 2 foi montado para se estimar o valor médio da resistência térmica total do tanque envolto pelo papelão ondulado. Porém, devido à resistência térmica de contato entre o papelão e o tanque de aço, o valor da resistência térmica do papelão ondulado (R_{pap}) equivale ao somatório da resistência térmica de contato com a resistência térmica do papelão, e foi chamada de resistência térmica efetiva do papelão (R_{efet_pap}). Na Figura 5.5 apresenta-se o circuito térmico relacionado ao Sistema 2.

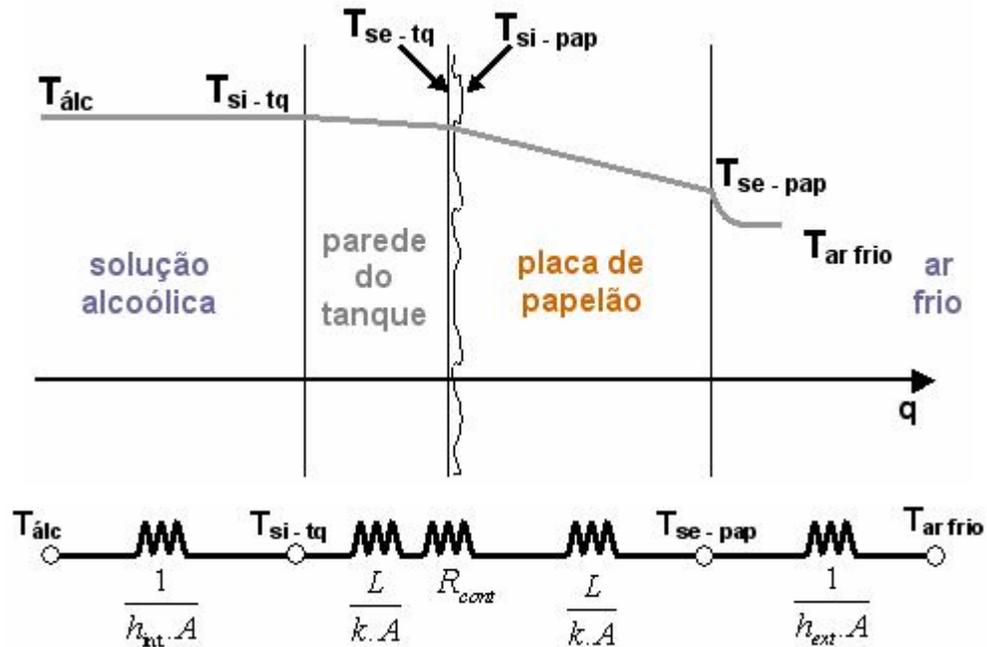


Figura 5.5. Transferência de calor através de uma das faces do Sistema 2 e a distribuição de temperatura.

A resistência térmica total do sistema pode ser obtida através do somatório das resistências individuais,

$$R_{total2} = \sum R_2 = \left(\frac{1}{h_{int} A} + \frac{L_{tq}}{k_{tq} A_{tq}} + R_{cont} + \frac{L_{pap}}{k_{pap} A_{pap}} + \frac{1}{h_{ext} A} \right)_2 \quad (5.11)$$

A resistência térmica total foi calculada em termos de diferença de temperatura total, como segue

$$\sum R_2 = \frac{(T_{álc} - T_{arfrio})_2}{q_2} \quad (5.12)$$

Da mesma forma que no Sistema 1, a taxa de transferência de calor foi calculada analisando-se o resfriamento da solução alcoólica contida no tanque, como mostra a Equação 5.13.

$$q_2 = \frac{m_2 c_{p2} \Delta T_2}{\Delta t} = \frac{\left(m_{tq} c_{p_{tq}} \Delta T_{tq} + m_{\acute{a}lc} c_{p_{\acute{a}lc}} \Delta T_{\acute{a}lc} + m_{pap} c_{p_{pap}} \Delta T_{pap} \right)_2}{\Delta t} \quad (5.13)$$

Como a espessura da placa de aço era muito pequena e sua superfície externa não estava em contato direto com o ar frio, a variação da temperatura do tanque (ΔT_{tq}) foi considerada igual à variação da temperatura da solução ($\Delta T_{\acute{a}lc}$). Isso também foi feito porque não foram colocados sensores de temperatura entre o tanque e o papelão, para evitar que houvesse grandes variações na resistência térmica de contato entre esses dois materiais. Assim, a Equação 5.13 pode ser dada por

$$q_2 = \frac{\left(m_{tq} c_{p_{tq}} \Delta T_{\acute{a}lc} + m_{\acute{a}lc} c_{p_{\acute{a}lc}} \Delta T_{\acute{a}lc} + m_{pap} c_{p_{pap}} \Delta T_{pap} \right)_2}{\Delta t} \quad (5.14)$$

As variações das temperaturas da solução alcoólica ($\Delta T_{\acute{a}lc}$) foram calculadas a partir da Equação 5.15, sendo $T_{\acute{a}lc}$ a temperatura medida pelo sensor colocado na solução.

$$\Delta T_{\acute{a}lc2} = \left(T_{(t=0)} - T_{(t=\Delta t)} \right)_{\acute{a}lc2} \quad (5.15)$$

Para o cálculo de ΔT_{pap} seriam necessárias as evoluções temporais das temperaturas das superfícies interna e externa do papelão. Como só a sua temperatura externa foi monitorada, assumiu-se uma média entre a temperatura medida em sua superfície externa e a temperatura da solução alcoólica, a cada intervalo de tempo Δt . Assim, a variação da temperatura do papelão no intervalo de tempo Δt foi calculada pela Equações 5.16.

$$\Delta T_{pap2} = \left(T_{(t=0)} - T_{(t=\Delta t)} \right)_{pap2} = \left[\left(\frac{T_{(t=0)se-pap} + T_{(t=0)\acute{a}lc}}{2} \right) - \left(\frac{T_{(t=\Delta t)se-pap} + T_{(t=\Delta t)\acute{a}lc}}{2} \right) \right]_2 \quad (5.16)$$

Com as Equações 5.15 e 5.16, calculou-se q_2 pela Equação 5.14.

Tendo-se calculado o valor de q_2 , foi possível obter a resistência térmica total do Sistema 2 através da utilização da Equação 5.10 para o mesmo sistema,

$$\sum R_2 = \frac{(T_{\acute{a}lc} - T_{arfrio})_2}{q_2} = \frac{(T_{\acute{a}lc} - T_{arfrio})_{2(t=0)} + (T_{\acute{a}lc} - T_{arfrio})_{2(t=\Delta t)}}{2} \quad (5.17)$$

Dessa forma, foram calculados $\sum R_1$ e $\sum R_2$ a cada Δt . Assim, a resistência térmica efetiva do papelão pôde ser obtida também para cada Δt fazendo-se

$$\sum R_2 - \sum R_1 = R_{pap} + R_{contato(pap-tq)} = R_{efetiva_pap} \quad (5.18)$$

A resistência térmica efetiva média em cada um dos quatro experimentos, \bar{R}_{efet_pap} , pôde ser obtida através da média aritmética dos valores de R_{efet_pap} .

Cabe ressaltar que antes da realização dos cálculos, foi feita uma análise prévia das temperaturas do ar medidas pelo sensor ao redor de cada tanque, já que os dois sistemas não foram colocados nos túneis em um mesmo momento. Essas temperaturas foram plotadas em um gráfico. Como os dois dispositivos deveriam sofrer as mesmas influências das condições do ambiente para que pudessem ser comparados, as temperaturas do ar ao redor de cada sistema foram igualadas através da verificação de pequenos picos. Estipulou-se como tempo inicial real de cada teste ($t = 0$) o momento em que os dois tanques já se encontravam nos túneis e sofriam as mesmas variações das condições ambientes, com a temperatura do ar constante.

5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As temperaturas da solução, da superfície de cada sistema e do ar foram lidas pelos sensores em intervalos de tempo de 2 minutos. Os valores das resistências térmicas totais foram calculados para cada intervalo de 10 minutos, suficientes para se verificar variações sensíveis na temperatura da solução alcoólica.

O tempo real dos experimentos foi limitado pela taxa de resfriamento da solução contida no tanque não recoberto pelo papelão (Sistema 1). Essa solução atingia a temperatura de equilíbrio com o ar do túnel mais rapidamente do que a solução do Sistema 2, como era de se esperar. Quando $T_{álc1}$ se aproximava muito de $T_{arfrio1}$, as variações de $T_{álc1}$ com o tempo eram muito pequenas, assim como os valores da diferença ($T_{álc1} - T_{arfrio1}$). Os dados obtidos a partir desse ponto não foram utilizados nos cálculos da resistência térmica efetiva média da caixa de papelão, \bar{R}_{efet_pap} . A evolução temporal das temperaturas da solução e do ar, medidas pelos sensores no primeiro teste realizado no túnel semi-contínuo E pode ser observada na Figura 5.6. Nota-se que a temperatura da solução do Sistema 1 levou aproximadamente 100 min para se estabilizar.

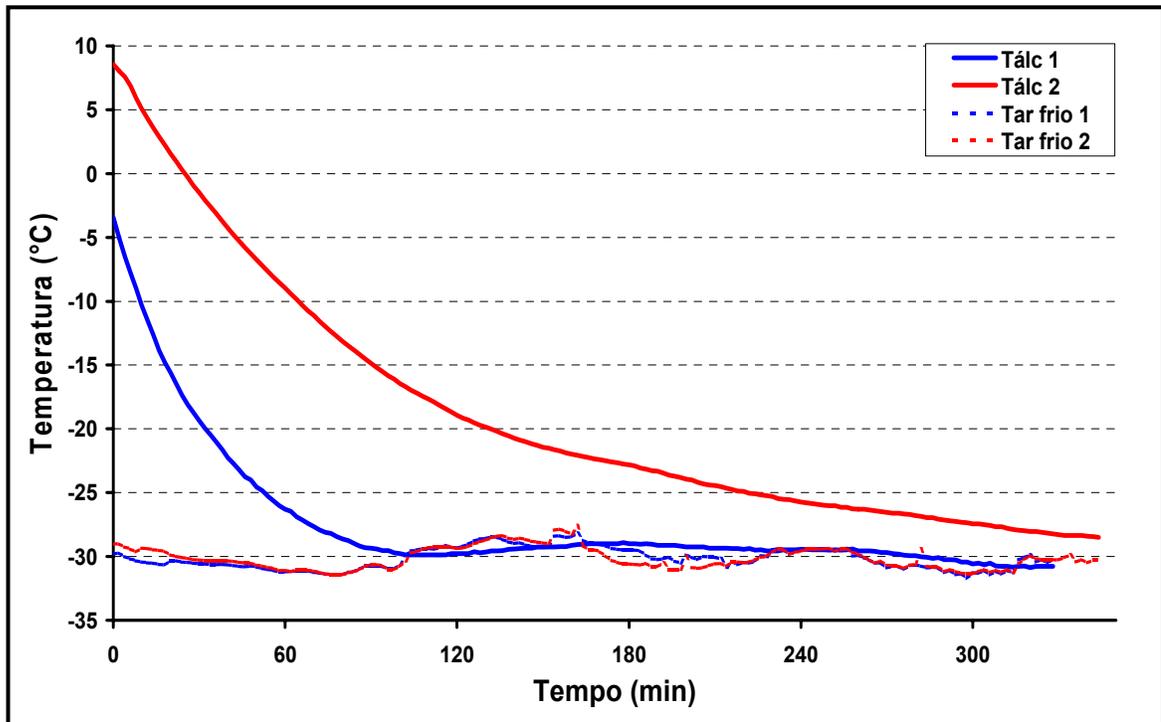


Figura 5.6. Evolução das temperaturas do ar e da solução alcoólica no decorrer do tempo, no experimento 1 do túnel E.

Na Figura 5.7, pode-se visualizar os valores de $\sum R_1$, $\sum R_2$ e R_{efet_pap} , calculados a partir dos dados desse primeiro teste. Pôde-se confirmar que somente os dados obtidos no início de cada experimento se mostravam confiáveis para o cálculo de \bar{R}_{efet_pap} .

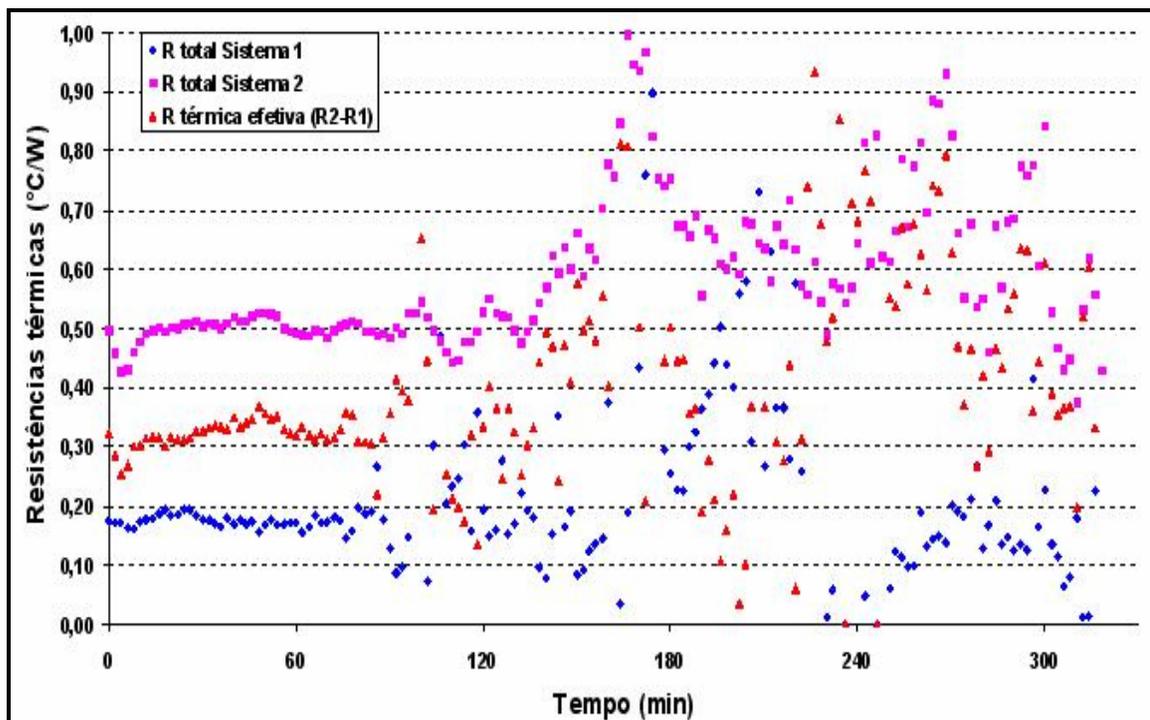


Figura 5.7. Valores das resistências térmicas totais dos Sistemas 1 e 2 e da resistência térmica efetiva, no experimento 1 do túnel E.

Os valores calculados de $\sum R_1$, $\sum R_2$ e de R_{efet_pap} são aproximadamente constantes enquanto há diferenças entre a temperatura do ar e da solução do Sistema 1. A partir do ponto onde T_{alc1} se aproximou de $T_{arfrio1}$, esses valores se dispersaram, além de terem ficado muito mais susceptíveis às pequenas flutuações da temperatura do ar dos túneis.

O tempo útil de cada experimento variou de acordo com o túnel de congelamento utilizado, ou seja, com a velocidade e a temperatura do ar do túnel, responsáveis pela velocidade de resfriamento da solução. Quanto mais rápido esse resfriamento, menor o tempo útil do experimento.

Para a análise dos dados obtidos somente durante o tempo útil de cada experimento, evoluções temporais das temperaturas do ar e da solução dos dois sistemas foram graficadas.

Dessa forma, pôde-se verificar as pequenas flutuações das temperaturas do ar e a sua influência sobre os valores das resistências térmicas totais calculadas. Na Figura 5.8 são mostradas as evoluções temporais de $T_{álc}$ e $T_{arfrío}$ obtidas durante o tempo útil do experimento 1 (túnel E), enquanto na Figura 5.9 são apresentados os valores $\sum R_1$, $\sum R_2$ e R_{efet_pap} calculados com os dados desse primeiro experimento.

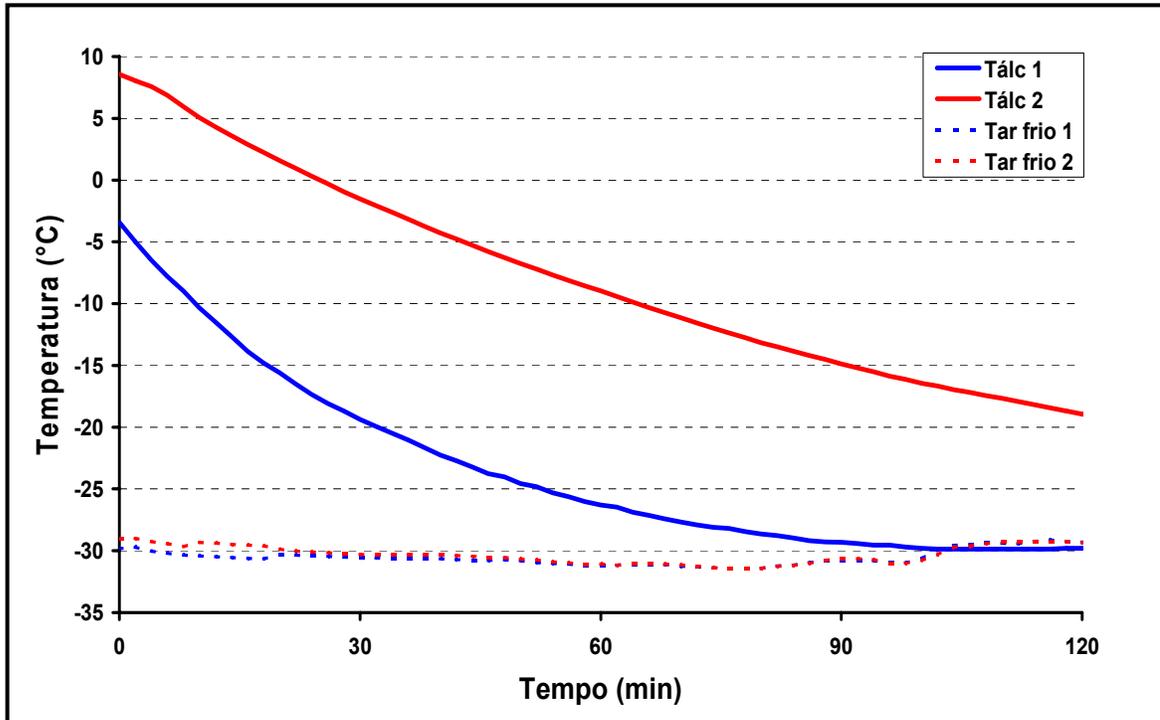


Figura 5.8. Evolução das temperaturas do ar e da solução alcoólica no decorrer do tempo útil para o experimento 1 do túnel E.

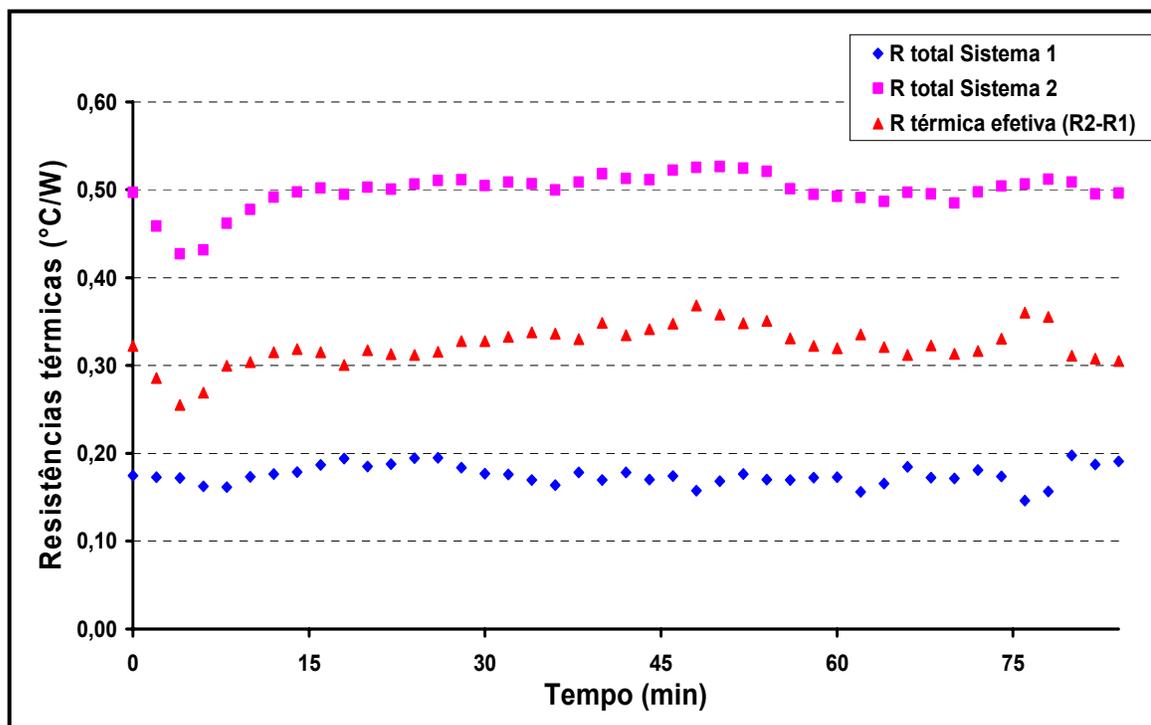


Figura 5.9. Valores das resistências térmicas totais dos Sistemas 1 e 2 e da resistência térmica efetiva para o experimento 1 do túnel E durante o tempo útil do experimento.

Foi verificada uma pequena diferença entre as temperaturas do ar em torno dos Sistemas 1 e 2 nos primeiros minutos de teste. Isso causou variação nos valores de R_{efet_pap} . Dessa forma, para a determinação de \bar{R}_{efet_pap} , somente os pontos situados entre $t=10\text{ min}$ e $t=84\text{ min}$ foram considerados. Na Figura 5.10 são apresentados os valores de R_{efet_pap} calculados, plotados juntamente com as temperaturas da solução dos Sistemas 1 e 2. Na Figura 5.11 são apresentados os valores de R_{efet_pap} juntamente com o seu valor médio, \bar{R}_{efet_pap} .

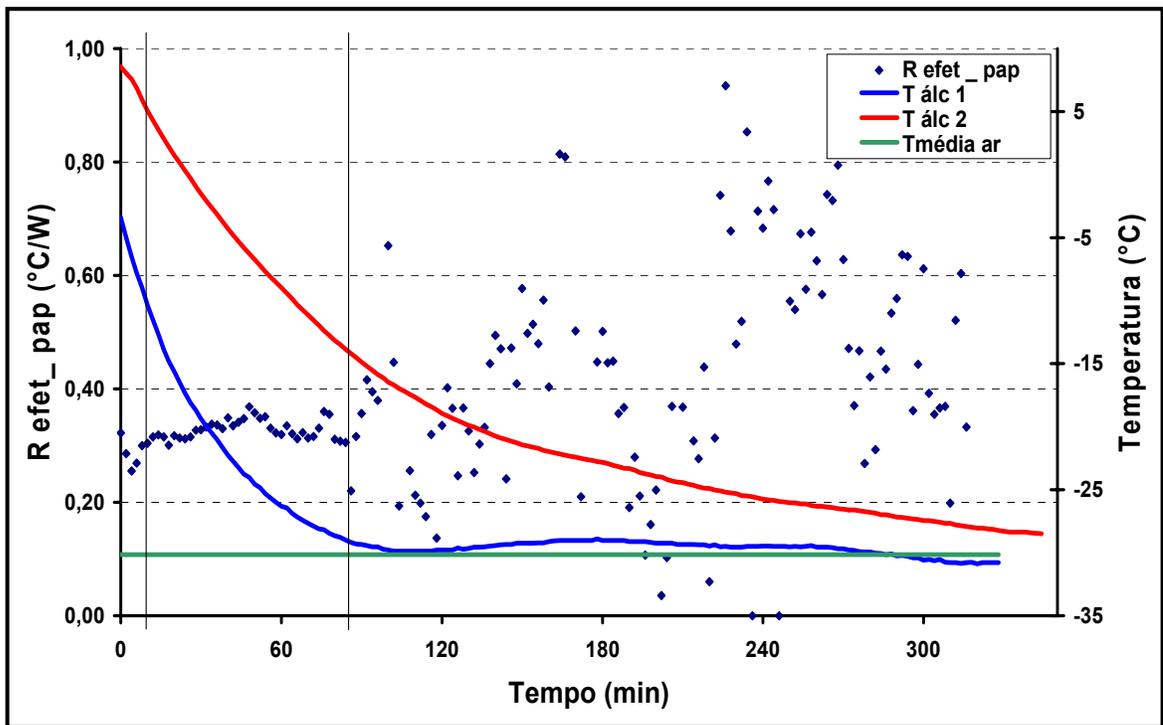


Figura 5.10. Valores pontuais da resistência térmica efetiva. Comparação com as temperaturas da solução e do ar, para o experimento 1 do túnel E.

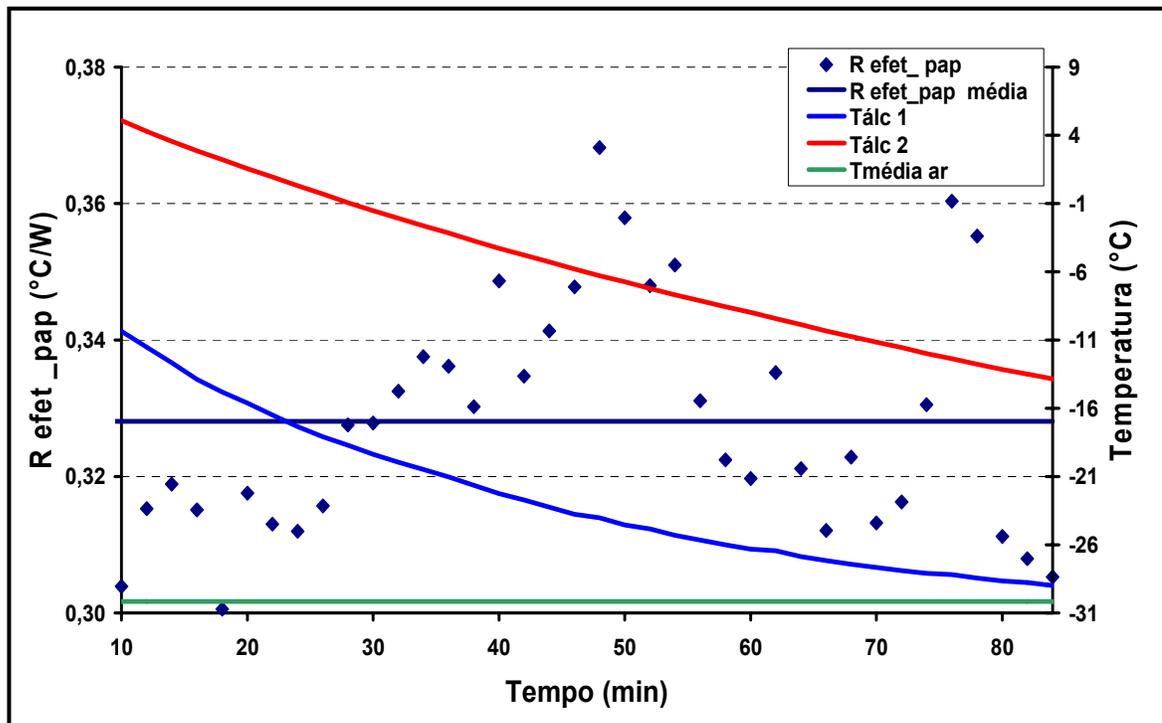


Figura 5.11. Valores pontuais da resistência térmica efetiva. Comparação com as temperaturas da solução e do ar para o experimento 1 do túnel E.

Foram calculados valores de R_{efet_pap} que variaram de 0,300 a 0,368 °C/W, com $\bar{R}_{efet_pap} = 0,328$ °C/W e desvio padrão de 0,017. Isso implica em um coeficiente de variação de apenas 5,2%, o que é pequeno, se considerarmos que se tratam de dados obtidos em uma planta industrial.

Por meio da razão $\sum R_2 / \sum R_1$, foi possível verificar o quanto a resistência térmica do sistema recoberto pelo papelão é maior do que a do sistema modelo (Sistema 1). A partir dos dados desse primeiro experimento, verificou-se que $\sum R_2$ é cerca de 2,88 vezes maior do que $\sum R_1$.

Os dados relativos aos outros três experimentos encontram-se em anexo a este trabalho.

Com relação ao experimento 2, foram observadas diferenças entre as temperaturas do ar ao redor de cada sistema nos minutos iniciais e intermediários do teste, de forma que somente entre 14 e 38 minutos e entre 64 e 98 minutos de teste essas temperaturas se encontravam equiparadas. Apesar disso, como a temperatura da solução demorava mais para “sentir” a variação da temperatura do ar, os valores de $\sum R_1$ e $\sum R_2$ calculados nos intervalos de tempo onde $T_{ar1} = T_{ar2}$ também foram comprometidos, não sendo confiáveis para os cálculos de \bar{R}_{efet_pap} , conforme é apresentado nas Figuras 5.12 a 5.21 em anexo. Como T_{ar1} variou bem menos que T_{ar2} , os valores de $\sum R_1$ foram mais constantes que os de $\sum R_2$, o que comprometeu ainda mais a R_{efet_pap} , resultante de $\sum R_2 - \sum R_1$ a cada 10 min. Verificou-se que a amplitude dos valores de R_{efet_pap} foi muito grande, variando de 0,245 a 0,700 °C/W, com média de 0,419 °C/W e desvio padrão de 0,110. Dessa maneira, os resultados alcançados com a realização deste segundo teste não foram considerados confiáveis para a análise sugerida neste trabalho.

Os resultados equivalentes aos quatro experimentos realizados podem ser vistos na Tabela 5.2.

Tabela 5.2. Valores experimentais estimados.

EXPERIMENTO/TÚNEL	t (min)	$\overline{\sum R_2} / \overline{\sum R_1}$ (°C/W)	\overline{R}_{efet_pap} (°C/W)	DESVIO PADRÃO (°C/W)
1/E	84	2,88	0,328	0,017
2/E	94	3,96	0,419	0,110
3/SD2	58	2,68	0,226	0,060
4/SD1	36	3,23	0,276	0,013
MÉDIA (EXCLUINDO-SE 2/E)	-	2,93	0,277	0,042

Como se observa, desconsiderando-se os resultados do experimento 2 do túnel E, os valores de \overline{R}_{efet_pap} calculados a partir dos dados experimentais tiveram pouca dispersão, com um pequeno desvio padrão de 0,042 °C/W.

O valor da resistência térmica do papelão também foi calculado a partir de dados encontrados na literatura, para efeito de comparação. Segundo HOLMAN (1983) e ASHRAE (1989), a condutividade térmica do papelão ondulado, k , é de aproximadamente 0,07 W/m.°C. Sendo A , área da superfície normal ao fluxo de calor, de (0,430x0,340x2) m² = 0,292 m² e L = 2.10⁻³ m (espessura da placa de papelão), o valor de R_{pap} pôde ser calculado através da Equação 5.19.

$$R_{pap} = \frac{L_{pap}}{k_{pap} A_{pap}} \sim 0,098 \text{ °C/W} \quad (5.19)$$

O valor de \overline{R}_{efet_pap} equivale à soma da resistência térmica de contato entre o papelão e o tanque de aço com a resistência térmica do papelão ($\overline{R}_{efet_pap} = R_{pap} + R_{cont}$). Comparando-se o valor calculado a partir de dados da literatura, $R_{pap} = 0,098 \text{ °C/W}$, com o valor médio estimado experimentalmente, $\overline{R}_{efet_pap} = 0,277 \text{ °C/W}$, observou-se que a resistência térmica de contato pode estar associada a mais de 64% da resistência térmica efetiva. Como a resistência térmica de contato é de difícil determinação, não há como calcular o erro experimental associado. Além disso, caso esse erro seja considerável, pode estar relacionado aos dados encontrados na literatura, referentes à condutividade térmica do papelão. Os autores não mencionam o tipo de

papelão ondulado caracterizado e nem a metodologia para a determinação do k . Como cada tipo de papelão ondulado possui características diferentes, como o número de camadas, número de ondas, etc., a variação do volume de ar ocluído entre essas camadas poderá influenciar na determinação do k .

Foram obtidos, ainda neste terceiro estudo, resultados que confirmam a variação dos valores de \bar{h} estimados nos experimentos realizados no capítulo 4. Constatou-se que os menores valores médios de $\sum R_1$ e $\sum R_2$ calculados estavam relacionados às posições onde foram verificados os maiores valores de \bar{h} , e vice-versa. Isso ocorreu porque as temperaturas médias do ar, bem como os coeficientes convectivos de transferência de calor locais (h) são diretamente responsáveis pela maior ou menor velocidade de resfriamento da solução alcoólica contida nos dispositivos. Como o coeficiente convectivo de transferência de calor (h) do ar está embutido no valor da resistência térmica total, quanto menor o valor de \bar{h} da posição estudada, maiores os valores de $\overline{\sum R_1}$ e $\overline{\sum R_2}$ na mesma posição. Entenda-se que não se trata do valor de $\overline{R_{efet_pap}}$ estimado, já que essa resistência não deve variar com a posição do produto, pois é uma característica do material da embalagem. Foram estudadas as posições situadas no nível 9 de cada túnel, e os resultados obtidos foram comparados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3. Comparação entre as resistências térmicas totais e os coeficientes convectivos de transferência de calor nos túneis estudados.

TÚNEIS	NÍVEL SUPERIOR (N9)					
	POSIÇÃO PRÓXIMA AOS VENTILADORES (N9V)			POSIÇÃO OPOSTA AOS VENTILADORES (N9P)		
	\bar{h} (W/m ² .°C)	$\overline{\sum R_1}$ (°C/W)	$\overline{\sum R_2}$ (°C/W)	\bar{h} (W/m ² .°C)	$\overline{\sum R_1}$ (°C/W)	$\overline{\sum R_2}$ (°C/W)
E	58	0,176 e 0,147	0,504 e 0,567	131	–	–
SD1	207	0,127	0,396	47	–	–
SD2	35	–	–	66	0,145	0,367

5.5 CONCLUSÃO

A metodologia empregada neste trabalho permitiu uma estimativa da distribuição das resistências térmicas totais em paredes compostas. Além disso, a partir da análise da taxa de transferência de calor de uma solução anticongelante submetida ao resfriamento em túneis de congelamento, foi possível, através de comparações, avaliar quantitativamente a resistência térmica de embalagens de papelão ondulado comercialmente utilizadas durante o congelamento de produtos alimentícios em túneis com convecção de ar forçada.

A partir dos resultados de três experimentos realizados independentemente, em diferentes túneis de congelamento semi-contínuos, foram determinados valores de resistência térmica efetiva média da embalagem estudada entre 0,226 e 0,328 °C/W, sendo o desvio padrão de 0,042 °C/W. Os resultados estimados a partir dos testes foram coerentes com aqueles calculados a partir de dados encontrados na literatura, quando se considera a resistência térmica de contato. Dessa forma, a metodologia desenvolvida demonstrou ser adequada à avaliação e quantificação das resistências à transferência de calor de embalagens de papelão, podendo também ser aplicada à determinação da resistência térmica de outros materiais, desde que tenham condutividade térmica relativamente baixa, quando comparadas à condutividade do aço. Além disso, essa metodologia pode ser perfeitamente utilizada em quaisquer outros tipos de túneis de congelamento e em laboratório.

6 CONCLUSÕES GERAIS E SUGESTÕES

Os estudos realizados e as técnicas desenvolvidas neste trabalho permitiram uma avaliação global do processo de transferência de calor envolvido durante o congelamento de produtos cárneos embalados.

O estudo apresentado no capítulo 3 mostrou que a substituição das caixas de papelão comercialmente utilizadas pelas caixas metálicas teladas pode proporcionar resultados de grande impacto tecnológico e econômico para a empresa produtora de alimentos. Os consideráveis ganhos de tempo de congelamento resultam em aumento de produtividade. Além disso, a redução do tamanho dos cristais de gelo formados promove uma melhor qualidade ao produto final.

Com relação à metodologia desenvolvida no capítulo 4, foi possível realizar uma avaliação das medidas dos coeficientes de transferência de calor convectivos em túneis de congelamento. Foram encontradas variações de \bar{h} de até uma ordem de grandeza em um mesmo túnel. Isso dá indícios da má disposição e distribuição de ventiladores e da presença de obstáculos em excesso, formando caminhos preferenciais do ar e impedindo a homogeneização das temperaturas dentro do túnel.

Os dispositivos desenvolvidos permitiram a realização do mapeamento dos túneis estudados, apontando a grande heterogeneidade de distribuição espacial de ar existente nos mesmos. Com esse estudo, verificou-se também que o emprego da técnica desenvolvida pode ser uma alternativa ao uso de anemômetros quando se deseja a obtenção do diagnóstico dos fluxos de ar em grandes plantas industriais, já que esses equipamentos são cercados de inconvenientes quando utilizados a temperaturas muito baixas.

Foi possível também, através dos mesmos dispositivos, avaliar quantitativamente a resistência térmica de embalagens de papelão ondulado, comercialmente utilizadas durante o congelamento de produtos cárneos. Nos estudos apresentados no capítulo 5, a técnica desenvolvida mostrou ser bastante apropriada, podendo também ser utilizada para a determinação da resistência térmica efetiva de outros materiais de embalagens.

Dados quantitativos e qualitativos acerca da distribuição de temperaturas e de velocidades do ar nos túneis de congelamento, além de dados de resistência térmica de embalagens puderam ser obtidos de maneira simples. As técnicas empregadas foram muito satisfatórias, mas estudos

mais aprofundados poderão ainda ser feitos. Novas modificações nas embalagens de papelão poderão ser analisadas e propostas. Além disso, sugere-se que modificações no número e posição dos ventiladores no interior dos túneis sejam estudadas em detalhes, para que seja implementada a configuração ótima, dos pontos de vista técnico e econômico. Para isso, propõe-se o estudo da otimização dos mesmos através de simulações gráficas e numéricas com o programa CFX, que promove todo o mapeamento da dinâmica de fluidos existente dentro dos túneis e permite simular a influência de troca ou acréscimo de ventiladores ou obstáculos nos mesmos, obtendo-se assim, resultados de elevada precisão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHRAE, American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers – Refrigeration Handbook. **Food Storage and Equipment, Food Refrigeration**. Atlanta: 1998.
- BOWATER, F. J. Design of carton air blast freezing systems. **The International Institute of Refrigeration**, p. 1-5, 2004.
- BRENNAN, J. G.; BUTTERS, J. R.; COWELL, N. D., LILLY, A.E. **Las operaciones de la ingeniería de los alimentos**. 2. ed. Zaragoza (España): Acribia, 1980. p. 367-377.
- DAUDIN, J. D.; VAN GERWER, R. J. M. Air circulation: how to cope with this critical point. New developments in meat refrigeration. **International Institute of Refrigeration**, Chillers, p. 30-37. 1996.
- DICKEL, E. L. Barreiras sanitárias na comercialização de carnes de aves – cenário das salmonelas. In: V SIMPÓSIO BRASIL SUL DE AVICULTURA, 2004, Chapecó, SC - Brasil. **Anais...**Chapecó: Embrapa Suínos e Aves, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2004. p. 11-18.
- EVANGELISTA, J. **Tecnologia de alimentos**. 2.ed. Rio de Janeiro; São Paulo: Atheneu, 1989. p. 371-383.
- GEANKOPLIS, C. J. **Transport processes and unit operations**. 3rd ed. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1993. p. 214-370, 883.
- HELDMAN, D. R.; HARTEL, R. W. **Principles of food processing**. Gaithersburg: Aspen Publishers, 1998. p. 113-137.
- HELDMAN, D. R. Food Freezing. In: HELDMAN, D. R.; LUND, D. B. (eds.) **Handbook of Food Engineering**, New York: Marcel Dekker, 1992. p. 277-315.
- HENSE, H. **Avaliação dos parâmetros termofísicos e cinética de congelamento do cação**. Campinas-SP, 1990. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos), Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.

HENSE, H. Congelamento de cação com transmissão de calor unidirecional: 1 – dados experimentais. **Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 27, n. 2, p. 118-127. 1993.

HOLMAN, J. P. **Transferência de calor**. São Paulo; Rio de Janeiro: McGraw-Hill do Brasil, 1983. 639 p.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 5. ed. São Paulo: LTC, 2003. p. 5, 62-65, 170-175, 643-655.

KONDJOYAN, A.; DAUDIN, J. D. Heat and mass transfer at the surface of a pork hindquarter. **Journal of Food Engineering**, v. 32, p. 225-240. 1997.

LAWRIE, R. A. **Meat science**. 4.ed. New York: Pergamon, 1985. p. 112-134.

MICROSOFT CORPORATION. **Temprecord for Windows 3.11**. New Zealand, 1998. 1 disquete; 3,5 pol. Armazenamento e leitura da evolução temporal de temperaturas.

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

PARDI, M. C.; SANTOS, I. F.; SOUZA, E. R.; PARDI, H. S. **Ciência, higiene e tecnologia da carne**. 2. ed. Goiânia: UFG, 2001. v. 1: Ciência e higiene da carne. Tecnologia da sua obtenção e transformação. p. 560-571.

PERRY, R. H.; CHILTON, C. H. **Manual de engenharia química**. 5 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois S. A., 1980.

RAMAKRISHNAN, S.; WYSK, R. A.; PRABHU, V. V. Prediction of process parameters for intelligent control of tunnel freezers using simulation. **Journal of Food Engineering**, v. 65, p. 23-31, 2004.

RESENDE, J. V.; NEVES FILHO, L. C.; SILVEIRA JÚNIOR, V. Escoamento de ar através de embalagens de polpa de frutas em caixas comerciais: efeito sobre os perfis de velocidade em

túneis de congelamento. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 22, n. 2, p. 184-191, maio./ago. 2002 (a).

RESENDE, J. V.; SILVEIRA JÚNIOR, V. Medidas da condutividade térmica efetiva de modelos de polpas de frutas no estado congelado. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 22, n. 2, p. 177-183, maio./ago. 2002.

RESENDE, J.V.; SILVEIRA JÚNIOR, V.; NEVES FILHO, L. Air blast freezing of fruit pulp models in commercial boxes: Influence of preferential channels in the bed on freezing times estimating. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 22, n. 3, p. 319-327, set./dez. 2002 (b).

RESENDE, J. V.; SILVEIRA JÚNIOR, V.; NEVES FILHO, L. C. Experimental measures of the effective heat transfer coefficients in air blast freezers for the processing of fruit pulps. **Engenharia Térmica**, n. 3, p. 11-18. 2003.

SILVA, J. A. **Tópicos da tecnologia de alimentos**. São Paulo: Livraria Varela, 2000. p.147-159.

SINGH, R. P.; HELDMAN, D. R. **Introducción a la ingeniería de los alimentos**. Zaragoza (España): Acribia, 1997.

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

TOLEDO, R. T. **Fundamentals of food process engineering**. 2nd ed. Gaithersburg: Aspen, 1999. p. 232-301, 398-436.

ANEXOS

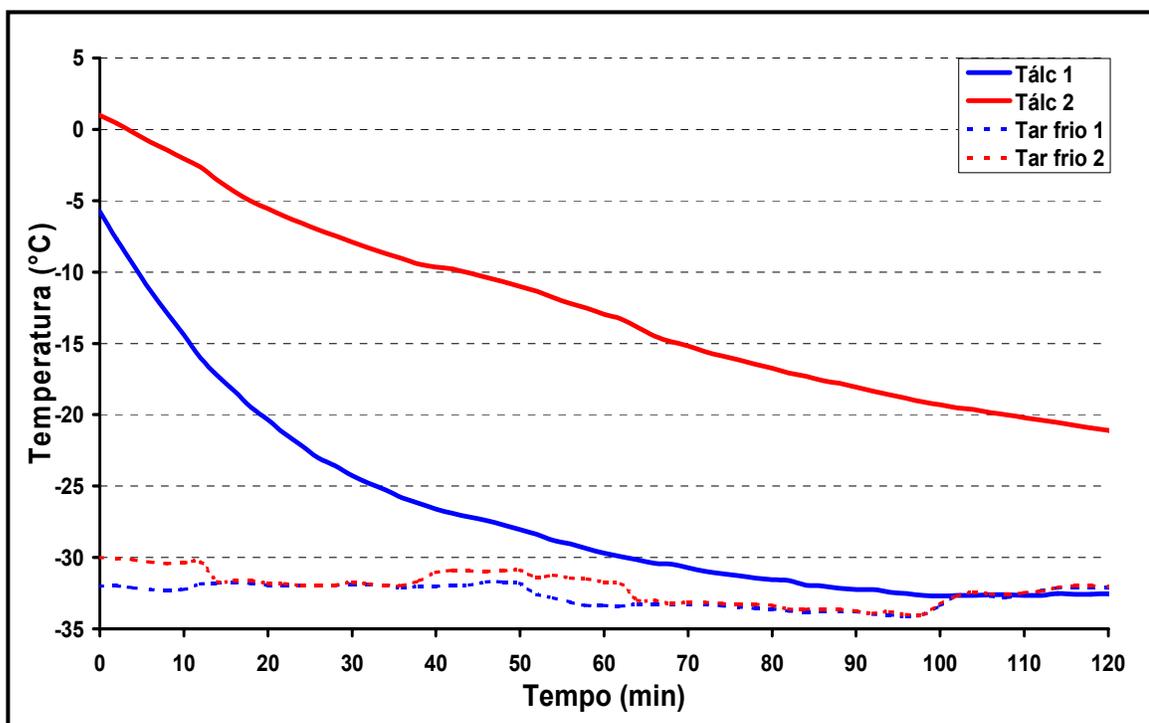


Figura A.1. Evolução das temperaturas do ar e da solução alcoólica no decorrer do tempo útil para o experimento 2 do túnel E.

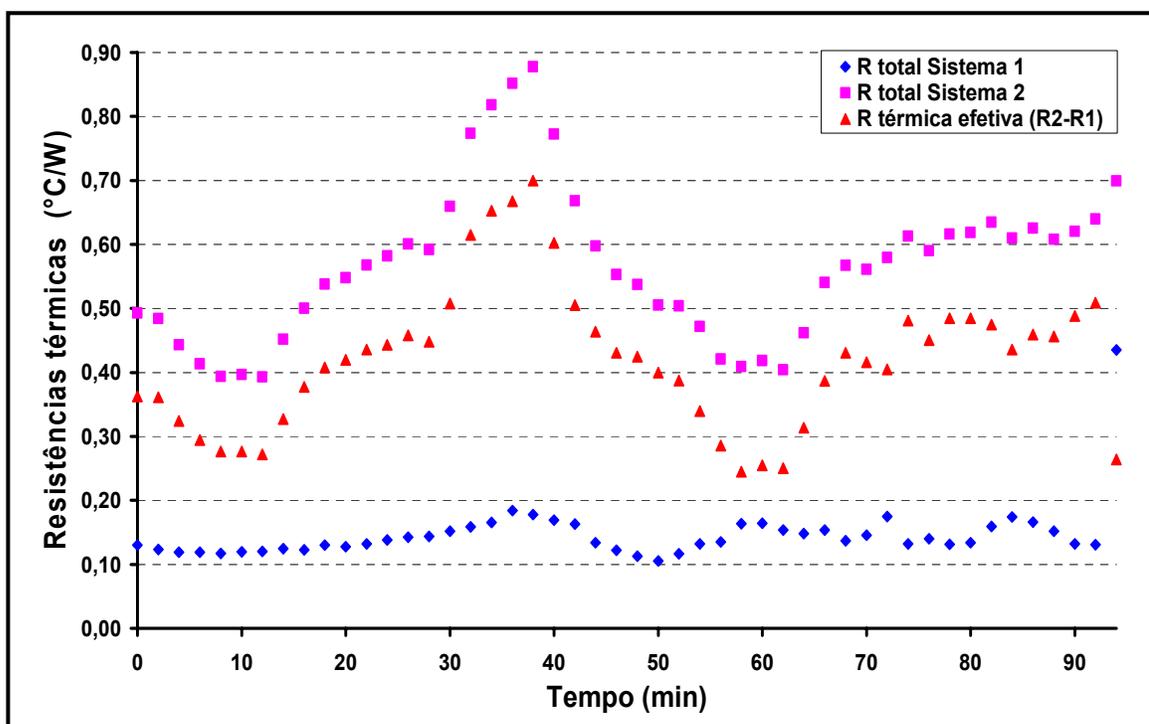


Figura A.2. Valores pontuais das resistências térmicas totais dos Sistemas 1 e 2 e da resistência térmica efetiva para o experimento 2 do túnel E durante o tempo útil do experimento.

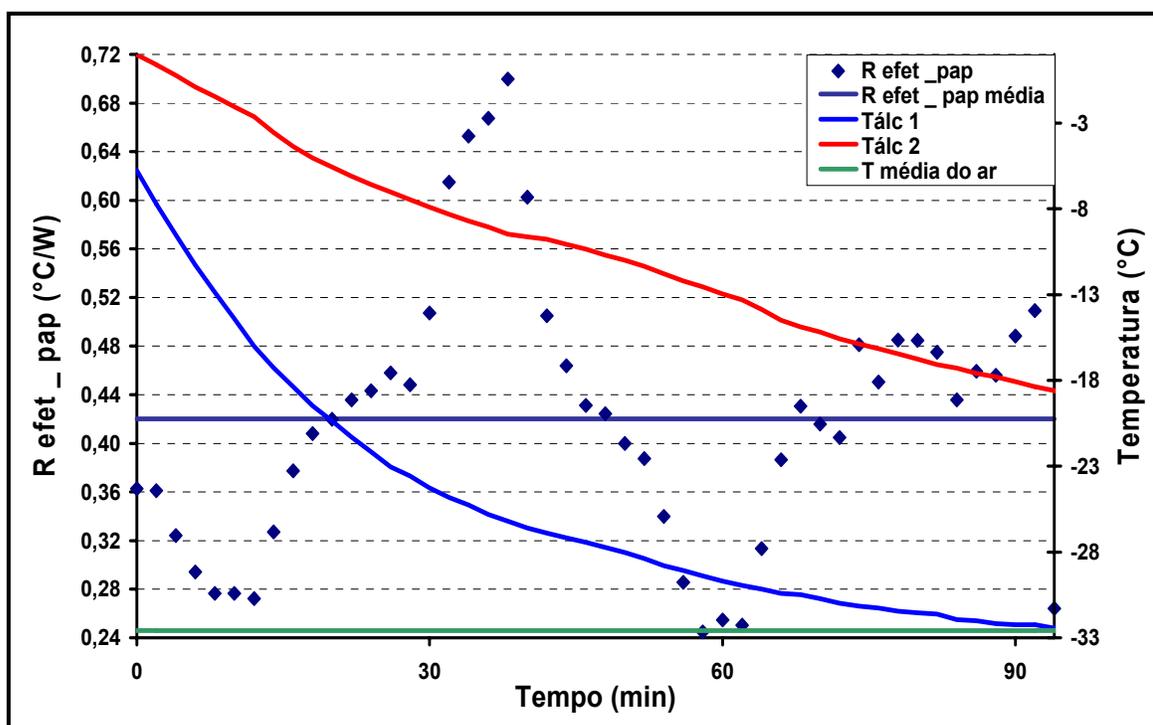


Figura A.3. Valores pontuais da resistência térmica efetiva. Comparação com as temperaturas da solução e do ar para o experimento 2 do túnel E.

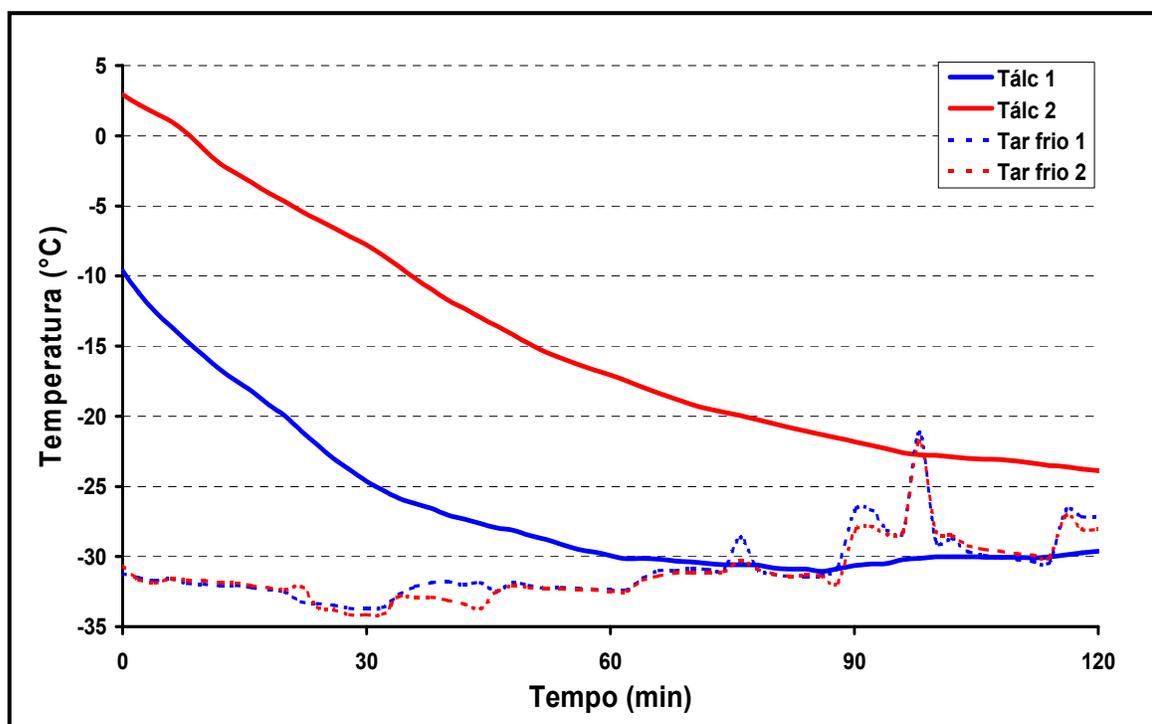


Figura A.4. Evolução das temperaturas do ar e da solução alcoólica no decorrer do tempo útil, no experimento 3, túnel SD2.

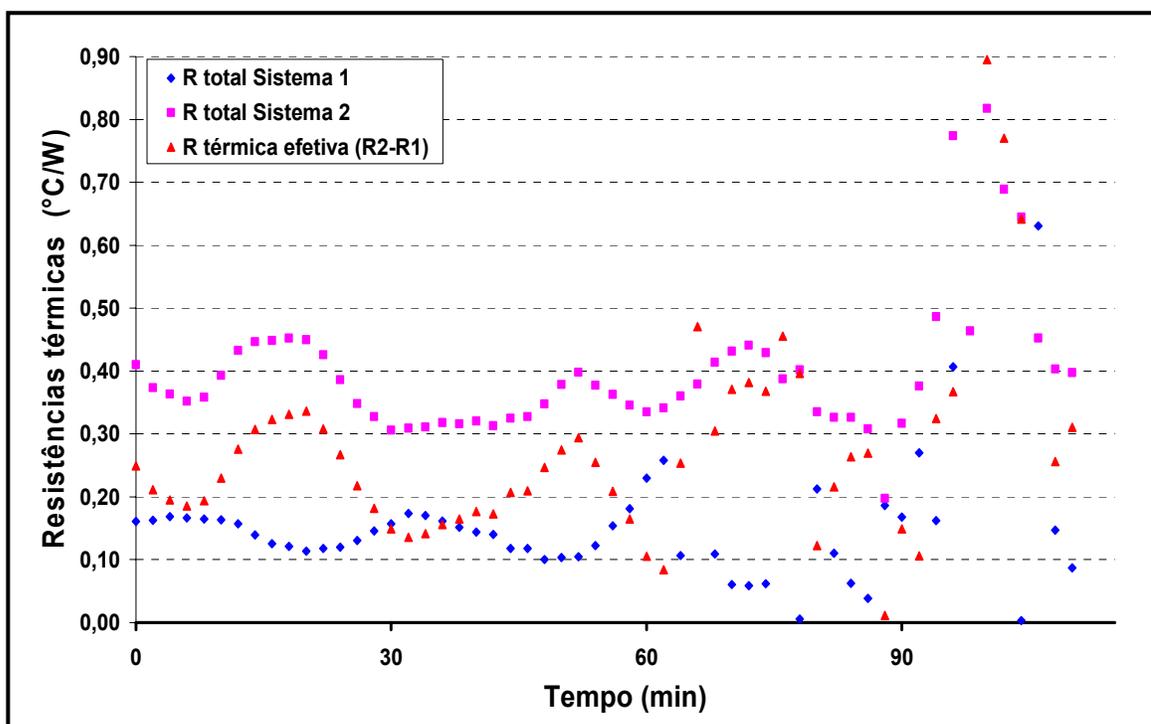


Figura A.5. Valores pontuais das resistências térmicas totais dos Sistemas 1 e 2 e da resistência térmica efetiva no experimento 3, túnel SD2.

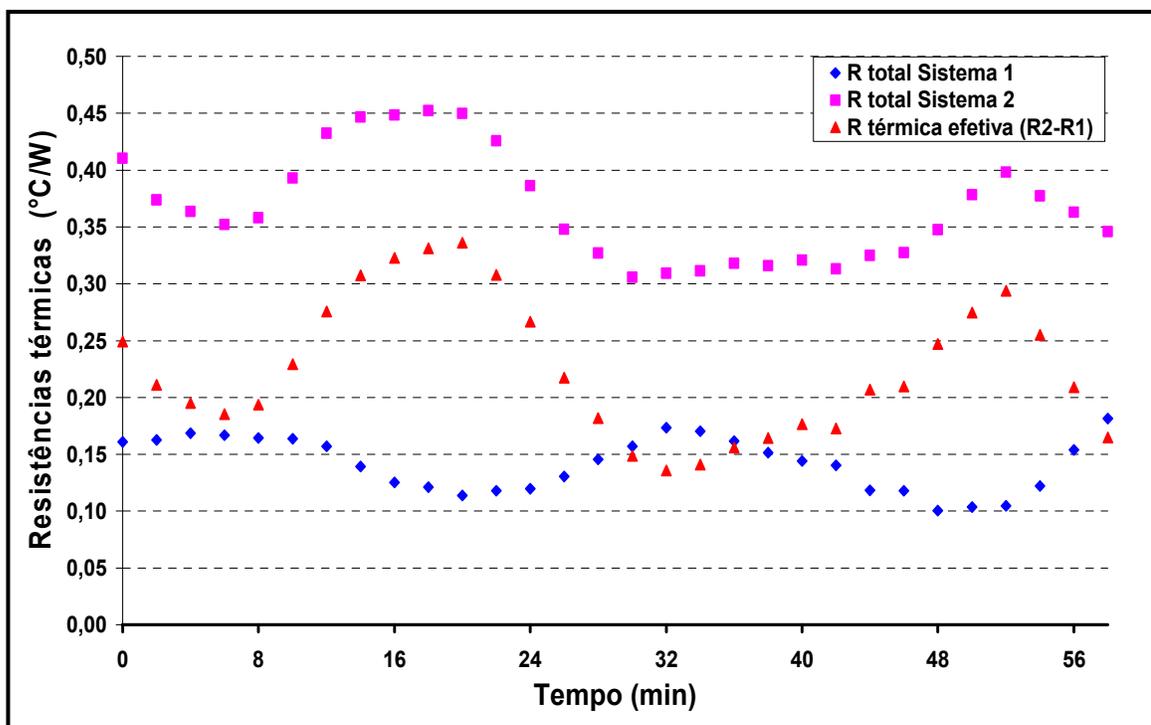


Figura A.6. Valores pontuais das resistências térmicas totais dos Sistemas 1 e 2 e da resistência térmica efetiva para o experimento 3, túnel SD2, durante o tempo útil do experimento.

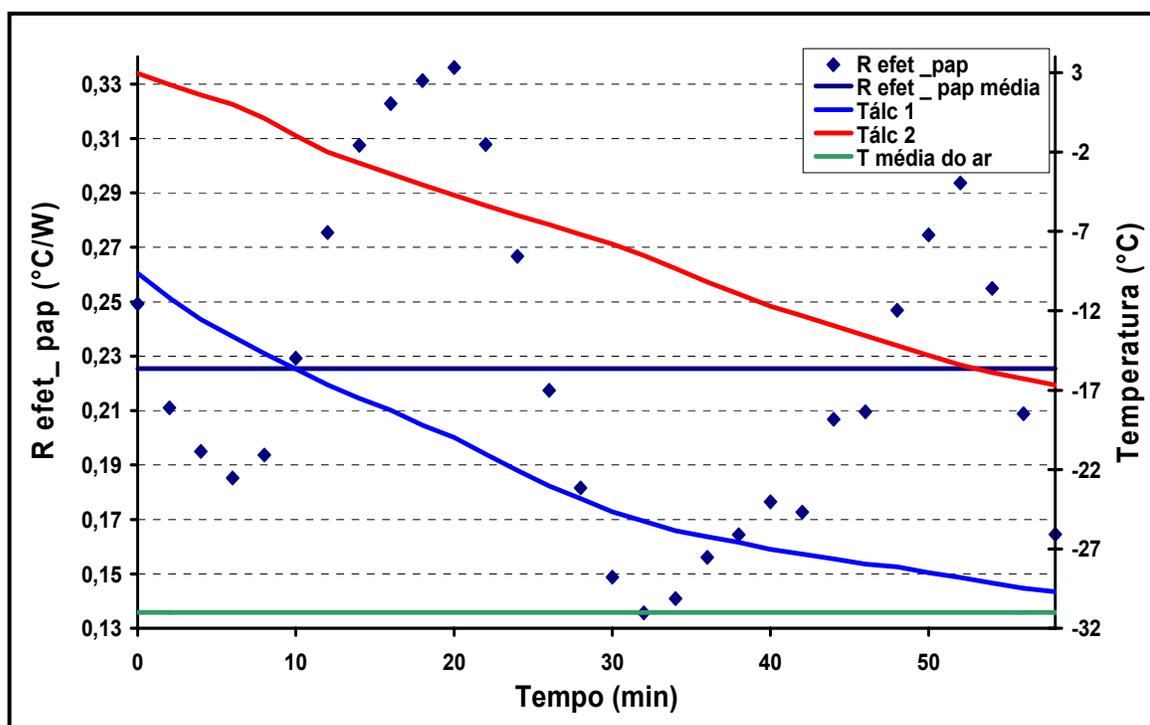


Figura A.7. Valores pontuais da resistência térmica efetiva. Comparação com as temperaturas da solução e do ar para o experimento 3, túnel SD2.

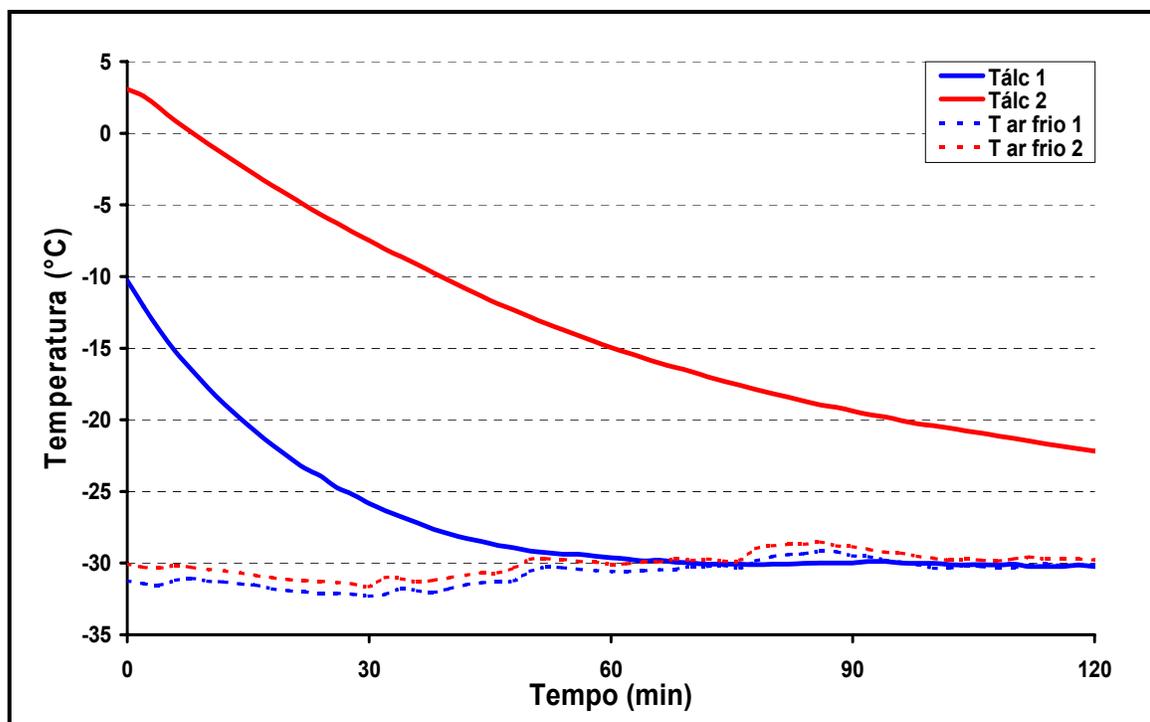


Figura A.8. Evolução das temperaturas do ar e da solução alcoólica no decorrer do tempo útil para o experimento 4, túnel SD1.

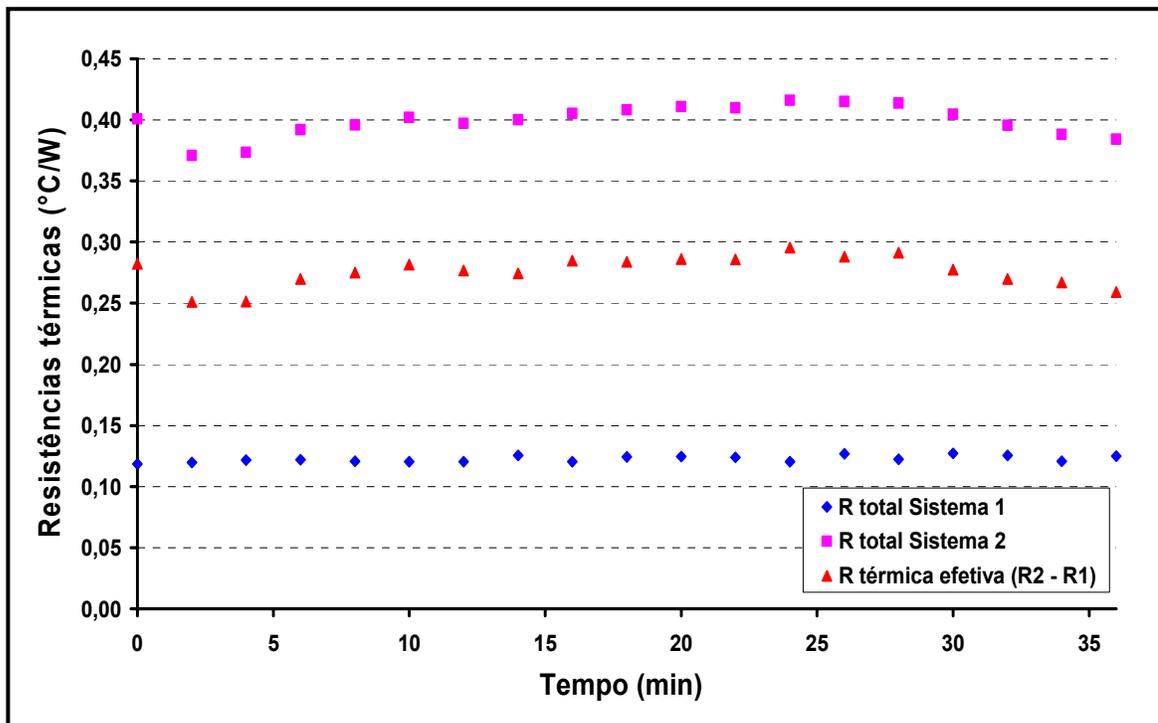


Figura A.9. Valores pontuais das resistências térmicas totais dos Sistemas 1 e 2 e da resistência térmica efetiva para o experimento 4, túnel SD1, durante o tempo útil do experimento.

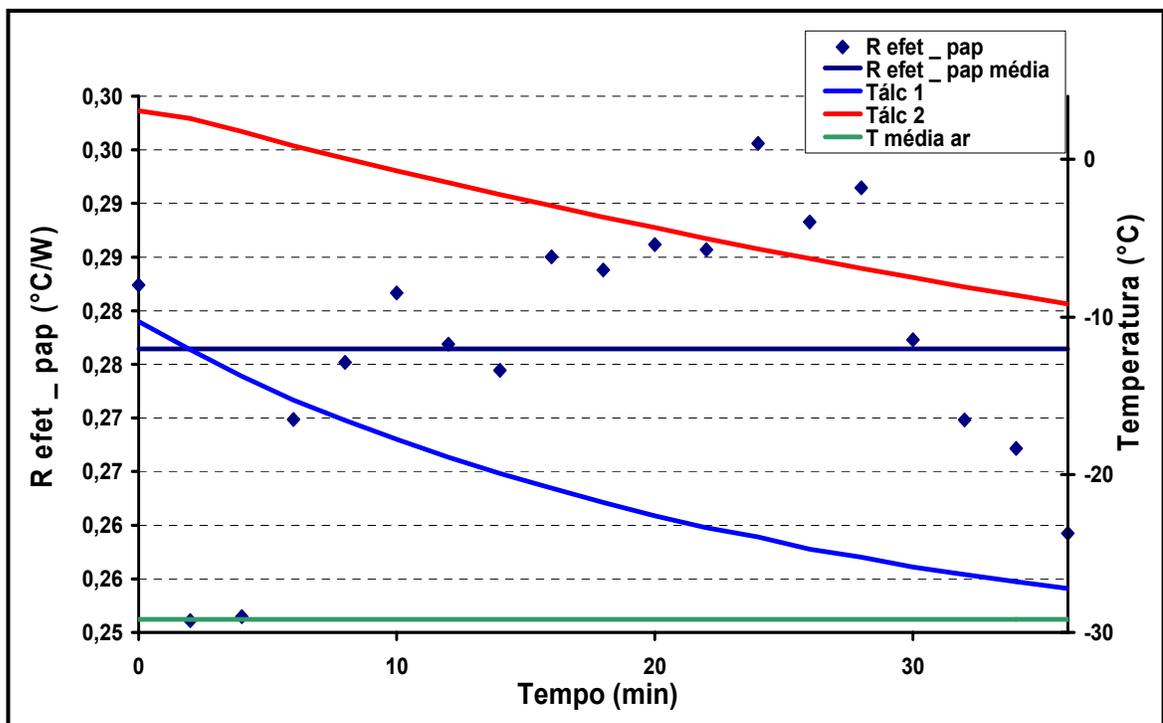


Figura A.10. Valores pontuais da resistência térmica efetiva. Comparação com as temperaturas da solução e do ar para o experimento 4, túnel SD1.