

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR BÁRBARA JANET TERUEL
MEDEROS E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 20 11 2000


ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Estudo Teórico-Experimental do Resfriamento de Laranja e Banana com Ar Forçado

Autor: Bárbara Janet Teruel Mederos

Orientador: Prof. Dr. Luís Augusto Barbosa Cortez

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA INTERDISCIPLINAR DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS
ENERGÉTICOS

Estudo Teórico-Experimental do Resfriamento
de Laranja e Banana com Ar Forçado

Autor: Bárbara Janet Teruel Mederos

Orientador: Prof. Dr. Luís Augusto Barbosa Cortez

Curso: Engenharia Mecânica

Área de concentração: Planejamento de Sistemas Energéticos

Tese de doutorado apresentada à Comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Planejamento de Sistemas Energéticos.

Campinas, 2000

São Paulo - Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

T279e Teruel Mederos, Bárbara Janet
Estudo teórico-experimental do resfriamento de laranja
e banana com ar forçado / Bárbara Janet Teruel
Mederos.--Campinas, SP: [s.n.], 2000.

Orientadores: Luís Augusto Barbosa Cortez, Paulo
Martins Leal.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

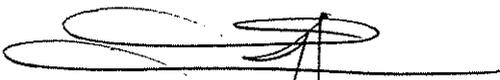
1. Resfriamento. 2. Frutas - Conservação. 3.
Embalagens. 4. Ar - Escoamento. 5. Modelos
matemáticos. 6. Calor - Transmissão. 7. Temperatura.
8. Custo benefício. I. Cortez, Luís Augusto Barbosa. II.
Leal, Paulo Martins. III. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. IV. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA INTERDISCIPLINAR DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS
ENERGÉTICOS

TESE DE DOUTORADO

Estudo Teórico-Experimental do Resfriamento
de Laranja e Banana com Ar Forçado

Autor: **Bárbara Janet Teruel Mederos**
Orientador: **Prof. Dr. Luís Augusto Barbosa Cortez**



Prof. Dr. Luís Augusto Barbosa Cortez
FEAGRI/UNICAMP



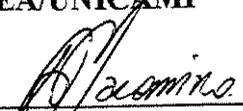
Prof. Dr. José Tomaz Vieira Pereira
FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Sinclair Mallet-Guy Guerra
FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Vivaldo Silveira Jr.
FEA/UNICAMP



Prof. Dr. Angelo Pedro Jacomino
ESALQ

2011/2012

Dedicatória:

À Nélida e Vivino, meus pais;

À Lianet e Gabriela, minhas filhas;

À Pablo, meu esposo;

Dedico.

Agradecimentos:

Gostaríamos de deixar aqui o agradecimento às pessoas e entidades que fizeram possível a realização deste trabalho:

Ao **Brasil**, por ter-me acolhido.

À **UNICAMP**, excelente instituição, por ter colocado à nossa disposição toda a infraestrutura necessária durante todos estes anos.

À **FAPESP**, que financiou a estadia, pesquisa e todas as atividades vinculadas a este trabalho.

Ao meu orientador **Prof. Luís Augusto Barbosa Cortez** pela oportunidade a mim oferecida e pelo apoio no desenvolvimento do trabalho.

Ao **Prof. Paulo Martins Leal**, co-orientador do trabalho, pela sua colaboração em todos os aspectos, e pelo incentivo.

Ao **Prof. Lincoln de Camargo Neves Fo.**, que colocou à nossa disposição o Laboratório de Refrigeração da Faculdade de Engenharia dos Alimentos e toda sua infraestrutura para o desenvolvimento dos experimentos.

Ao **Prof. Antônio Gilson de Barbosa Lima**, da Universidade Federal da Paraíba, além de grande colaborador na realização do trabalho, um excelente amigo. Muito obrigada.

Ao **Prof. Ennio Pérez da Silva**, pela sua colaboração e apoio como Coordenador da Área de Planejamento Energético.

Sou muito grata a meus pais **Vivino e Nélide**, aos quais devo a vida. Além de ter-me sustentado e educado, guiaram meus passos, com amor e firmeza. Meu eterno amor e dedicação, ainda é pouco ante tudo o que merecem. A meus irmãos **Ignácio e Juan Carlos**, pelo apoio e quota de alegria.

Às minhas filhas **Lianet** e **Gabriela**, pérolas delicadas que com firmeza absoluta têm me ajudado sempre, com seu carinho e doçura, fiéis companheiras. A Lianet meu reconhecimento especial por ter sido capaz de assimilar, com maturidade incrível, a nossa separação, física, durante todos estes anos, ainda que criança. Às duas, peço desculpas pelas horas que lhes privei da minha companhia, pelas horas em que faltou tempo para as brincadeiras necessárias, pelo agito do dia.

Filhas: tenho muito orgulho de vocês.

À meu esposo **Pablo**, meu fiel companheiro, por acreditar em mim, e na felicidade, ainda nos momentos mais difíceis. Sempre me apoiando com muita força, otimismo e alegria. Obrigada pela inestimável colaboração na fase de testes.

À meus sogros, **Pablo** e **Zulma**, que com carinho, junto aos **meus pais**, tem assumido a custódia da minha Lianet, fazendo dela uma filha. Esta ajuda, sem dúvidas, têm sido uma parte importante para a realização deste trabalho.

Ao técnico da FEAGRI **João Evaristo Bergamo**, pela colaboração na fase preliminar e na montagem da instalação. Ao **Prof. Sylvio Luís Honório**, que colocou o Laboratório de Produtos Percíveis da FEAGRI, à nossa disposição. À técnica **Rosalia Favoretto** por sua colaboração na realização das análises químicas.

Ao técnico do Laboratório de Refrigeração da Faculdade de Engenharia de Alimentos, **Carlos Parreira**, pelo apoio incondicional. Aos colegas do Laboratório de Refrigeração **Flávio Vasconcelos** e **Jaime Vilela**, os quais, em não poucos momentos, deram uma grande "força" no carregamento das caixas para os testes. À **Aparecido José Contiero** e **Nilson Alves dos Santos**, do Departamento de Manutenção, dos quais sempre tive ajuda no momento preciso, assim como em eventuais consertos que foram necessários.

Ao pessoal da **Fazenda Sete Lagoas**, os quais doaram desde o início todos os frutos necessários para o desenvolvimento da pesquisa. Além de ter colocado gentilmente todas as suas instalações ao nosso alcance, cederam as informações que foram solicitadas. Eles são: **León Van Paris**, **José Renato Melari**, **Edson Refundini** e **Antonio José Fadel**. Sem a colaboração deles a concretização deste trabalho teria sido muito mais difícil.

Ao **Eng. Avalmir Paiva**, representante da TORIN Ventiladores, pelo apoio, rapidez e eficiência, no subministro, troca e conserto do ventilador usado na bancada de testes.

À **Joana D'Arc Silva Pereira**, diretora da Biblioteca de Engenharia da UNICAMP, pela inestimável ajuda na revisão da tese.

Aos meus colegas do **Planejamento Energético e do Departamento de Construções Rurais**.

Aos analistas de sistemas do **SIFEM** (Seção de Informática da Faculdade de Engenharia Mecânica), pelo apoio e infra-estrutura oferecida.

À todos os funcionários da **Faculdade de Engenharia Mecânica, Engenharia Agrícola e Engenharia de Alimentos**, da UNICAMP, que têm colaborado de forma direta ou indireta na realização deste trabalho.

À todos **meus amigos**, sempre presentes, fisicamente ou não, os quais sustentam as minhas alegrias, as minhas tristezas.

À **Cuba**, sempre.

À todos os que têm formado parte da minha vida nestes anos todos e;

À todos os que de uma forma ou outra têm colaborado:

MUITO OBRIGADA.

“.....Fé não é crer no impossível, mas sim criar o impossível.....”

Autor desconhecido

Resumo

TERUEL, Mederos Bárbara Janet, *Estudo Teórico-Experimental do Resfriamento de Laranja e Banana com Ar Forçado*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2000. 290 p. Tese (Doutorado).

Neste trabalho apresenta-se um estudo para a obtenção das curvas de resfriamento e do coeficiente de transferência de calor convectivo, de frutas de geometria diferentes (laranja e banana). Os frutos foram resfriados num sistema de circulação de ar forçado à temperatura de 1°C e 7°C e umidade relativa entre 87-88%. O sistema de resfriamento foi projetado para garantir três fluxos de ar, avaliando-se o resfriamento dos frutos submetidos a fluxos de 6; 7,5 e 10 m³/h. Os frutos foram acondicionados em duas embalagens, com área efetiva para a passagem do ar variando de 40% a 3,5%. Para a coleta dos dados experimentais foi aplicado um delineamento experimental aleatorizado, num esquema fatorial 3x2 para os experimentos com laranja e um esquema fatorial 2x2, nos experimentos com banana. O nível de significância estatística adotado para a análise dos resultados foi de 10%. Outras medições foram desenvolvidas para caracterizar a razão de aspecto dos frutos, e avaliar as perdas de peso após o resfriamento. Um modelo matemático bidimensional, em coordenadas esféricas prolato, foi adaptado para caracterizar a condução de calor transiente dentro da fruta, assumindo-se condição de contorno convectiva na superfície do corpo. As equações geradas foram resolvidas numericamente pelo método de volumes finitos, e as equações lineares resolvidas iterativamente pelo método de Gauss-Seidel. O coeficiente de transferência de calor convectivo aparente foi obtido por ajuste, aplicando o método dos mínimos quadrados. O modelo prediz a distribuição interna de temperatura nos frutos, assim como a temperatura média ao longo do processo de resfriamento. A adequada concordância entre os resultados experimentais e numéricos, permitem afirmar que o modelo proposto caracteriza adequadamente o processo de resfriamento dos frutos, assim como os valores do coeficiente de transferência de calor obtidos por ajuste. Também foram desenvolvidos cálculos econômicos, que permitiram obter o custo total de resfriamento de laranja em sistemas com ar forçado, comparando-se com o custos quando resfriadas em sistemas convencionais.

Palavras-chave:

Tempo de resfriamento, Embalagens, Modelo matemático, Coeficiente de transferência de calor, Custo de resfriamento

Abstract

TERUEL, Mederos Bárbara Janet, *Experimental and Theoretical Study of Orange and Banana with Forced Air Cooling*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2000. 290 p. Tese (Doutorado).

This work states a study for the obtaining of the cooling curves and of the convective heat transfer coefficient of geometrical different fruits (orange and banana). The fruits were cooled in a system of forced air to the temperature of 1°C and 7°C relative humidity between 87-88%. The cooler system was projected to guarantee three flows of air, being evaluated the cooler of the fruits submitted to flows of 6; 7,5 and 10 m³/h. The fruits were conditioned in two package, with effective passage area of the air varying from 40% to 3,5%. For the collection of the experimental data it was applied an experimental random non-alignment, in an factorial scheme 3x2 for the experiments with orange and an factorial scheme 2x2, in the experiments with bananas. The level of statistical significant adopted for the analysis of the results was of 10%. Other measurements were developed for characterize the reason of aspects of the fruits, and to evaluate the losses of weight of the fruits after the cooler. A mathematical bidimensional model, in prolate spheroid coordinates, was adapted and applied to characterize the conduction of heat transient inside of the fruit, being assumed boundary condition convective in the surface of the body and constant diffusion coefficient. The generated equations was numerical solved for the finite-volume method of, and the linear equations set was solved iteratively utilizing the Gauss-Seidel method. The apparent heat transfer convective coefficient was obtained by adjustment, applying the square minimum method. The model predicts the internal distribution of temperature in the fruits, as well as the medium temperature along the cooling process. The appropriate agreement among the experimental and numeric results, they allow to affirm that the model proposed it characterizes the of cooling process of the fruits appropriately used in the experiments, as well as the values of the apparent heat transfer convective coefficient of value obtained by the adjustment. Economical calculations were also developed, that allowed to obtain the total cost of cooling of orange in systems with forced- air cooling, being compared with it costs in room cooling systems.

Key- words:

Cooling time, Package, Mathematical models, Heat transfer coefficient, Cooling costs

Sumário

Lista de Figuras	xviii
Lista de Tabelas	xxi
Nomenclatura	xxiv
1- Introdução	
1.1- Objetivos	6
1.2- Considerações do capítulo	6
2- Revisão da Literatura	
2.1- Pré-resfriamento	8
2.2- Resfriamento rápido com ar forçado	10
2.3- Resfriamento de produtos agrícolas	12
2.3.1- Tempo de resfriamento	14
2.4- Formulação de modelos	18
2.4.1- Modelos matemáticos para a avaliação resfriamento de produtos agrícolas	18
2.4.2- Modelos analíticos	19
2.4.3- Modelos numéricos	20
2.4.4- Modelos apresentados na literatura	23
2.5-Propriedades termofísicas dos produtos	28

2.5.1- Coeficiente de difusividade térmica	28
2.5.2- Coeficiente convectivo de transferência de calor	31
2.6- Fatores que afetam a taxa de resfriamento	35
2.6.1- Dimensões e forma geométrica	35
2.6.2- Altura do leito	37
2.6.3- Tipo de embalagem	38
2.6.4- Fluxo de ar	42
2.7- Calor de respiração	43
2.8- Umidade relativa	44
2.9- Laranja: aspectos tecnológicos e científicos	45
2.9.1- Características da fruta	45
2.9.2- Laranja Valência	46
2.9.3- Propriedades termofísicas da laranja	48
2.10- Banana: aspectos tecnológicos e científicos	50
2.10.1- Características da fruta	50
2.10.2- Banana Prata	51
2.10.3- Propriedades termofísicas da banana	51
2.11- Custos envolvendo os sistemas de resfriamento	52
2.12- Considerações do capítulo	55
3- Material e Métodos	57
3.1- Análise Experimental	57
3.1.1- Sistema de resfriamento com ar forçado	58
3.1.1.1- Ventilador e características	58
3.1.1.2- Testes preliminares	61
Teste 1- Medição da velocidade de rotação do ventilador	62
Teste 2- Medição da velocidade do ar	62
Teste 3- Determinação da vazão de ar	63
3.1.2- Sistema de resfriamento	63
3.1.3- Sistema de aquisição de dados por computador	65
3.1.4- Termopares. Aferição	66
3.1.5- Produto	67

3.1.5.1- Determinações do peso e das dimensões das laranjas	68
3.1.5.2- Determinações do peso e das dimensões das bananas	70
3.1.6- Medição da temperatura	71
3.1.6.1- Experimentos de resfriamento com laranja	71
3.1.6.2- Temperatura do ar	75
3.1.6.3- Determinação da umidade relativa	75
3.1.7- Determinação do tempo de resfriamento	76
3.1.8- Testes na câmara de estocagem	76
3.1.9- Testes de resfriamento com banana. Termopares	77
3.1.10- Embalagens	80
3.1.11- Medição da velocidade do ar	83
3.1.12- Medição do consumo elétrico da instalação	84
3.1.13- Planejamento experimental	85
3.1.14- Determinação do tamanho da amostra	86
3.1.15- Casualização dos experimentos	87
3.1.16- Estratégia de análise dos resultados	87
3.1.17- Verificação da adequação do modelo de análise de variância	89
3.1.17.1- Resíduos vs. ordem de coleta dos dados	90
3.1.17.2- Probabilidade normal	91
3.2- Modelagem Teórica	
3.2.1- Formulação matemática do processo de transferência de calor	93
3.2.2- Equação de transferência de calor em coordenadas esferoidais prolato	94
3.2.3.- Formulação analítica	97
3.2.4- Resolução numérica	100
3.2.4.1- Formulação numérica	102
3.2.5- Diagrama de blocos	107
3.2.5.1- Dados para a validação do modelo	109
3.2.6- Potencial do software <i>Spherodiff-Transf</i>	109
3.3- Considerações Econômicas	
3.3.1- Considerações iniciais	111

3.3.2- Princípios para desenvolver o cálculo econômico	112
3.3.2.1- Custos fixos (Cf)	112
3.3.2.2- Custos variáveis (Cv)	113
3.3.2.3- Custo total de (CT)	114
3.3.2.4- Custo total por produto resfriado (CTP)	114
3.3.3- Outros dados necessários para desenvolver os cálculos	115
3.3.3.1- Custo por caixa de produto	116
4- Resultados e Discussão	
4.1- Análise Experimental	117
4.1.1- Resultados dos testes preliminares	117
4.1.1.1- Ventilador	117
4.1.1.2- Temperatura e umidade relativa da câmara sem produto	118
4.1.1.3- Testes preliminares no sistema de ar forçado com produto	119
4.1.2- Resultados dos testes de resfriamento de laranja	121
4.1.2.1- Experimentos FAEI, FBEI e FCEI	122
a)- FAEI (fluxo de ar de 1.933 m ³ /h e embalagem com 40% área efetiva de abertura)	124
b)- FBEI (fluxo de ar de 1.450 m ³ /h)	125
c)- FCEI (fluxo de ar de 1.160 m ³ /h)	125
4.1.2.2- Experimentos FAEII, FBEII e FCEII	126
a)- FAEII (fluxo de ar de 1.933 m ³ /h e embalagem com 3,5 % área efetiva de abertura)	128
b)- FBEII (fluxo de ar de 1.450 m ³ /h)	129
c)- FCEII (fluxo de ar de 1.160 m ³ /h)	129
4.1.2.3- Comparação entre todos os experimentos de resfriamento de laranja	131
4.1.3- Análise estatística	133
4.1.3.1- Ponto 1 (TAT _{1/2})	133
4.1.3.2- Ponto 1 (TAT _{7/8})	135
4.1.3.3- Ponto 3 (TAT _{1/2})	136
4.1.3.4- Ponto 3 (TAT _{7/8})	137
4.1.4- Verificação da adequação do modelo de análise de variância	138

4.1.4.1- Análise dos resíduos	138
4.1.4.2- Probabilidade normal	139
4.1.5- Determinação da umidade relativa	141
4.1.6- Determinação das dimensões e peso dos frutas	143
4.1.6.1- Dimensões dos frutos	143
4.1.6.2- Perda de peso dos frutos	144
4.1.7- Velocidade do ar	145
4.1.8- Medição do consumo de energia	147
4.1.9- Testes na câmara de estocagem	148
4.1.10- Resultados dos testes de resfriamento de banana	152
4.1.10.1- Experimento FAEI e FCEI	152
a)- FAEI (fluxo de ar de 1.933 m ³ /h e embalagem com 40% área efetiva de abertura)	154
b)- FCEI (fluxo de ar de 1.160 m ³ /h)	154
4.1.10.2- Experimento FAEII e FCEII	155
a)-FAEII (fluxo de ar de 1.933 m ³ /h e embalagem com 3,2 % área efetiva de abertura)	156
b)- FCEII (fluxo de ar de 1.160 m ³ /h)	157
4.1.10.3- Comparação entre todos os experimentos de resfriamento de banana	158
4.1.11- Análise estatística	159
4.1.11.1- Ponto 1 (TAT _{1/2})	160
4.1.11.2- Ponto 1 (TAT _{7/8})	161
4.1.12- Verificação da adequação do modelo de análise de variância	162
4.1.12.1- Análise dos resíduos	162
4.1.12.2- Probabilidade normal	163
4.1.13- Determinação da umidade relativa	165
4.1.14- Dimensões e peso dos frutos	166
4.1.14.1- Dimensões dos frutos	166
4.1.14.2- Perdas de peso dos frutos	167
4.2- Modelagem Teórica	
4.2.1- Experimentos com laranja	170

4.2.1.1- Experimento FAEI	170
4.2.1.2- Experimento FBEI	177
4.2.1.3- Experimento FCEI	180
4.2.1.4- Experimento FAEII	183
4.2.1.5- Experimento FBEII	186
4.2.1.6- Experimento FCEII	189
4.2.1.7- Comparação os experimentos com laranja	192
4.2.2- Experimentos com banana	196
4.2.2.1- Experimento FAEI	195
4.2.2.2- Experimento FCEI	199
4.2.2.3- Experimento FAEII	201
4.2.2.4- Experimento FCEII	204
4.2.2.5- Comparação entre todos os experimentos com banana	207
4.2.3- Comparação dos resultados em função de Fo e Bi	210
4.3- Considerações Econômicas	
4.3.1- Câmara de estocagem	215
4.3.1.1- Custos fixos	215
4.3.1.2- Custos variáveis	215
4.3.1.3- Custo total anual	216
4.3.1.4- Custo total anual de resfriamento	215
4.3.2- Sistema de resfriamento com ar forçado	217
4.3.2.1- Custos fixos	217
4.3.2.2- Custos variáveis	217
4.3.2.3- Custo total anual	218
4.3.2.4- Custo total anual de resfriamento por caixa	218
4.3.3- Comparação dos sistemas de resfriamento	219
4.3.3.1- Custo incrementado às caixas de laranja por conceito de resfriamento	224
5- Conclusões e Recomendações	
5.1- Conclusões	226
5.2- Sugestões para próximos trabalhos	230

6- Bibliografia

6.1- Referências bibliográficas

231

6.2- Bibliografia consultada

245

Anexos

Anexo A- Fotos

250

Anexo B- Resultados experimentais

260

Anexo C- Resultados da modelagem teórica

273

Lista de Figuras

2.1	Componentes do sistema de resfriamento com ar forçado (Adaptado de Fraser, 1991)	11
2.2	Curva característica de resfriamento --- Temperatura na superfície (Ts); — Temperatura no centro do fruto (Tc) (Adaptado de Chau, 1990)	16
2.3-	Parâmetros que intervêm no resfriamento do fruto	32
2.4	Laranja Valência (Adaptado de Rodriguez, 1980)	47
2.5	Bananeira Prata (Adaptado de Moreira, 1987)	51
3.1	Representação esquemática da dinâmica de desenvolvimento do trabalho	58
3.2	Representação da polia escalonada do ventilador. I- Regime I ($d_2 = 100$ mm), II- Regime II ($d_2 = 200$ mm), e III- Regime III ($d_2 = 250$ mm)	60
3.3	Posições de medida da velocidade do ar na saída do ventilador	62
3.4	Dimensões (mm) e colocação dos dutos ligando o ventilador ao evaporador, e o ventilador ao túnel de resfriamento	64
3.5	Elementos que compõem o sistema de resfriamento e a bancada de experimentos	65
3.6	Representação esquemática da forma e dimensões da laranja	69
3.7	Representação esquemática da forma e dimensões da banana	71
3.8	Representação esquemática em planta dos pontos em que foram colocados os termopares nas caixas B e E	73
3.9	Pontos da medição da temperatura nos experimentos com laranja	73
3.10	Representação esquemática da colocação do termopar no interior e na superfície dos frutos (laranja)	74
3.11	Vista superior das laranjas dispostas no arranjo alternado e a posição onde foram colocados os termopares	75
3.12	Pontos da medição da temperatura nos experimentos com banana	78
3.13	Representação esquemática da colocação do termopar no interior e na superfície do fruto (banana)	79
3.14	Vista superior das bananas dispostas no interior da embalagem e a posição onde foram colocados os termopares	79
3.15	Representação esquemática do formato e dimensões (mm) da caixa plástica usada nos experimentos	80
3.16	Formato das caixas de papelão, dimensões (mm) e localização das aberturas (embalagens para laranja)	81
3.17	Formato das caixas de papelão, dimensões (mm) e localização das aberturas (embalagens para banana)	82
3.18	Representação esquemática das caixas e dos pontos em que foi medida a velocidade do ar	83

3.19	Esquema representativo dos fatores e dos níveis do esquema fatorial 3x2 aplicado nos experimentos	86
3.20	Estratégia de condução da análise do efeito dos fatores da ANOVA	89
3.21	Caracterização de um corpo sólido com geometria esferoidal prolato (Adaptado de Lima, 1999)	94
3.22	Sistema de coordenadas esferoidal prolato (Adaptado de Lima, 1999)	96
3.23	Caracterização do problema físico (Adaptado de Lima, 1999)	101
3.24	Malha numérica no plano físico para corpos com geometria em que $L_2/L_1 = 1,05$ (laranja)	105
3.25	Malha numérica no plano físico para corpos com geometria em que $L_2/L_1 = 4,0$ (banana)	106
3.26	Diagrama de blocos do programa computacional <i>Spherodiff-Transf</i>	108
4.1	Comportamento da temperatura do ar (T_a), da temperatura do bulbo úmido (T_{bu}), e da umidade relativa no interior da câmara sem produtos	119
4.2	Curvas de resfriamento obtidas nos testes preliminares com laranja	120
4.3	Comportamento da temperatura do ar na nova montagem experimental	121
4.4	Curvas de resfriamento de laranjas submetidas ao tratamento FAEI	124
4.5	Curvas de resfriamento de laranjas submetidas ao tratamento FBEI	125
4.6	Curvas de resfriamento de laranjas submetidas ao tratamento FCEI	125
4.7	Curvas de resfriamento de laranjas submetidas ao tratamento FAEII	128
4.8	Curvas de resfriamento de laranjas submetidas ao tratamento FBEII	129
4.9	Curvas de resfriamento de laranjas submetidas ao tratamento FCEII	129
4.10	Curvas de resfriamento obtidas em todos os testes de resfriamento de laranja (ponto 1)	131
4.11	Comportamento dos resíduos com respeito á ordem e coleta dos dados, ponto 1 (experimentos com laranja)	139
4.12	Faixa de dispersão dos resíduos contra a média dos tratamentos	139
4.13	Probabilidade dos resíduos para o ponto 1	141
4.14	Comportamento da umidade relativa média em todos os tratamentos (laranja)	143
4.15	Comportamento das perdas de peso das laranjas em todos os tratamentos	145
4.16	Representação dos pontos em que foi medida a velocidade do ar	145
4.17	Curvas de resfriamento das laranjas acondicionadas na embalagem EI na câmara de estocagem	148
4.18	Curvas de resfriamento das laranjas acondicionadas na embalagem EII na câmara de estocagem	149
4.19	Curvas de resfriamento das laranjas acondicionadas na embalagem EI e EII na câmara de estocagem	150
4.20	Curvas de resfriamento das laranjas nos tratamentos com ar forçado (FA, FB, FC) e na câmara de a estocagem (EI, EII)	151
4.21	Curvas de resfriamento das bananas submetidas ao tratamento FAEI	154
4.22	Curvas de resfriamento das bananas submetidas ao tratamento FCEI	154
4.23	Curvas de resfriamento das bananas submetidas ao tratamento FAEII	156
4.24	Curvas de resfriamento das bananas submetidas ao tratamento FCEII	157
4.25	Curvas de resfriamento obtidas em todos os testes de resfriamento de banana (ponto 1)	158
4.26	Comportamento dos resíduos com respeito á ordem e coleta dos dados, ponto 1 (experimentos com banana)	163
4.27	Faixa de dispersão dos resíduos contra a média dos tratamentos	163

4.28	Probabilidade dos resíduos para o ponto 1	164
4.29	Comportamento da umidade relativa média em todos os tratamentos (banana)	166
4.30	Comportamento das perdas de peso nas bananas em todos os tratamentos	168
4.31	Comportamento da TAT experimental e teórica, experimento FAEI (laranja)	171
4.32	Comportamento da TAT média, experimento FAEI	173
4.33	Distribuição da TAT no fruto, para três instantes de tempo (ponto 1)	175
4.34	Distribuição da TAT no fruto, para três instantes de tempo (ponto 3)	176
4.35	Comportamento da TAT experimental e teórica, experimento FBEI	177
4.36	Comportamento da TAT média, experimento FBEI	178
4.37	Distribuição da TAT no fruto, para três instantes de tempo (ponto 1)	179
4.38	Comportamento da TAT experimental e teórica, experimento FCEI	180
4.39	Comportamento da TAT média, experimento FCEI	181
4.40	Distribuição da TAT no fruto, para três instantes de tempo (ponto 1)	183
4.41	Comportamento da TAT experimental e teórica, experimento FAEII	183
4.42	Comportamento da TAT média, experimento FAEII	184
4.43	Distribuição da TAT no fruto, para três instantes de tempo (ponto 1)	186
4.44	Comportamento da TAT experimental e teórica, experimento FBEII	187
4.45	Comportamento da TAT média, experimento FBEII	188
4.46	Distribuição da TAT no fruto, para três instantes de tempo (ponto 1)	189
4.47	Comportamento da TAT experimental e teórica, experimento FCEII	190
4.48	Comportamento da TAT média, experimento FCEII	191
4.49	Distribuição da TAT no fruto, para três instantes de tempo (ponto 1)	192
4.50	Comportamento da TAT experimental e teórica, experimento FAEI (banana)	196
4.51	Comportamento da TAT média, experimento FAEI	197
4.52	Distribuição da TAT no fruto, para três instantes de tempo (ponto 1)	198
4.53	Distribuição da TAT no fruto, para três instantes de tempo (ponto 3)	199
4.54	Comportamento da TAT experimental e teórica, experimento FCEI	200
4.55	Comportamento da TAT média, experimento FCEI	201
4.56	Distribuição da TAT no fruto, para três instantes de tempo (ponto 1)	202
4.57	Comportamento da TAT experimental e teórica, experimento FAEII	203
4.58	Comportamento da TAT média, experimento FAEII	204
4.59	Distribuição da TAT no fruto, para três instantes de tempo (ponto 1)	205
4.60	Comportamento da TAT experimental e teórica, experimento FCEII	206
4.61	Comportamento da TAT média, experimento FCEII	207
4.62	Distribuição da TAT no fruto, para três instantes de tempo (ponto 1)	208
4.63	Comportamento do Bi e do Fo para relação de forma de $L_2/L_1 = 1,05$ (experimentos com laranja, $\alpha = 1,06 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$)	212
4.64	Comportamento do Bi e do Fo para relação de forma de $L_2/L_1 = 4,00$ (experimentos com banana, $\alpha = 1,25 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$)	214
4.65	Custo total em função do tempo de resfriamento. CE- câmara de estocagem; CAF- câmara de ar forçado	221
4.66	Custo de resfriamento anual em função do tempo de operação do sistema, para os dois tipos de embalagens usadas	222
4.67	Custo de resfriamento anual em função do número de caixas resfriadas, para os dois tipos de sistemas	224

Lista de Tabelas

1.1	Projeção de crescimento de demanda de frutas no Brasil nos próximos anos	2
2.1	Valores da difusividade térmica de alguns frutos	29
2.2	Propriedades térmicas e físicas de algumas frutas e hortaliças (temperatura média de 35°C)	29
2.3	Valores da difusividade citados pela literatura (resfriamento com ar forçado)	30
2.4	Valores do hc citados pela literatura (resfriamento com ar forçado)	35
2.5	Condições para estocagem de algumas frutas	45
2.6	Composição nutricional de algumas frutas	48
2.7	Propriedades termofísicas da laranja	49
2.8	Propriedades termofísicas da banana	52
2.9	Valores do custo de resfriamento em sistemas de ar forçado	54
3.1	Valores dos parâmetros de operação do ventilador do sistema com ar forçado	61
3.2	Ordem de coleta dos experimentos com laranja	87
3.3	Ordem para cálculo dos resíduos	90
3.4	Valores da difusividade e condutividade usados na validação do modelo matemático	109
3.5	Dados fornecidos pelos fabricantes da câmara de resfriamento usada nos experimentos (dados subministrados pela RECROSUL, junho 1999)	115
3.6	Dados subministrados pelos fabricantes do ventilador do sistema de resfriamento com ar forçado (TORIN, junho 1999)	115
4.1	Valores médios de alguns parâmetros do ventilador	118
4.2	Valor teórico (T) e experimental (E) dos parâmetros medidos	118
4.3	Tempo médio de resfriamento para todos os tratamentos nos testes preliminares	120
4.4	Temperatura (°C) em que foi atingida a condição $TAT_{1/2}$ e $TAT_{7/8}$	123
4.5	Tempo de resfriamento nos pontos monitorados nos experimentos FAEI, FBEI e FCEI	126
4.6	Valores (%) da diferença entre o tempo de resfriamento para cada ponto	126
4.7	Temperatura (°C) em que foi atingida a condição $TAT_{1/2}$ e $TAT_{7/8}$	127
4.8	Tempo de resfriamento nos pontos monitorados nos experimentos FAEI, FBEI e FCEI	130
4.9	Valores (%) da diferença entre o tempo de resfriamento para cada ponto	130
4.10	Tempo de resfriamento em todos os tratamentos (experimentos com laranja)	131
4.11	Diferença (%) do tempo de resfriamento entre os diferentes tratamentos	132
4.12	Resultados da aplicação dos testes de hipóteses e da ANOVA para a interação (ponto 1, $TAT_{1/2}$)	133
4.13	Resultados da aplicação dos testes de hipóteses e da ANOVA para a interação	134
4.14	Resumo dos testes de hipótese (influência dos fluxos)	134
4.15	Resumo dos testes de hipóteses (influência da embalagem)	135
4.16	Resumo dos testes de hipóteses e da ANOVA (ponto 1, $TAT_{7/8}$)	135

4.17	Resumo dos testes de hipóteses e da ANOVA (ponto 3, TAT _{1/2})	136
4.18	Resumo dos testes de hipóteses e da ANOVA (ponto 3, TAT _{7/8})	137
4.19	Parâmetros de cálculo do coeficiente de correlação (Rc) e da normalidade (Ei)	140
4.20	Umidade relativa para cada tratamento (experimentos com laranja)	142
4.21	Resumo dos testes de hipóteses e da ANOVA (umidade relativa, %)	142
4.22	Dimensões dos frutos (laranja)	143
4.23	Valores do peso e das perdas em cada tratamento	144
4.24	Resumo dos testes de hipóteses e da ANOVA (perdas de peso, g)	144
4.25	Valores médios da velocidade do ar e do desvio padrão (m/s)	146
4.26	Consumo de energia dos componentes do sistema de refrigeração (câmara de estocagem)	147
4.27	Consumo de energia do ventilador nas três posições de rotação da polia (220 v)	148
4.28	Valores do tempo de resfriamento (min) para os testes na câmara de estocagem (laranja)	150
4.29	Valores (%) da diferença entre o tempo de resfriamento para cada ponto	150
4.30	Temperatura (°C) em que foi atingida a condição TAT _{1/2} e TAT _{7/8}	153
4.31	Tempo de resfriamento (min), para FAEI e FCEI	155
4.32	Valores (%) da diferença entre o tempo de resfriamento para cada ponto	155
4.33	Temperatura (°C) em que foi atingida a condição TAT _{1/2} e TAT _{7/8}	156
4.34	Tempo de resfriamento (min), para FAEII e FCEII	157
4.35	Valores (%) da diferença entre o tempo de resfriamento para cada ponto	158
4.36	Tempo de resfriamento em todos os tratamentos (banana)	159
4.37	Diferença (%) do tempo de resfriamento entre os diferentes tratamentos	159
4.38	Resultados da aplicação dos testes de hipóteses e da ANOVA para a interação (ponto 1, TAT _{1/2})	160
4.39	Resumo dos testes de hipóteses e da ANOVA (ponto 1, TAT _{7/8})	161
4.40	Ordem de realização dos experimentos com banana	162
4.41	Parâmetros de cálculo do coeficiente de correlação (Rc) e da normalidade (Ei)	164
4.42	Umidade relativa para cada tratamento (experimentos com banana)	165
4.43	Resumo dos testes de hipóteses e da ANOVA (umidade relativa, %)	165
4.44	Dimensões dos frutos (banana)	166
4.45	Valores do peso e das perdas em cada tratamento	167
4.46	Resumo dos testes de hipóteses e da ANOVA (perdas de peso, g)	167
4.47	Valores do hc, de ERQ e do S, experimento FAEI	172
4.48	Tempo de resfriamento (min) determinado com TAT _m e diferença com respeito a TAT _e	173
4.49	Valores do hc, de ERQ e do S, experimento FBFI	177
4.50	Tempo de resfriamento (min) determinado com TAT _m e diferença com respeito a TAT _e	178
4.51	Valores do hc, de ERQ e do S, experimento FCEI	181
4.52	Tempo de resfriamento (min) determinado com TAT _m e diferença com respeito a TAT _e	181
4.53	Valores do hc, de ERQ e do S, experimento FAEII	184
4.54	Tempo de resfriamento (min) determinado com TAT _m e diferença com respeito a TAT _e	184
4.55	Valores do hc, de ERQ e do S, experimento FBFI	187
4.56	Tempo de resfriamento (min) determinado com TAT _m e diferença com respeito a TAT _e	187

4.57	Valores do hc, de ERQ e do S, experimento FCEII	190
4.58	Tempo de resfriamento (min) determinado com TATm e diferença com respeito a TATe	190
4.59	Valores do hc, de ERQ e do S, para todos os tratamentos (laranja)	193
4.60	Tempo de resfriamento (min) experimental e numérico (experimentos com laranja)	194
4.61	Diferença (%) entre o tempo de resfriamento teórico e experimental	195
4.62	Valores do hc, de ERQ e do S, experimento FAEI (banana)	197
4.63	Tempo de resfriamento (min) determinado com TATm e diferença com respeito a TATe	197
4.64	Valores do hc, de ERQ e do S, experimento FCEI	200
4.65	Tempo de resfriamento (min) determinado com TATm e diferença com respeito a TATe	201
4.66	Valores do hc, de ERQ e do S, experimento FAEI	203
4.67	Tempo de resfriamento (min) determinado com TATm e diferença com respeito a TATe	204
4.68	Valores do hc, de ERQ e do S, experimento FCEII	206
4.69	Tempo de resfriamento (min) determinado com TATm e diferença com respeito a TATe	207
4.70	Valores do hc, de ERQ e do S, em todos os tratamentos (banana)	209
4.71	Tempo de resfriamento (min) experimental e numérico (experimentos com banana)	210
4.72	Diferença (%) entre o tempo de resfriamento teórico e experimental	211
4.73	Valores da relação A/V para a laranja e a banana	213
4.74	Parâmetros utilizados para o cálculo dos custos fixos (câmara de estocagem)	215
4.75	Parâmetros utilizados para o cálculo dos custos variáveis	216
4.76	Custos anuais para a câmara de estocagem	216
4.77	Parâmetros considerados para o cálculo do CTP	217
4.78	Parâmetros para o cálculo dos custos fixos (sistema com ar forçado)	218
4.79	Parâmetros de cálculo dos custos variáveis	218
4.80	Custos anuais total o sistema de resfriamento com ar forçado	219
4.81	Parâmetros para o cálculo do custo total anual de resfriamento (CTP)	220
4.82	Custo de resfriamento para os dois tipos de embalagens usadas nos os tipos de sistemas de resfriamento	223
4.83	Valor do custo incrementado por conceito de energia em cada sistema de resfriamento	224
4.84	Custo total por caixa incrementado com o valor do custo de resfriamento	225

Nomenclatura

Letras latinas

A-	área	[m ²]
A₀, A_P, N_A, A_S, A_E, A_W, A_P^O	constantes	[-]
°Brix-	graus de concentração	[%]
Bi -	número de Biot	[-]
C-	consumo por hora de energia	[kwh]
C_f	custos fixos	[R\$]
C_i-	custo inicial do investimento	[R\$]
C_p-	calor específico	[J/kg °C]
C_v-	custos variáveis	[R\$]
D-	depreciação	[R\$/ano]
d-	quantidade de dias de trabalho por ano	[dias/ano]
d₁ -	diâmetro vertical do produto, diâmetro da polia	[m]
d₂ -	diâmetro horizontal do produto, diâmetro da polia	[m]
dT/dt-	taxa de difusão da temperatura	[1/s]
E -	custo da energia consumida	[R\$/ano]
e -	resíduos	[min]
Ei-	distribuição normal esperada na equação 3.18	[min]
esf-	esfericidade dos produtos	[-]
f -	porcentagem do C _i , como valor final presumido	[R\$/ano]
Fo-	número de Fourier	[-]
g-	aceleração da gravidade	[m/s ²]
G'-	taxa mássica de fluxo de ar	[kg/s m ²]
H-	altura	[m]
hc-	coeficiente convectivo de transferência de calor	[W/ m ² °C]
Ht-	quantidade de horas de trabalho	[h/ano]
i -	taxa anual de juros	[%]
J-	custo dos juros na equação 3.56	[R\$/ano]
j-	fator logarítmico na equação 2.9 a 2.13	[-]
J₀, J₁	funções de Bessel de primeira ordem na equação 2.18 e 2.19	[-]
ka-	condutividade térmica do ar	[W/ m °C]
kp-	condutividade térmica do produto	[W/ m °C]
L-	comprimento	[m]
L₁, L₂-	dimensões do esferoide prolato	[m]
M-	massa, peso	[kg]

M_f	peso final	[kg]
M_i	peso inicial	[kg]
Mo	custo das horas de trabalho	[R\$/ano]
Mp	perdas de peso nos produtos	[kg]
n	número de amostras	[-]
N	velocidade de rotação das polias	[rpm]
N, S, E, W, P	pontos nodais	[-]
nv	vida útil adicional do bem de capital	[anos]
Pe	perímetro	[cm]
Pr	preço da energia consumida	[R\$/kwh]
Q	vazão de ar	[m ³ /h]
q°	taxa de geração de calor	[W]
Qo	capacidade do compressor	[J/s]
R	dimensão característica	[m]
r	raio	[m]
Rc	coeficiente de correlação calculado	[-]
Re	número de Reynolds	[-]
Rm	custos de reparos e manutenção	[R\$]
rm	percentagem dedicado à manutenção	[%]
Rt	coeficiente de correlação tabelado	[-]
S	desvio padrão	[-]
S²	variância	[(°C/°C) ²]
So	salário	[R\$]
ST	fator que incorpora à equação 3.48 o efeito convectivo de calor na superfície do sólido	[-]
t	tempo	[min]
T	temperatura	[°C]
Ta	temperatura do ar	[°C]
Tc	temperatura no centro do produto	[°C]
Ti	temperatura inicial	[°C]
TR	taxa de resfriamento	[-]
u	número de horas de uso de um bem	[h/ano]
UR	umidade relativa	[%]
V	volume	[m ³]
v	velocidade	[m/s]
W	conteúdo de umidade	[%]
x, y, z	coordenadas cartesianas	[m]
\bar{x}_{ij}	média de cada tratamento na equação 3.18	[min]
x_{ij}	valor de uma observação na equação 3.18	[min]
z	percentual da distribuição normal padronizada	[%]

Letras Gregas

α	difusividade térmica	[m ² /s]
δ	comprimento do intervalo de confiança	[-]
η	coordenada angular (⊥ x)	[-]
ζ	coordenada angular (⊥ z)	[-]

θ -	coordenada angular	[-]
ξ -	coordenada radial	[-]
ϕ -	coordenada radial	[-]
ρ -	densidade	[kg/m ³]
φ -	fluxo difusivo por unidade de área	[1/m ²]
τ -	nível de significância estatística	[%]
ν -	viscosidade cinemática	[m ² /s]
∇	gradiente	[-]
Δ, δ -	variação	[-]
μ, ϕ, ω -	coordenadas esferoidal prolato	[-]
μ_n	coeficientes na equação 2.16 a 2.21	[-]
ξ_0, η_0, ω_0 -	valores constantes das coordenadas	[-]
$\delta T/\delta t$ -	taxa de difusão da temperatura	[1/s]

Superescritos

- * - adimensional
- m- constante
- n- n-ésima iteração em cada instante de tempo

Subscritos

- $\eta; \xi; \zeta$ - direção perpendicular ao fluxo
- a- ar
- bu- bulbo úmido
- c- centro
- e, n, s, w- faces dos pontos nodais na seção 3.2
- e- experimental
- f- final, superfície
- ij- valores para os tratamentos, posição do ponto nodal na malha
- n- numérico
- P- ponto nodal P
- s - superfície

Abreviações

- CT- custo total anual [R\$/ano]
- CTP- custo total de resfriamento [R\$/caixa]
- ERQ- erro quadrado mínimo
- exp- experimental
- Fc- teste F, valor calculado (análise estatística)
- Ft- teste F, valor tabelado
- H1- hipótese alternativa
- H0- hipótese nula (análise estatística)
- num- numérico

TAT- taxa adimensional de temperatura

TAT_{1/2}- taxa de temperatura que corresponde-se com o tempo de meio resfriamento

TAT_{7/8}- taxa de temperatura que corresponde-se com o tempo dos sete oitavos do resfriamento

Capítulo 1

Introdução

O problema da produção e conservação de alimentos, é uma questão que, há muitas décadas, vem chamando a atenção do mundo todo, em todos os níveis, pela sua relação direta com a situação econômica e social dos países.

O Brasil é hoje um dos maiores produtores agrícolas do mundo, destacando-se na área de produção de frutas, ocupando um papel destacado no contexto internacional. A título de exemplo, o mercado da fruticultura brasileira têm o primeiro lugar na produção de laranja, banana e mamão, mantendo posições relevantes para abacaxi, tangerina, manga, maçã e uva. Esta situação é amplamente favorecida pelas condições climatológicas do país e a área disponível para o plantio. Estima-se que atualmente a base agrícola da cadeia produtiva das frutas abrange 2 milhões de hectares, gera 4 milhões de empregos diretos e um PIB agrícola de US\$ 11 bilhões.

Sob o ponto de vista econômico, quando faz-se uma análise dos 33 milhões de toneladas de frutas produzidas em Brasil, que constam das estatísticas, percebe-se que metade são de laranjas e 20% de banana, portanto 70% entre as duas frutas. No caso da laranja, cerca de 65% da produção nacional destinam-se ao processamento industrial, sendo o Brasil o principal exportador de suco concentrado.

No campo das exportações, em 1998 o volume de frutas *in natura* exportadas, geraram divisas

em torno de US\$142,4 milhões para um volume de 296,8 mil toneladas contra US\$ 131,5 milhões, correspondentes à 270 mil toneladas em 1997, o que aponta um crescimento de 8,3 % em volume e 9,9 % em valor (IBRAF, 1999).

A título de exemplo na tabela 1.1, mostra-se a demanda no mercado interno de algumas frutas em 1998, e a projeção para os próximos anos.

Tabela 1.1: Projeção de crescimento de demanda no consumo interno de frutas no Brasil nos próximos anos

Fruta	Demanda (t)		
	1998	2000	2002
Banana	10.766.000	13.240.000	16.000.000
Laranja	2.938.745	3.000.000	3.100.000
Manga	271.000	364.000	459.000
Mamão	78.000	101.000	118.000

FONTE: IBRAF, 1999

Observa-se que a demanda de banana vai crescer em quase 40%, e que a demanda de laranja também é alta, se comparada com frutas como a manga e o mamão. Espera-se também que a demanda do mercado de exportações aumente de 0,6%, do total produzido em 1998, para 1,3% em 2002, para a banana. Por outro lado as exportações de laranja devem ter um ligeiro aumento de 2,1% para 2,3% até o ano 2002.

Como pode-se observar a banana e a laranja são frutas que se destacam tanto na produção como na comercialização, e ambas têm grande aceitação por parte da população por serem saborosas, de fácil consumo e preço baixo.

A Companhia de Entrepostos e Abastecimento do Estado de São Paulo (CEAGESP), que é o maior entreposto de América Latina, comercializa diariamente entre R\$ 4 e R\$ 5 milhões, movimentando 60% do abastecimento total da região Metropolitana do Estado de São Paulo e 26% do país. Em 1997 comercializou, 4.962,30 toneladas de banana à 0,39 R\$/kg e 27.957,80 toneladas de laranja à 0,23 R\$/kg; contra 6.604,90 toneladas de maçãs, à um preço de 0, 71 R\$/kg (Circuito Agrícola, 1998).

Entretanto, mesmo que a produção de frutas no Brasil atinja valores significativos, o desperdício nas diferentes etapas, desde o processo de colheita até a distribuição e venda é grande. A estrutura deficitária dos portos, a falta de tratamento adequado após a colheita, os equipamentos insuficientes, assim como a não utilização de resfriamento adequado, incluindo o transporte frigorificado para a movimentação da produção, são alguns dos grandes problemas enfrentados atualmente.

Estima-se que o valor das perdas anuais de produtos frescos, incluindo as frutas, por amadurecimento precoce e por falta de tratamento adequado após a colheita, pode chegar até 50%; dependendo do produto (Anexo A, Foto 1). Entre as várias causas que originam estas perdas estão, a não utilização de armazenamento refrigerado após a colheita (EMBRAPA, 1993; Carraro & Mancuso, 1994; IBRAF, 1996).

Quando os produtos tornam-se impróprios para o consumo humano, têm-se perdas diretas e indiretas, devido não só a diminuição do valor de comercialização dos mesmos, mas também pela perda de toda a energia utilizada na produção destes.

A título de exemplo mostram-se dados referidos por Stout (1980), em estudo feito para a FAO, no qual se refere que em países em desenvolvimento da América do Sul, dos 8.147×10^{15} J da energia total empregada, 313×10^{15} J pertencem a agricultura, representando aproximadamente 24%. Esses valores compreendem todos os insumos necessários empregados desde o campo até o produto chegar ao consumidor: eletricidade, transporte, maquinaria, fertilizantes, irrigação, combustíveis, mão-de-obra, etc.

E como diminuir as perdas? Têm-se comprovado, através de vários estudos que a refrigeração é um dos métodos mais eficientes para conservar os produtos após a colheita e até o consumo, com manutenção da qualidade. Altas temperaturas são prejudiciais à qualidade das frutas, quanto maior é esta, maior será a taxa respiratória, o que afeta diretamente todos os processos vitais após a colheita e, em particular, para as frutas que possuem uma vida naturalmente curta, como são as das frutas. Por outro lado, não basta submeter o produto à refrigeração logo após a colheita, se depois desse momento em diante não continuasse um tratamento adequado durante o transporte, estocagem e

inclusive durante o tempo que fica exposto em supermercados até ser consumido.

Precisa-se então de uma adequada “Cadeia do Frio” (CF), que está definida como o conjunto de sistemas que garantem a manutenção da qualidade dos produtos desde o momento da colheita até o consumo. São elementos fundamentais desta cadeia: as câmaras e sistemas de resfriamento rápido e estocagem, caminhões frigorificados para o transporte terrestre, *containers* frigoríficos para o transporte marítimo, aéreo ou ferroviário, expositores refrigerados de supermercados e geladeiras domésticas e industriais.

Nos países onde tem-se implementado corretamente a CF, existem diferentes técnicas de resfriamento, os produtos podem levar até menos de duas horas para ser resfriados após a colheita, nestes países o valor das perdas pode estar entre 5 e 25%, aproximadamente (Noomhorm & Ting, 1990).

A permanência dos produtos dentro da CF garante várias vantagens como: o consumo de um produto de melhor qualidade, menos perdas para o comerciante, aumento do tempo de comercialização, o que significa um maior benefício para o agricultor, com menos desperdício e maiores ganhos (Kader, 1992).

Para este fim muitos são os sistemas e métodos de resfriamento que podem ser usados. Dentre os mais comuns encontram-se: sistemas de resfriamento com ar forçado, com água gelada, a vácuo, entre outros. Dos sistemas existentes na atualidade, um dos mais usados, pelas vantagens que apresenta, é o sistema que utiliza ar forçado. Podendo-se citar entre estas vantagens: a facilidade de operação e montagem, eficiência do resfriamento, assim como pela abrangência quanto à variedade de produtos que podem ser resfriados neste tipo de sistema.

Existe uma relação entre o tempo e a temperatura que caracteriza a eficiência do resfriamento. Ou seja, quanto menor for o tempo de resfriamento, maior será a eficiência do sistema, o que se traduz em produtos que mantêm a sua qualidade, com uma vida útil de prateleira maior.

Para que o tempo de resfriamento seja menor muitos são os fatores a serem considerados.

Dentre esses fatores destacam-se os que são inerentes à cinética da transferência de calor, o que envolve parâmetros relacionados com a fruta: dimensões, tipo de embalagem e posição da fruta no interior destas. E parâmetros que envolvem o meio de resfriamento entre eles: a velocidade do ar, a temperatura de resfriamento, a umidade relativa da câmara, e o fluxo de ar. A adequada inter-relação de todos estes parâmetros garante a eficiência do processo de resfriamento.

A determinação do tempo de resfriamento pode ser feita de forma experimental ou teórica. Várias soluções analíticas ou numéricas da equação de transferência de calor, com condições de contorno constantes ou do tipo convectiva, para várias geometrias podem ser encontradas na literatura.

Na prática, os produtos biológicos, dentre eles as frutas, não apresentam forma geométrica perfeita o que traz consigo a introdução de erros quando aplicado um específico sistema de coordenadas, para a resolução numérica do problema. Isto pode acarretar a introdução de erros quando são determinadas algumas das propriedades de transporte, que caracterizam o processo de transferência de calor durante o resfriamento.

Por outro lado, a implantação de sistemas de resfriamento precisa de investimentos. Sistemas mais eficientes podem garantir menor custo, e ao mesmo tempo não afetar significativamente o preço final dos produtos. Um adequado sistema de pré-resfriamento, antes da armazenagem em câmaras frigoríficas comuns, garante que o consumo de energia durante a operação antes citada seja menor.

O Brasil possui as condições necessárias para se tornar, além do grande produtor que já é, um grande exportador de frutas, com a implantação de adequadas técnicas de tratamento pós-colheita. Tudo isto traz consigo também a diminuição das perdas até níveis compatíveis, podendo abastecer de forma suficiente o mercado interno, com a qualidade exigida pelo consumidor.

Este trabalho compreende uma análise teórico/experimental do processo de resfriamento em frutas com geometria diferente, adotando como estudo de caso duas frutas de grande produção e consumo, laranja e banana, num sistema de resfriamento com ar forçado.

1.1- Objetivos

Para atingir os resultados esperados foram propostos os seguintes objetivos:

- Determinação do tempo de resfriamento dos frutos submetidos à diferentes taxas de ar e tipos de embalagens, num sistema com ar forçado;
- Determinação de parâmetros como: velocidade do ar e umidade relativa, assim como a perda de peso dos frutos após o resfriamento;
- Validação de um modelo matemático, em coordenadas esferoidal prolato, comprovando a sua efetividade para caracterizar o resfriamento de frutas com geometria diferente (esférica e cilíndrica);
- Obtenção do coeficiente de transferência de calor por ajuste a partir dos resultados experimentais;
- Estudo da viabilidade do sistema de resfriamento proposto. Cálculo e avaliação dos custos envolvendo o produto.

1.2- Considerações do capítulo

Neste ponto, considerou-se necessário apontar alguns aspectos de interesse:

- Após a colheita, o resfriamento deve ser o feito imediatamente, garantindo a conservação da qualidade de frutas *in natura*.
- Embora no Brasil a produção de frutas atinja valores elevados, o desperdício é alarmante e poderia ser diminuído consideravelmente.
- As perdas diretas, de produtos, reflete-se em indiretas, com um grande desperdício de energia e recursos, a qual não poderá ser recuperada.
- É importante ter produtos selecionados, que tenham sabor, bom aspecto visual, adequada conservação pós-colheita e condicionados em embalagens adequadas.

- Dentre a grande variedade de frutas produzidas no país, destacam-se a laranja e a banana, como duas das mais consumidas e, com um mercado de exportações promissor.

- A implantação de uma adequada CF, utilizando sistemas de resfriamento eficientes e adaptados às condições nacionais, o estudo das principais questões que envolvem o processo de resfriamento em sistemas com ar forçado, assim como a sua divulgação para melhor entendimento e aplicação, deve ser um desafio dos tempos atuais.

Capítulo 2

Revisão da Literatura

A pesquisa bibliográfica apresentada foi realizada com o auxílio das bases de dados: COMPENDEX, FOOD SCIENCE TECHNOLOGY (FSTA) e AGRIS, entre outros, no período de 1980 a 1999. Também foram recuperados trabalhos da década do 60 e 70, quando foram relatadas as primeiras pesquisas na área de resfriamento de alimentos. Outros recursos importantes na atualidade, como a *Internet*, também foram utilizados, com o propósito de ter acesso a outras fontes bibliográficas.

2.1- Pré-resfriamento

O pré-resfriamento ou resfriamento rápido, é um método que têm como objetivo a retirada rápida do calor de campo do produto recém colhido, submetendo-o ao processo de resfriamento, antes que seja armazenado em câmaras comuns ou transportado. Este processo pode ser realizado em tempos razoavelmente curtos, que vão desde minutos até algumas horas (Spanol & Sigrist, 1988; Mitchell, 1992).

A diminuição da temperatura até níveis compatíveis com o produto traz consigo o retardamento da deterioração dos frutos, adiando o desenvolvimento de microorganismos, e diminuindo o processo de respiração e de transpiração, os quais são responsáveis pelo rápido amadurecimento e conseqüentemente perda de qualidade dos frutos.

Após a colheita, o resfriamento rápido deve ser o primeiro passo a ser dado, não devendo ser usado, para estes fins, câmaras comuns, pois estas não possuem o movimento de ar necessário para o resfriamento rápido do produto. O uso de resfriamento rápido após a colheita, além de garantir melhor qualidade para os produtos, permite reduzir a quantidade de energia que é gasta durante o armazenamento (Sastry & Buffington, 1983; ASHRAE, 1994).

Entre os diferentes sistemas que existem na atualidade, para realizar o resfriamento rápido de frutas e hortaliças, encontram-se: resfriamento à vácuo (*vacuum cooling*), resfriamento com água gelada (*hydrocooling*), resfriamento com gelo (*ice cooling*) e resfriamento com sistemas de ar forçado (*forced air cooling*) (Fraser, 1991; Kader, 1992; ASHRAE, 1994).

O método de resfriamento deve ser escolhido em dependência da perecibilidade e requerimento de refrigeração do produtos, sua adaptabilidade ao método, disponibilidade de instalações e equipamentos, adequada compatibilidade entre o método usado e a embalagem, temperatura do produto após a colheita, entre outros fatores.

Frutas como os cítricos, embora tenham vida pós-colheita maior, se comparado com o morango, pêssego e banana, devem ser resfriadas aplicando técnicas de resfriamento rápido, o que justifica-se pela manutenção da qualidade e frescor durante o período de estocagem (Kader, 1992). Segundo Trelea *et al.* (1998), na França, aproximadamente 40% das frutas produzidas por ano, são resfriadas após a colheita, em sistemas de resfriamento rápido.

Atualmente os sistemas de resfriamento com ar forçado têm demonstrado ser eficientes se comparados com outros métodos. Resultados de experimentos realizados avaliando diferentes sistemas de resfriamento, demonstram que depois daqueles à água gelada e vácuo, o mais eficiente é o que utiliza ar forçado (Fraser, 1991; Kader, 1992).

2.2- Resfriamento rápido com ar forçado

Estes sistemas estão compostos de ventiladores, associados à câmara de refrigeração da câmara. O ar resfriado deve envolver totalmente o produto, para permitir uma eficiente troca de calor.

Diversos experimentos revelam que este tipo de resfriamento pode ser aplicado numa infinidade de produtos como: maçã, laranja, tangerina, morango, aipo, couve-flor, uva, espinafre, banana, entre outros (Kopelman *et al.*, 1966; Soule *et al.* 1966; Smith *et al.*, 1970; Arifin & Chau, 1987; Ohling, 1990).

O resfriamento com ar forçado geralmente é realizado em túneis dentro da própria câmara, e não deve ser confundido com o resfriamento realizado em câmaras frigoríficas comuns, onde o ar é simplesmente circulado pelo produto, com baixas velocidades.

Para que o processo de resfriamento com ar forçado seja eficiente, o produto deve estar exposto ao meio de resfriamento de uma forma adequada. A máxima área de superfície do produto deve ficar em contato com o ar resfriado, para permitir uma efetiva troca de calor, com uma determinada taxa de fluxo de ar. Para garantir esta eficiência no resfriamento, as embalagens devem ser adequadas a este tipo de resfriamento (Fraser, 1991).

Na figura 2.1 mostram-se os componentes do sistema de resfriamento com ar forçado. Estes sistemas, são montados no interior de câmaras de resfriamento, adicionando um ventilador que funciona como exaustor na parte frontal do volume de caixas.

O ventilador força o ar resfriado que sai do evaporador a passar apenas entre o volume de caixas, atravessando transversalmente em alta velocidade por entre os frutos, onde então acontece o processo de transferência de calor. Depois da troca de calor, o ar retorna pelo corredor existente entre as caixas, para o evaporador. Uma lona é colocada acima do volume de caixas e na parte frontal, garantindo assim o fechamento do circuito de circulação do ar.

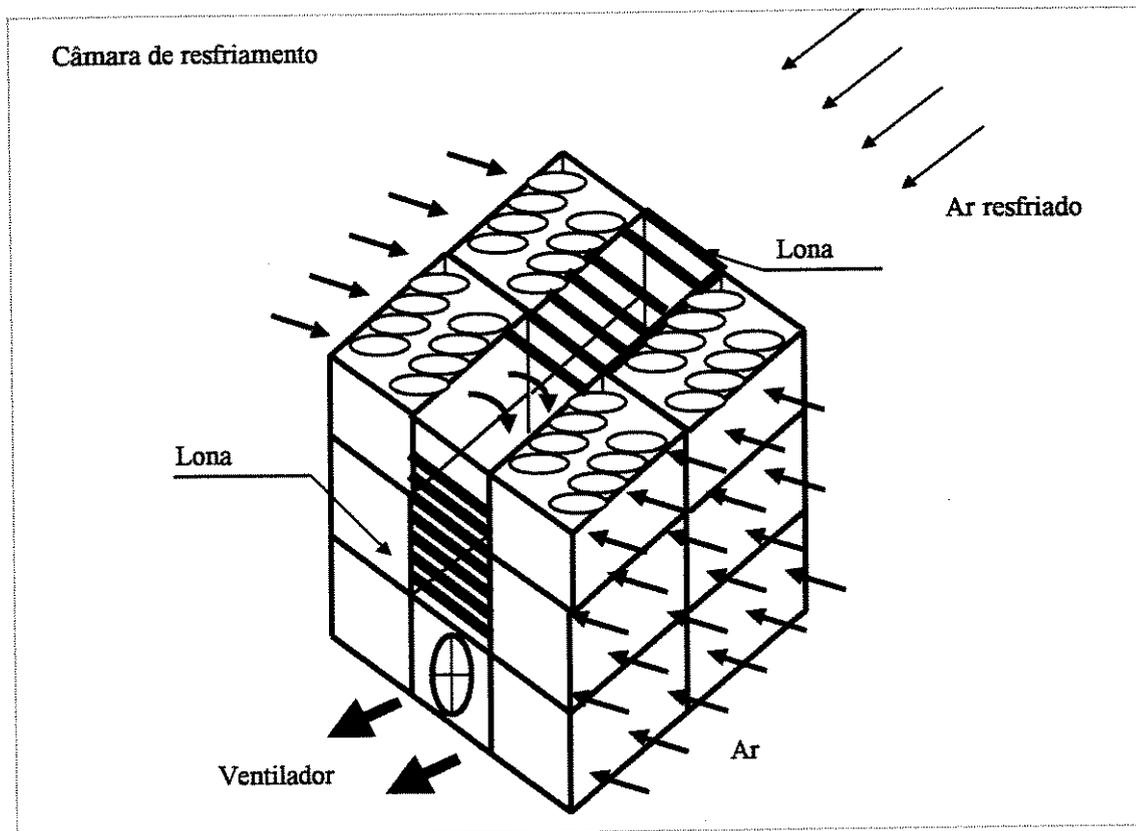


Figura 2.1: Componentes do sistema de resfriamento com ar forçado (Adaptado de Fraser, 1991)

Uma avaliação preliminar dos sistemas de resfriamento com ar forçado, pode ser obtida considerando a correlação de transferência de calor que relaciona os números de Nusselt-Reynolds-Prandtl (ASHRAE, 1994):

$$\frac{2 hcL}{ka} = C \left(\frac{2 LG}{v} \right)^m \left(\frac{v Cp}{ka} \right)^n \quad (2.1)$$

Na relação anterior, para uma temperatura do ar e comprimento característico do produto constante, o coeficiente convectivo de transferência de calor (hc) é proporcional ao fluxo de ar (G') e as características físicas do produto, o que é o mesmo que:

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

Realizar um resfriamento rápido dos frutos, ou um pré-resfriamento, num sistema com alta

eficiência é de grande importância sob vários pontos de vista. Primeiramente consegue-se diminuir rapidamente o calor de campo, diminuindo a atividade metabólica, diminuindo a velocidade de deterioração dos frutos. Desta forma possibilita-se também que as câmaras de estocagem tenham dimensões e equipamentos de menor capacidade, em virtude da maior carga térmica ser retirada no resfriamento rápido. Assim tornam-se as câmaras de estocagem, sistemas com um consumo energético menor, a eficiência do resfriamento rápido traz uma eficiência energética do sistema de estocagem.

2.3- Resfriamento de produtos agrícolas

O resfriamento de produtos agrícolas, dentre eles as frutas, é um processo de transferência de calor, no qual estão envolvidos, geralmente, os três mecanismos de transmissão de calor: condução, convecção e radiação.

Números adimensionais, que correlacionam as propriedades termofísicas e condições de processo, freqüentemente são usados para avaliar os problemas que envolvem transferência de calor em produtos agrícolas. Dentre estes o Número de Fourier (Fo) e o Número de Biot (Bi), são os mais usados.

O número de Fo pode-se definir como a razão entre a dimensão característica do corpo R e a profundidade de penetração dos efeitos térmicos, dados por um tempo (t) (Holman, 1986):

$$Fo = \frac{\alpha t}{R^2} \quad (2.3)$$

Existe uma relação direta entre o tempo de resfriamento dos produtos e o número de Fo. Para uma mesma condição convectiva, uma duplicação do diâmetro dos produtos leva um aumento do tempo de resfriamento, de até quatro vezes (Kopelman *et al.* 1966; Baird *et al.*, 1988).

O número de Bi é definido como a razão entre a resistência interna do sólido à transferência de calor, e a resistência à transferência na superfície. Este número é expresso como:

$$Bi = \frac{hcR}{k_p} \quad (2.4)$$

Quando $Bi > 10$, a diferença de temperatura entre a superfície do corpo e o meio de resfriamento pode ser desprezível, e o maior gradiente de temperatura acontece entre o centro do corpo e a superfície deste.

Para valores de Bi entre 0,2 e 10, existe uma resistência externa e interna de transferência de calor finita. Valores muito baixos do Bi indicam que a resistência interna de condução é desprezível se comparada com a resistência superficial por convecção (Holman, 1986; Moshenin, 1980).

Para as situações em que $Bi < 0,2$ a resistência ao fluxo de calor pode ser considerada devido apenas à resistência no fluido junto à superfície do produto. Nessas condições a taxa de calor pode estar representada por:

$$q = hcA(T - T_a) \quad (2.5)$$

Para o resfriamento de um sólido de volume V , num meio de resfriamento à temperatura constante, num intervalo de tempo diferencial dt , a equação 2.5 pode ser expressa como:

$$\int_{T_i}^T \frac{dT}{T - T_a} = -\frac{hcA}{C_p \rho V} \int_0^t dt \quad (2.6)$$

A solução desta equação diferencial pode-se apresentar como:

$$\frac{T - T_a}{T_i - T_a} = e^{-\frac{hcA}{\rho V C_p} t} \quad (2.7)$$

Nesta relação a condutividade térmica do produto é assumida infinita e o produto é tratado como um corpo uniforme. Para as condições em que hc , A , ρ , V e C_p , são considerados constantes, a

equação pode ser expressada em dependência da difusividade térmica e do tempo, como (Mohsenin, 1980):

$$\frac{T - T_a}{T_i - T_a} = e^{-\alpha t} \quad (2.8)$$

2.3.1- Tempo de resfriamento

Para quantificar a eficiência do processo de resfriamento, tanto em termos de tempo como de temperatura, são empregados parâmetros como: tempo de meio resfriamento (*half-cooling time*), e o tempo dos sete oitavos do resfriamento (*seven-eighths cooling time*). Estes parâmetros estão relacionados com o tempo necessário para resfriar comercialmente os produtos, e pode ser expresso em horas ou min.

O tempo de meio resfriamento é o tempo necessário para reduzir pela metade a diferença entre a temperatura inicial do produto e a temperatura do meio de resfriamento. Já o tempo de sete oitavos do resfriamento é o tempo necessário para reduzir a $1/8$ a diferença entre a temperatura inicial do produto e a temperatura do meio de resfriamento

Para o cálculo do tempo de resfriamento, um método gráfico pode ser usado. A partir de dados experimentais do resfriamento do produto, plotam-se num papel semi-logarítmico os valores da diferença de temperatura $T_c - T_a$ em dependência do tempo t . Desconsiderando a parte inicial da curva de resfriamento, a porção reta pode ser representada pela seguinte equação (Mohsenin, 1980):

$$\log(T_c - T_a) = \log j - \frac{B}{2,3} t \quad (2.9)$$

Onde pode ser calculada a taxa de resfriamento (TR) a partir da inclinação da reta, utilizando-se dois pontos arbitrários de temperatura (T_1, T_2) e tempo (t_1 e t_2), obtidos no gráfico de temperatura vs. tempo, como:

$$TR = \frac{-B}{2,3} = \frac{\log T_2 - \log T_1}{t_2 - t_1} \quad (2.10)$$

O valor de j na equação 2.9 é determinado prolongando-se o trecho reto na curva semi-logarítmica até o ponto de interseção (T_{int}) com a ordenada y e calculado com a equação:

$$j = \frac{T_{int} - T_a}{T_i - T_a} \quad (2.11)$$

Finalmente o tempo de meio resfriamento e o tempo dos sete oitavos do resfriamento pode ser determinado como mostrado nas equações 2.12 e 2.13, respectivamente (Mohsenin, 1980; Spanol & Sigrist, 1988):

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2j}{TR} \quad (2.12)$$

ou

$$t_{7/8} = \frac{\ln 8j}{TR} \quad (2.13)$$

Aplicando este método para determinar o tempo de resfriamento de tomate e pepino, resfriados num sistema com água gelada ($T_a = 0,5^\circ\text{C}$), Dincer (1995) obteve uma diferença de 14% a 16% e de 11% a 13%, entre o método gráfico e o valor obtido, aplicando a regressão dos dados experimentais.

O mesmo autor obteve uma diferença na ordem de 7% na determinação do tempo de resfriamento de uva, resfriada num sistema com ar forçado ($T_a = 4^\circ\text{C}$) e velocidade do ar na ordem de 1 a 2 m/s (Dincer, 1995a).

O tempo de resfriamento pode ser determinado também, calculando-se a chamada Taxa Adimensional de Temperatura (TAT), e está definida como a relação que existe entre a diferença entre a temperatura do produto num determinado ponto interno (T), e a temperatura do meio refrigerado (T_a), dividido pela diferença entre a temperatura inicial do sólido (T_i), e o meio de resfriamento, como expressado na equação 2.14 (ASHRAE, 1994; Mohsenin, 1980).

$$TAT = \frac{T - T_a}{T_i - T_a} \quad (2.14)$$

O tempo de meio resfriamento (Equação 2.15) e o tempo dos sete oitavos do resfriamento (Equação 2.16) serão atingidos quando esta relação for igual à 0,5 e 0,125; respectivamente:

$$TAT_{1/2} = \frac{T - T_a}{T_i - T_a} = 0,50 \quad (2.15)$$

$$TAT_{7/8} = \frac{T - T_a}{T_i - T_a} = 0,125 \quad (2.16)$$

O valor de TAT pode ser determinado a partir de dados experimentais, onde o valor da temperatura T pode ser lido em pontos que vão desde o centro até a superfície, ou de forma numérica, como será visto em itens posteriores. Na figura 2.2 mostra-se a curva característica de resfriamento em dependência do tempo e da TAT.

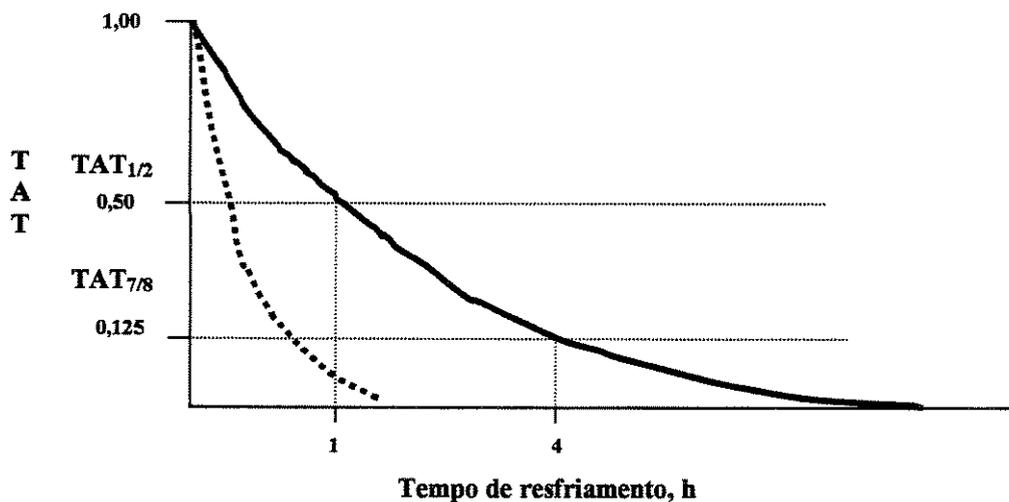


Figura 2.2: Curva característica de resfriamento. --- Temperatura na superfície (T_s); — Temperatura no centro do fruto (T_c) (Adaptado de Chau, 1990)

Quanto menor seja o tempo de resfriamento, maior será a eficiência do resfriamento. Hall (1972) comprovou que o tempo de meio resfriamento de maçãs numa câmara de estocagem foi de 22

h (acondicionadas em caixas), sendo que num túnel de ar forçado (velocidade de 3 a 6 m/s), o tempo diminuiu para 14 h. As frutas partiram de uma temperatura inicial de 26°C, e foram resfriadas até uma temperatura de 5°C.

Ansari & Afaq (1986a), obtiveram as curvas de resfriamento de banana, resfriadas num sistema de ar forçado com velocidade de 6 m/s ($T_a = 4,3^\circ\text{C}$; $T_i = 35^\circ\text{C}$), comprovando que o tempo dos sete oitavos do resfriamento foi atingido, no centro das frutas, aproximadamente aos 25 min de iniciado o resfriamento.

Por outro lado, Baird *et al.* (1988), obtiveram as curvas de resfriamento para frutos submetidos a temperaturas entre -7°C e 5°C , para produtos acondicionados em caixas de papelão e a granel. Para temperaturas de 4°C o tempo de resfriamento foi de aproximadamente 7 horas, ao passo que para uma temperatura de -7°C o tempo de resfriamento foi reduzido para 2 horas. Isto demonstra que a temperatura do ar de resfriamento deve ser a mais baixa possível, sempre que não afete o produto, nem provoque injúrias pelo frio.

Uma proposta interessante foi feita por Gaffney & Baird (1991), mostrando que no início do resfriamento o ar pode estar a uma temperatura negativa, sem chegar a congelar o produto. Uma vez que a temperatura da superfície se aproxime do ponto de congelamento, a temperatura do ar deve ser aumentada gradualmente, evitando assim o congelamento do produto, garantindo-se menores tempos de resfriamento.

O tempo e a taxa de resfriamento, podem ser determinados tanto de forma experimental como numérica ou analítica. Para isto é necessário desenvolver modelos matemáticos que representem adequadamente o processo de transferência de calor que acontece durante o resfriamento.

A investigação experimental é uma forma de obter os dados reais acerca dos processos que estão sendo medidos. O método experimental de pesquisa envolve equipamentos usados para a determinação das medidas experimentais. A predição teórica é uma consequência da aplicação de modelos matemáticos ao problema físico que está sendo caracterizado. Para resolver o problema físico uma série de equações devem ser resolvidas, aplicando métodos numéricos ou analíticos.

2.4- Formulação de modelos

A solução de qualquer problema físico requer a habilidade da criação do modelo matemático correspondente. O modelo matemático deve ser concebido de forma tal que possa ser resolvido em tempos computacionais adequados e que os resultados obtidos representem o modelo físico adequadamente.

Entre as vantagens do cálculo teórico podem-se citar: o baixo custo que envolve os programas de computador, muito menores que os custos que envolvem o desenvolvimento de experimentos; a velocidade, devido ao fato de que pode-se obter uma resposta num tempo menor do que quando usados métodos experimentais; além de oferecer a possibilidade de apresentar informações detalhadas, podendo ser avaliadas múltiplas variantes de um problemas físico, considerar condições adversas e desprezar aquelas que são irrelevantes (Patankar, 1980).

Mas, apesar das vantagens citadas, o cálculo teórico apresenta também desvantagens. Pode-se citar aqueles problemas físicos em que a simulação de alguns parâmetros torna-se muito complexa, e onde os métodos numéricos não garantem uma adequada precisão, afastando-se das condições reais (Maliska, 1995).

2.4.1-Modelos para avaliação do resfriamento de produtos agrícolas

O problema da predição do tempo de resfriamento dos produtos têm sido estudado ao longo de muitos anos. O objetivo comum desses estudos é desenvolver um método simples de predição requerendo uma mínima quantidade de dados e um programa computacional adequado.

Durante o resfriamento de produtos agrícolas, o coeficiente de transferência de calor convectivo (h_c), pode ser grande se comparado com a condutividade térmica (k), de tal forma a temperatura na superfície varia mais rapidamente que a temperatura no interior do corpo, estabelecendo-se um gradiente de temperatura.

A Lei de Fourier representa adequadamente este processo, partindo da equação de Fourier, que

estabelece um histórico do comportamento da temperatura num corpo sólido através do tempo, para um elemento de espaço infinitesimal.

A equação de Fourier em termos das coordenadas em x, y e z pode ser expressa como:

$$\rho C_p \frac{\delta T}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} \left(k \frac{\delta T}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(k \frac{\delta T}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(k \frac{\delta T}{\delta z} \right) + q \quad (2.17)$$

Esta equação pode ser expressada em coordenadas esféricas, cartesianas ou cilíndricas, em dependência da geometria do fruto que está sendo avaliado, com ρ , C_p , k , constantes.

2.4.2- Modelos analíticos

A solução analítica da equação 2.17, foi apresentada por Mohsenin (1980), para a geometria esférica, cilíndrica e plana. Para esferas com raio R , a temperatura à uma distância r do centro pode ser determinada como:

$$\frac{T - T_a}{T_i - T_a} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(\sin \mu_n - \mu_n \cos \mu_n) R \sin \mu_n (r/R)}{(\mu_n - \sin \mu_n \cos \mu_n)(r \mu_n)} e^{-\mu_n^2 \frac{\alpha t}{R^2}} \quad (2.18)$$

onde a solução de μ_n pode ser expressada como:

$$1 - Bi = \mu \cot \alpha \mu \quad (2.19)$$

Para cilindros finitos de raio R , a temperatura à uma distância radial r pode ser determinada como:

$$\frac{T - T_a}{T_i - T_a} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2J_1(\mu_n)J_0(\mu_n(r/R))}{\mu_n(J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n))} e^{-\mu_n^2 \frac{\alpha t}{R^2}} \quad (2.20)$$

onde μ_n pode ser determinada como:

$$\frac{J_0(\mu)}{J_1(\mu)} = \frac{1}{Bi^\mu} \quad (2.21)$$

onde J_0 e J_1 são funções de Bessel de primeira ordem

Para placas finitas com espessura de $2L$, a temperatura à uma distância x do centro pode ser determinada como:

$$\frac{T - T_a}{T_i - T_a} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin \mu_n \cos \mu_n (x/L)}{(\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n)} e^{-\mu_n^2 \frac{\alpha t}{R^2}} \quad (2.22)$$

Onde a solução de μ_n pode ser apresentada como:

$$Bi = \mu \tan \mu \quad (2.23)$$

Os valores de μ_n , para esferas, cilindros, e placas podem ser encontrados tabelados na literatura (Mohsenin, 1980; Chau, 2000).

2.4.3- Modelos numéricos

A literatura da área de refrigeração apresenta a resolução de forma numérica da equação de Fourier (Equação 2.17), que define o processo de transferência de calor, em coordenadas esféricas, cilíndricas ou cartesianas, em dependência da geometria do corpo.

Em coordenadas esféricas a equação 2.17 pode ser expressada como:

$$\frac{1}{r^2} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{\sin \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\sin \phi \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{1}{\sin^2 \phi} \frac{\partial^2 T}{\partial \psi^2} \right] + \frac{q \cdot}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.24)$$

Supondo que não há geração interna de calor, e que a condutividade térmica é constante, assim como que a temperatura varia apenas na direção radial, a equação 2.24 pode ser simplificada:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\alpha}{r^2} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] = \frac{\alpha}{r^2} \left[2r \frac{\partial T}{\partial r} + r^2 \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right] \quad (2.25)$$

Em coordenadas cilíndricas, a equação 2.17 se expressa como:

$$\left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{q'''}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial t}{\partial \theta} \right] \quad (2.26)$$

Considerando que a condutividade térmica é constante, que não há fontes internas de geração de calor, e que a transferência de calor acontece na direção radial, a equação 2.26, pode ser expressada como:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] = \alpha \left[\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right] \quad (2.27)$$

Para placas finitas a equação 2.17 apresenta a seguinte forma em coordenadas cartesianas (considerando que não há fonte interna de geração de calor e que a condutividade térmica é constante):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (2.28)$$

Para placas em que a transferência de calor acontece de forma uniforme no sentido da coordenada x, a equação 2.28 pode-se reduzir à (Mohsenin, 1980):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.29)$$

2.4.4- Modelos apresentados na literatura

Diversos modelos são apresentados na forma numérica ou analítica, desde os mais simples até os mais complexos, da equação de transferência de calor (Equação 2.17), para a avaliação de processos envolvendo refrigeração de frutas, resolvidos por vários métodos (diferenças finitas, volumes finitos), e com diferentes restrições, e condições de contorno, para geometrias cilíndricas, esféricas ou planas, são relatados na literatura.

Dentre os trabalhos destacam-se os de: Henri & Hesselschwerdt, 1964; Smith & Bennett; 1965, Bennett *et al.*, 1966; Kopelman *et al.*, 1966; Smith *et al.*, 1970; Pflug *et al.*, 1975; Baird & Gaffney, 1976; Gaffney, 1977; Baerdemaker & Singh, 1977; Hayakawa, 1978; Gaffney *et al.*, 1980; Beukema *et al.*, 1982; Cleland & Earle, 1982; Hayakawa & Succar, 1982; Mascheroni & Calvelo, 1982; Sastry & Buffington, 1983; Ansari *et al.*, 1984; Bazan *et al.*, 1984; Chau *et al.*, 1985; Ansari & Afaq, 1986a; Novy & Kieckbush, 1986; Arifin & Chau, 1987; Cleland *et al.*, 1987; Guemes *et al.*, 1989; Spagnol *et al.*, 1989; Chau & Gaffney, 1990; Talbot & Chau, 1991; Fraser & Otten, 1992; Mackinnon & Bilanski, 1992; Tang & Jonhson, 1992; Alvarez & Trystam, 1995; Dincer, 1995; Dincer, 1995a; Dincer, 1995b; Dincer & Genceli, 1995; Goyette *et al.*, 1997; Trelea *et al.*, 1998). Embora não será detalhado cada um dos trabalhos listados, informações adicionais podem ser encontradas nas referências citadas.

Um dos primeiros trabalhos na área foi relatado por Smith & Bennett em 1965, os quais desenvolveram um modelo matemático simples para o cálculo da temperatura no centro de frutas e hortaliças, durante o resfriamento em regime transiente.

Gaffney (1977) desenvolveu um método para a análise do comportamento do processo de transferência de calor e massa de frutas e hortaliças, de forma individual e em paletes. A solução analítica é aplicada ao fluxo de calor unidimensional de corpos de diferentes formas geométricas, sujeito a determinadas restrições. A equação diferencial de Fourier foi resolvida numericamente, aplicando o método de elementos finitos.

Hayakawa & Succar (1982), desenvolveram um complexo método computacional (usando a

técnica de elementos finitos), para a simulação do resfriamento pós-colheita e perdas de umidade dos frutos. A equação diferencial da transferência de calor e massa foi desenvolvida em coordenadas esféricas e o modelo foi validado com os resultados obtidos do resfriamento com ar forçado de batata e tomate.

Cleland & Earle (1982), desenvolveram um método simples para a predição da taxa de resfriamento em corpos sólidos, de várias formas, aplicando a solução analítica. A solução é válida para corpos cilíndricos, esféricos ou de forma plana (placas). O método pode ser aplicado na prática, usando gráficos ou tabelas, sem necessidade do desenvolvimento de um programa de computador. Segundo os autores o mesmo foi validado com dados experimentais, obtendo-se um erro de $\pm 10\%$.

Ansari *et al.* (1984), desenvolveram um programa computacional para avaliar o comportamento da transferência de calor e massa durante o resfriamento com ar de maçãs e batatas, considerando condição convectiva na superfície, e considerando os produtos como corpos esféricos.

Ansari & Afaq (1986a), relataram um trabalho onde mostram um esquema da cálculo, utilizando o sistema de coordenadas cilíndricas e o método de diferenças finitas, para determinar a distribuição de temperatura durante o resfriamento de produtos cilíndricos (banana e cenoura).

Novy & Kieckbusch (1986), propuseram uma série de equações simplificadas, resolvidas usando o Teorema de Duhamel, para o cálculo rápido do tempo de resfriamento rápido de um leito de frutas esféricas refrigeradas com ar forçado. As equações relacionam a velocidade superficial do ar, o diâmetro e a massa total do produto, com a temperatura média do leito a cada instante.

Guemes *et al.* (1989), estudaram as características da transferência de calor, especialmente o comportamento do coeficiente de transferência de calor, durante o resfriamento rápido com ar de morangos, usando o conceito de área ortogonal em dois planos (resultado de dividir a forma do produto em dois, aplicado à solução numérica). O autor comprovou que existe uma diferença de 15,9% na predição quando considerado o fruto como uma esfera e quando corrigida a forma do corpo, com a determinação da área ortogonal.

Fraser & Otten (1992), desenvolveram um modelo matemático, partindo do modelo analítico para a determinação do tempo de resfriamento de pêras, considerando os frutos como esferas. O modelo é simples e permite determinar numericamente o tempo de resfriamento para três posições dos frutos ao longo do túnel de resfriamento. O coeficiente convectivo de transferência de calor foi assumido, seguindo as recomendações da literatura.

Dincer (1995b), desenvolveu um estudo, partindo do método numérico, para analisar o comportamento da transferência de calor em produtos esféricos, considerando o resfriamento como um processo de transferência de calor, dividido nos três mecanismos que envolvem este processo: convecção, radiação e condução. O modelo foi validado com dados experimentais do resfriamento do figo, com um grau de aproximação na ordem de 5% a 20%.

Alvarez & Tristram (1995), propuseram um modelo numérico, resolvido em coordenadas esféricas, para descrever o processo de transferência de calor e massa de produtos agrícolas condicionados em paletes. O modelo foi validado com dados experimentais resultantes do resfriamento de corpos esféricos (esferas de gel).

Trelea *et al.* (1997), desenvolveram um algoritmo de controle, baseado no método numérico em coordenadas esféricas para otimizar o processo de resfriamento, incluindo aspectos de ordem econômica. Os resultados do modelo teórico foram validados com os resultados obtidos em experimentos desenvolvidos numa planta piloto ($UR = 90\%$, $T_a = -10$ a 15°C e $v = 0$ a $1,5$ m/s). Foram feitos modelos com gel, com forma esférica ($d=75$ mm), onde foram introduzidos termopares para medir a temperatura no centro dos mesmos. Estes resultados foram comparados com os obtidos do resfriamento de frutas (laranja, pêra e maçã), obtendo-se uma adequada aproximação entre o modelo com gel e as frutas. Os autores comprovaram que o comportamento do valor do coeficiente de transferência de calor foi praticamente constante ao longo do resfriamento, observando-se um pequeno desvio ao início do resfriamento para a maçã (devido ao tempo de manipulação dos frutos). O tempo de resfriamento para as laranjas esteve entre 120 à 140 min. Observou-se uma diminuição de 7% no tempo de resfriamento quando foi aplicado o modelo de otimização.

Observou-se em todos os modelos matemáticos apresentados que, geralmente é feita uma série

de considerações para simplificar a resolução do sistema de equações, dentre elas:

- material homogêneo;
- temperatura inicial do produto uniforme;
- temperatura do meio de resfriamento constante ao longo do tempo;
- coeficiente de transferência de calor é constante com o tempo e a posição do produto;
- propriedades termofísicas são constantes com a temperatura;
- ausência de geração interna de calor;
- ausência de transferência de massa na superfície.

As frutas não possuem um formato geometricamente regular, não são perfeitamente homogêneas e suas propriedades térmicas mudam com a temperatura, então o uso das relações apresentadas na literatura fornecem apenas soluções aproximadas sobre o fenômeno da transferência de calor (Spagnol *et al.*, 1989).

Produtos hortifrutícolas, entre eles: maçã, uva, pêssego, alface, repolho, melão e tomate, podem ser considerados homogêneos, e ainda as propriedades térmicas destes produtos podem ser assumidas como constantes em determinadas faixas de temperatura (Gaffney *et al.* 1980).

As condições ambientais, dimensões do produto e propriedades térmicas são muito importantes na hora de projetar um método de predição do tempo de resfriamento. Neste sentido, têm particular importância a geometria do fruto e o tipo de coordenadas empregado para a resolução da equação da transferência de calor.

A solução matemática da equação diferencial para a transferência de calor e massa em regime transiente, tem sido resolvida até o momento, somente em corpos de geometria simples, tais como placas, cilindros e esferas, sujeitos a certas condições de contorno. Na prática, para simplificar a aplicação do método, considera-se frutos como maçã, morango e figo, aproximado à esferas, quando na realidade, apresentam uma forma esferoidal.

Lima & Nebra (1997), desenvolveram um modelo matemático utilizando o método dos volumes finitos, para descrever o transporte de umidade, durante a secagem em corpos elipsoidais. A

obtenção e discretização numérica da equação de transferência de massa foi desenvolvida num sistema de coordenadas esferoidal prolato, o qual permite uma adaptação mais exata à forma geométrica do corpo. A equação 2.30, em coordenadas esferoidal prolato pode ser escrita como:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left[\frac{1}{L^2(\xi^2 - \eta^2)} \frac{\partial}{\partial \xi} [(\xi^2 - 1)\alpha \frac{\partial T}{\partial \xi}] \right] + \left[\frac{1}{L^2(\xi^2 - \eta^2)} \frac{\partial}{\partial \eta} [(1 - \eta^2)\alpha \frac{\partial T}{\partial \eta}] \right] + \left[\frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{L^2(\xi^2 - 1)(1 - \eta^2)} \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(\alpha \sqrt{1 - \zeta^2} \frac{\partial T}{\partial \zeta} \right) \right] \quad (2.30)$$

As relações entre os sistemas de coordenadas cartesianas (x, y, z) e o sistema esferoidal prolato (μ , ϕ , ω) foram expressas como (Lima & Nebra, 1998):

$$x = L \sinh\mu \sin \phi \cos\omega ; y = L \sinh\mu \sin \phi \sin\omega ; z = L \cosh\mu \cos \phi \quad (2.31)$$

sendo que:

$$L = \sqrt{(L_2^2 - L_1^2)} \quad (2.32)$$

Onde L_1 e L_2 são os semi-eixos menor e maior do corpo em estudo, respectivamente, com geometria esferoidal. Este modelo torna-se muito interessante pela sua abrangência, podendo ser utilizado num mesmo trabalho para avaliar o processo de resfriamento de frutas de geometrias diferentes, sem necessidade de modificar o modelo, apenas introduzindo as propriedades termofísicas e as dimensões do novo produto. Ou seja, o mesmo modelo poderia ser utilizado para geometrias que variam desde uma esfera até um cilindro, com outras condições de contorno, podendo ser adaptado para processos de resfriamento.

A validação experimental do modelo, com dados de secagem de banana, mostrou uma excelente concordância, com valores de erro na ordem de 2% (Lima & Nebra, 1997; Lima & Nebra 1998).

A cinética da transferência de calor envolve parâmetros relacionados com a fruta como: condutividade e difusividade térmicas, dimensões, posição no interior das caixas e tipo de embalagens. Por outro, lado as condições dos processos que envolvem o meio de resfriamento são: a

velocidade, o coeficiente convectivo de transferência de calor, a temperatura, a umidade e a taxa de ar. A adequada interação de todos estes parâmetros garante a eficiência do processo de resfriamento.

2.5- Propriedades termofísicas dos produtos

Os alimentos, geralmente apresentam, uma série de propriedades, dentre elas, químicas, reológicas, físicas e térmicas. Em específico, as propriedades térmicas, tais como, a condutividade, calor específico, entalpia e difusividade térmica, são, do ponto de vista da engenharia, muito importantes para o projeto de equipamentos e processamento na indústria de alimentos.

Em particular, o processo de resfriamento está ligado estritamente à temperatura e propriedades dos produtos. Desta forma, o efeito das propriedades térmicas e de transporte tem influência na precisão dos resultados, quando são aplicados métodos de resolução para a caracterização do fenômeno de transferência. Por esta razão algumas soluções e equações podem tornar-se limitadas, ou com um grau apreciável de incerteza.

Muito importante também, junto às propriedades dos alimentos, são as que estão ligadas ao meio de resfriamento, seja ar, água ou outro. Nesse sentido destacam-se a condutividade térmica e o calor específico, as quais têm sido determinadas experimentalmente, e das quais existem na literatura uma vasta quantidade de tabelas e gráficos. Por outro lado, propriedades de transporte, tais como o coeficiente convectivo de calor (h_c), são também de grande importância no desenvolvimento de cálculos de transferência de calor.

Durante a consulta aos trabalhos avaliados na pesquisa bibliográfica, na área de resfriamento com ar forçado, constatou-se a existência de uma ampla faixa de valores do coeficiente convectivo de transferência de calor (h_c). Esta situação torna-se um problema quando é necessário escolher um valor para desenvolver cálculos de transferência de calor. Para o valor da difusividade térmica (α), a literatura apresenta um consenso nos valores reportados, com uma faixa de dispersão bem menor que os valores do coeficiente convectivo de transferência de calor relatados.

2.5.1- Coeficiente de difusividade térmica

O valor da difusividade é uma das propriedades de transporte mais importantes, essencial para o projeto e otimização de processos de transferência de calor. Até o momento não existe um equipamento que possa quantificá-la, sendo assim, os pesquisadores utilizam-se dos métodos e modelos matemáticos (numérico ou analítico), para sua determinação, por comparação direta entre o valor numérico ou analítico e os valores experimentais, procurando minimizar o erro nesta diferença.

A determinação da difusividade térmica (α), é um aspecto que têm sido discutido na literatura da área. Constatou-se que propriedades térmicas para produtos tropicais, em geral, aparecem na literatura com diferentes valores, devido ao fato de serem determinados com diferentes técnicas. Geralmente as frutas são consideradas como material homogêneo quando vão ser determinadas algumas propriedades, ou quando são aplicados modelos matemáticos.

Não obstante isto, a diferença entre os valores obtidos nas frutas descascadas e os obtidos com a aplicação de soluções baseadas em esferas homogêneas, oscilou entre 25 a 30%, num trabalho desenvolvido por Gaffney *et al.*, (1980).

Ansari *et al.* (1984a), determinaram a difusividade térmica de forma experimental, submetendo maçã, laranja e batata a um resfriamento com ar forçado ($v = 6,6$ m/s), a diferentes temperaturas ($0,5^{\circ}\text{C}$ à 6°C). A temperatura foi medida no centro dos frutos e na superfície. Os resultados experimentais foram comparados com o resultado teórico, aplicando o método numérico em coordenadas esféricas (os frutos foram aproximados como esferas), considerando a condição convectiva na superfície. Com estas considerações o valor da difusividade térmica foi de $1,3198 \times 10^{-7}$ m²/s, com um desvio padrão de $0,1745 \times 10^{-7}$ m²/s e um coeficiente de variação de 13,22% (para laranja). Para maçã, foi de $1,0547 \times 10^{-7}$ m²/s; $0,10261 \times 10^{-7}$ m²/s e 9,73%, respectivamente. Para batata foram de: $0,8975 \times 10^{-7}$ m²/s, $0,07492 \times 10^{-7}$ m²/s e 8,35%, respectivamente. Os autores usaram valores do coeficiente convectivo de transferência de calor entre 38,5 até 43,76 W/m²°C.

Dando continuidade a estes estudos, em 1986, Ansari & Afaq desenvolveram um novo método para a medição da difusividade térmica em produtos esféricos, aplicando um procedimento numérico

para gerar os dados tempo - temperatura, relacionando o número de Fourier, de Biot, a distância radial adimensional e a temperatura. Os dados de tempo-temperatura foram determinados também de forma experimental (com laranja, batata e maçã). Os resultados obtidos foram comparados com estudos anteriores. O método utilizado pelos autores, aperfeiçoou a técnica usada em 1984, e os valores obtidos são resumidos na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Valores da difusividade térmica de alguns frutos

Produto	Valor médio ($10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$) (a)	Desvio padrão ($10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)	Coefficiente de variação (%)	Estudos anteriores (b)	Diferença (%) $[(a)-(b)] \times 100$
Maçã	1,4115	0,0063	4,46	1,0547	25,28
Laranja	1,1300	0,0051	4,51	1,3198	16,80
Batata	1,2424	0,0014	1,13	0,8975	27,76

FONTE: Ansari & Afaq, 1986

Como se pode observar na tabela 2.1, a laranja teve o menor valor de diferença com respeito a os valores obtidos pelos autores em estudos anteriores, o que demonstra um tendência de um valor de α mais aproximado a realidade nestas frutas.

Ramos *et al.* (1993), desenvolveram um estudo experimental para determinar a difusividade térmica de várias frutas e hortaliças, com e sem casca. Entre os produtos testados estavam: batata, cenoura, aipo, laranja azeda (*Citrus aurantium*) e grapefruit (*Citrus paradisi*) (Tabela 2.2).

Tabela 2.2: Propriedades térmicas e físicas de algumas frutas e hortaliças (temperatura média de 35°C)

Produto	Teor umidade (%)	Densidade ($\pm 0,001 \text{ kg/m}^3$)	Difusividade térmica ($10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$)
Batata	60-70	1.323	1,420
Cenoura	80-90	1.042	1,599
Laranja (cc)*	86	1.052	1,060
Laranja (sc)**	-	-	1,030
Grapefruit (cc)	91	1.031	1,130

FONTE: Ramos *et al.* 1993. *cc- com casca, **sc- sem casca

Queiroz & Nebra (1996), determinaram o valor da difusividade térmica de banana descascada,

durante a secagem das mesmas, aplicando o método numérico de resolução da equação que define o processo de difusão em corpos cilíndricos. O modelo proposto foi validado com dados experimentais obtidos durante a secagem de banana Nanica, numa estufa com ar forçado à 29,7°C. O valor desta propriedade foi de $1,25 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$.

Em geral, em todos os métodos usados para avaliar o comportamento das propriedades de transporte, são consideradas as seguintes restrições: material homogêneo, geometria aproximada às coordenadas esféricas, cilíndricas ou planas, temperatura inicial uniforme, temperatura do meio constante com o tempo, coeficiente de transferência de calor na superfície constante com o tempo e propriedades termofísicas do material constante com o tempo e com a temperatura. Na tabela 2.3 mostra-se um resumo dos valores da difusividade térmica apresentados até aqui.

Tabela 2.3: Valores da difusividade citados pela literatura (resfriamento com ar forçado)

Autores	Valor de α ($\times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$)	Produto	Geometria considerada
Ansari & Afaq (1984a)	1,054	Maça	Esférica
	1,319	Laranja	
	0,897	Batata	
Ansari & Afaq (1986)	1,411	Maça	Esférica
	1,130	Laranja	
	1,242	Batata	Cilíndrica
	1,250	Banana	
Ramos <i>et al.</i> (1993)	1,420	Batata	Esférica
	1,060	Laranja (cc)*	Cilíndrica
	1,030	Laranja (sc)**	
	1,130	Grapefruit (cc)	
	1,599	Cenoura	
Queiroz & Nebra (1996)	0,0125	Banana	Cilíndrica

FONTE: Elaboração própria

Fazendo uma análise da tabela 2.3, observa-se que a diferença entre o valor da difusividade térmica da laranja, com e sem casca, é de aproximadamente 2,8%. Pode-se dizer então que, os valores de difusividade térmica encontrados na literatura podem ser considerados como a média entre a casca e o corpo do fruto, com boa aproximação.

A composição da condutividade efetiva entretanto, depende do volume de cada uma das frações e, na laranja, o volume da casca normalmente é muito menor que da polpa. Nota-se então que

a maior condutividade térmica da polpa é amortecida pela maior capacidade térmica da fruta, podendo-se afirmar que pela diferença encontrada, pode-se considerar a laranja como um sólido homogêneo.

Os valores da difusividade de massa obtidos por meios numéricos ou analíticos, dependem de muitos fatores, tais como: tipo de modelo, considerações adotadas em cada um, geometria adotada, tipo de método numérico usado, entre outros, como já foi citado. Desta forma os seus valores variam de caso para caso, mesmo relacionando-se com um mesmo experimento. A mesma dificuldade existe na determinação do coeficiente de transferência de calor, quando obtido com uma metodologia similar à utilizada na transferência de massa.

2.5.2- Coeficiente convectivo de transferência de calor

O coeficiente convectivo de transferência de calor (h_c) pode ser obtido de forma teórica (através de cálculo) ou experimental. Este coeficiente depende de muitos fatores, dentre eles: a rugosidade da superfície, características dimensionais do sólido, velocidade do ar, assim como as condições termodinâmicas do ar na camada limite que os envolve. Erros significativos podem ser obtidos, ao usar-se correlações para o estudo dos fenômenos de transferência em produtos biológicos.

As correlações empíricas, em geral, foram determinadas usando produtos não biológicos, os quais diferem completamente nas propriedades e comportamento dos produtos biológicos, portanto seu uso em cálculos envolvendo produtos como frutas, traz consigo erros na determinação do h_c (Holman, 1986). Embora trabalhos apresentados por Baird & Gaffney (1976), apresentem uma correlação para frutas esféricas obtidas por regressão, durante o resfriamento de laranja, ainda este aspecto apresenta limitações.

Quando o coeficiente vai ser determinado por métodos teóricos, o tipo de modelo usado, as considerações adotadas em cada um, tipo de coordenadas adotado e o tipo de método numérico usado, influenciam no resultado, mesmo relacionando-se com um mesmo experimento.

As condições do fluxo de ar, perfil de velocidade, dimensões do fruto e orientação com respeito ao fluxo de ar, temperatura do meio, velocidade e umidade, evaporação de água, respiração, mudança de fase, afetam a transferência de calor e portanto o coeficiente de transferência de calor (hc). Da mesma forma, inicialmente o coeficiente de transferência de calor na superfície é maior, e à medida que a temperatura diminui este vai se tornando constante.

Por outro lado, as medições da temperatura na superfície do produto introduzem erros no método de predição do coeficiente de transferência de calor, quando este é determinado experimentalmente, pela dificuldade encontrada para a colocação do sensor no ponto adequado (Cleland *et al.*, 1994). Nos trabalhos desenvolvidos nesta área, para simplificar este problema, acaba-se assumindo que a temperatura da superfície é aproximadamente igual à temperatura do meio de resfriamento, o que não é real, pois na verdade existe um gradiente de temperatura entre a superfície e o meio de resfriamento de aproximadamente $1,5^{\circ}\text{C}$ (Goyette *et al.*, 1997).

Durante o resfriamento das frutas ao redor das mesmas, o processo de transferência de calor acontece de forma mista, como resultado da convecção forçada e natural (Tang & Johnson, 1992). Este fenômeno é influenciado por vários fatores: a velocidade do fluxo de ar forçado (representado pelo número de Reynolds), a diferença de temperatura (representada pelo número de Grashof) e o ângulo entre o fluxo de ar forçado e o fluxo de ar natural.

Tem-se comprovado que, a orientação dos frutos com respeito ao fluxo de ar tem influência no comportamento do processo de transferência de calor, do mesmo modo que a forma geométrica, a irregularidade da superfície, assim como as dimensões dos frutos. Na figura 2.3 são mostrados os parâmetros que intervêm no processo de transferência de calor dos frutos.

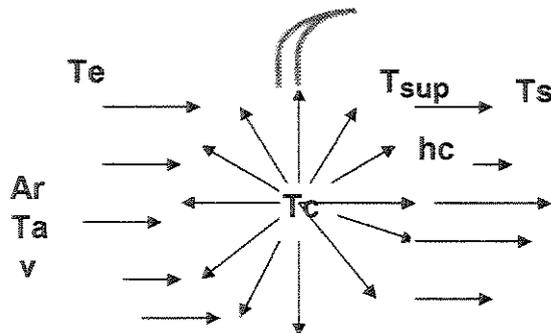


Figura 2.3: Parâmetros que intervêm no resfriamento do fruto

Soule *et al.* (1966), obtiveram coeficientes de transferência de calor convectivo variando entre 50 a 68 $\text{W/m}^2\text{°C}$, durante o resfriamento de laranjas, variedade Hamlin, e tangerinas Orlando. As frutas foram dispostas a granel, com um fluxo de ar a uma velocidade entre 1,1 a 1,8 m/s.

Durante o resfriamento de 450 kg de laranja da variedade Hamlin ($d=72$ mm), partindo de uma temperatura inicial de 27°C , e resfriadas até 8°C ($v = 1,7$ m/s), o tempo de resfriamento foi de 1 hora e o coeficiente convectivo de transferência de calor foi da ordem de $62 \text{ W/m}^2\text{°C}$ (Bennet *et al.*, 1966).

Baird & Gaffney (1976), correlacionaram dados do resfriamento de laranjas a granel com um modelo matemático, e conseguiram determinar o coeficiente convectivo de transferência de calor ajustado aos dados experimentais. O coeficiente h_c comportou valores entre $8,15 \text{ W/m}^2\text{°C}$ e $55 \text{ W/m}^2\text{°C}$, para velocidade do fluxo de ar variando entre 0,055 m/s e 2,1 m/s, respectivamente.

Segundo Mohsenin (1980), pode ser assumido que, para sistemas de ar forçado com velocidades de ar entre 1,5 a 5,0 m/s (1 a 3 l/s por quilograma de produto), o valor de h_c pode estar entre 20 e $35 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

Em sistemas de resfriamento convencional, onde o movimento do ar através dos produtos é menor, especialmente quando os produtos estão entre caixas, este coeficiente pode ser considerado com valores entre 5 e $6 \text{ W/m}^2\text{°C}$, segundo Holman (1986).

Valores de h_c entre $28,02 \pm 1,20 \text{ W/m}^2\text{°C}$ até $52,11 \pm 3,02 \text{ W/m}^2 \text{°C}$, foram obtidos por Dincer & Genceli (1994), submetendo produtos cilíndricos (pepino) a resfriamento, numa câmara de ar forçado, com velocidades entre 1 e 2 m/s. O valor do erro na obtenção de h_c por ajuste, esteve na faixa de 12%.

Dincer & Genceli (1995) desenvolveram um modelo matemático para a determinação do coeficiente de transferência de calor em esferas e cilindros, partindo de dados experimentais. Os frutos foram submetidos ao fluxo de ar com velocidades variando desde 1; 1,25; 1,5; 1,75 e 2 m/s, no interior de uma câmara de resfriamento ($T_a = 4\text{°C}$ e $UR = 80\%$).

Os frutos partiram de uma temperatura inicial de aproximadamente 22°C. Estes autores comprovaram que o coeficiente de transferência de calor variou de 12,62 a 19,51 W/m²°C e de 18,22 a 26,56 W/m²°C, durante o resfriamento individual de pêra e pepino, quando a velocidade incrementa-se desde 1 a 2 m/s (a temperatura foi medida no centro do frutos). Os autores obtiveram um erro na ordem de 15 a 20%.

Dincer (1995b) desenvolveu experimentos para avaliar o processo de transferência de calor durante o resfriamento de produtos esféricos. O coeficiente de transferência de calor foi determinado aplicando as correlações empíricas e as propriedades termofísicas. As curvas teóricas foram comparadas com as curvas experimentais obtidas durante o resfriamento com ar forçado de figo (geometria aproximadamente esférica). Os valores de hc variaram entre 21,1; 24,7; 26,2 e 32,1 W/m²°C, para velocidades de 1,10; 1,50; 1,75 e 2,5 m/s, respectivamente. O valor do erro obtido no ajuste de hc oscilou na ordem de 5 a 20%.

Em geral, durante o resfriamento de produtos agrícolas, o coeficiente de transferência de calor convectivo, pode ser grande quando comparado com a condutividade térmica. Isto significa que a temperatura na superfície muda mais rapidamente que a temperatura no interior do corpo. Desta forma estabelece-se um gradiente de temperatura, nestes casos se cumpre a Lei de Fourier, como já tinha sido discutido. Na tabela 2.4, mostra-se um resumo dos valores de hc citados na literatura consultada.

Tabela 2.4: Valores do hc citados pela literatura (resfriamento com ar forçado)

Autores	Valor de hc (W/m²°C)	Produto	Geometria considerada
Soule <i>et al.</i> (1966)	50-68	Laranja, Tangerina	Esférica
Bennet <i>et al.</i> (1966)	62	Laranja	Esférica
Baird & Gaffney (1976)	8 - 55	Laranja	Esférica
Mohsenin (1980)	20 - 35	-	-
Dincer & Genceli (1994)	28 - 52	Pepino	Cilíndrica
Dincer (1995b)	21 -38	Figo	Esférica
Dincer & Genceli (1995)	12 - 19	Pêra	Esférica
	18 - 26	Pepino	Cilíndrica

FONTE: Elaboração própria

Como pode ser constatado, existe uma grande faixa de valores do coeficiente convectivo de transferência de calor relatados pela literatura, para experimentos semelhantes. Isto porque a determinação deste coeficiente torna-se complexa, e seu valor depende muito das características do fluxo e dos produtos, quando determinado de forma experimental, ou do método, propriedades termofísicas e correlações empíricas, quando determinado de forma teórica.

2.6- Fatores que afetam a taxa de resfriamento

Entre os diferentes fatores que afetam a taxa de resfriamento estão: dimensões e forma geométrica do corpo, propriedades termofísicas dos produtos, forma em que são condicionados estes (a granel ou em caixas), o tipo de arranjo dos frutos dentro das caixas e a disposição destas nas paletes.

Outros fatores que têm uma influência predominante nas taxas de resfriamento são: área de abertura das embalagens para a circulação do ar, a profundidade do leito, a temperatura final desejada, assim como a velocidade do ar de resfriamento (vinculada à taxa de ar passando através dos frutos). A influência destes fatores nas taxas de resfriamento têm uma incidência direta no custo de resfriamento (Baird *et al.* 1988; Gaffney & Baird, 1991).

2.6.1- Dimensões e forma geométrica

Décadas atrás os pesquisadores começaram a desenvolver trabalhos, nos quais deixavam claramente demonstrada a influência direta do diâmetro dos produtos nas taxas de resfriamento, sendo que para velocidade do ar constante, as taxas de resfriamento mudam em até 90%, com o aumento do diâmetro das frutas.

Frutos de geometria diferente respondem de forma diferente ao resfriamento com ar forçado, submetidos a temperatura e fluxos de ar semelhantes (Kopelman *et al.* 1966; Perry *et al.*; 1968; Baird & Gaffney, 1976). Isto porque o tempo de resfriamento é proporcional ao número de Fourier (Fo), para sistemas de resfriamento com condição convectiva.

A relação de Fo pode ser parcialmente válida para produtos dispostos em leitos, a título de

exemplo, Gaffney & Baird (1991), ao resfriar frutas esféricas dispostas à granel e acondicionadas em caixas de papelão, perceberam que, os produtos que se encontravam mais próximos à entrada do ar seguiam a relação de Fo , ao passo que os produtos que se encontravam nas camadas inferiores do leito não obedeceram esta relação, devido ao gradiente de temperatura, ao ar se movimentar através do leito.

Frutos de geometria diferente respondem de forma diferente ao resfriamento com ar forçado, submetidos a temperatura e fluxos de ar semelhantes. A título de exemplo, Perry *et al.* (1968), concluíram que pêssegos diminuem a temperatura mais rapidamente que batatas, quando resfriados num leito com condições semelhantes de temperatura e velocidade.

Uma relação para avaliar a esfericidade dos frutos foi proposta por Mohsenin (1980):

$$esf = \frac{d_2}{d_1} \quad (2.33)$$

onde d_2 é o diâmetro maior e d_1 é o menor diâmetro (equatorial).

Para maçã, pêra, e morango, os valores de esfericidade estão entre 0,88; 0,90; 0,96 e 0,79, respectivamente. Isto demonstra que estas frutas realmente não são esferas (quando $esf = 1$, o corpo é uma esfera perfeita), sendo mais aproximadas à esferoides.

Trabalhos como o desenvolvido por Guemes *et al.* (1989), demonstram que a forma geométrica das frutos têm influência na resposta, quando comparado com curvas teóricas, as quais foram obtidas com um tipo específico de coordenadas. Estes autores resfriaram morango (os quais apresentam forma irregular, aproximadamente esferoidal), e determinaram as curvas de resfriamento de forma experimental, e as compararam com curvas teóricas (aplicando o método em coordenadas esféricas e correlações empíricas). Na comparação das curvas comprovou-se que, efetivamente, a curva obtida com o valor de hc ajustado aos dados experimentais, apresentou uma porcentagem de erro menor, que a obtida do cálculo com as correlações empíricas. O coeficiente de variação entre os valores experimentais e o método numérico estiveram na ordem de 10% a 15%.

Estes resultados demonstram que, realmente, a forma geométrica dos produtos têm influência nos resultados. Quando são aplicados modelos matemáticos, nos quais acaba-se simplificando o problema usando um sistema de coordenadas específico, que seja o mais próximo à geometria do corpo em estudo, podem-se introduzir erros nos valores obtidos.

2.6.2- Altura do leito

A altura do leito e disposição dos produtos dentro deste, têm influência na eficiência do resfriamento a qual pode diminuir a medida que a altura do leito aumenta, assim com o aumento da perda de pressão, o coeficiente de transferência de calor convectivo pode ser menor, se comparado com o coeficiente obtido em produtos resfriados de forma isolada, pois a área dos produtos que é exposta ao fluxo de ar é menor (Gaffney, 1977, Baird *et al.*, 1985; Arifin & Chau, 1987; Boyette *et al.*, 1994; Baird *et al.*, 1988; ASHRAE, 1994).

A influência da altura do leito na taxa de resfriamento, relacionando as dimensões do produto e sua posição no leito, foi estudado por Gaffney em 1977. O autor observou que, os produtos que se encontravam mais expostos ao fluxo do ar resfriaram durante a primeira hora, entretanto para a camada mais afastada o resfriamento demorou 7 horas. Isto é devido a que baixas velocidades do ar, traduzem-se em baixas taxas de ar, tendo uma capacidade baixa de absorver o calor das frutas, sendo este um dos fatores limitantes. Desta forma, a temperatura do ar aumenta quando este circula através do leito de frutos, o que deriva num resfriamento mais lento dos produtos mais afastados do fluxo de ar.

Baird *et al.* (1985) desenvolveram um estudo para comprovar a influência da altura do leito no tempo de resfriamento de produtos esféricos, dispostos a granel. Segundo os autores, o tempo de resfriamento aumentou com a disposição das frutas no leito, pois se estabelece um gradiente de temperatura na direção do fluxo de ar.

Novy & Kieckbusch (1986), comprovaram de forma teórica, que para uma velocidade do ar de 1 m/s, em 2 h, a temperatura ao longo de um leito de frutas esféricas estava uniformizada. Para uma velocidade de 5 m/s, pode-se atingir a uniformidade da temperatura em todo o leito, num tempo de aproximadamente 1 h. Comprovaram também que, para diâmetros menores o tempo de resfriamento

é menor e vice-versa, cumprindo-se a relação de Fo.

Uma diferença de aproximadamente 80 minutos no tempo de resfriamento, entre o primeiro e último cesto de morango, dispostos numa caixa de papelão, e submetidos a um resfriamento com um fluxo de ar de $0,001 \text{ m}^3/\text{s}$ por quilograma de produto, foi observada por Arifin & Chau (1987).

A influência que a posição dos frutos no leito, assim como a disposição das caixas nas paletes, têm sobre a taxa de resfriamento foi estudada por Baird *et al.* (1988). Um efeito significativo na taxa de resfriamento com ar forçado na direção do fluxo de ar, foi observado pelos autores. A eficiência do resfriamento diminui a medida que a altura do leito aumenta, devido também ao aumento da perda de pressão. Pode-se formar as chamadas "zonas mortas", as quais implicam em pouca renovação do ar e a diminuição da área disponível para que o processo de transferência de calor convectivo aconteça com alta eficiência.

A ASHRAE (1994), indica que se as frutas encontram-se dispostas em leitos, submetidas a uma determinada taxa de fluxo de ar, o valor do coeficiente de transferência de calor convectivo pode ser menor, se comparado com os obtidos em produtos resfriados de forma isolada, pois a área dos produtos que é exposta ao fluxo de ar é menor.

Alvarez & Letang (1994), comprovaram a existência de uma diferença de temperatura entre os frutos colocados na entrada do fluxo de ar (chamado ponto mais "frio") e os frutos colocados na outra face da embalagem (chamado ponto mais "quente"). Constatou-se também uma diferença de aproximadamente 20% entre a temperatura da superfície e a temperatura do centro do corpo. Para uma velocidade do ar em torno de 1 m/s , entre as frutas condicionadas num mesmo palhete, existiu um diferencial de temperatura de 6 a 14°C .

2.6.3- Tipo de embalagem

O tipo de embalagem, assim como a área de abertura, são elementos imprescindíveis para que exista um resfriamento eficiente. A área efetiva para a ventilação é um aspecto muito importante durante o resfriamento rápido com ar forçado, onde o contato do ar com a superfície do produto

deve ser o maior possível. São recomendados embalagens que apresentem no mínimo uma área de abertura de 5 a 10%, no sentido da entrada do fluxo de ar. Nada adianta projetar um sistema de resfriamento com parâmetros eficientes, se as embalagens são inadequadas para este tipo de sistema (Grierson *et al.*, 1970; Hass *et al.*; 1976; Chau *et al.*, 1985; Arifin & Chau, 1988; Baird *et al.*, 1988, Talbot & Baird, 1990; Talbot *et al.*, 1992).

Baird *et al.* (1975) estudaram o resfriamento de laranja a granel, num sistema com ar forçado. O sistema foi projetado para fornecer uma taxa de ar de $7,6 \text{ m}^3/\text{s}$, com uma pressão estática de 1 kPa, o que garantiu uma velocidade do fluxo de 5 m/s na entrada do ar na câmara de resfriamento. A umidade do ar esteve entre 75-100%, e o ar estava sendo subministrado à 0°C . As frutas foram acondicionadas dentro de compartimentos de papelão, onde foi medida a temperatura em três pontos dentro do leito de frutos. Os autores obtiveram tempos de resfriamento que variaram de 90 min; 150 min e 270 min, para os frutos colocados na entrada do ar, no meio da pilha e na saída do ar, respectivamente.

Hass *et al.* (1976), relataram que a perda de pressão do fluxo de ar, através dos orifícios para a ventilação, está diretamente relacionada com a porcentagem de abertura, sendo pouco influenciada pelo tamanho, forma ou localização destas, nas caixas.

Yost *et al.* (1977), desenvolveram um estudo para avaliar o efeito da embalagem e de filmes plásticos na taxa de resfriamento de pêras (Anjou), resfriadas num sistema convencional e em paletes. Os autores observaram que o tempo de resfriamento diminui à medida que aumenta a velocidade do fluxo de ar, variando de 28 horas ($v = 0,05 \text{ m/s}$), para 12,5 h ($v = 1,2 \text{ m/s}$).

Estudos desenvolvidos por Arifin & Chau (1987), comparam o efeito de diferentes modelos de aberturas para a ventilação, em caixas de papelão, usadas comercialmente para a distribuição de morango. Foram testadas caixas com uma porcentagem de abertura entre 13 e 18% (com aberturas circulares de 3,8 cm de diâmetro), e caixas com 14 % de área de abertura (aberturas circulares de 2,5 cm de diâmetro). Os testes foram realizados para quatro regimes de velocidade do ar (0,32; 0,64; 1,27 e 1,90 m/s, respectivamente). O tempo de sete oitavos do resfriamento variou de 100 e 32 min, para as caixas com maior área de aberturas e de 132 e a 50 min, para as caixas com menor área de

aberturas.

Ohling (1990) descreve um sistema de resfriamento comumente usado nos EUA, para o resfriamento rápido de frutas e hortaliças. O autor discute que, no mínimo, se faz necessária uma área efetiva na embalagem de 6%, para permitir e uma troca eficiente de calor entre o produto e o ar resfriado.

Talbolt & Chau (1991) resfriaram morango desde a temperatura ambiente (aproximadamente 28°C) até uma temperatura de 5°C. O tempo dos sete oitavos do resfriamento variaram em dependência da taxa de ar e da área de aberturas das embalagens. O tempo de resfriamento variou entre 160 min a 52 min (taxas de 1,04 a $6,24 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$), e de 160 min a 136 min (embalagens sem orifícios até embalagens com 7 orifícios, para uma taxa de $1,04 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$). Para a taxa de ar de $6,24 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, o tempo diminuiu de 52 min para 32 min, à medida que foram usadas caixas com maior área de abertura. Observa-se a tendência da diminuição do tempo de resfriamento à medida que aumentou a taxa de ar e a área efetiva de passo das embalagens

Fraser & Otten (1992), determinaram o tempo dos sete oitavos do resfriamento de forma experimental e teórica, num sistema de ar forçado, durante o resfriamento de pêra ($v=2,2 \text{ m/s}$, taxa de ar de $0,66 \text{ m}^3/\text{s}$, e $hc=25 \text{ W/m}^2\text{°C}$). Os autores comprovaram que, a temperatura diminuiu gradualmente ao longo do leito no sentido do passo do ar (transversalmente). O tempo de resfriamento variou entre 59 min a 83 min no leito (temperatura referida ao centro das frutas). As curvas teóricas demonstraram uma aproximação adequada com as curvas experimentais.

Na prática deve existir um compromisso entre a área de abertura nas caixas e a resistência destas pois, uma área muito grande ou mal localizada, pode afetar significativamente a função das embalagens. Por outro lado, existem estudos que demonstram que a área de abertura das embalagens afetam significativamente os custos de resfriamento, porque é necessário um tempo maior para conseguir resfriar o produto até a temperatura desejada, representando um maior consumo energético (Baird *et al.*, 1988).

No Brasil, atualmente, grande parte das embalagens utilizadas para o acondicionamento,

transporte e comercialização das frutas, apresenta entre 3% a 7% de área de aberturas. Sendo que desta porcentagem é aproveitável, durante o resfriamento, como área efetiva apenas 50% destes valores (Teruel *et al.*, 1999; Visotto *et al.*, 1999).

A influência do tipo de arranjo em que os frutos são acondicionados, no interior das caixas, tem sido estudada por alguns pesquisadores. Atualmente conhecem-se os tipos de arranjos: quadrado, reto, alternado e triangular.

Grierson & Brown (1975) realizaram testes de resfriamento com frutas cítricas acondicionadas em caixas de papelão usadas comercialmente, no interior de um túnel de ar forçado. Para o desenvolvimento da pesquisa foram testados três modelos de empilhamento das caixas nas paletes. Os autores obtiveram os melhores resultados para o arranjo em que se mantinham as aberturas superiores e inferiores abertas e as aberturas laterais fechadas, o ar foi obrigado a passar apenas no sentido transversal. Não existiu espaçamento entre as colunas de caixas, sendo vedado o túnel com uma lona. Os autores comprovaram que quanto menor é a porosidade do arranjo, menor é o tempo de resfriamento das frutas, em dependência da menor resistência à passagem do fluxo de ar. Em ordem decrescente, com respeito ao tipo de arranjo, os melhores resultados foram: arranjo alternado < arranjo quadrado < arranjo triangular < arranjo reto.

Talbot & Chau (1991) propuseram que para sistemas de resfriamento com ar forçado (para resfriamento de morango), na Flórida, a área livre disponível, para o contato entre o ar refrigerado e o produto deve ser no mínimo de 14%.

Visotto (1998) desenvolveu um trabalho para avaliar as taxas de resfriamento de modelos esféricos construídos com plástico e gel, simulando laranja, os quais foram resfriados num túnel de ar forçado vertical, e acondicionadas em caixas de papelão, usadas para a exportação no Brasil. Foram testados três tipos de arranjos (aleatório, alternado e triangular), comprovando-se que não existiu diferença significativa entre os diferentes arranjos, quanto às taxas de resfriamento (Visotto *et al.*, 1999).

2.6.4- Fluxo de ar

A taxa de ar que passa através dos frutos é outro parâmetro muito importante, o qual envolve a velocidade, significando que, para maiores taxas de ar, maior será a velocidade e menor tempo de resfriamento, o que se traduz em maior eficiência do sistema. Mesmo assim, esta taxa de ar não pode ser aumentada de forma arbitrária, pois velocidades muito altas podem provocar ressecamento da superfície dos frutos e como consequência perdas de peso.

A literatura consultada, propõe que esta taxa de ar deve estar entre 0,001 à 0,006 m³/s por kg de produto a ser resfriado (1 a 6 l/s por kg de produto) (Arifin & Chau, 1987; Arifin & Chau, 1988; Baird *et al.*, 1985; Talbot & Chau, 1991; Fraser, 1991).

Talbot & Chau (1991) propuseram que, para sistemas de resfriamento com ar forçado (para resfriamento de morango), a taxa de ar que deve circular entre os produtos deve estar entre 0,00104 a 0,00624 m³/s por kg de produto resfriado (1,04 a 6,24 l/s por kg).

Émond *et al.* (1996), desenvolveram um trabalho para estudar os parâmetros que afetam a taxa de resfriamento de morango num sistema de ar forçado. Para atingir os resultados foram testados 6 tipos de caixas e 3 fluxos diferentes. O fluxo de ar foi de 0,241 à 0,400 m³/s (241 e 400 l/s). Os frutos partiram de uma temperatura inicial de 22°C e foram resfriados até 2°C. Os autores comprovaram a redução de 30 a 44% do tempo dos sete oitavos do resfriamento quando a taxa de ar é incrementada de 2 para 4x10⁻³ m³/s por kg. Por outro lado a modificação do tipo de embalagem (quanto à área efetiva), provocou um aumento da eficiência do resfriamento em 51%, se comparado com as embalagens usadas convencionalmente. Os autores comprovaram que o coeficiente de transferência de calor é diretamente proporcional ao quadrado do número de Re. Assim, para maiores taxas de ar, maior velocidade, maior é o número de Re e menor o tempo de resfriamento ($Re = \rho V d/\mu$).

Estudos desenvolvidos por Martínez-Jávega *et al.* (1993) demonstraram que, morango resfriado num sistema de ar forçado, com velocidade de 5 m/s desde uma temperatura de 18°C até 4°C (T_c = 2,5°C), resfriaram-se em 60 min. Os frutos foram acondicionados em embalagens de plástico (celofane) perfurados.

Edegou *et al.* (1997) compararam o efeito do fluxo vertical e horizontal no resfriamento rápido de alface, cenoura e morango. Foram utilizadas caixas de plástico convencionais, modificadas para cada tratamento (fluxo vertical ou horizontal). A taxa de ar aplicada foi de $0,002 \text{ m}^3/\text{s}$ por kg de produto, fornecida por um ventilador centrífugo. A porcentagem de área efetiva das caixas foi de 10%. Os produtos partiram de uma temperatura inicial de 20°C e foram resfriados até 2°C . As curvas de resfriamento obtidas, com os dois tipos de fluxos, foram comparadas com o resfriamento dos produtos numa câmara convencional. Para o morango, o tempo de meio resfriamento foi de 26 min e 57 min (fluxo vertical e horizontal), para o resfriamento na câmara convencional o tempo de meio resfriamento foi de 92 min. Os autores comprovaram a não existência de diferença significativa a um nível de 5% entre o resfriamento com os dois tipos de fluxos, existindo diferença significativa quando comparado com o resfriamento na câmara convencional.

Como na prática os fatores inerentes ao produto não podem ser alterados, a diminuição da taxa de resfriamento têm que ser conseguida manipulando as demais variáveis, ou fatores que têm influência no processo de resfriamento.

2.7- Calor de respiração

O período que encerra a fase de completo desenvolvimento das frutas é marcado por uma série de características particulares como: amadurecimento da semente, mudanças na taxa de respiração, alteração da taxa de produção de etileno, mudança da permeabilidade do tecido, alteração da atividade enzimática, incremento da produção de substâncias voláteis, entre outros. Durante a respiração, a energia é liberada em forma de calor (geração interna de calor), os frutos liberam CO_2 e consomem O_2 , acontece um processo de transferência de calor e massa (Chitarra & Chitarra, 1990).

Quanto a influência da taxa de respiração no processo de transferência de calor e massa, alguns trabalhos consultados demonstram que este parâmetro pode ser desprezado em simulações do processo de resfriamento rápido, como é o caso do resfriamento rápido em sistemas com ar forçado. O aumento da temperatura causado pela respiração no centro de uma maçã, foi de $0,023^\circ\text{C}$, após 2 horas de resfriamento (Baird & Gaffney, 1976).

Novy (1985), determinou o calor de respiração de laranjas sendo resfriadas num sistema com ar forçado, sendo que este valor foi igual a 8,5 kcal/300kg (0,00283 kcal/kg), para uma variação de temperatura de 5°C para 2,7°C. Este valor pode ser desprezível se comparado com o calor envolvido no resfriamento que foi de 20 kcal/kg.

2.8- Umidade relativa

Quando vão ser projetados os sistemas de resfriamento deve-se estabelecer um critério técnico-econômico na escolha das condições de temperatura e umidade relativa do ar. Sabe-se que quanto maior a diferença entre a pressão do vapor de água na superfície dos frutos e a pressão do ar que o rodeia, maior será a perda de água do produto (Neves Fo, 1993).

A maioria das frutas possuem um alto teor de água, estando entre 80-95%, (ASHRAE, 1994a), e uma parte dela é perdida a través da transpiração, ou seja, como consequência da transferência de massa entre o ar e o produto que está sendo resfriado. Desta forma a perda por transpiração tem uma influência direta na qualidade dos produtos e, por consequência, nos custos destes, pelas perdas de peso que provoca. Por outro lado, valores de umidade relativa excessivamente altos podem influenciar o desenvolvimento de microorganismos nos frutos, o que também ocasionam perdas da qualidade (Kader, 1992; Chitarra & Chitarra, 1990). Quando o tempo de permanência dos frutos no interior de uma câmara for pequeno, como é o caso do resfriamento rápido num sistema de ar forçado, o valor das perdas de peso podem ser consideradas desprezíveis, sendo menores que 1% segundo Hayakawa (1978) e Gaffney & Baird (1991).

Grierson *et al.* (1970) desenvolveram um estudo para resfriar frutas cítricas, num sistema com ar forçado (velocidades do ar entre 1,27 e 1,52 m/s). Os frutos foram acondicionados em caixas abertas, possibilitando a passagem de um eficiente fluxo de ar através destes. Os frutos partiram de uma temperatura inicial de 25°C, sendo resfriados até 6°C e segundo os autores, as perdas de peso por evaporação durante o resfriamento foram menores de 1%, e os frutos não apresentaram injúrias pelo frio.

Existe uma temperatura e umidade ótima para a conservação dos produtos frescos. Estes

valores devem ser respeitados para garantir uma adequada conservação da fruta (Bleinroth *et al.*, 1992). A ASRHAE (1994a) propõe estes valores e o tempo aproximado de vida útil quando os produtos, entre as frutas, são refrigerados nestas condições (Tabela 2.5).

Tabela 2.5: Condições para estocagem de algumas frutas

Produto	Temperatura de conservação, °C	Umidade relativa, %	Tempo aproximado de conservação
Banana	13 - 14	85 - 95	-*
Manga	10 - 13	85 - 90	2-3 semanas
Mamão	7	85 - 90	1-3 semanas
Morango	-0,5 - 0	90 - 95	5-7 dias
Laranja	1 - 3	85 - 90	8-12 semanas

FONTE: ASRHAE, 1994

*A banana é uma fruta muito sensível, e não deve ser armazenada por mais de um dia.

Para a conservação de laranja da variedade Valência, recomenda-se valores de umidade relativa na ordem de 90%, e temperatura de até 4°C, por um período máximo de 16 semanas. Muñoz-Delgado (1987), cita que um dos maiores problemas durante a conservação de frutas cítricas, é a utilização de embalagens inadequadas ao tipo de resfriamento, o que pode ocasionar perdas de peso nas frutas.

2.9- Laranja: aspectos tecnológicos e científicos

2.9.1- Características da fruta

A laranja é hoje uma das frutas mais consumidas pelas famílias brasileiras. Dados do Instituto Brasileiro de Frutas, IBRAF (1996), mostram que, em pesquisas desenvolvidas sobre o nível de consumo de frutas no Brasil, destacam-se a laranja e a banana. Estes produtos apresentam primazia entre as frutas que mais são encontradas na mesa do brasileiro, por várias razões: maior durabilidade, melhor sabor, melhor para a saúde, contêm mais vitaminas e por serem baratas, se comparada com outras frutas.

A laranja (*Citrus sinensis* O.) é fruto da laranjeira. As mesmas podem ser consumidas frescas (*in natura*), em forma de sucos, doces, ou produtos industrializados. As plantas cítricas (laranjeiras, limoeiros, tangerinas, limeiras, etc.), são originárias de regiões úmidas tropicais e subtropicais do continente asiático e ilhas adjacentes. As mesmas foram levadas para os países europeus há séculos, antes do descobrimento do Novo Continente.

No Brasil, as espécies citrinas foram introduzidas pelas expedições de colonizadores, provavelmente na Bahia. Estas espécies encontraram melhores condições para desenvolver-se que nas próprias regiões de origem, e por esta razão as espécies introduzidas se expandiram por todo o país. Entre as variedades de laranja mais cultivadas no país encontram-se: Valência, Bahia, Hamlin, Pera (Rodriguez & Viégas, 1980).

2.9.2- Laranja Valência

Supõe-se que essa variedade é de origem espanhola (da região de Valência, na Espanha), mas não se têm evidências concretas. As árvores são de porte médio à grande, com folhagem abundante. As plantas podem chegar a produzir 200 kg de frutos por árvore.

Os frutos têm uma forma quase esférica, com 5 a 6 sementes e peso médio de 150 g, a casca é de cor laranja forte, de espessura média e vesículas de óleo quase em nível, apresentando casca de textura firme. O suco representa aproximadamente 50% do peso do fruto, com teores médios de °Brix -11,8%, acidez de 1,05%, e ratio de 11,2 (Rodriguez & Viégas, 1980).

Na figura 2.4 mostra-se a forma e característica da laranja Valência, a qual foi escolhida para o desenvolvimento dos experimentos, pelas suas características e por ser uma das frutas cítricas mais exportadas no Brasil.

As frutas em geral têm um importante papel na alimentação humana, especialmente por serem fontes ricas em vitaminas (C, A, entre outras), tiamina e niacina, minerais e fibra dietética. Papel destacado tem as frutas cítricas, entre elas a laranja, que contém uma importante fonte de vitamina C, em forma de ácido ascórbico. Este é o componente nutricionalmente mais importante da laranja,

sendo sugerido como indicador do valor nutricional das frutas cítricas. O suco contém entre 40-70 mg de ácido ascórbico/100 ml (Rocha *et al.*, 1995).

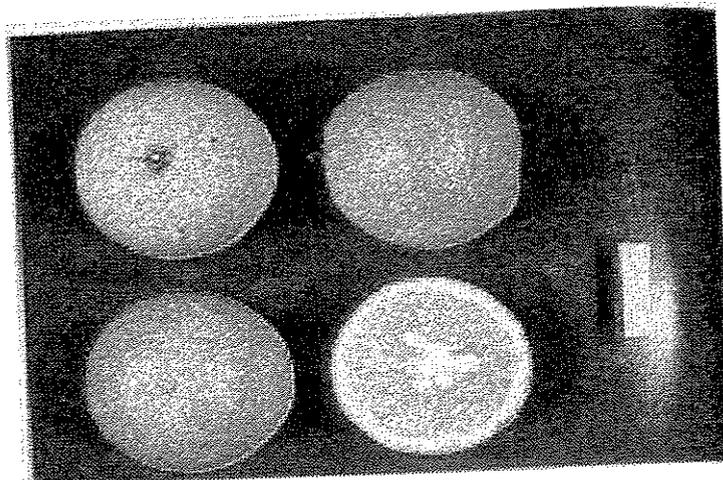


Figura 2.4: Laranja Valência (Adaptado de Rodriguez *et al.*, 1980)

Os níveis de vitamina C estão influenciados por fatores climáticos, grau de maturidade, posição da fruta na árvore, espécie e variedade do fruto, manuseio e colheita (Nagy, 1980). Após a colheita as perdas da qualidade nutricional, particularmente vitamina C, aumentam com os danos fisiológicos, armazenamento prolongado, altas temperaturas, umidade relativa baixa e injúrias causadas pelo frio, quando as frutas são estocadas à temperatura abaixo da recomendada (Kader, 1992).

Diversos estudos tem sido desenvolvidos para avaliar a variação dos níveis de ácido ascórbico, fundamentalmente do suco de frutas cítricas. A avaliação do comportamento de frutas *in natura* é mais reduzida. Nagy & Smoot (1977), mostraram que longos períodos de estocagem das frutas à temperaturas entre 28 a 38°C, são a causa da destruição de grande quantidade de vitamina C. Laranjas expostas ao sol durante 9 h, após a colheita, prática comum na Nigéria, tiveram perdas de 40% no nível de ácido ascórbico (Mudambi & Rajagopal, 1977).

Análises desenvolvidas durante a estocagem de laranja *in natura* (por 4 semanas a 3°C), demonstraram uma retenção de ácido ascórbico de 93% (Nagy, 1980). Uma diminuição de aproximadamente 36% no nível de ácido ascórbico, de laranjas cortadas e submetidas a estocagem durante 13 dias a 4°C, foi reportado por Rocha *et al.* (1995). Em geral, todas as variedades de frutas

cítricas, diminuem o nível de AA dependendo das condições de estocagem (Klein, 1987).

Após 15 dias de armazenamento de laranja Baianinha (num sistema de refrigeração com ar forçado; $T_a = 1 \pm 0,5^\circ\text{C}$ e $UR = 85 \pm 2,5\%$) e a temperatura ambiente ($T = 21 \pm 0,4^\circ\text{C}$ e $UR = 60 \pm 1,0\%$), foi observada uma diferença altamente significativa no nível de ácido ascórbico. A diminuição foi de 20% e 8%, nas laranjas conservadas à temperatura ambiente e nas que foram resfriadas, respectivamente. Os resultados apontam uma tendência à perda da qualidade nos frutos conservados sem refrigeração, reafirmando-se a necessidade do uso de refrigeração para a conservação de frutas *in natura* (Teruel *et al.*, 2000). Na tabela 2.6 mostra-se a composição nutritiva de algumas frutas.

Tabela 2.6: Composição nutricional de algumas frutas

Frutas	Calorias (kcal/100g)	Calcio*	Ferro	Manganês	Potássio	Ácido ascórbico	Tiamina	V-B6	V-A (IU)
Banana	92	6	0,31	29	396	9,1	0,045	0,578	81
Laranja	47	40	0,10	10	181	53,2	0,280	0,060	205
Maçã	59	7	0,18	5	115	5,7	0,017	0,048	53

FONTE: Food Technology, 1990. *(mg/100g)

Como se pode observar a laranja é rica em ácido ascórbico, com baixas calorias. Por outro lado a banana é rica em potássio e possui um alto conteúdo de calorias, se comparada com a laranja e a maçã.

2.9.3- Propriedades termofísicas da laranja

Durante o levantamento bibliográfico feito nesta etapa do trabalho, observou-se a existência de um grande número de dados das propriedades térmicas das frutas. Os dados publicados tem uma variação grande, e isto deve ser provocado, provavelmente, pelo uso de diversas técnicas na determinação destas propriedades. Na tabela 2.7 mostra-se um resumo dos valores de algumas das propriedades encontradas na pesquisa bibliográfica sobre a laranja.

A laranja é um fruto que tem uma estrutura composta, sendo que a casca com o albedo formam uma proteção térmica e impermeabilizante que pode ser considerada como uma resistência adicional à transferência de calor. Essa resistência se fosse incluída na resistência externa, implicaria num

coeficiente efetivo de transferência de calor mais baixo.

Tabela 2.7: Propriedades termofísicas da laranja

Especificação	Valor	Referência
Calor específico, (kJ/kg°C)	3,517(V*)/ 3,663 (N)	Perry, (1968)
	3,85	ASHRAE (1993)
	3,77	Trelea <i>et al.</i> (1998)
Conductividade térmica, (W/m °C)	0,179 - 0,282	Bennett <i>et al.</i> (1966)
	0,489 (V) / 0,4103 (N)	Perry, (1968)
	0,490-0,580	Sweat (1974)
	0,469	Gaffney & Baird (1980)
	0,42	Tang & Jonhson (1991)
	0,50	Trelea & Alvarez (1998)
Condutividade térmica da casca	0,179	ASHRAE (1993)
Condutividade térmica do suco	0,435	ASHRAE (1993)
Densidade, (kg/m³)	1003	Sweat (1974)
	1042	Ramos <i>et al.</i> (1993)
	640	ASHRAE (1993)
	948	Trelea & Alvarez (1998)
Conteúdo de umidade, (%)	85,9	Sweat (1974)
	86	Ramos <i>et al.</i> (1993)
	85	ASHRAE (1993)
Difusividade térmica, (10⁻⁷ m²/s)	1,3 (à 16°C)	Gaffney <i>et al.</i> (1980)
	0,994* (à 40°C)	-
	1,07** (à 40°C)	-
	1,21	-
	1,319	Ansari <i>et al.</i> (1984)
	1,13	Ansari & Afaq (1985)
	1,060	Ramos <i>et al.</i> (1993)

FONTE: Elaboração própria. *Laranja Valencia, **Laranja Navel

Na maioria dos estudos desenvolvidos para a determinação das propriedades térmica e físicas,

os autores referem um valor único de condutividade térmica, nestes casos pode-se considerar que o valor está referido a uma média entre a casca e o suco, ou só referido ao suco.

2.10- Banana: aspectos tecnológicos e científicos

2.10.1- Características da fruta

A bananeira, monocotiledônea pertencente à ordem *Scitamineae*, família *Musaceae*, abrange entre 24 a 30 espécies. Têm-se notícia de que à chegada do Pedro Alvares Cabral ao Brasil, os índios nativos já plantavam e consumiam a banana. A atividade de bananicultura de forma oficial só teve início no século passado, por volta de 1820. Baseado em informações de plantio trazidas das regiões bananeiras de América Central, Caribe, África e Filipinas, a cultura bananeira no Brasil foi se expandindo em regiões próximas aos rios, como Rio Grande do Sul (Barros, 1995).

A banana fruto da bananeira (*Musa Sp*) é apreciada por pessoas de todas as idades e classes. Assim como a laranja, pode ser consumida fresca (*in natura*), ou industrializada. Atualmente existe uma grande variedade desta fruta, dentre as que se destacam (Moreira, 1987):

- *Musa cavendishii*: Nanica, Nanicão, Poyo, Piruá.
- *Musa sapientum*: Gros Michel, Figo cinza, Branca, São Tomé, Ouro, Prata, Maçã, Pacovan.
- *Musa paradisiaca*: Terra, Maranhão Branca, Terra Caturra.
- *Musa corriculata*: Farta Velhaco ou Pacova.

2.10.2- Banana Prata

A bananeira Prata é um cultivar triplóide do grupo AAB, antes classificada como *Musa balbisiana Colla*. Caracteriza-se pelo seu alto porte e baixo peso do cacho (6-15 kg), sendo voltada a sua exploração quase que exclusivamente para o consumo *in natura* (Barros, 1995).

O ponto de colheita do cacho é atingido a partir dos 105 dias de idade, com tamanho e características bioquímicas capazes de suportar um maior período de armazenamento. Na figura 2.5 é

mostra-se uma penca de banana Prata.

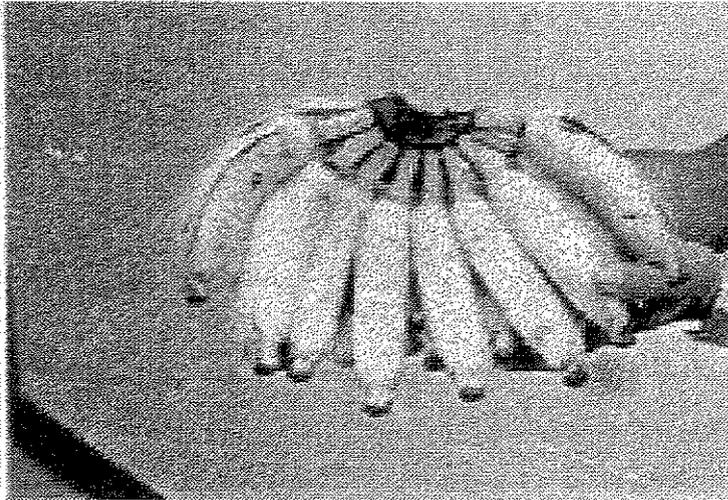


Figura 2.5: Bananeira Prata (Adaptado de Moreira, 1987)

A banana constitui uma fonte importante na alimentação do homem pelo valor calorífico, energético e principalmente pelo conteúdo mineral e de vitaminas que apresenta (Tabela 2.6). Como já foi discutido no capítulo 1, o Brasil é hoje um dos maiores produtores de banana, assim como de laranja, mesmo assim o valor das perdas pós-colheita é elevado. Esta situação está atribuída ao manuseio, transporte e armazenagem inadequado, isto compreende também o fator da temperatura.

A banana encontra-se classificada entre os frutos climatéricos, sendo que a energia liberada em forma de calor no processo de respiração, pode variar entre 0,102 a 0,112 W/kg de produto, à 20°C (Mohsenin, 1980). Estes frutos apresentam alta sensibilidade aos efeitos do frio, por esta razão devem ser conservadas à temperatura adequada, a qual deve estar entre 14 a 16°C (ASHRAE, 1994).

2.10.3- Propriedades termofísicas da banana

Na tabela 2.8 mostram-se as propriedades térmicas e físicas da banana, relatadas na literatura consultada.

Tabela 2.8: Propriedades termofísicas da banana

Especificação	Valor	Referência
Calor específico, (kJ/kg °C)	3,49	Mohsenin (1980)
	3,35 - 3,55	Bleinroth (1984)
Conductividade térmica, (W/m °C)	0,481 (27°C)	Sweat (1974)
	0,509*	Marin <i>et al.</i> (1985)
Densidade, (kg/m³)	1010 - 960	Finney Jr. <i>et al.</i> (1967)
	980	Sweat (1974)
Conteúdo de umidade, (%)	75,7	Sweat (1974)
	73,5	Marin <i>et al.</i> (1985)
	76,0	ASHRAE (1993)
Difusividade térmica, (10⁻⁷ m²/s).	1,257 à 5,9°C	Ansari & Afaq (1986)
	1,180 À 5°C (purê)	ASHRAE (1993)
	0,0125 à 29,7°C**	Queiroz & Nebra (1996)

FONTE: Elaboração própria.

* Estimado com uma equação linear. ** Banana inteira e descascada.

2.11- Custos envolvendo os sistemas de resfriamento

Um outro aspecto a ser considerado quanto a sistemas de resfriamento e a eficiência, são os custos envolvidos neste processo. Os custos podem variar significativamente entre os diferentes sistemas de resfriamento. O custo capital do sistema de resfriamento pode ser minimizado com o uso de equipamentos mais baratos e que possam ser transportados. Como exemplo, na Califórnia, os resfriadores a vácuo são movidos até os locais da colheita durante o ano, podendo ser usados sem custo adicional (Fraser, 1992).

Estudos têm demonstrado que os sistemas de resfriamento com ar forçado são mais econômicos (menores custos e consumo energético), se comparados com os sistemas de resfriamento com água gelada e câmaras de estocagem. Os custos envolvendo os sistemas de resfriamento com ar forçado podem ser menores se utilizados unicamente para o resfriamento rápido dos produtos, que logo depois sejam estocados em câmaras de resfriamento até ser transportados para sua comercialização (Kader, 1992). Entre os principais fatores que afetam os custos de resfriamento

encontram-se: quantidade de horas de operação, temperatura do meio de resfriamento, tipos de embalagens, entre outros.

Gaffney & Bowman (1971), desenvolveram um estudo econômico para avaliar os custos de resfriamento de frutas cítricas num sistema com ar forçado (3 milhões de caixas de 40 kg, resfriadas na Califórnia numa safra). Os frutos foram resfriados em caixas de papelão e a granel. Estes autores comprovaram que quando as frutos foram resfriados no sistema de resfriamento com ar forçado, com diferentes combinações (a granel, em caixas de papelão), o custo total anual variou de US\$ 0,53 à 0,62 por kg de produto.

Baird *et. al* (1985) desenvolveram um estudo para determinar o custo total de resfriamento por kg de produto num sistema de ar forçado, colocando os frutos a granel no interior da câmara. Os frutos foram resfriados a granel e colocados em embalagens de papelão com 5% de área efetiva. Os autores comprovaram que o custo de resfriamento oscilou entre US\$ 0,46 à US\$ 0,62 por kg de produto (velocidade do ar entre 0,3 a 2 m/s), para o resfriamento a granel. Quando os frutos foram resfriados nas caixas de papelão o custo do resfriamento oscilou entre US\$ 0,50 à US\$ 0,95 por kg de produto.

Baird *et al.* (1988) desenvolveram um modelo econômico para estudar a influência de diferentes fatores na taxa e no custo total de resfriamento, para produtos resfriados num sistema de resfriamento com ar forçado. Os parâmetros estudados foram: diâmetro dos frutos, espessura do leito, área efetiva das embalagens, velocidade e temperatura do ar de resfriamento e a temperatura inicial dos produtos. Os frutos foram acondicionados em caixas de papelão e a granel, para velocidades de 0,25 m/s e 0,76 m/s, respectivamente. Todos estes fatores estão inter-relacionados e têm uma influência direta nos custos de resfriamento.

O tempo de resfriamento oscilou entre 2 a 10 horas para frutos de diâmetro de 3 a 15 cm, resfriados em caixas de papelão. Para frutos destas mesmas dimensões, resfriados à granel, o tempo de resfriamento foi 1 a 5 horas. O custo de resfriamento para os produtos resfriados em caixas oscilou entre US\$ 0,11 à US\$ 0,20 por kg, a granel o custo foi de US\$ 0,10 à US\$ 0,14 por kg de produto. Os autores comprovaram que para caixas com 9% de área efetiva o tempo de resfriamento é

de 3,5 h, sendo que para caixas com 1% de área efetiva, o tempo foi de aproximadamente 6 h (com um custo de US\$ 0,43 por kg). Para caixas de 3% de área efetiva o tempo de resfriamento caiu para 4 h, com um custo de US\$ 0,22 por kg de produto.

Para frutos com temperatura inicial de 30°C o tempo de resfriamento foi de 4 h, para frutos entrando a 10 °C, o tempo de resfriamento diminuiu para aproximadamente 2 h, caindo o custo de resfriamento de US\$ 0,16 para US\$ 0,06 por kg de produto.

Na tabela 2.9 mostra-se um resumo dos principais resultados encontrados na literatura, quando avaliados os custos dos sistemas de resfriamento, e as diferentes variáveis que o formam. Particularmente no Brasil, o resfriamento rápido de frutas cítricas não é utilizado pelo fato destas apresentarem um preço muito baixo no mercado, o que não compensa a adição de custos, segundo os produtores.

Tabela 2.9: Valores do custo de resfriamento em sistemas de ar forçado

Custo - parâmetro	Gaffney & Bowman (1971)	Baird <i>et. al</i> (1985)	Baird <i>et. al.</i> (1988)
Área efetiva, US\$/cx (R\$/kg)*	-	-	0,22 (0,38) 0,43 (0,75)
Caixas, US\$/kg, (R\$/kg)	-	-	0,11 a 0,20 (0,19 a 0,35)
Granel, US\$/kg, (R\$/kg)	-	-	0,10 a 0,14 (0,17 a 0,24)
Água gelada, US\$/cx (R\$/cx)	0,43 (0,75)	-	-
Caixas, US\$/cx (R\$/cx)	0,62 (1,08)	-	-
Granel	0,53 (0,92)	-	-
Velocidade do ar, US\$/cx (R\$/caixa)	-	0,48 (0,84) 0,60 (1,05)	-

FONTE: Elaboração própria

*Taxa cambial de 1,75, valor médio fevereiro à março/2000 (Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas, FIPE)

Os resultados aqui mostrados correspondem-se aos trabalhos desenvolvidos em outros países, onde os custos dependem das condições do país em questão. Até o momento não se tem conhecimento de pesquisas no território nacional, que avaliem a magnitude dos custos envolvidos no resfriamento de frutas.

O conhecimento dos custos envolvidos neste processo, junto às vantagens que possui do ponto de vista da conservação da qualidade pós-colheita e o tempo de comercialização, poderia levar os produtores, gradualmente, à implantação de sistemas de resfriamento rápido.

2.12- Considerações do capítulo

- Constatou-se a existência de uma ampla faixa de valores relatados na literatura sobre o coeficiente convectivo de transferência de calor (h_c). Os valores são tão diversos, que vão desde 8 a 62 $\text{w/m}^2\text{C}$. Considera-se importante a obtenção deste coeficiente por ajuste, partindo dos dados experimentais da pesquisa.

- Os valores da difusividade térmica observados na literatura consultada, apresentam uma faixa de variação menor, se comparado com o coeficiente convectivo de transferência de calor. Os valores oscilaram entre 1,06 a $1,31 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, para laranja e banana.

- Constatou-se a existência de vários trabalhos abordando a problemática do resfriamento de frutas, de forma numérica e analítica, desenvolvidos utilizando coordenadas esféricas, cilíndricas ou cartesianas.

- Considera-se interessante a adaptação e validação experimental de um modelo numérico em coordenadas esferoidais (proposto por Lima & Nebra, 1997), para as condições de resfriamento de produtos agrícolas com forma geométricas diferentes.

- Laranja e banana apresentam um alto nível de produção, demanda e consumo no mercado interno e de exportações, no Brasil, tornando-se produtos interessantes para desenvolver a validação experimental.

- Para garantir uma eficiência adequada do processo de resfriamento com ar forçado se faz necessária a escolha criteriosa dos fatores que influenciam o resfriamento. Merecem destaque o uso de embalagens apropriadas a este tipo de sistema, assim como a taxa de ar.

- Até o momento não se tem conhecimento de pesquisas na literatura nacional disponível que avaliem os custos envolvidos em sistemas de resfriamento com ar forçado.

Capítulo 3

Material e Métodos

O desenvolvimento da pesquisa foi dividida em três etapas:

- Etapa I- Análise Experimental
- Etapa II- Modelagem Teórica
- Etapa III- Considerações Econômicas

Na figura 3.1. mostra-se, de forma simplificada, a estratégia seguida para a resolução do problema nas três etapas propostas.

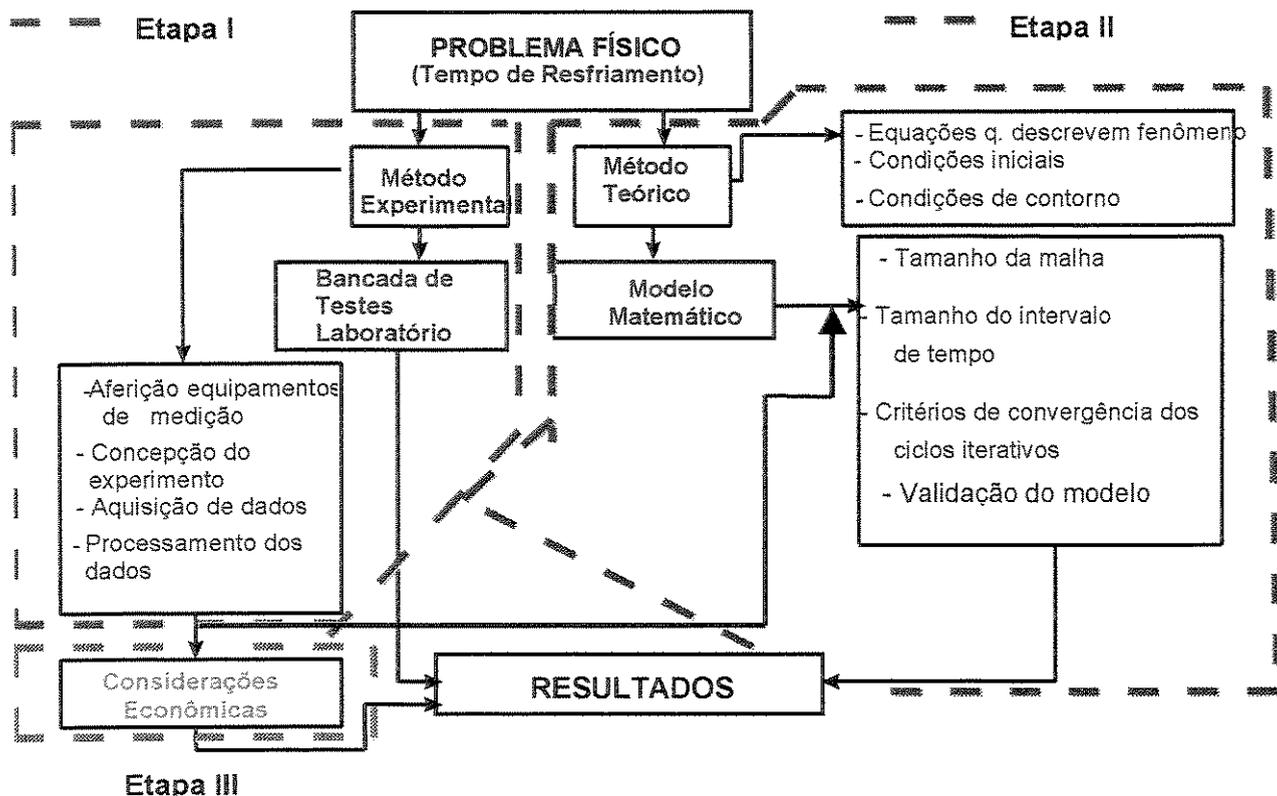


Figura 3.1: Representação esquemática da dinâmica de desenvolvimento do trabalho

3.1-Análise Experimental

3.1.1- Sistema de resfriamento com ar forçado

Quando foi iniciada a pesquisa contava-se apenas com a câmara frigorífica, porém o sistema de resfriamento com ar forçado deveria ser projetado e instalado, uma vez que fossem adquiridos os elementos que o compõem. Inicialmente foi necessário o desenvolvimento de cálculos para escolher o ventilador adequado aos objetivos da pesquisa.

3.1.1.1- Ventilador e características

Para o dimensionamento do ventilador foi necessário calcular a quantidade de produto que poderia ser resfriado, considerando as seguintes condições:

$T_a = 1^\circ\text{C}$ (temperatura do ar na câmara, temperatura de conservação do produto)

$T_i = 30^\circ\text{C}$ (temperatura inicial do produto, assumido para efeitos de cálculo)

$\Delta T = 14,5^\circ\text{C}$ (aplicando o tempo de meio resfriamento)

$C_p = 3,67 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$

$t = 3600 \text{ s}$ (1 hora) (tempo de resfriamento considerado)

$Q_o = 2,90 \text{ J/s}$ (tomado da curva do compressor para $T_o = -9^\circ\text{C}$)

Partindo da equação:

$$\dot{Q}_o = \frac{MC_p\Delta T}{t} \quad (3.1)$$

então

$$M = \frac{\dot{Q}_o t}{C_p\Delta T} \approx 190 \text{ kg} \quad (3.2)$$

Como foi apresentado no capítulo 2, para garantir um resfriamento rápido efetivo com ar forçado, em geral recomenda-se aplicar uma taxa de 1 a 4 l/s de ar por quilograma de produto a ser resfriado (0,01 a 0,04 m³/s de ar). Para o dimensionamento do ventilador considerou-se uma taxa de ar 4 l/s por kg de produto (0,04 m³/s por kg de produto), escolhendo-se um ventilador centrífugo de pás, com as seguintes características (Anexo A):

Modelo:	BSC 241-152
Vazão de ar:	2.900 m ³ /h
Pressão estática :	440 kPa
Voltagem:	220-380-3F
Velocidade de descarga:	14,08 m/s
Rendimento estático:	36,62%
Velocidade rotação do ventilador:	1.730 rpm
Pressão dinâmica:	98 kPa

Para que o ventilador trabalhe-se em três regimes de operação, garantindo três fluxos de ar diferentes, uma polia escalonada foi construída. Esta alternativa permitiu desenvolver vários experimentos no mesmo túnel de ar forçado, para fluxos de ar variando desde 0,01 m³/s até 0,04 m³/s. Desta forma foi testada a influência da taxa de ar no tempo de resfriamento dos produtos. Para a construção da polia escalonada foi fornecido ao fabricante o valor das três taxas de ar requeridas. Construiu-se então uma polia escalonada com três diâmetros (Figura 3.2).

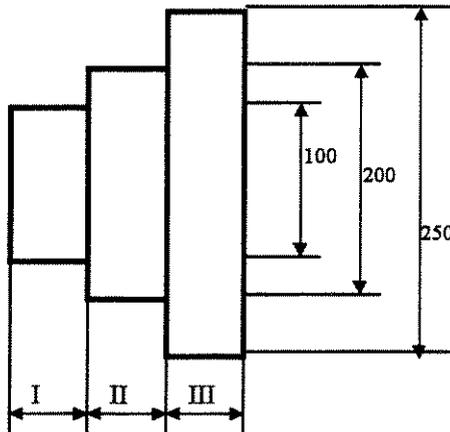


Figura 3.2: Representação da polia escalonada do ventilador. I- Regime I ($d_2 = 100$ mm), II- Regime II ($d_2 = 200$ mm), e III- Regime III ($d_2 = 250$ mm)

O diâmetro da polia escalonada do motor (d_1), não variou (100 mm). O fluxo de ar e a velocidade de rotação foi calculada, utilizando as equações da Lei dos Ventiladores, tendo como dado o diâmetro das polias, fornecidos pelos fabricantes e a curva característica do ventilador BSC 241-152.

Para o cálculo da velocidade de rotação da polia do ventilador e o fluxo de ar em cada posição da polia do ventilador foram usadas as seguintes equações e dados:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{d_2}{d_1} \quad (3.3)$$

$$N_1 = 1.730 \text{ rpm e } d_1 = 100 \text{ mm}$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3.4)$$

sendo:

$$Q_1 = 2.900 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q = v \cdot A \quad (3.5)$$

Partindo da equação 3.3, com N_1 e d_1 e d_2 ($d_2 = 100, 200$ e 250 mm), determinou-se N_2 , para as posições I, II e III. Aplicando a equação 3.4, com $Q_1 = 2.900 \text{ m}^3/\text{h}$, $N_1 = 1.730$ rpm e cada um dos valores de N_2 determinados com a equação 3.3, obteve-se o valor de Q para cada posição da polia.

A velocidade de descarga do ventilador foi determinada com a equação 3.5, com o valor de Q para cada posição da polia, e com o valor da área de saída do ventilador ($0,0572 \text{ m}^2$). Os valores obtidos nos cálculos teóricos foram conferidos na curva de operação do ventilador (Tabela 3.1).

Tabela 3.1: Valores dos parâmetros de operação do ventilador do sistema com ar forçado

Parâmetro	I (3 l/s)	II (2 l/s)	III (1,5 l/s)
Diâmetro da polia do ventilador, (mm)	150	200	250
Vazão de ar, (m^3/h)	1.933,77	1.450,00	1.160,00
Velocidade de rotação, rpm	1.153	865	692
Velocidade de descarga do ventilador, m/s	9,38	7,04	5,63

3.1.1.2- Testes preliminares

Para conferir a validade dos dados fornecidos pelo fabricante foram desenvolvidas uma série de medições experimentais. Estas medições permitiram comprovar os parâmetros de funcionamento do ventilador:

Teste 1- Medição da velocidade de rotação do ventilador

Teste 2- Medição da velocidade do ar

Teste 3- Determinação da vazão de ar

Teste 1- Medição da velocidade de rotação do ventilador

Para a medição da velocidade de rotação (rpm) foi utilizado um tacômetro digital ótico de quartzo, Marca MICROTEST F44. Para tanto o ventilador foi colocado para trabalhar nos três regimes acima descritos, mudando a correia e a polia para cada regime.

Teste 2- Medição da velocidade do ar

A velocidade do ar na saída do ventilador foi determinada com ajuda de um anemômetro digital de pás, LUTRON, com escala de 0 a 15 m/s. Para isto foi medida a velocidade do ar em 9 pontos na saída do duto acoplado ao ventilador, determinando-se a velocidade média aritmética. A área da boca de saída do duto é de $0,0572 \text{ m}^2$.

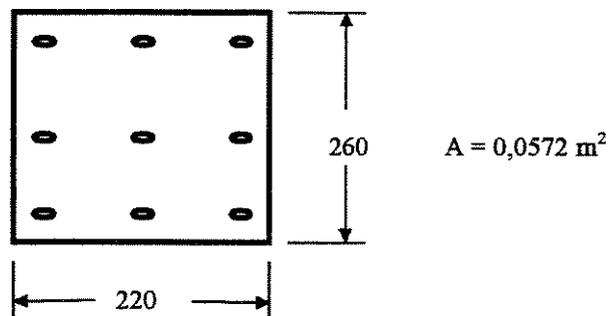


Figura 3.3: Posições de medida da velocidade do ar na saída do ventilador

A velocidade do ar na saída do evaporador foi medida com o anemômetro, colocando o instrumento na frente do ventilador, numa posição adequada para a medição, em 12 pontos ao redor da área de saída. Para todas as medições, em todos os regimes de operação foram feitas três repetições.

Teste 3- Determinação da vazão de ar nominal

A vazão de ar nominal fornecida pelo ventilador foi determinada usando a equação 3.5, com o valor da velocidade de rotação (N_2) obtido experimentalmente.

3.1.2- Sistema de resfriamento

Depois de efetuados os cálculos e medições experimentais, durante a instalação do ventilador, foi desenvolvida a montagem do sistema de resfriamento com ar forçado, no interior de uma câmara de resfriamento (*room cooling*), com as seguintes características:

Dimensões:	3.060 x 3.060 x 2.300 m
Volume:	21,54 m ³
Isolamento térmico:	Espuma rígida de poluretano, densidade de 35 kg/m ³
Paredes:	Painéis modulados, revestidos externa e internamente com chapas de aço galvanizado.
Compressor:	Modelo Fk-3, rotação 915 rpm, regime de -25 / + 45°C, R-22. Potência frigorífica 2.700 kcal/h
Condensador:	Modelo Recrusul 24-06-36-0790, condensação a ar
Evaporador:	Modelo Recrusul 16-06-74-0600, a ar, com degelo elétrico automático
Iluminação:	Luminária incandescente de 100 w

A câmara frigorífica possui um registrador-indicador de temperatura do tipo analógico, na parede exterior, ao lado da porta, assim como termostato de ambiente, termostato para o degelo e um termostato no evaporador, que aciona o sistema de desligamento automático do compressor. O evaporador encontra-se na parte superior da câmara, fixado no teto.

Na figura 3.4, está representada a forma e colocação dos dutos no interior da câmara de resfriamento. O ventilador (2) foi instalado no interior da câmara embaixo do evaporador (1). Um duto metálico (3) foi construído de acordo com a capacidade do ventilador, sendo encaixado na

sucção do ventilador ($d = 235$ mm), e um outro na descarga do ventilador. O duto colocado na descarga do ventilador (1a), tinha a função de direcionar o ar succionado pelo ventilador até o evaporador, permitindo que todo esse fluxo de ar voltasse ao evaporador para ser resfriado novamente. O duto inserido no canal de sucção do ventilador (3), tinha a função de direcionar todo o fluxo de ar que passava entre os produtos até o ventilador.

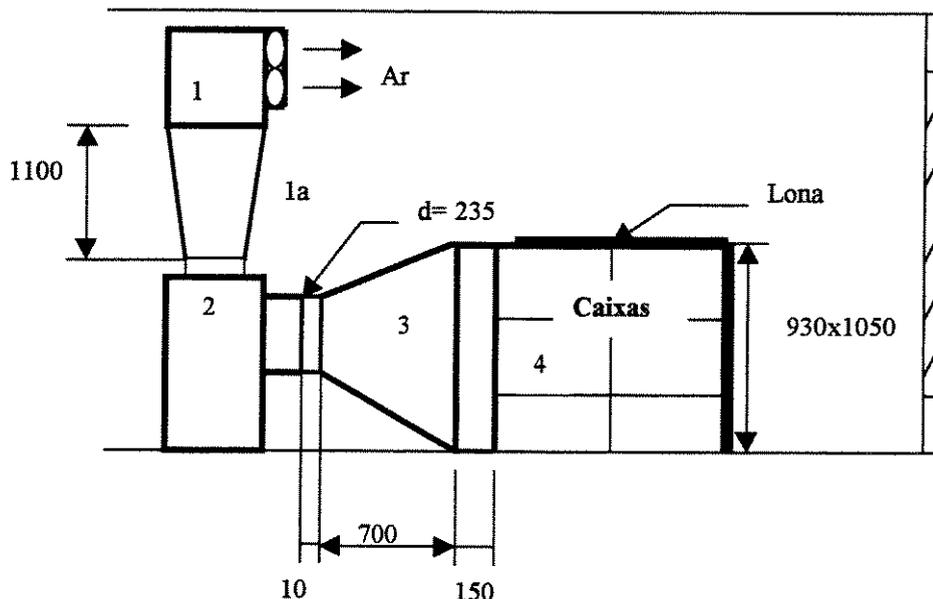


Figura 3.4: Dimensões (mm) e colocação dos dutos ligando o ventilador ao evaporador, e o ventilador ao túnel de resfriamento (Anexo A)

Na parte frontal do duto (3), foi colocado o volume de 12 caixas, por cima das quais foi disposta uma lona fechando o túnel de resfriamento (4), na parte superior e frontal das caixas.

O sistema de resfriamento com ar forçado montado para a realização dos testes funciona da seguinte forma: o ar resfriado que sai do evaporador (1), é direcionado a passar transversalmente entre o volume das caixas que encontram-se no interior do túnel (4), fechado com a lona. O ar resfriado que passa através dos frutos, é succionado pelo ventilador (2), depois da troca de calor e é descarregado até o evaporador, por onde passa novamente para ser resfriado, fechando-se assim o ciclo (Figura 3.5).

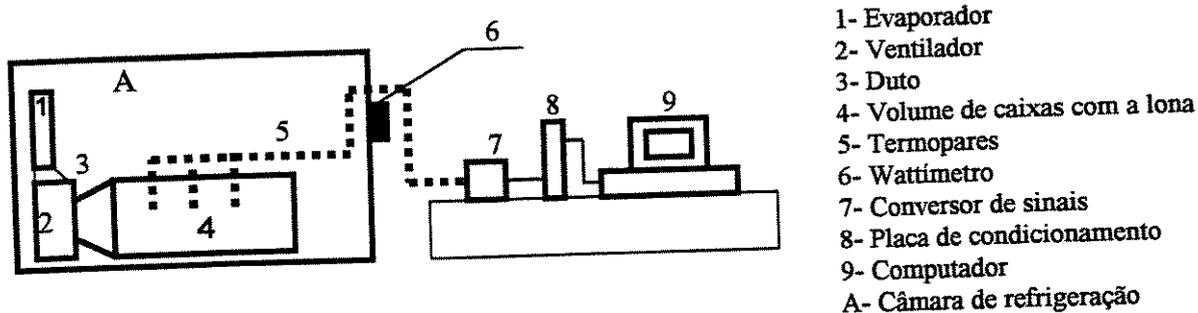


Figura 3.5: Elementos que compõem o sistema de resfriamento e a bancada de experimentos

Para desenvolver as medições de temperatura, e do consumo elétrico da instalação outros elementos foram incorporados à bancada de experimentos. Para a medição de temperatura foram usados termopares (5), os quais foram introduzidos por um orifício existente na parte lateral da câmara. Estes termopares foram conectados a um sistema de aquisição de dados por computador (7; 8; 9), o qual foi instalado na parte exterior da câmara. Um wattímetro (6) para a medição do consumo elétrico foi instalado, ao lado do painel de controle da câmara, na parede lateral exterior (Figura 3.5).

Depois da montagem do sistema de resfriamento, teve início a realização de uma série de testes preliminares, com o objetivo de conferir o adequado funcionamento do sistema e de parâmetros de operação como a temperatura e umidade relativa do ar sem produtos. Culminados os experimentos preliminares sem produto, foram realizados uma série de experimentos preliminares, desta vez utilizando produto, a fim de aprimorar a metodologia e o planejamento experimental proposto.

3.1.3- Sistema de aquisição de dados por computador

Um sistema de aquisição de dados via computador, para o monitoramento das leituras de temperatura, foi utilizado para a realização dos testes. Este sistema foi instalado no laboratório ao lado da câmara de refrigeração (Anexo A, Foto 4).

Este sistema é constituído por uma placa de condicionamento de sinais analógicas (PCX 0802) e um conversor de sinais (CAD 12/32), com 32 canais (de entrada). O computador usado para a instalação dos elementos que conformam o sistema foi um AT 486.

O sistema de aquisição de dados foi calibrado pelos técnicos, os quais fornecem o certificado de calibração. O sistema possui um sensor de temperatura interno (compensação por junta fria), e pode ser usado para medições com termopares do tipo J, K, T, S e R.

O sistema foi adquirido da LYNX TECNOLOGIA ELETRÔNICA LTDA. e consta além dos elementos já mencionados, do *software* AQDADOS, versão 5.1. Este *software* possui uma interface homem-máquina simples e eficiente, através de opções de menus, que permite a configuração e programação dos canais de entrada, armazenagem dos dados em disco, impressão de relatórios, visualização dos dados em 4 canais em tempo real, entre outras vantagens.

O sistema de aquisição de dados foi programado para realizar as leituras de temperatura com uma frequência de 0,01 Hz.

3.1.4- Termopares. Aferição

As medições de temperatura foram realizadas usando termopares tipo T (Cobre-Constantan), construídos a partir de cabos flexíveis AWG # 24 (0,5 mm), revestidos de PVC e soldados com solda prata, seguindo as recomendações da literatura (ASTM, 1989). Estes termopares já tinham sido usados em pesquisas precedentes, demonstrando ótimos resultados (Teruel, 1996; Teruel *et al.*, 1999).

Para a aferição dos termopares, estes foram ligados ao sistema de aquisição de dados por computador, sendo numerado cada termopar (26 em total), dependendo do canal onde foram conectados. Os termopares a serem usados nos experimentos foram inseridos num banho de água no ponto de ebulição ($T=98,1^{\circ}\text{C}$), e num banho de uma mistura de água e gelo ($T = 0,1$ a $0,5^{\circ}\text{C}$). Como referência foi usado um termopar padrão (desvio padrão de $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$) e um termopar de mercúrio com um desvio padrão de $\pm 0,001^{\circ}\text{C}$ e divisão de $0,1^{\circ}\text{C}$, onde eram feitas as leituras visuais.

Efetuuou-se a média aritmética das leituras de temperatura dos termopares para cada um dos valores previamente definidos no banho. Obteve-se um desvio padrão na calibração de todos os termopares (26 em total) entre $0,15$ e $0,22^{\circ}\text{C}$, o que pode ser considerada uma faixa aceitável para

termopares tipo T. Para leituras de temperatura de -200 à 0°C , o limite de desvio recomendado com respeito ao termopar padrão deve estar na faixa de $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ (ASTM, 1989).

Depois da aferição, os termopares foram novamente numerados e identificados, de acordo com o número de saída do canal do conversor, o que permitiu a identificação quando introduzidos nos frutos.

3.1.5-Produto

A fase de testes com produto foi dividida em duas etapas. Inicialmente uma série de testes preliminares foram desenvolvidos para então executar os testes definitivos.

Nos testes preliminares foram usadas laranjas da variedade Baiainha (*Citrus sinenses O.*), trazidas diretamente do campo de colheita da Fazenda Sete Lagoas, em Mogi Iguçu (SP). Estes testes preliminares permitiram decidir qual seria a melhor posição para colocar os termopares, o tempo necessário para o desenvolvimento dos experimentos, a confiabilidade dos resultados e a metodologia estatística a ser usada nos experimentos definitivos, assim como testar o funcionamento do túnel de resfriamento com produtos, entre outros fatores importantes no desenvolvimento da pesquisa.

Uma vez aprimorada a metodologia experimental, foram usadas, para os testes definitivos, laranjas da variedade Valência cultivadas na mesma fazenda que as laranjas variedade Baiainha. As laranjas foram trazidas do *packinghouse* (galpão onde é feito o tratamento pós-colheita que inclui: seleção por grau de maturação, lavagem, enceramento, seleção por tamanho e acondicionamento nas embalagens). A classificação é feita com um sistema mecanizado, que permite dividir em várias classes, por tamanho, as laranjas, desta forma sempre foram escolhidas para o desenvolvimento da pesquisa, caixas contendo frutos de aproximadamente o mesmo diâmetro. Esta variedade de laranja é destinada à exportação, fundamentalmente para Europa. Atualmente a produção de laranja da Fazenda Sete Lagoas, representa aproximadamente 3% da produção do Estado de São Paulo (Visita Técnica, 1998).

Para a realização dos experimentos foram trazidas 12 caixas, contendo cada uma entre 18 a 20 kg de laranja (aproximadamente 88 laranjas por caixa), entre os meses de julho à outubro, sendo que quatro vezes em cada mês foram retiradas as caixas do *packinghouse* da fazenda, aproximadamente às 8.30 h. Os frutos foram transportados até a UNICAMP numa camioneta devidamente coberta, com uma lona, para evitar o aquecimento das mesmas. Os frutos foram levados ao Laboratório de Refrigeração da Faculdade de Engenharia de Alimentos, onde foram desenvolvidos os experimentos.

Depois de culminados os experimentos definitivos com laranja, foi desenvolvida uma série de experimentos, desta vez usando banana. Para estes fins foi usada banana da variedade Prata (*Musa balbisiana Colla*). As frutas foram fornecidas por um produtor da região, embaladas e transportadas à Companhia de Entrepósitos de Campinas (CEASA), pelo produtor, de onde eram transportadas até a UNICAMP, tomando os mesmos cuidados observados com as laranjas.

As bananas sempre foram colhidas ao final da tarde anterior ao transporte até a UNICAMP, selecionadas previamente por tamanho e grau de maturação, antes de serem acondicionadas nas embalagens. Nos meses de novembro à dezembro, 12 caixas de bananas, uma vez por semana (de aproximadamente de 18 a 20 kg), foram trazidas até o Laboratório de Refrigeração da Faculdade de Engenharia de Alimentos, sempre nas primeiras horas da manhã.

3.1.5.1- Determinações do peso e das dimensões das laranjas

Depois da chegada dos frutos ao laboratório, era feita uma seleção aleatória de uma caixa, da qual foram medidas e pesadas 80 amostras (frutas). Esta operação foi feita antes de cada experimento de resfriamento.

Para a determinação do peso foi usada uma balança digital (Marca Filizola Modelo BP15, 110/220 v, 60 Hz, com carga máxima de 15 kg e min de 125 g). As amostras foram numeradas, etiquetadas e pesadas antes do resfriamento. Depois do resfriamento rápido esta caixa era retirada da câmara e, novamente, foram pesadas as amostras. Com o valor do peso antes (M_i) e depois do resfriamento (M_f), foram determinadas as perdas de peso (Equação 3.7).

$$Mp = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \quad (3.6)$$

Antes do resfriamento e após a pesagem das amostras, foram determinadas as dimensões dos mesmos frutos. Para este fim foi usada uma fita métrica flexível para a medição do perímetro, determinando o diâmetro no sentido longitudinal (Pe_2) e equatorial (Pe_1), para depois determinar, com essas dimensões, o raio ($r_1=L_1$ e $r_2=L_2$) (Figura 3.6).

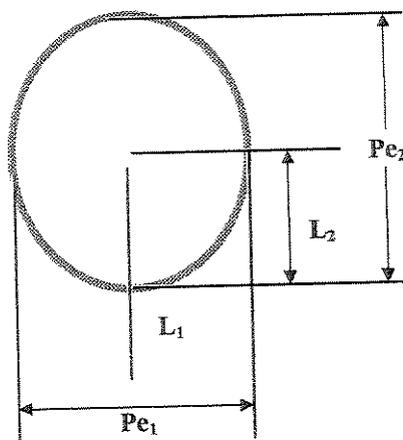


Figura 3.6: Representação esquemática da forma e dimensões da laranja

Para a determinação do raio, utilizou-se a equação do perímetro da circunferência:

$$Pe = 2\pi r \quad (3.7)$$

sendo que:

$$r = \frac{Pe}{2\pi} \quad (3.8)$$

A determinação destas duas dimensões é muito importante, pois serão necessárias para serem incluídas no modelamento matemático. Com uma simples apreciação visual das amostras, comprovou-se que as laranjas não são esferas perfeitas, pelo que sua forma geométrica é próxima a um corpo esferoidal prolato (elipsoide), onde $L_2 > L_1$.

3.1.5.2- Determinações do peso e das dimensões das bananas

Nos experimentos com banana, da mesma forma que com a laranja, uma caixa de bananas foi escolhida aleatoriamente, antes do resfriamento, para a determinação do peso.

Para a determinação do peso, todas as pencas, da caixa escolhida, foram pesadas (as caixas continham em média 12 pencas), numerando e etiquetando as mesmas. Depois do resfriamento foram pesadas as amostras, e calculadas as perdas de peso (Equação 3.7). Para realizar as medições foi usada a mesma balança digital usada nos experimentos com laranja.

Para a determinação das dimensões, outra caixa de bananas foi escolhida de forma aleatória, medindo em cada tratamento 30 bananas. A medição foi feita com uma fita métrica flexível, medindo sempre o comprimento dos lados côncavo e convexo das bananas (Pe_2 e Pe_2'), e o perímetro P_1 (Figura 3.7). Com estes parâmetros foi determinado o valor de L_1 e L_2 . O valor de L_1 foi determinado com a equação 3.8. O valor de L_2 foi calculado como:

$$L_2 = \frac{\left(\frac{Pe_2 + Pe_2'}{2} \right)}{2} \quad (3.9)$$

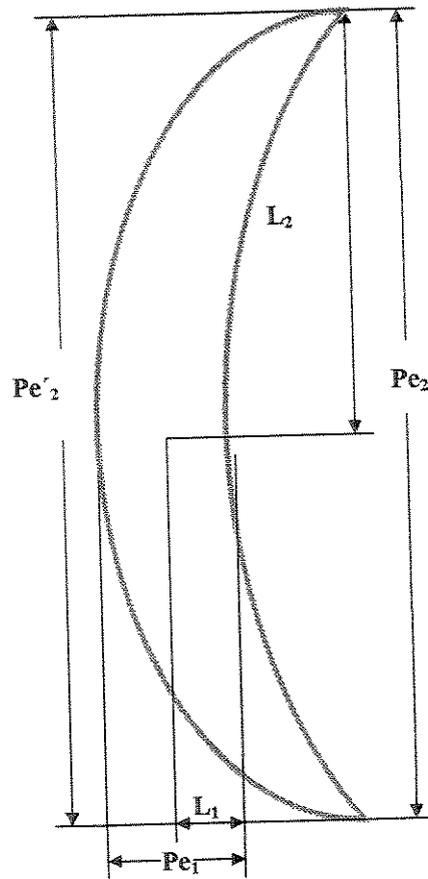


Figura 3.7: Representação esquemática aproximada da forma e dimensões da banana

3.1.6- Medição da temperatura

3.1.6.1- Experimentos de resfriamento com laranja

Nos testes preliminares, uma vez colocados os termopares nas amostras escolhidas, em quatro caixas em diferentes posições dentro do túnel, a porta da câmara foi fechada e somente então foi ligado o sistema de resfriamento. O ar começou a circular entre os frutos, ainda à temperatura do ambiente exterior, o que provocou um resfriamento lento dos produtos, situação esta acentuada pela carga térmica que introduz o produto. Desta forma foi comprovado, nos testes preliminares, que a manutenção do ar, a uma temperatura constante, tornava-se quase impossível. Houve casos em que a temperatura do ar entre os produtos era quase a mesma, sem conseguir uma estabilização da temperatura à 1°C .

Para que um sistema de resfriamento seja eficiente, a temperatura do ar deve estar estabilizada, em regime permanente. Desta forma os produtos entram no túnel à temperatura inicial, e o processo de resfriamento efetuado devido à eficiente troca de calor, de forma rápida, refletindo-se em curtos tempos de resfriamento.

Como o sistema montado para o desenvolvimento dos testes têm dimensões reais, e foi calculado para resfriar 12 caixas de produtos, decidiu-se então, para poder diminuir o problema da estabilização e manutenção da temperatura do ar, agindo da seguinte maneira: inicialmente o sistema foi ligado, com a câmara sem produtos, até estabilizar a temperatura em 1°C. Depois que o ar no interior da câmara encontrava-se estabilizado, sendo monitorado através do sistema de aquisição de dados via computador. O processo de inserção dos termopares nas amostras selecionadas, de duas caixas, se fazia depois de tirar os frutos da caixa até a fileira em que iam ser colocados os termopares, e depois colocavam-se novamente os frutos respeitando o arranjo alternado.

O restante das caixas de frutos (10 caixas), era mantido perto da porta de entrada da câmara, até o momento de serem colocadas no interior da câmara, no menor tempo possível, cuidadosamente, para evitar que os termopares não saíssem do lugar. Uma vez colocadas as 12 caixas, era colocada a lona por cima das mesmas, fechando o túnel e ligando o ventilador do sistema de ar forçado, e fechando a porta da câmara.

Desta forma, e dentro das possibilidades que a montagem experimental permitiu, puderam ser realizados os experimentos, garantindo um mínimo de desestabilização da temperatura do ar, provocada pela abertura e colocação das caixas no interior da câmara.

Citados os fatores que levaram a desenvolver as medições, apenas em duas caixas no interior do túnel de resfriamento, será explicada a colocação dos termopares.

As caixas foram dispostas em duas colunas, em duas fileiras e com três caixas de altura. A face de maior área das caixas, foi colocada no sentido da passagem do fluxo de ar, permitindo assim que, a troca de calor fosse mais eficiente e em consequência, a obtenção de melhores taxas de resfriamento.

Os termopares foram inseridos no centro de 3 laranjas da fileira do meio, nas caixas B e E, como é mostrado na figura 3.8. A temperatura foi medida no ponto 1 que se corresponde com a entrada do ar na caixa, no ponto 2 (fruto no meio da caixa) e ponto 3 (que se corresponde a posição mais afastada da entrada do ar na caixa).

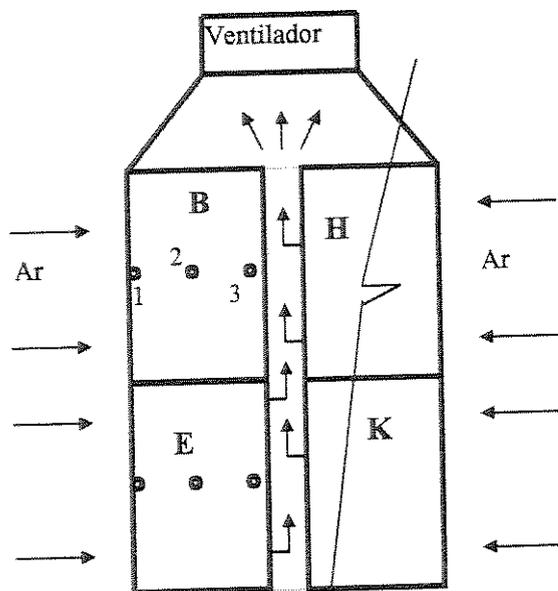


Figura 3.8: Representação esquemática em planta da colocação dos pontos em que foram colocados os termopares nas caixas B e E

Os ensaios tiveram uma duração aproximada de 600 minutos (10 horas) e o termostato da câmara foi colocado em 1°C. Com a distribuição de termopares feita, pretendeu-se avaliar o comportamento do tempo de resfriamento em três posições diferentes à passagem do ar pelos frutos, podendo avaliar a existência do gradiente de temperatura ao longo do leito no sentido transversal. A localização dos pontos em que foi monitorada a temperatura ao longo do leito, numa caixa, é mostrado na figura 3.9.

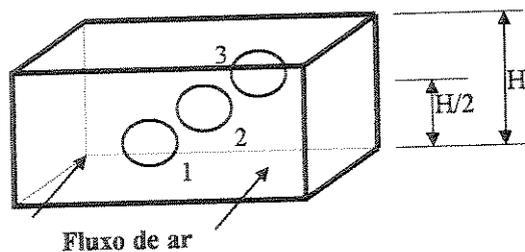


Figura 3.9: Pontos da medição da temperatura nos experimentos com laranja

Para a inserção dos termopares seguiu-se o procedimento a seguir exposto: os frutos selecionados foram colocados na posição equatorial, introduzindo-se uma vareta de aproximadamente o mesmo diâmetro do termopar, até aproximadamente o centro do frutos (o qual já tinha sido marcado na vareta partindo das medidas determinadas). O termopar foi introduzido em seguida, de forma ajustada, evitando assim a entrada de umidade do ar nos frutos.

Outros termopares foram colocados para medir a temperatura na superfície dos mesmos frutos. Para tanto, a ponta do termopar foi delicadamente colocada de forma a ser inserida apenas na superfície dos frutos, e depois o termopar era fixado ao corpo do fruto com fita adesiva. No entanto, devido ao fato de que após a colocação dos termopares as caixas eram transportadas até o interior da câmara, e também em outros casos, devido ao fechamento da embalagem usada, foi quase impossível evitar o deslocamento do termopar em relação a posição normal à superfície das laranjas, em alguns dos experimentos (Figura 3.10).

A medição da temperatura na superfície torna-se complexa, esta problemática já foi discutida por alguns pesquisadores. Geralmente nos trabalhos desta área a temperatura da superfície é considerada em equilíbrio com a temperatura do meio de resfriamento, como já foi discutido no capítulo 2 (Gaffney *et al.*, 1980; Chau *et al.*, 1985).

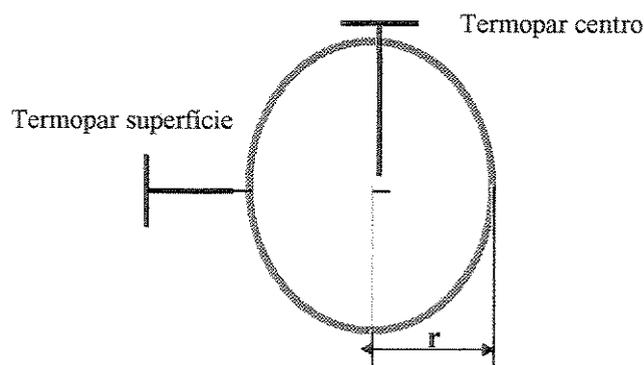


Figura 3.10: Representação esquemática da colocação do termopar no interior e na superfície dos frutos (laranja)

Como as frutas saem do *packinghouse* acondicionadas em arranjo alternado, preferiu-se manter este tipo de arranjo para desenvolver o estudo. Na figura 3.11 mostra-se, de forma simplificada, a

forma do arranjo e a posição em que foram colocados os termopares para a medição da temperatura.

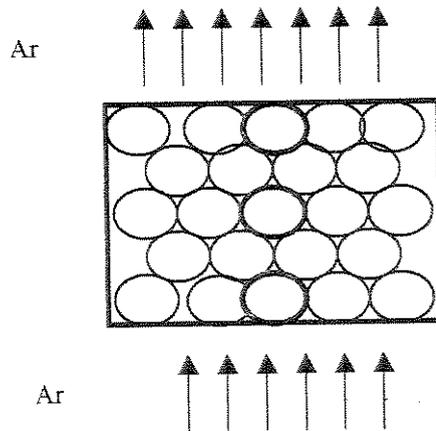


Figura 3.11: Vista superior das laranjas dispostas no arranjo alternado e a posição onde foram colocados os termopares

3.1.6.2- Temperatura do ar

A temperatura do ar foi monitorada através de um termopar colocado no interior da câmara, na parede lateral, a esquerda do evaporador e um outro termopar ao lado para medir a temperatura do bulbo úmido (T_{bu}). Para este fim, num termopar foi revestida a ponta com uma mecha de tecido absorvente, esta mecha foi inserida num bulbo com água destilada, permitindo assim fazer as leituras das temperaturas do bulbo úmido durante os experimentos. Este tipo de medição já tinha sido testado em pesquisas precedentes, assim como nos testes preliminares, demonstrando confiabilidade nos resultados (Teruel, 1996; Teruel *et al.*, 1999).

3.1.6.3-Determinação da umidade relativa

A determinação da umidade relativa foi feita através das leituras da temperatura do bulbo úmido (T_{bu}) e do bulbo seco (T_a) a temperatura do ar. Os valores da umidade relativa foram determinados com auxílio do *software* PLUS (Albrigh, 1990), introduzindo como dados os valores da T_{bu} e T_a , para cada instante de tempo e a pressão barométrica em Campinas (95 kPa).

3.1.7- Determinação do tempo de resfriamento

Para a determinação experimental do tempo de resfriamento foram usados os dados experimentais de temperatura lidos no centro das frutas ($T=T_c$), para cada ponto em que foi monitorada a temperatura, e calculada a Taxa Adimensional de Temperatura (TAT):

$$TAT = \frac{T_c - T_a}{T_i - T_a} \quad (3.10)$$

No instante em que TAT seja igual à 0,5 o produto terá atingido o tempo de meio resfriamento:

$$TAT_{1/2} = \frac{T_c - T_a}{T_i - T_a} = 0,5 \quad (3.11)$$

Quando a TAT seja igual à 0,125; aproximadamente no centro, os frutos terão atingido o tempo dos sete oitavos do resfriamento :

$$TAT_{7/8} = \frac{T_c - T_a}{T_i - T_a} = 0,125 \quad (3.12)$$

Os dados experimentais, de todos os testes, foram processados com o auxílio de uma planilha do Microsoft Excel. As curvas de resfriamento experimentais serão mostradas no capítulo 4.1.

3.1.8- Testes na câmara de estocagem

Além dos testes para a determinação do tempo de resfriamento dos produtos no túnel de resfriamento, foram desenvolvidos alguns testes para determinar o tempo de resfriamento dos produtos estocados na câmara, usada geralmente para resfriamento e estocagem (*room cooling*). O valor do tempo de resfriamento, quando os produtos são resfriados na câmara de estocagem, serão usados posteriormente nos cálculos do custo total por caixa resfriada (capítulo 3.3).

Para a realização destes experimentos foi seguida a mesma metodologia usada nos testes no túnel de ar forçado, quanto à colocação dos termopares e das caixas no interior da câmara. Os frutos foram resfriados até uma temperatura do ar de 1°C. As caixas de laranja foram colocadas em duas colunas, na mesma posição que quando colocadas no túnel de ar forçado e não foi utilizada a lona.

Os pontos onde foi medida a temperatura, no interior das embalagens, foram escolhidos aleatoriamente, visto que o ar não segue um direção predestinada, como quando os frutos são resfriados no túnel com ar forçado.

Foram realizados dois ensaios em cada experimento. Um experimento para determinar o tempo de resfriamento com os frutos acondicionados nas embalagens plásticas e, o outro, com os frutos acondicionados nas embalagens de papelão. Os testes tiveram uma duração de até 24 horas, dependendo do experimento.

3.1.9-Testes de resfriamento com banana. Termopares

Para a realização dos testes de resfriamento com banana, foi aplicado o mesmo procedimento experimental, mas desta vez foram colocados termopares em duas posições no interior da caixa. No interior das embalagens os frutos encontram-se distribuídos em duas fileiras, cada uma com aproximadamente 3 pencas de bananas, de cada lado. Dentro de cada embalagem, aproximadamente, existiam 12 pencas, com um número irregular de frutos, que variou entre 8 à 10 frutos por penca.

Estes pontos foram escolhidos de acordo com a posição da penca no interior da embalagem. Nos experimentos com banana a situação tornou-se mais complexa do que quando realizados os experimentos com laranja, isto porque cada penca possui formato e quantidade de frutos variáveis. Por esta razão, decidiu-se apenas inserir os termopares numa banana por penca, e no ponto coincidindo no ponto do centro do frutos, e nas bananas situadas nas pencas da fileira superior, mas num fruto que estava aproximadamente no meio das pencas. O ponto 1 coincide com a entrada do ar, e o ponto 2 encontra-se mais afastado, coincidindo com a borda lateral da embalagem (Figura 3.12).

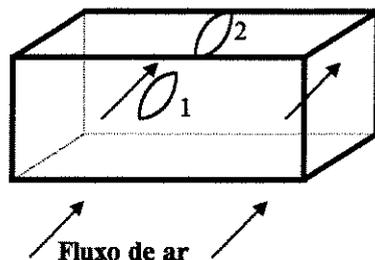


Figura 3.12: Pontos da medição da temperatura nos experimentos com banana

Testes preliminares demonstraram a dificuldade existente para obter reprodutibilidade dos dados, pelo fato das pencas de bananas serem irregulares, tanto na quantidade, como na posição em que ficam situados no interior da embalagem.

Outro problema surgido, foi o fato de que a massa destas frutas não é tão compacta como a massa da laranja, o que dificultou consideravelmente a colocação dos termopares e, em alguns casos a aquisição dos dados de temperatura.

Para inserir os termopares, previamente foram determinadas as dimensões do fruto, e depois marcado no termopar, o ponto até onde este deveria ser inserido. Como os frutos encontravam-se num estágio quase verde, a vareta era introduzida até o ponto determinado, aproximadamente no centro do fruto, e logo depois inserido o termopar no mesmo lugar, de forma justa, evitando a entrada de umidade do ar nos frutos.

Para a colocação do termopar na superfície dos frutos foi seguido o mesmo procedimento que dos experimentos com laranja. Na figura 3.14, mostra-se de forma representativa a posição aproximada dos frutos no interior da embalagem e os pontos em que foram tomadas as leituras de temperatura.

De igual forma para a colocação das 12 caixas, no interior do túnel de resfriamento, seguiu-se o mesmo procedimento adotado para os experimentos com laranja. O sistema de resfriamento foi programado para trabalhar a uma temperatura do ar de 7°C. Esta temperatura foi escolhida para obter um diferencial de temperatura que permiti-se obter as curvas de resfriamento dos frutos. Os testes tiveram uma duração entre 600 à 900 min (10 à 15 horas), dependendo do tratamento.

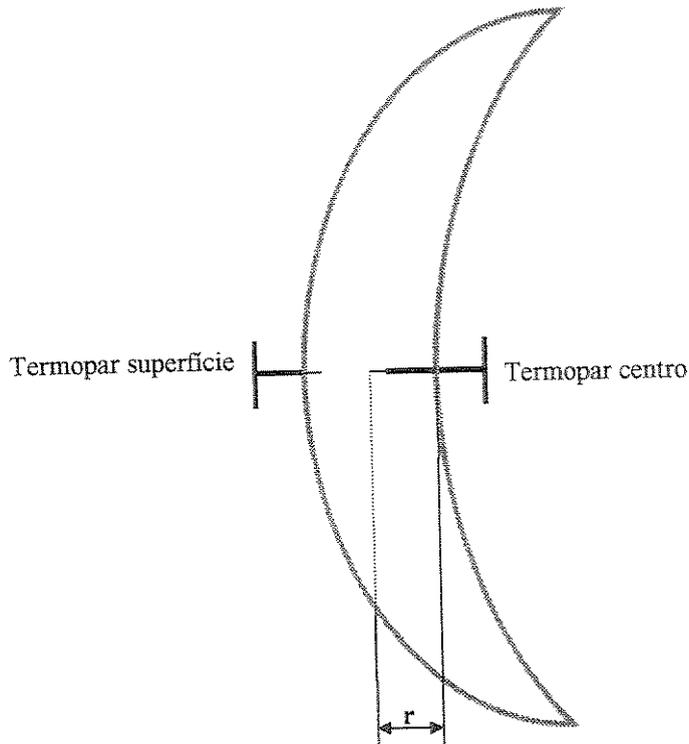


Figura 3.13: Representação esquemática da colocação do termopar no interior e na superfície do fruto (banana)

Na figura 3.13, mostra-se uma representação da posição em que foram colocados os termopares para a medição da temperatura.

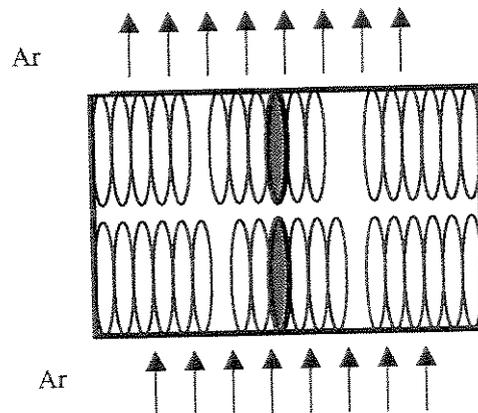


Figura 3.14: Vista superior das bananas dispostas no interior da embalagem e a posição onde foram colocados os termopares

3.1.10- Embalagens

O maior atrativo de um produto deve ser a sua embalagem. Mas a embalagem, cada vez mais, é um aspecto fundamental, seja para a manutenção do produto ou mesmo para reduzir o seu custo. A embalagem adequada é um fator importante para a redução de custos, e o aumento da eficiência da cadeia produtiva.

Para o desenvolvimento dos experimentos com laranja foram utilizadas dois tipos de embalagens: plásticas e embalagens de papelão, as quais são usadas comumente para o acondicionamento, comercialização e exportação de laranja. As principais características das embalagens são mostradas a seguir:

- **Caixa plástica:**

- dimensões: 528 mm de comprimento(c), 335 mm de largura (l) e 310 mm de altura (H)
- porcentagem de aberturas: 60%
- porcentagem de aberturas disponível para o fluxo de ar: 40%

Este tipo de caixa é usado geralmente para o transporte dos frutos colhidos desde o campo de colheita até os galpões de embalagens. Como se mostra na figura a seguir, estas caixas apresentam uma grande área de aberturas, que permite um contato maior entre o fluxo de ar e o produto. Desta forma, as taxas de resfriamento podem ser aumentadas, em função de uma eficiente troca de calor por convecção (produto-meio de resfriamento). Para que este objetivo seja atingido com mais eficiência, as caixas foram colocadas com a face II no sentido do fluxo de ar.

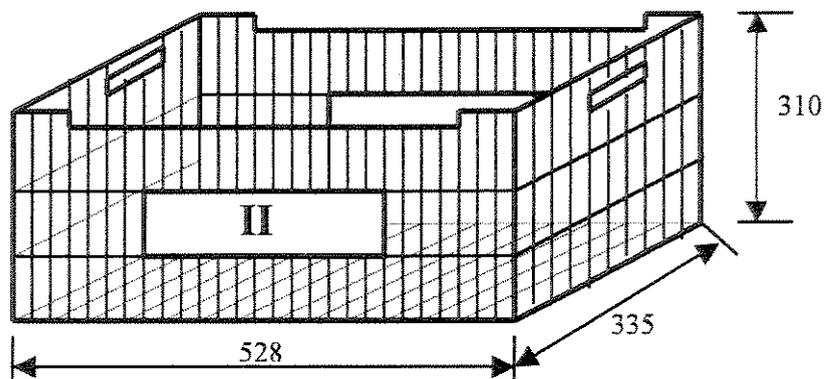


Figura 3.15: Representação esquemática do formato e dimensões (mm) da caixa plástica usada nos experimentos

- Caixa de papelão:

- dimensões: 390 mm de comprimento (c), 290 mm de largura (l) e 350 mm de altura (H)
- porcentagem de aberturas: 7%
- porcentagem de aberturas disponível para o fluxo de ar: 3,5%

As faces superior e inferior estão dotadas de quatro aberturas para ventilação, de forma esférica. Nas laterais, as aberturas são ovaladas. As aberturas da parte superior e inferior não tinham contribuição no processo de resfriamento, assim como as laterais de menor área, pois as caixas foram dispostas no interior do túnel com a face de maior área voltada na direção do passo de fluxo transversal, como mostrado nas figuras 3.15 e 3.16.

A finalidade de usar dois tipos de embalagens, com área efetiva para a passagem do ar tão diferentes, que vão desde 40% até 3,5%, foi testar a influência da área de abertura efetiva das embalagens sobre a taxa de resfriamento. Na revisão da literatura foi discutido que a recomendação é que no mínimo este valor deve ser de 5%, para atingir tempos de resfriamento reduzidos.

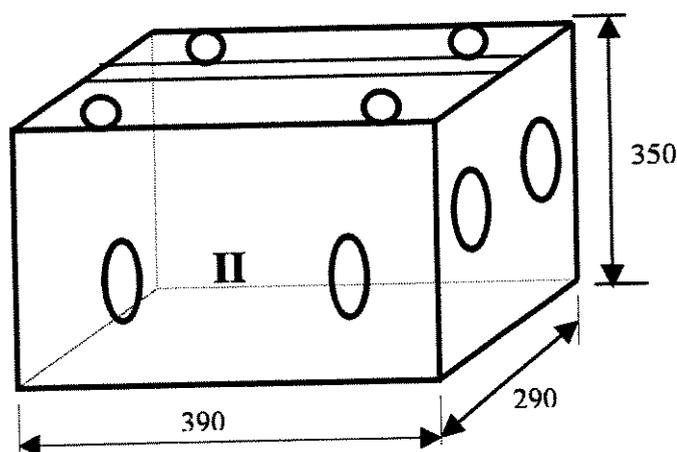


Figura 3.16: Formato das caixas de papelão, dimensões (mm) e localização das aberturas (embalagens para laranja)

Para os experimentos com banana utilizou-se as embalagens em que são acondicionadas as frutas para a comercialização. Para manter as mesmas condições experimentais dos testes com laranja, também foram desenvolvidos testes de resfriamento de banana nas caixas plásticas usadas no resfriamento de laranja. A seguir são apresentadas as características das embalagens em que foram acondicionadas as bananas.

- Caixa de papelão:

- dimensões: 390 mm de comprimento (c), 290 mm de largura (l) e 350 mm de altura (H)
- porcentagem de aberturas: 6,5%
- porcentagem de aberturas disponível para o passo do fluxo de ar: 3,25%.

Na figura 3.17 mostra-se a forma simplificada do formato das caixas de papelão e a localização das aberturas.

As faces superior e inferior estão dotadas de quatro aberturas para ventilação de forma esférica. Nas laterais as aberturas são quadradas e nas laterais circulares. As aberturas da parte superior e inferior não tinham contribuição no processo de resfriamento, assim como as laterais de menor área, pois as caixas foram dispostas no interior do túnel com a face de maior área (II) voltada na direção do passo de fluxo de ar. Estas caixas possuem, aproximadamente, um valor de área de aberturas de 6,5%, sendo efetiva para o passo livre do ar através dos produtos de 3,25% da área total.

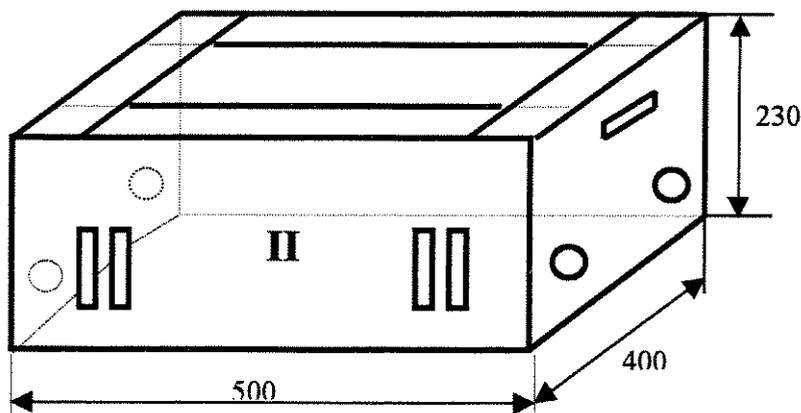


Figura 3.17: Formato das caixas de papelão para banana, dimensões (mm) e localização das aberturas (embalagens para banana)

3.1.11- Medição da velocidade do ar

A velocidade do fluxo do ar no interior do túnel de ar forçado foi determinada com um Termoanemômetro Digital de fio quente (Modelo TRI-SENSE), com escala de velocidade de 0,5 a 25 m/s, e uma escala de temperatura de -30°C a 100°C ($\pm 0,5^\circ\text{C}$). Este tipo de anemômetro possui

uma vareta de medição, que permite grande flexibilidade para a colocação do mesmo nos pontos em que foram feitas as medições.

A velocidade foi medida em 9 pontos na entrada das caixas B e E. Na figura 3.18 mostram-se, de forma simplificada, os pontos onde foi medida a velocidade do ar. As medições da velocidade do ar foram feitas depois de finalizadas as medições da temperatura em cada tratamento, perfazendo três repetições.

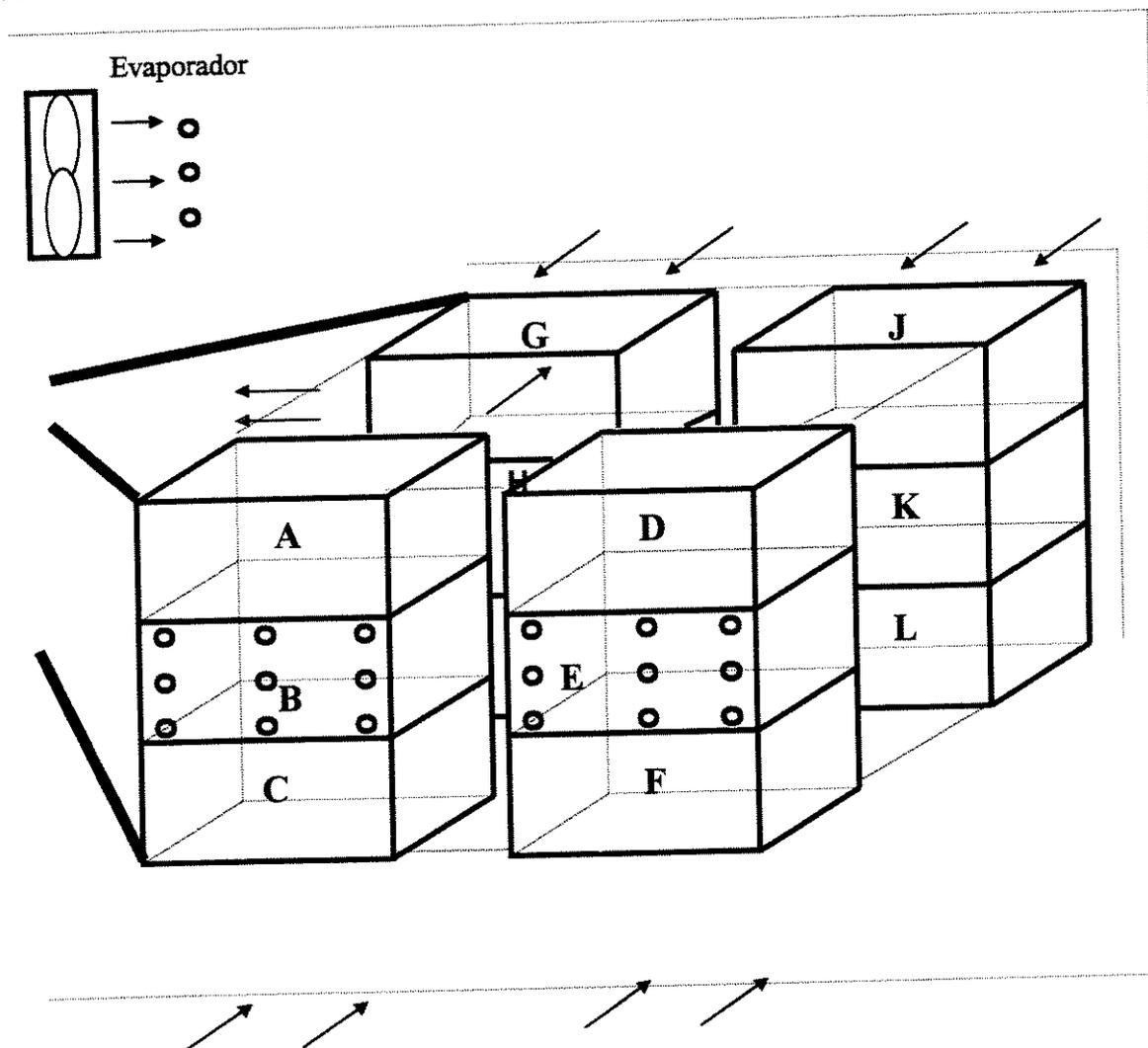


Figura 3.18: Representação esquemática das caixas e dos pontos em que foi medida a velocidade do ar

Devido a dificuldade encontrada para a medição da velocidade no interior das embalagens, através do leito de frutas, as medidas de velocidade foram tomadas apenas na face da caixa que se

corresponde com a entrada do fluxo de ar, em vários pontos, para depois poder determinar a média e o desvio padrão.

Além da velocidade na entrada das caixas, foi determinada a velocidade do ar no insuflamento do evaporador, lendo-se de igual maneira, a velocidade em 9 pontos, ao redor da face de saída do ar do ventilador do evaporador, perfazendo três repetições.

3.1.12- Medição do consumo elétrico da instalação

Para a medição do consumo elétrico do sistema de refrigeração, foi instalado um Wattímetro de relógio (Marca Schlumberger, Modelo FY02, 3 fases, 60 Hz, 240 V/15 A), na parede lateral da câmara (ao lado do painel de controle, como indicado na figura 3.4). Inicialmente foi determinado o consumo durante o funcionamento da câmara de resfriamento sem carga, medindo o valor inicial e o valor da leitura no instante em que o compressor desligava.

Para determinar o consumo do ventilador foi anotado o valor da leitura no momento que se desligava o compressor, até o instante em se que ligava o compressor novamente. Para determinar o valor do consumo no degelo, foi anotado o valor da leitura no instante em que se desligava o compressor e se ligava o sistema de degelo com resistência elétrica.

Todos os valores obtidos foram multiplicados pelo fator 6 (indicado pelo equipamento), restando-se o valor anterior em cada leitura, determinando-se assim o valor do consumo do compressor, do ventilador e do sistema de degelo.

O consumo elétrico do ventilador foi calculado partindo do valor de amperagem medido, nas três posições da polia do ventilador. A amperagem foi lida com auxílio de um Multímetro Alicata Digital (Marca Minipa, Modelo ET-3110 com DCV: 2V-1000V; ACV: 750V - 200V; ACA: 20A-600A). Os dados do consumo foram usados para determinar o custo da energia consumida pela instalação, no capítulo 3.3.

3.1.13- Planejamento experimental

Para a coleta dos dados de temperatura, e poder obter resultados coerentes e estatisticamente válidos, sempre se faz necessário organizar o planejamento experimental. Neste trabalho a variável de resposta será o tempo de resfriamento dos produtos. Para a avaliação desta foi escolhido um delineamento inteiramente casualizado (DIC), no esquema fatorial 3x2, para testar o efeito que os três fluxos de ar e os dois tipos de embalagem, exercem no tempo de resfriamento dos produtos (variável de resposta).

- Fluxos de ar

FA- 1.933 m³/h (3 l/s por kg produto)

FB- 1.450 m³/h (2 l/s)

FC- 1.160 m³/h (1,5 l/s)

- Embalagens

EI- Embalagem plástica (40% de área efetiva para a ventilação)

EII- Embalagem de papelão (3,5%)

Resultando em:

- Fatores: 3
- Níveis: 2
- Variável de resposta: tempo de resfriamento

Na figura 3.19 mostra-se o esquema simplificado da distribuição dos tratamentos para o desenvolvimento dos experimentos e da análise de variância (ANOVA).

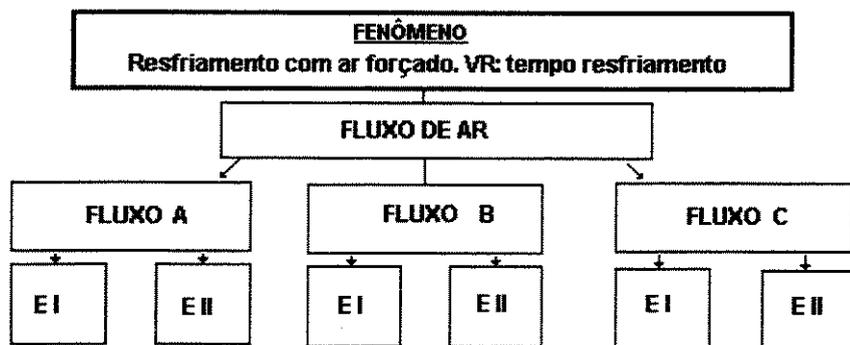


Figura 3.19: Esquema representativo dos fatores e dos níveis do esquema fatorial 3x2 aplicado nos experimentos

Deste esquema é possível fazer 6 combinações ou tratamentos: FAEI, FAEII, FB EI, FB EII, FCEI, FCEII.

3.1.14- Determinação do tamanho da amostra

Para a determinação do tamanho da amostra foi utilizada a distribuição t de *Student* (*ts*), porém as amostras sempre foram menores de 20 ($n < 20$). Como a distribuição de *t* depende do tamanho da amostra (*n*), o valor de *ts* pode ser usado para estimar *n*, e obter uma estimativa da média da amostra. O tamanho da amostra pode ser determinado como (Vieira & Hoffmann, 1989):

$$n = \left(ts \frac{S}{\delta} \right)^2 \quad (3.13)$$

O tamanho da amostra foi determinado partindo dos dados obtidos nos testes preliminares. Foi determinada o tempo de resfriamento médio, depois de uma série de experimentos, assim como o desvio padrão da amostragem (*S*). Considerou-se um nível de confiança de 90%, adequado para se obter resultados com boa precisão, aceitando então um nível de significância (τ) de 10% da estimativa. O valor de *n* (Equação 3.13) foi de 2,7 ($\delta = 7,86$ [média = 78,66 min; $S = 6,5$]; $t = 2,01$ [G.L=5 e $\tau = 10\%$] (Banzatto, 1989; Barros Neto *et al.*, 1995).

Porém para obter-se uma precisão adequada nos resultados, para um intervalo de confiança de

90%, e tomando em consideração as condições experimentais em que seriam desenvolvidos os testes, seriam feitas para cada tratamento duas repetições. Para os experimentos com banana também foi adotado este número de experimentos.

3.1.15- Casualização dos experimentos

A ordem de execução dos tratamentos foi realizada por sorteio das doze parcelas (6 tratamentos com duas repetições). A ordem de colheita das observações, está mostrada na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Ordem de coleta dos experimentos com laranja

Níveis	Tratamentos		
	FA	FB	FC
EI	FAEI ₁ (3)	FBEI ₁ (4)	FCEI ₁ (5)
	FAEI ₂ (9)	FBEI ₂ (11)	FCEI ₂ (10)
EII	FAEII ₁ (6)	FBEII ₁ (1)	FCEII ₁ (2)
	FAEII ₂ (7)	FBEII ₂ (12)	FCEII ₂ (8)

3.1.16- Estratégia de análise dos resultados

Para fazer a análise estatística dos dados coletados seguindo o planejamento proposto, foi aplicado o teste F e feita a análise de variância (ANOVA), para um nível de significância de 10%. As hipóteses testadas foram:

$$H_0: T_1 = T_2 = T_3 = T_4 = T_5 = T_6$$

$$H_1: T_1 \neq T_2 \neq T_3 \neq T_4 \neq T_5 \neq T_6$$

Onde T1 é o tratamento FAEI, assim respectivamente até T6 (FCEII). A condição de rejeição (CR) da hipótese nula ($\tau = 10\%$) foi:

$$F_c > F_t_{(6, 5, 10\%)} \quad (3.14)$$

Se rejeitada a hipótese nula significa que os tratamentos não são iguais e, que existe interação entre os fatores, ou seja, os fatores exercem influência diferente sobre a variável de resposta, sendo

preciso então fazer o desdobramento da interação para avaliar a influência de cada fator na variável de resposta. Na figura 3.20 mostra-se, de forma simplificada, a estratégia de condução da análise dos efeitos dos fatores. As hipóteses testadas para o desdobramento da interação serão:

- Para o fator fluxo (F)

Ho: O fator F têm influência na variável de resposta

H1: O fator F não têm influência na variável de resposta

A condição de rejeição (CR) da hipótese nula Ho é:

$$F_c > F_t_{(6, 2, 10\%)} \quad (3.15)$$

- Para o fator embalagem (E)

Ho: O fator E têm influência na variável de resposta

H1: O fator E não têm influência na variável de resposta

A condição de rejeição (CR):

$$F_c > F_t_{(6, 1, 10\%)} \quad (3.16)$$

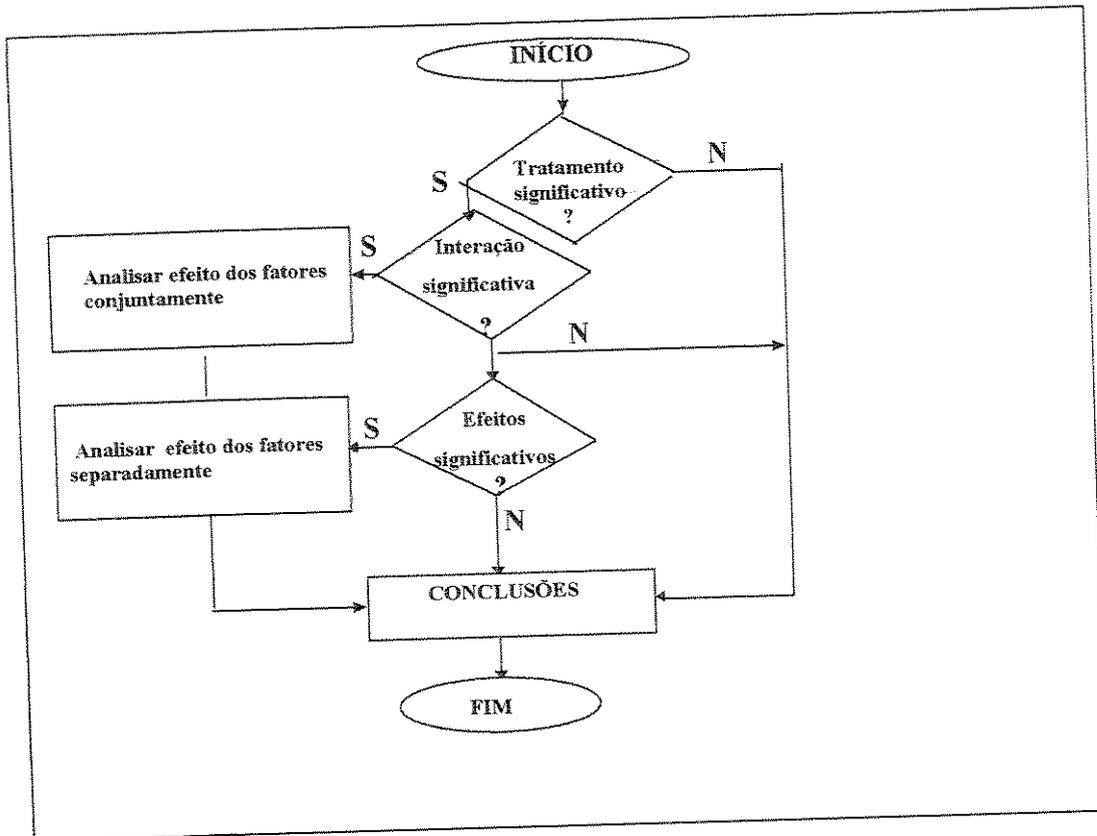


Figura 3.20: Estratégia de condução da análise do efeito dos fatores na ANOVA

- Para a interação

H₀: A interação entre fator F e fator E têm influência na variável de resposta

H₁: A interação entre fator F e fator E não têm influência na variável de resposta.

A condição de rejeição (CR):

$$F_c > F_t (6, 2, 10\%)$$

(3.17)

3.1.17- Verificação da adequação do modelo de análise de variância

Como a análise de variância parte do princípio de que as observações são independentes e, normalmente distribuídas com a mesma variância para cada tratamento, a validade dessas suposições deve ser verificada por meio da análise de resíduos.

Um resíduo é definido como a diferença entre uma observação e a média do tratamento correspondente, ou seja:

$$e_{ij} = x_{ij} - \bar{x}_{ij} \quad (3.18)$$

A análise para verificar a adequação do modelo de variância foi feito através do estudo dos:

- Resíduos vs. ordem de coleta dos dados
- Resíduos vs. média dos tratamentos
- Probabilidade normal

3.1.17.1- Resíduos vs. ordem de coleta dos dados

A suposição de independência da ordem de coleta das informações pode ser verificada com a construção deste gráfico. Se os resíduos estiverem situados aproximadamente em torno ao eixo $e_{ij} = 0$, então pode-se afirmar que existe independência entre a ordem de coleta e os resíduos. Um comportamento fora do mencionado pode indicar que as observações não são independentes, ou que variáveis que se alteraram ao longo do estudo são influentes e não foram consideradas.

Para construir o gráfico deve ser calculado o resíduo para cada um dos tratamentos com sua respectivas repetições e organizados por ordem de colheita (Tabela 3.3).

Tabela 3.3: Ordem para cálculo dos resíduos

Níveis	Tratamentos			Médias
	FA	FB	FC	
EI	FAEI ₁ (3)	FBEI ₁ (4)	FCEI ₁ (5)	FEI ₁
	FAEI ₂ (9)	FBEI ₂ (11)	FCEI ₂ (10)	FEI ₂
EII	FAEII ₁ (6)	FBEII ₁ (1)	FCEII ₁ (2)	FEII ₁
	FAEII ₂ (7)	FBEII ₂ (12)	FCEII ₂ (8)	FEII ₂

Para calcular os resíduos:

$$e_1 = \text{FAEI}_{1-} - \text{FEI}_{1-}, \dots, e_{12} = \text{FCEII}_{2-} - \text{FEII}_{2-}$$

A suposição de igualdade de variâncias em todos os níveis do fator, será feita através da análise de resíduos contra a média dos tratamentos, e avaliar a dispersão dos mesmos. A faixa de dispersão deve ser aproximadamente igual para cada média.

3.1.17.2- Probabilidade normal

Para construir este gráfico é necessário determinar o valor esperado de normalidade (E_i), o qual é calculado supondo que os resíduos (e_i) seguem uma distribuição normal. Se os pontos do gráfico estiverem localizados aproximadamente ao longo de uma linha reta, pode então ser considerado que a suposição de normalidade é válida.

Para uma variável aleatória com distribuição normal de média zero e o desvio padrão estimado como $\sqrt{S^2}$, o valor da i -ésima menor observação (E_i) pode ser calculado como:

$$E_i = \sqrt{S^2 \left[z \left(\frac{i - 0,375}{n + 0,25} \right) \right]^2} \quad (3.19)$$

O valor $f(z)$ é determinado nas tabelas de distribuição normal padronizada.

O cálculo do coeficiente de correlação linear (R_c), entre os resíduos (e_{ij}) e seus valores esperados pode ser calculado como (Drumond *et al.*, 1996):

$$R_c = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})(e_i - \bar{e})}{\left[\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2 \sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (3.20)$$

onde:

$$\bar{e} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i \quad (3.21)$$

$$\bar{E}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i \quad (3.22)$$

Valores próximos de 1 para R_c indicam uma forte correlação linear entre os resíduos e seus valores esperados, sobre a suposição de normalidade. O valor calculado deve ser comparado com o valor crítico (R_t), o qual é tomado de tabelas com o valor do número de repetições (n) e o nível de significância (τ) (Drumond *et al.*, 1996).

3.2- Modelagem Teórica

3.2.1- Formulação matemática do processo de transferência de calor

A equação que define o processo de transferência de calor pode ser expressa em coordenadas esféricas ou cilíndricas, dependendo da geometria do corpo que está sendo tratado. Em muitas situações da prática estes sistemas de coordenadas se tornam inadequados para descrever mais exatamente a transferência de calor num certo tipo de geometria. Com o intuito de utilizar um modelo matemático, que caracteriza-se adequadamente à geometria do corpo em estudo, e que fosse flexível, podendo ser aplicado em estudos de processos de resfriamento de corpos com geometria diferente, procurou-se um modelo adequado.

Este modelo foi desenvolvido por Lima (1999) e Lima & Nebra (1997). Neste modelo, os autores discretizaram as equações que definem o processo de difusão de massa em corpos esferoidais prolato, cujas equações estão descritas no sistema de coordenadas esferoidal prolato, que pode ser utilizado em geometrias que vão desde uma esfera até um cilindro, inclusive elipsóides. Pelas grandes possibilidades de aplicação deste modelo, assim como pelos resultados obtidos na aplicação do mesmo num estudo de caso de secagem de banana, decidiu-se adaptar este modelo às condições propostas neste estudo, ou seja, para descrever o processo de transferência de calor.

Nesta seção são apresentadas as bases do modelo existente, e as modificações propostas para sua adaptação às condições do problema físico, apresentado neste trabalho.

3.2.2- Equação de transferência de calor em coordenadas esferoidais prolato

Como foi mencionado no capítulo 2, a lei de Fourier representa adequadamente o processo de transferência de calor, e pode ser expressa em coordenadas em x, y e z por (Kern, 1987):

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} \quad (3.23)$$

Onde \dot{q} é a taxa interna de geração de calor e α é a difusividade térmica e que pode ser expressa como:

$$\alpha = \frac{k_p}{\rho C_p} \quad (3.24)$$

Um elipsóide de revolução, em que um eixo de revolução é maior que o outro eixo, é chamado de esferóide prolato. Os corpos em que o eixo de revolução é menor que o outro eixo são chamados esferóides oblato. Na figura 3.21 mostra-se as dimensões que caracterizam um corpo esferoidal prolato.

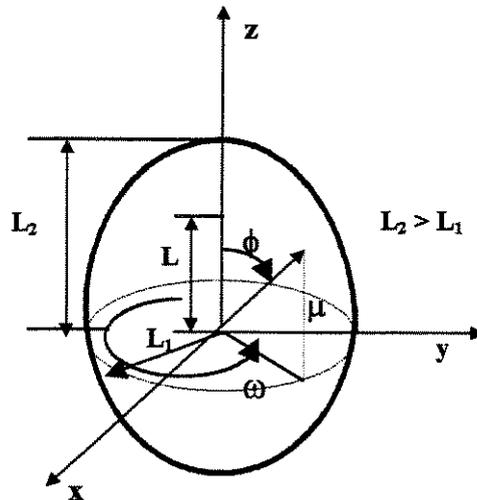


Figura 3.21: Caracterização de um corpo sólido com geometria esferoidal prolato (Adaptado de Lima, 1999)

O sistema de coordenadas esferoidal prolato tem sido pouco usado para resolver problemas de engenharia. Este sistema pode ser adequado para modelar corpos que tenham geometria tão diferentes que vão desde uma esfera até um cilindro, incluindo elipsoide. Na prática os corpos não têm geometria exata e, quando se quer modelar matematicamente processos de transferência de calor em morango, ou em figo, considera-se estes corpos como esféricos, quando realmente não são, pois $L_2 > L_1$.

As relações entre os sistemas de coordenadas cartesiano (x, y, z) e o esferoidal prolato (μ, ϕ, ω) podem ser expressas como (Haji-Sheikh & Sparrow, 1966):

$$x = L \operatorname{senh}\mu \operatorname{sen} \phi \cos \omega \quad (3.25)$$

$$y = L \operatorname{senh}\mu \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \omega \quad (3.26)$$

$$z = L \operatorname{cosh}\mu \cos \phi \quad (3.27)$$

A equação no novo sistema de coordenadas novo pode ser expressa em termos das seguintes variáveis:

$$\xi = \operatorname{cosh}\mu \quad \eta = \operatorname{cosh}\phi \quad \zeta = \cos \omega$$

Substituindo diretamente as variáveis acima nas equações 3.25, 3.26 e 3.27, podem ser obtidas as relações entre o sistema de coordenadas cartesiano e o sistema de coordenadas esferoidal prolato:

$$x = L \sqrt{(1 - \xi^2)(\eta^2 - 1)} \zeta \quad (3.28)$$

$$y = L \sqrt{(1 - \xi^2)(\eta^2 - 1)} \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (3.29)$$

$$z = L \xi \eta \quad (3.30)$$

onde $L = \sqrt{(L_2^2 - L_1^2)}$ L_1 e L_2 são os semi-eixos menor e maior do corpo em estudo (Figura 3.21).

Para as variáveis ξ , η e ζ (em termos de ω), o domínio com relação à figura 3.21 pode ser expresso como:

$$1 \leq \xi \leq L_2/L$$

$$0 \leq \eta \leq 1$$

$$0 \leq \omega \leq 2\pi$$

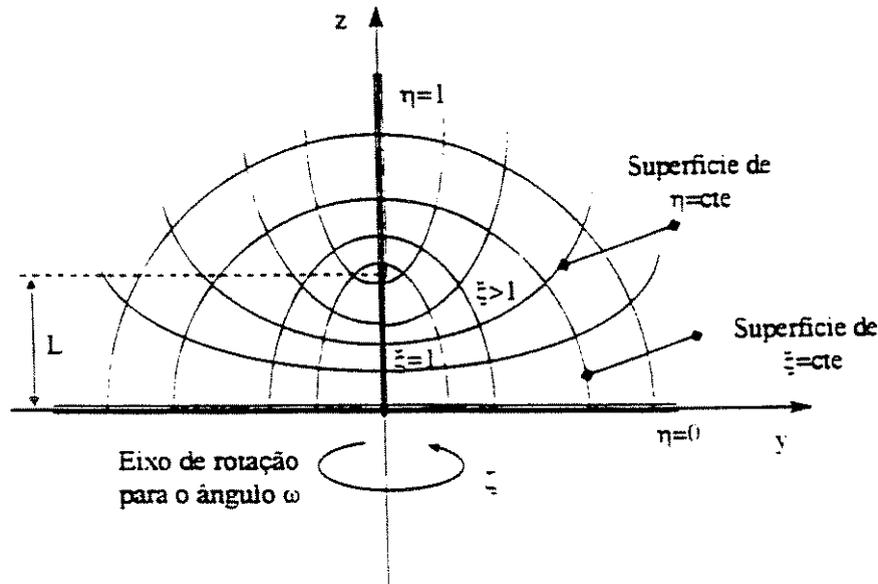


Figura 3.22: Sistema de coordenadas esférico prolato (Adaptado de Lima, 1999)

As superfícies $\xi=\xi_0$ (cte), $\xi_0>1$, são elipsóides de revolução cofocais alongados em torno ao eixo z constante. A superfície $\xi = 1$, é a linha reta que une a origem ($z=0$) e o ponto focal ($z=L$). As superfícies $\eta=\eta_0$ (cte), $\eta_0<1$, são hiperbolóides de duas capas, com um cone assintótico que é gerado por linhas que passam pela origem e estão inclinadas com um ângulo de $\phi=\cos^{-1}\eta$ em relação a eixo z. A superfície $\eta = 1$ é a parte do eixo $z>L$. As superfícies $\omega=\omega_0$ (cte) são os planos que passam pelo eixo z e perpendiculares ao plano xy, formando um ângulo ω com o eixo x (Figura 3.22).

Considerando a figura 3.22 tem-se que, para $L_2=L_1$, o esferóide passa a ser uma esfera; para $L_2<L_1$, o esferóide será um corpo oblato. Desta forma, quando a distância interfocal tende a zero, o

sistema de coordenadas esferoidal prolato se reduz a um sistema de coordenadas esféricas, como representada na figura 3.21.

Determinando-se o Jacobiano, os coeficientes métricos e relações matemáticas aplicadas, a equação 3.23 pode ser expressa como:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left[\frac{1}{L^2 (\sinh^2 \mu + \sin^2 \phi) \sinh \mu} \frac{\partial}{\partial \mu} \left(\sinh \mu \alpha \frac{\partial T}{\partial \mu} \right) \right] + \left[\frac{1}{L^2 (\sinh^2 \mu + \sin^2 \phi)} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\sin \phi \alpha \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) \right] + \frac{1}{L^2 (\sinh^2 \mu \sin^2 \phi)} \frac{\partial}{\partial \omega} \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial \omega} \right) \quad (3.31)$$

Na base das coordenadas ξ , η e ζ , e considerando a existência de simetria em torno do eixo z, $\partial/\partial\omega=0$ e $\partial/\partial\zeta=0$), pode-se escrever a equação 3.27 como:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left[\frac{1}{L^2 (\xi^2 - \eta^2)} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[(\xi^2 - 1) \alpha \frac{\partial T}{\partial \xi} \right] \right] + \left[\frac{1}{L^2 (\xi^2 - \eta^2)} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[(1 - \eta^2) \alpha \frac{\partial T}{\partial \eta} \right] \right] \quad (3.32)$$

Informações adicionais sobre este tipo de coordenadas e a metodologia para obter as equações 3.31 e 3.32 podem ser encontradas em Lima & Nebra (1997) e Lima (1999).

3.2.3- Formulação analítica

Para a adequação do modelo proposto por Lima & Nebra (1997), às condições deste trabalho, este foi reescrito para descrever o processo de transferência de calor em regime transiente, incorporando os parâmetros adimensionais comumente usados na literatura.

Para a simplificação do problema de transferência de calor, em 2-D, no interior de corpos sólidos, algumas considerações foram feitas:

- sólido homogêneo e isotrópico;
- propriedades termofísicas dos produtos constantes e independentes da temperatura e do teor de umidade do corpo;

- variação da temperatura simétrica ao redor do eixo z;
- condução de calor partícula-partícula pode ser negligenciada, considerando a transferência de calor fundamentalmente por convecção.
- fontes internas de geração de calor desprezíveis tais como os efeitos da respiração e da transpiração do produtos sobre a transferência de calor são desprezíveis;
- condição convectiva na superfície do sólido.

Foram propostas as seguintes condições de contorno:

- Superfície: fluxo de calor difusivo é igual ao fluxo de calor convectivo:

$$-\frac{kp}{L} \sqrt{\frac{(\xi^2 - 1)}{(\xi^2 - \eta^2)}} \frac{\partial T}{\partial \xi} \Big|_{\xi=\xi_f} = hc[T(\xi = \xi_f; \eta; t) - T_a] \quad (3.33)$$

com $\xi_f = \frac{L_2}{L}$ na superfície do sólido.

Os termos desta equação representam o fluxo de calor por unidade de área que atravessa a superfície do corpo.

- Condição inicial: a temperatura do corpo têm uma distribuição uniforme:

$$T(\xi; \eta; t=0) = T_i = \text{cte}$$

- Planos de simetria: os gradientes angulares e radial da temperatura são nulos nos planos de simetria:

$$\frac{\partial T(\xi; \eta; t)}{\partial \eta} = 0; \quad \frac{\partial T(\xi; 0; t)}{\partial \eta} = 0; \quad \frac{\partial T(1; \eta; t)}{\partial \xi} = 0 \quad (3.34)$$

Para adimensionalizar a equação de transferência de calor, foram usados os seguintes

parâmetros:

$$T^* = \frac{T - T_a}{T_i - T_a}; \quad \eta^* = \eta; \quad \xi^* = \xi; \quad t^* = \frac{\alpha t}{L^2}; \quad Bi = \frac{hcL}{kp} \quad V^* = \frac{V}{L^3} \quad (3.35)$$

O valor de T^* foi definido na seção 3.1, como TAT. Baseando-se na equação 3.35, tem-se que as equações 3.31 e 3.32 podem ser escritas como:

$$\frac{\partial T^*}{\partial t^*} = \frac{1}{(\xi^{*2} - \eta^{*2})} \frac{\partial}{\partial \xi^*} \left[(\xi^{*2} - 1) \frac{\partial T^*}{\partial \xi^*} \right] + \frac{1}{(\xi^{*2} - \eta^{*2})} \frac{\partial}{\partial \eta^*} \left[(1 - \eta^{*2}) \frac{\partial T^*}{\partial \eta^*} \right] \quad (3.36)$$

Na fronteira, a equação que define o processo está expressa como:

$$T^*(\xi^* = \xi_f; \eta^*; t^*) = \frac{1}{Bi} \sqrt{\frac{(\xi^{*2} - 1)}{(\xi^{*2} - \eta^{*2})}} \frac{\partial T^*}{\partial \xi^*} \Big|_{\xi=\xi_f} \quad (3.37)$$

$$T^*(\xi^*; \eta^*; t^*=0) = 1; \quad \frac{\partial T^*(\xi^*; 1; t^*)}{\partial \eta^*} = 0; \quad \frac{\partial T^*(\xi^*; 0; t^*)}{\partial \eta^*} = 0; \quad \frac{\partial T^*(1; \eta^*; t^*)}{\partial \xi^*} = 0 \quad (3.38)$$

O valor médio da temperatura adimensional pode ser determinada a partir da equação que relaciona a temperatura no volume total do corpo:

$$\bar{T}^* = \frac{1}{V^*} \int_{V^*} T^* dV^* \quad (3.39)$$

ou ainda:

$$\bar{T}^* = \frac{1}{\int_0^1 \int_0^1 (\xi^{*2} - \eta^{*2}) d\xi^* d\eta^*} \int_0^1 \int_0^1 T^*(\xi^*, \eta^*, t^*) (\xi^{*2} - \eta^{*2}) d\xi^* d\eta^* \quad (3.40)$$

Na equação 3.39, V^* é o volume total no domínio considerado, e pode ser expresso como:

$$V^* = \frac{(\xi^{*2} - \eta^{*2})d\xi^* d\eta^* d\zeta^*}{\sqrt{(1 - \zeta^{*2})}} \quad (3.41)$$

3.2.4- Resolução numérica

A solução numérica da equação de difusão transiente no sistema de coordenadas esferoidais prolatado apresentada por Lima & Nebra (1997) e Lima (1999), foi desenvolvida aplicando o método de volumes finitos. O princípio fundamental deste método é: qualquer quantidade contínua pode ser aproximada por um modelo discreto composto por um conjunto de funções contínuas em degraus ou lineares, definidas sobre um número finito de subdomínios. Estes subdomínios podem ser chamados de volumes de controle e os pontos nodais de centróide do volume de controle (Maliska, 1995). Este tipo de formulação numérica têm sido aplicada na solução de alguns problemas que envolvem transferência de calor e massa para outras geometrias.

A equação diferencial parcial é do tipo elíptica, portanto as condições de contorno devem ser especificadas em toda a fronteira do domínio. Devido à simetria que apresentam os corpos foi utilizado um domínio computacional para a resolução do problema em estudo. Observa-se que, existe uma simetria nos quatro quadrantes do elipsóide, formado pelos planos que passam por $x=0$; $y=0$; $z=0$ e $x=0$; $y=0$ e $z=L$. Como no plano em que $\omega = 90^\circ$, existe simetria em cada quadrante da elipse, pode-se adotar apenas o domínio computacional que envolve o quadrante $y \geq 0$ e $z \geq 0$ no plano em que $\omega = 90^\circ$ (Figura 3.22).

Na figura 3.23, explica-se a configuração geométrica do problema físico. As linhas ξ e η são constantes e delimitam o domínio de controle associado ao ponto nodal P. Os pontos N, S, E e W, são os seus pontos nodais vizinhos (chamado também de norte, sul, leste e oeste) (Figura 3.23a). As faces do volume de controle de e, n, s e w ao redor do ponto P, as dimensões do volume de controle $\Delta\xi$ e $\Delta\eta$, e as distâncias entre o ponto P e seus vizinhos adjacentes são mostrados na figura 3.23b. Na figura 3.23c, é mostrado o volume de controle na fronteira, onde ϕ'' é definido no modelo de difusão

como o fluxo de φ por unidade de área.

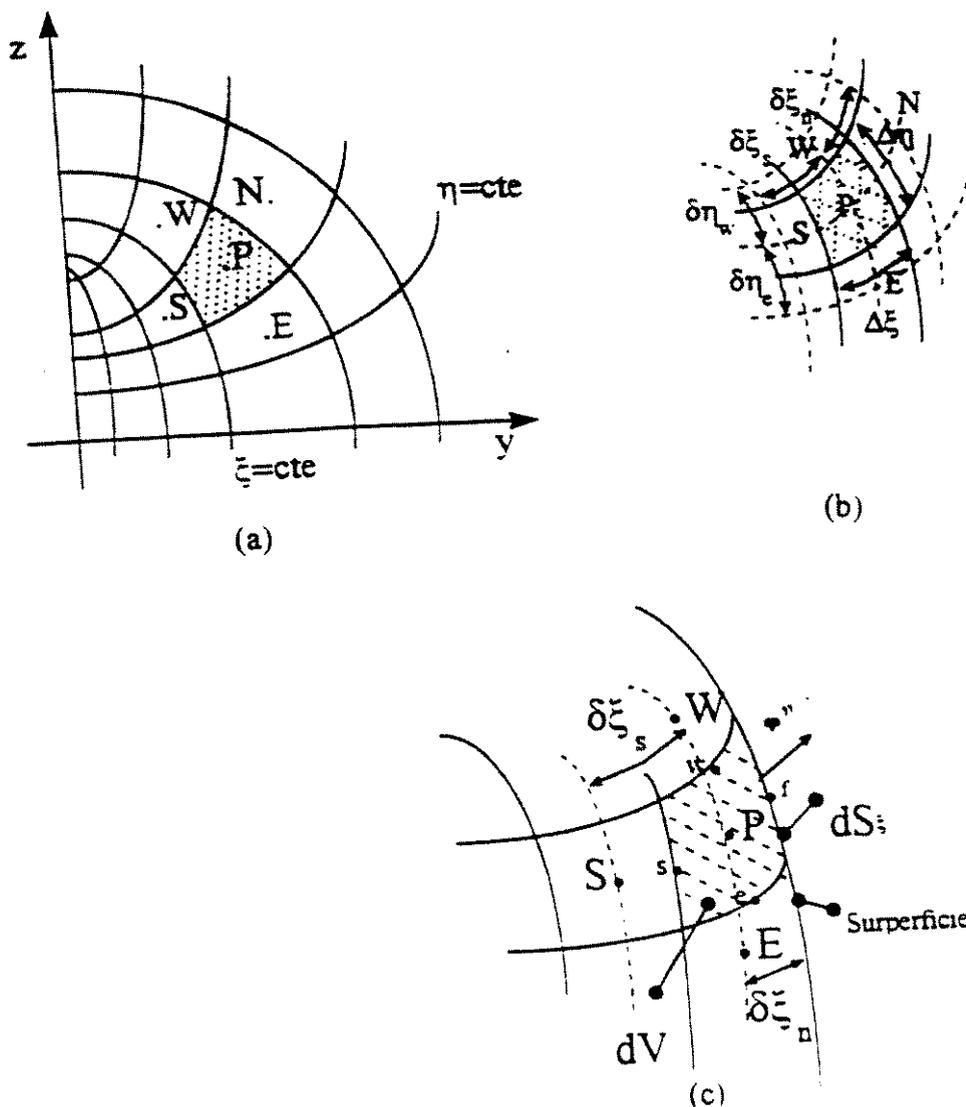


Figura 3.23: Caracterização do problema físico

A formulação numérica apresentada por Lima & Nebra (1997) e Lima (1999), é válida para:

- qualquer tipo de material homogêneo;
- condições de contorno na superfície do corpo constantes ou do tipo convectiva;
- coeficiente de difusividade térmica constante ou variável;
- malhas uniformes ou não-uniformes;
- qualquer intervalo de tempo;
- para corpos com formas que variam desde esférica até cilíndrica, incluindo formas esferoidais,

em função do valor de L_2/L_1 .

Observa-se então, a abrangência deste modelo, o que permite uma grande flexibilidade na aplicação, pois dentro de um mesmo estudo, apenas variando as propriedades termo-físicas e as dimensões do corpo, pode ser estudado o fenômeno da transferência de calor para frutos com geometria diferente, sem necessidade de resolver o equacionamento para uma nova geometria.

3.2.4.1-Formulação numérica

A equação 3.33 na forma discretizada pode ser expressa por:

$$T'' = hc [T - T_a] = \frac{kp}{L} \sqrt{\frac{(\xi_s^2 - 1)}{(\xi_s^2 - \eta_p^2)}} \left(\frac{T_p - T_f}{\delta \xi_s} \right) \quad (3.42)$$

Então:

$$T'' = \frac{T_p - T_a}{\left[\frac{1}{hc} + \frac{\delta \xi_s L}{kp \sqrt{\frac{(\xi_f^2 - 1)}{\xi_f^2 - \eta_p^2}}} \right]} \quad (3.43)$$

As equações do modelo podem ser agrupadas como:

$$A_P T_P^* = A_E T_E^* + A_W T_W^* + A_N T_N^* + A_S T_S^* + A_P^o T_P^{*o} \quad (3.44)$$

Onde A_E , A_W , A_S , A_N e A_P^o , são expressos como:

$$A_E = \frac{(1 - (\eta_e^*)^2)}{\delta \eta_e^*} \Delta \xi^* \quad A_W = \frac{(1 - (\eta_w^*)^2)}{\delta \eta_w^*} \Delta \xi^*$$

$$A_N = \frac{((\xi_n^*)^2 - 1) \Delta \eta^*}{\delta \xi_n^*} \quad A_s = \frac{((\xi_s^*)^2 - 1) \Delta \eta^*}{\delta \xi_s^*} \quad (3.45)$$

$$A_p^o = \left(\frac{(\xi_p^*)^2 - (\eta_p^*)^2}{\Delta t^*} \right) \Delta \eta^* \Delta \xi^* \quad (3.46)$$

$$A_p^* = \sum A_K^* + A_p^{*o} + \overline{ST} \quad (3.47)$$

onde \overline{ST} é o fator que incorpora à equação 3.47 o efeito convectivo de calor na superfície do sólido:

$$\overline{ST} = \frac{\Delta \eta^*}{\frac{1}{\text{Bi} \sqrt{[(\xi_s^*)^2 - (\eta_p^*)^2] \sqrt{[(\xi_s^*)^2 - 1]}} + \frac{\delta \xi_n^*}{[(\xi_s^*)^2 - 1]}} \quad (3.48)$$

Os coeficientes A_K , $K \neq P$, são o reflexo da contribuição da transferência de calor desde os nodos vizinhos em direção ao nodo P. A quantidade S é o termo fonte, que contém os efeitos convectivos na superfície do sólido, e que é adicionado aos pontos nodais que precedem aos pontos da fronteira.

Nos pontos situados na superfície do material o perfil adimensional de temperatura é determinado com o uso da equação:

$$T_f^* = \left(1 + \frac{\text{Bi} \delta \xi_n}{\sqrt{\frac{\xi_s^{*2} - 1}{(\xi_s^{*2} - \eta_s^{*2})}}} \right) T_p^* \quad (3.49)$$

Esta equação serve para determinar a temperatura adimensional na superfície do sólido, uma vez conhecida a temperatura adimensional nos pontos da fronteira (ponto P, figura 3.23c).

Na forma discretizada a temperatura média adimensional está dada por:

$$\bar{T}^* = \frac{1}{V^*} \sum_{i=2}^{n-1} \sum_{j=2}^{m-1} T_{i,j}^* \Delta V_{i,j}^* \quad (3.50)$$

onde m e n representam os números de pontos nas direções das coordenadas ξ e η , respectivamente, e i e j, a localização destes pontos na malha numérica.

Como mencionado anteriormente, neste trabalho utilizou-se um modelo matemático desenvolvido por Lima & Nebra (1997). Além disso, também foi utilizado um *software* desenvolvido no Microsoft Fortran Power Station pelos mesmos autores, denominado *Spherodiff*. Modificações então foram feitas neste programa, então esta versão será chamada de *Spherodiff-Transf*.

Os cálculos foram iniciados partindo de uma condição inicial, assumindo-se convergência da solução numérica quando os seguintes critérios foram satisfeitos:

- em cada ponto do domínio computacional para um instante de tempo:

$$\left| T^{*n+1} - T^{*n} \right| \leq 10^{-7} \quad (3.51)$$

- para a equação discretizada para cada instante de tempo:

$$\frac{\sum |A_K|}{|A_P|} \leq 1 \quad (3.52)$$

onde n representa a n-ésima iteração em cada instante de tempo, e K os pontos nodais vizinhos do ponto nodal P. Todos os coeficientes A_K devem ser positivos.

As equações foram resolvidas iterativamente usando o método de Gauss-Seidel, utilizando uma

malha de 20x20. Estes parâmetros foram escolhidos baseados em estudos desenvolvidos por Lima & Nebra (1997), que demonstraram que a variação do teor de umidade adimensional é praticamente independente do número de pontos da malha, e do incremento de tempo na forma adimensional.

As figuras 3.24 e 3.25, ilustram a forma que adota a malha para as dimensões das laranjas e para as dimensões da banana, respectivamente. Como pode ser observado, o sistema de coordenadas esferoidal prolato caracteriza muito bem a geometria de corpos de aspecto diferente, com valores que vão de $L_2/L_1=1$ até $L_2/L_1=\infty$.

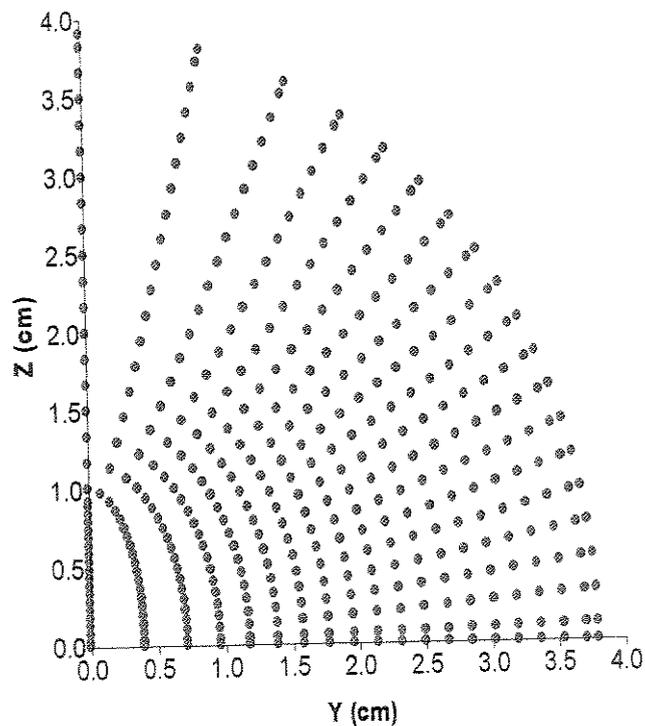


Figura 3.24. Malha numérica no plano físico para corpos com geometria em que $L_2/L_1=1,05$ (laranja)

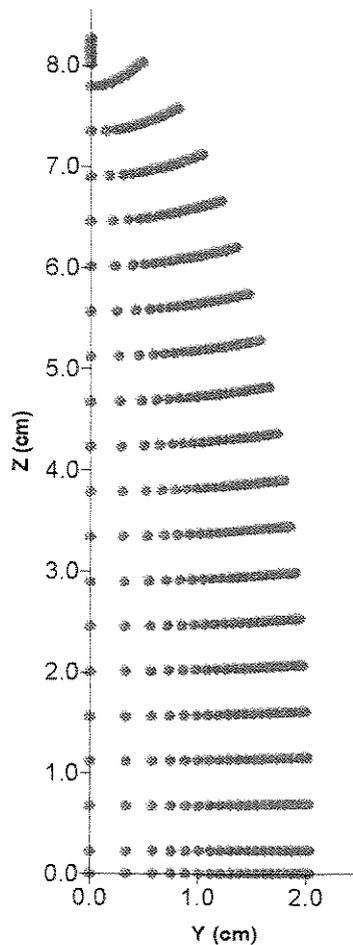


Figura 3.25 : Malha numérica no plano físico para corpos com geometria em que $L_2/L_1=4,0$ (banana)

Para determinação do coeficiente de transferência de calor, partindo-se dos dados experimentais da temperatura no centro dos frutos, calcula-se a TAT a qual é introduzida no *software*. Ajusta-se então o coeficiente convectivo de transferência de calor, podendo desta forma ser obtida a curva de resfriamento teórica, em cada experimento. O intervalo de tempo foi de 20 s, o qual mostrou-se adequado em testes preliminares desenvolvidos.

Como foi discutido no capítulo 2, durante a revisão bibliográfica foi constatado que do coeficiente convectivo de transferência de calor são reportados valores muito variáveis, numa faixa muito ampla, que vão desde 8 até $62 \text{ W/m}^2\text{C}$. Este problema levou a decidir por adaptar o programa à possibilidade de ajustar este coeficiente partindo dos dados experimentais. Deste modo ter-se-ia a possibilidade de obter valores deste importante coeficiente que representem adequadamente o problema físico em estudo.

O método usado para o ajuste do coeficiente de transferência de calor convectivo (h_c), foi do Erro Quadrado Mínimo (ERQ). O desvio relativo entre os valores experimentais e os valores teóricos, assim como a variância (S^2), são dados por:

$$ERQ = \sum_{i=1}^n (T_{i,num}^* - T_{i,exp}^*)^2 \quad (3.53)$$

$$S^2 = \frac{ERQ}{(n-1)} \quad (3.54)$$

A variável n representa o número de pontos experimentais e 1 o número de parâmetros ajustados (número de graus de liberdade). O valor ajustado de h_c corresponde ao valor para o qual o valor do erro ERQ é o mínimo.

3.2.5- Diagrama de blocos

Para facilitar a compreensão do funcionamento e interação de todas as partes do programa *Spherodiff-Transf*, na figura 3.26, mostra-se o digrama de blocos.

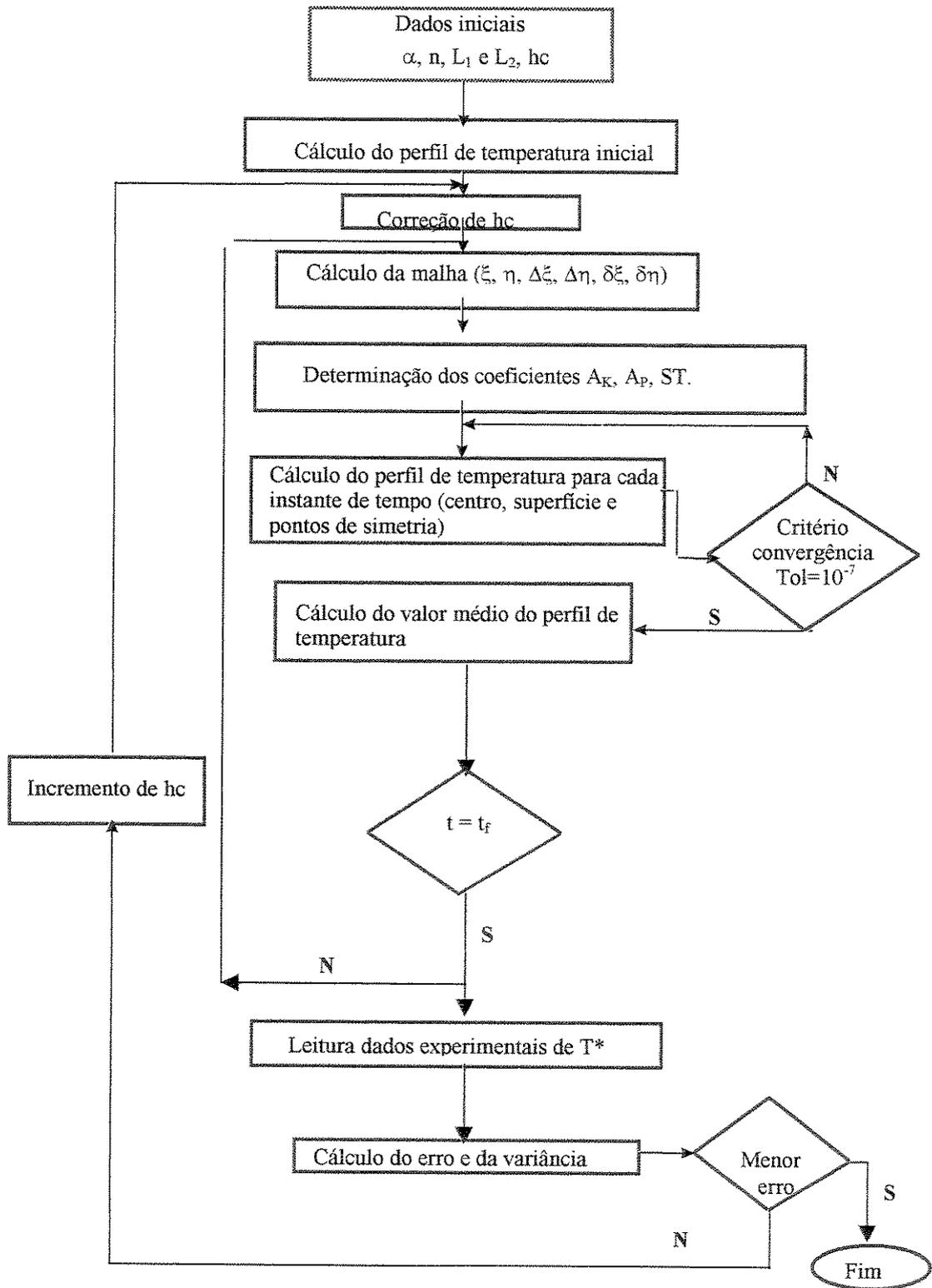


Figura 3.26: Diagrama de blocos do programa computacional *Spherodiff-Transf*

3.2.5.1- Dados para a validação do modelo

Para a validação do modelo matemático foram usadas algumas propriedades, as quais mostram-se na tabela 3.4. Estas propriedades foram escolhidas dentre os valores que foram apresentados na revisão da literatura (Capítulo 2). Procurou-se escolher aqueles mais próximos das condições em que foram desenvolvidos os experimentos de resfriamento de laranja e banana.

Tabela 3.4: Valores da difusividade e condutividade usados na validação do modelo matemático

Produtos	Propriedade	Valor	Referência
Laranja	Difusividade térmica, m^2/s	$1,06 \times 10^{-7}$	(Ramos <i>et al.</i> , 1993)
	Condutividade térmica $W/m^{\circ}C$	0,50	(Trelea, 1998)
Banana	Difusividade térmica, m^2/s	$1,25 \times 10^{-7}$	(Ansari & Afaq, 1986)
	Condutividade térmica, $W/m^{\circ}C$	0,48	(Sweat, 1974)

A quantidade de pontos experimentais foi variável em cada experimento estando entre 60 e 100 pontos, para os experimentos com laranja, e de 60 a 140 pontos, nos experimentos com banana.

3.2.6- Potencial do software *Spherodiff-Transf*

Os resultados gerados no final da validação de cada experimento são armazenados numa série de arquivos internos no *software*, com os quais poderão ser feitos os gráficos para análise dos resultados. São estes arquivos:

- **-cinetca.dat**: armazenados os valores da temperatura média adimensional. Com os valores deste arquivo podem ser traçadas as curvas de tempo vs. \bar{T}^* ;
- **ermq.dat**: onde são armazenados todos os valores da TAT experimentais e numéricos, assim como o valor do erro, da variância e o valor de h_c ajustado. Com estes dados são traçadas as curvas comparativas de TAT_{num} e TAT_{exp} , para o valor de h_c ajustado;
- **malhazy.dat**: armazena os valores de (y, z) e T^* da malha. Com estes dados poderão ser traçados os gráficos de comportamento da T^* no plano bidimensional zy .

- **perftc.dat**: neste arquivo são gravados os dados de T^* , em todos os pontos da malha, para cada instante de tempo, além do valor do Bi e do Fo .

Os gráficos em 2-D, traçados com os dados gravados no arquivo **malhazy.dat** permitem avaliar o comportamento do perfil de temperatura no plano físico zy , construído com as dimensões reais do fruto (L_1 e L_2). Desta forma, é possível conhecer a distribuição de temperatura desde o centro até a superfície, para cada instante de tempo desejado.

Como tinha sido discutido nos capítulos 2 e 3, a medição da temperatura na superfície é muito complexa, pelas dificuldades que se encontra para a colocação do termopar no ponto exato, que melhor represente esta leitura. Então com a aplicação deste modelo pode-se, partindo da leitura da temperatura no centro, conhecer a temperatura na superfície. Estes gráficos serão apresentados no capítulo 4.2.

3.3- Considerações Econômicas

3.3.1- Considerações iniciais

O objetivo desta seção foi obter um índice de custo referente ao produto resfriado. A motivação da realização destes cálculos surgiu da necessidade de oferecer, ao produtor agrícola, dados práticos que lhe permitam incorporar sistemas de resfriamento rápido nas suas propriedades, com a finalidade de aumentar o tempo de vida útil dos produtos, com a desejada qualidade.

O custo total de resfriamento quando, utilizado sistemas com ar forçado, será comparado com o custo quando os produtos são resfriados em câmaras convencionais. Nestes as taxas de resfriamento são menores, se comparado com os sistemas de ar forçado, baseado nas baixas velocidades do ar, fluxo de ar insuficiente e falta de direcionamento adequado deste através dos produtos.

Este tema têm sido discutido em trabalhos desenvolvidos na Flórida, onde o uso de resfriamento rápido é muito comum, como apresentado no capítulo 2. Nesta área costuma-se referenciar o custo por kg ou por caixa de produto resfriado, partindo do cálculo dos custos fixos e variáveis do sistema de resfriamento.

A metodologia empregada para desenvolver o cálculo econômico, foi baseada na metodologia usada no *software* CUSTAGRI, desenvolvido pelo Instituto de Economia Agrícola (IEA), em parceria com o Centro Nacional de Pesquisa em Informática para a Agricultura (Kaplan, 1983; CNPTIA/EMBRAPA, 1997).

3.3.2- Princípios básicos para desenvolver o cálculo econômico

Os custos de um sistema podem ser divididos em fixos e variáveis. Os custos fixos totais (Cf), são aqueles que não variam com a quantidade utilizada de uma máquina (juros sobre capital investido, seguro, depreciação anual, etc.). Os custos variáveis totais (Cv), são os que variam de acordo com o nível de uso dos equipamentos (energia, etc.).

3.3.2.1- Custos fixos (Cf)

Para o cálculo dos custos fixos se faz necessário o cálculo das seguintes variáveis:

- Depreciação (D): a taxa anual de depreciação pode ser calculada dividindo-se o custo inicial (preço de aquisição novo ou preço de reposição), menos um valor final presumido, pelo número de horas de uso no ano (Equação 3.55).

$$D = \frac{\left(\frac{C_i(1-f)}{nv} \right)}{u} \quad (3.55)$$

- Juros (J): os juros anuais são calculados sobre o valor médio do bem de capital ao longo da sua vida útil. O custo dos juros, por hora de uso, podem ser calculado como:

$$J = \frac{\left(\frac{C_i(1+f)}{2} \right)_i}{u} \quad (3.56)$$

O valor da taxa de juros (i), foi tomada com base em dados do Banco Nacional de Desenvolvimento (BNDES), onde foram consultadas as taxas de juros dos financiamentos oferecidos pela Agência Especial de Financiamento Industrial (FINAME). O valor médio utilizado nos cálculos correspondente ao período de janeiro à setembro do 2000, o qual foi de 12,00% a. a.

3.3.2.2- Custos variáveis (Cv)

Para o cálculo dos custos variáveis foram considerados:

- Custos de reparos de manutenção (R_m): os gastos realizados neste sentido podem ser calculados de duas formas, através das despesas efetivamente realizadas na manutenção do bem do capital durante o ano; através de uma estimativa em função do custo inicial (C_i), da intensidade de uso no ano e da vida útil adicional do bem. O valor dos gastos com manutenção pode ser calculado com a seguinte relação:

$$R_m = \frac{C_i r m}{u} \quad (3.57)$$

- Custo da energia (E): este custo pode ser estimado diretamente através das medições do consumo por hora, ou pela indicação do consumo pela fábrica, multiplicando pelo preço unitário do kW:

$$E = C.P_r \quad (3.58)$$

Neste trabalho, o consumo do sistema de refrigeração e do ventilador foi determinado experimentalmente, através da medição direta, como foi apresentado na seção 3.1.

O preço do kWh que a UNICAMP paga é calculado com base em uma série de fatores, que incluem os períodos de ponta e fora deste, um úmido e um seco, dias úteis, entre outros. Através do Escritório Técnico de Construções da UNICAMP (ESTEC), baseado no preço médio a ser pago no período de agosto do 1999 à agosto do 2000, estimou-se o preço do kWh para ser utilizado nos cálculos, o qual será de R\$ 0,11 /kWh (US\$ 0,06 /kWh).

- Custo da mão de obra (M_o): este custo foi obtido dividindo-se o salário mensal do operador da câmara (valor estimado), por 24 dias do mês (d) e por 8 horas do dia de trabalho (Ht):

$$M_o = \frac{\left(\frac{S_o}{d}\right)}{H_t} \quad (3.59)$$

3.3.2.3- Custo total (CT)

O custo total é a soma dos custos fixos e dos custos variáveis, para cada bem de capital:

$$CT = C_f + C_v \quad (3.60)$$

onde:

$$C_f = D + J \quad (3.61)$$

$$C_v = R_m + E + M_o \quad (3.62)$$

Os cálculos apresentados nesta seção são referidos apenas ao resfriamento de laranja. Mas o índice do CT poderá ser usado para a determinação do CTP de outros produtos, que sejam resfriados num sistema semelhante ao usado nesta pesquisa.

3.3.2.4- Custo total por produto resfriado (CTP)

O custo total por produto resfriado pode ser obtido da divisão do custo total anual entre a quantidade de produto resfriado (M):

$$CTP = \frac{CT}{M} \quad (3.63)$$

O resultado poderá ser expresso em unidade monetária por unidade (caixa), ou por unidade de peso, ou seja, R\$/cx (US\$/cx) ou em R\$/kg (US\$/kg).

3.3.3- Outros dados necessários para desenvolver os cálculos

Com a finalidade de poder comparar o custo do resfriamento para produtos resfriados numa câmara de estocagem, com o custo de outros que foram resfriados de forma rápida, num sistema a ar forçado, foi feito o cálculo do custo total para ambos os tipos de sistemas. Para desenvolver os cálculos uma série de dados tiveram que ser solicitados aos fabricantes das instalações, os quais mostram-se nas tabelas 3.5 e 3.6.

Tabela 3.5: Dados fornecidos pelos fabricantes da câmara de resfriamento usada nos experimentos (RECRUSUL, junho 1999)

Descrição		Quant.	Custo inicial, RS/ano (US\$/ano)**	Vida útil (anos)
Câmara Frigorífica	Painéis + isolamento	1	12.115,00 (6.922,85)	25
	Sistema de refrigeração	1	13.515,00 (7.722,85)	
Outros	Transporte, instalação, montagem civil*	-	5.700,00 (3.257,14)	
	Total	-	31.330,00 (17.902,85)	

*O valor de transporte refere-se ao frete desde a fábrica até Campinas (R\$ 1.200), o valor da instalação é de R\$ 2.000 (mão de obra dos operários), a montagem civil se refere a os custos envolvidos na construção da base para a montagem da câmara (R\$ 2.500). ** O valor da taxa cambial assumida (R\$1,75 /US\$), para a transformação em US\$ corresponde ao valor médio de fevereiro-março/2000 (Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas, FIPE).

Tabela 3.6: Dados fornecidos pelos fabricantes do ventilador do sistema de resfriamento com ar forçado (TORIN, junho 1999)

Descrição		Quant.	Custo inicial, RS/ano (US\$/ano)**	Vida útil (anos)
Sistema de resfriamento com ar forçado	Câmara Frigorífica	1	31.150,00 (17.800,00)	20
	Ventilador	1	700,00 (400,00)	
	Lona	1	40,00 (22,85)	
	Dutos	2	300,00 (257,14)	
Outros	Frete, montagem*	-	271,00 (342,85)	
	Total	-	32.641,00 (18.652,00)	

*Frete: R\$ 100,00. Montagem: R\$ 71,00, construção base: R\$ 100,00. **O valor da taxa cambial assumida (R\$1,75 /US\$), para a transformação em US\$ corresponde ao valor médio em fevereiro/2000.

3.3.3.1- Custo da caixa de produto

Depois de ser obtido o valor do custo total (CT), que será incrementado ao produto pelo conceito de refrigeração, se fez necessário conhecer o valor do custo total, por caixa de produto quando sai do *packinghouse*. Este dado foi fornecido pelo setor financeiro da Fazenda Sete Lagoas.

O custo total da caixa de laranja, considerando o custo no pomar (custos da preparação do solo, fertilizantes, plantação, coleta, mão-de-obra, maquinarias e transporte até o galpão de embalagem, entre outros), somado o custo no *packinghouse* (embalagens, palhetes, operações de beneficiamento), é de R\$ 4,85/cx. Este valor refere-se ao valor médio total (de 1994 à 1998), da caixa de laranja Valência produzida na fazenda.

Na seção 4.3, do capítulo 4, os resultados serão apresentados em forma de tabelas e figuras, comparando-se o valor do custo total por produto (CTP) para resfriamento numa câmara comum e num sistema de resfriamento a ar forçado.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Como no capítulo 3, o capítulo 4 será dividido em três seções, nas quais serão apresentados os resultados das diferentes etapas do trabalho, na seguinte ordem:

- 4.1- Análise Experimental
- 4.2- Modelagem Teórica
- 4.3- Considerações Econômicas

4.1- Análise Experimental

4.1.1- Resultados dos testes preliminares

A seguir serão mostrados os resultados obtidos nos testes preliminares, na instalação do ventilador e do sistema de resfriamento com ar forçado.

4.1.1.1- Ventilador

Uma série de testes e medições foram desenvolvidos, que incluíram a medição da velocidade de rotação, velocidade do ar de descarga, e calculada a vazão de ar para cada regime com os dados experimentais. Os resultados obtidos nas medições para os três regimes de operação do ventilador

são mostrados na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Valores médios de alguns parâmetros do ventilador

Parâmetro	I	II	III
Rotação, rpm	1.170,00 ± 7,91	872,00 ± 7,79	698,00 ± 7,40
Velocidade do ar de descarga do ventilador, m/s	10,50 ± 0,70	8,30 ± 0,75	5,90 ± 0,44
Vazão de ar nominal, m ³ /h	2.154,00	1.642,00	1.210,00

Na tabela 4.2 mostram-se os valores determinados experimentalmente e os valores calculados:

Tabela 4.2: Valor teórico (T) e experimental (E) dos parâmetros medidos

Parâmetro	I		II		III	
	T	E	T	E	T	E
Rotação, rpm	1.153,00	1.170,00	865,00	872,00	700,00	698,00
Velocidade na descarga do ventilador, m/s	9,40	10,50	7,10	8,30	5,60	5,90
Vazão de ar nominal, m ³ /h	1.933,00	2.154,00	1.450,00	1.642,00	1.160,00	1.210,00

Como pode ser observado na tabela 4.2, os valores teóricos apresentaram valores muito próximos dos obtidos experimentalmente. A diferença da velocidade de rotação do ventilador foi de 1,47; 0,80 e 0,28%, para o regime I, II e III, respectivamente. A velocidade do ar na descarga apresentou uma diferença de 11,70, 12,70 e 5,35% para os três regimes.

4.1.1.2- Temperatura e umidade relativa da câmara sem produto

Depois da montagem de todos os elementos que compõem o sistema de resfriamento com ar forçado, passou-se a desenvolver uma série de experimentos. Numa primeira etapa estes testes foram feitos sem produto, determinando-se o tempo em que o sistema atinge a temperatura de conservação com que seriam desenvolvidos os testes ($T_a = 1^\circ\text{C}$), além de determinar a umidade relativa no interior da câmara.

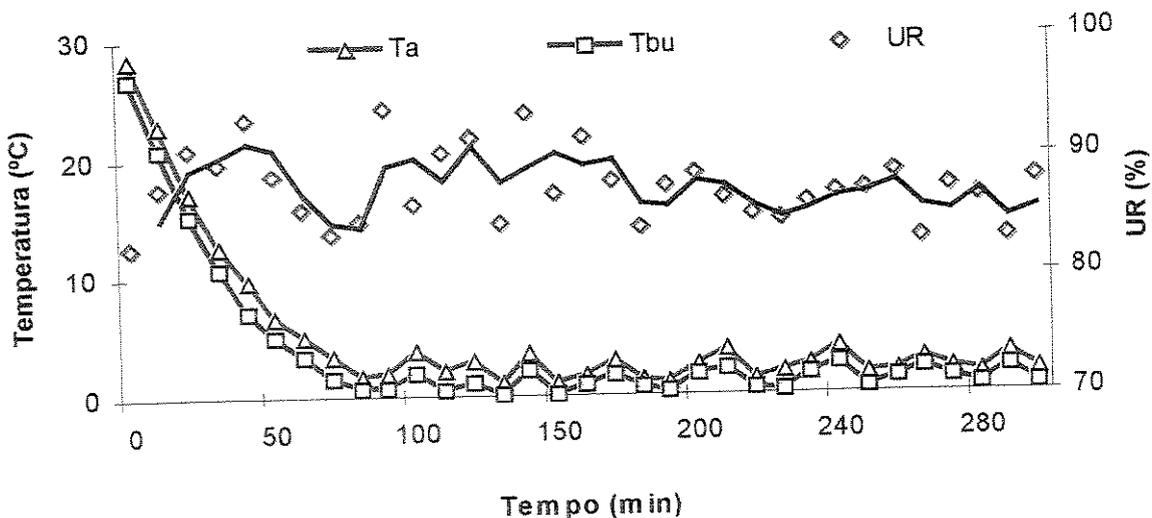


Figura 4.1: Comportamento da temperatura do ar (Ta), da temperatura do bulbo úmido (Tbu), e da umidade relativa no interior da câmara sem produtos

Com estes testes comprovou-se que a temperatura do ar no interior da câmara atingia 1°C em, aproximadamente, 70 min após ter sido ligado o sistema de refrigeração. Depois iniciavam-se os ciclos de arranque e parada do compressor, os quais tiveram uma duração aproximada de 8 a 10 min (Figura 4.1).

A umidade relativa comportou valores entre: $88,14 \pm 2,98\%$; $87,67 \pm 1,77\%$; $86,66 \pm 2,01\%$, para as três repetições feitas. O valor médio entre as três repetições foi de $87,61 \pm 2,43\%$ (Figura 4.1).

4.1.1.3- Testes preliminares no sistema de ar forçado com produto

Determinada a umidade relativa e o tempo necessário para o sistema de resfriamento estabilizar-se a temperatura de 1°C, desenvolveu-se uma série de testes preliminares usando laranja da variedade Baianinha. O objetivo destes testes foi apurar o delineamento experimental proposto no capítulo 3.1.

No capítulo 3.1, item 3.1.6.1, foi explicado com detalhe o procedimento usado nos testes

preliminares. Na figura 4.2, mostram-se as curvas de resfriamento do produto, para cada tratamento aplicado.

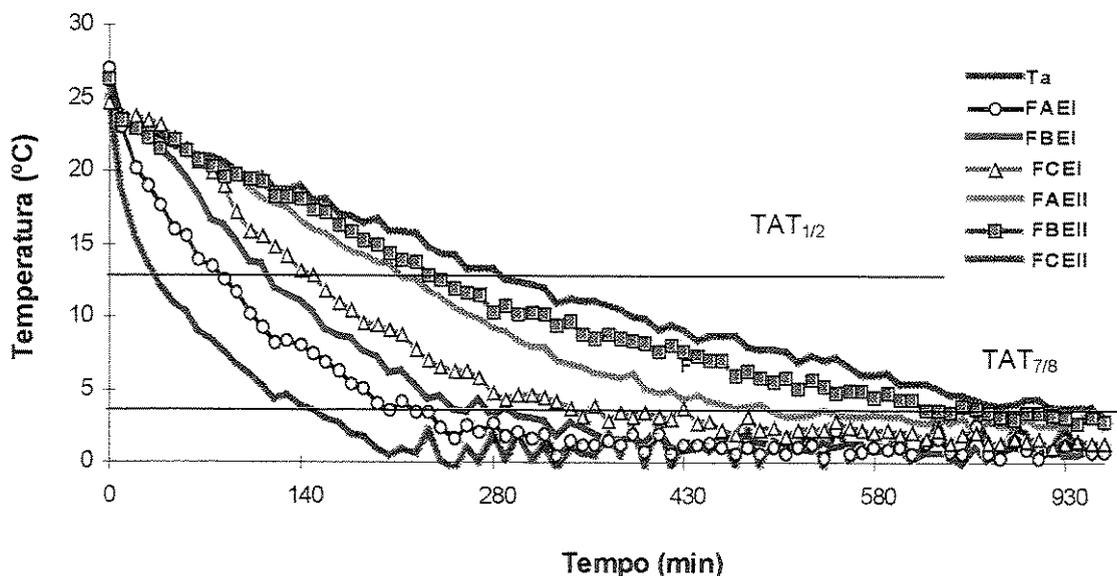


Figura 4.2: Curvas de resfriamento obtidas nos testes preliminares com laranja

Após aquisitadas as leituras de temperatura, através do *software* AQDADOS e com auxílio de uma planilha do Microsoft Excel foram traçadas as curvas, para cada tratamento. Os frutos partiram de uma temperatura inicial média $27 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$, então o tempo de meio resfriamento, onde $TAT = 0,5$, foi atingido quando no centro dos frutos T_c fosse $13,5^{\circ}\text{C}$. Quando, no centro dos frutos a temperatura for de $3,3^{\circ}\text{C}$, os mesmos haverão atingido o tempo dos sete oitavos do resfriamento ($TAT= 0,125$).

Tabela 4.3: Tempo médio de resfriamento (min) para todos os tratamentos nos testes preliminares

Níveis	Fatores		
	FA	FB	FC
Tempo de meio resfriamento			
EI	$82,50 \pm 2,50$	$122,50 \pm 7,50$	$150,00 \pm 10,00$
EII	$230,00 \pm 5,00$	$255,00 \pm 5,00$	$292,50 \pm 7,50$
Tempo dos sete oitavos do resfriamento			
EI	$255,00 \pm 5,00$	$365,50 \pm 2,50$	$460,00 \pm 5,00$
EII	$755,50 \pm 7,50$	$850,00 \pm 7,50$	$910,50 \pm 7,50$

Como pode ser observado na figura 4.2, a temperatura do ar começa a diminuir quase no mesmo ritmo que a temperatura nos produtos, não existindo o ΔT necessário e imprescindível para

que este tipo de resfriamento seja eficiente. Foram necessários aproximadamente 190 min para o ar atingir 1°C, como foi discutido na metodologia (seção 3.1).

Na figura 4.3, mostra-se, de forma simplificada, o comportamento da temperatura do ar para a nova forma de montagem experimental proposta. A região delimitada com a letra I corresponde com o tempo em que o sistema (sem produtos), atinge o regime permanente, ou seja a temperatura se estabiliza em 1°C. A região marcada com a letra II, corresponde-se com o tempo utilizado para a colocação das caixas no interior da câmara (± 15 min), e a região III, é o tempo em que o sistema atinge novamente o regime permanente.

Quando a porta da câmara foi aberta para a colocação das caixas, a temperatura da câmara atingiu aproximadamente $14,2 \pm 1,8$ °C, depois de fechar a porta, a temperatura do ar, no interior da câmara, atingia 1°C, em aproximadamente 50 ± 7 min.

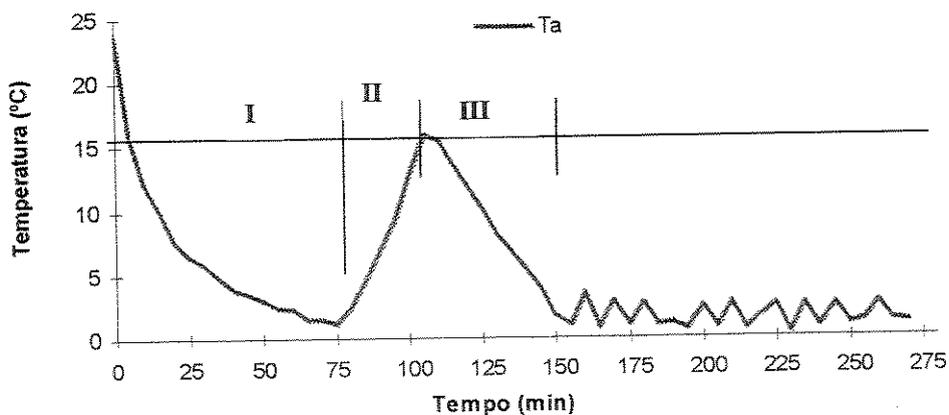


Figura 4.3: Comportamento da temperatura do ar na nova montagem experimental

O tempo necessário para a estabilização da temperatura uma vez colocadas as caixas, com a nova proposta experimental diminuiu em quase 4 vezes, o que repercute favoravelmente no tempo de resfriamento, podendo atingir valores menores, como será mostrado nos resultados posteriores.

4.1.2- Resultados dos testes de resfriamento com laranja

Como foi detalhado no capítulo 3.1, para a realização dos testes de resfriamento e a obtenção da variável de resposta (tempo de resfriamento), foi aplicado um delineamento experimental fatorial

3x2, com 6 tratamentos e duas repetições. Neste capítulo, para facilitar a exposição dos resultados, cada experimento será identificado da mesma forma que foi proposta no item 3.1.12, como segue:

- **FA**: 1.933 m³/h (3 l/s por kg produto)
- **FB**: 1.450 m³/h (2 l/s por kg produto)
- **FC**: 1.160 m³/h (1,5 l/s por kg produto)
- **EI**: embalagem plástica (40% de área efetiva para a ventilação)
- **EII**: embalagem de papelão (3,5%)

Então os tratamentos foram denominados como:

- **FAEI**: fluxo de ar A e embalagem EI
- **FBEI**: fluxo de ar B e embalagem EI
- **FCEI**: fluxo de ar C e embalagem EI
- **FAEII**: fluxo de ar A e embalagem EII
- **FBEII**: fluxo de ar B e embalagem EII
- **FCEII**: fluxo de ar C e embalagem EII

O produto usado nesta etapa dos experimentos foi laranja da variedade Valência, das quais já foram apresentadas as suas características no capítulo 2.

4.1.2.1- Experimentos **FAEI**, **FBEI** e **FCEI**

Nas figuras apresentadas neste item, a temperatura no centro dos frutos está sinalizada na legenda como T_c, para os pontos 1, 2 e 3. O fruto localizado perto da entrada do ar na caixa (1), o fruto localizado no meio da pilha na mesma direção transversal (2), e o fruto localizado no ponto que coincide com a face lateral mais afastada da entrada do ar (3), respectivamente. A temperatura foi medida nestes pontos em duas caixas no interior do túnel (B e E), mas como os resultados obtidos em ambas caixas foram muito semelhantes, e devido à grande quantidade de dados coletados, nesta seção serão apresentados apenas os resultados obtidos na caixa B.

Como pode ser observado nas figuras 4.4; 4.5 e 4.6 a temperatura do ar atinge 1°C,

aproximadamente 50 min após a colocação das caixas no túnel. Em seguida iniciava-se um ciclo de arranque e parada do compressor. A temperatura média exterior foi de $27,2 \pm 1,3^{\circ}\text{C}$; $29,1 \pm 0,6^{\circ}\text{C}$ e $28,3 \pm 1,1^{\circ}\text{C}$; nos experimentos FAEI, FBEI e FCEI, respectivamente.

Os frutos partiram de uma temperatura inicial média de $25,2 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$; $25,4 \pm 0,9^{\circ}\text{C}$ e $25,3 \pm 0,3^{\circ}\text{C}$, nos tratamentos FAEI, FBEI e FCEI, respectivamente. Na tabela 4.4 são mostrados os valores de temperatura quando foi atingida a condição $TAT_{1/2}$ e $TAT_{7/8}$, determinados usando as equações 3.11 e 3.12. Estes valores foram calculados partindo da temperatura obtida nos experimentos com o auxílio de uma planilha do Excel.

Tabela 4.4: Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) em que foi atingida a condição $TAT_{1/2}$ e $TAT_{7/8}$

$TAT_{1/2}$		
FAEI	FBEI	FCEI
12,8	13,0	13,4
$TAT_{7/8}$		
3,6	3,7	3,8

Observou-se em cada experimento a existência de um diferencial de temperatura entre os pontos 1, 2 e 3. A título de exemplo, no experimento FAEI no instante em que o ponto 1 atinge o tempo meio do resfriamento, no ponto 2, T_c é de $15,9^{\circ}\text{C}$ e no ponto 3 de $17,5^{\circ}\text{C}$. Estes valores representam uma diferença de 19% à 27% ao longo do leito (de $4,7^{\circ}\text{C}$ à $1,6^{\circ}\text{C}$). Esta diferença oscilou entre 32% e 17% nos experimentos FBEI e FCEI, respectivamente.

Este diferencial de temperatura pode ter sido provocado pela possível diminuição do escoamento do ar através dos frutos e o aumento da temperatura do ar de resfriamento. Vários trabalhos da área demonstram a existência de um diferencial de temperatura ao longo do leito (Baird *et al.*, 1985; Novy & Kieckbusch, 1986; Arifin & Chau, 1987; Baird *et al.*, 1988; Alvarez & Letang, 1994). Porém, os frutos que encontram-se em maior contato com o fluxo do ar, resfriam-se num tempo menor que aqueles que encontram-se numa posição mais afastada.

Observando-se as curvas de resfriamento (Figuras 4.4; 4.5 e 4.6), pode-se notar que nos três pontos onde foi monitorada a temperatura, atinge-se o tempo de resfriamento em instantes diferentes. O diferencial de temperatura existente entre os diferentes pontos ao longo do leito, reflete-se no tempo de resfriamento, como mostrados na tabela 4.5.

Um aspecto a ser destacado refere-se a nova forma de montagem experimental, a qual possibilitou a obtenção de tempos de resfriamento de 18 a 33% menores, com respeito aos testes preliminares. Comprova-se então que efetivamente com a forma de montagem experimental adotada nos testes definitivos obtém-se menores tempos de resfriamento.

Em todos os experimentos notou-se a existência de um diferencial de temperatura entre o centro (T_c) e a temperatura na superfície (T_s). Observando a figura 4.4, esta diferença é evidente, a temperatura na superfície do fruto diminui acompanhando a temperatura do ar. Entre o centro dos frutos e a superfície, o ΔT , oscilou entre aproximadamente $1,2^\circ\text{C}$ a 10°C , dependendo da posição do fruto. Este aspecto será discutido com mais detalhe no item onde são mostrados os resultados obtidos da validação do modelo matemático, onde é apresentado o comportamento da temperatura em gráficos em 2-D.

Nas figuras 4.4; 4.5 e 4.6, são mostradas as curvas de resfriamento dos frutos quando usada a embalagem EI, para as três taxas de ar aplicadas.

a)-FAEI (fluxo $1.933 \text{ m}^3/\text{h}$, embalagem com 40% área efetiva de abertura)

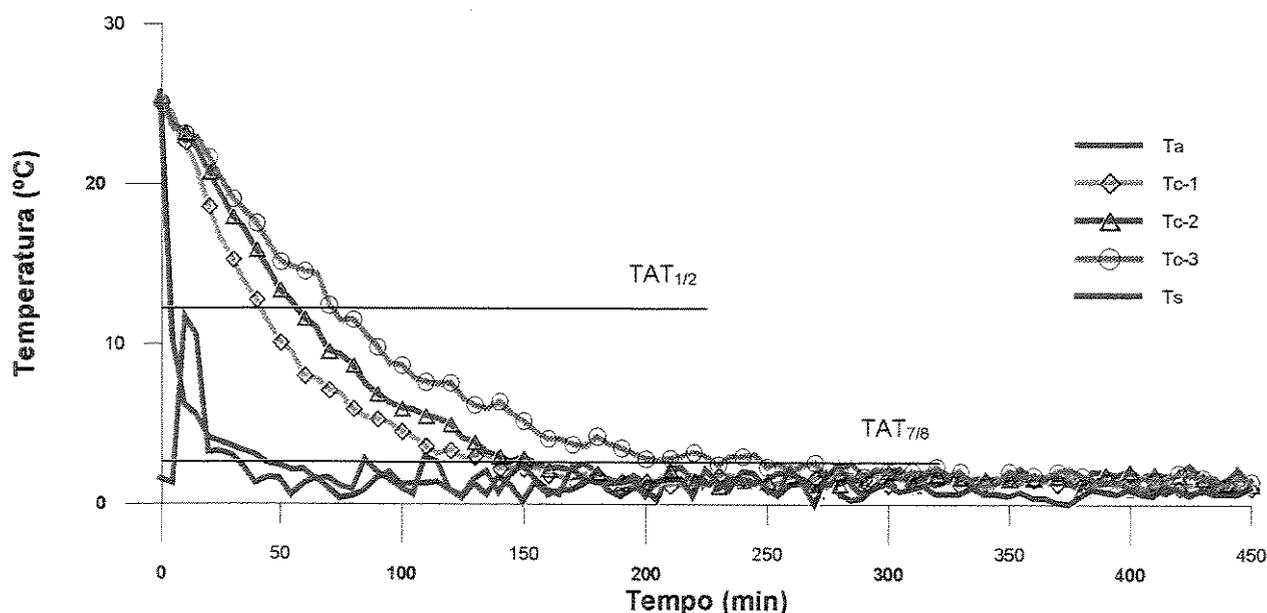


Figura 4.4: Curvas de resfriamento para laranjas submetidas ao tratamento FAEI

b) -FBEI (fluxo de ar de 1.450 m³/h)

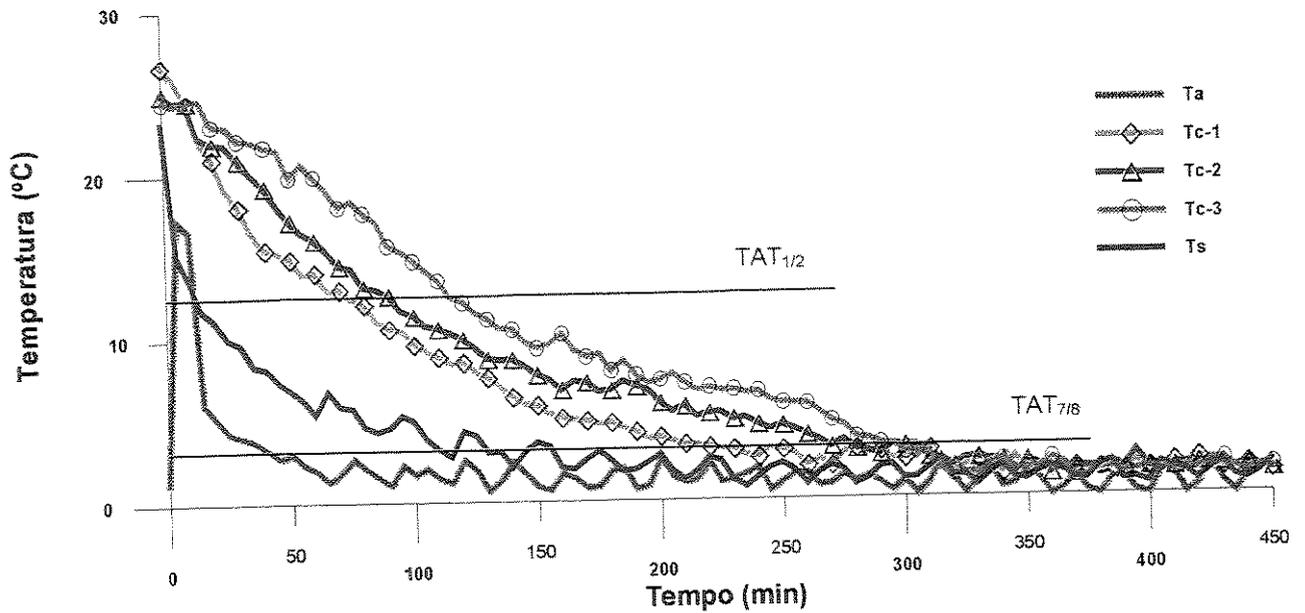


Figura 4.5: Curvas de resfriamento para laranjas submetidas ao tratamento FBEI

c)- FCEI (fluxo de ar de 1.160 m³/h)

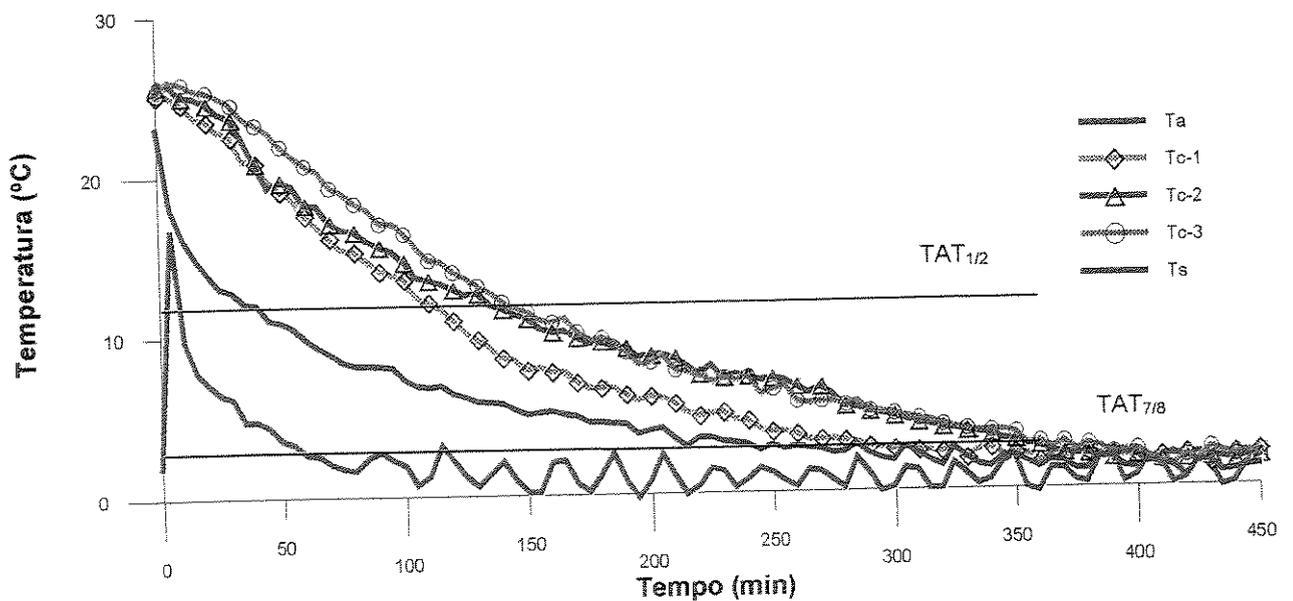


Figura 4.6: Curvas de resfriamento para laranjas submetidas ao tratamento FCEI

Na tabela 4.5 é mostrado um resumo do tempo de resfriamento para cada tratamento e na

tabela 4.6 a diferença em porcentagem do tempo de resfriamento, entre o ponto 1 e 3.

Tabela 4.5: Tempo de resfriamento (min) nos pontos monitorados nos tratamentos FAEI, FBEI e FCEI

Tratamento	TAT _{1/2}		
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
FAEI	37,50 ± 2,50	50,00 ± 5,00	67,50 ± 2,50
FBEI	57,50 ± 7,50	85,00 ± 5,00	117,00 ± 12,50
FCEI	100,00 ± 10,00	110,00 ± 10,00	132,50 ± 7,50
Tratamento	TAT _{7/8}		
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
FAEI	107,50 ± 7,50	122,50 ± 2,50	170,00 ± 10,00
FBEI	192,50 ± 7,50	262,50 ± 12,50	282,50 ± 12,50
FCEI	250,00 ± 10,00	302,50 ± 12,50	337,50 ± 7,50

Tabela 4.6: Valores (%) da diferença entre o tempo de resfriamento para cada ponto

Tratamento	Diferença entre os pontos 1 e 3	Diferença entre tratamentos FAEI-FCEI
	TAT _{1/2}	Ponto 1
FAEI	44,4	62,5
FBEI	51,0	Ponto 3
FCEI	24,5	49,0
Tratamento	TAT _{7/8}	Ponto 1
	FAEI	36,0
FBEI	32,0	Ponto 3
FCEI	26,0	49,5

Note-se que o tempo de resfriamento sempre é menor no ponto 1 que no ponto 3, ou seja, para o ponto onde os frutos encontram-se em maior contato com o fluxo de ar. Também foi constatado que na medida que diminuiu a taxa de ar existe um aumento do tempo de resfriamento de até 62%.

Estes resultados demonstram que a variável de resposta avaliada (tempo de resfriamento), é fortemente influenciada pelo fator fluxo de ar, e que para taxas de ar maiores tem-se tempos de resfriamento menores e vice-versa. Esta interação, entre embalagem e fluxo, foi avaliada em termos estatísticos, e os resultados serão apresentados em itens posteriores.

4.1.2.2- Experimentos FAEII, FBEII e FCEII

Os resultados mostrados a seguir, correspondem-se com os experimentos em que foi modificado o tipo de embalagem (caixas de papelão, com 3,5% de área efetiva para a passagem do

ar), aplicando os três fluxos de ar (FA, FB e FC).

Os frutos partiram de uma temperatura inicial de $25,9 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$; $24,4 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ e $25,1 \pm 0,3^{\circ}\text{C}$, nos experimentos FAEII, FBEII e FCEII, respectivamente. A temperatura média exterior nestes experimentos foi de $27,5 \pm 1,2^{\circ}\text{C}$; $27,22 \pm 1,1^{\circ}\text{C}$ e $25,1 \pm 1,3^{\circ}\text{C}$. Na tabela 4.7 mostra-se o valor da temperatura em que foi atingido $TAT_{1/2}$ e $TAT_{7/8}$ em cada experimento.

Tabela 4.7: Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) em que foi atingida a condição $TAT_{1/2}$ e $TAT_{7/8}$

$TAT_{1/2}$		
FAEII	FBEII	FCEII
13,1	13,4	13,5
$TAT_{7/8}$		
3,7	3,0	3,2

No experimento FAEII entre os pontos 1, 2 e 3 existiu um ΔT de $6,3^{\circ}\text{C}$ a $1,3^{\circ}\text{C}$, (uma diferença de 32% a 3%) (Figura 4.7). A temperatura na superfície (T_s), manteve um ΔT de $6,0^{\circ}\text{C}$ a $13,2^{\circ}\text{C}$, até o tempo de meio resfriamento. Já quando o fruto encontra-se praticamente resfriado ($TAT_{7/8}$), o ΔT diminui até valores de $1,1^{\circ}\text{C}$ a $6,6^{\circ}\text{C}$.

No experimento FBEII o valor do ΔT entre o centro e a superfície entre os diferentes pontos foi de $5,4$ e $12,1^{\circ}\text{C}$ (para $TAT_{1/2}$), e de $1,6$ a $6,1^{\circ}\text{C}$ (para $TAT_{7/8}$). Entre o ponto 1 e 3 o valor de ΔT , quando o fruto atinge o tempo de meio resfriamento no ponto 1, é de $2,18$ e $4,45^{\circ}\text{C}$, uma diferença que representa de 15 a 34%.

No experimento FCEII entre os frutos nas três posições, existe um ΔT que é de $2,49$ a $3,6$, entre os pontos 1 e 3 (quando $TAT_{1/2}$), e de $1,56$ a $2,21^{\circ}\text{C}$ (para $TAT_{7/8}$). Este diferencial de temperatura têm influência sobre o tempo de resfriamento, o qual difere para os três pontos (Figura 4.9). O tempo de resfriamento é 45% maior no ponto 3 que no ponto 1 (para $TAT_{1/2}$) e 24% maior quando o fruto atinge o tempo dos sete oitavos do resfriamento de resfriamento.

Observou-se a existência de um diferencial de temperatura entre o centro e a superfície do frutos dentre $3,2$ à 14°C entre os pontos 1, 2 e 3, Estes valores representam entre 40% e 10%, aproximadamente. Resultados semelhantes foram apresentados por Alvarez & Letang (1994), os quais obtiveram uma diferença entre a temperatura na superfície do corpo e o centro na ordem de

20%.

O valor do ΔT entre os experimentos com a embalagem EI foi menor ($\approx 30\%$), que com a embalagem EII, isto devido ao fato de que a embalagem EI, por apresentar uma área de aberturas 11 vezes maior que a embalagem EII, permite um maior contato da superfície do produto com o fluxo de ar.

As curvas de resfriamento obtidas para cada tratamento com a embalagem EII são mostradas a seguir:

a)- FAEII (fluxo de ar de $1.933 \text{ m}^3/\text{h}$ e embalagem com 3,5% área efetiva de abertura)

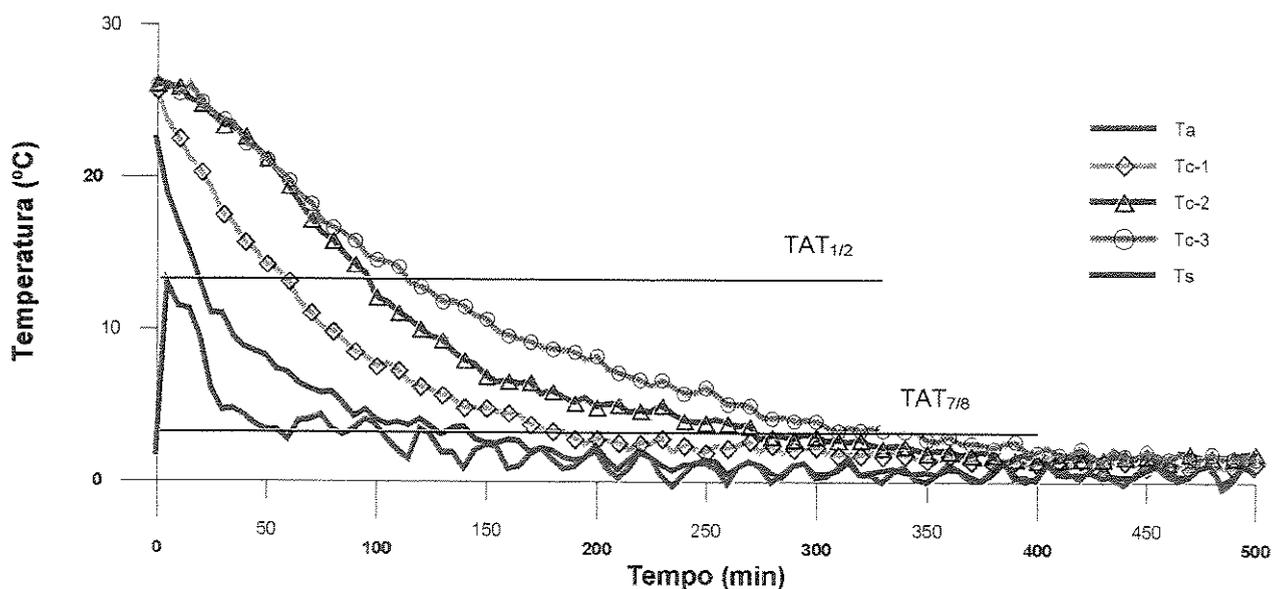


Figura 4.7: Curvas de resfriamento para laranjas submetidas ao tratamento FAEII

b)- FBEII (fluxo de ar de 1.450 m³/h)

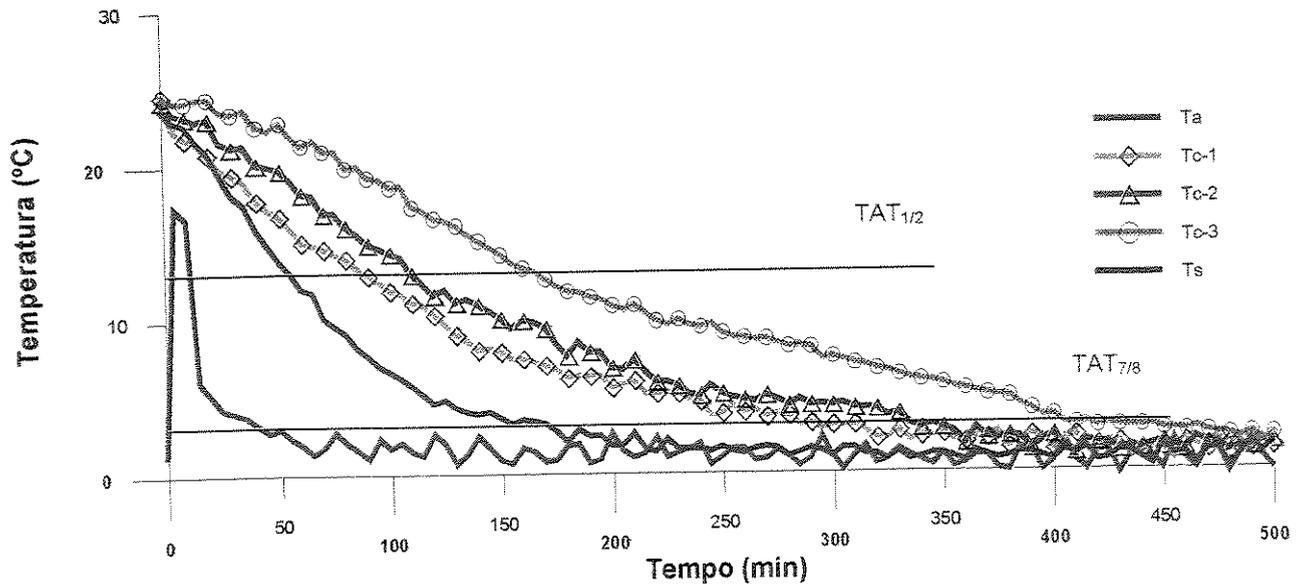


Figura 4.8: Curvas de resfriamento para laranjas submetidas ao tratamento FBEII

c)- FCEII (fluxo de ar de 1.160 m³/h)

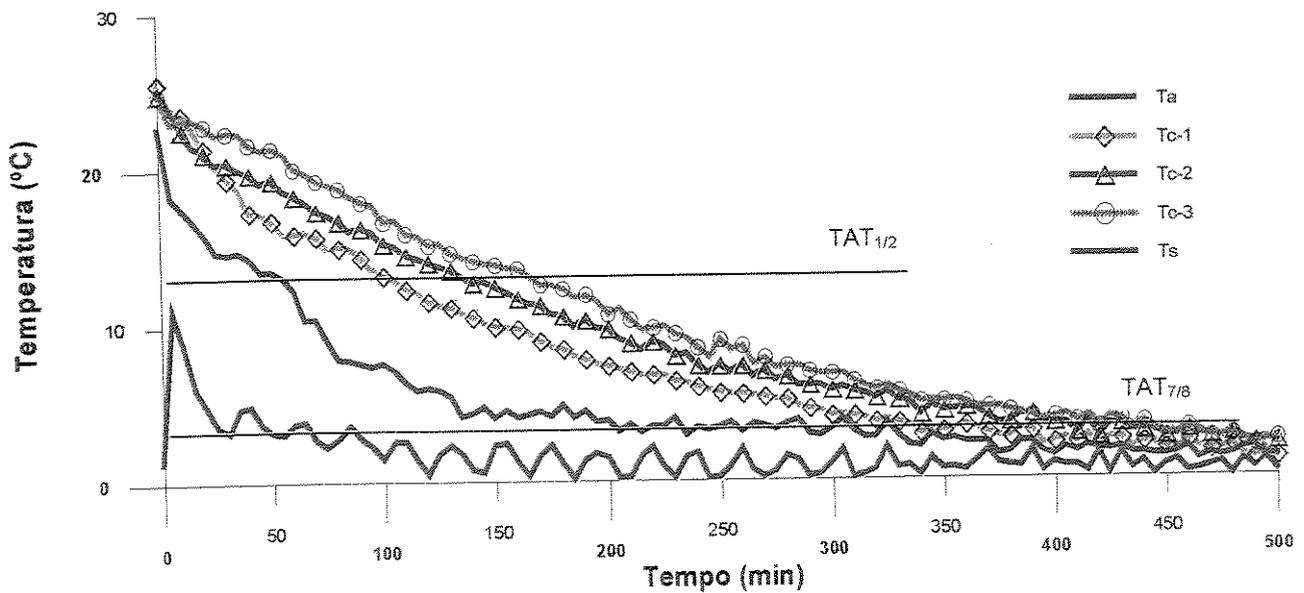


Figura 4.9: Curvas de resfriamento para laranjas submetidas ao tratamento FCEII

Na tabela 4.8 apresenta-se um resumo do valor do tempo de resfriamento para os experimentos com a embalagem EII. Na tabela 4.9 apresenta-se a diferença em % do tempo de

resfriamento entre o ponto 1 e 3 para cada tratamento e a diferença entre FAEII e FCEII.

Tabela 4.8: Tempo de resfriamento (min) nos pontos monitorados nos tratamentos FAEII, FBEII e FCEII

Tratamento	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
	TAT _{1/2}		
FAEII	57,50 ± 2,50	90,00 ± 10,00	112,50 ± 7,50
FBEII	92,50 ± 7,50	117,50 ± 7,50	170,00 ± 10,00
FCEII	117,50 ± 2,50	137,50 ± 2,50	180,00 ± 10,00
	TAT _{7/8}		
FAEII	167,50 ± 2,50	260,00 ± 5,00	300,00 ± 5,00
FBEII	297,50 ± 12,50	322,50 ± 2,50	395,00 ± 15,00
FCEII	307,50 ± 12,50	387,50 ± 12,50	405,00 ± 12,50

Note-se que do mesmo modo que nos experimentos com a embalagem EI, entre os diferentes pontos existe um diferencial de temperatura que chega até aproximadamente 50%. Da mesma maneira na medida que a taxa de ar diminui, o tempo de resfriamento apresenta um aumento considerável, como apreciado na tabela 4.9.

Tabela 4.9: Valores (%) da diferença entre o tempo de resfriamento para cada ponto

Tratamentos	Diferença entre os pontos 1 e 3	Diferença entre tratamentos FAEII-FCEII
	TAT _{1/2}	Ponto 1
FAEII	48,8	51,0
FBEII	45,5	Ponto 3
FCEII	34,7	37,5
	TAT _{7/8}	Ponto 1
FAEII	44,1	45,5
FBEII	24,5	Ponto 3
FCEII	24,1	25,9

Desta forma comprova-se que efetivamente a posição dos frutos com respeito ao fluxo de ar tem uma influência marcante no tempo de resfriamento. Isto porque estabelece-se um gradiente de temperatura na direção do fluxo de ar como foi comprovado em trabalhos desenvolvidos por Gaffney, 1977; Baird *et al.*, 1985; Novy & Kieckbush, 1986; Arifin & Chau, 1987; Baird *et al.*, 1988; Alvarez & Letang, 1994.

Estes resultados demonstram que, tempo de resfriamento, também é fortemente influenciado pelo fator embalagem. A análise estatística da influência da embalagem será mostrada em itens

posteriores.

4.1.2.3- Comparação entre todos os experimentos de resfriamento de laranja

Na figura 4.10 mostram-se as curvas de resfriamento para todos os experimentos (ponto 1), onde pode-se apreciar com clareza a diferença entre os diferentes tratamentos, refletida no tempo de resfriamento. Na tabela 4.10, mostra-se um resumo com os valores do tempo de resfriamento para todos os experimentos, nos três pontos monitorados.

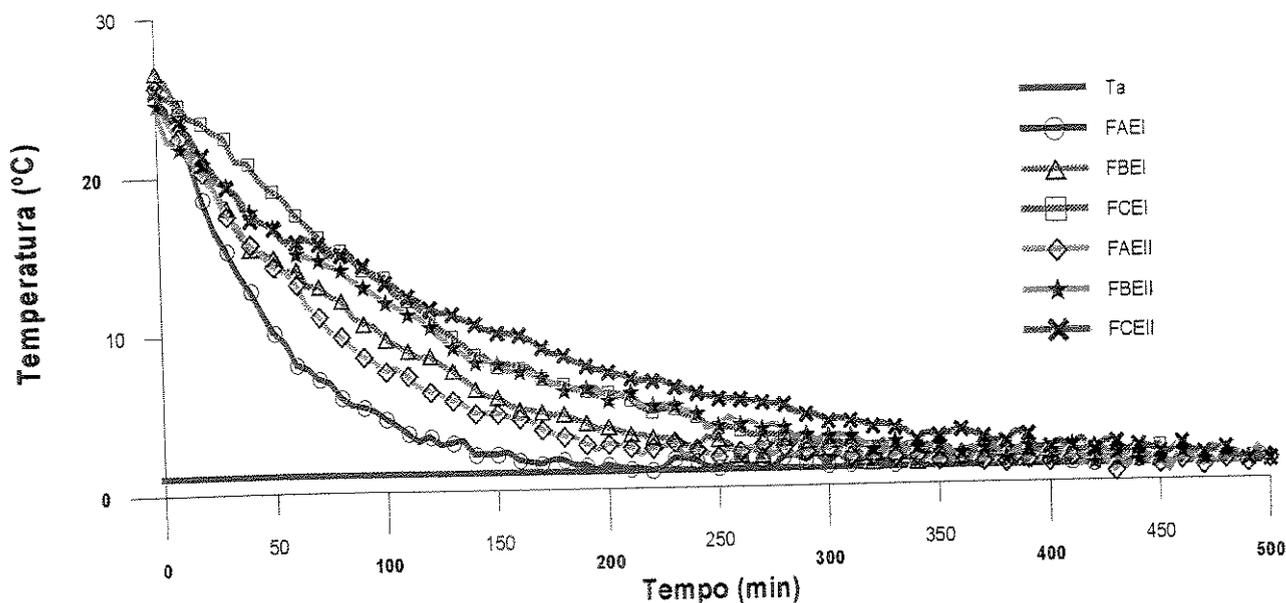


Figura 4.10: Curvas de resfriamento obtidas em todos os testes de resfriamento de laranja (ponto 1)

Tabela 4.10: Tempo de resfriamento (min) em todos os tratamentos (experimentos com laranja)

Tratamento	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
	TAT _{1/2}		
FAEI	37,50 ± 2,50	50,00 ± 5,00	67,50 ± 2,50
FB EI	57,50 ± 7,50	85,00 ± 5,00	117,50 ± 12,50
FCEI	100,00 ± 10,00	110,00 ± 10,00	132,50 ± 7,50
FAEII	57,50 ± 2,50	90,00 ± 10,00	112,50 ± 7,50
FBEII	92,50 ± 7,50	117,50 ± 7,50	170,00 ± 10,00
FCEII	117,50 ± 2,50	137,50 ± 2,50	180,00 ± 10,00
TAT _{7/8}			
FAEI	107,50 ± 7,50	122,50 ± 2,50	170,00 ± 10,00
FB EI	192,50 ± 7,50	262,50 ± 12,50	282,50 ± 12,50
FCEI	250,00 ± 10,00	307,50 ± 12,50	337,50 ± 7,50
FAEII	167,50 ± 2,50	260,00 ± 5,00	300,00 ± 5,00
FBEII	297,50 ± 12,50	322,50 ± 2,50	395,00 ± 15,00
FCEII	307,50 ± 12,50	387,50 ± 12,50	405,00 ± 12,50

A título de comparação mostra-se a tabela 4.11, com os valores em % da diferença do tempo de resfriamento entre os diferentes tratamentos, para o ponto 1 e 3.

Tabela 4.11: Diferença (%) do tempo de resfriamento entre os diferentes tratamentos

Tratamentos	Ponto 1	Ponto 3
	TAT _{1/2}	
FAEI-FAEII	34,7	40,0
FBEI-FBEII	37,8	30,8
FCEI-FCEII	17,5	26,3
	TAT _{7/8}	
FAEI-FAEII	35,8	43,3
FBEI-FBEII	35,3	28,4
FCEI-FCEII	18,7	16,8

Como foi discutido na apresentação de cada tratamento, observou-se uma tendência ao aumento do tempo de resfriamento quando diminui a taxa de ar, da mesma forma que quando usadas embalagens com menor área disponível para o passagem do ar.

Os valores mostrados na tabela 4.11 demonstram que para as mesmas condições do fluxo de ar, o tempo de resfriamento depende em grande medida do tipo de embalagem usada, ou seja, depende da área de abertura efetiva que estas apresentam para a passagem do ar.

Note-se então que realmente a influência da área de aberturas das embalagens é grande no tempo de resfriamento, como discutido por Grierson *et al.*, 1970; Hass *et al.*, 1976; Chau *et al.*, 1985; Arifin & Chau, 1988; Baird *et al.*, 1988. Nestes trabalhos recomenda-se que no mínimo a área de aberturas das embalagens deve ser no mínimo de 5 a 10%, no sentido do passagem do fluxo de ar.

De igual forma o tempo de resfriamento é diferente para cada ponto em todos os tratamentos, provocado pelo gradiente de temperatura que existe entre os diferentes pontos no interior do leito, provocado pela provável diminuição da velocidade entre os diferentes pontos. Resultados semelhantes aos apresentados foram obtidos por Arifin & Chau, 1987; Baird *et al.*, 1988; Alvarez & Letang, 1994.

Até este ponto do trabalho têm-se comprovado experimentalmente que o tempo de resfriamento (variável de resposta avaliada), depende fortemente do tipo de embalagem e da taxa de

ar aplicada aos frutos.

4.1.3- Análise estatística

Neste item serão apresentados os resultados da análise estatística desenvolvida, para avaliar a influência da taxa de ar e da embalagem sobre a variável de resposta (tempo de resfriamento). Foi aplicado o teste F e a análise de variância (ANOVA), para um nível de confiança de 90%.

Os cálculos foram desenvolvidos para todos os pontos, mas devido à grande quantidade de dados, serão apresentados os resultados para os pontos 1 e 3, para o instante que corresponde-se com o tempo de meio resfriamento e com o tempo dos sete oitavos do resfriamento. Para todos os pontos analisados foram obtidos resultados semelhantes.

4.1.3.1- Ponto 1 ($TAT_{1/2}$)

Na tabela 4.12 mostram-se os resultados obtidos, com a aplicação da ANOVA para testar se os fatores (fluxo) e os níveis (embalagem), exercem influência diferente sobre a variável de resposta (tempo de resfriamento).

Tabela 4.12: Resultados da aplicação dos testes de hipóteses e da ANOVA para a interação (ponto 1, $TAT_{1/2}$)

Teste de Hipóteses	
Fcalculado [Fc]	24,54*
Ftabelado [Ft (6, 5, 10%)]	3,11
Hipóteses testadas	Ho: T1=T2=T3=T4=T5=T6 H1= T1 ≠ T2 ≠ T3 ≠ T4 ≠ T5 ≠ T6
Condição de rejeição da hipótese nula	Fc > Ft
Conclusão	REJEITA Ho

* Média significativa para um intervalo de confiança de 90%

Como se cumpre a condição de rejeição de Ho, significa dizer que aceitou-se a hipótese alternativa, os tratamentos apresentam efeitos diferentes sobre o tempo de resfriamento. Então se faz necessário desdobrar os tratamentos e desenvolver novamente a ANOVA.

Desdobrando os G. L dos tratamentos:

Fluxos: 3-1=2; Embalagens: 2-1=1; Interação (FxE)= 2

Tabela 4.13: Resultados da aplicação dos testes de hipóteses e da ANOVA para a interação

Teste de Hipóteses	
Fc (F)	48,84*
Fc (E)	22,73*
Fc (FxE)	4,16*
Ft (F) (6, 2, 10%)	3,46
Ft (E) (6, 1, 10%)	3,78
Ft (FxE) (6, 2, 10%)	3,46
Hipóteses testadas	Ho: Não dependência entre FxE na VR H1= dependência entre FxE na VR
Condição de rejeição da hipótese nula	$F_c > F_t$
Conclusão	REJEITA Ho

Verifica-se então que, o teste F foi significativo para o nível de significância de 10%, aceitando a hipótese H1, o que indica que existe uma dependência entre os fatores fluxo e embalagem na variável de resposta, desta forma pode-se dizer que:

- os efeitos do fluxo dependem da embalagem usada
- os efeitos da embalagem utilizada dependem do fluxo de ar

Neste ponto, e seguindo a metodologia proposta no capítulo 3.1, faz-se necessário fazer o desdobramento da interação FxE para estudar: o comportamento do fluxo de ar dentro de cada embalagem, e o comportamento das embalagens para cada fluxo de ar.

a)- desdobramento da interação FxE para estudar o comportamento da embalagem dentro de cada fluxo de ar

Tabela 4.14: Resumo dos testes de hipótese (influência dos fluxos)

Teste de Hipóteses	
Fc (E/FA)	5,18*
Fc (E/FB)	15,89*
Fc (E/FC)	3,99*
Ft [(6, 1, 10%)]	3,78
Hipóteses testadas	Ho: FA=FB= FC H1= FA ≠ FB≠ FC
Condição de rejeição da hipótese nula	$F_c > F_t$
Conclusão	REJEITA Ho

Como em todos os casos o F_c é significativamente maior que o F_t , rejeitou-se H_0 , o que significa aceitar a hipótese alternativa H_1 , ou seja, os três fluxos de ar exercem influência significativa sobre a embalagem, influenciando a variável de resposta, para um nível de significância estatística de 10%.

b)-desdobramento da interação $F \times E$ para estudar o comportamento do fluxo de ar dentro de cada embalagem

Tabela 4.15: Resumo dos testes de hipóteses (influência da embalagem)

Teste de Hipóteses	
F_c (F/EI)	26,43*
F_c (F/EII)	23,56*
F_t (6, 2, 10%)	3,46
Hipóteses testadas	$H_0: EI = EII$
	$H_1 = EI \neq EII$
Condição de rejeição da hipótese nula	$F_c > F_t$
Conclusão	REJEITA H_0

Rejeitar H_0 e aceitar H_1 significa dizer que :

- os três fluxos têm efeito significativo, no tempo de resfriamento, quando utilizada a embalagem plástica (EI);
- os três fluxos de ar têm efeito significativo sobre o tempo de resfriamento, quando utilizada a embalagem de papelão (EII), para um intervalo de confiança de 90%.

4.1.3.2- Ponto 1 ($TAT_{7/8}$)

Seguindo a mesma metodologia apresentada para este ponto, ao tempo de meio resfriamento, na tabela 4.17, são apresentados os resultados, quando o fruto encontrava-se no tempo dos sete oitavos do resfriamento de resfriamento.

Tabela 4.16: Resumo dos testes de hipóteses e da ANOVA (ponto 1, $TAT_{7/8}$)

Teste de Hipóteses	
F_c	19,83*
F_t (6, 5, 10%)	3,11
Hipóteses testadas	$H_0: T_1 = T_2 = T_3 = T_4 = T_5 = T_6$
	$H_1 = T_1 \neq T_2 \neq T_3 \neq T_4 \neq T_5 \neq T_6$
Condição de rejeição da hipótese nula	$F_c > F_t$

Conclusão	REJEITA Ho
Desdobramento dos tratamentos	
Fc (F)	37,42*
Fc (E)	23,22*
Fc (FxE)	3,58*
Ft (6, 2, 10%)	3,46
Ft (E) (6, 1, 10%)	3,78
Ft (FxE) (6, 2, 10%)	3,46
Hipóteses testadas	Ho: Não dependência entre FxE na VR H1= dependência entre FxE na VR
Conclusão	REJEITA Ho
Efeito das embalagens	
Fc (E/FA)	5,54*
Fc (E/FB)	13,24*
Fc (E/FC)	5,54*
Ft (6,1, 10%)	3,78
Hipóteses testadas	Ho: FA=FB= FC H1= FA ≠ FB≠ FC
Conclusão	REJEITA Ho
Efeito do fluxo	
Fc (F/EI)	17,75*
Fc (F/EII)	20,22*
Ft (6, 2, 10%)	3,46
Hipóteses testadas	Ho: EI = EII H1= EI ≠ EII
Conclusão	REJEITA Ho

4.1.3.3- Ponto 3 (TAT_{1/2})

Tabela 4.17: Resumo dos testes de hipóteses e da ANOVA (ponto 3, TAT_{1/2})

Teste de Hipóteses	
Fc	15,94*
Ft (6, 5, 10%)	3,11
Hipóteses testadas	Ho: T1=T2=T3=T4=T5=T6 H1= T1 ≠ T2 ≠ T3 ≠ T4 ≠ T5 ≠ T6
Condição de rejeição da hipótese nula	Fc > Ft
Conclusão	REJEITA Ho
Desdobramento da iteração	
Fc (F)	20,76*
Fc (E)	37,24*
Fc (FxE)	3,55*
Ft (F)	3,46
Ft (E) (6, 1, 10%)	3,78
Ft (FxE) (6, 2, 10%)	3,46

Hipóteses testadas	Ho: Não dependência entre FxE na VR H1= dependência entre FxE na VR
Conclusão	REJEITA Ho
Efeito da embalagem	
Fc (E/FA)	8,84*
Fc (E/FB)	18,84*
Fc (E/FC)	10,91*
Ft (6, 1, 10%)	3,78
Hipóteses testadas	Ho: FA=FB=FC H1= FA ≠ FB ≠ FC
Conclusão	REJEITA Ho
Efeito do fluxo	
Fc (F/EI)	8,89*
Fc (F/EII)	12,35*
Ft (6, 2, 10%)	3,46
Hipóteses testadas	Ho: EI = EII H1= EI ≠ EII
Conclusão	REJEITA Ho

4.1.3.4.- Ponto 3 (TAT_{7/8})

Tabela 4.18: Resumo dos testes de hipóteses e da ANOVA (ponto 3, TAT_{7/8})

Teste de Hipóteses	
Fc	24,64*
Ft (6, 5, 10%)	3,11
Hipóteses testadas	Ho: T1=T2=T3=T4=T5=T6 H1= T1 ≠ T2 ≠ T3 ≠ T4 ≠ T5 ≠ T6
Condição de rejeição da hipótese nula	Fc > Ft
Conclusão	REJEITA Ho
Desdobrando os tratamentos	
Fc (F)	31,39*
Fc (E)	58,17*
Fc (FxE)	4,12*
Ft (F)	3,46
Ft (E) (6, 1, 10%)	3,78
Ft (FxE) (6, 2, 10%)	3,46
Hipóteses testadas	Ho: Não dependência entre FxE na VR H1= dependência entre FxE na VR
Condição de rejeição da hipótese nula	Fc > Ft
Conclusão	REJEITA Ho
Efeito da embalagem	
Fc (E/FA)	29,65*
Fc (E/FB)	19,69*
Fc (E/FC)	11,07*

Ft (6, 1, 10%)	3,78
Hipóteses testadas	Ho: FA=FB= FC H1= FA ≠ FB≠ FC
Conclusão	REJEITA Ho
Efeito do fluxo	
Fc (F/EI)	21,81*
Fc (F/EII)	10,71*
Ft (6, 2, 10%)	3,46
Hipóteses testadas	Ho: EI = EII H1= EI ≠ EII
Conclusão	REJEITA Ho

Como foi mostrado nas tabelas 4.17, 4.18 e 4.19, para todos os pontos analisados, o resultado foi o mesmo que o obtido quando analisado o ponto 1, para o tempo de meio resfriamento. Desta forma pode-se dizer que fica demonstrado estatisticamente que o tempo de resfriamento depende tanto da taxa de ar como da embalagem usada, para um intervalo de confiança de 90%.

Pode-se afirmar então, como já foi comprovado experimentalmente, que quanto maior o fluxo de ar e a área efetiva da embalagem, menor será o tempo de resfriamento.

4.1.4- Verificação da adequação do modelo de análise de variância

Neste item será feita a comprovação da adequação do modelo de análise de variância adotado, através da análise dos resíduos, avaliando-se assim a validade do planejamento experimental aplicado, assim como a confiabilidade dos resultados obtidos.

4.1.4.1- Análise dos resíduos

Através da análise dos resíduos foi possível determinar o comportamento do erro obtido durante os ensaios. A análise de resíduos foi realizada para todos os pontos, mas, devido ao grande volume de dados, e a semelhança obtida entre os diferentes pontos, apenas serão mostrados os resultados para o ponto 1, na caixa B ($TAT_{1/2}$).

Com o valor do resíduo calculado para cada tratamento foi construído o gráfico mostrado na figura 4.11. Observa-se que não existe nenhuma configuração especial que revele uma associação

dos resíduos contra a ordem de execução dos experimentos, o que indica que a suposição de independência não foi violada (Drumond *et al.*, 1996).

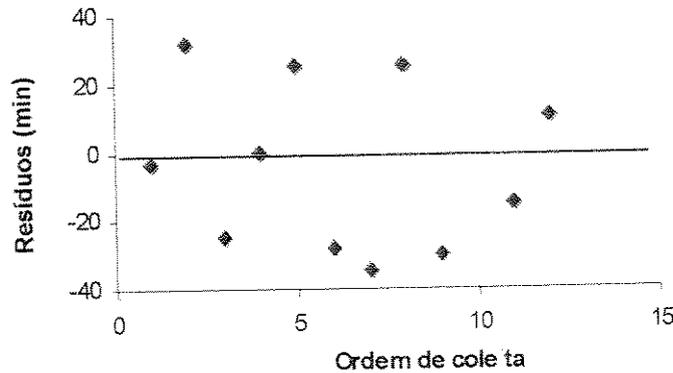


Figura 4.11: Comportamento dos resíduos com respeito á ordem e coleta dos dados, ponto 1 (experimentos com laranja)

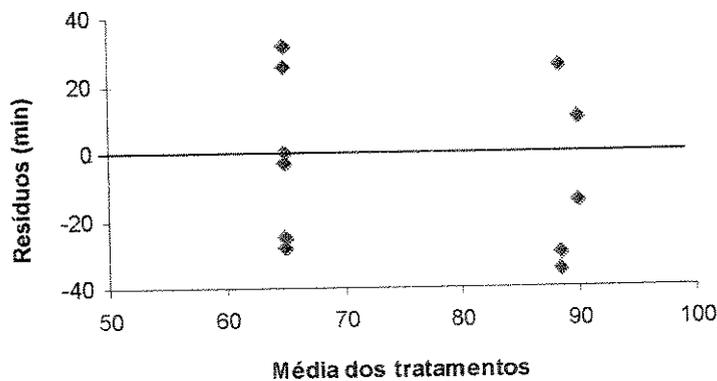


Figura 4.12: Faixa de dispersão dos resíduos contra a média dos tratamentos

Note-se também que o valor do erro obtido em cada tratamento estão uniformemente distribuídos ao longo da linha zero. Observando-se também a figura 4.12, reafirmam-se os resultados acima discutidos. A dispersão dos resíduos mantêm-se num intervalo aproximadamente igual para cada tratamento, o que indica que a suposição de igualdade de variância adotada é válida.

4.1.4.2- Probabilidade normal

Para construir o gráfico que avalia a suposição de normalidade, foram calculados os valores da

probabilidade esperada (Ei), assim como o valor do coeficiente de correlação, os valores calculados estão mostrados na tabela 4.20. Com estes valores foi construído o gráfico de probabilidade vs. resíduos.

Tabela 4.19: Parâmetros de cálculo do coeficiente de correlação (Rc) e da normalidade (Ei)

Ordem	Resíduos (ei), mín	Normalidade (Ei), mín	F. normal (P), mín	(ei - em) ² , mín	(Ei - Em) ² , mín	(ei * Ei), mín
1	-35,00	-14,39	-1,64	1406,31	207,31	503,94
2	-30,00	-9,74	-1,11	1056,30	94,97	292,35
3	-28,33	-6,93	-0,79	950,54	48,10	196,49
4	-25,00	-4,74	-0,54	756,29	22,47	118,52
5	-3,33	-2,72	-0,31	33,99	7,40	9,06
6	0,00	-0,96	-0,11	0,00	0,93	0,00
7	10,00	0,96	0,11	56,23	0,93	9,65
8	15,00	2,72	0,31	156,22	7,40	40,82
9	25,00	4,74	0,54	506,21	22,47	118,52
10	25,00	6,93	0,79	506,21	48,10	173,39
11	31,67	9,74	1,11	850,84	94,97	308,63
12	45,00	14,39	1,64	1806,17	207,31	647,92
Média	2,50	0,00	Σ	8085,36	762,41	2419,34
Rt (10%, n)					0,940	
Rc					0,974	
Condição de normalidade Rt < Rc					CUMPRE NORMALIDADE	

Na figura 4.13 mostra-se o comportamento dos resíduos (ei) vs. a normalidade esperada (Ei). Como pode ser apreciado, os valores dos resíduos acompanham uma tendência fortemente linear com respeito aos valores da normalidade.

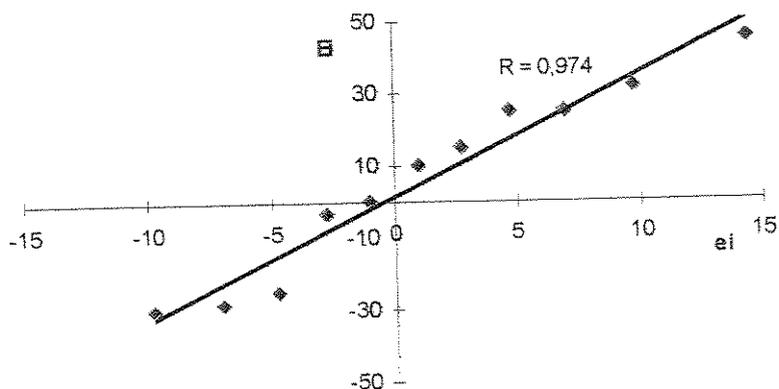


Figura 4.13: Probabilidade dos resíduos para o ponto 1

A distribuição obtida (Figura 4.13), indica que os componentes de erro do modelo utilizado seguiram uma distribuição normal. Esta condição é reafirmada ao se calcular o valor de R, o qual foi de 0,974; superior ao valor de R tabelado ($R_t=0,940$), para 90% de intervalo de confiança. Este resultado reafirma a condição de normalidade, ou seja, o alto valor de R obtido demonstrou que como existe uma forte correlação linear, a condição de normalidade é satisfeita.

O comportamento para o instante $TAT_{1/2}$ e $TAT_{7/8}$ para o ponto 2 e 3 foram similares aos resultados para o ponto 1. Os resultados da análise de resíduos realizada, permitiram comprovar que o planejamento estatístico adotado foi adequado para avaliar a variável de resposta (tempo de resfriamento). De igual forma, pode-se dizer que os dados experimentais obtidos podem ser considerados confiáveis.

4.1.5- Determinação da umidade relativa

Para a determinação da umidade relativa foi medida a temperatura do bulbo úmido (T_{bu}) em cada um dos tratamentos. Com a temperatura do bulbo seco (T_a), e com o auxílio do *software* PLUS (Albritg, 1990), foi determinado o valor da umidade relativa (%), para cada tratamento. O valor da umidade relativa média e o desvio padrão obtidos para cada tratamento são mostrados na tabela 4.20.

Tabela 4.20: Umidade relativa para cada tratamento (experimentos com laranja)

Tratamento	UR (%)
FAEI	86,9 ± 0,4
FBEI	89,8 ± 3,6
FCEI	87,0 ± 1,4
FAEII	88,8 ± 1,4
FBEII	90,1 ± 2,2
FCEII	88,0 ± 3,2
Média	88,4 ± 2,0

Como pode ser observado, a umidade relativa da câmara com produtos em média foi de 88,45 ± 2,0%; sendo que a diferença entre a umidade relativa da câmara sem produtos foi de 1,10%, um valor quase que desprezível (87,6 ± 3,8%). Esta diferença deve ter sido provocada pelas prováveis perdas de peso dos frutos.

Para comprovar se o valor da umidade relativa da câmara teve uma variação significativa entre os diferentes tratamentos para um nível de significância de 10 %, foi aplicado o teste F e a ANOVA. Os resultado do teste de hipóteses é mostrado na tabela 4.21.

Tabela 4.21: Resumo dos testes de hipóteses e da ANOVA (umidade relativa, %)

Teste de Hipóteses	
Fc	0,39
Ft (6, 5, 10%)	3,11
Hipóteses testadas	Ho: T1=T2=T3=T4=T5=T6 H1= T1 ≠ T2 ≠ T3 ≠ T4 ≠ T5 ≠ T6
Condição de rejeição da hipótese nula	Fc > Ft
Conclusão	ACEITA-SE Ho

Como não se cumpre a condição de rejeição de Ho, significa dizer que aceita-se a hipótese nula (Ho), ou seja, os tratamentos não apresentam efeitos diferentes sobre a umidade relativa. Independentemente do tipo de embalagem ou de fluxo aplicado, o valor da umidade relativa da câmara permanece igual para um nível de significância de 10%.

Na figura 4.14 mostra-se de forma o comportamento da umidade relativa em todos os tratamentos.

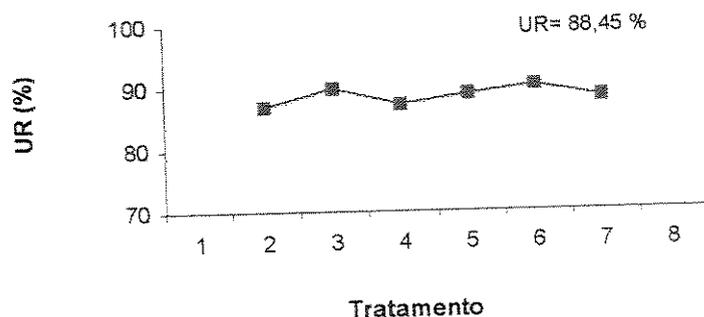


Figura 4.14: Comportamento da umidade relativa média em todos os tratamentos (laranja)

4.1.6- Determinação das dimensões e do peso das frutas

Seguindo a metodologia proposta no item 3.1.5.1, foram determinadas as dimensões dos frutos. O peso das frutas foi determinado antes e depois do resfriamento, para poder calcular as possíveis perdas de peso.

4.1.6.1- Dimensões dos frutos

As dimensões L_1 e L_2 das laranjas foram calculadas partindo da medição experimental de Pe_1 e Pe_2 . Na tabela 4.22, são mostrados os valores médios para cada tratamento assim como o desvio padrão.

Tabela 4.22: Dimensões dos frutos (laranja)

Tratamento	L_2 (cm)	L_1 (cm)	L_2/L_1
FAEI	$3,89 \pm 0,08$	$3,78 \pm 0,07$	1,03
FBEI	$3,91 \pm 0,07$	$3,81 \pm 0,06$	1,03
FCEI	$3,87 \pm 0,08$	$3,77 \pm 0,06$	1,03
FAEII	$3,95 \pm 0,08$	$3,81 \pm 0,05$	1,04
FBEII	$3,91 \pm 0,07$	$3,80 \pm 0,06$	1,03
FCEII	$3,92 \pm 0,07$	$3,80 \pm 0,06$	1,03
Média	$3,91 \pm 0,024$	$3,80 \pm 0,015$	1,03

Como pode-se observar na tabela acima a dimensão L_2 manteve uma tendência a um valor ligeiramente maior que o valor de L_1 , o que demonstra que as laranjas não apresentam uma forma perfeitamente esférica ($L_2/L_1 = 1,03$). O valor adotado para a validação do modelo matemático será

o valor médio entre todos os experimentos : $L_2 = 3,91$ cm e $L_1 = 3,80$ cm.

4.1.6.2- Perdas de peso dos frutos

Para o cálculo das perdas de peso (Equação 3.6), foi determinado o peso inicial (antes do resfriamento), e o peso das frutas logo após o resfriamento. Os valores obtidos são mostrados na tabela 4.23.

Tabela 4.23: Valores do peso e das perdas em cada tratamento

Tratamento	Mi (g)	Mf (g)	Mp (g)	Mp (%)
FAEI	214,04 ± 10,95	213,86	0,18 ± 0,14	0,084 ± 0,065
FBEI	212,37 ± 15,34	212,20	0,17 ± 0,16	0,080 ± 0,056
FCEI	214,80 ± 12,60	214,63	0,17 ± 0,12	0,079 ± 0,058
FAEII	218,46 ± 12,68	218,26	0,20 ± 0,10	0,093 ± 0,046
FBEII	218,22 ± 9,20	218,04	0,18 ± 0,08	0,080 ± 0,035
FCEII	220,76 ± 11,35	220,57	0,19 ± 0,11	0,088 ± 0,050
Média	216,44 ± 12,02	216,26	0,19 ± 0,12	0,084 ± 0,052

Para testar se as perdas de peso tiveram uma variação significativa ou não entre os diferentes tratamentos, foi aplicado o teste F e a ANOVA (Tabela 4.24).

Tabela 4.24: Resumo dos testes de hipóteses e da ANOVA (perdas de peso, g)

Teste de Hipóteses	
Fc	2,34
Ft (6, 5, 10%)	3,11
Hipóteses testadas	Ho: as médias são iguais H1: as médias são diferentes
Condição de rejeição da hipótese nula	Fc > Ft
Conclusão	ACEITA-SE Ho

Os resultados do teste F demonstram que, as médias são iguais para todos os tratamentos. Isto significa dizer que a variação do peso depois do resfriamento, para cada um dos tratamentos não teve uma variação significativa, para um nível de confiança de 90%.

Estes resultados permitem afirmar que, quando realizado o resfriamento com ar forçado, as

perdas de peso podem ser consideradas desprezíveis. Resultados semelhantes a este já haviam sido mostrados por Chau *et. al* (1985), os quais obtiveram valores de perdas de peso na ordem de 1%, durante o resfriamento de laranja num sistema com ar forçado. Na figura 4.15 mostra-se o comportamento médio das perdas de peso entre todos os tratamentos aplicados.

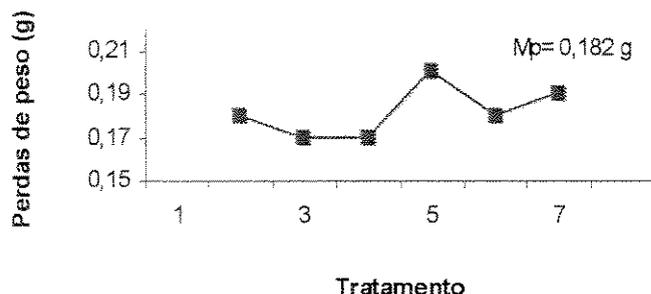


Figura 4.15: Comportamento das perdas de peso das laranjas em todos os tratamentos

Experiências desenvolvidas por Neves Fo. (1991), com resfriamento de maçã estocadas a 5°C e 95% de umidade relativa, utilizando uma vazão de ar entre 8; 15 e 24 m³/h, não apresentaram variação significativa na perdas de peso, sendo de 0,78%; 0,86% e 0,96% ao mês, respectivamente.

4.1.7- Velocidade do ar

A velocidade média no insuflamento do ar no evaporador foi de aproximadamente 13,22 ± 1,41 m/s. Para a medição da velocidade do ar na face que corresponde com a entrada do fluxo de ar nas embalagens, foi atribuída uma numeração aos diferentes pontos, onde foram feitas as medidas, seguindo a mesma ordem da numeração (Figura 4.16).

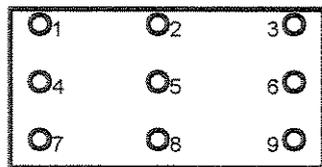


Figura 4.16: Representação dos pontos em que foi medida a velocidade do ar

Na medição da velocidade do ar encontrou-se certa dificuldade, pois independentemente do fato do anemômetro digital de fio quente, ser sempre colocado na mesma posição, notou-se uma

diferença no valor das leituras, durante a repetição de um mesmo experimento. Nas tabelas 4.26 mostra-se o valor médio da velocidade em cada ponto medido para cada regime de operação do ventilador.

Como os valores obtidos na medição da caixa B e E, foram muito semelhantes, apenas será mostrado o valor obtido nas medições da caixa B, quando usada a embalagem EI, para os três regimes de operação do ventilador.

Como pode ser observado na tabela 4.25, a velocidade média do ar no regime I foi de $1,02 \pm 0,15$ (entre todos os pontos). Já no regime II foi de $0,41 \pm 0,06$, e no regime III de $0,19 \pm 0,03$. A diferença entre os pontos 1-2-3 foi de 70% (entre I e II), de 45% (I e II) e de 84% (I e III). Entre os pontos 1-4-7, a diferença foi de 30 % (I e II), 60% (II e III), e de 72% (I e III).

Tabela 4.25 : Valores médios da velocidade do ar e do desvio padrão (m/s)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Regime I										
Média	1,06	1,30	1,24	0,91	0,92	0,95	1,01	0,81	1,02	1,02
DP	0,06	0,12	0,27	0,18	0,23	0,04	0,21	0,16	0,19	0,15
1-2-3	Média		1,20	4-5-6		0,93	7-8-9		0,95	
	DP		0,10			0,02			0,10	
1-4-7	Média		0,73	2-5-8		1,01	3-6-9		1,07	
	DP		0,37			0,21			0,12	
Regime II										
Média	0,33	0,35	0,38	0,59	0,24	0,26	0,60	0,41	0,58	0,41
DP	0,09	0,08	0,14	1,18	0,26	0,11	0,08	0,12	0,24	0,06
1-2-3	Média		0,35	4-5-6		0,37	7-8-9		0,53	
	DP		0,02			0,16			0,09	
1-4-7	Média		0,51	2-5-8		0,33	3-6-9		0,22	
	DP		0,12			0,07			0,15	
Regime III										
Média	0,19	0,15	0,23	0,21	0,26	0,19	0,21	0,12	0,18	0,19
DP	0,11	0,12	0,06	0,08	0,07	0,14	0,11	0,09	0,13	0,03
1-2-3	Média		0,19	4-5-6		0,22	7-8-9		0,17	
	DP		0,03			0,03			0,04	
1-4-7	Média		0,20	2-5-8		0,18	3-6-9		0,21	
	DP		0,01			0,06			0,02	

A diferença da velocidade média, entre cada regime de operação do ventilador foi de 59,8% (I e II), 53,6% (II e III), e de 88,3% (I e III).

A velocidade do ar para cada regime de operação sofre uma variação nos pontos medidos, o

que certamente reflete-se na diferença obtida no tempo de resfriamento para cada tratamento. Quando a velocidade do ar é maior, tem-se uma troca de calor mais efetiva entre o ar e o produto (obtendo-se maiores valores de hc), o que traduz-se em maiores taxas de transferência de calor, e menores tempos de resfriamento.

Comprovou-se então que efetivamente uma diminuição do fluxo de ar, acarreta uma diminuição da velocidade do ar, ou seja, existe uma relação diretamente proporcional entre ambos parâmetros ($Q = v.A$). Com a diminuição da taxa de ar de 25% a 40% (de 1.933 m³/h para 1.160 m³/h), a velocidade diminuiu em torno de 60% a 81%.

É interessante ressaltar que a faixa de variação do desvio padrão vai desde valores de 0,06 até 0,26 m/s, uma diferença de até 76%, aproximadamente, entre alguns valores, podendo-se concluir que no interior da câmara existe um índice alto de turbulência, além da incidência de fatores como o erro introduzido pela leitura do próprio instrumento, como já foi discutido.

4.1.8- Medição do consumo de energia

Na tabela 4.26 mostram-se os valores do consumo de energia para os componentes do sistema de refrigeração.

Tabela 4.26: Consumo de energia dos componentes do sistema de refrigeração (câmara de estocagem)

Componente	Consumo, kWh
Compressor	3,82
Ventilador do evaporador	0,12
Miscelâneas *	0,064
Total	4,00

*Lâmpada 0,1 kw (0,05 kwh), sistema de desgelos 0,05 kW (0,014 kWh), considerando a lâmpada acesa durante 2 horas por dia, e o sistema de desgelos funcionando 2 horas por dia.

O consumo de energia do ventilador do sistema de resfriamento com ar forçado foi calculado para as três posições de rotação da polia (I; II; III). Os resultados mostram-se na tabela 4.27.

Tabela 4.27: Consumo de energia do ventilador nas três posições de rotação da polia ($v = 220 \text{ V}$)

Posição da polia	Amperagem	kWh
I (d=150 mm)	$5,81 \pm 1,85$	1,27
II (d=200 mm)	$4,89 \pm 1,54$	1,03
III (d = 250 mm)	$4,59 \pm 1,22$	1,00

Observa-se que na medida que diminui a taxa de ar, diminui o consumo energético do sistema em aproximadamente 21% entre o regime I e III. Estes dados serão utilizados no capítulo 3.3 para o desenvolvimentos das considerações econômicas.

4.1.9- Testes na câmara de estocagem

Para determinar o tempo de resfriamento dos frutos quando resfriados num sistema convencional (câmara de estocagem), foram desenvolvidos testes com os dois tipos de embalagens usados nos testes no sistema com ar forçado. Na figura 4.17 são mostrados os resultados dos testes na câmara usando a embalagem EI.

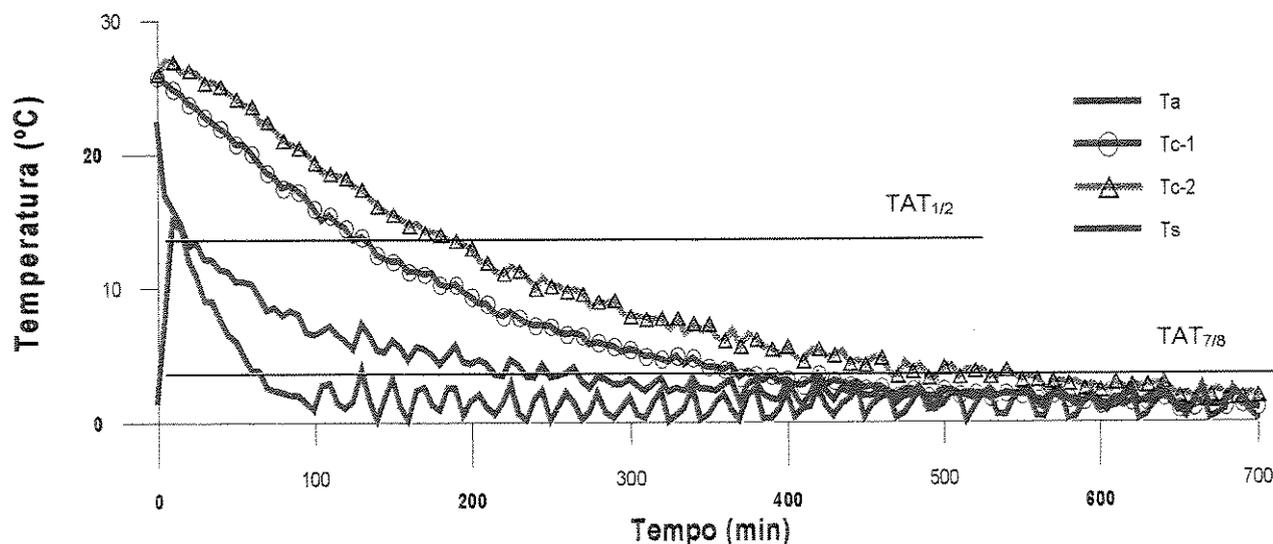


Figura 4.17: Curvas de resfriamento das laranjas acondicionados na embalagem EI na câmara de estocagem

A temperatura média inicial foi de $26,6 \pm 0,5^\circ\text{C}$, sendo que os frutos atingiram o tempo de meio resfriamento quando no Tc foi de aproximadamente 13°C , já o tempo dos sete oitavos do resfriamento (TAT_{7/8}), foram atingidos quando Tc foi de 3°C . A temperatura

exterior durante o desenvolvimento dos experimentos foi em média de $26,3 \pm 1,4^{\circ}\text{C}$.

Na figura 4.18 mostram-se as curvas de resfriamento obtidas quando os frutos foram condicionados nas embalagens EII. A temperatura média inicial foi de $27,1 \pm 0,8^{\circ}\text{C}$, e os frutos atingiram o tempo de meio resfriamento quando T_c foi de $13,5^{\circ}\text{C}$. Quando T_c foi de aproximadamente 3°C , foi atingida a condição $TAT_{7/8}$. A temperatura exterior durante o desenvolvimento dos experimentos esteve na faixa média de $27,8 \pm 0,7^{\circ}\text{C}$.

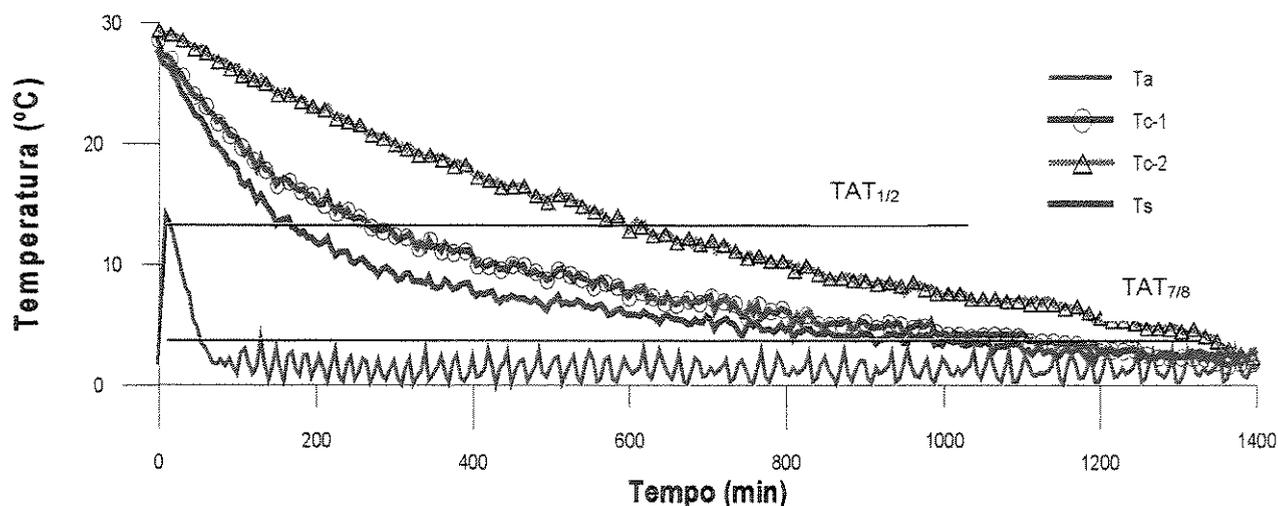


Figura 4.18: Curvas de resfriamento das laranjas acondicionadas na embalagem EII na câmara de estocagem

As curvas apresentadas nas figuras 4.17 e 4.18, demonstram a existência de um diferencial de temperatura entre os dois pontos escolhidos aleatoriamente no interior do leito. Esta diferença comporta-se entre 4°C a 7°C , quando as frutas foram acondicionadas na embalagem EI, e de 6°C a 8°C , quando foram acondicionadas nas embalagens EII. Este ΔT representa uma diferença de aproximadamente 66%, nos mesmos pontos, quando o resfriamento é realizado nas embalagens EII (caixas de papelão). Esta situação está claramente refletida no tempo de resfriamento (Tabela 4.28), o qual foi diferente para cada ponto e tratamento. Na tabela 4.29 é apresentada a diferença do tempo de resfriamento entre cada tratamento.

Tabela 4.28: Valores do tempo de resfriamento (min) para os testes na câmara de estocagem (laranja)

Tratamento	Ponto 1	Ponto 2
	TAT_{1/2}	
FEI	127,50 ± 7,50	185,00 ± 15,00
FEII	240,00 ± 5,00	530,00 ± 20,00
TAT_{7/8}		
FEI	362,50 ± 12,50	460,00 ± 20,00
FEII	1.125,00 ± 10,00	1.330,00 ± 20,00

Tabela 4.29: Valores (%) da diferença entre o tempo de resfriamento para cada ponto

Tratamentos	Diferença entre os pontos 1 e 2	Diferença entre tratamentos FEI-FEII	
	TAT _{1/2}	Ponto 1	Ponto 2
FEI	31,1	46,8	65,0
FEII	54,7		
	TAT _{7/8}	Ponto 1	Ponto 2
FEI	21,2	67,8	65,4
FEII	18,2		

Na tabela acima pode-se observar que quando usada a embalagem EII o tempo de resfriamento (TAT_{7/8}), é quase 70% maior que quando usada a embalagem EI. Na figura 4.19 mostram-se, de forma comparativa, as curvas de resfriamento com ambas embalagens, notando-se claramente a diferença.

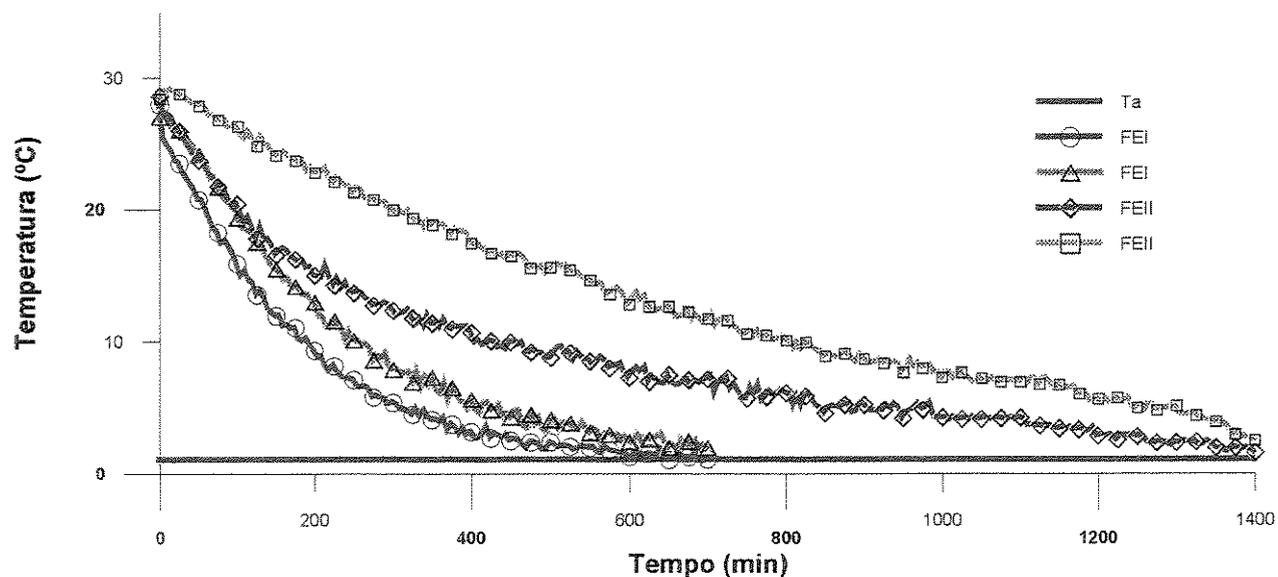


Figura 4.19: Curvas de resfriamento das laranjas acondicionadas na embalagem EI e EII na câmara de estocagem

A diferença no tempo de resfriamento quando usada a embalagem EII demonstra que mesmo usando sistemas de resfriamento convencionais, devem ser usadas embalagens com área de aberturas suficientes que permitam uma eficiente troca de calor entre o produto e o ar resfriado, o que se traduz em menor tempo de resfriamento e diretamente num menor consumo energético.

Na figura 4.20 mostram-se todas as curvas de resfriamento, para o resfriamento dos frutos no sistema de ar forçado, e quando foi realizado na câmara de estocagem. A título de exemplo, é importante destacar que o maior tempo de resfriamento obtido quando usado ar forçado (tratamento FAEI) foi de 67,50 min ($TAT_{1/2}$), já no teste com a embalagem EI na câmara de estocagem, o tempo de meio resfriamento foi de 127 a 185 min, um tempo de 46 a 63% maior. No instante em que atinge-se $TAT_{7/8}$, o tempo foi de 170 min, com ar forçado e na câmara de convencional entre 362 a 460 min, um tempo de 53 a 63% maior. Da mesma forma entre o tratamento FAEII e na câmara de estocagem com a embalagem EII, a diferença no tempo de resfriamento foi de 53 a 78%, e de 73 a 77% maior.

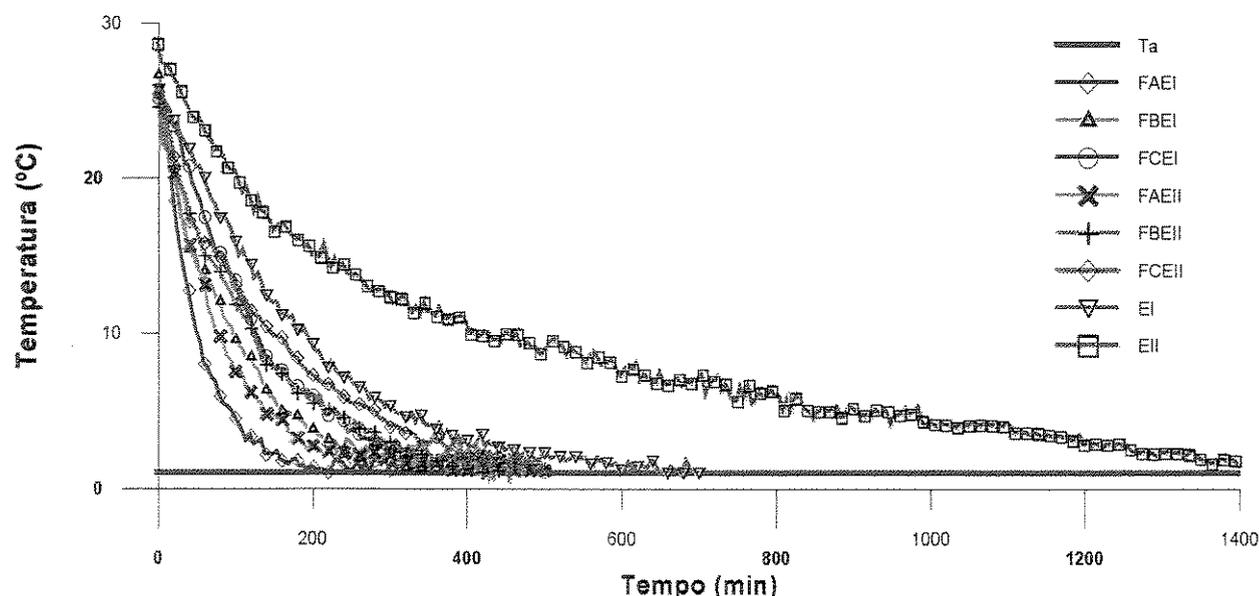


Figura 4.20: Curvas de resfriamento das laranjas nos tratamentos com ar forçado (FA, FB, FC) e na câmara de estocagem (EI, EII)

Estes resultados demonstram que efetivamente, o uso de sistemas de resfriamento com ar forçado permite a obtenção de menores tempos de resfriamento, o que sem dúvida reverte-se num maior tempo de vida útil dos produtos.

Resultados semelhantes foram obtidos por Fraser & Otten (1992), os quais determinaram o tempo de resfriamento de pêra, submetida a resfriamento numa câmara convencional e num sistema com ar forçado ($v = 1,5$ a 5 m/s; $h_c = 25$ W/m²°C; $T = 3$ °C). Segundo os autores o tempo dos sete oitavos do resfriamento de resfriamento (TAT_{7/8}) foram atingidos em 65 min no sistema com ar forçado e em aproximadamente 285 min no sistema convencional. Um tempo 4 vezes maior no sistema convencional.

Em geral o sistema de circulação forçada do ar frio resfria em 1/4 a 1/10 em relação ao tempo exigido em câmaras convencionais, mas ainda é duas a três vezes mais lento que o resfriamento a água ou a vácuo (Mitchell *et al.*, 1973).

4.1.10- Resultados dos testes de resfriamento com banana

Neste item serão mostradas as curvas de resfriamento de banana (variedade Prata), quando resfriadas no sistema de ar forçado. Devido a problemas surgidos durante a realização dos experimentos, e tomando como base os resultados obtidos dos experimentos com laranja, onde foi comprovado que o tempo de resfriamento segue uma tendência de aumento em todos os tratamentos, a medida que diminui a taxa de ar, nos experimentos com banana foi aplicado um delineamento experimental inteiramente ao acaso (DIC), num esquema fatorial 2x2, perfazendo duas repetições. Os tratamentos aplicados foram:

- FAEI: fluxo de ar A e embalagem EI
- FCEI: fluxo de ar C e embalagem EI
- FAEII: fluxo de ar A e embalagem EII
- FCEII: fluxo de ar C e embalagem EII

4.1.10.1- Experimentos FAEI e FCEII

A temperatura média inicial dos frutos nos experimentos FAEI e FCEI foi de $27,6 \pm 0,3$ °C e $24,9 \pm 0,4$ °C, respectivamente. A temperatura média exterior foi de $27,9 \pm 0,9$ °C e $26,9 \pm 0,5$ °C em ambos experimentos.

Na tabela a seguir mostram-se os valores de temperatura para os quais foi atingido o tempo de resfriamento.

Tabela 4.30: Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) em que foi atingida a condição $TAT_{1/2}$ e $TAT_{7/8}$

$TAT_{1/2}$	
FAEI	FCEI
17,5	15,6
$TAT_{7/8}$	
9,6	8,3

A temperatura na superfície mostrou a mesma tendência apresentada nos experimentos com laranja, acompanhando a temperatura do ar. Nos experimentos com banana a temperatura no termostato foi fixada em 7°C . No instante em que $TAT_{1/2}$, o ΔT entre o centro e a superfície variou entre $7,5^{\circ}\text{C}$ a $9,5^{\circ}\text{C}$, uma diferença com respeito ao centro de 43 a 48% menor. Já quando $TAT_{7/8}$, o valor de ΔT diminuiu consideravelmente, devido ao fruto encontrar-se praticamente resfriado, obtendo-se valores de $1,1$ a $3,4^{\circ}\text{C}$, em dependência da posição dos frutos. Estes valores representam um valor de 13% a 31%.

É válido ressaltar que esta temperatura do ar ($T_c = 7^{\circ}\text{C}$), só pode ser aplicada a estes frutos quando serão resfriados por períodos curtos de tempo, como é o caso do resfriamento rápido com ar forçado, pois a temperatura de conservação da banana deve estar em torno de 13°C a 14°C , por ser um fruto muito sensível as injúrias pelo frio.

Observou-se uma diferença de temperatura entre os pontos onde esta foi monitorada. Quando no ponto 1 é atingido o tempo de meio resfriamento, no ponto 2 a temperatura ainda é de $19,4^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T = 1,9^{\circ}\text{C}$, com respeito ao ponto 1). Quando o ponto 1 atinge o tempo dos sete oitavos do resfriamento com respeito ao ponto 2 este ΔT é de $2,2^{\circ}\text{C}$. A diferença de temperatura, que chega a representar de 9 a 20% e reflete no tempo de resfriamento, como mostrado na tabela 4.30.

O tempo de meio resfriamento é aproximadamente 33% menor no ponto 1 que no ponto 2. Já quando $TAT_{7/8}$, o tempo de resfriamento é 30% menor.

A temperatura na superfície (FCEI) mantêm um diferencial com respeito à temperatura no centro, como já foi discutido no experimento anterior. Neste experimento o valor da ΔT comportou-

se entre 2,9°C e 5,2°C (para $TAT_{1/2}$), e entre 1,2°C e 2,3°C, para $TAT_{7/8}$. O valor da ΔT entre o ponto 1 e 2 esteve entre 2,2 e 1,1°C, para $TAT_{1/2}$ e $TAT_{7/8}$, o que refletiu-se no tempo de resfriamento (Tabela 4.32). O ponto 1 atinge o tempo de meio resfriamento num tempo aproximadamente 29% menor que o ponto 2. O tempo dos sete oitavos do resfriamento foi atingido num tempo 23% menor (FCEI).

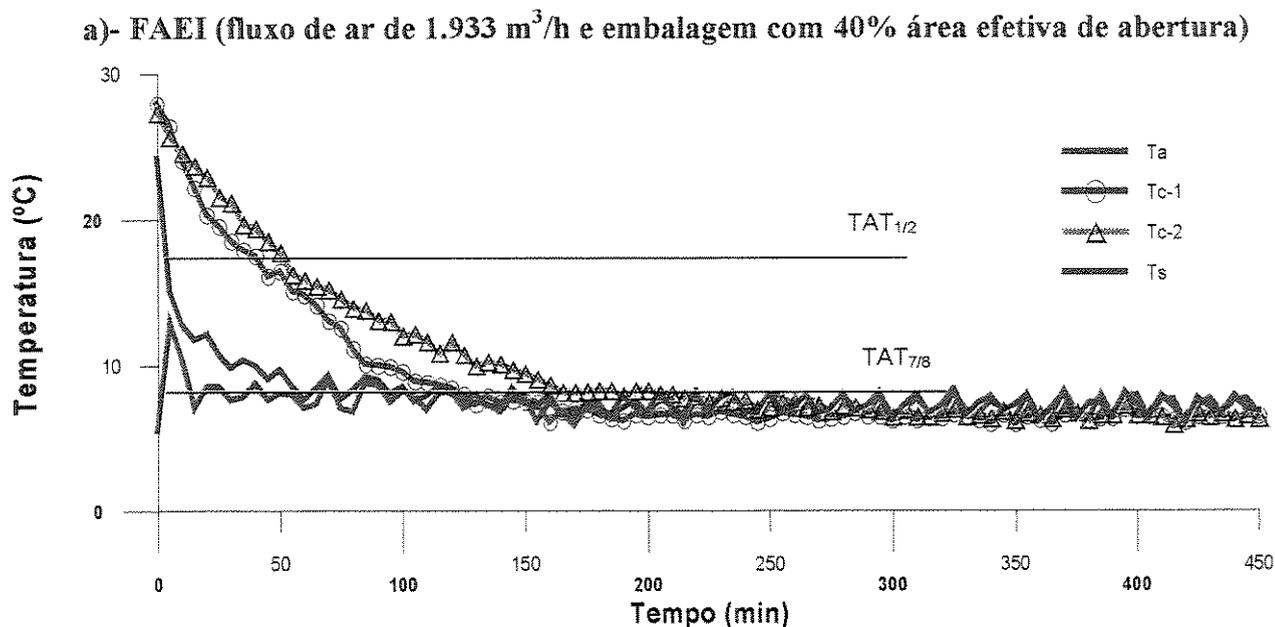


Figura 4.21: Curvas de resfriamento de bananas submetidas ao tratamento FAEI

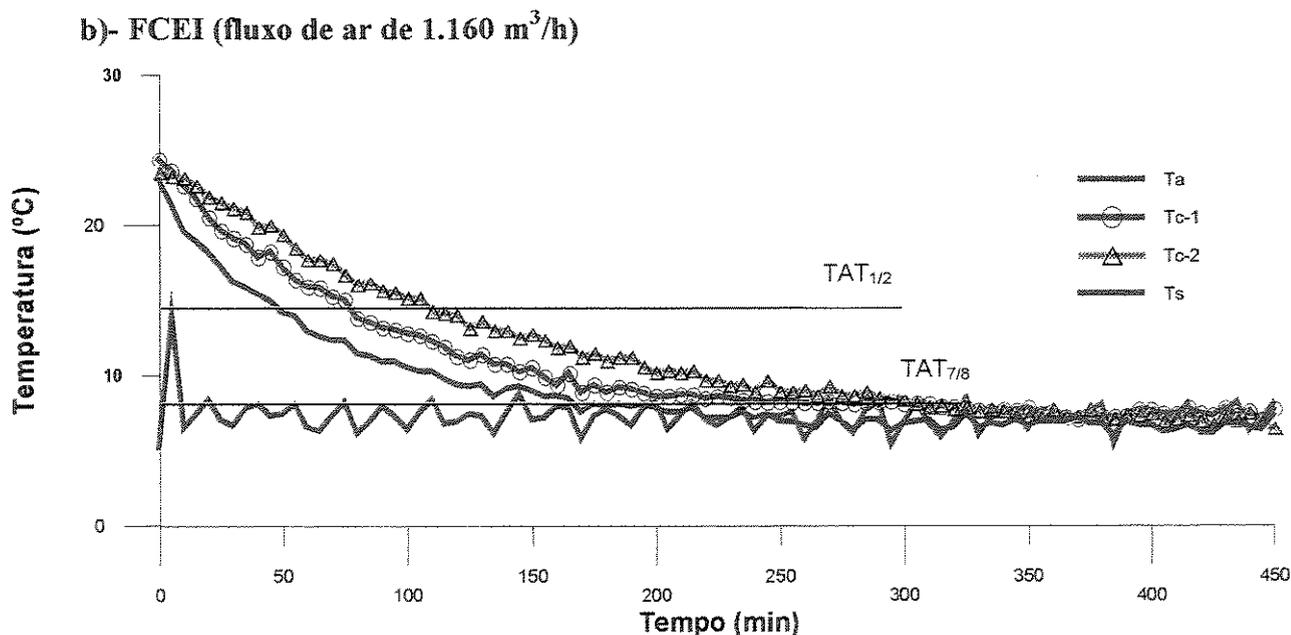


Figura 4.22: Curvas de resfriamento de bananas submetidas ao tratamento FCEI

Na tabela 4.31 mostra-se um resumo do tempo de resfriamento para os dois tratamentos discutidos, na tabela 4.32 mostra-se a diferença expressada em %. Nota-se que efetivamente, quando a taxa de ar diminui o tempo de resfriamento aumenta.

Tabela 4.31: Tempo de resfriamento (min), para os tratamentos FAEI e FCEI

Tratamento	Ponto 1	Ponto 2
	TAT _{1/2}	
FAEI	45,00 ± 5,00	67,50 ± 7,50
FCEI	77,50 ± 7,50	110,00 ± 5,00
TAT _{7/8}		
FAEI	117,50 ± 2,50	167,50 ± 7,50
FCEI	240,00 ± 5,00	312,50 ± 7,50

Tabela 4.32: Valores (%) da diferença entre o tempo de resfriamento para cada ponto

Tratamento	Diferença entre os pontos 1 e 2	Diferença entre tratamentos FAEI-FCEI	
	TAT _{1/2}	Ponto 1	Ponto 2
FAEI	33,3	41,9	38,6
FCEI	29,5		
TAT _{7/8}			
FAEI	29,8	51,0	46,4
FCEI	23,2		

O aumento do tempo de resfriamento demonstra que a taxa de ar exerce uma considerável influência no tempo de resfriamento, como já havia sido discutido nos experimentos com laranja. Nota-se que mesmo tendo eliminado o tratamento FBEII, os resultados finais se manifestaram com a mesma tendência, permitindo chegar a conclusões adequadas.

4.1.10.2- Experimentos FAEII e FCEII

Na realização dos experimentos FAEII e FCEII os frutos apresentaram uma temperatura média inicial de 28,8 ± 0,3°C e 26,4 ± 0,3°C, respectivamente. A temperatura exterior em média foi de 27,1 ± 0,8°C e 27,5 ± 0,8°C, respectivamente. Na tabela a seguir mostra-se o valor da temperatura em que forma atingido o tempo de meio resfriamento (TAT_{1/2}) e os sete oitavos do resfriamento (TAT_{7/8}), em cada experimento.

Tabela 4.33: Temperatura (°C) em que foi atingida a condição $TAT_{1/2}$ e $TAT_{7/8}$

$TAT_{1/2}$	
FAEII	FCEII
17,9	16,0
$TAT_{7/8}$	
8,6	8,1

A diferença entre a T_c e a temperatura na superfície esteve entre 4,86°C a 8,84°C e 1,25°C a 2,59°C, entre os pontos 1 e 2, para os instantes $TAT_{1/2}$ e $TAT_{7/8}$ (Figura 4.23).

Entre os dois pontos, onde foi monitorada a temperatura, apresentou-se um ΔT dentre 3,9°C e 1,3°C; para $TAT_{1/2}$ e $TAT_{7/8}$, o que refletiu-se no tempo de resfriamento, o qual foi de 37% a 5% maior para o ponto 2, para os dois instantes de tempo avaliados (FAEII).

No experimento FCEII o valor de ΔT entre a superfície e o centro manteve a mesma tendência dos experimentos anteriores, sendo de 5,62°C e 4,21°C ($TAT_{1/2}$) e de 1,9°C a 0,22°C, para $TAT_{7/8}$ (Figura 4.24).

a)- FAEII (fluxo de ar de 1.933 m³/h e embalagem com 3,2% área efetiva de abertura)

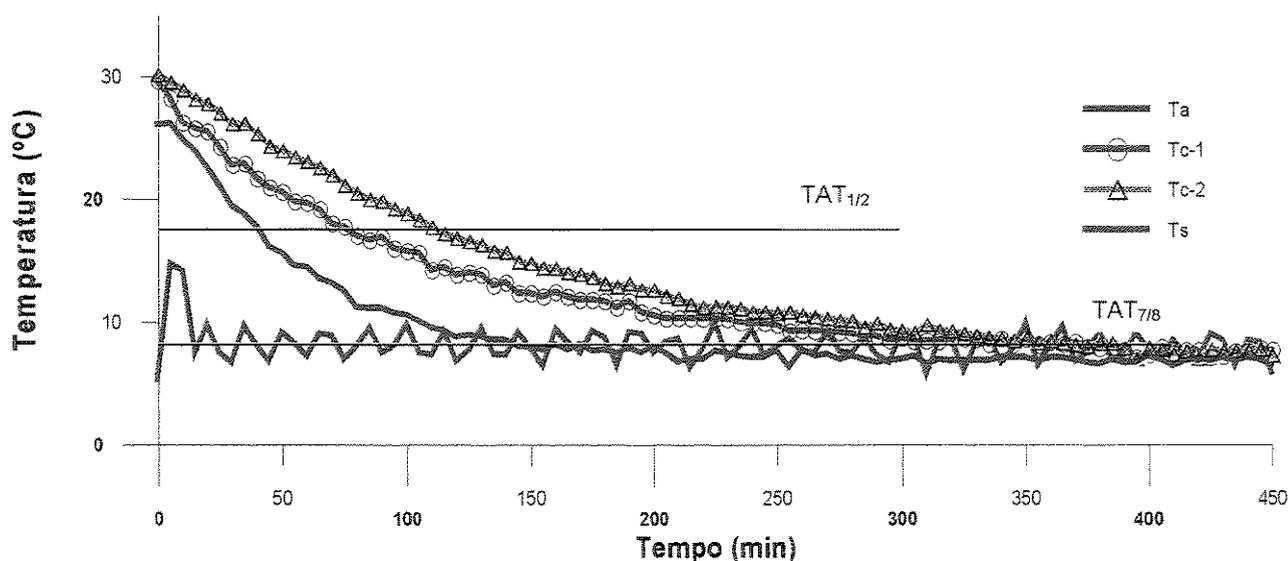


Figura 4.23: Curvas de resfriamento de bananas submetidas ao tratamento FAEII

b)- FCEII (fluxo de ar de 1.160 m³/h)

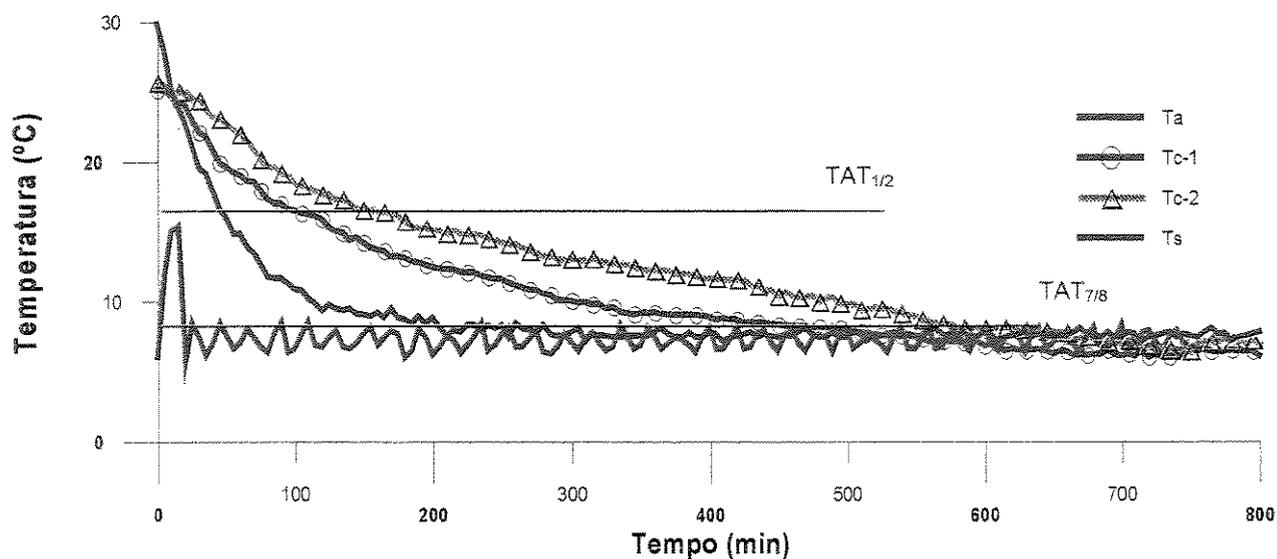


Figura 4.24: Curvas de resfriamento de bananas submetidas ao tratamento FCEII

Como pode ser observado na figura 4.24, os pontos 1 e 2 apresentam um comportamento diferente, em relação ao tempo de resfriamento. Esta diferença manifesta-se no ΔT que existe entre estes pontos, o qual é de 2,41°C e 2,09°C, atingindo-se a condição de resfriamento em instantes de tempo diferentes, como mostrado na tabela 4.35. Observa-se que o tempo de resfriamento no ponto 1 é 26% menor que no ponto 2 ($TAT_{1/2}$) e 16% menor para $TAT_{7/8}$ (FCEII).

Na tabela 4.34 apresenta-se um resumo do tempo de resfriamento dos tratamentos FAEII e FCEII. Na tabela 4.35 apresentam-se as diferenças expressas em porcentagem.

Tabela 4.34: Tempo de resfriamento (min), para os tratamentos FAEII e FCEII

Tratamento	Ponto 1	Ponto 2
	$TAT_{1/2}$	
FAEII	75,00 ± 5,00	120,00 ± 10,00
FCEII	142,50 ± 7,50	192,50 ± 12,50
$TAT_{7/8}$		
FAEII	302,50 ± 7,50	320,00 ± 10,00
FCEII	462,50 ± 12,50	555,00 ± 15,00

Tabela 4.35: Valores (%) da diferença entre o tempo de resfriamento para cada ponto

Tratamento	Diferença entre os pontos 1 e 2	Diferença entre tratamentos FAEI-FCEI	
	TAT _{1/2}	Ponto 1	Ponto 2
FAEII	37,5	47,3	37,6
FCEII	25,9		
	TAT _{7/8}		
FAEII	5,4	34,5	42,3
FCEII	16,6		

Ou seja, experimentalmente comprovou-se que quando é modificada a taxa de ar, o tempo de resfriamento varia, aumentando na medida que diminui o fluxo de ar. Ao igual que quando usada a embalagem II o tempo de resfriamento sofre uma variação, aumentando à medida que diminui a taxa de ar.

4.1.10.3- Comparação entre todos os experimentos de resfriamento de banana

Na figura 4.25 apresentam-se as curvas de resfriamento obtidas em todos os tratamentos de resfriamento de banana, referido ao ponto 1.

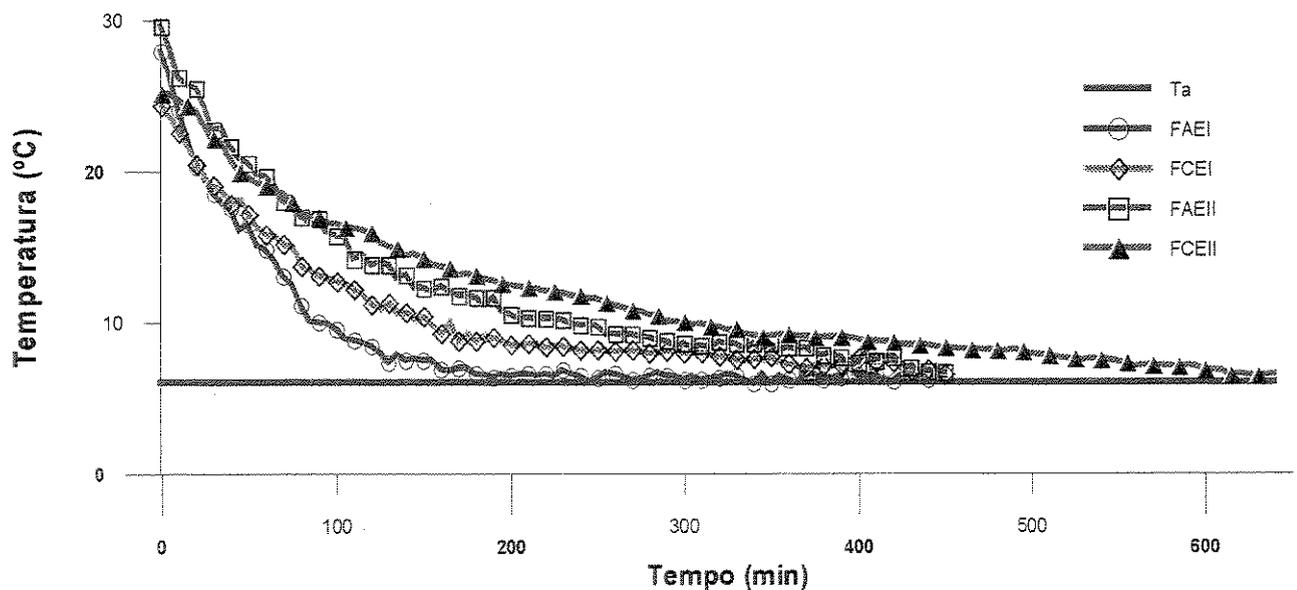


Figura 4.25: Curvas de resfriamento obtidas em todos os testes de resfriamento de banana (ponto 1)

Na tabela 4.36 apresentam-se o valor do tempo de resfriamento para cada tratamento aplicado no resfriamento das bananas e na tabela 4.37 a diferença expressada em porcentagem.

Tabela 4.36: Tempo de resfriamento em todos os tratamentos (banana)

Tratamento	Ponto 1	Ponto 2
	TAT _{1/2}	
FAEI	45,00 ± 5,00	67,50 ± 7,50
FCEI	77,50 ± 7,50	110,00 ± 5,00
FAEII	75,00 ± 5,00	120,00 ± 10,00
FCEII	142,50 ± 7,50	192,50 ± 12,50
TAT _{7/8}		
FAEI	117,50 ± 2,50	167,50 ± 7,50
FCEI	240,00 ± 5,00	312,50 ± 7,50
FAEII	302,50 ± 7,50	320,00 ± 10,00
FCEII	462,50 ± 12,50	555,00 ± 15,00

Tabela 4.37: Diferença (%) do tempo de resfriamento entre os diferentes tratamentos

Tratamento	Ponto 1	Ponto 2
	TAT _{1/2}	
FAEI-FAEII	40,0	43,7
FCEI-FCEII	45,6	42,8
TAT _{7/8}		
FAEI-FAEII	61,1	47,6
FCEI-FCEII	48,1	43,6

Note-se que quando a embalagem apresenta menor área para o passo do ar, o tempo de resfriamento chega ser 45% maior, que quando usada a embalagem EI.

Estes resultados reafirmam que o tempo de resfriamento dos frutos (bananas) está influenciado fortemente pela taxa de ar e o tipo de embalagem onde são acondicionados os produtos ao igual que nos experimentos com laranja.

4.1.11- Análise estatística

A aplicação do teste F, para avaliar se a influência das taxas de ar e das embalagens sobre a variável de resposta foi desenvolvida para o ponto 1 e 2, no instante em que atinge-se o tempo de meio resfriamento e o tempo dos sete oitavos do resfriamento, para um nível de significância estatística de 90%.

4.1.11.1- Ponto 1 (TAT_{1/2})

Na tabela 4.38 apresentam-se os resultados obtidos na aplicação do teste F e da ANOVA, para o ponto 1 quando este encontrava-se no tempo de meio resfriamento.

Tabela 4.38: Resultados da aplicação dos testes de hipóteses e da ANOVA para a interação (ponto 1, TAT_{1/2})

Teste de Hipóteses	
Fc	15,94*
Ft (4, 3, 10%)	4,19
Hipóteses testadas	Ho: T1=T2=T3=T4 H1= T1 ≠ T2 ≠ T3 ≠ T4
Condição de rejeição da hipótese nula	Fc > Ft
Conclusão	REJEITA Ho
Desdobramento da interação	
Fc	55,71*
Fc (E)	61,90*
Fc (FxE)	8,99*
Ft (F)	
Ft (E)	4,54
Ft (FxE) (4, 1, 10%)	
Hipóteses testadas	Ho: Não dependência entre FxE na VR H1= dependência entre FxE na VR
Conclusão	REJEITA Ho
Efeito da embalagem	
Fc (E/FA)	20,83*
Fc (E/FC)	43,05*
Ft (4, 1, 10%)	4,54
Hipóteses testadas	Ho: FA = FC H1= FA ≠ FC
Conclusão	REJEITA Ho
Efeito do fluxo	
Fc (F/EI)	18,31*
Fc (F/EII)	39,39*
Ft (4, 1, 10%)	4,54
Hipóteses testadas	Ho: EI = EII H1= EI ≠ EII
Conclusão	REJEITA Ho

4.1.11.2- Ponto 1 (TAT_{7/8})

Tabela 4.39: Resumo dos testes de hipóteses e da ANOVA (ponto 1, TAT_{7/8})

Teste de Hipóteses	
Fc	236,72*
Ft (4, 3, 10%)	4,19
Hipóteses testadas	Ho: T1=T2=T3=T4 H1= T1 ≠ T2 ≠ T3 ≠ T4
Condição de rejeição da hipótese nula	Fc > Ft
Conclusão	REJEITA Ho
Desdobrando os tratamentos	
Fc (F)	249,45*
Fc (E)	459,45*
Fc (FxE)	8,27*
Ft (F)	4,54
Ft (E)	4,54
Ft (FxE) (4, 1, 10%)	4,54
Hipóteses testadas	Ho: Não dependência entre FxE na VR H1= dependência entre FxE na VR
Conclusão	REJEITA Ho
Efeito da embalagem	
Fc (E/FA)	206,18*
Fc (E/FC)	254,54*
Ft (4, 1, 10%)	4,54
Hipóteses testadas	Ho: FA=FC H1= FA ≠ FC
Conclusão	REJEITA Ho
Efeito do fluxo	
Fc (F/EI)	107,54*
Fc (F/EII)	143,18*
Ft (4, 1, 10%)	4,54
Hipóteses testadas	Ho: EI = EII H1= EI ≠ EII
Conclusão	REJEITA Ho

Como pode ser observado na tabela 4.37 e 4.38, em todos os casos foi rejeitada a hipótese nula (Ho), o que significa dizer que:

- os dois fluxos têm efeitos significativo no tempo de resfriamento dos frutos, quando utilizada a embalagem plástica (EI);
- os dois fluxos de ar têm efeito significativo sobre o tempo de resfriamento, quando utilizada a embalagem de papelão (EII), para um intervalo de confiança de 90%.

4.1.12- Verificação da adequação do modelo de análise de variância

Neste item será verificado se o planejamento experimental adotado e os dados obtidos podem ser considerados adequados, através da análise dos resíduos e da probabilidade normal.

4.1.12.1- Análise dos resíduos

Com foi dito no item 4.1.10, nos experimentos com banana foi aplicado um esquema fatorial 2x2, com duas repetições, ou que significou em 4 tratamentos. A ordem de coleta dos experimentos, depois da aleatorização, mostra-se na tabela a seguir:

Tabela 4.40: Ordem de realização dos experimentos com banana

Níveis	Tratamentos	
	FA	FC
EI	FAEI ₁ (4)	FCEI ₁ (7)
	FAEI ₂ (8)	FCEI ₂ (6)
EII	FAEII ₁ (3)	FCEII ₁ (2)
	FAEII ₂ (1)	FCEII ₂ (5)

Calculados os resíduos, foi construído a gráfico mostrado na figura 4.26. A distribuição dos resíduos mantêm-se numa faixa proporcional ao redor do eixo 0, e não obedece a nenhuma configuração em específico que denote a dependência dos resíduos e a ordem de coleta dos experimentos. Pode-se dizer então que a ordem de coleta dos experimentos foi adequada, não existindo influência de fatores externos nas medições experimentais de temperatura.

Na figura 4.27 mostra-se a dispersão dos resíduos para cada média dos tratamentos, observe-se que a faixa de dispersão dos resíduos é aproximadamente igual em todos os tratamentos.

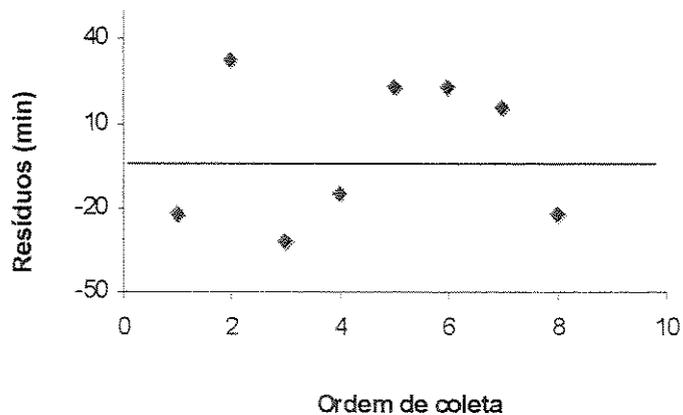


Figura 4.26: Comportamento dos resíduos com respeito à ordem e coleta dos dados, ponto 1 (experimentos com banana)

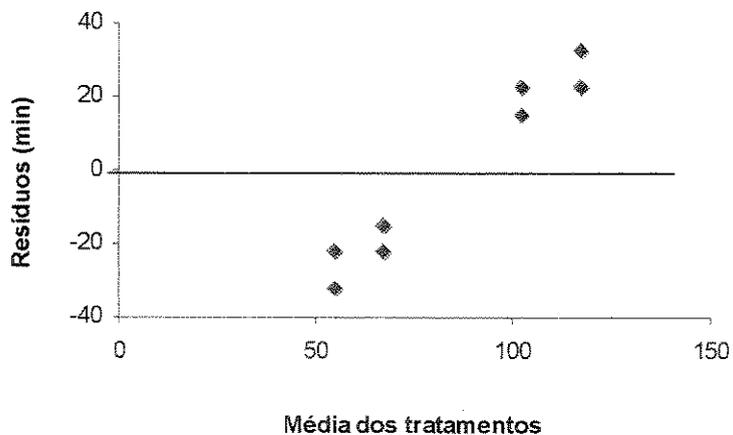


Figura 4.27: Faixa de dispersão dos resíduos contra a média dos tratamentos

Como pode ser observado na figura acima, a faixa de dispersão permite afirmar que existe igualdade de variância da variável de resposta nos experimentos realizados.

4.1.12.2- Probabilidade normal

A seguir mostra-se a tabela de cálculos para a determinação do coeficiente de correlação, para a avaliar a suposição adotada de probabilidade normal.

Tabela 4.41: Parâmetros de cálculo do coeficiente de correlação (R_c) e da normalidade (E_i)

Ordem	Resíduos (e_i), mín	Normalidade (E_i), mín	F. normal (P), mín	$(e_i - e_m)^2$, mín	$(E_i - E_m)^2$, mín	$(e_i * E_i)$, mín
1	-32,50	-9,09	-1,44	1056,25	82,53	295,50
2	-22,50	-5,43	-0,86	506,25	29,40	122,18
3	-22,50	-3,03	-0,48	506,25	9,13	68,19
4	-15,00	-1,01	-0,16	225,00	1,00	15,15
5	15,00	1,01	0,16	225,00	1,03	15,15
6	22,50	2,96	0,47	506,25	8,85	66,77
7	22,50	5,43	0,86	506,25	29,54	122,18
8	32,50	9,09	1,44	1056,20	82,81	295,50
Média	0,00	-0,007	Σ	4587,50	244,35	1000,65
R_t (10%, n)					0,918	
R_c					0,945	
Condição de normalidade $R_t < R_c$					CUMPRE NORMALIDADE	

Como pode ser observado na tabela 4.41, cumpre-se a condição de normalidade, ou seja o valor de R_c (0,945) é maior que o valor de R_t (0,918), para um intervalo de confiança de 90%. Na figura 4.28 observa-se o comportamento dos resíduos (e_i) vs. a normalidade esperada (E_i), notando-se que a tendência da distribuição ao longo de uma linha reta, com uma forte correlação linear.

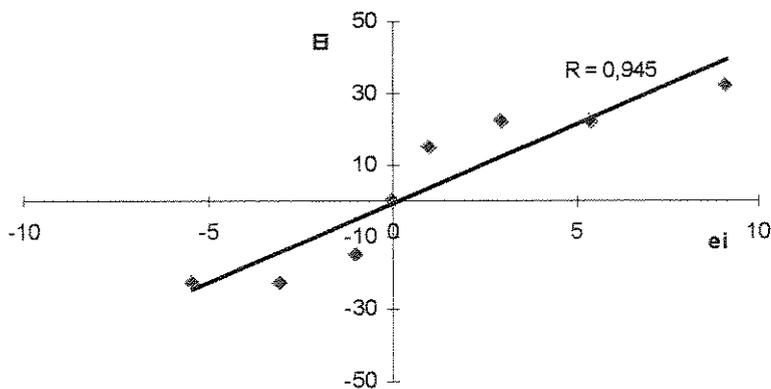


Figura 4.28: Probabilidade dos resíduos para o ponto 1

O comportamento para o instante $TAT_{1/2}$ e $TAT_{7/8}$ para o ponto 2 foram similares aos resultados para o ponto 1. Os resultados da análise estatística mostrada até aqui, permitem afirmar que, durante os experimentos de resfriamento de banana, os dados foram coletados de forma adequada, existindo confiabilidade no planejamento experimental adotado para obter o tempo de resfriamento.

4.1.13- Determinação da umidade relativa

Com os valores de temperatura T_a e T_{bu} para cada tratamento foi determinada a umidade relativa (*software* PLUS, Albright, 1990). Os valores médios assim como o desvio padrão para cada tratamento é apresentado na tabela 4.41.

Como pode ser observado na tabela 4.42, o valor médio da umidade relativa entre todos os tratamentos foi de $88,9 \pm 2,4\%$, apresentando uma diferença com respeito à umidade relativa da câmara sem produtos de $1,6\%$ ($87,6 \pm 3,8\%$).

Tabela 4.42: Umidade relativa para cada tratamento (experimento com banana)

Tratamento	Umidade Relativa (%)
FAEI	$89,9 \pm 2,3$
FCEI	$89,3 \pm 3,0$
FAEII	$86,1 \pm 2,3$
FCEII	$90,4 \pm 2,0$
Média	$88,95 \pm 2,4$

Para comprovar se a variação da umidade relativa entre os tratamentos foi significativa ou não para um nível de significância de 10%, foi aplicado o teste F e a ANOVA. Os resultados são mostrados na tabela 4.43.

Tabela 4.43: Resumo dos testes de hipóteses e da ANOVA (umidade relativa, %)

Teste de Hipóteses	
Fc	1,11
Ft (4, 3, 10%)	5,34
Hipóteses testadas	Ho: $T_1=T_2=T_3=T_4$ H1= $T_1 \neq T_2 \neq T_3 \neq T_4$
Condição de rejeição da hipótese nula	Fc > Ft
Conclusão	ACEITA-SE Ho

Como não se cumpre a condição de rejeição, significa dizer que aceitou-se a hipótese nula (Ho), ou seja, a variação da umidade relativa não é significativa entre os tratamentos, para um intervalo de confiança de 90%. Na figura 4.29 mostra-se o comportamento da umidade relativa média entre todos os tratamentos.

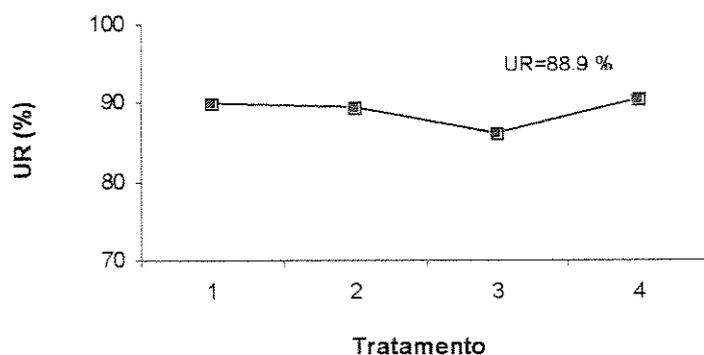


Figura 4.29: Comportamento da umidade relativa média em todos os tratamentos (banana)

4.1.14- Dimensões e peso dos frutos

Neste item serão mostrados os valores das dimensões dos frutos assim com as perdas de peso depois do resfriamento.

4.1.14.1- Dimensões dos frutos

As dimensões L_1 e L_2 das bananas foram determinadas partindo da medição experimental de Pe_1 , Pe_2 e Pe'_2 (Equação 3.9). Na tabela 4.44 mostram-se os valores médios para cada tratamento, e o desvio padrão.

Tabela 4.44: Dimensões dos frutos (banana)

Tratamento	L_2 (cm)	L_1 (cm)	L_2/L_1
FAEI	$7,81 \pm 0,59$	$2,04 \pm 0,05$	3,83
FCEI	$8,31 \pm 0,48$	$1,98 \pm 0,06$	4,21
FAEII	$8,53 \pm 0,35$	$2,03 \pm 0,08$	4,20
FCEII	$8,38 \pm 0,51$	$2,05 \pm 0,07$	4,09
Média	$8,26 \pm 0,48$	$2,03 \pm 0,07$	4,08

Observa-se que o valor de L_2 sempre é maior que o valor de L_1 , obtendo-se valores da relação L_2/L_1 na ordem de 4, característico de uma forma geométrica cilíndrica. O valor adotado para a validação do modelo matemático será o valor médio entre todos os experimentos foi: $L_2 = 8,26$ cm e $L_1 = 2,03$ cm.

4.1.14.2- Perdas de peso dos frutos

Para o cálculo das perdas de peso foi determinado o peso inicial (antes do resfriamento), e o peso das frutas logo após o resfriamento. O valores obtidos são mostrados na tabela 4.45.

Tabela 4.45: Valores do peso e das perdas em cada tratamento com banana

Tratamento	Mi (g)	Mf (g)	Mp (g)	Mp (%)
FAEI	1,39±0,21	1,350	0,031±0,026	2,25±2,02
FCEI	1,23±0,12	1,203	0,034±0,030	2,64±2,67
FAEII	1,42±0,25	1,396	0,032±0,028	2,47±2,48
FCEII	1,69±0,63	1,640	0,046±0,030	2,69±1,56
Média	1,432±0,302	1,397	0,035±0,028	2,512±2,185

Na tabela anterior observa-se que a perda média de peso dos frutos depois do resfriamento foi de 0,035 g; 2,51% por penca e 0,42 % por fruto, aproximadamente.

Comparando-se as perdas de peso nos experimentos com laranja (0,084%), com as perdas de peso nos experimentos com banana (0,42%), observa-se uma diferença de 0,80%. Por outro lado a diferença entre a umidade relativa média entre os tratamentos com laranja e a câmara sem produtos, foi de 1,0%, sendo que nos experimentos com banana esta diferença foi de 1,6%, um valor 0,36% maior.

Estes valores de perdas na banana podem estar provocados pela constituição da casca, a qual é muito mais porosa que a casca da laranja o que facilita a perda de água para o meio. Depois do resfriamento foram observadas mudanças na casca (escurecimento). Para testar se as perdas de peso tiveram uma variação significativa entre os diferentes tratamentos, foi aplicado o teste F (Tabela 4.46).

Tabela 4.46: Resumo dos testes de hipóteses e da ANOVA (perdas de peso, g)

Teste de Hipóteses	
Fc	1,24
Ft (4, 3, 10%)	4,19

Hipóteses testadas	Ho: as médias são iguais H1: as médias são diferentes
Condição de rejeição da hipótese nula	$F_c > F_t$
Conclusão	ACEITA-SE H_0

Como pode ser observado, aceita-se a hipótese nula (H_0), o que significa dizer que as perdas de peso não foram significativas para o intervalo de confiança adotado (90%), da mesma forma como foi discutido nos experimentos com laranja.

Desta forma fica comprovado que quando os frutos são submetidos a um pré-resfriamento rápido, como é neste caso com ar forçado, as perdas de peso podem ser consideradas desprezíveis, como discutido por Chau *et al.*, 1985 e Novy & Kieckbush, 1986, dentre outros autores.

Na figura 4.30 mostra-se o comportamento das perdas de peso em todos os experimentos realizados.

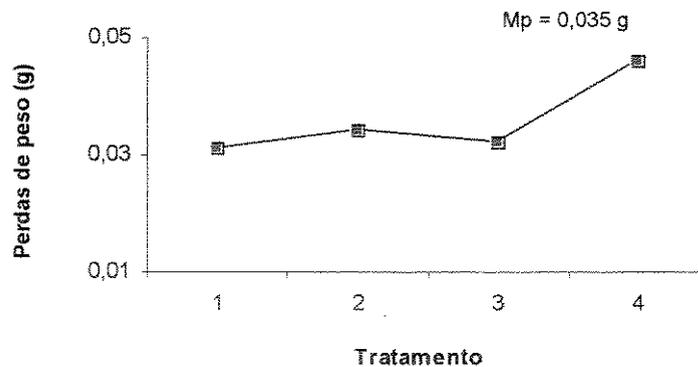


Figura 4.30: Comportamento das perdas de peso das bananas em todos os tratamentos

Perdas de peso na ordem de 4%, em cenouras estocadas durante um mês, a temperatura entre 7 e 8°C, com uma vazão de ar de 5,3 m³/h, foram apresentados em experimentos realizados por Neves Fo., 1991.

A constituição da casca da banana, unido ao fato de ser uma fruta com uma relação de forma maior que da laranja, podem ter contribuído para o valor de perdas apresentado.

4.2- Modelagem Teórica

Nesta seção do capítulo 4 serão apresentados os resultados obtidos da aplicação e validação do modelo matemático proposto, através do uso do software *Spherodiff-Transf*, para cada tratamento, nos experimentos com laranja e com banana.

4.2.1- Experimentos com laranja

Seguindo a mesma ordem apresentada na fase experimental, serão apresentados, primeiramente, os resultados da validação do modelo teórico com laranja e em seguida os resultados com banana, nomeando cada experimento com a mesma simbologia usada na seção 4.1.

4.2.1.1- Experimento FAEI

Com os dados experimentais de T_c , obtidos para cada ponto, e com o auxílio de uma planilha do Microsoft Grapher, foi calculado o valor da Taxa Adimensional de Temperatura (TAT), os quais foram introduzidos num arquivo do *software Spherodiff-Transf*. Nos gráficos mostrados para cada experimento serão apresentados os valores experimentais e teóricos em função do TAT.

Na figura 4.31 observa-se o comportamento da TAT durante os resfriamento dos frutos, para os três pontos (1, 2 e 3) onde foi monitorada a temperatura T_c . As siglas TATn representam os valores numéricos, obtidos da validação do software *Spherodiff-Transf*. Os valores experimentais estão nomeados na legenda como TATe.

Observa-se que efetivamente entre os três pontos existe uma diferença de temperatura, como já foi discutido na seção 4.1, representado desta vez pela TAT. Ou seja, quando no ponto 1 é

atingido o tempo de meio resfriamento ($TAT_{1/2} = 0,5$), no ponto 2, TAT é de aproximadamente 0,61; e no ponto 3, de 0,68. Esta situação demonstra a influência do provável aumento da temperatura do ar ao longo do leito, como já havia sido discutido na seção 4.1.

Nota-se também que existe uma adequada concordância entre os valores experimentais e numéricos, o que está refletido no baixo valor do desvio padrão S ($S = \sqrt{S^2}$) e do erro (ERQ), mostrado na tabela 4.47.

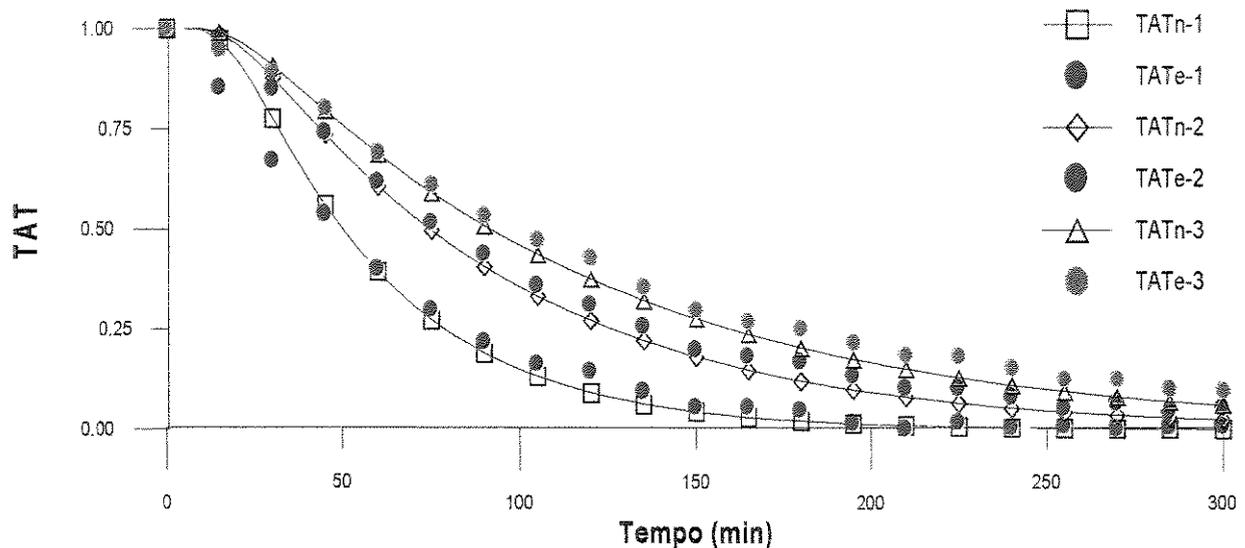


Figura 4.31. Comportamento da TAT experimental e teórica, experimento FAEI (laranja)

A adequada concordância do ajuste, entre os valores numéricos e os valores experimentais, está refletido no baixo valor do erro (ERQ), e do desvio padrão (S), que em média são de $7,22^{-2}$ e $3,55^{-2}$. Ao mesmo tempo esta concordância permite assegurar que o valor de hc obtido é representativo do fenômeno em estudo (Tabela 4.47).

Observa-se na tabela 4.47 que existe uma diminuição do valor do coeficiente convectivo de transferência de calor (hc), entre os pontos 1, 2 e 3. Esta situação é devido ao decréscimo do fluxo de ar, provocado pela provável perda de carga e que também traz consigo uma diminuição da velocidade do ar ao redor dos frutos.

Tabela 4.47: Valores do hc, de ERQ e do S, experimento FAEI

Trat.	Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3		
FAEI	hc (W/m ² °C)	ERQ	S	hc (W/m ² °C)	ERQ	S	hc (W/m ² °C)	ERQ	S
	56,48	7,788 ⁻²	3,72 ⁻²	30,17	7,982 ⁻²	3,71 ⁻²	21,23	5,849 ⁻²	3,22 ⁻²

O valor de hc apresenta uma diminuição de aproximadamente 45% (entre o ponto 1 e 2), de 29% (2 e 3) e de 62% (1 e 3). Esta diminuição do valor de hc, demonstra que a posição do fruto com respeito ao fluxo de ar é importante, e que as maiores taxas de transferência de calor são obtidas para os pontos que se encontram em maior contato com o fluxo de ar, onde o valor da temperatura do ar é menor.

É necessário ressaltar que devido a complexidade na determinação do hc, assim como pela quantidade de fatores que influenciam este coeficiente, e tomando em consideração que neste trabalho foram feitas uma série de simplificações, considera-se que os valores de hc obtidos e apresentados neste trabalho podem ser considerados aparentes. Ou seja, o coeficiente convectivo de transferência de calor obtido neste trabalho será denominado coeficiente aparente.

Na figura 4.32, mostra-se o comportamento da TAT média, TATm (Equação 3.50), notando-se que a temperatura média do fruto durante o resfriamento segue aproximadamente a mesma tendência que a temperatura no centro. A distribuição média da temperatura no fruto foi calculada (Equação 3.49; 3.50), considerando todos os pontos desde a superfície até o centro. Com o valor desta taxa média, pode-se conhecer o tempo médio de resfriamento dos frutos. Na tabela 4.48 mostra-se o valor do tempo de resfriamento para cada ponto e a diferença com respeito ao tempo determinado com TAT.

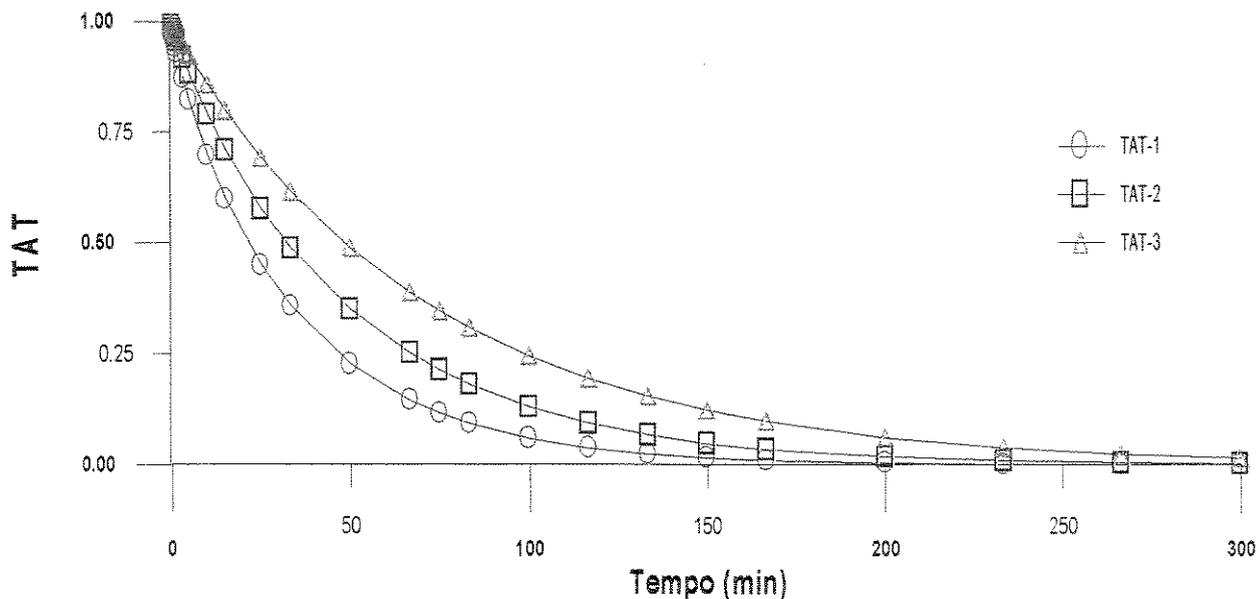


Figura 4.32: Comportamento da TAT média, experimento FAEI

Observa-se que o tempo médio, considerando todo o volume do fruto, é menor que o tempo em que a temperatura no centro atinge o tempo de meio resfriamento e o tempo dos sete oitavos do resfriamento. Estes valores permitem conhecer qual é o tempo médio em que resfria todo o volume do fruto, a partir dos dados de temperatura obtidos experimentalmente (Tabela 4.48).

Tabela 4.48: Tempo de resfriamento (min) determinado com TATm e diferença com respeito a TATe

FAEI	Tempo de resfriamento para TATm (min)			Diferença entre TATm e TATe (%)		
	1	2	3	1	2	3
TAT _{1/2}	20,0	30,0	45,0	-55,0	-50,0	-35,7
TAT _{7/8}	75,0	105,0	155,0	-28,5	-22,2	-11,4

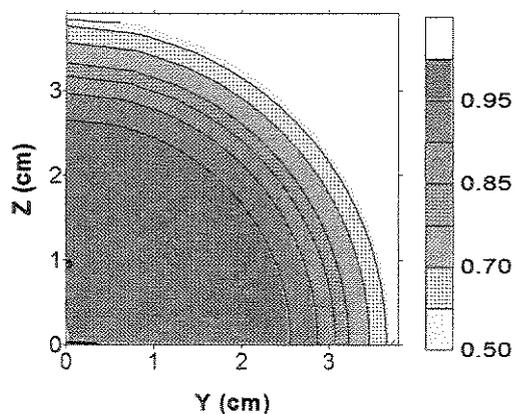
Para visualizar o comportamento da distribuição de temperatura nos frutos, foram traçados os gráficos em 2-D, em função da TAT. Estes gráficos foram traçados a partir dos dados gerados com o programa, e são o que poderia ser chamado de uma "radiografia" ou "mapeamento" do processo de resfriamento, para diferentes instantes de tempo. A vantagem deste tipo gráfico é que apenas medindo a temperatura no centro dos frutos, pode-se conhecer o comportamento da mesma em toda a sua geometria, que vai desde o centro até a superfície. Obter esta distribuição de temperatura de forma experimental torna-se muito difícil, arriscando-se a obter erros consideráveis.

Estes gráficos foram traçados para os três pontos em estudo, utilizando-se para isto o *software*

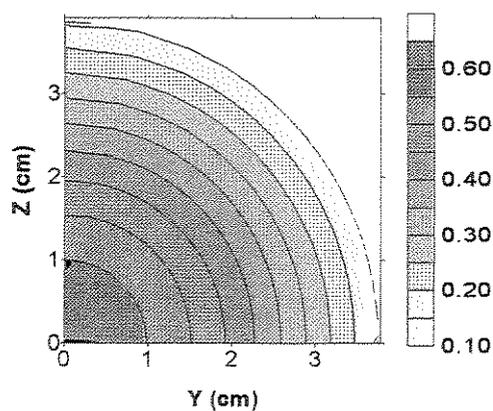
Surfer, mas devido à grande quantidade de experimentos, serão apresentados apenas os resultados para o ponto 1 e 3, em três instantes de tempo, no início do resfriamento ($t = 5\text{ min}$), no instante em que $TAT = 0,5$ ($TAT_{1/2}$), e no instante em que $TAT = 0,125$ ($TAT_{7/8}$).

Na figura 4.33 (a) mostra-se o comportamento da TAT aos 5 min de iniciado o resfriamento (ponto 1), nota-se que na superfície do fruto, e em algumas camadas adjacentes, a TAT está entre 0,70 à 0,60, ou seja, a temperatura está, aproximadamente, entre 17 a 15°C. Porém, no centro do fruto, a temperatura mantém-se inalterada, ou seja, à temperatura inicial do fruto ($T_i = 25,22\text{ °C}$).

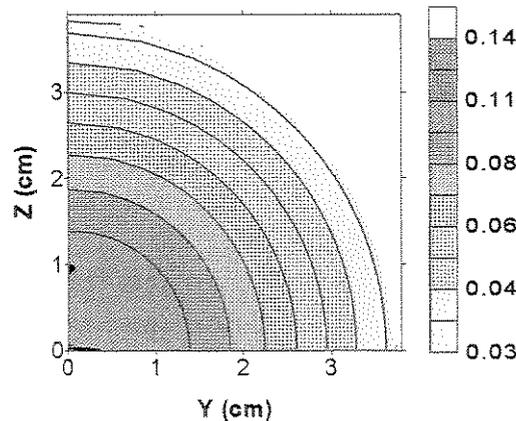
Já na figura 4.33 (b), aos 40 min ($TAT_{1/2}$), nota-se que nesse instante de tempo na região da superfície o valor de TAT diminuiu para 0,20, o que representa aproximadamente 5°C, nas regiões adjacentes à superfície a TAT está entre 0,30 à 0,40 (de 7 à 10°C). Já na região do centro do fruto ($Y=0$), a TAT é de 0,50; ou seja, aproximadamente 12°C. Essa temperatura corresponde-se com o tempo de meio resfriamento e, nesse instante, a diferença entre a temperatura no centro e a superfície é da ordem de 9°C, o que representa uma diferença de 25%.



(a)- $t = 5\text{ min}$



(b)- $t = 40\text{ min}$



(c)- $t= 105$ min

Figura 4.33: Distribuição da TAT no fruto, para três instantes de tempo (ponto 1)

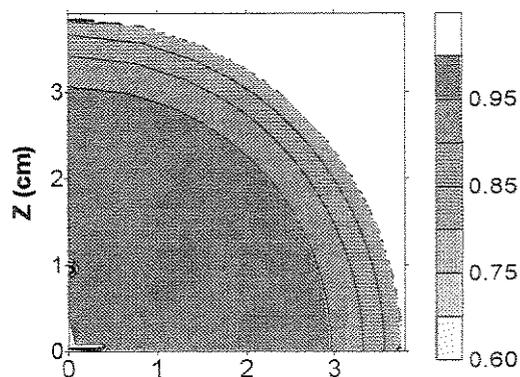
Observando a seqüência do gráfico 4.33, nos três instantes de tempo, nota-se rapidamente a diferença nos valores de TAT, expressos através das cores. A escala de cores que vai desde o azul (para as maiores taxas de temperatura), até o amarelo (para as menores taxas de temperatura), denotam que no instante em que é atingido o tempo dos sete oitavos do resfriamento ($TAT_{7/8}$), o fruto encontra-se praticamente resfriado, apresentando-se quase da cor amarela. Comparado-se o gráfico 4.33 (a) com o 4.33 (c), nota-se a sensível diferença.

Voltando ao gráfico 4.33 (c), na superfície do fruto o valor da TAT é de 0,06 ($T_s \approx 1,5^\circ\text{C}$), e no centro do fruto a TAT é de 0,12 ($T_c \approx 3,0^\circ\text{C}$). O valor da ΔT , entre T_c e T_s , nesse instante de tempo é de $1,5^\circ\text{C}$. Ou seja, neste ponto a superfície do fruto encontra-se estabilizada com a temperatura do ar (1°C).

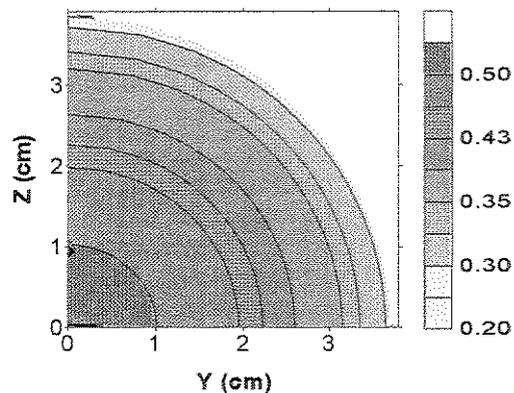
Na figura 4.34 (a, b, c), mostra-se o comportamento da TAT nos três instantes de tempo analisados para o ponto 1, porém para o ponto 3. Note-se que a tendência do comportamento da TAT é muito semelhante à obtida no ponto 1. No início do resfriamento a temperatura na superfície é de aproximadamente 21°C , sendo que no centro dos frutos a temperatura mantém-se inalterada com respeito à temperatura inicial.

Já aos 65 min do início do resfriamento ($TAT_{1/2}$) (Figura 4.34 (b)), a temperatura na superfície dos frutos diminuiu até aproximadamente 7°C , e no centro está à 12°C . Aos 180 min do início do resfriamento a temperatura na superfície é de $1,70^\circ\text{C}$, e no centro de $3,06^\circ\text{C}$, um ΔT de

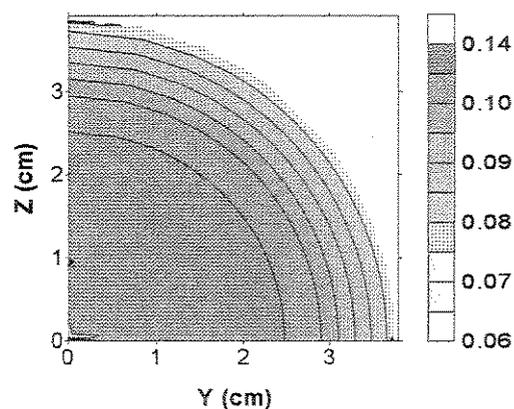
aproximadamente $1,36^{\circ}\text{C}$, que representa uma diferença de aproximadamente 44%.



(a)- $t= 5$ min



(b)- $t= 65$ min



(c)- $t= 180$ min

Figura 4.34: Distribuição da TAT no interior do fruto para três instantes de tempo (ponto 3)

4.2.1.2-Experimento FBEI

Na figura 4.35 mostram-se as curvas obtidas com o modelo matemático, assim como os pontos experimentais. Nota-se a existência de uma boa correlação entre TATe e TATn, como é expressada na tabela 4.49.

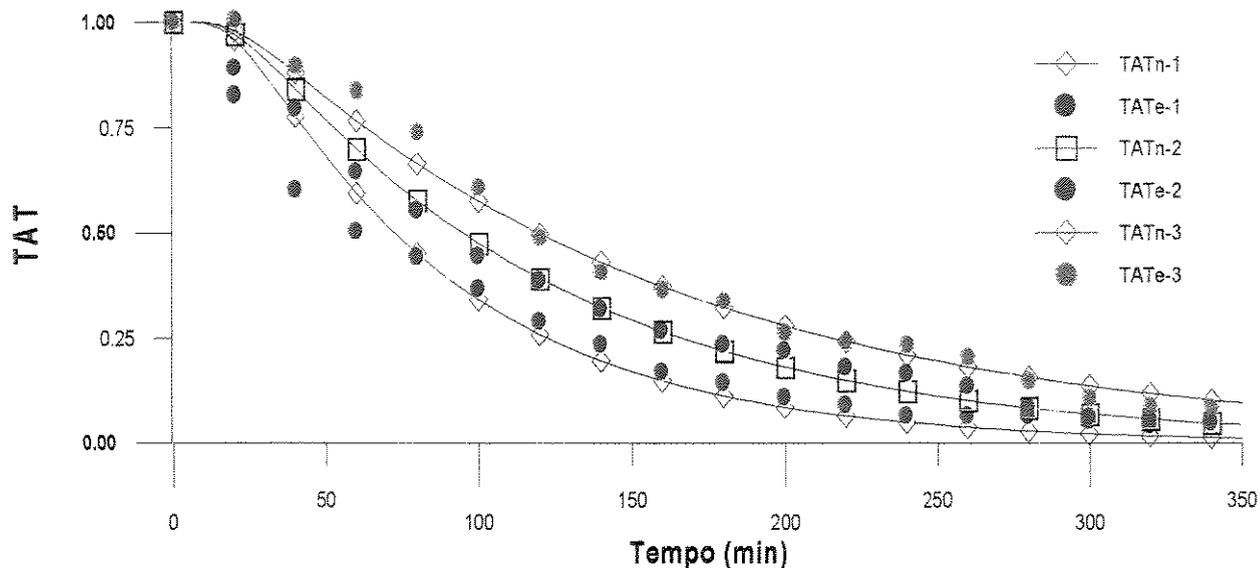


Figura 4.35: Comportamento da TAT experimental e teórica, experimento FBEI

Observa-se na tabela 4.48 que o valor do ERQ e do S entre os valores experimentais e teóricos, comportam-se baixos, sendo em média de $1,160^{-1}$ (ERQ), e $4,33^{-2}$ (S). O valor de hc sofre uma diminuição ao longo do leito de aproximadamente 55% (ponto 1 e 3), o que denota a efetividade do ajuste do valor de hc , a partir da temperatura T_c .

Tabela 4.49: Valores do hc , de ERQ e do S, experimento FBEI

Trat.	Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3		
	hc ($W/m^2\text{°C}$)	ERQ	S	hc ($W/m^2\text{°C}$)	ERQ	S	hc ($W/m^2\text{°C}$)	ERQ	S
FBEI	21,50	$1,860^{-1}$	$6,02^{-2}$	13,52	$6,521^{-2}$	$3,15^{-2}$	9,58	$1,110^{-1}$	$4,06^{-2}$

Na figura 4.36 mostra-se o comportamento da TATm para os três pontos, e na tabela 4.50 o valor do tempo de resfriamento que se corresponde com TATm assim como a diferença com respeito aos valores no centro (TAT).

Tabela 4.50: Tempo de resfriamento (min) determinado com TATm e diferença com respeito a TATe

FBEI	Tempo de resfriamento para TATm (min)			Diferença entre TATm e TAT (%)		
	1	2	3	1	2	3
TAT _{1/2}	45,0	70,0	95,0	-35,0	-26,0	-13,0
TAT _{7/8}	140,0	205,0	265,0	-22,2	-16,3	-13,1

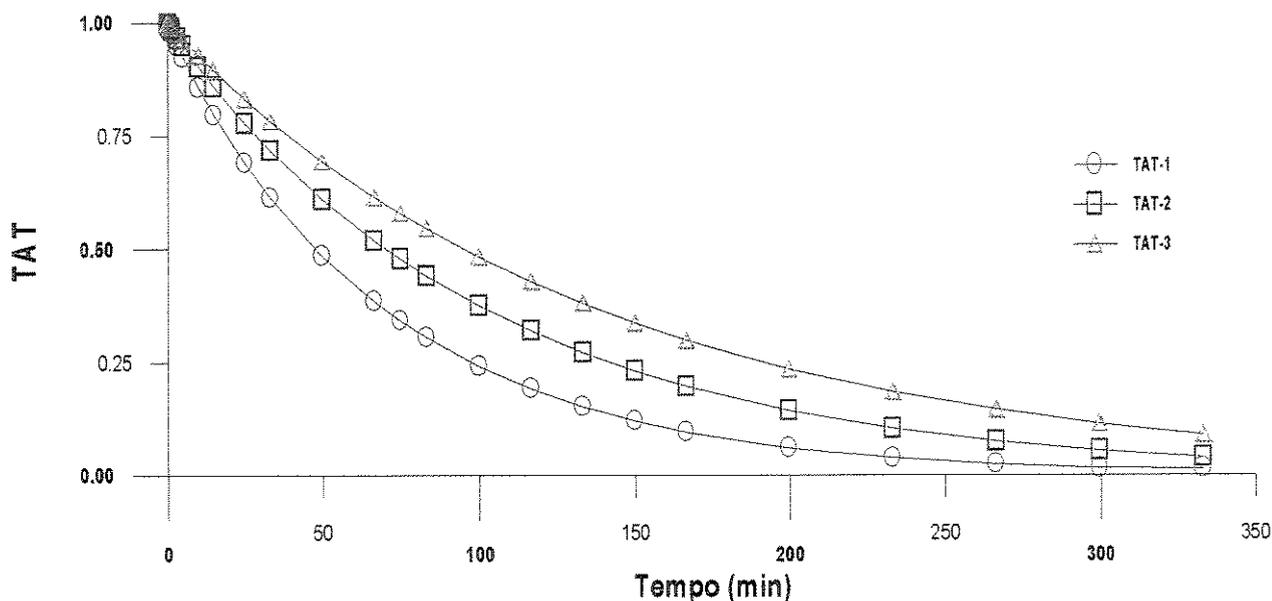


Figura 4.36: Comportamento da TAT média, experimento FBEI

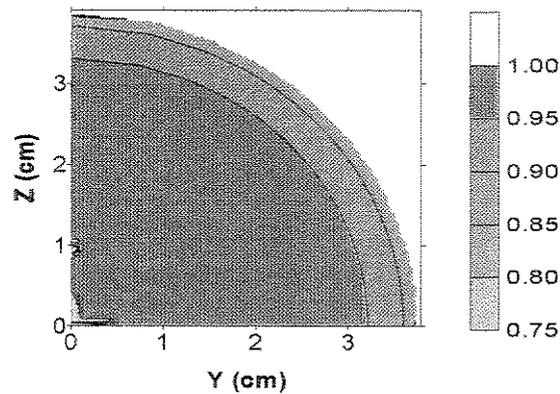
Na figura 4.37 (a), apresenta-se a distribuição da temperatura no início do resfriamento, observando-se que no fruto a temperatura ainda encontra-se praticamente inalterada, ou seja, na temperatura inicial (25,4°C). Nota-se que para este mesmo instante de tempo, no experimento FAEI, nas camadas mais próximas da superfície, o valor de TAT encontra-se na faixa de 0,60. Neste este experimento, como a taxa de ar é 25% menor que no experimento anterior, percebe-se que o resfriamento acontece de forma mais lenta.

A título de exemplo, no mesmo ponto no experimento FAEI, aos 5 min do início do experimento a temperatura nas camadas adjacentes à superfície, está entre 15°C a 17°C, já no experimento que aqui está sendo discutido, no ponto 1 a temperatura na superfície e camadas adjacentes, está na faixa de 20°C a 19°C, uma diferença de aproximadamente 25%.

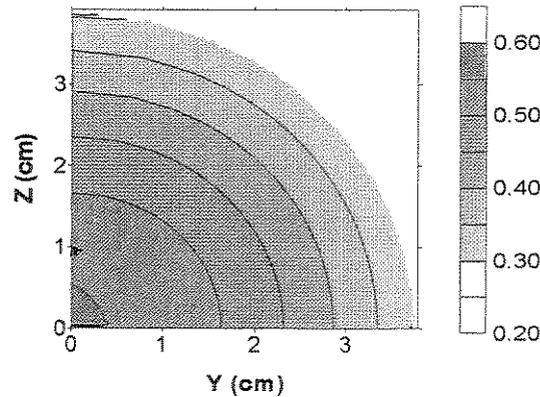
Já quando o fruto encontra-se à temperatura que corresponde a TAT_{1/2} (Figura 4.37 (b)), nota-

se um ΔT entre o centro e superfície de aproximadamente 5°C , o que está claramente refletido nos valores de TAT, quando TAT no centro ($Z = 0$) é de aproximadamente 0,5; na superfície o valor de TAT está na faixa de 0,20; representando uma diferença de aproximadamente 58%.

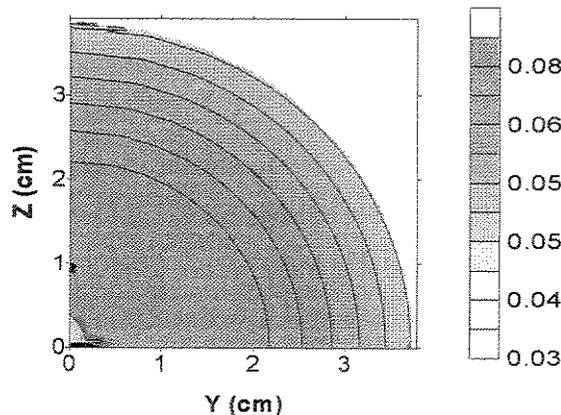
Observa-se que na figura 4.37 (c), que o fruto já encontrava-se praticamente resfriado, o valor da TAT é da ordem de 0,125 no centro, na superfície é de 0,05 ($T_s = 2,3^{\circ}\text{C}$), uma diferença de 26%.



(a)-t = 5 min



(b)-t= 60 min



(c)-t= 200 min

Figura 4.37: Distribuição da TAT no fruto para três instantes de tempo (ponto 1)

Como os resultados obtidos para o ponto 3 são muito semelhantes aos apresentados para o ponto 1, quando o fruto atinge o meio e o tempo dos sete oitavos do resfriamento, e devido a ao volume de dados, então apenas serão mostrados os resultados para o ponto 1 nos experimentos que serão apresentados a seguir.

4.2.1.3- Experimento FCEI

Na figura 4.38 mostram-se as curvas de resfriamento teóricas, sendo comparadas com os pontos experimentais. Nota-se a adequada concordância entre ambos pontos, o que reflete-se no baixo valor do ERQ e do S, como mostrado na tabela 4.48.

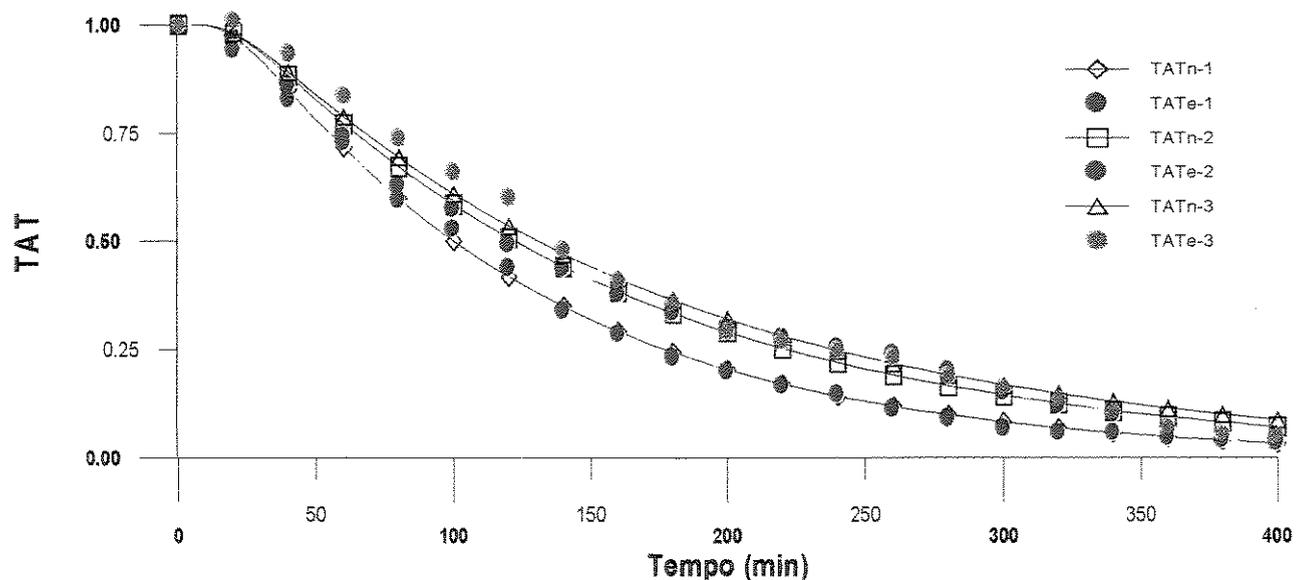


Figura 4.38: Comportamento da TAT experimental e teórica, experimento FCEI

Como pode ser observado na tabela 4.51, o valor do erro comportou um valor médio entre os três pontos, de $5,11^{-2}$ e o desvio padrão de $2,43^{-2}$. Estes baixos valores permitem afirmar que existiu um adequado ajuste, pelo que o valor de h_c pode ser considerado representativo do processo estudado. Observa-se que existe uma diminuição do valor de h_c ao longo do leito (entre o ponto 1 e 3) da ordem de 32%.

Tabela 4.51: Valores do h_c , de ERQ e do S, experimento FCEI

Trat.	Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3		
	h_c ($W/m^2\text{°C}$)	ERQ	S	h_c ($W/m^2\text{°C}$)	ERQ	S	h_c ($W/m^2\text{°C}$)	ERQ	S
FCEI	12,34	$1,301\text{e}^{-2}$	$1,32\text{e}^{-2}$	9,21	$7,322\text{e}^{-2}$	$3,12\text{e}^{-2}$	8,40	$6,714\text{e}^{-2}$	$2,96\text{e}^{-2}$

Na figura 4.39 apresenta-se o comportamento da TATm e na tabela 4.52 o valor do tempo de resfriamento e a diferença com respeito ao tempo quando considerada TAT.

Tabela 4.52: Tempo de resfriamento (min) determinado com TATm e diferença com respeito a TATe

FCEI	Tempo de resfriamento para TATm (min)			Diferença entre TATm e TAT (%)		
	1	2	3	1	2	3
TAT _{1/2}	75,0	95,0	105,0	-25,0	-20,8	-19,2
TAT _{7/8}	245,0	305,0	325,0	-4,0	-4,6	-5,7

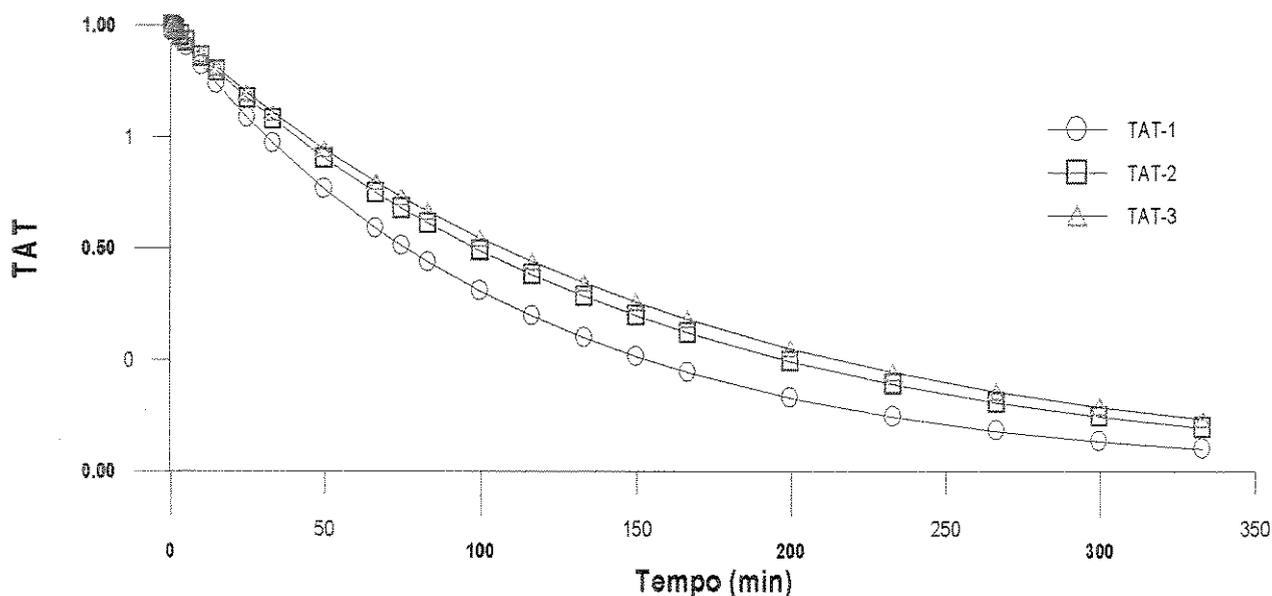
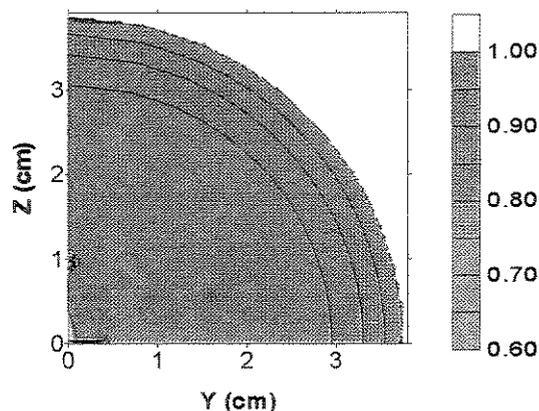


Figura 4.39: Comportamento da TAT média, experimento FCEI

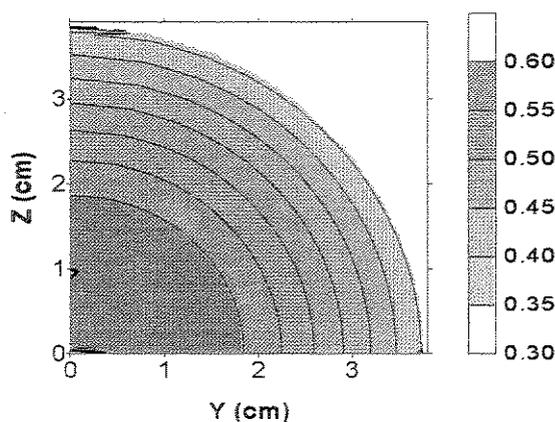
Na figura 4.40 (a, b e c), apresenta-se a seqüência do resfriamento para o ponto 1, observa-se que aos 5 min (Figura 4.39 (a)), o fruto encontra-se com TAT na faixa de 0,85 a 1,0; o que significa dizer que o fruto apresenta ainda taxas de transferência de calor muito baixas, mantendo-se à temperatura inicial ($T_i = 25,3\text{°C}$). A temperatura na superfície e nas camadas mais próximas a esta, encontra-se na faixa de 20 a 22°C.

Observando novamente a figura 4.37 (a), nota-se que para esse mesmo instante de tempo, nesse mesmo ponto, mas no experimento FBEL, na superfície e camadas adjacentes, o valor da temperatura é mais baixo (entre 19°C e 20°C). Esta diferença é função da taxa de ar, que no experimento FCEI é mais baixa que no experimento FBEL.

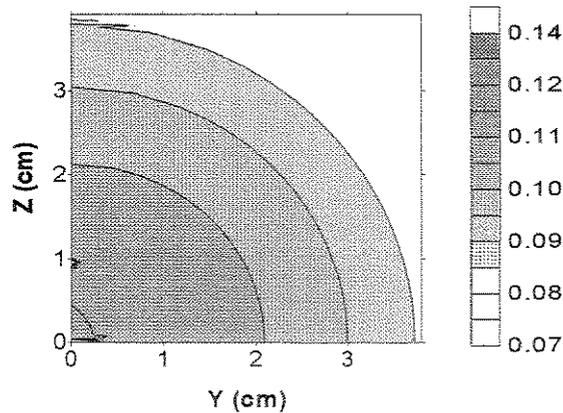
Observe-se na figura 4.40 (a, b e c), a seqüência do resfriamento, aos 100 min ($TAT_{1/2}$), o valor de TAT é de 0,50; no centro, e na superfície de 0,30 (diferença de 40%). Estes valores podem ser traduzidos em termos de temperatura, porém quando no centro a temperatura está em torno de 13°C, na superfície está em volta de 7°C. Aos 260 min, quando $TAT = 0,125$ no centro, na superfície está na ordem de 0,07 ($T_s = 2,85^\circ\text{C}$) (diferença na ordem de 22%).



(a)- $t=5$ min



(b)- $t=100$ min



(c)-t = 260 min

Figura 4.40: Distribuição da TAT no fruto para três instantes de tempo (ponto 1)

4.2.1.4- Experimento FAEII

Para este experimento a tendência no comportamento das curvas teóricas esteve muito próximo dos pontos experimentais (Figura 4.41).

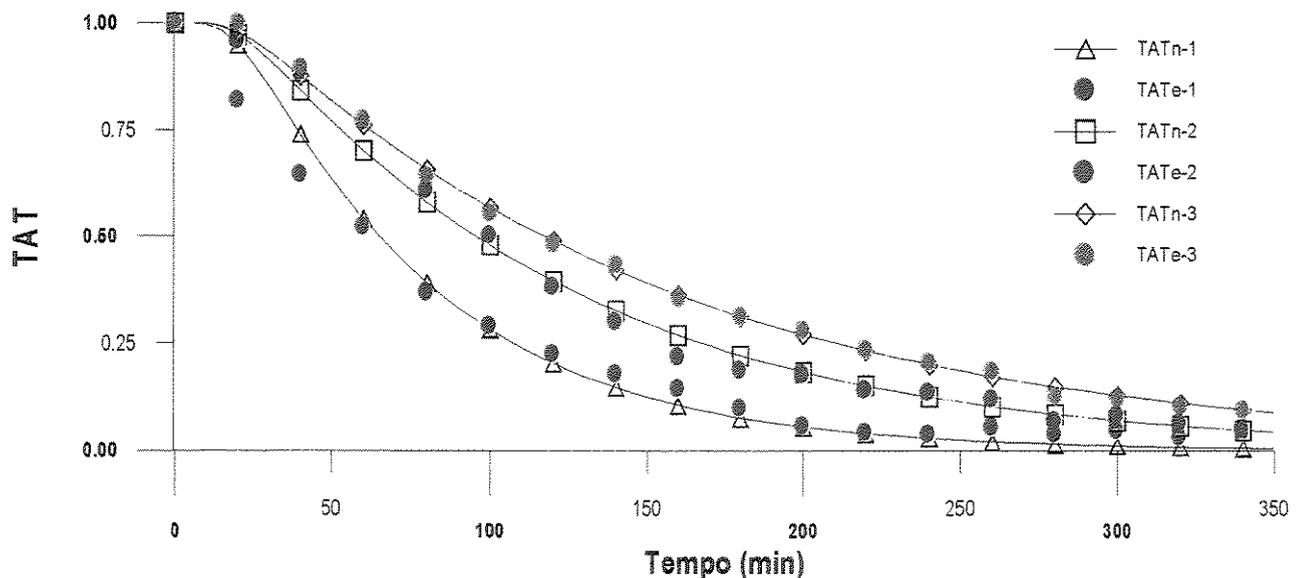


Figura 4.41: Comportamento da TAT experimental e teórica, experimento FAEII

Como pode ser apreciado na tabela 4.53, o valor de h_c aparente apresenta uma tendência à diminuição, através do leito, apresentado uma diferença entre o ponto 1 e 3 de aproximadamente 63%. O baixo valor de ERQ obtido no ajuste, em média de $6,84^{-2}$, e de $2,87^{-2}$, permite afirmar que os

valores de hc resultantes representam adequadamente o processo.

Tabela 4.53: Valores do hc, de ERQ e do S, experimento FAEII

Trat.	Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3		
	hc (W/m ² °C)	ERQ	S	hc (W/m ² °C)	ERQ	S	hc (W/m ² °C)	ERQ	S
FAEII	26,75	1,472 ⁻¹	4,70 ⁻²	13,31	4,770 ⁻²	2,71 ⁻²	9,83	1,040 ⁻²	1,22 ⁻²

Na figura 4.42 apresentam-se as curvas com os valores médios da TAT e na tabela 4.54 mostra-se a diferença em percentagem, com respeito ao tempo de resfriamento, quando considerada TAT no centro do fruto

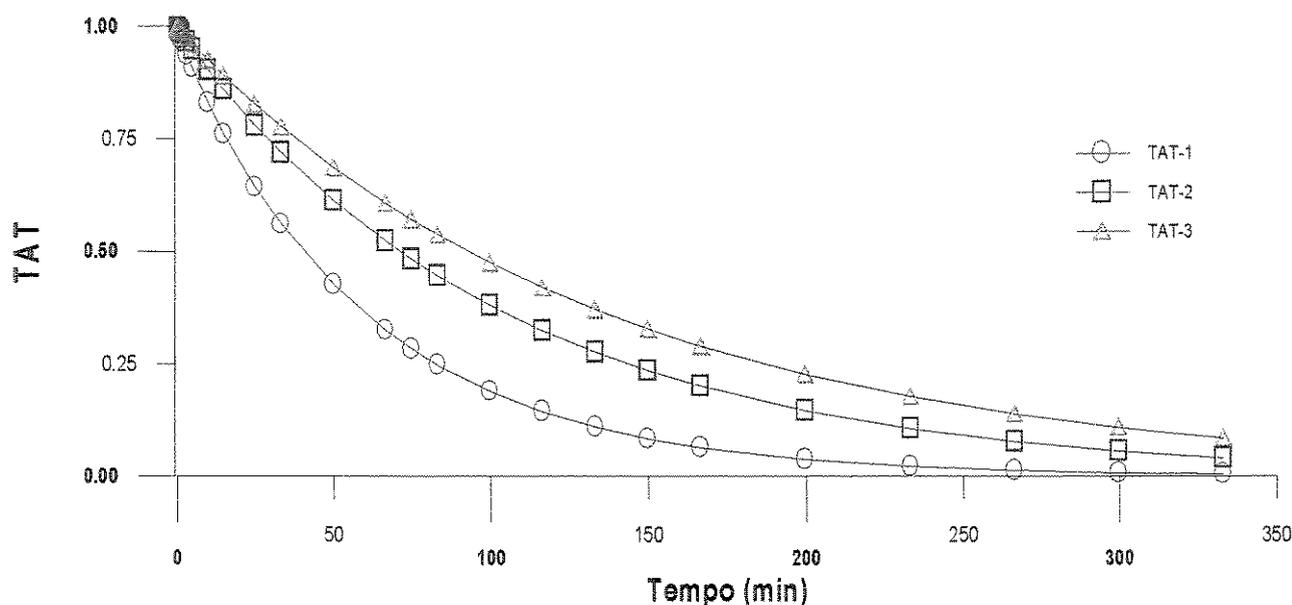


Figura 4.42: Comportamento da TAT média, experimento FAEII

Tabela 4.54: Tempo de resfriamento (min) determinado com TATm e diferença com respeito a TATe

FAEII	Tempo de resfriamento para TATm (min)			Diferença entre TATm e TAT (%)		
	1	2	3	1	2	3
TAT _{1/2}	40,0	70,0	90,0	-38,8	-26,3	-21,7
TAT _{7/8}	140,0	235,0	290,0	-6,6	-4,1	-3,3

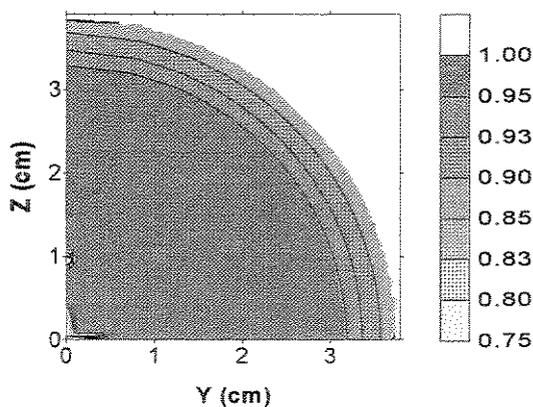
Na figura 4.43 (a, b e c), apresenta-se a seqüência do resfriamento, observa-se que no início do resfriamento, o valor da TAT está em torno de 0,90 à 1,00. Ou seja, o fruto encontra-se praticamente à temperatura inicial (Ti=25,95°C). Este valor, em termos de temperatura, representa

aproximadamente 23°C. Se comparado com o gráfico 4.32 (a) (Experimento FAEI), nota-se que, para o mesmo instante de tempo, o fruto na mesma posição apresenta um resfriamento diferente no experimento FAEII, termos da TAT.

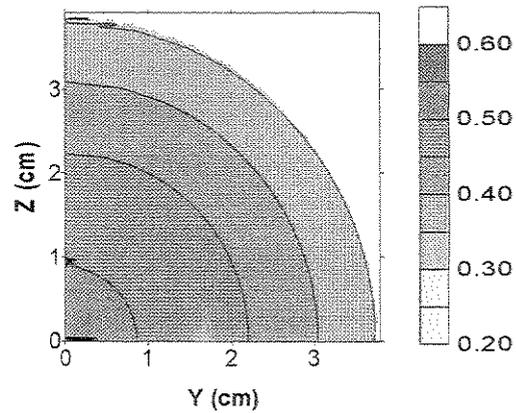
Ou seja, no experimento FAEI, aos 5 min do início do resfriamento, o valor da TAT encontra-se entre 0,60 e 0,90, o que representa temperaturas na ordem de 17 a 22°C. Já no experimento FAEII, o valor da TAT encontra-se na faixa de 0,85 a 1,00, em termos de temperatura, entre 23 a 25°C. Esta diferença está explicada no fato de ter-se modificado o tipo de embalagem (EII), apresentando uma área 91% menor que a embalagem EI.

Observando-se a figura 4.43 (b), aos 60 min do início do resfriamento ($TAT_{1/2}$), quando TAT é de 0,5 no centro, na superfície TAT é de aproximadamente 0,30. Na figura 4.43 (c), o fruto encontra-se praticamente resfriado ($TAT_{7/8}$), o valor da TAT no centro é de aproximadamente 0,125, na superfície o valor de TAT está na faixa de 0,06. Em termos de temperatura significa dizer que, entre a superfície e o centro existe um ΔT de aproximadamente 1,7°C.

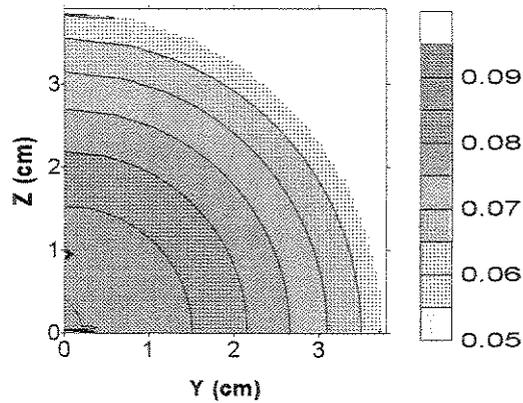
Observa-se que o comportamento da temperatura na superfície, obtido a partir dos dados de temperatura no centro, é aproximadamente igual à que foi obtida experimentalmente, o que permite afirmar que o modelo teórico proposto, assim como os resultados obtidos são coerentes com o fenômeno em estudo.



(a)-t = 5 min



(b)-t = 60 min



(c)-t = 170 min

Figura 4.43: Distribuição da TAT no fruto para três instantes de tempo (ponto 1)

4.2.1.5- Experimento FB EII

Na figura 4.54 apresentam-se as curvas obtidas pelo método numérico e os pontos experimentais, todos em função da TAT, para o experimento que combina o fluxo de ar FB e a embalagem EII.

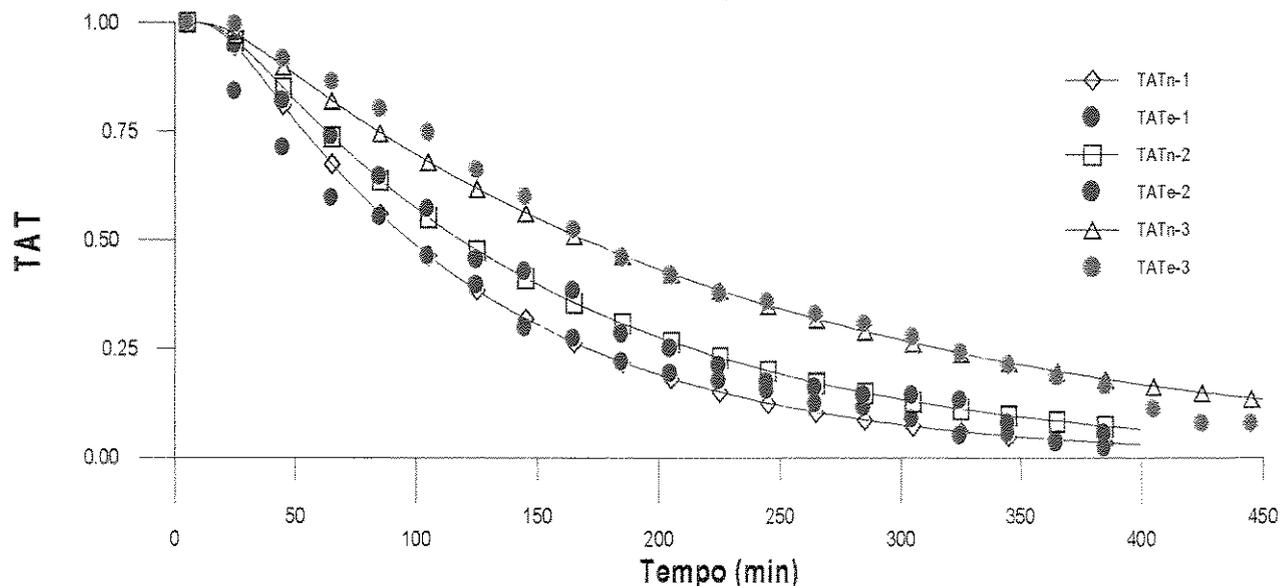


Figura 4.44: Comportamento da TAT experimental e teórica, experimento FBEII

O adequado ajuste dos valores numéricos aos valores experimentais, está refletido nos baixos valores do erro, o qual em média foi de $1,103^{-1}$, e do desvio padrão, $3,45^{-2}$. Como nos experimentos anteriores, o valor de hc apresenta um decréscimo entre os pontos monitorados na ordem de 53% (Tabela 4.55).

Tabela 4.55: Valores do hc , de ERQ e do S, experimento FBEII

Trat.	Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3		
	hc ($W/m^{2\circ}C$)	ERQ	S	hc ($W/m^{2\circ}C$)	ERQ	S	hc ($W/m^{2\circ}C$)	ERQ	S
FBEII	13,01	$1,330^{-1}$	$4,11^{-2}$	9,67	$3,400^{-2}$	$2,14^{-2}$	6,03	$1,641^{-1}$	$4,12^{-2}$

Na figura 4.45 apresenta-se o comportamento da TATm e na tabela 4.56 o valor do tempo de resfriamento e a diferença com respeito ao tempo considerando TAT.

Tabela 4.56: Tempo de resfriamento (min) determinado com TATm e diferença com respeito a TATe

FBEII	Tempo de resfriamento para TATm (min)			Diferença entre TATm e TAT (%)		
	1	2	3	1	2	3
	TAT _{1/2}	75,0	95,0	145,0	-21,0	-20,8
TAT _{7/8}	210,0	260,0	230,0	-16,0	-17,4	-47,7

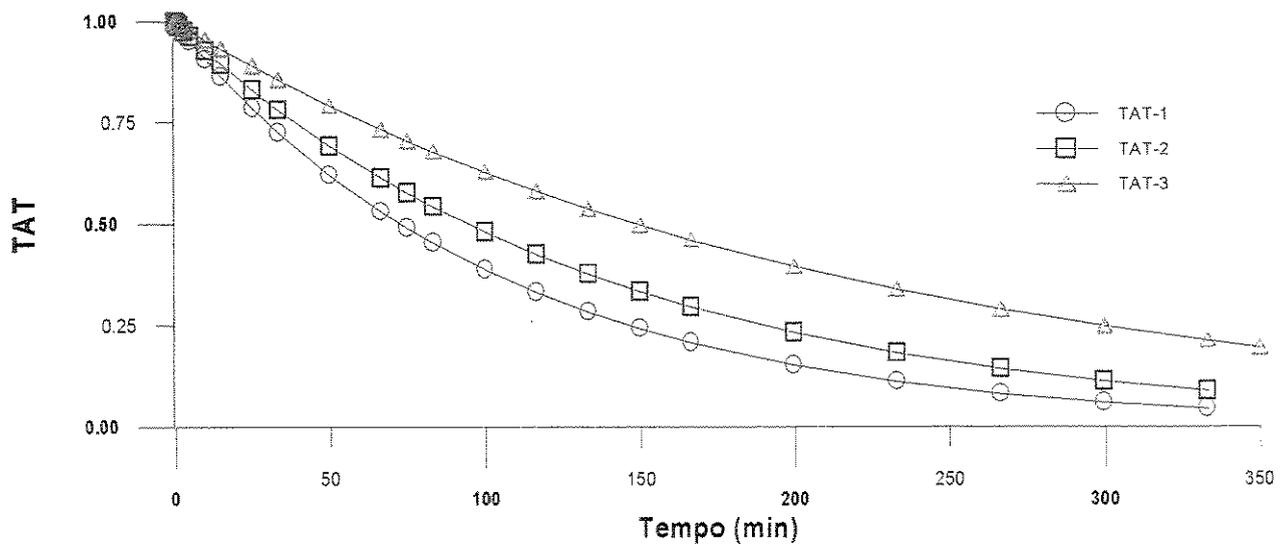


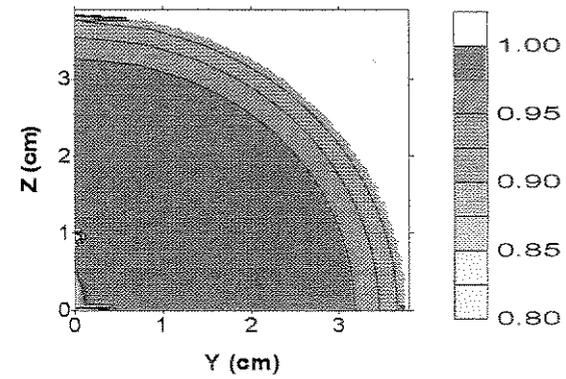
Figura 4.45: Comportamento da TAT média, experimento FBEII

Apresenta-se na figura 4.46, a seqüência do resfriamento para o fruto na posição 1. Ao início do resfriamento (Figura 4.46 (a)), o valor da TAT na superfície e da ordem de 0,90 ($T_s = 22^\circ\text{C}$), já no centro do fruto a temperatura permanece invariável com respeito à temperatura inicial, como demonstra a escala de cores.

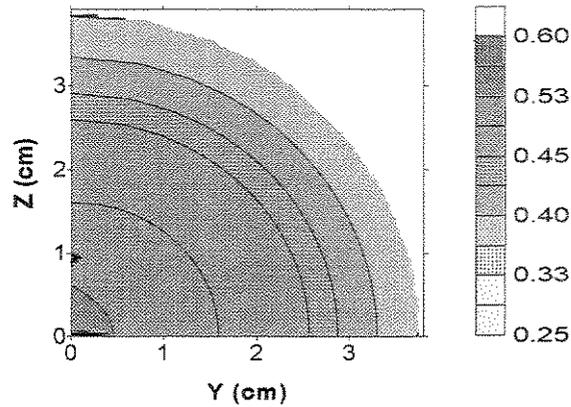
Já aos 90 min de iniciado o resfriamento ($TAT_{1/2}$), o valor da TAT está em torno de 0,33 ($T_s \approx 8^\circ\text{C}$), quando no centro TAT é de 0,5 ($T_c \approx 12^\circ\text{C}$). O ΔT entre o centro e a superfície comporta valores na ordem de 7°C , o que representa uma diferença de aproximadamente 41%.

Aos 295 min do início do resfriamento, quando o valor da TAT atinge aproximadamente 0,125; na superfície o TAT está na ordem de 0,06; o que representa um ΔT de $1,5^\circ\text{C}$, uma diferença na ordem de 40%.

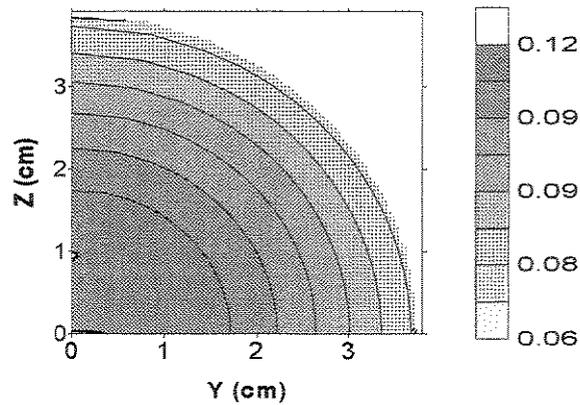
Estes valores concordam com os resultados apresentados na seção 4.1, onde foi apresentado o comportamento da temperatura na superfície obtida de forma experimental, o que leva a afirmar que o modelo aplicado é adequado para representar o processo em estudo.



(a)- $t = 5$ min



(b)- $t = 90$ min



(c)- $t = 295$ min

Figura 4.46: Distribuição da TAT no fruto para três instantes de tempo (ponto 1)

4.2.1.6- Experimento FCEII

Apresenta-se neste item o comportamento do valor da TAT obtidos com a aplicação do modelo, e os pontos experimentais (Figura 4.47).

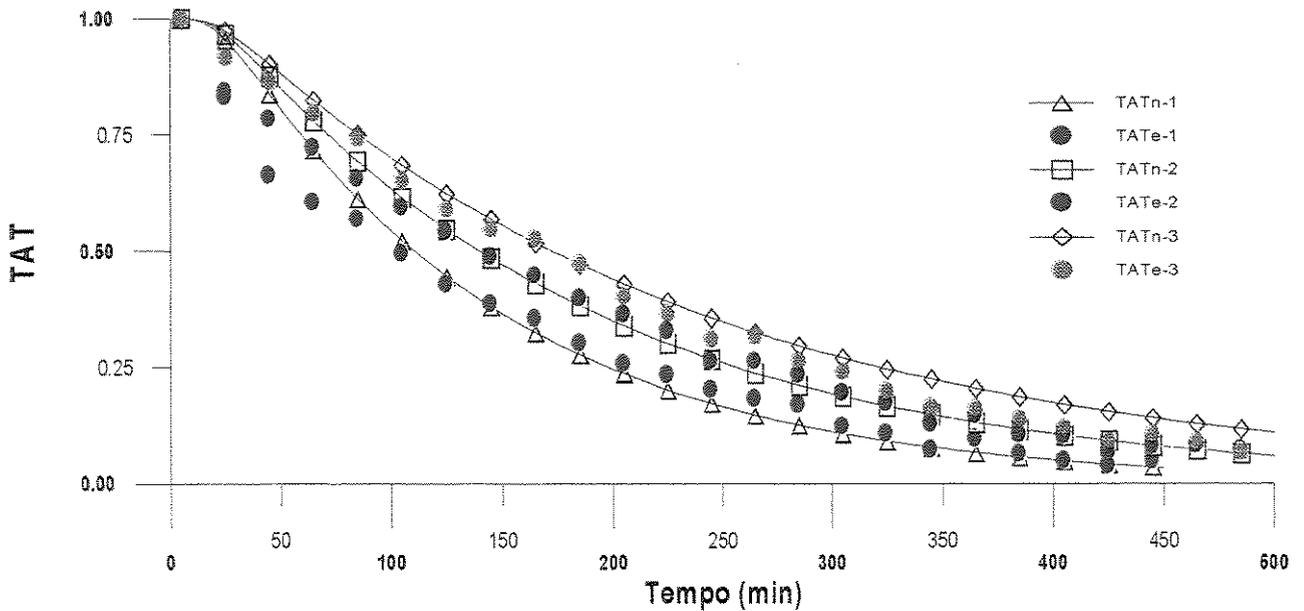


Figura 4.47: Comportamento da TAT experimental e teórica, experimento FCEII

Como nos experimentos anteriores, o valor do hc comportou um decréscimo da ordem de 44%, entre o ponto 1 e 3. Observa-se que o valor médio do erro está em torno de $1,804^{-1}$, e o desvio padrão de $4,35^{-2}$ (Tabela 4.57).

Tabela 4.57: Valores do hc , de ERQ e do S, experimento FCEII

Trat.	Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3		
	Hc (W/m ² °C)	ERQ	S	hc (W/m ² °C)	ERQ	S	hc (W/m ² °C)	ERQ	S
FCEII	10,70	2,171 ⁻¹	5,42 ⁻²	7,71	1,370 ⁻¹	3,71 ⁻²	5,89	1,472 ⁻¹	3,94 ⁻²

Na figura 4.48 apresentam-se as curvas de resfriamento em função da TATm, e na tabela 4.58 o valor do tempo de resfriamento para cada ponto e da diferença com respeito a TAT.

Tabela 4.58: Tempo de resfriamento (min) determinado com TATm e diferença com respeito a TATe

FCEII	Tempo de resfriamento para TATm (min)			Diferença entre TATm e TAT (%)		
	1	2	3	1	2	3
TAT _{1/2}	90,0	110,0	145,0	-18,2	-21,4	-17,1
TAT _{7/8}	260,0	335,0	410,0	-8,7	-9,4	-10,8

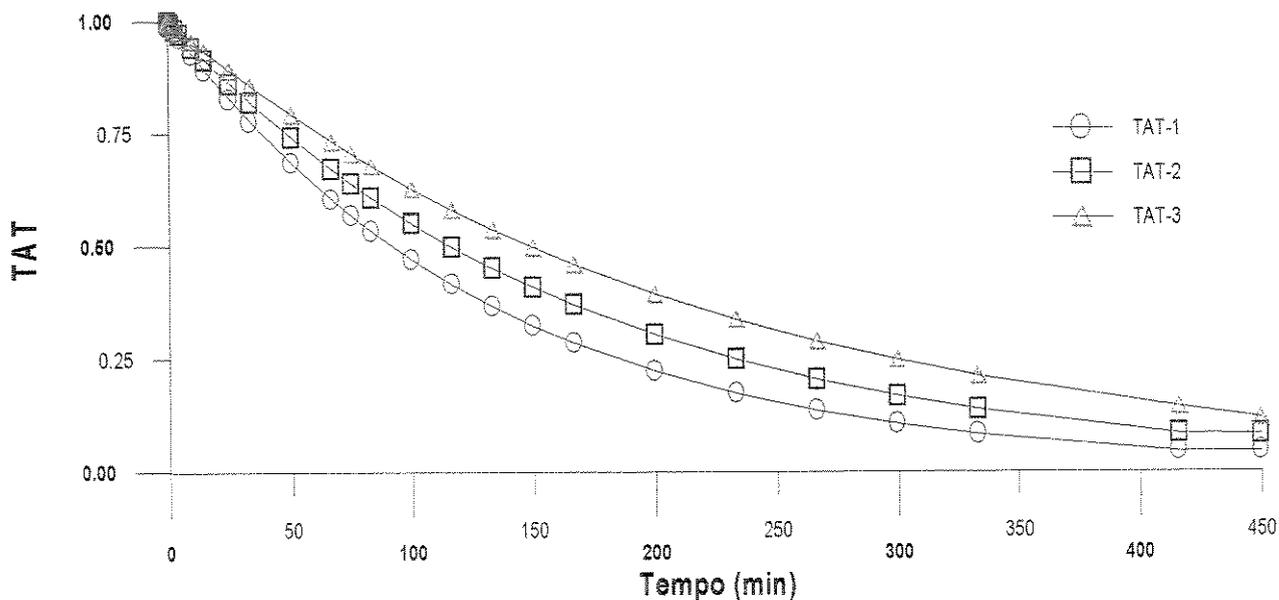
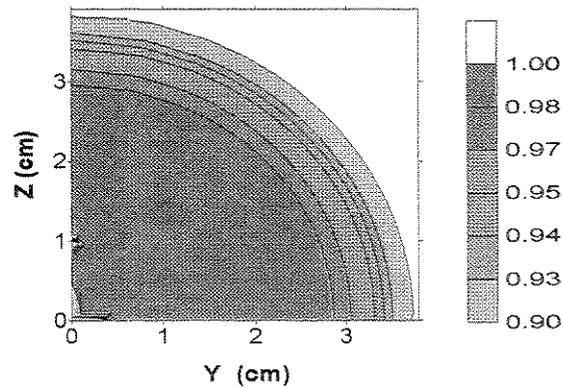


Figura 4.48: Comportamento da TAT média, experimento FCEII

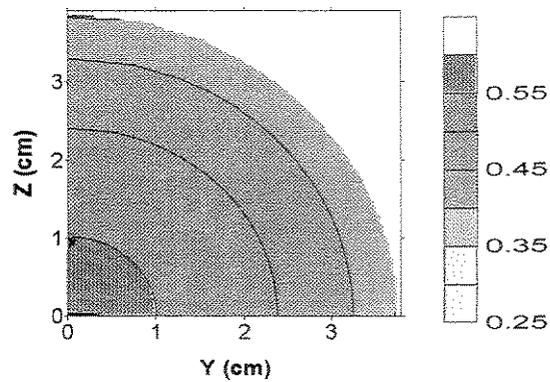
Apresenta-se na figura 4.49, a seqüência do resfriamento do fruto (posição 1), nota-se que no início do resfriamento o valor da TAT está entre 0,90 e 1,00 o que, em termos de temperatura, significa dizer que o fruto apresenta uma temperatura na faixa dos 22 a 25°C, na superfície e nas camadas mais próximas desta temperatura permanece quase inalterada. Observando-se a figura 4.45 (a), nota-se que para o experimento FBEII, o valor da TAT ao início do resfriamento é da ordem de 0,85 para a superfície e camadas bem próximas desta. O fruto na mesma posição, quando o fluxo de ar é menor, apenas apresenta sinais de resfriamento para o mesmo intervalo de tempo (5 min), o que demonstra claramente a influência da taxa de ar.

Quando o fruto encontra-se no instante em que TAT é 0,5 (115 min), na superfície do fruto TAT é de aproximadamente 0,40; o que em termos de temperatura significa dizer que a temperatura está em torno de 8°C (38% de diferença entre o centro e a superfície).

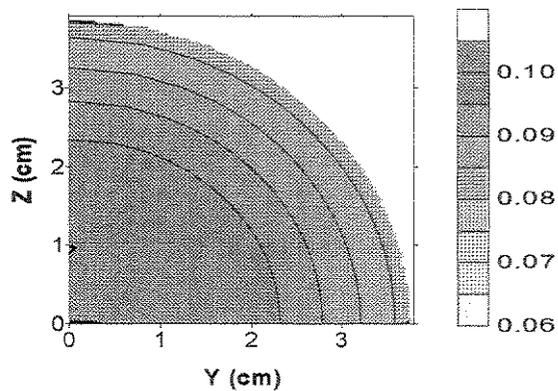
Já aos 310 min de iniciado o resfriamento, o fruto encontra-se a uma TAT de aproximadamente 0,125, ou seja, a temperatura no centro é de aproximadamente 3°C, por outro lado na superfície a TAT é da ordem de 0,07 ($T_s \approx 2^\circ\text{C}$). Esta diferença representa um valor do ΔT na ordem de aproximadamente 1°C (33%). Neste instante a temperatura da superfície encontra-se praticamente estabilizada com respeito à temperatura do ar.



(a)-t = 5 min



(b)-t = 115 min



(c)-t = 310 min

Figura 4.49: Distribuição da TAT no fruto para três instantes de tempo (ponto 1)

4.2.1.7- Comparação dos experimentos com laranja

Na tabela 4.59 mostra-se um resumo do valor de h_c , do erro (ERQ) e do desvio padrão (S), para cada um dos tratamentos aplicados e discutidos até aqui. Na tabela 4.60 mostram-se, a título de comparação, os valores experimentais e numéricos do tempo de resfriamento para $TAT_{1/2}$ e $TAT_{7/8}$.

Tabela 4.59: Valores do hc, de ERQ e do S, para todos os tratamentos (laranja)

Trat.	Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3		
	hc (W/m ² °C)	ERQ	S	hc (W/m ² °C)	ERQ	S	hc (W/m ² °C)	ERQ	S
FAEI	56,48	7,788 ⁻²	3,72 ⁻²	30,17	7,982 ⁻²	3,71 ⁻²	21,23	5,849 ⁻²	3,22 ⁻²
FBEI	21,50	1,860 ⁻¹	6,02 ⁻²	13,52	6,520 ⁻²	3,15 ⁻²	9,58	1,110 ⁻¹	4,06 ⁻²
FCEI	12,34	1,309 ⁻²	1,32 ⁻²	9,21	7,320 ⁻²	3,12 ⁻²	8,40	6,711 ⁻²	2,96 ⁻²
FAEII	26,75	1,470 ⁻¹	4,70 ⁻²	13,31	4,770 ⁻²	2,71 ⁻²	9,83	1,040 ⁻²	1,22 ⁻²
FBEII	13,01	1,331 ⁻¹	4,11 ⁻²	9,67	3,405 ⁻²	2,14 ⁻²	6,03	1,641 ⁻¹	4,12 ⁻²
FCEII	10,70	2,171 ⁻¹	5,42 ⁻²	7,71	1,370 ⁻¹	3,71 ⁻²	5,89	1,472 ⁻¹	3,94 ⁻²

Como pode ser observado na tabela anterior, os valores de hc variam para cada ponto num mesmo experimento. Da mesma forma existe uma diferença sensível no valor do hc entre os tratamentos. Ou seja, à medida que diminui a taxa de ar, diminui o valor de hc. Também observa-se que quando usadas as embalagens EII, o coeficiente hc sofre uma diminuição de até 50 % (tratamento FAEI e FAEII), de 39% (entre FBEI e FBEII), e de 13% (entre FCEI e FCEII), para o ponto 1. Nos demais pontos a tendência à diminuição do hc, que foi chamado de aparente, segue aproximadamente o mesmo comportamento.

A diferença do valor de hc entre os tratamentos, é devida à influência da taxa de ar e a área efetiva para a passagem do ar, nas embalagens. Estes fatores têm uma influência significativa, como já havia sido discutido na seção 4.1, no tempo de resfriamento.

Comprovou-se que o aumento ou diminuição do tempo de resfriamento, está diretamente relacionado com as taxas de transferência de calor, as quais são representadas pelo valor de hc. Este parâmetro também apresenta uma diminuição ou um acréscimo, em dependência do fluxo de ar e da área de abertura das embalagens. Sabe-se que este coeficiente está relacionado diretamente com a velocidade do ar, sendo tanto maior, quanto maior seja a velocidade, e a velocidade que ao mesmo tempo é diretamente proporcional ao fluxo de ar (ASHRAE, 1994).

Observou-se que entre todos os tratamentos e pontos, onde foi monitorada a temperatura, o valor do erro entre os valores experimentais e os computados com o modelo, estiveram na faixa de 4% a 16%, aproximadamente, sendo em alguns casos na ordem de 1%.

Valores de erro na ordem de 5% a 20%, foram obtidos por Dincer (1995b), no ajuste do coeficiente de transferência de calor, aplicando um modelo matemático validado com os dados

experimentais do resfriamento de figo num sistema de ar forçado ($v= 1,10$ a $2,5$ m/s; $T_a = 4^\circ\text{C}$).

Na literatura reportam-se valores de h_c na faixa de 8 a 62 $\text{W/m}^2\text{C}$, obtido por diferentes métodos e aplicado a frutas com geometria aproximadamente esférica. Como já foi discutido, o valor deste parâmetro está afetado por múltiplos fatores (Bennet *et al.*, 1966; Baird & Gaffney, 1976; Dincer, 1995a; Dincer & Genceli, 1994; Dincer, 1995b).

A adequada concordância entre os valores numéricos e experimentais da TAT, demonstram-se no valor do tempo de resfriamento (Tabela 4.60). A diferença entre o tempo de resfriamento obtido experimentalmente e o tempo obtido de forma teórica oscilou entre $1,96$ a $10,44\%$ (ponto 1, $TAT_{7/8}$), entre $2,38$ a $9,25\%$ (ponto 2), e $1,63$ a $11,12\%$ (ponto 3), entre todos os experimentos.

Em função da temperatura significa dizer que para o ponto 1, quando atingida a condição $TAT_{7/8}$, a diferença de temperatura (ΔT) entre todos os experimentos, esteve entre $0,2$ e $0,7^\circ\text{C}$. Para o ponto 2 o valor da ΔT oscilou entre $0,1$ e $0,5^\circ\text{C}$, e para o ponto 3, entre $0,1$ e $0,8^\circ\text{C}$. Observe-se que a diferença entre os valor teórico e o experimental não atingiu em nenhum dos experimentos o valor de 1°C , o que confirma que realmente o modelo matemático aplicado é adequado para caracterizar o processo de transferência de calor que dá-se durante o resfriamento dos frutos com ar forçado.

Tabela 4.60: Tempo de resfriamento (min) experimental e numérico (experimentos com laranja)

Trat.	Ponto 1				Ponto 2				Ponto 3			
	Experimental		Numérico		Experimental		Numérico		Experimental		Numérico	
	$TAT_{1/2}$	$TAT_{7/8}$	$TAT_{1/2}$	$TAT_{7/8}$	$TAT_{1/2}$	$TAT_{7/8}$	$TAT_{1/2}$	$TAT_{7/8}$	$TAT_{1/2}$	$TAT_{7/8}$	$TAT_{1/2}$	$TAT_{7/8}$
FAEI	37,5	107,5	45,0	105,0	50,0	122,5	60,0	135,0	67,5	170,0	70,0	175,0
FBEI	57,5	192,5	70,0	180,0	85,0	262,5	95,0	245,0	117,5	282,5	110,0	305,0
FCEI	100,0	250,0	100,0	255,0	110,0	307,5	120,0	320,0	132,5	337,5	130,0	345,0
FAEII	57,5	167,5	65,0	150,0	90,0	260,0	95,0	245,0	112,5	300,0	115,0	300,0
FBEII	92,5	297,5	95,0	250,0	117,5	322,5	120,0	315,0	170,0	395,5	170,0	440,0
FCEII	117,5	307,5	110,0	285,0	137,5	387,5	140,0	370,0	180,0	405,0	175,0	460,0

Na tabela a seguir apresenta-se o valor em porcentagem da diferença entre o valor de tempo obtido de forma experimental e com a aplicação do modelo matemático. Verifica-se que a diferença oscilou em torno de 16% a 2% em todos os experimentos.

Tabela 4.61: Diferença (%) entre o tempo de resfriamento teórico e experimental

Trat.	Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3	
	TAT _{1/2}	TAT _{7/8}	TAT _{1/2}	TAT _{7/8}	TAT _{1/2}	TAT _{7/8}
FAEI	16,00	2,3	16,6	9,2	3,5	2,8
FBEI	17,8	6,5	10,5	6,6	6,3	7,3
FCEI	0,0	1,9	8,3	3,9	1,8	2,2
FAEII	11,5	10,0	5,2	5,7	2,1	0,0
FBEII	2,6	15,9	2,1	2,3	0,0	10,0
FCEII	6,4	7,3	1,8	4,5	2,7	11,9

Como já havia sido discutido no capítulo 2, para o mesmo comprimento característico e temperatura do ar, o coeficiente de transferência de calor convectivo (h_c) é proporcional à taxa de ar. A variação do coeficiente de transferência de calor também é influenciada pela velocidade do ar, porém, para maior velocidade, maior será o valor deste coeficiente.

Provavelmente ao longo do leito ocorre uma diminuição da velocidade do escoamento do ar, influenciada pela perda de carga, e ao mesmo tempo um aumento da temperatura do ar de resfriamento, o que traduz-se em taxas de transferência de calor menores e, ao mesmo tempo, maiores tempos de resfriamento, como já foi discutido na seção 4.1.

Fraser & Otten (1992) obtiveram uma diferença de aproximadamente 28% entre o valor teórico e o experimental, do tempo dos sete oitavos do resfriamento de pêras resfriadas num sistema com ar forçado ($h_c = 25 \text{ W/m}^2\text{°C}$, $T_a = 3\text{°C}$, $v = 1,5 \text{ a } 5 \text{ m/s}$). Os autores aplicaram a solução numérica da equação de transferência de calor em coordenadas esféricas.

Ainda estes autores comprovaram experimentalmente a existência de um diferencial de temperatura entre três posições diferentes ao longo do leito de frutas. A diferença expressa em função da TAT, variou em torno de 0,19 a 0,33; aproximadamente. O ponto 1 (fruto colocado na face mais próxima da entrada do ar), atingiu o tempo dos sete oitavos do resfriamento (TAT_{7/8}), em aproximadamente 60 min. Por sua parte o ponto 3 (fruto colocado na seção mais afastada da entrada do ar), atingiu a condição de resfriamento num tempo maior que 83 min. Porém a diferença representa um valor aproximadamente 40% maior para o ponto 3, com respeito ao ponto 1.

Dincer (1995a) comprovou que o aumento da velocidade em função do aumento da taxa de

ar, fez diminuir o tempo de resfriamento de uvas resfriadas num sistema com ar foçado ($T = 4^{\circ}\text{C}$ e $v = 1$ a 2 m/s). Esta diminuição do tempo de resfriamento foi da ordem de em 21% a 23%, para $TAT_{1/2}$ e $TAT_{7/8}$, respectivamente.

4.2.2- Experimentos com banana

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos da validação do modelo para os experimentos com banana.

4.2.2.1-Experimento FAEI

Na figura 4.50, apresentam-se as curvas obtidas com a aplicação do modelo teórico durante o resfriamento de banana, para o tratamento FAEI. Observa-se que existe uma adequada concordância entre os pontos experimentais e os pontos numéricos.

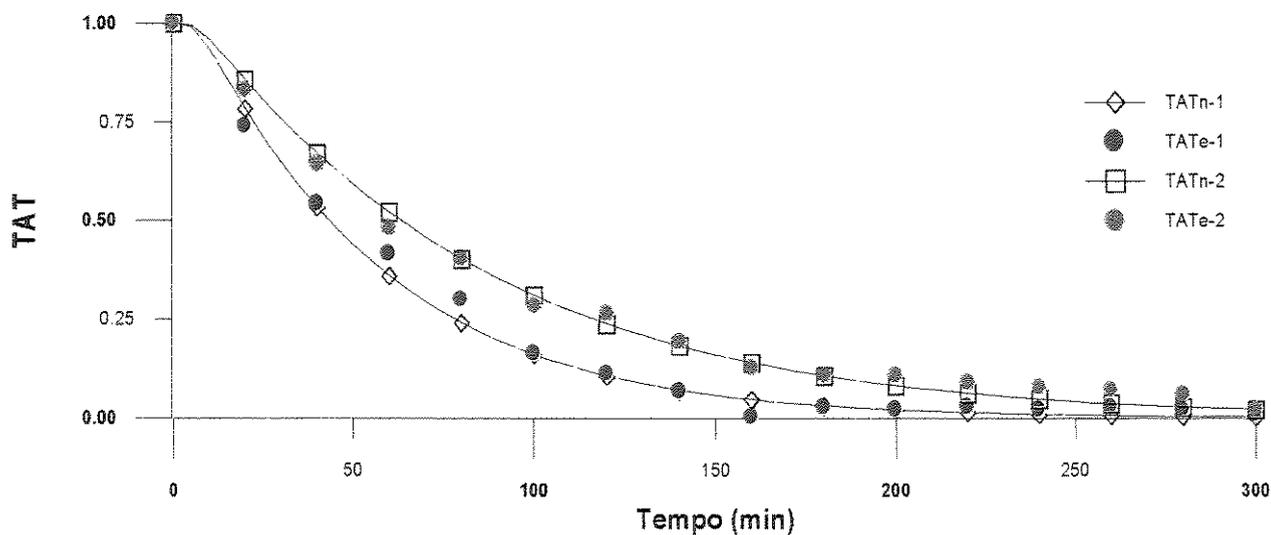


Figura 4.50: Comportamento da TAT experimental e teórica, experimento FAEI (banana)

Observa-se na tabela 4.62, que o valor do erro e do desvio padrão são baixos, em média $3,62^{-2}$ e $2,44^{-2}$. Estes valores permitem afirmar que o ajuste de hc apresenta uma concordância adequada com o fenômeno em estudo. O decréscimo do valor de hc entre o ponto 1 e 2 é aproximadamente de 40%.

Tabela 4.62: Valores do h_c , de ERQ e do S, experimento FAEI (banana)

Trat.	Ponto 1			Ponto 2		
	h_c (W/m ² °C)	ERQ	S	h_c (W/m ² °C)	ERQ	S
FAEI	13,72	4,82 ⁻²	2,83 ⁻²	8,23	2,43 ⁻²	2,05 ⁻²

Na figura 4.51 apresentam-se as curvas em função da TATm e na tabela 4.63 o valor do tempo de resfriamento e da diferença com respeito a TAT.

Tabela 4.63: Tempo de resfriamento (min) determinado com TATm e diferença com respeito a TATe

FAEI	Tempo de resfriamento para TATm (min)		Diferença entre TATm e TAT (%)	
	1	2	1	2
TAT _{1/2}	30,0	50,0	-33,0	-23,0
TAT _{7/8}	95,0	115,0	-17,1	-12,2

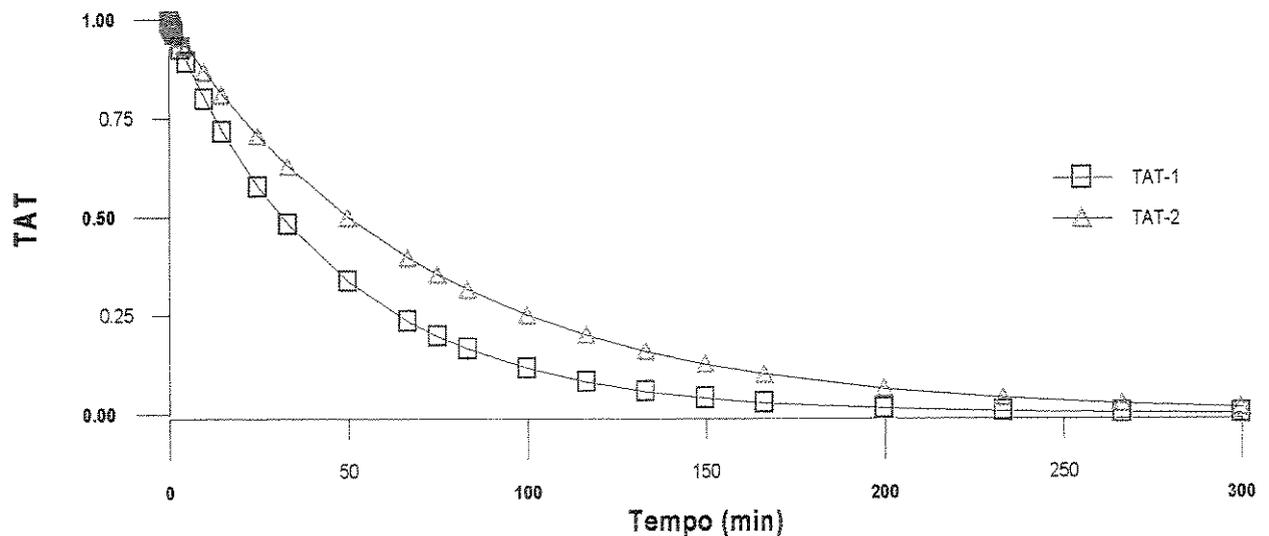


Figura 4.51: Comportamento da TAT média, experimento FAEI

Na figura 4.52, apresenta-se a distribuição da temperatura em função da TAT, para três instantes de tempo: no início do resfriamento, no tempo de meio resfriamento (TaT_{1/2}), e o tempo dos sete oitavos do resfriamento (TAT_{7/8}), para o ponto 1.

Como pode ser observado, para o caso de resfriamento de banana, as linhas que representam a distribuição de temperatura comportam-se um pouco diferentes do que quando apresentadas as

figuras do resfriamento de laranja. Nota-se um fato curioso: o resfriamento das bananas não é homogêneo, ou seja, observando-se a figura 4.52 (a), na região superior, no extremo (ponta) da banana, o valor da TAT está em torno de 0,70; o que em termos de temperatura significa que nessa parte da fruta, a temperatura na superfície e nas camadas mais próximas é da ordem de 19°C. No entanto, nas outras regiões da fruta ($Z = 7,5$ cm), o valor da TAT está na ordem de 0,83; o que representa temperaturas na ordem de 22°C, incluindo a superfície. Este fato pode ser explicado pela quantidade de massa que apresenta a fruta na região superior, ou seja, na ponta, o que se deduz que as pontas resfriam-se num menor tempo que o restante do fruto. Observa-se que este fenômeno está muito bem representado por este tipo de mapeamento. Esta mesma tendência apresenta-se nas figuras 4.52 (b) e (c), observando-se que a medida que o fruto resfria-se a escala de cores passa a ser amarela intenso.

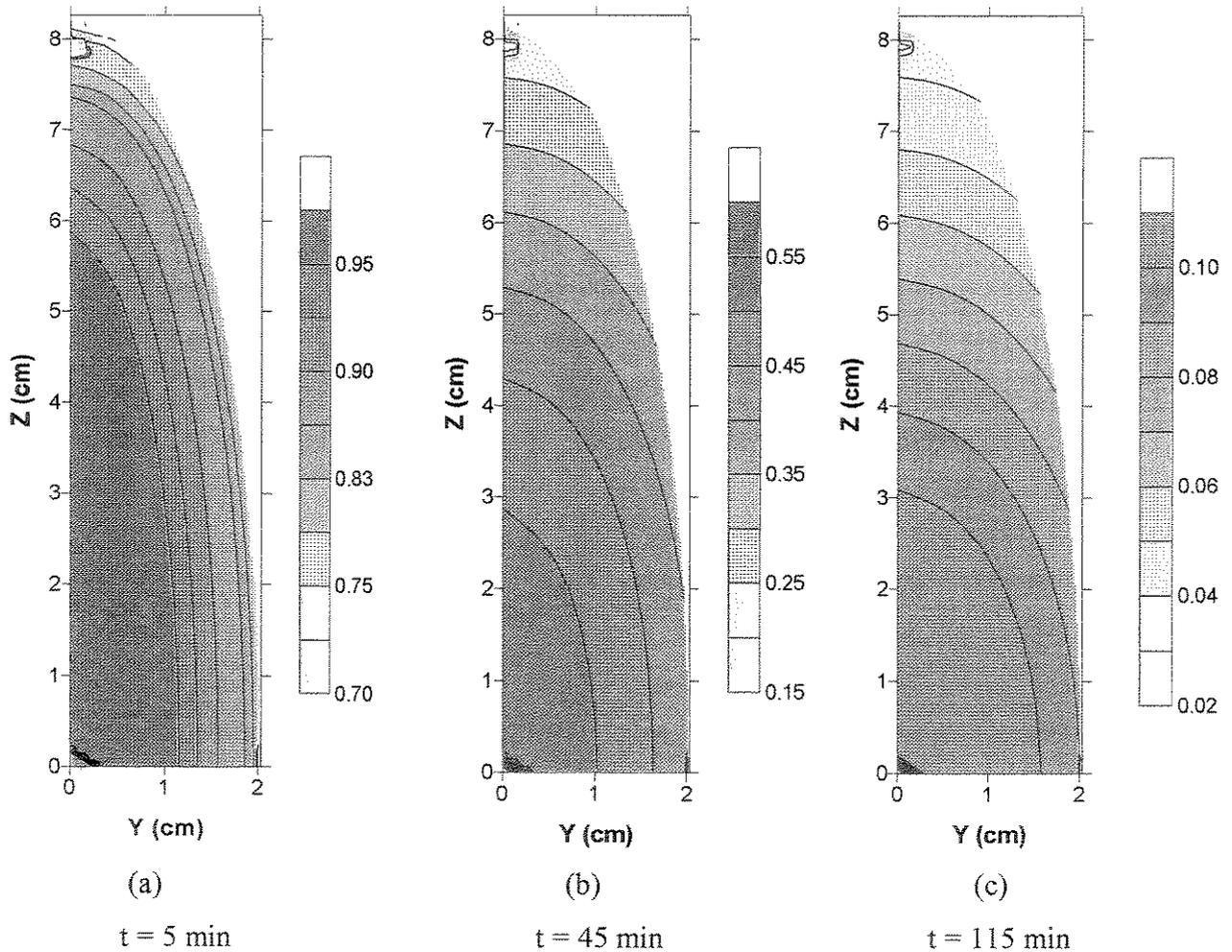


Figura 4.52: Distribuição da TAT no fruto para três instantes de tempo (ponto 1)

Na figura 4.52 (a), observa-se que quando no centro é atingida o valor de TAT de 0,5, na

ponta o valor de TAT é de 0,15 ($T_s \approx 9^\circ\text{C}$), e nas outras regiões perto da superfície, a TAT está na ordem de 0,45 à 0,35 (temperaturas na faixa de 12 a 14°C). No entanto no centro a temperatura encontra-se na ordem dos 17°C.

Na figura 4.53 (a, b e c), apresenta-se a seqüência do resfriamento para o ponto 2, observando-se a mesma tendência analisada na figura anterior. As pontas apresentam um resfriamento mais rápido que o restante do fruto.

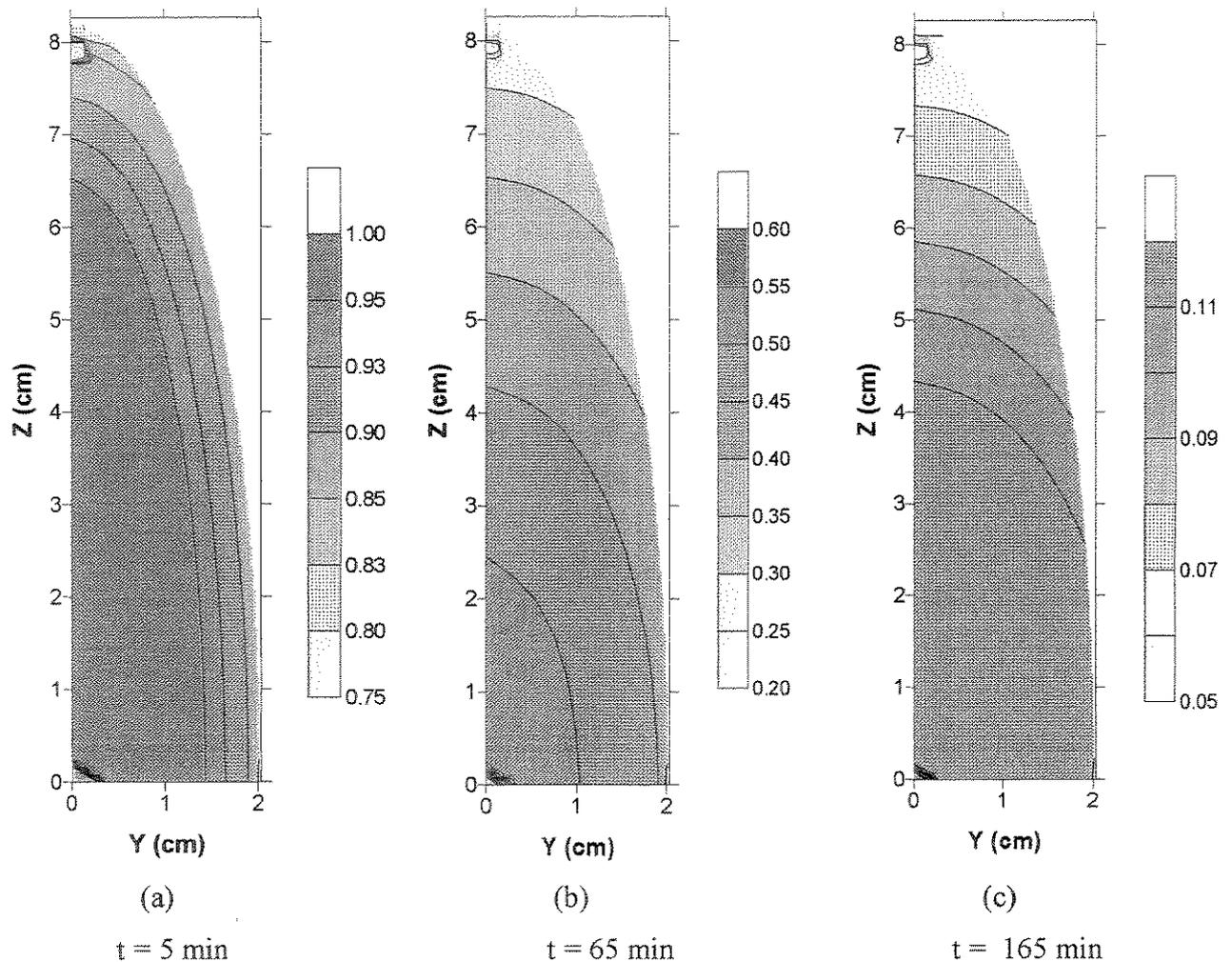


Figura 4.53: Distribuição da TAT no fruto para três instantes de tempo (ponto 2)

Nas figuras 4.52 e 4.53, pode ser observado que entre o centro da fruta e as regiões próximas à superfície, embora o resfriamento não seja completamente homogêneo, a diferença oscila na ordem de 9°C a 2°C, durante o resfriamento. Estes valores representam uma diferença na ordem de 40 a 35%, entre o centro e a superfície, aproximadamente.

4.2.2.2- Experimento FCEI

Na figura 4.54 apresentam-se as curvas obtidas na aplicação do modelo, e os pontos experimentais. Na tabela 4.64, apresenta-se o valor do erro e do desvio padrão obtido do ajuste do resultado teórico ao experimental.

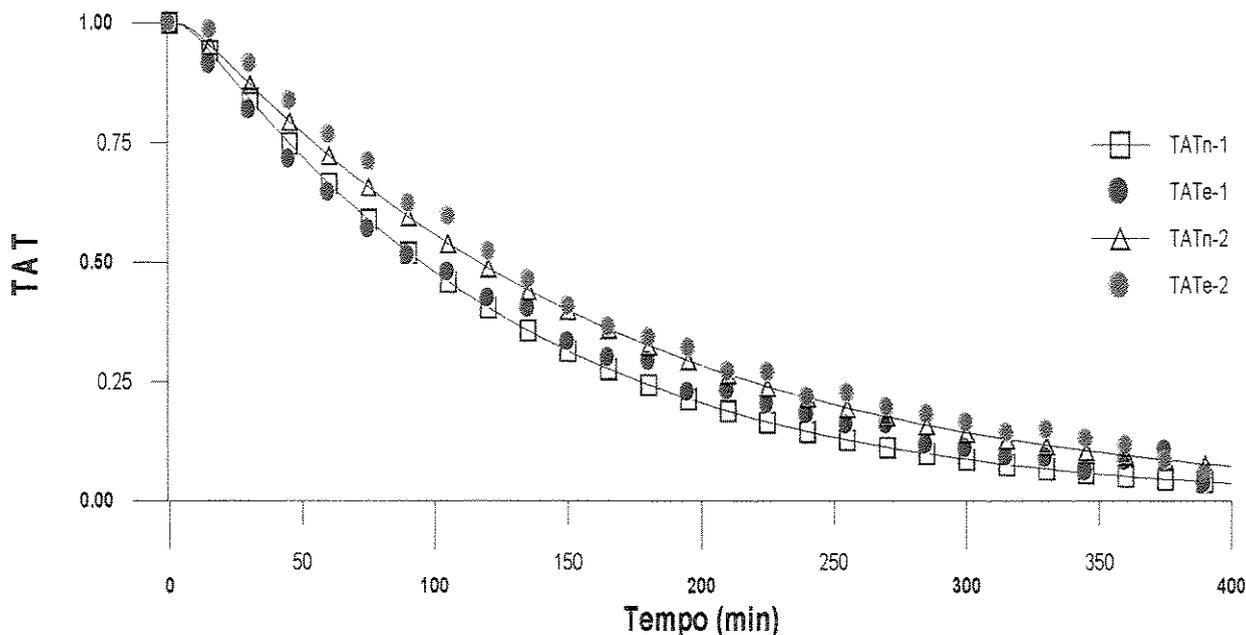


Figura 4.54: Comportamento da TAT experimental e teórica, experimento FCEI

A adequada concordância entre os pontos teóricos e experimentais, está refletida no valor do erro, que em média entre os dois pontos é de $9,83^{-2}$, e o desvio padrão que é de $3,55^{-2}$. O decréscimo no valor de hc entre o ponto 1 e 2, é da ordem de 79%.

Tabela 4.64: Valores do hc , de ERQ e do S, experimento FCEI

Trat.	Ponto 1			Ponto 2		
	hc ($W/m^2 \cdot C$)	ERQ	S	hc ($W/m^2 \cdot C$)	ERQ	S
FCEI	6,15	$1,242^{-1}$	$4,08^{-2}$	4,56	$7,25^{-2}$	$3,02^{-2}$

O valor da TAT média é apresentada na figura 4.55, o valor do tempo de resfriamento e da diferença entre TAT_m e TAT é apresentada na tabela 4.65.

Tabela 4.65: Tempo de resfriamento (min) determinado com TATm e diferença com respeito a TATe

FCEI	Tempo de resfriamento para TATm (min)		Diferença entre TATm eTAT (%)	
	1	2	1	2
TAT _{1/2}	60,0	95,0	-20,1	-13,0
TAT _{7/8}	210,0	270,0	-12,0	-13,1

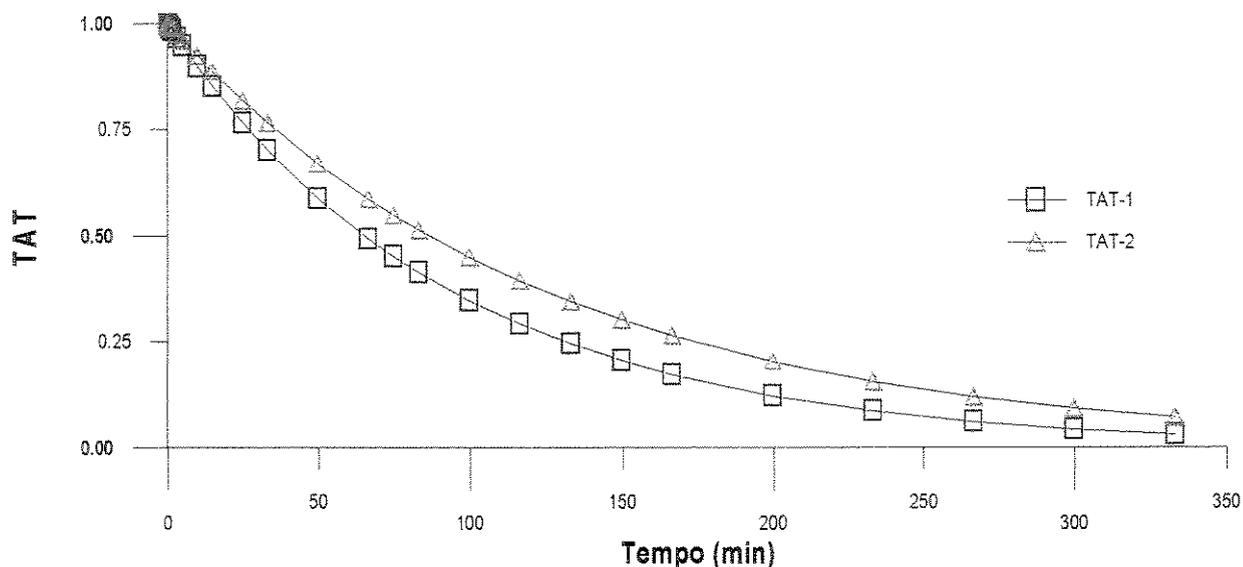


Figura 4.55: Comportamento da TAT média, experimento FCEI

Na figura 4.56 (a, b e c), apresenta-se a seqüência do resfriamento, notando-se a mesma situação que foi discutida no experimento FAEI, as pontas sempre resfriam-se muito mais rápido que o restante do fruto. Nota-se também que na figura 4.55 (a), o valor da TAT na ponta está na ordem de 0,80; no entanto, observando a figura 4.52 (a), a TAT é da ordem de 0,70. Ou seja, para o fruto na mesma posição, quando a taxa de ar diminui (de 1.933 para 1.160 m³/s), o valor da TAT é maior, o que se traduz em maiores tempos de resfriamento, como foi discutido na seção 4.1. Este fenômeno é bem caracterizado pela distribuição da TAT, partindo dos dados de temperatura no centro.

Aos 75 min de iniciado o resfriamento, o fruto apresenta valores de TAT que variam de 0,30 à 0,50; aproximadamente, distribuídos em regiões não uniformes, devido à forma irregular da banana. Já aos 240 min a distribuição da temperatura oscila para taxas que vão desde 0,06 na superfície, até 0,12 no centro, representando temperaturas na ordem de aproximadamente 7°C, nas pontas, e entre 8 e 9°C, nas regiões próximas ao centro.

Como o comportamento da distribuição de temperatura em função da TAT, para o ponto 2, foi muito semelhante à obtida para o ponto 1, apresentaram-se apenas os resultados para o ponto 1.

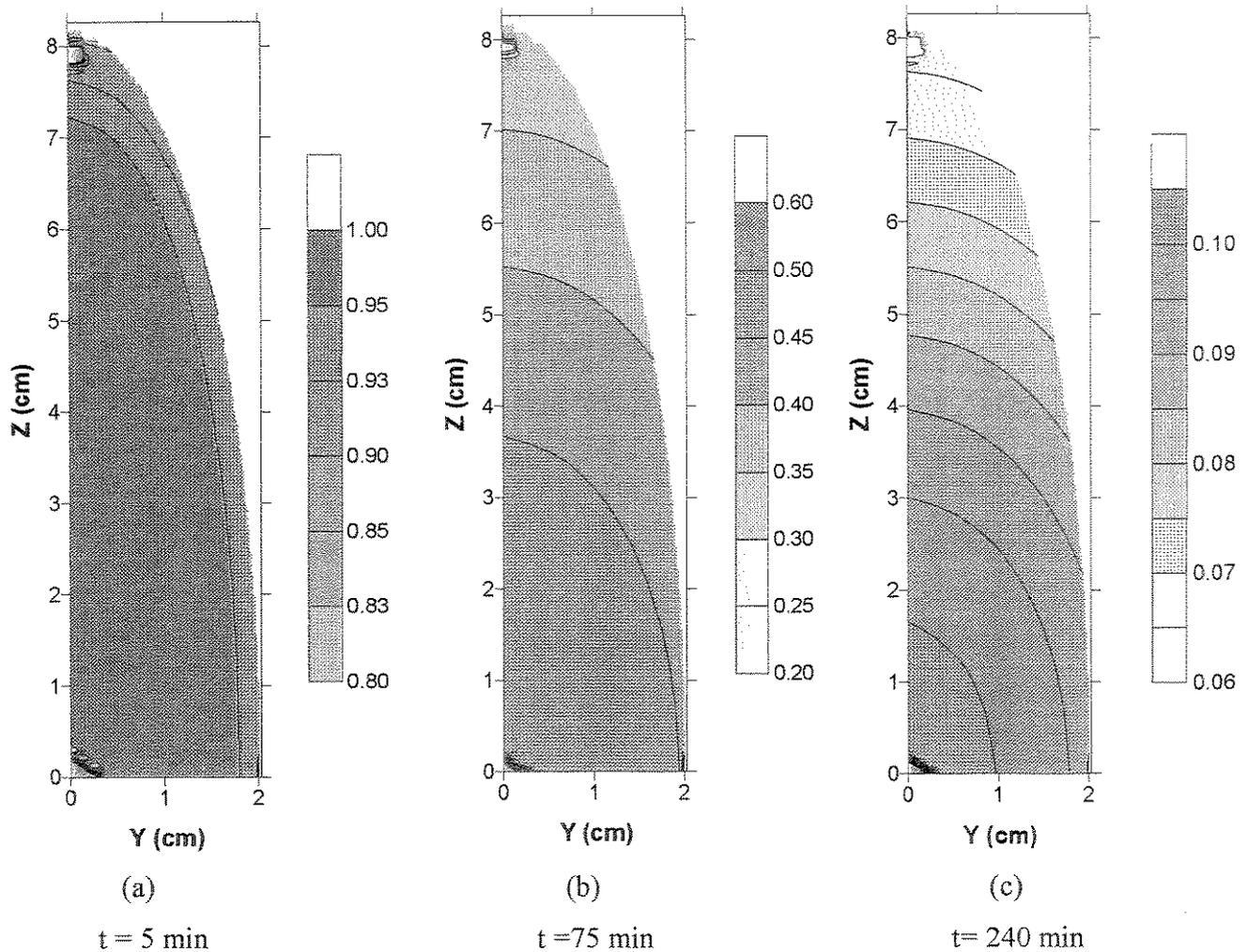


Figura 4.56: Distribuição da TAT no fruto para três instantes de tempo (ponto 1)

Como pode-se notar no gráfico acima, entre o centro e as camadas próximas à superfície, incluindo existe um diferencial de temperatura, como já foi discutido, que está na ordem de 2°C a 5°C, no início do resfriamento e vai diminuindo até valores entre 1 e 2°C. Esta diferença representa valores na ordem de 30% a 22%.

4.2.2.3- Experimento FAEII

Na figura 4.57 mostra-se o comportamento da TAT, obtido com a aplicação do modelo

matemático, e os pontos experimentais. Neste experimento os frutos foram acondicionados em embalagens com 3,5% de área efetiva para a passagem de ar, o que representa uma área aproximadamente 10 vezes menor do que quando usada a embalagem EI.

Os valores de hc obtidos para cada ponto, assim como o valor do erro (ERQ), e do desvio padrão são mostrados na tabela 4.66.

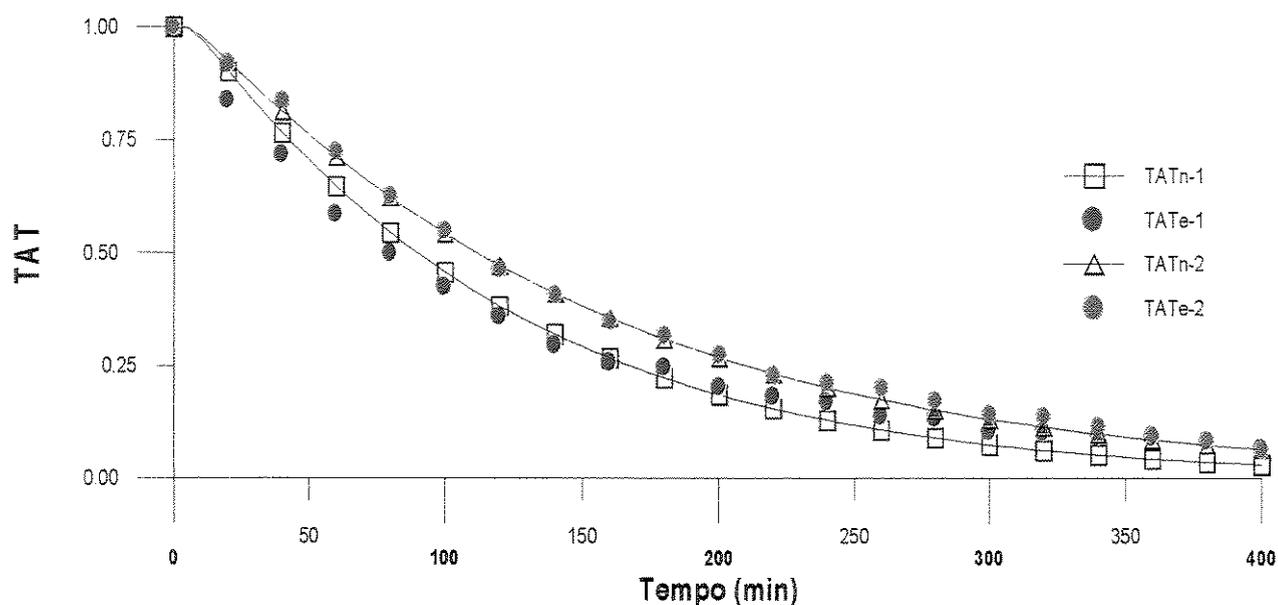


Figura 4.57: Comportamento da TAT experimental e teórica, experimento FAEII

Observa-se que a variação do valor de hc está na ordem de 23%, entre os dois pontos. Já o valor médio do erro é de $8,05^{-2}$, e o valor médio do S de $2,83^{-2}$.

Tabela 4.66: Valores do hc , de ERQ e do S , experimento FAEII

Trat.	Ponto 1			Ponto 2		
	hc ($W/m^2 \cdot C$)	ERQ	S	hc ($W/m^2 \cdot C$)	ERQ	S
FAEII	5,35	$1,441^{-1}$	$4,27^{-2}$	4,12	$1,70^{-2}$	$1,46^{-2}$

Na figura 4.58 mostra-se o comportamento da TAT_m e na tabela 4.67 o valor do tempo de resfriamento e da diferença entre TAT_m e TAT_e .

Tabela 4.67: Tempo de resfriamento (min) determinado com TATm e diferença com respeito a TATe

FAEII	Tempo de resfriamento para TATm (min)		Diferença entre TATm e TAT (%)	
	1	2	1	2
TAT _{1/2}	60,0	90,0	-20,1	-25,0
TAT _{7/8}	245,0	300,0	-19,1	-6,2

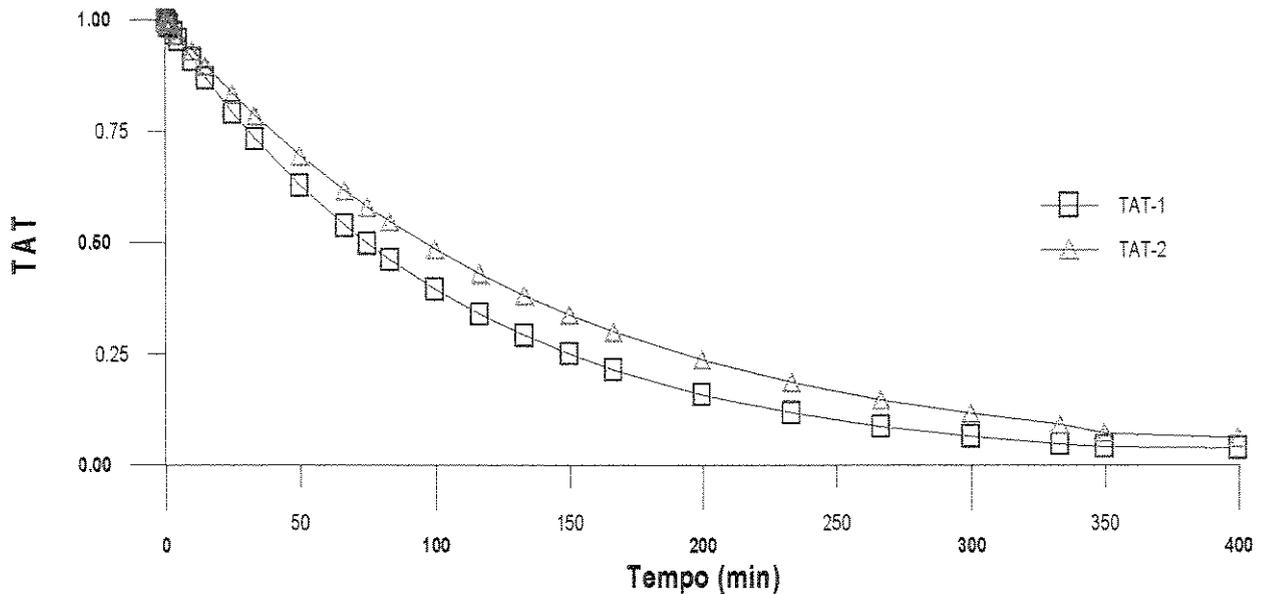


Figura 4.58: Comportamento da TAT média, experimento FAEII

Na figura 4.59, apresenta-se o comportamento da TAT, na seqüência do resfriamento. Na figura 4.59 (a), ao início do resfriamento a ponta do fruto apresenta valores de TAT na faixa de 0,83; no entanto no resto do fruto o valor de TAT oscila entre 0,93 à 1,00. Ou seja, a temperatura ainda permanece praticamente igual à temperatura inicial ($T_i = 28,8^{\circ}\text{C}$).

Já aos 75 min (TAT_{1/2}), os valores da TAT oscilam entre 0,35 (para a ponta), o que se traduz em valores de temperatura da ordem de 13°C , e 0,55 a 0,55 para as regiões próximas ao centro, o que em termos de temperatura representa entre 17 a 18°C .

Quando o fruto atinge o tempo dos sete oitavos do resfriamento, para a ponta e as regiões mais próximas à superfície, as taxas de temperatura são da ordem de 0,05 e 0,12; traduzindo-se em temperaturas de aproximadamente 9°C para o centro, 7°C para as pontas, e valores entre 8°C e 9°C , para as outras regiões.

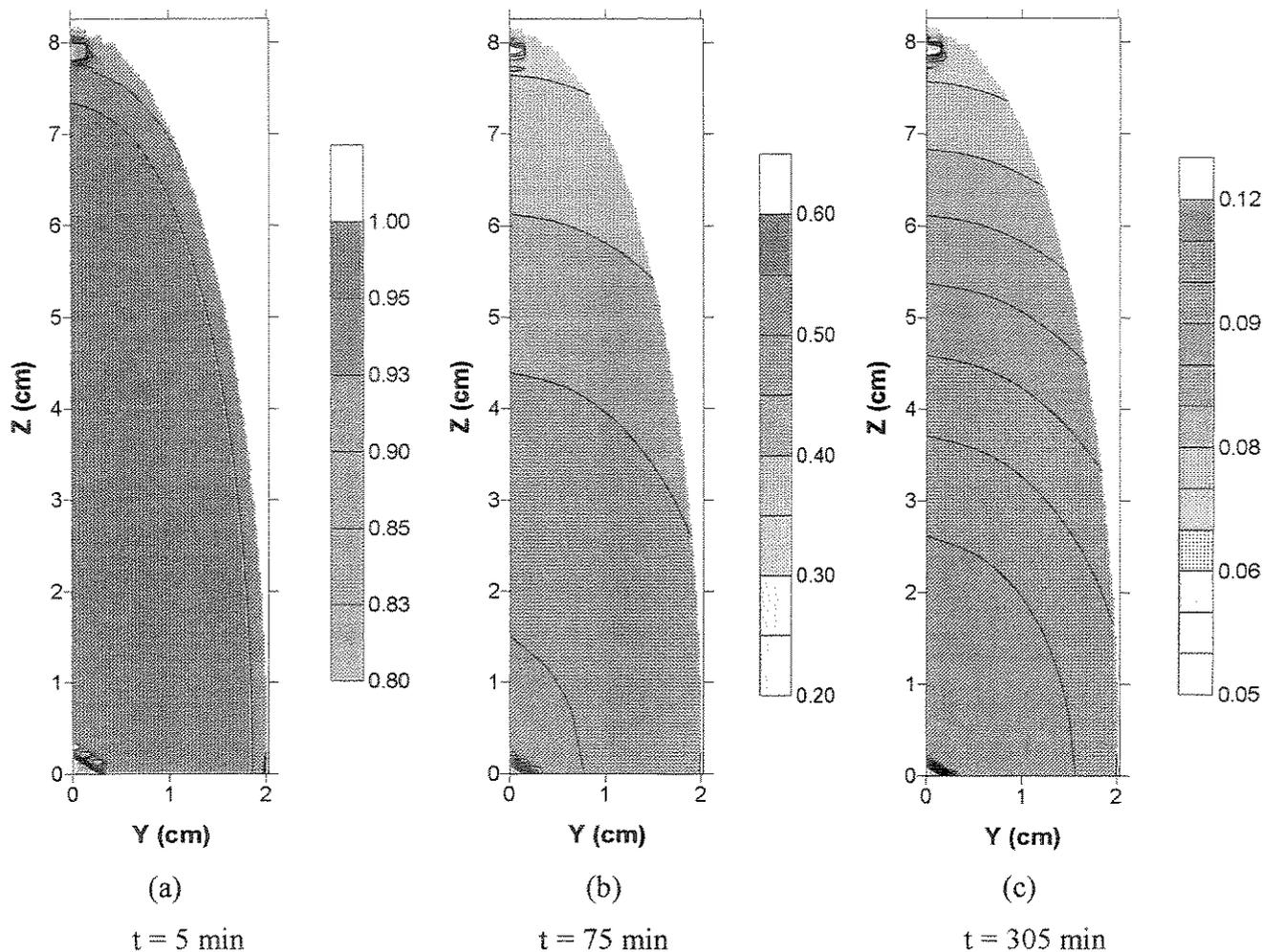


Figura 4.59: Distribuição da TAT no fruto para três instantes de tempo (ponto 1)

A diferença entre as taxas de temperatura entre o centro e a superfície traduzem-se em valores que representam uma diferença entre 27% a 0,22%, durante o resfriamento.

4.2.2.4- Experimento FCEII

Os valores de TATn obtidos com a aplicação do modelo matemático assim como os valores da TATE, calculados a partir dos dados experimentais, são mostrados na figura 4.60.

Observa-se que existe uma concordância adequada entre os pontos numéricos e experimentais, mantendo sempre a tendência da existência de uma diferença entre o ponto 1 e 2, situação esta devida à posição do fruto com respeito à entrada do fluxo de ar resfriado (Figura 4.60).

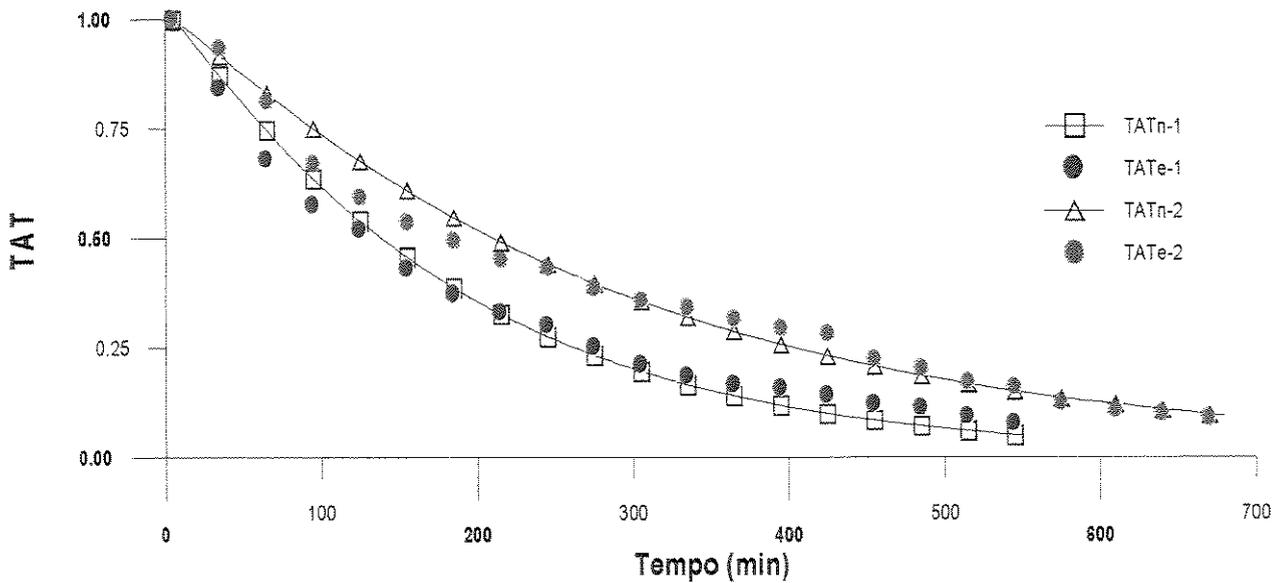


Figura 4.60: Comportamento da TAT experimental e teórica, experimento FCEII

Na tabela 4.68 apresentam-se os valores do erro, o qual apresentou em média um valor de $1,601^{-1}$, por sua parte o desvio padrão foi em média de $3,65^{-2}$. A diminuição do valor do hc entre o ponto 1 e 2 foi de aproximadamente 28%.

Tabela 4.68: Valores do hc , de ERQ e do S, experimento FCEII

Trat.	Ponto 1			Ponto 2		
	hc ($W/m^2 \cdot C$)	ERQ	S	hc ($W/m^2 \cdot C$)	ERQ	S
FAEII	3,72	$1,371^{-1}$	$3,53^{-2}$	2,68	$1,832^{-1}$	$3,78^{-2}$

Na figura 4.61 apresenta-se o valor da TAT_m e na tabela 4.69 o valor do tempo de resfriamento e da diferença entre TAT e TAT_m .

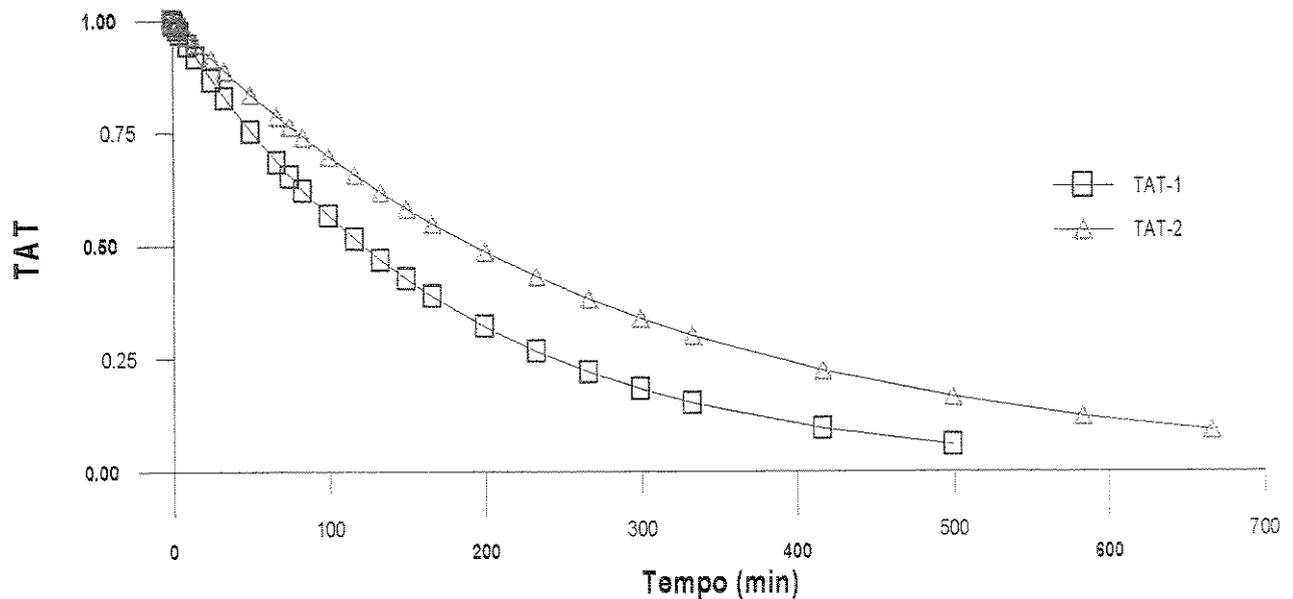


Figura 4.61: Comportamento da TAT média, experimento FCEII

Tabela 4.69: Tempo de resfriamento (min) determinado com TATm e diferença com respeito a TATe

FAEII	Tempo de resfriamento para TATm (min)		Diferença entre TATm e TAT (%)	
	1	2	1	2
TAT _{1/2}	110,0	180,0	-21,2	-5,3
TAT _{7/8}	350,0	510,0	-23,1	-9,0

Na figura 4.62 apresenta-se a seqüência do resfriamento para o fruto na posição 1. Nota-se que o valor da TAT é da ordem de 0,93 na região da ponta (Figura 4.62 (a)), o que em termos de temperatura representa aproximadamente 24°C. Observando-se a figura 4.59 (a), nota-se que o valor da TAT está na ordem de 0,83. Esta diferença demonstra a influência que têm, no tempo de resfriamento, a diminuição da taxa de ar, que como pode ser observado é muito bem representada pelo modelo aplicado.

Depois de 140 min, o valor da TAT oscila entre 0,30 para a ponta (temperaturas na ordem de 9°C), e de 0,40 a 0,55; para as regiões que vão desde a superfície até o centro (temperaturas na ordem de 13°C), observando-se claramente a forma em que acontece o resfriamento de frutas com relação de forma onde $L_2 > L_1$, como é o caso da banana.

Da mesma forma observando-se a figura 4.59 (c), os valores da TAT oscilam entre 0,09 para a

ponta ($T \approx 7^{\circ}\text{C}$), e de 0,10 para 0,12 ($T \approx 8$ a 9°C), em regiões mais próximas da superfície até o centro, o que indica a forte tendência ao resfriamento sempre mais rápido da ponta, até o centro, acompanhando a geometria do fruto.

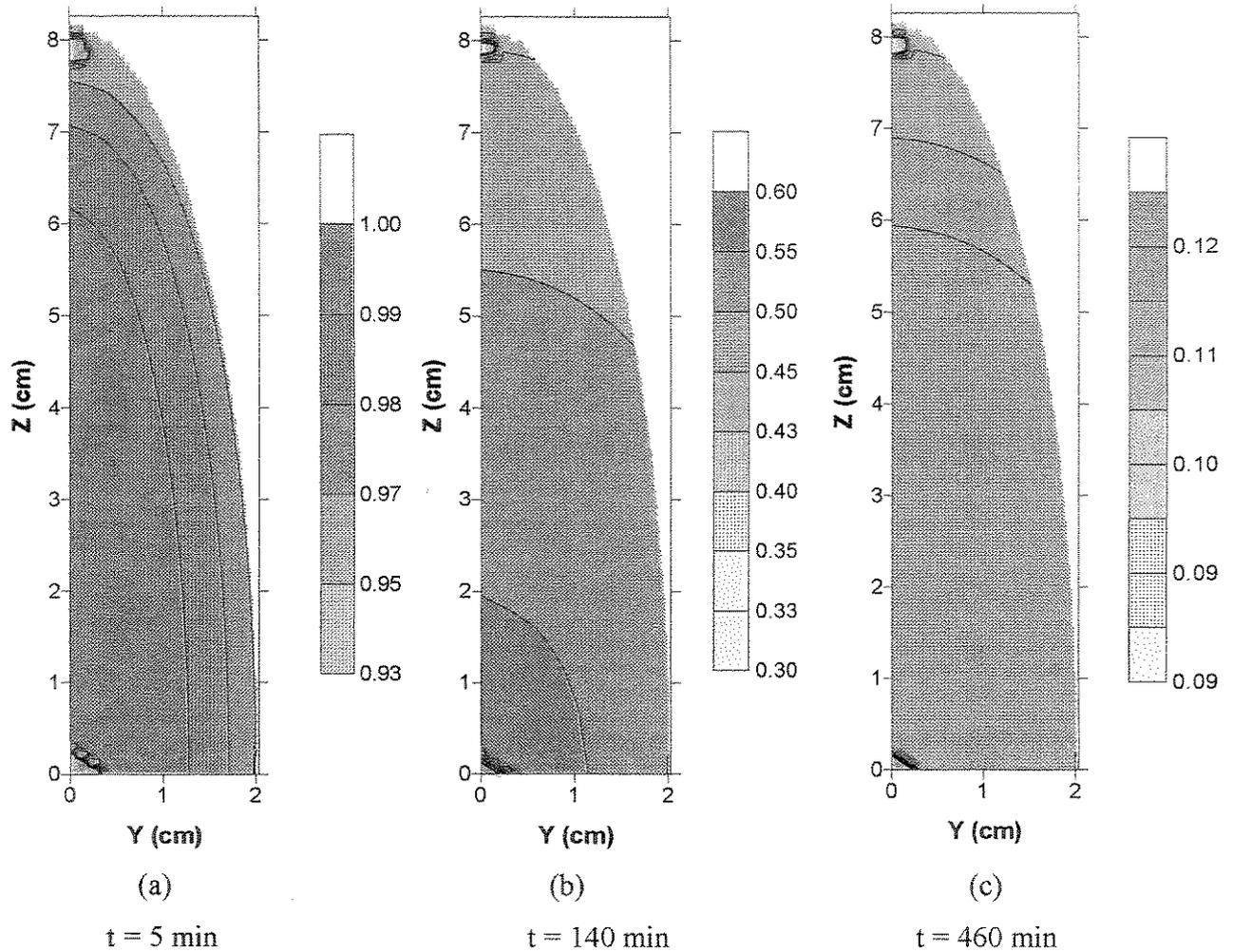


Figura 4.62: Distribuição da TAT no fruto para três instantes de tempo (ponto 1)

Neste experimento a diferença entre a temperatura na superfície e no centro oscila na ordem de 30% a 22%, durante o resfriamento das frutas.

4.2.2.5- Comparação entre todos os experimentos com banana

Na tabela 4.70 apresenta-se um resumo do valor do h_c , do erro e do desvio padrão em todos os tratamentos aplicados para o resfriamento de banana.

Tabela 4.70: Valores do hc, de ERQ e do S, em todos os tratamentos (banana)

Tratamento	Ponto 1			Ponto 2		
	hc (W/m ² °C)	ERQ	S	hc (W/m ² °C)	ERQ	S
FAEI	13,62	4,82 ⁻²	2,83 ⁻²	8,23	2,43 ⁻²	2,05 ⁻²
FCEI	6,15	1,241 ⁻¹	4,08 ⁻²	4,56	7,25 ⁻²	3,02 ⁻²
FAEII	5,35	1,440 ⁻¹	4,27 ⁻²	4,12	1,70 ⁻²	1,46 ⁻²
FCEII	3,72	1,371 ⁻¹	3,53 ⁻²	2,68	1,832 ⁻¹	3,78 ⁻²

Como pode-se observar na tabela acima, entre os tratamentos FAEI e FAEII, há diferença, a qual é da ordem de 60% (ponto 1), e de 50% (ponto 2). Entre os tratamentos FCEI e FCEII, a diferença é da ordem de 45% e de 41%, para o ponto 1 e 2, respectivamente.

Já entre os tratamentos FAEI e FCEI, a diferença no valor do hc é de 54 a 45% (ponto 1), e de 30 a 35% (ponto 2). As diferenças obtidas no valor do hc refletem muito bem a diminuição das taxas de transferência de calor, o que ao mesmo tempo está diretamente relacionado com o tempo de resfriamento.

Valores do hc entre 28 e 52 W/m²°C, e entre 18 e 26 W/m²°C foram obtidos por Dincer & Genceli (1994; 1995), durante o resfriamento com ar forçado de pepino (Ta = 4°C; v=1 a 2 m/s), aplicando um modelo em coordenadas cilíndricas. Os autores comprovaram que o valor de hc apresentou um decréscimo de até 47%, quando diminui a velocidade do ar.

Lima (1999), obteve valores de entre 12,73 a 14,16 W/m²°C, durante a secagem de banana Nanica numa estufa com ar forçado com temperaturas entre 30 e 60°C. O valor do erro esteve na ordem de 4%, com a aplicação de um modelo matemático em coordenadas esférica prolato e considerando propriedades térmicas variáveis com a temperatura.

O valor do erro, com a aplicação do modelo em coordenadas esférica prolato ao resfriamento de banana Prata no presente trabalho, esteve na ordem de 3 a 8%.

Lima (1999) refere que os valores do coeficiente hc, obtidos com o modelo esférica prolato aplicados à secagem de banana, foram em média de 15 a 30% menores, que quando obtidos por Queiroz (1994), considerando um modelo em coordenadas cilíndricas.

Valores do tempo de resfriamento na ordem de 25 min ($TAT_{7/8}$), foram obtidos por Ansari & Afaq (1986a), quando as frutas foram resfriadas num sistema de ar forçado com velocidade de 6 m/s ($T_a = 5^\circ\text{C}$; $T_i = 35^\circ\text{C}$). O tempo de resfriamento foi referido ao centro das frutas, considerando $h_c = 64,44 \text{ W/m}^2\text{°C}$ e $\alpha = 1,25 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Os autores obtiveram uma diferença entre o valor experimental e teórico (determinado com a aplicação de uma modelo em coordenadas cilíndricas), na ordem de 20%.

Na tabela 4.71 apresenta-se um resumo do valor do tempo de resfriamento obtido a partir dos valores numéricos e experimentais da TAT. A diferença entre o valor do tempo de resfriamento obtido de forma experimental e teórica nos experimentos com banana oscilou na faixa de 18% a 6,8% (ponto 1, $TAT_{7/8}$), e de 9,64% a 1,47%, para o ponto 2, no tempo dos sete oitavos do resfriamento.

Em termos de temperatura a diferença entre o valor teórico e o experimental para o ponto 1 (ΔT), oscilou entre todos os experimentos entre 0,13 a 0,90°C. Para o ponto 2 o valor da ΔT esteve entre 0,26 a 0,60°C. Com estes valores reafirma-se os resultados apresentados anteriormente, ou seja, a adequada concordância obtida demonstra que o modelo matemático caracteriza de forma adequada o processo de transferência de calor que acontece durante o resfriamento com ar forçado de banana.

Tabela 4.71: Tempo de resfriamento (min) experimental e numérico (experimentos com banana)

Trat.	Ponto 1				Ponto 2			
	Experimental		Numérico		Experimental		Numérico	
	$TAT_{1/2}$	$TAT_{7/8}$	$TAT_{1/2}$	$TAT_{7/8}$	$TAT_{1/2}$	$TAT_{7/8}$	$TAT_{1/2}$	$TAT_{7/8}$
FAEI	45,00	117,50	45,00	110,00	67,50	167,50	65,00	170,00
FCEI	77,50	240,00	80,00	215,00	110,00	312,50	105,00	285,00
FAEII	75,00	302,50	90,00	250,00	120,00	320,00	115,00	315,00
FCEII	142,50	462,50	140,00	390,00	192,50	555,00	210,00	590,00

Para a maior taxa de ar foram obtidos os maiores valores do h_c , da mesma forma que para a embalagem com maior área efetiva para a passagem de ar, são obtidos menores tempos de resfriamento. Na tabela 4.72 apresentam-se os valores da diferença entre o tempo de resfriamento teórico e experimental.

Tabela 4.72: Diferença (%) entre o tempo de resfriamento teórico e experimental

Trat.	Ponto 1		Ponto 2	
	TAT _{1/2}	TAT _{7/8}	TAT _{1/2}	TAT _{7/8}
FAEI	0,0	6,3	3,7	1,5
FCEI	3,1	10,4	4,5	8,8
FAEII	16,6	17,3	4,1	1,5
FCEII	1,7	15,6	8,3	5,9

Um decréscimo na ordem de 27 a 32% no tempo de resfriamento, foi observado por Dincer & Genceli (1994) quando aumenta a velocidade de 1 para 2 m/s, durante o resfriamento de pepino, num sistema com ar forçado.

Todos estes aspectos que já foram discutidos na seção 4.1, quando apresentadas as curvas experimentais, estão muito bem caracterizadas pelo modelo matemático, tanto para o resfriamento de laranja como de banana, demonstrando-se a versatilidade deste modelo, e suas possibilidades de uso para geometrias tão diferentes, que vão desde relação de forma $L_2/L_1 = 1$ até $L_2/L_1 = 4$.

4.2.3- Comparação dos resultados em função de Fo e do Bi

O valor dos números de Bi e de Fo para os experimentos com laranja e com banana, foi calculado a partir dos dados experimentais, e impresso na planilha do perfil de temperatura obtido para a corrida de cada ponto, em cada experimento.

Como pode ser observado na figura 4.63, os valores de Bi estão entre 3,5 e 0,5, numa faixa de Fo entre 0 e 1, para os experimentos com laranja. Observando a figura 4.64, observa-se que os valores de Bi estão numa faixa entre 0,2 e 0,10, e uma faixa de Fo entre 0 e 2, nos experimentos com banana.

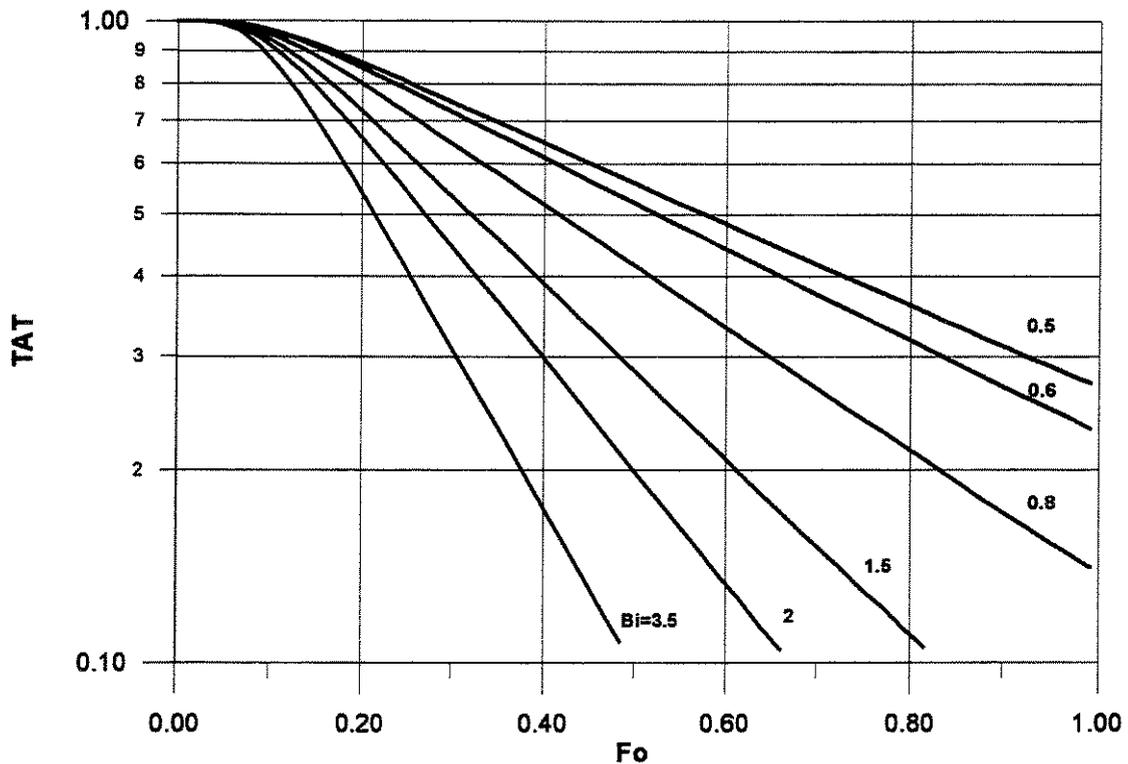


Figura 4.63: Comportamento do Bi e do Fo para relação de forma de $L_2/L_1 = 1,05$ (experimentos com laranja Valência, $\alpha = 1,06 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$)

Como foi discutido no capítulo 2, o número de Bi, é definido como a razão entre a resistência interna do sólido à transferência de calor, e a resistência à transferência na superfície. Para valores de Bi entre 0,2 e 10, existe uma resistência externa e interna de transferência de calor finita. Valores muito baixos do Bi indicam que a resistência interna de condução é desprezível se comparada com a resistência superficial por convecção. O número de Fo, por sua parte, relaciona a dimensão do corpo com os efeitos da penetração dos efeitos térmicos, sendo usado para determinar o tempo de resfriamento, e vice-versa (Holman, 1986; Mohsenin, 1980).

Corpos esféricos resfriam em menor tempo que corpos cilíndricos, em função da relação área/volume (A/V). A área superficial das esferas é menor que a área superficial dos cilindros, como pode ser constatado nos experimentos com laranja e banana (Tabela 4.73).

Como pode ser observado, na tabela 4.73, a relação de A/V dos corpos aproximadamente esféricos, como a laranja, é aproximadamente 50 vezes menor, que a relação para corpos cilíndricos (como a banana).

Tabela 4.73: Valores da relação A/V para a laranja e a banana

Produto	A (cm ²)	V (cm ³)	A/V (cm ⁻¹)
Laranja (esfera)	25,00	230,00	0,11
Banana (cilindro)	205,01	36,00	5,70

Então, observando a figura 4.63 e 4.64, verifica-se a diferença existente entre os valores de Fo para os experimentos com laranja, onde a relação A/V é menor, os tempos de resfriamento são menores e o valor de Fo é baixo.

Já o comportamento nos experimentos com banana é diferente, a relação A/V é maior, obteve-se em média tempos de resfriamento maiores, e o valor de Fo é maior que para os corpos esféricos.

Cleland & Earle (1982), determinaram, aplicando soluções numéricas, o valor do Fo, para cilindros, esferas e placas. Os autores comprovaram que para números de Bi entre 0,01 e 100, o valor de Fo para cilindros esteve na faixa de 34,9 a 0,120 e para esferas o valor de Fo comportou valores entre 23,3 e 0,072.

Para uma mesma condição convectiva, uma duplicação do diâmetro dos produtos, leva um aumento do tempo de resfriamento de até quatro vezes maior (Kopelman *et al.* 1966, Baird *et al.*, 1988).

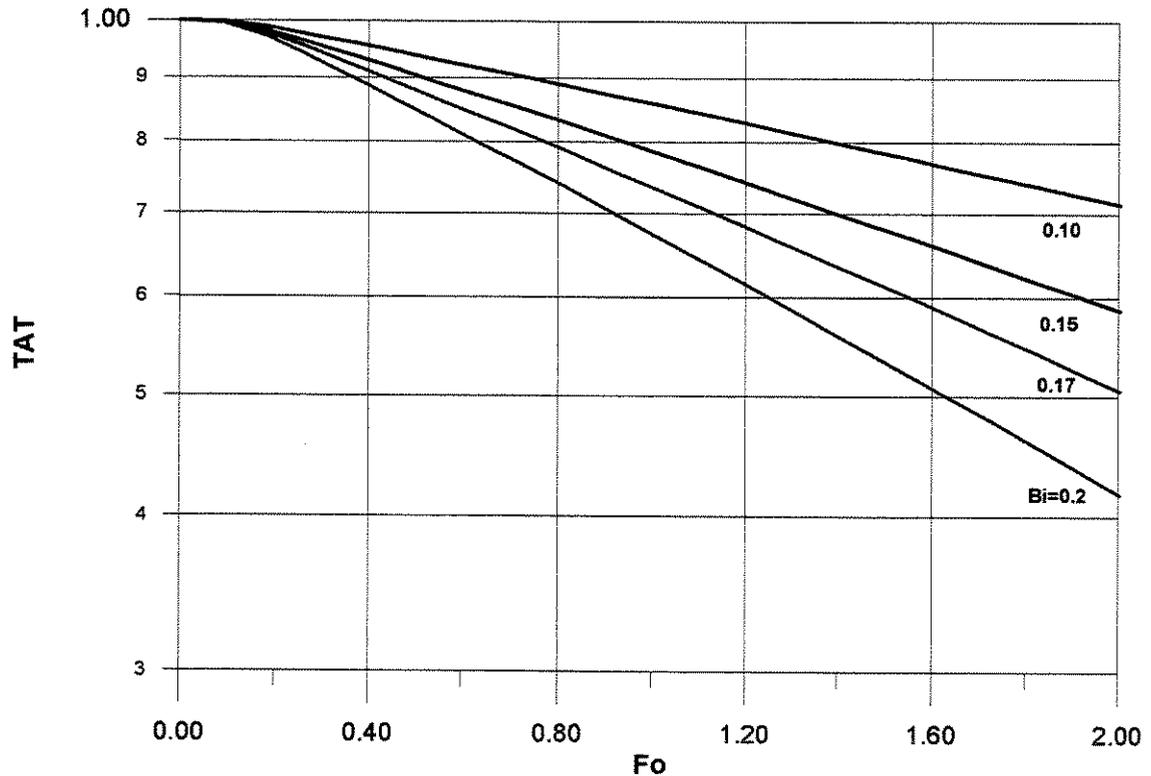


Figura 4.64: Comportamento do Bi e do Fo para relação de forma de $L_2/L_1 = 4,00$ (experimentos com banana Prata, $\alpha = 1,25 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$)

Se corpos esféricos esfriam em menor tempo que corpos cilíndricos, então, explica-se o porquê o valor de Bi está entre 3,5 e 0,5 (laranja), e entre 0,2 e 0,1 (banana). Valores baixos de Bi refletem uma baixa intensidade no processo de transferência de calor, o que foi muito bem caracterizado nos valores de h_c que foram obtidos por ajuste, os quais oscilaram entre 13,62 a 2,68 $\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$. Por outro lado, valores mais altos de Bi, indicam uma maior intensidade no processo de transferência de calor, o que reflete-se em altos coeficientes de transferência de calor. Os valores obtidos com a aplicação do modelo matemático para o resfriamento de laranja, oscilaram entre 56,48 a 5,39 $\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$. Gráficos semelhantes aos obtidos neste trabalho foram apresentados por Chau, 1990.

Valores de Bi entre 0,85 e 1,7 foram obtidos por Dincer & Genceli (1994), durante o resfriamento com ar forçado de pepino, a uma temperatura de 4°C.

4.3- Considerações Econômicas

Neste seção serão apresentados os resultados obtidos do cálculo do custo total dos sistemas de resfriamento e do custo total por produtos. A metodologia usada foi exposta na seção 3.3, e os resultados serão apresentados para os dois sistemas analisados.

4.3.1- Câmara de estocagem

4.3.1.1-Custos fixos

Os dados utilizados para o cálculo dos custos fixos (Cf), são mostrados na tabela a seguir:

Tabela 4.74: Parâmetros utilizados para o cálculo dos custos fixos (câmara de estocagem)

Parâmetro	Valores
D	
Ci (R\$)	31.330,00
f (%/ano)	10
n (anos)	25
u (h)	2.160 *
D (R\$/hora)	0,522
(R\$/ano)	1.127,88
J	
i (% a.a)	12,0 **
J (R\$/hora)	0,957
(R\$/ano)	2.067,78

* 18 horas/dia x 120 dias/ano (20 dias por mês, 6 meses de safra)

** FINAME, janeiro à março/2000

4.3.1.2-Custos variáveis

Na tabela 4.75 mostram-se os valores dos parâmetros utilizados para o cálculo dos custos variáveis (Cv):

Tabela 4.75: Parâmetros utilizados para o cálculo dos custos variáveis

Parâmetro	Valores
Rm	
r (% a.a)	0,5 (r = 0,005)
u (h)	2.160 *
Rm (R\$/h)	0,072
(R\$/ano)	156,65
Mo	
S (R\$)	200,00
d (dias)	24
H (h)	8
Mo (R\$/h)	1,04
(R\$/ano)	2.250,00
E	
C (kW)	4,00
Pr (R\$/kWh)	0,11
E (R\$/h)	0,44
(R\$/ano)	950,40

4.3.1.3- Custo total anual

Na tabela 4.76, mostram-se os valores do custo total anual de resfriamento (CT), (incluindo o valor dos custos fixos e variáveis), para a câmara de estocagem.

Tabela 4.76: Custos anuais para a câmara de estocagem

Conceito	Custo fixo anual R\$/ano (US\$/ano)*		Custo variável anual R\$/ano (US\$/ano)			CT R\$/ano (US\$/ano)
	D	J	Rm	Mo	E	
Câmara estocagem	1.127,88 (644,50)	2.067,78 (1.181,59)	155,75 (89,51)	2.250,00 (1.285,71)	950,40 (543,08)	6.552,71 (3.744,41)
Cf = D+J	3.195,66 (1.826,09)		Cv = Rm+Mo+E		3.356,15 (1.917,80)	
CT (R\$/h)						3,02

* O valor da taxa cambial assumida (1,75), para a transformação em US\$ corresponde ao valor médio de fevereiro-março/2000 (Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas, FIPE).

4.3.1.4- Custo total anual de resfriamento

Para determinar o custo anual total por caixa resfriada (CTP), na câmara de estocagem, considerou-se o tempo médio que foi necessário para atingir o tempo dos sete oitavos do resfriamento, quando usados os dois tipos de embalagens, durante o resfriamento de laranja. As embalagens com 40% de área efetiva para a passagem do ar (EI) e as embalagens com 3,5% de área (EII).

- Resfriamento em caixas EI: 6 horas.
- Resfriamento em caixas EII: 18 horas

Considerando que de cada vez possam ser colocadas aproximadamente 80 caixas no interior da câmara, quando é feito o resfriamento nas caixas EI (40% área efetiva) o tempo de resfriamento é de 6 horas (câmara de estocagem). Desta forma num dia poderão ser resfriadas, aproximadamente, dois lotes de caixas, totalizando 160 caixas por dia. Considerando um período de trabalho de 10 horas por dia, durante 20 dias ao mês (fins de semana, manutenção, ect.), e 6 meses de safra (120 dias ao ano), poderão ser resfriadas 19.200 caixas/ano.

Já, quando o resfriamento é feito nas embalagens EII (3,5% de área efetiva), o tempo de resfriamento é 3 vezes maior, o que faz diminuir o fator de rotatividade da câmara, necessitando-se mais de um dia para resfriar um lote, podendo então ser resfriadas no mesmo período, até 10.000 caixas (Tabela 4.77).

Tabela 4.77: Parâmetros considerados para o cálculo do CTP

Parâmetros	Valores	
	EI	EII
Rotatividade	2	1
Total de caixas por período*	19.200	10.000
Custo total por caixa, R\$/cx	0,34	0,65

*120 dias

O custo total por caixa (CTP) foi calculado com a equação 3.63 (dividindo o custo total pela quantidade de caixas de produto).

Observando a tabela 4.77 nota-se que o CTP depende da quantidade de caixas que são resfriadas num período, que, por sua vez, está em função do tipo de embalagem usada. Para a embalagem EI o CTP é 46% menor que quando usadas as embalagens EII. Menores tempos de resfriamento permitem uma rotatividade de uso maior e vice-versa, perfazendo com que o CTP diminua.

Para sistemas de resfriamento convencionais, como é o caso da câmara usada, o tipo de embalagem também é importante para atingir tempos de resfriamento menores, uma vez que as

velocidades do ar costumam ser bem menores, que em sistemas de resfriamento com ar forçado.

4.3.2- Sistema de resfriamento com ar forçado

O sistema de resfriamento a ar forçado, apresentado neste trabalho, teve um custo relativamente baixo, é de simples operação e montagem, garantindo alta eficiência no resfriamento o que se reflete em curtos tempos de resfriamento, dependendo da taxa de ar e da embalagem usada.

A seguir são apresentados os valores dos parâmetros usados para o cálculo dos custos fixos e variáveis do sistema de resfriamento com ar forçado.

4.3.2.1- Custos fixos

Tabela 4.78: Parâmetros para o cálculo dos custos fixos (sistema com ar forçado)

Parâmetro	Valores
D	
Ci (R\$)	32.641,00
f (%/ano)	10
n (anos)	20
u (h)	2.160
D (R\$/hora)	0,901
(R\$/ano)	1.958,46
J	
i (% a.a)	12**
J (R\$/hora)	0,99
(R\$/ano)	2.154,30

4.3.2-2- Custos variáveis

Tabela 4.79: Parâmetros de cálculo dos custos variáveis

Parâmetro	Valores
Rm	
r (% a.a)	0,5 (r = 0,005)
u (horas)	2.160
Rm (R\$/hora)	0,075
(R\$/ano)	163,205
Mo	
S (R\$)	200,00
d (dias)	24
H (horas)	8,00
Mo (R\$ /hora)	1,04
(R\$/ano)	2.250,00

E	
C (kWh)	5,27
Pr (R\$/kWh)	0,11
E (R\$/h)	0,58
(R\$/ano)	1.252,15

4.3.2.3- Custo total anual

Na tabela 4.80 mostra-se um resumo dos custos calculados (Cf e Cv), e o valor do custo total por ano e por hora de operação.

Tabela 4.80: Custos anuais total o sistema de resfriamento com ar forçado

Conceito	Custo fixo anual R\$/ano (US\$/ano)		Custo variável anual R\$/ano (US\$/ano)			CT R\$/ano (US\$/ano)
	D	J	Rm	Mo	E	
Câmara ar forçado	1.958,46 (1.119,12)	2.154,30 (1.231,02)	163,25 (93,28)	2.250,00 (1.285,71)	1.252,15 (715,51)	7.778,12 (4.444,64)
Cf = D+J		4.112,76 (2.350,14)	Cv = Rm+Mo+E		3.663,40 (2.093,37)	
			CT (R\$/h)			3,60

* O valor da taxa cambial assumida (1,75), para a transformação em US\$ corresponde ao valor médio de fevereiro-março/2000 (Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas, FIPE).

4.3.2.4- Custo total anual de resfriamento por caixa

Para determinar o custo anual total por caixa resfriada (CTP) no sistema de resfriamento com ar forçado, foi considerado o tempo médio necessário para resfriar os frutos até o tempo dos sete oitavos do resfriamento:

- Resfriamento nas embalagens EI: 3 horas
- Resfriamento nas embalagens EII: 5 horas

Quando usado o sistema com ar forçado, a quantidade de caixas que podem ser resfriadas num mesmo período aumenta sensivelmente, podendo-se resfriar até 3 lotes de 80 caixas, totalizando 28.800 caixas (embalagens EI), e quando condicionados os produtos na embalagem EII, podem se resfriar até 19.000 caixas (Tabela 4.81).

Tabela 4.81: Parâmetros para o cálculo do custo total anual de resfriamento (CTP)

Parâmetros	Valores	
	EI	EII
Rotatividade	3	2
Total de caixas num período*	28.800	19.000
CTP, R\$/cx	0,27	0,41

*120 dias/ano

Como pode ser observado na tabela anterior, o CTP é maior em aproximadamente 30%, quando as frutas são acondicionadas nas caixas EII, que quando condicionadas em caixas EI. Como já foi discutido no capítulo 4.1, o tempo de resfriamento depende do tipo de embalagem usado, o que por sua vez define as possibilidades de rotatividade da câmara, ou seja, menor tempo de resfriamento permite um fator de rotatividade maior, e num mesmo período poderão ser resfriadas um número maior de caixas de frutas.

4.3.3- Comparação dos sistemas de resfriamento

Comparando os custos do sistema de estocagem e o sistema de ar forçado, nota-se que a diferença entre ambos está fundamentalmente nos custos variáveis, e isto resulta do fato do sistema de resfriamento com ar forçado possuir um maior consumo energético.

No sistema de resfriamento com ar forçado devido à adição do ventilador, o consumo de energia apresenta um incremento de 25%, com relação ao sistema de resfriamento na câmara convencional. O custo total anual por hora (CT) na câmara de estocagem é de R\$ 3,01 /h e o custo total de resfriamento no sistema de resfriamento com ar forçado é de R\$ 3,60 /h; uma diferença de aproximadamente 16%.

Mesmo que o CT do sistema com ar forçado seja 20% maior que o CT do sistema convencional, o CTP do sistema de ar forçado é de 40 à 20% menor, para embalagens com 3,5% e 40% de área efetiva, que quando os frutos são resfriados nestes mesmos tipos de embalagens no sistema convencional.

Esta diferença decorre, como já havia sido discutido em cada caso em particular, pelo tempo de resfriamento. Para tempos de resfriamento menor, a rotatividade da câmara será maior, podendo ser resfriadas um maior número de caixas, no mesmo período.

Na figura 4.65 pode ser observado que à medida que o tempo de resfriamento aumenta, o custo total do sistema de resfriamento aumenta, seguindo uma relação linear, para os dois tipos de sistemas de resfriamento (câmara estocagem, CE e sistema de ar forçado, CAF). Este aumento é sempre maior nos sistemas de resfriamento com ar forçado, devido ao fato do consumo de energia também ser maior.

Na figura 4.66 mostra-se uma comparação do CTP para ambos os sistemas e os dois tipos de embalagens usadas. Como pode-se observar, comparando esta figura com a anterior, independentemente de que o CT seja maior no sistema de ar forçado, o CTP é menor. Isto é explicado pelo fato de, como a rotatividade dos sistemas de resfriamento com ar forçado é maior, em função do menor tempo de resfriamento, isto resulta num maior número de caixas resfriadas num mesmo período, o que acaba diminuindo o custo total por caixa resfriada.

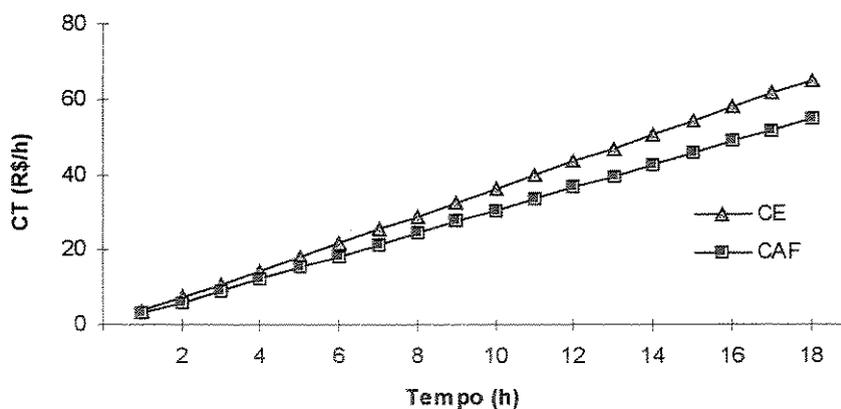


Figura 4.65: Custo total em função do tempo de resfriamento. CE- câmara de estocagem; CAF- câmara de ar forçado

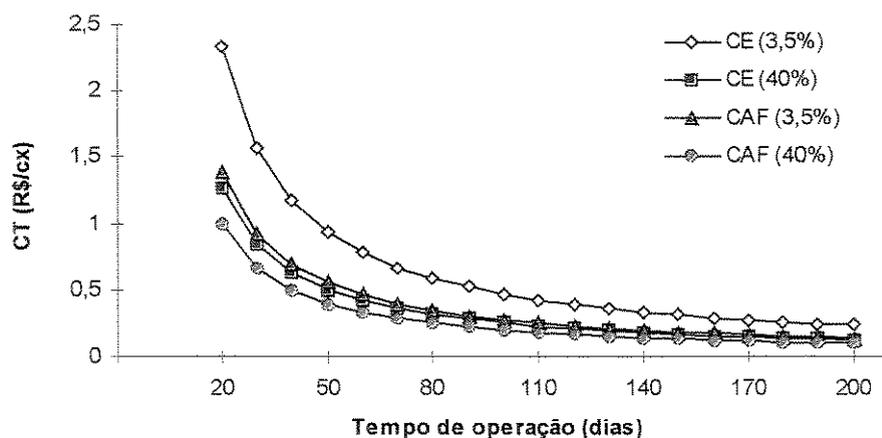


Figura 4.66: Custo de resfriamento anual em função do tempo de operação do sistema, para os dois tipos de embalagens usadas

Pode-se dizer que, embora o CT dos sistemas de resfriamento com ar forçado seja maior que o CT dos sistemas de resfriamento comuns, o CTP dos sistemas de resfriamento com ar forçado é menor que o CTP, quando o resfriamento é realizado nas câmaras convencionais. Nesse ponto os sistemas de resfriamento com ar forçado tornam-se eficientes, desde o ponto de vista econômico.

O sistema de resfriamento com ar forçado se torna vantajoso também pelas seguintes questões:

- Produtos resfriados em menor tempo, são produtos que terão uma maior vida de prateleira, repercutindo em maior qualidade;
- Produtos resfriados em embalagens adequadas ao sistema de resfriamento com ar forçado (maior área de abertura), garantem menor tempo de resfriamento, o que garante menor custo de resfriamento por caixa resfriada.

Na tabela 4.82, mostra-se a comparação da diferença de custos quando os produtos são resfriados em embalagens EI e nas embalagens EII. Como se observa na tabela anterior o custo de resfriamento é 1,2 vezes maior no sistema de estocagem (embalagem EI). Para as embalagem EII, o valor do custo por caixa é aproximadamente 1,7 vezes maior quando o resfriamento é feito no sistema convencional, que quando realizado no sistema a ar forçado.

Tabela 4.82: Custo de resfriamento para os dois tipos de embalagens usadas nos sistemas de resfriamento

Sistema	CTP, R\$/cx (US\$/cx)*	
	EI	EII
Câmara de estocagem	0,34 (0,12)	0,65 (0,22)
Ar forçado	0,27 (0,09)	0,41 (0,13)

Como foi discutido no capítulo 2, a área efetiva de aberturas para a passagem do ar nas embalagens, é um dos principais fatores que afetam o custo do resfriamento. Gaffney & Bowman (1971), determinaram o custo de caixas de laranjas (de 38 kg), resfriadas num sistema de ar forçado, sendo que o custo, por caixa oscilou entre, R\$ 0,92 /cx à R\$ 1,08 /cx (US\$ 0,53 /cx à US\$ 0,62 /cx), dependendo da forma em que foram acondicionadas as caixas, no interior da câmara.

Baird *et al.* (1988), obtiveram valores entre R\$ 0,38 /cx à R\$ 0,75 /cx, para caixas com 5% até 1% de área efetiva de aberturas e tempos de resfriamento que variaram de 3,5 até 6 horas, respectivamente, quando resfriadas num sistema com ar forçado.

Os cálculos desenvolvidos neste capítulo foram feitos considerando que a câmara de resfriamento seja utilizada em todo o seu volume. É necessário ressaltar que o CTP dependerá em grande medida da rotatividade da câmara em função do tempo de resfriamento. Por esta razão, entre maior quantidade de caixas possam ser resfriadas, menor será o CTP e viceversa. Na figura 4.67 mostra-se o comportamento do CTP em dependência da quantidade de caixas resfriadas em ambos sistemas.

A título de comparação, se fossem resfriadas até 15.000 caixas na câmara de estocagem, o custo de resfriamento subiria de R\$/cx 0,34 para R\$/cx 0,44. No sistema de resfriamento com ar forçado mesmo período resfriando-se até 23.000, o CTP aumentaria de R\$/cx 0,27 para R\$/cx 0,35; o que representa um aumento do custo de aproximadamente 52%.

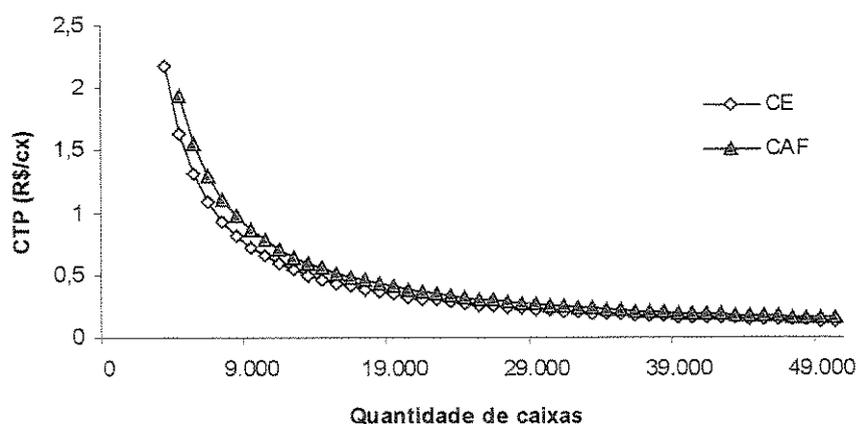


Figura 4.67: Custo de resfriamento anual em função do número de caixas resfriadas, para os dois tipos de sistemas

Por outro lado, um elemento que têm influência no valor do CT, para cada sistema de resfriamento, é o consumo energético. No sistema de estocagem o custo da energia representa 14% do custo total, já no sistema de ar forçado este custo representa 16%. Na tabela 4.83 mostra-se, a título de comparação, o valor do custo de energia por caixa, para os dois tipos de embalagens usadas.

Tabela 4.83: Valor do custo incrementado por conceito de energia em cada sistema de resfriamento

Valor dos custos	Sistema de resfriamento			
	Câmara de estocagem		Sistema de resfriamento com ar forçado	
	EI (40%)	EII (3,5%)	EI (40%)	EII (3,5%)
Custo da energia, R\$/cx	0,05	0,03	0,03	0,03
CTP, R\$/cx	0,34	0,65	0,27	0,41

No cálculo do custo da energia, foi considerado o preço que a Unicamp paga, que geralmente é um pouco mais baixo que o preço do kWh industrial. Se fosse considerado o preço do kWh industrial médio em julho de 1999 (R\$ 0,19 /kWh), o valor de CTP aumentaria de R\$ 0,34 /cx para R\$ 0,36 /cx (EI) e de R\$ 0,65 /cx para R\$ 0,69 /cx (EII), o que representa um acréscimo de aproximadamente 8%, no sistema convencional. Para o sistema com ar forçado o CTP aumentaria de R\$ 0,27 /cx para R\$ 0,29 /cx (EI), e de R\$ 0,41 /cx para R\$ 0,44 /cx (EII). Este aumento representa um acréscimo do custo por caixa resfriada na ordem de 6%. Nota-se que o custo do kWh, influencia notavelmente o valor do CTP.

4.3.3.1- Custo incrementado às caixas de laranja por conceito de resfriamento

O custo total médio (dos últimos 5 anos), de uma caixa de laranja de aproximadamente 20 kg na Fazenda Sete Lagoas, como já foi explicado no capítulo 3.3, foi de R\$ 4,85. Na tabela 4.84, mostra-se um resumo que mostra o acréscimo ao custo da caixa que sai da fazenda, adicionando-se o custo do resfriamento (Visita Técnica, 1999).

Tabela 4.84: Custo total por caixa incrementa com o valor do custo de resfriamento

Sistema de resfriamento	Custo total, R\$/caixa			
	EI	Acréscimo, %	EII	Acréscimo, %
Câmara de estocagem	5,19	6,5	5,50	11,8
Ar forçado	5,12	7,8	5,26	7,8

Na tabela anterior observa-se que o custo incrementado pelo resfriamento representa de 5 à 7% de acréscimo, com respeito ao custo da caixa sem resfriamento, quando usado um sistema de resfriamento com ar forçado.

Já, quando o resfriamento é realizado em câmaras convencionais, onde o tempo de resfriamento é maior, o acréscimo por conceito de refrigeração pode chegar até 11%, um valor 2 vezes maior do que quando realizado o resfriamento num sistema de ar forçado.

Pode-se comprovar que o aumento do custo total do sistema de resfriamento com ar forçado, em relação ao custo total do sistema convencional mostrado, em função do aumento do consumo energético, é compensado com um fator de rotatividade maior na câmara de ar forçado, que finalmente reflete num custo total por caixa menor, quando os produtos são resfriados no sistema com ar forçado.

Considera-se então, factível a aplicação de sistemas de resfriamento com ar forçado, assim como de embalagens adequadas para este tipo de sistema, em virtude de obter tempos de resfriamento menores com baixos custos de resfriamento.

Capítulo 5

Conclusões e Recomendações

5.1- Conclusões

Análise Experimental

- O sistema de resfriamento a ar forçado estudado mostrou-se adequado para o resfriamento rápido de frutas.

- O tempo de resfriamento é até duas vezes menor quando usada a embalagem com maior área efetiva de aberturas e até três vezes maior quando aplicada a menor taxa de ar.

- Ao longo do leito existe um diferencial de temperatura de 2 a 5°C.

- Existe uma influência significativa do tipo de embalagem e do fluxo de ar no tempo de resfriamento dos frutos.

- O planejamento experimental adotado mostrou-se adequado, para um nível de confiança de 90%, o que permite afirmar que os dados experimentais obtidos são válidos, tanto nos experimentos com laranja como com banana.

- Uma maior eficiência no resfriamento é obtida quando usadas as embalagens com 40% de área de aberturas. Considera-se necessário o projeto de uma embalagem adequada ao resfriamento com ar forçado.

- A umidade relativa no sistema de resfriamento com ar forçado não apresentou diferença significativa entre os tratamentos, assim como com respeito à umidade do sistema sem produtos, o que demonstra praticamente a inexistência de troca de massa entre o ar resfriado e os frutos.

- As perdas de peso, tanto nos experimentos com laranja como com banana, não apresentaram diferença significativa, num intervalo de confiança de 90%. Para as condições em que foram realizados os experimentos, as perdas podem ser consideradas desprezíveis.

- Constatou-se que com a diminuição do fluxo de ar de 25% a 40%, a velocidade diminuiu de 60% a 81%.

- O tempo de resfriamento, quando os frutos foram resfriados na câmara de estocagem, foi aproximadamente três vezes maior, se comparado com o tempo em que os frutos resfriam-se no sistema com ar forçado.

- O sistema de resfriamento com ar forçado demonstrou ser mais eficiente do ponto de vista da transferência de calor, que o resfriamento na câmara convencional.

- O consumo de energia apresentou um aumento de até 21% com o aumento da taxa de ar e a diminuição da velocidade de rotação da polia do ventilador.

Modelagem Teórica

- O modelo matemático aplicado mostrou-se adequado para a caracterização do fenômeno de transferência de calor estudado.

- Dentre as vantagens do modelo proposto encontram-se:

- Grau de aproximação razoável, permitindo obter ajustes adequados.

- Aplicável em diversos produtos hortifrutícolas (com geometria desde esferas até cilindros e semelhantes, e com propriedades termofísicas diferentes).
- Alta estabilidade numérica e baixo custo computacional.

- O modelo em coordenadas esférica prolat, caracterizou adequadamente as taxas de resfriamento da laranja (a qual apresenta uma ligeira tendência à forma esférica). Da mesma forma mostrou-se compatível ao caracterizar as taxas de resfriamento de banana.

- Com a aplicação do modelo foi possível prever a distribuição interna de temperatura nos frutos, comprovando-se o comportamento desta em todo o volume do fruto.

- Comprovou-se com a aplicação do modelo resultados muito próximos dos obtidos na medição experimental da temperatura na superfície. Esta temperatura apresenta uma diferença com respeito ao centro em torno de 7°C a 2°C , o que representou diferenças da ordem de 50% a 30%, aproximadamente, entre todos os experimentos com laranja.

- O modelo apresentado prevê que a taxa de resfriamento nos experimentos com banana é muito mais alta nas pontas que nas outras regiões do fruto.

- A diferença entre o tempo de resfriamento obtido de forma experimental e teórica em termos de temperatura oscilou na faixa de $0,10^{\circ}\text{C}$ a $0,97^{\circ}\text{C}$, o que demonstra a adequada concordância entre os valores experimentais e os obtidos de forma numérica.

- Os valores do coeficiente convectivo de transferência de calor são representativos do processo estudado, tendo sido obtidos a partir de dados experimentais e com razoáveis valores de erro.

- O coeficiente convectivo de transferência de calor apresenta valores diferentes para cada posição do fruto no leito e para cada tratamento, o que denota a influência que neste exerce a taxa de ar aplicada e seu contato mais ou menos efetivo com o produto.

- Devido à complexidade na determinação do coeficiente convectivo de transferência de

calor, assim como pela quantidade de fatores que o afetam de forma direta e indireta, os valores apresentados neste trabalho podem ser considerados como valores aparentes.

- O número de Bi e de Fo mostraram-se adequados e representativos do processo estudado, caracterizando adequadamente o resfriamento de corpos com relação de área/volume diferente.

Considerações Econômicas

- Embora o custo total seja 19% maior nos sistemas com ar forçado, o custo de resfriamento é até 40% menor, se comparado com o sistema convencional.

- O custo total de resfriamento aumenta na medida que aumenta o preço do kWh assim como quando seja menor a quantidade de caixas resfriadas num mesmo período no sistema de resfriamento.

- O custo de resfriamento é de 23 a 41% menor, quando os frutos são resfriados no sistema com ar forçado, nas embalagens EI e EII, respectivamente; se comparado com o custo quando foram resfriados nas mesmas embalagens no sistema convencional.

- Os valores de custos que estão sendo apresentados neste trabalho correspondem-se com um estudo preliminar, por tanto devem ser usados com cautela em casos particulares.

- Sistemas de resfriamento a ar forçado tornam-se mais econômicos, pois permitem uma rotatividade maior (em função de menores tempos de resfriamento).

- Atendendo aos aspectos discutidos nos itens anteriores, recomenda-se a implementação de sistemas a ar forçado, para o resfriamento rápido de frutas após a colheita, pois:

- Apresentam altas taxas de resfriamento.
- Simplicidade de operação.
- Baixos custos.

5.2- Sugestões para próximos trabalhos

No transcurso do trabalho surgiram dificuldades que permitiram neste ponto, sugerir algumas idéias que podem ser aplicadas em trabalhos que venham a ser desenvolvidos proximamente. Outras sugestões surgiram como consequência da impossibilidade de abarcar todos os aspectos apenas neste trabalho:

- Desenvolver um projeto de embalagem adequado aos sistemas de resfriamento com ar forçado.

- Projeto de túnel de resfriamento a escala de laboratório que permita a entrada dos produtos sem alteração das condições de equilíbrio do ar.

- Desenvolver um método diferente de medição da velocidade do ar no túnel de resfriamento, que garanta que o instrumento de medição encontre-se fixo numa posição, evitando-se assim que erros possam vir a acontecer, gerados pelo fator humano.

- Aplicação do modelo matemático proposto para o estudo do processo de transferência de calor em frutos com geometria e propriedades diferentes, obtendo-se o coeficiente convectivo de transferência de calor.

- Ampliar o modelo apresentado incorporando propriedades térmicas variáveis e a configuração do leito.

- Implementar um sistema de informação e divulgação aos produtores da região que permita a implementação de sistemas de resfriamento com ar forçado.

Capítulo 6

Bibliografia

6.1- Referências bibliográficas

Albright, L. D. *Environment controls for animal and plants*. St. Joseph: ASAE. 1990. 453 p.

Alvarez, G., Letang, G. Transferts de chaleur et de matiere au sein d' un échangeur de type "palette".
Revue du Froid, v. 47, p. 47-49, 1994.

Alvarez, G., Trystam, G. Desing of a new strategy for the control of the refrigeration process: fruits and vegetables conditioned in a pallet. *Food Control*, v. 6, n. 6, p. 347-354, 1995.

Ansari, F. A., Charan, V., Varma, V. K. Heat and mass transfer analysis in air-cooling of sperical food produces. *Revue Internationale du Froid*, v. 7, n. 3, p. 194-197, 1984.

Ansari, F. A., Charan, V., Varma, V. K. Heat and mass transfer in fruits and vegetables and measurement of thermal diffusivity. *International Comitee Heat Mass Transfer*, v. 11, p. 583-590, 1984 a.

Ansari, F. A, Afaq, A. A new method of measuring thermal diffusivity of spherical produets. *International Journal of Refrigeration*, v. 9, n.3, p.158-160, 1986.

- Ansari, F. A., Afaq, A. Precooling of cylindrical food products. *International Journal of Refrigeration*, v. 9, n. 5, p.161-163, 1986a.
- Arifin, B. B., Chau, K. V. Forced air cooling of strawberries. *American Society of Agricultural Engineers: ASAE*, Paper no. 87-6004, St. Joseph, USA, 1987.
- Arifin, B. B., Chau, K. V. Cooling of strawberries in cartons with new vent hole designs. *ASHRAE Transactions*, v. 94, n. 1, p. 1415-1426, 1988.
- ASHRAE. *Systems and Applications*. Methods of precooling of fruits, vegetables and flowers. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers,, 1994. Cap. 10p, 1-10.
- ASHRAE. Commodity Storage Requeriments. *Refrigeration Systems and Applications Handbook*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1994a. Cap. 25.
- ASHRAE. *Systems and Applications*. Thermal proprieties of foods. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. 1993. Cap. 30, p. 1-26.
- ASTM. *Manual on the use of termocouples in temperature measurement*. American Society for testing and Materials. 1989, v. 14.03. Section: 14.
- Baerdemaker, J., Singh, R.P. Modelling heat transfer in foods using the finite elements methods. *Journal Foods*. Part I. 1977.
- Baird, C. D., Gaffney, J. J., Kinard, D. T. Research facility for forced-air precooling of fruits and vegetables. *Transactions of the ASAE*, v. 18, p. 1-3. 1975.
- Baird, C. D., Gaffney, J. J. An numerical procedure for calculating heat transfer in bulk loads of fruits or vegetables. *ASHRAE Transactions*, v. 82, n. 2, p. 525. 1976.

- Baird, C. D., Chau, K. V., Gaffney, J. J. An engineering/economic model for evaluating forced-air cooling systems for fruits and vegetables. *Refrigeration Science and Technology*. Institute International of Refrigeration, 1985, p. 259-266.
- Baird, C. D., Gaffney, J. J., Talbot, M. T. Desing criteria for efficient and cost effective forced-air cooling systems for fruits and vegetables. *ASHRAE Transactions*. v. 94, p. 1434-1453, 1988.
- Banzatto, D. A., Kronka, S. N. *Experimentação Agrícola*. Jaboticabal (SP): Faculdade de Ciências Exatas. 1989, 247 p.
- Barros Neto, B. de Scarmino, I.S.; Bruns. R. E. Planejamento e Otimização de Experimentos. Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 1995, 299 p.
- Barros, V. B. E. *Modificações pós-colheita de banana Prata (Musa acuminata x Musa balbisiana) grupo AAB) γ irradiada*. Lavras (MG): Faculdade de Alimentos, 1995. 73 p. Dissertação (Mestrado).
- Bazan, T., Chau, K. V., Baird, C. D. Heat transfer simulation of the bulk cooling of fruits. American Society of Agricultural Engineers. ASAE. Paper 896669. 1984.
- Bennett, A. H., Soule, J., Yost, G. G. Forced air precooling of citrus to forced-air precooling. *ASHRAE Journal*, v. 8, n. 4, p. 48, 1966.
- Beukema, K. J., Bruinn, S., Schenk, J. Heat and mass transfer during cooling and storage of agricultural products. *Chemical Engineering Science*, v. 37, n. 2, p. 291-298, 1982.
- Bleinroth, E. W. Manuseio pós-colheita, classificação, embalagens e transporte da banana. In: Simpósio Brasileiro sobre Bananicultura. Jaboticabal. *Anais.....* Universidade Estadual Paulista: UNESP. 1984, p. 368-385.

- Bleinroth, E. W., Sigrist, J. M., Ardito, E. F., Castro, J. V., Spagnol, W. A., Neves F^o, L. C. *Tecnologia de Pós-Colheita de Frutas Tropicais*. Campinas (SP): Instituto de Tecnologia de Alimentos – ITAL. 1992, 203 p
- Boyette, M. D., Rohrbach, R. P. A low-cost, portable, forced-air pallet cooling system. *American Society of Agricultural Engineers*, v. 9, n. 1, p. 97-104, 1993.
- Carraro, F. A., Mancuso, C. M. *Manual de Exportação de Frutas*. Brasília, Ministério da Agricultura, do Abastecimento e da Reforma Agrária, 1994.
- Chau, K. V.; Gaffney, J. J.; Baird, C. D.; Church, G. A. Resistance to air flow of oranges in bulk and in cartons. *Transactions of ASAE*. v. 28, n. 6, p. 2083-2088. 1985.
- Chau, K. V., Gaffney, J. J. A finite difference model for the heat and mass transfer in products with internal heat generation and transpiration. *Journal of Food and Science*, p. 484-487, 1990.
- Chau, K. V. *Aspectos de Engenharia de Resfriamento de Frutas e Hortaliças*. Campinas: Grupo de Tecnologia Pós-Colheita, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, 2000. 235 p (Apostila).
- Chitarra, F. M., Chitarra, A. B. *Pós-Colheita de Frutas e Hortaliças*. Fisiologia e Manuseio. Lavras (MG): Fundação Ensino Pesquisa, 1990. 293 p.
- CIRCUITO AGRÍCOLA. São Paulo: CEAGESP, n. 51, outubro, 1998.
- Cleland, D.J., Earle, R. L. Freezing time prediction for foods—a simplified procedure. *Revue Internationale du Froid*, v. 5, n. 3, p. 134- 140, 1982.
- Cleland, D.J., Cleland, A. C., Earle, R. L., Byrne, S. J. Prediction of freezing and thawing times for multi-dimensional shapes by numerical methods. *International Journal of Refrigeration*, v. 10, p. 32-39, 1987.

- Cleland, D. J., Cleland, A. C., Jones, R. S. Collection of accurate experimental data for testing the performance of simple methods for food freezing time prediction. *Journal of Food Process Engineering*, v. 17, p. 93-119, 1994.
- CNPTIA/EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa Tecnológica em Informática para a Agricultura Instituto De Economia Agrícola (IEA/SSA). *Sistema CUSTRAGRI*. Sistema Integrado de Custos Agropecuários. Versão 1.0. 1997. 75 p.
- Dincer, I., Genceli, O. F. Cooling process and heat transfer parameters of cylindrical products cooled both in water and air. *International Journal Heat Transfer*, v. 37, n. 4, p. 625-633, 1994.
- Dincer, I. An effective method for analysing of precooling process parameters. *International Journal of Energy Research*, v. 19, p. 95-102, 1995.
- Dincer, I., Genceli, F. Determination of surface heat transfer coefficients from measured temperature data for spherical and cylindrical bodies during cooling. *Heat and Mass Transfer*, v. 30, p. 215-220, 1995.
- Dincer, I. Air flow precooling of individual grapes. *Journal of Food Engineering*, v. 26, p. 243-249, 1995a.
- Dincer, I. Transient heat transfer analysis in air cooling of individual spherical products. *Journal of Food Engineering*, v. 26, p. 453-467, 1995b.
- Drumond, B. F., Werkema, C. M. C., Aguiar, S. *Análise de Variância: Comparação de Várias Situações*. Série: Ferramentas de Qualidade. v. 6. Universidade Federal de Minas Gerais. Fundação Cristiano Ottoni. 1996. 302 p.
- Edegou, I., Feddes, J., Leonard, J. Comparison between vertical and horizontal air flow for fruit and vegetable peocooling. *Canadian Agricultural Engineering*, v. 39, no. 2, p. 107-112, 1997.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Perdas na Agropecuária Brasileira. Centro de Pesquisas. *Relatório Preliminar*. Brasília: Ministério da Agricultura, Abastecimento e Reforma Agrária, 1993.

Émond, J. P., Mercier, F., Sadfa, S. O., Bourré, M., Gakwaya. Study of parameters affecting cooling rate and temperature distribution in forced-air precooling of strawberry. *Transactions of the ASAE*, v. 39, n. 6, p. 2185-2191, 1996.

Finney Jr, E. E., Bem-Gera, I, Massie, D. R. An objective evaluation of changes in firmness of ripening bananas using a sonic technique. *Journal of Food Science*, v. 32, n.6, p. 642-646, 1967.

Fraser, H. W. *Forced-air rapid cooling of fresh Ontario fruits and vegetables*. Toronto: Ministry of Agriculture and Food. AGDEX 202-736. 4p. 1991.

Fraser H., Otten, L. Predicting $7/8$ cooling times for peaches by comparing heat transfer modelling and field measurement methods. *American Society of Agricultural Engineers*. ASAE. Paper no. 92-6016. 10 p. 1992.

FOOD Technology. *Quality of fruits and vegetables*, junho 1990, p. 99-106.

Gaffney, J.J., Bowman, E. K. An engineering/economic evaluation of different concepts for precooling citrus fruits. *ASHRAE. Symposium Bulletin*. SF. 4-70. USA: Department Agriculture. 1971.

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

Gaffney, J., Baird, C. D., Eshleman, W. D. Review and analysis of the transient method for determining thermal diffusivity of fruits and vegetables. *ASHRAE Transactions*, v. 86, n. 2, p. 261-280, 1980.

- Gaffney, J. J., Baird, C. D. Factors affecting the costs of forced air cooling of fruits and vegetables. *ASHRAE Journal*, p. 40-49, 1991.
- Goyette, B., Vigneault, C., Panneton, B., Raghavan, G. S. V. Method to evaluate temperature at the surface of horticultural crops. *Canadian Agriculture Engineering*, v. 38, n. 4, p. 291-295, 1997.
- Grierson, W., Bennett, A. H., Bowman, E. K. Forced -air precooling of citrus fruits on a moving conveyor. United States Department of Agriculture. *ARS 52-40*. 1970.
- Grierson, W.; Brown, B. Vertical air distribution for cooling fruit in cartons. *Florida Horticultural Society*, v. 88, 1975.
- Guemes, D. R.; Pirovani, M. E., Pentima, J. H. Heat transfer characteristics during air precooling of strawberries. *Revue du Froid*, v. 12, p. 169-173, 1989.
- Haji-Sheikh, A., Sparrow, E. M. Transient Heat conduction in a Prolate Spheroidal Solid. Transactions of the ASME: *Journal of Heat Transfer*, v. 88, n. 3, 1966.
- Hall, E. G. Precooling and container shipping of citrus fruits. *Food Research Quality*, v. 32, n. 1, p. 1-10, 1972.
- Hass, E., Felsenstein, G., Shiter, A., Magnor, G. Factors affecting resistance to air flow through packed fresh fruit. *ASHRAE Transactions*, v. 82, part. 2, 1976.
- Hayakawa, K. Computerized simulation for heat transfer and moisture loss from an idealized fresh produce. *Transactions of the ASAE*, v. 21, p. 4-6, 1978.
- Hayakawa, K., Succar, J. Heat transfer and moisture loss of spherical fresh produce. *Journal of Food Science*, v. 47, p. 596- 605, 1982.

- Henri, D., Hesselschwerdt, A. L. Temperature-time characteristics during food precooling. *ASHRAE Transactions*, n. 1886, p. 249-255, 1964.
- Holman, J. P. *Heat transfer*. Toronto: Mc. Graw-Hill Book Company. 1986. 675 p.
- IBRAF. Instituto Brasileiro de Frutas. *Boletim Informativo*. Ano 3. 13 ed. junho-julho-agosto, 1996.
- IBRAF. Instituto Brasileiro de Frutas. *Boletim Informativo*. Relatório, outubro, 1999.
- Kader, A.A. *Postharvest technology of horticultural crops*. 2.ed. Division of Agriculture and Natural Resources. Davis: University of California, n. 3311, 295p, 1992.
- Kaplan, S. *Energy economics: quantitative methods for energy and environmental decisions*. Part Two: Economics Analysis. New York: Polytechnic Institute, McGraw-Hill, 1983, 352 p..
- Kern, D. Q. *Processos de transferência de calor*. Editora Guanabara. Rio de Janeiro, 1987. 385 p.
- Klein, B. P. Nutritional consequences of minimal processing of fruits and vegetables. *Journal Food Quality*, v. 10, p. 179-193, 1987.
- Kopelman, I., Blaisdell, J. L., Pflug, I. J. Influence of fruit size and coolant velocity on the cooling of Jonathan apples in water and air. *ASHRAE Transactions*, v. 72, part. I, p. 209-216, 1966.
- Lima, A. G. B., Nebra, S. A. Influência de parâmetros geométricos na cinética de secagem de elipsóides sólidos. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (ENEMP), 25, 1997. *Anais.....*
- Lima, A. G. B., Nebra, S. A., Altemani, C. A. Simulation of the drying kinetics of the of the silkworm cocoon considering diffusive mechanism in elliptical coordinate. In: Inter-American Drying Conference. (IADC), 1997. *Proceedings.....*v. B, p. 317-324.

- Lima, A. G. B., Nebra, S. A. Formulação utilizando o método de volumes finitos para problemas de difusão de massa transiente em corpos elipsoidais axi-simétricos. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (ENEMP), 26, 1998.
- Lima, A. G. B. *Fenômeno de difusão em sólidos esferoidais prolatos. Estudo de caso: secagem de banana*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica, 1999, 244 p. Tese (Doutorado).
- Mackinnon, I. R., Bilanski, W. K. Heat and mass transfer characteristics of fruits and vegetables prior shipment. *The Engineering Society for Advancing Mobility Land Sea Air Space, SAE*. Paper 921620. 1992.
- Maliska, C. R. *Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional*. Rio de Janeiro: LTC. 1995. 424 p.
- Marin, M., Rios, G. M., Gibert, H. Use of time-temperature data during fluidized bed freezing to determine frozen food properties. *Journal of Food Process Engineering*, v. 7, n. 4, p. 253-264, 1985.
- Martínez-Jávega, J. M., Cuquerella, J., M. A.; Del Rio, M. A., Navarro, P. Effects of precooling, packaging film, modified atmosphere and ethylene absorber on the quality of refrigerated Chandler and Douglas strawberries. *Food Chemistry*, v. 48, p. 183-193, 1993.
- Mascheroni, R.H., Calvelo, A. A simplified model for freezing time calculations in foods. *Journal of Food Science*, v. 47, p. 1201, 1982.
- Mitchell, F. G., Guillou, R., Parsons, R. A. *Commercial cooling of fruits and vegetables: Manual Series. N. 43*. Califórnia: Division of Agricultural Sciences. University of California. 1973. 44 p.

- Mitchell, F.G. The need for cooling. In: Kader, A.A. (ed.) *Postharvest Technology of Horticultural Crops*. Publ. n. 3311. p. 53-56. 2. ed. California: Division of Agriculture and Natural Resources. University of California. Davis. 1992.
- Mohsenin, N. N. *Thermal properties of foods and agricultural materials*. New York. USA. 1980. 405 p.
- Moreira, R. S. *Banana: teoria e prática de cultivo*. Fundação Cargill. Cap. 2. Campinas, 1987. 335 p.
- Mudambi, S. R., Rajagopal, M. V. Vitamin C content of some fruits grown in Nigéria. *Journal Food Technology*, v. 12, 189-191, 1977.
- Muñoz-Delgado, J. A. Problems in cold storage of citrus fruit. *Revue du Froid*, v. 10, p. 229-233, 1987.
- Nagy, S.; Smoot, M. J. Temperature and storage effects on percent retention and percent U.S. recommended dietary allowance of vitamin C in canned single-strength orange juice. *Journal Agricultural Food Chemistry*, v. 25, p. 135, 1977.
- Nagy, S. Vitamin C content of citrus and their products; a review. *Journal Agricultural Food Chemistry*, v. 28, p. 8-18, 1980.
- Neves Fo, L. C. Resfriamento, congelamento e estocagem de alimentos. *Instituto Brasileiro do Frio*. IBF. São Paulo, 1991, 176 p.
- Neves Fo, L. C. Resfriamento rápido de frutas e hortaliças. *Revista ABRAVA*, São Paulo, v. 17, n. 133, p. 22-29, 1993.

- Noomhorm, A., Ting, C. C. On farm mobile precooling system for tropical fruits and vegetables. *American Society of Agricultural Engineers, ASAE*, Paper no. 90-6517, 1990.
- Novy, M. G. *Avaliação do tempo de pré-resfriamento por ar forçado de frutas esféricas colocadas em leitos*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia dos Alimentos, 1985, 128p. Dissertação (Mestrado).
- Novy, M., Kieckbush, T.G. Equações para o cálculo do tempo de resfriamento em leitos de frutas esféricas. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, n. 6, p. 1-16, 1986.
- Ohling, R. S. Rapid air precooling of fruits and vegetables. *ASHRAE Journal*, p. 60-65, 1990.
- Patankar, S. V. *Numerical heat transfer and fluid flow*. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980. 197 p.
- Perry, J. S., Bennett, A. H., Minh, T.V. *Experiments with a prototype commercial forced-air pre-cooler on peaches, potatoes, apples and strawberries*. University of Georgia, 1968.
- Pflug, I. J., Blaisdell, J. L., Kopelman, J. Developing temperature -time curves for objects that can be approximated by a sphere, infinite plate or infinite cylinder. *ASHRAE Transactions*, v 71. Part I, p. 238-248, 1975.
- Queiroz, M. R. *Estudo teórico-experimental da cinética de secagem de bananas*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 1994. 176 p. Tese (Doutorado).
- Queiroz, M. R., Nebra, S. A theoretical and experimental analysis of the drying kinetics of bananas. In: International Drying Symposium (IDS), 1996. *Proceedings.....Part B*, p. 1045-1052.

- Ramos, A. L., Palmisano, E., Dombey, A., Pimentel, J. A., Fayés, D., González, D. Thermal properties of tropical fruits and vegetables. *Revista Española de Ciencia e Tecnología de los Alimentos*, v. 33, n. 3, p. 271-283, 1993.
- Rocha, A. M., Brochado, C.M., Kirby, R., Morais, A.M. Shelf-life of chilled cut orange determined by sensory quality. *Food Control*, v. 6, n. 6, p. 317-322, 1995.
- Rodriguez, O., Viégas, F. *Citricultura Brasileira*. Campinas: Fundação Gargill. Cap.10, 1980. 383 p.
- Sastry, S.K., Buffington D.E. Transpiration rates of stored perishable commodities: a mathematical model and experiments on tomatoes. *International Journal. Refrigeration*, v. 6, n. 2, p. 84-96, 1983.
- Smith, R. E., Bennet, A.H. Mass average temperature of fruits and vegetables during transient cooling. *Transaction of ASAE*, v. 8, n. 2, p. 249, 1965.
- Smith, R. E., Bennett, A. H., Vacinek, A. A. Convection film coefficients related to geometry for anomalous shapes. *Transactions of ASAE*. Paper n. 69-373. 1970.
- Soule, J., Yost, G. E., Bennett, A. H. Certain heat characteristics of oranges, grapefruits and tangelos during forced-air precooling. *Transactions of ASAE*, v. 9, n. 3, p. 335, 1966.
- Spagnol, A W., Sigrist, J. M. Tecnologia de pós-colheita de futas tropicais. *Manual Técnico*. n. 9. Campinas: Instituto de Tecnologia dos Alimentos. 1988. 190 p.
- Spagnol, W. A., Rocha, J. L. V., Park, K. J. Mathematical model of the pre-cooling of fruits and vegetables: A review. *Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 23, n 3-4, p. 1292-200, 1989.

- Stout, B. A. Energía para la agricultura mundial. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. *Colección FAO: Agricultura*. n. 7, 1980, 305 p.
- Sweat, V. E. Experimental values of the thermal conductivity of select fruits and vegetables. *Journal of Food Science*, v. 39, p. 1080-1083, 1974.
- Talbot, M. T., Baird, C. D. Evaluating commercial forced-air precoolers. *American Society of Agricultural Engineers, ASAE*. Paper n. 91-6021. 1990.
- Talbot, M. T., Chau, K. V. *Precooling strawberries*. Institute of Food and Agricultural Sciences. University of Florida. Circular 942. 1991. 8 p
- Talbot, M. T., Baird, C. D., Sargent, S. A., Brecht, J. K. *Improving forced-air cooler performance*. Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences. University of Florida. Circular AE 108. 1992. 9 p.
- Tang, L., Johnson A.T. Mixed convection about fruits. *Journal Agricultural Research*, v. 51, p. 15-27, 1992.
- Teruel, M. B. J. *Uso de containers refrigerados para o armazenamento de produtos agrícolas*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. 1996. 130 p. Dissertação (Mestrado).
- Teruel M. B. J, Cortez, L. A. B., Leal, P. M., Neves Fo, C. L. Obtención de las curvas de refrigeración de naranja en un sistema com aire forzado In: Congresso Iberoamericano de Refrigeração, 5, 1999. *Anais*.....
- Teruel M. B. J; Cortez, L. A. B.; Leal, P. M.; Lima, G. A B. Obtenção numérico/experimental das curvas de resfriamento de laranja (variedade Valência). In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (COBEM), 12, 1999a. *Anais*.....

- Teruel M. B. J, Cortez, L. A. B., Leal, P. M., Neves Fo, C. L. Caracterização pós-colheita de laranjas 'Baianinha' submetidas ao armazenamento refrigerado e a condições ambientais. *Revista Horticultura Brasileira*, v. 18, n. 1, p. 46-48, 2000.
- Teruel M. B. J; Cortez, L. A. B.; Leal, P. M.; Neves Fo, C. L. Curvas de enfriamiento de naranjas refrigeradas en un sistema con aire forzado. *Revista Información Tecnológica, CIT*, v. 11, n. 4, p. 25-29, 2000.
- Trelea, I. C., Alvarez, G., Trystram, G. Nonlinear predictive optimal control of a batch refrigeration process. *Journal of Food Process Engineering*, v. 21, p. 1-32, 1998.
- Vieira, S., Hoffman, R. *Estatística Experimental*. São Paulo: Atlas, 1989. 179 p.
- Visita Técnica. Fazenda Sete Lagoas. SP, agosto. 1998.
- Visita Técnica. Fazenda Sete Lagoas. SP, agosto. 1999.
- Vissotto, F. Z. *Estudos dos parâmetros que influenciam no pré-resfriamento de um leito de produtos esféricos disposto no interior de uma embalagem de papelão*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos. 1998. 100 p. Dissertação (Mestrado).
- Visotto, F. Z., Kieckbusch, T. G., Neves F^o. L. C. Pré-resfriamento de frutas e hortaliças com ar forçado. *Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 33, p. 106-114, 1999.
- Yost, G. E., Hovey, R., Couey, H. M. Cooling characteristics of Anjou pears in film-overwrapped trays. *Transactions of ASAE*, v. 20, p. 1-3, 1977.

6.2- Bibliografía consultada

- Alan, G. M., Pitts, M. J., Hyde, M. G. Economic comparison of two vs. three-plane potato seed cutting. *American Society of Agricultural Engineers, ASAE*, v. 30, n. 5, p. 1512-1517, 1987.
- Beek, G. Practical applications of transpiration coefficients of horticultural produce. *ASHRAE Transactions*, v. 91, part B, p. 708-724, 1985.
- Benavides, M. N. & Avendaño, G. O., 1997, Curvas de congelación y descongelación de fresas y frambuesas calculadas con el método de diferencias finitas. Anales IV Congreso Iberoamericano de Aire Acondicionado y Refrigeración. Outubro 9-11, Santiago de Chile, vol. 1, pp. 154-159.
- Billiard, F., Gautherin, W. Chiffre et ratios du froid alimentaire. *Revue du Froid*, n. 959, p. 37-40, 1995.
- Ceponis, M. J., Capellini, R. A., Lightner, G. W. Disorders in sweet cherry and strawberry shipments to the New York market, 1972-1984. *Plant Disease*, v. 71, n. 5, p. 472-475, 1987.
- Cleland, A. C., Earle, R. L. Assessment of freezing time prediction methods. *Journal of Food Science*, v. 49, p. 1034-1042, 1984.
- Cleland, A. C., Cleland, A. C., Earle, R. L., Byrne, S. J. Prediction of freezing and thawing times for multi-dimensional shapes by numerical methods. *International Journal of Refrigeration*, v. 10, p. 32-39, 1987.
- Cleland, A. C., Cleland, A. C., Earle, R. L., Byrne, S. J. Experimental data for freezing and thawing of multi-dimensional objects. *International Journal of Refrigeration*, v. 10, p. 22-31, 1987.
- Comini, G., Cortella, G., Saro, O. Finite element analysis of coupled conduction and convection in refrigerated transport. *International Journal of Refrigeration*, v. 18, n. 2, p. 123-131, 1995.

- Coulter, S., Pham, Q. T., McNeil, I., McPhail, N. G. Geometry, cooling rates and weight losses during pig chilling. *International Journal of Refrigeration*, v. 18, n. 7, p. 456-464, 1995.
- Donsi, G., Ferrari, G., Nigro, R. Experimental determination of thermal conductivity of apple and potato at different moisture contents. *Journal of Food Engineering*, v. 30, p. 263-268, 1996.
- Ferreira, M. D.; Brecht, J. K.; Sargent, S. A.; Aracena, J. J. Physiological responses of strawberries to film wrapping and precooling methods. *Proceedings State Horticultural Society*, v. 107, p. 265-268, 1994.
- Ferreira, M. D., Bartz, J. A., Sargent, S. A., Brecht, J. K. An assessment of decay hazard associated with hydrocooling strawberries. *Plant Disease*, v. 80, n. 10, p. 1117-1122, 1996.
- Fischer, D., Craig, W. L., Watada, A. E., Douglas, W., Ashby, B. H. Simulated in transit vibration damage to packaged fresh market grapes and strawberries. *Applied Engineering in Agriculture*, v. 8, n. 3, p. 363-366, 1992.
- Gariépy, Y., Raghavan, S. V., Thériault, R. Cooling characteristics of cabbage. *Canadian Agricultural Engineering*, v. 29, n. 1, p. 45-50, 1987.
- Guimei, Z., Sun, G., Jiankun, L. A new method to determine the heat transfer coefficient of refrigerated vehicles. *International Journal of Refrigeration*, v. 17, n. 8, p. 516-523, 1994.
- Hackert, J. M., Vance, M. R., Thompson, D. R. Precooling of fresh market broccoli. *American Society of Agricultural Engineers*, v. 30, n. 5, p. 1489-1493, 1987.
- Hongming, J., Thompson, D. R., Morey, V. R. Finite element model of temperature distribution in broccoli stalks during forced-air cooling. *American Society of Agricultural Engineers*, v. 30, n. 5, p. 1473-1477, 1987.
- Hossain, M. M., Cleland, D. J., Cleland, A. C. Prediction of freezing and thawing times for foods of

- multi-dimensional irregular shape by using a semi-analytical derived geometric factor. *Reviu Internationale du Froid*, v. 15, n. 4, p. 227-234, 1992.
- Hossain, Md, M., Cleland, D. J., Cleland, A. C. Prediction of freezing and thawing times for foods of two-dimensional irregular shape by using a semi-analytical geometric factor. *Reviu Internationale du Froid*, v. 15, n. 4, p. 235-240, 1992.
- Hossain, Md, M., Cleland, D. J., Cleland, A. C. Prediction of freezing and thawing times for foods of three-dimensional irregular shape by using a semi-analytical geometric factor. *Reviu Internationale du Froid*, v. 15, n. 4, p. 241-246, 1992.
- Incropera, F. P.; Witt, D. P. *Fundamentos da transferência de calor e massa*. Rio de Janeiro: AS. 1992. 455 p.
- Irving, A.R., Shepherd, I. C. Measurement of air circulation rate integral refrigerated shipping containers. *International Journal of Refrigeration*, v. 5, n. 4, 1982.
- Kole, N. K., Prasad, S. Respiration rate and heat of respiration of some fruits under controlled atmosphere conditions. *Reviu Internationale du Froid*, v. 17, n. 3, p. 199-204, 1994.
- Letang, G., Alvarez, G. La réfrigération nas l'air des fruits et des légumes. *Revue du Froid*, v. 47, p. 42-46, 1994.
- Lind, I. Surface heat transfer in thawing by forced air convection. *Journal of Food Engineering*, v. 7, p. 19-39, 1988.
- Maul, F., Vigneault, C., Sargent, S. A., Chau, K. V., Caron, J. Nondestructive sensor system for evaluation of cooling efficiency. *Horticultural Sciences*, v. 21, 1996. 10 p.
- Miller, W, M., Burns, K, K., Whitney, J. D. Effects of harvesting practices on damage to Florida grapefruit and oranges. *American Society of Agricultural Engineers*, v. 11, n. 2, p. 265-269,

1995.

- Mirade, P. S., Arnaud, G. Simulation en deux dimensions de l'aéraulique de deux tunnels de réfrigération des viandes. *International Journal of Refrigeration*, v. 18, n. 6, p. 403-412, 1995.
- Montgomery, D. C. *Introduction to Linear Regression Analysis*. 2. ed. New York: Jonh Wiley & Sons. 1992. 527 p.
- Pflug, I. J. Methods of analysis of precooling data. *Journal ASHRAE*. Atlanta. 42 p. 1973.
- Pham, Q. T. Simplified equation for predicting the freezing time of foodstuffs. *Journal of Food Technology*. v. 21. p. 209-219. 1986.
- Rama, M. V., Narasimham, P. Evaporative cooling of potatoes in small naturally ventilated chambers. *Journal Food Science Technology*, v. 28, n. 3, p. 145-148, 1991.
- Rosset, M. La maîtrise de la chaîne du froid. *Revue du Froid*, n. 940, p. 22-26, 1994.
- Ryall, A.L., Lipton W.J. Handling, transportation, and storage of fruits and vegetables. Vegetables and melons. *The AVI Publishing Company*, v. 1473, 1972.
- Salvadori, V. O., Mascheroni, R, H. Freezing of strawberry pulp in large containers: experimental determination and prediction of freezing times. *International Journal of Refrigeration*, v. 19, n. 2, p. 87-94, 1996.
- Saravacos, G. D., Kostaropoulos, A. E. Transport properties in processing of fruits and vegetables. *Food Technology*, p. 99-105, sept, 1995.
- Shou-Chun, Q. The application of mechanical refrigeration to cave storage of fruit. *International Journal of Refrigeration*, v. 5, n. 4, p. 235-237, 1982.
- Shun-Ching, L., Ching-Yang, C., Cha' o-Kuang C. Finite element solutions of laminar and turbulent

flows with forced and mixed convection in air-cooled room. *Numerical Heat Transfer*, part A, v. 31, p. 529-550, 1997.

Stout, B. A. *Energía para la agricultura mundial*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Colección FAO: Agricultura, n 7, Roma, 1980. 305 p.

Talbot, M. T., Brecht, J. K., Sargent, S. A. Cooling performance evaluation of strawberries containers. *Proceedings State Horticultural Society*, n. 108, p. 258-268, 1995.

Teruel M. B. J, Cortez, L. A B., Neves Fo, C. L. Containers Refrigerados: uma alternativa para a conservação de produtos agrícolas. In: Congreso Iberoamericano de Refrigeración y Aire Acondicionado (CIAR), 4, 1997. *Anais.....*

Teruel M. B. J, Cortez, L. A. B., Leal, P. M.; Neves Fo, C. L. Qualidade pós-colheita de laranja. In: Congresso Brasileiro de Fruticultura, 12, 1998. v. 1. *Anais.....*

ANEXO A

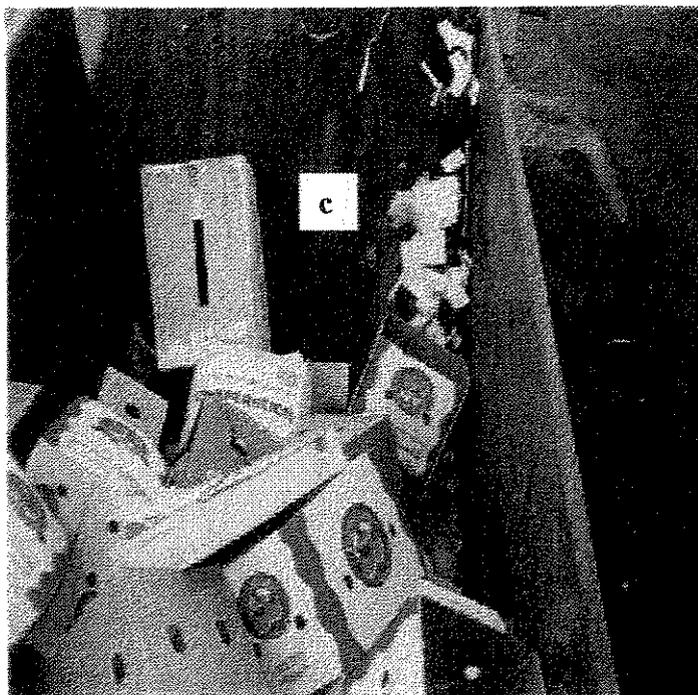
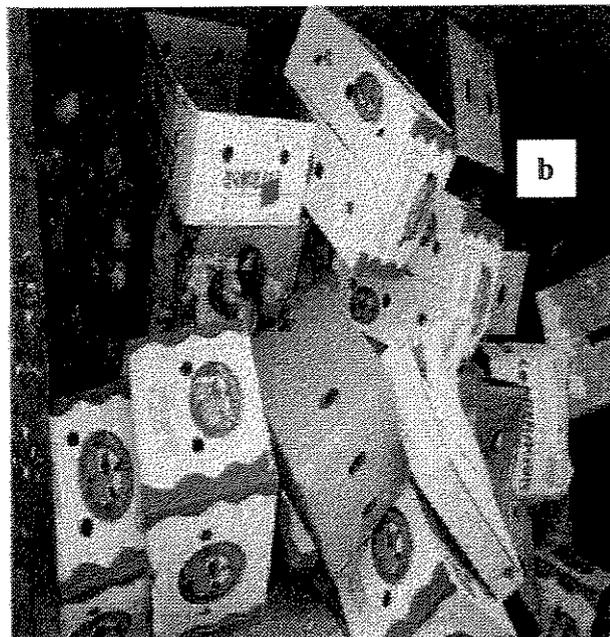


Foto 1- Desperdício de frutas na Central de Abastecimento de Campinas (CEASA, 1999). (a)- Mamão Papaia; (b)- Maçã; (c)- Laranja e tangerina

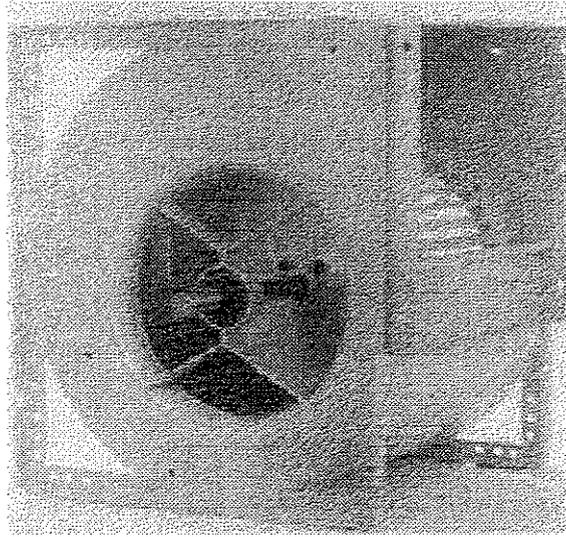


Foto 2- Ventilador Modelo BSC 241-152

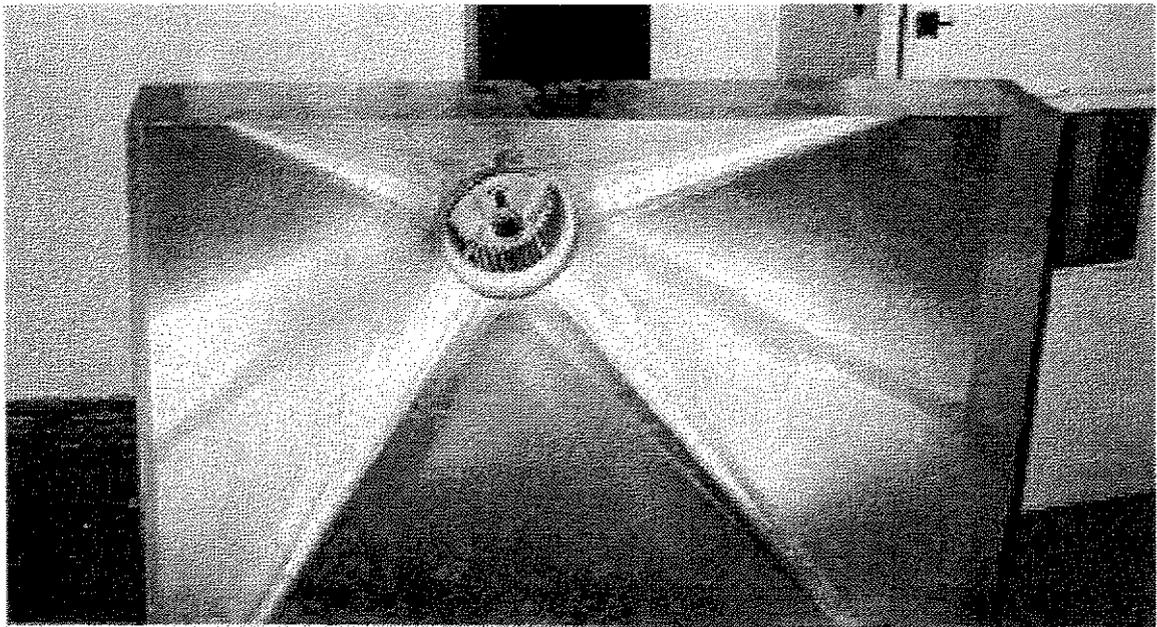


Foto 3- Coifa para condução do ar no sistema de resfriamento com ar forçado

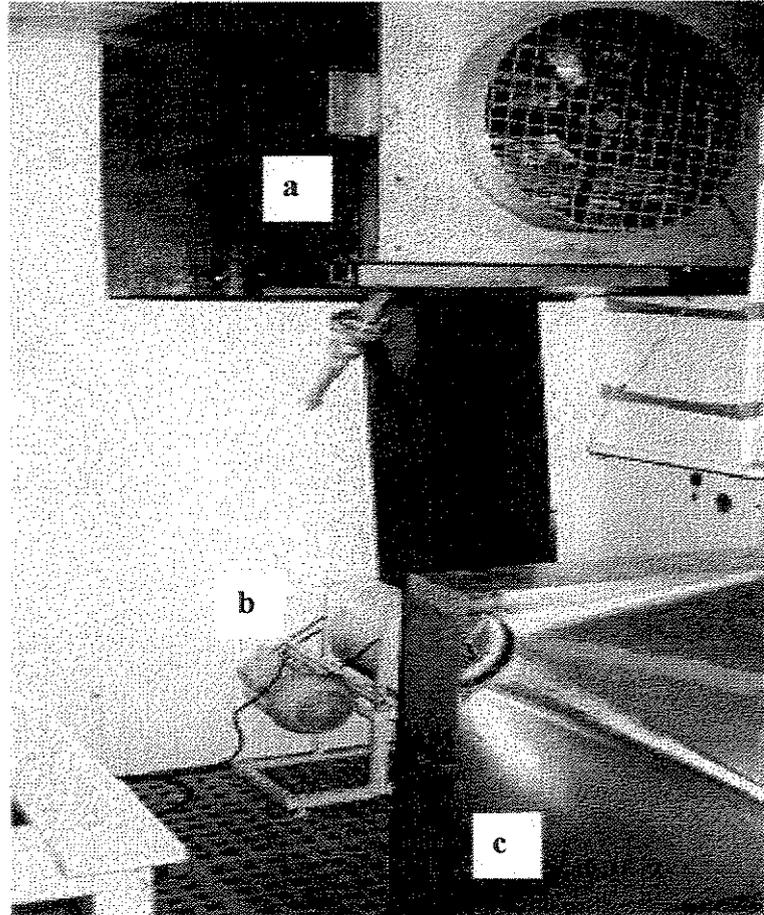


Foto 4- Câmara de refrigeração e sistema de resfriamento com ar forçado. (a)- Evaporador; (b)- Ventilador; (c)- Coifa

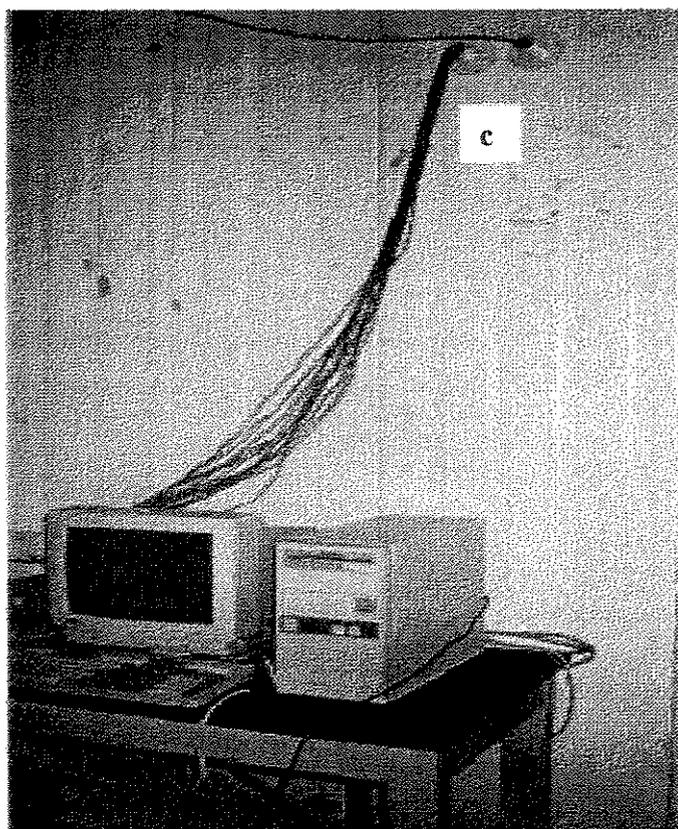
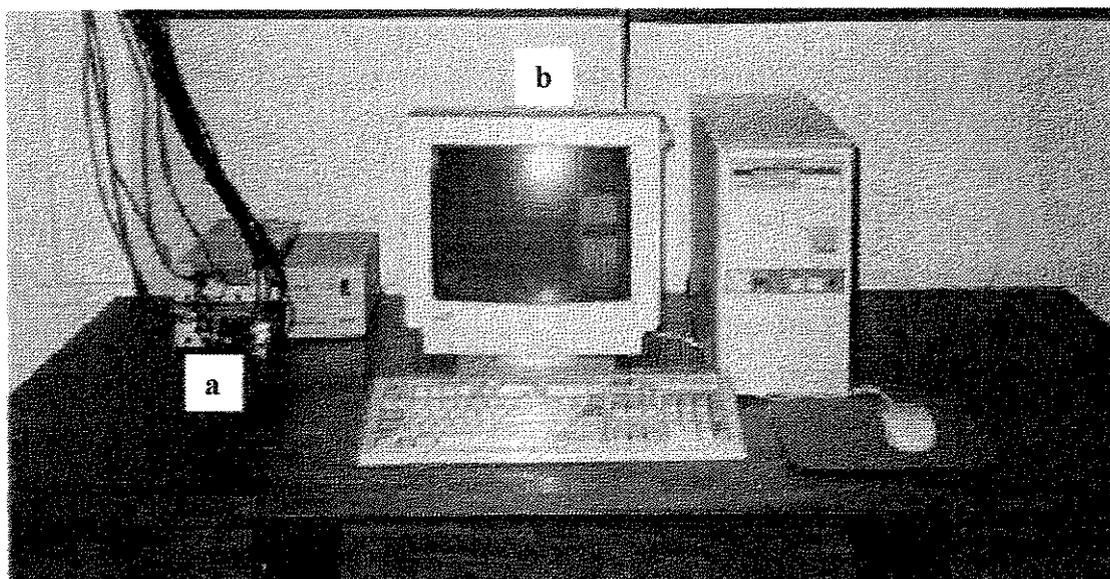


Foto 5- Sistema de aquisição de dados via computador (a)- Conversor de sinais (CAD 12/32); (b)- Computador AT 486; (c)- Termopares entrando na câmara de resfriamento

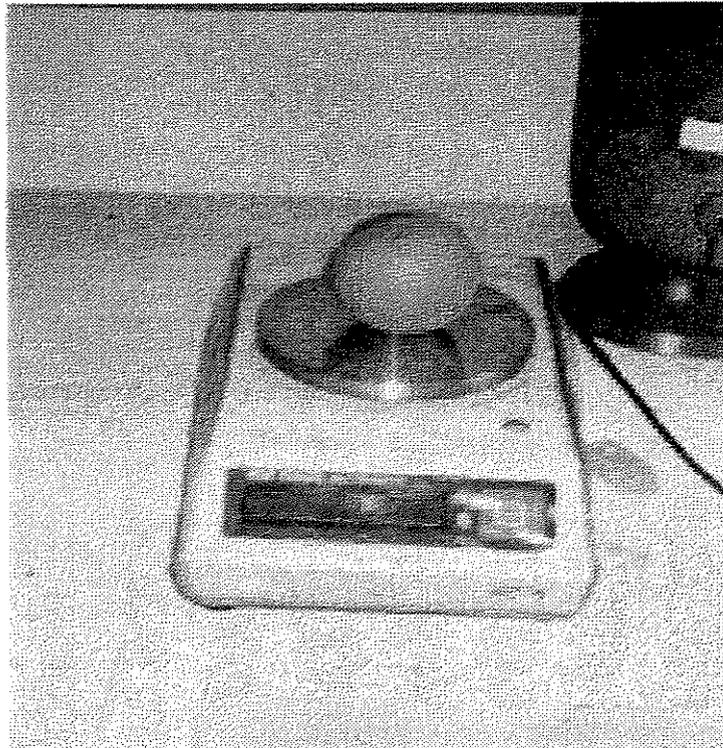


Foto 6- Balança digital usada nos experimentos

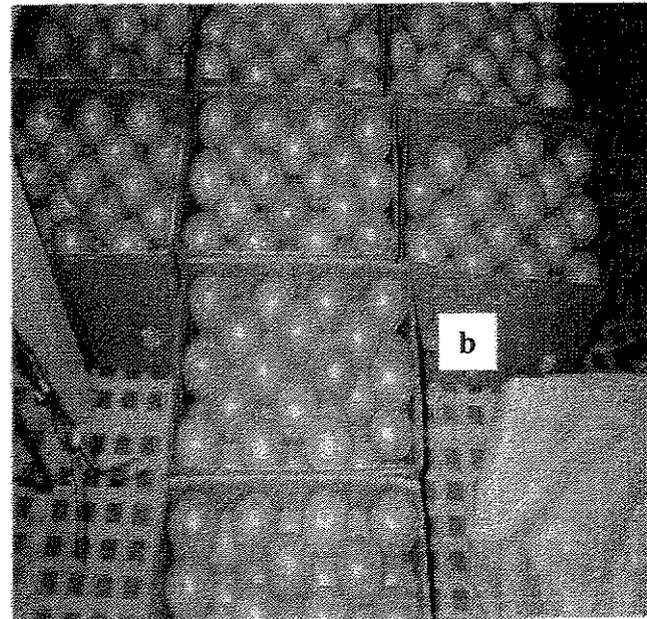
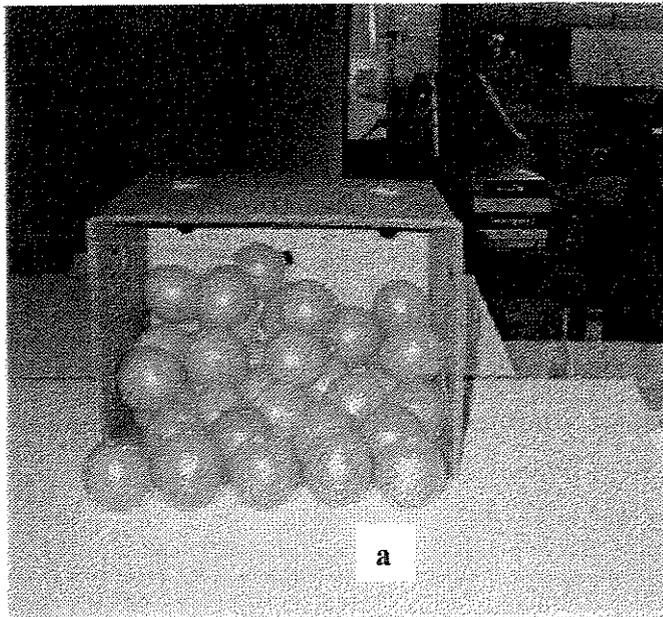


Foto 7- (a)- Laranja Valência; (b)- Disposição em arranjo alternado

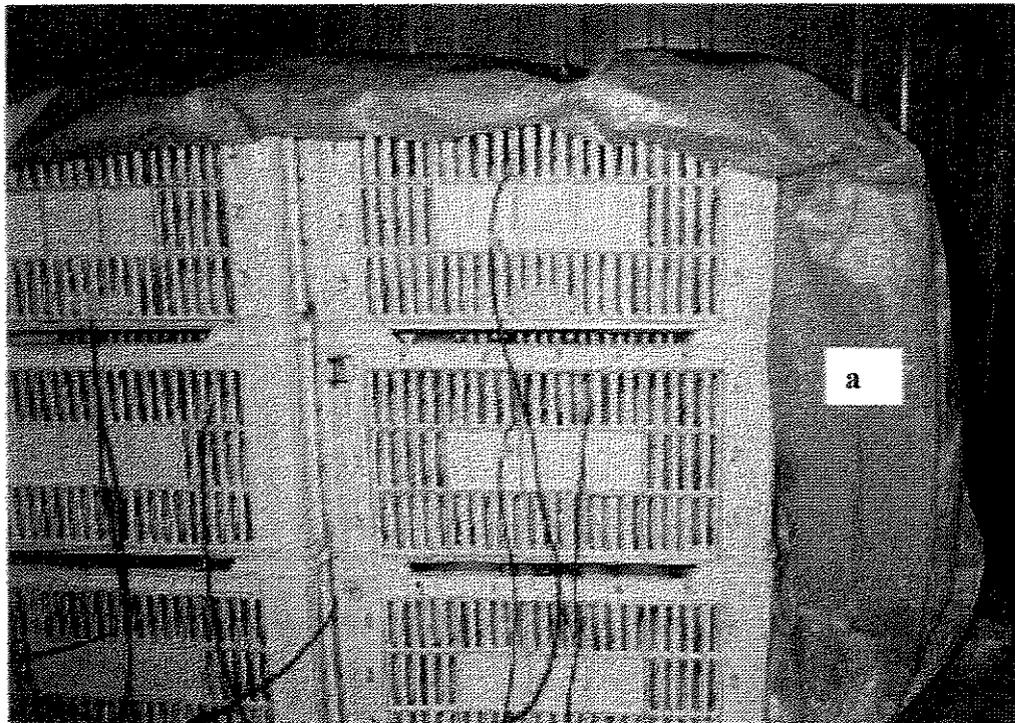


Foto 8- Disposição das embalagens plásticas (EI) no interior do túnel de resfriamento, (a)- Lona fechando o volume de caixas

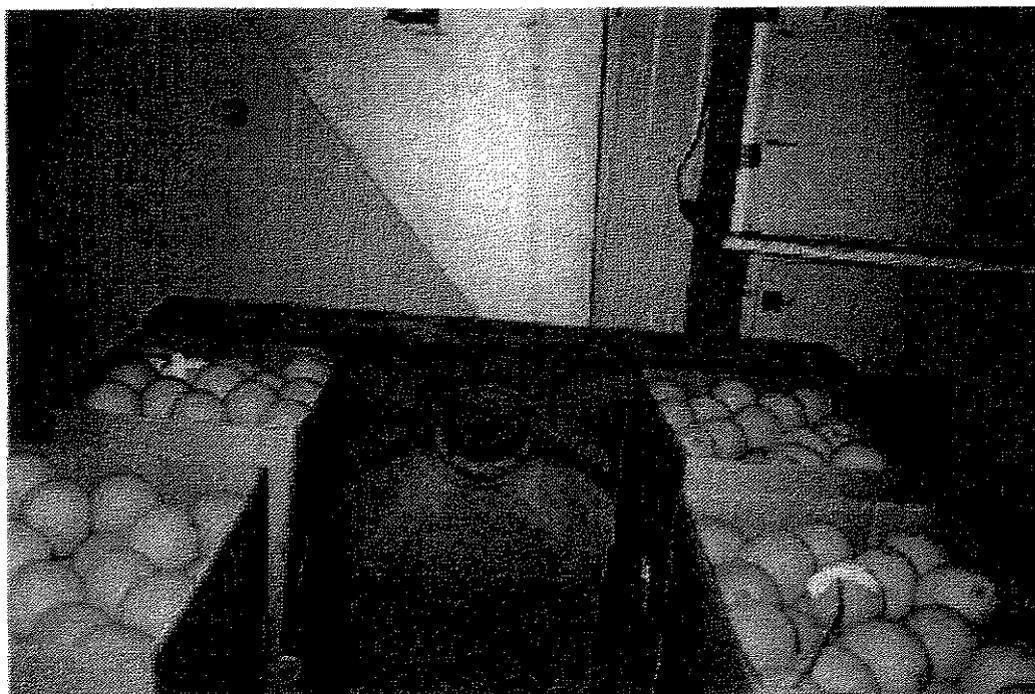


Foto 9- Disposição das embalagens de papelão (EII) no interior do túnel de resfriamento

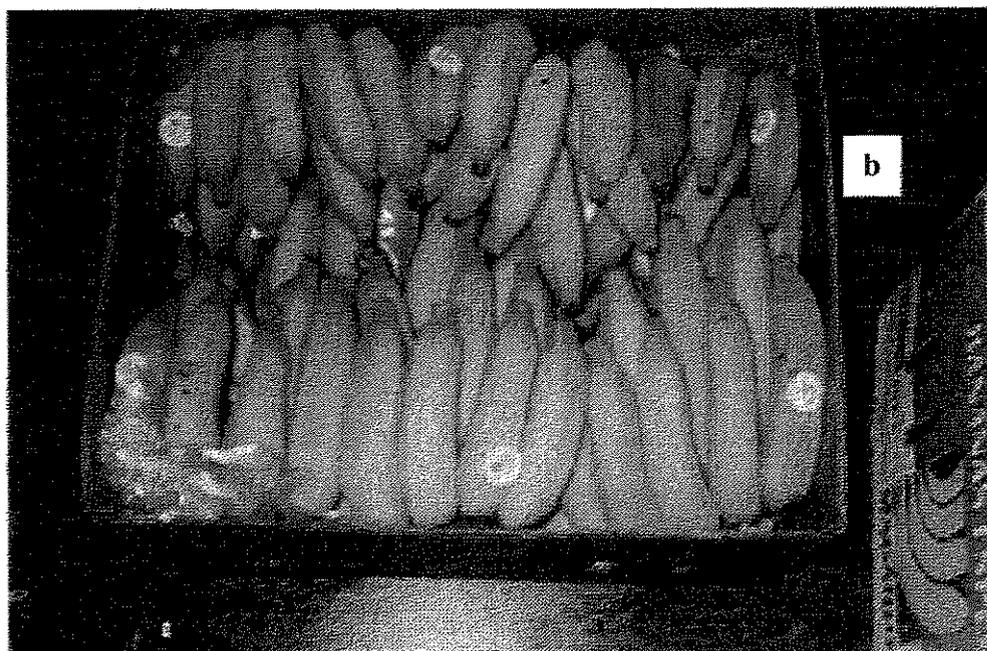


Foto 10- (a)- Embalagem onde é comercializada a banana Prata; (b)- Disposição dos frutos na caixa

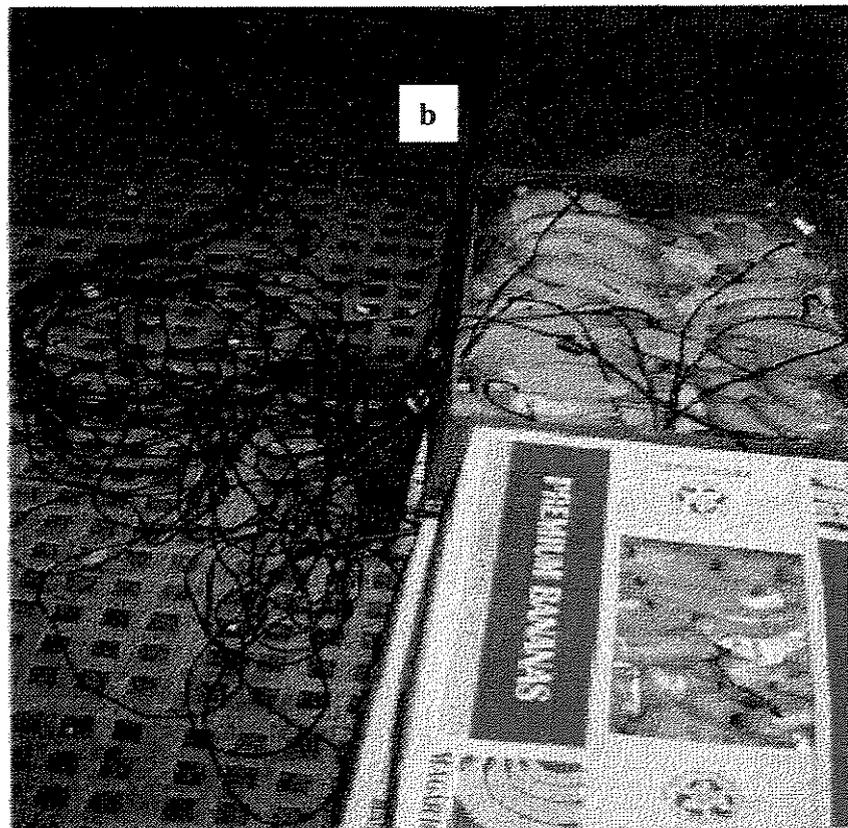


Foto 11- Disposição dos termopares e das embalagens EI (a) e EII (b) no interior do túnel de resfriamento

ANEXO B

Resultados Experimentais

Experimentos com laranja. Resultados para a caixa E

Tabela 1: Tempo de resfriamento (min) nos pontos monitorados

Tratamento	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
	TAT _{1/2}		
FAEI	42,50 ± 2,5	72,50 ± 7,5	92,50 ± 2,5
FBEI	72,50 ± 2,5	90,00 ± 10,0	107,50 ± 7,5
FCEI	95,00 ± 5,0	115,00 ± 5,0	125,00 ± 5,0
FAEII	95,00 ± 5,0	122,50 ± 2,5	145,00 ± 5,0
FBEII	105,00 ± 5,0	130,00 ± 10,0	152,50 ± 2,5
FCEII	132,50 ± 2,5	180,00 ± 5,0	210,00 ± 5,0
TAT _{7/8}			
FAEI	112,50 ± 7,5	190,00 ± 10,0	257,50 ± 12,5
FBEI	230,00 ± 5,0	240,00 ± 5,0	260,00 ± 15,0
FCEI	285,00 ± 5,0	307,50 ± 7,5	342,50 ± 7,5
FAEII	280,00 ± 5,0	297,50 ± 5,0	335,00 ± 5,0
FBEII	305,00 ± 5,0	337,50 ± 12,5	370,00 ± 10,0
FCEII	332,50 ± 5,0	402,50 ± 12,5	427,00 ± 10,0

Tabela 2: Resultados dos testes de hipóteses e da ANOVA (Ponto 1, TAT_{7/8})

Teste de Hipóteses	
Fc	234,66*
Ft	3,11*
Hipóteses testadas	Ho: T1=T2=T3=T4=T5=T6 H1= T1 ≠ T2 ≠ T3 ≠ T4 ≠ T5 ≠ T6
Condição de rejeição da hipótese nula	Fc > Ft
Conclusão	REJEITA Ho
Desdobrando os tratamentos	
Fc (F)	243,88*
Fc (E)	529,00*
Fc (FxE)	81,28*
Ft (F)	3,46
Ft (E)	3,78
Ft (FxE)	3,46
Hipóteses testadas	Ho: Não dependência entre FxE na VR H1= dependência entre FxE na VR
Conclusão	REJEITA Ho
Efeito da embalagem	
Fc (E/FA)	538,68*
Fc (E/FB)	108,00*
Fc (E/FC)	38,88*
Ft	3,78

Hipóteses testadas	Ho: FA=FB= FC
	H1= FA ≠ FB≠ FC
Conclusão	REJEITA Ho
Efeito do fluxo	
Fc (F/EI)	298,16*
Fc (F/EII)	24,00*
Ft	3,46
Hipóteses testadas	Ho: EI = EII
	H1= EI ≠ EII
Conclusão	REJEITA Ho

Tabela 3: Resultados dos testes de hipóteses e da ANOVA (Ponto 3, TAT _{7/8})

Teste de Hipóteses	
Fc	31,42*
Ft	3,11*
Hipóteses testadas	Ho: T1=T2=T3=T4=T5=T6
	H1= T1 ≠ T2 ≠ T3 ≠ T4 ≠ T5 ≠ T6
Condição de rejeição da hipótese nula	Fc > Ft
Conclusão	REJEITA Ho
Desdobrando os tratamentos	
Fc (F)	32,38*
Fc (E)	90,90*
Fc (FxE)	3,72*
Ft (F)	3,46
Ft (E)	3,78
Ft (FxE)	3,46
Hipóteses testadas	Ho: Não dependência entre FxE na VR
	H1= dependência entre FxE na VR
Conclusão	REJEITA Ho
Efeito da embalagem	
Fcalculado [Fc]	
Fc (E/FA)	25,13*
Fc (E/FB)	42,09*
Fc (E/FC)	25,13*
Ft	3,78
Hipóteses testadas	Ho: FA=FB= FC
	H1= FA ≠ FB≠ FC
Conclusão	REJEITA Ho
Efeito do fluxo	
Fc (F/EI)	17,93*
Fc (F/EII)	15,17*
Ft	3,46

Hipóteses testadas	$H_0: EI = EII$
	$H_1 = EI \neq EII$
Conclusão	REJEITA H_0

Análise de resíduos

Probabilidade normal

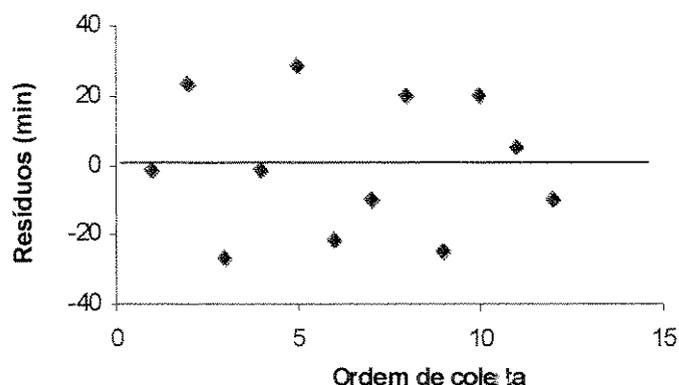


Figura 1: Gráfico de resíduos contra ordem de coleta

Tabela 4: Cálculo do coeficiente de correlação (Probabilidade normal)

Ordem	Resíduos (ei), min	Normalidade (Ei), min	F.NORMAL (P), min	$(ei - em)^2$, min	$(Ei - Em)^2$, min	$(ei * Ei)$, min
1	-26,67	-8,858	-1,64	711,200	78,456	236,230
2	-25	-5,995	-1,11	624,917	35,940	149,876
3	-21,67	-4,267	-0,79	469,517	18,205	92,460
4	-10	-2,916	-0,54	99,967	8,506	29,165
5	-10	-1,674	-0,31	99,967	2,803	16,743
6	-1,67	-0,594	-0,11	2,789	0,353	0,992
7	-1,67	0,594	0,11	2,783	0,353	-0,992
8	5	1,674	0,31	25,017	2,803	8,371
9	20	2,916	0,54	400,067	8,506	58,330
10	20	4,267	0,79	400,067	18,205	85,335
11	23,33	5,995	1,11	544,367	35,940	139,864
12	28,33	8,858	1,64	802,683	78,456	250,933
Média	-0,0017	0,0000	Soma	4183,339	288,526	1067,307
Rt (10%, n)					0,940	
Rc					0,971	
Condição de normalidade Rt < Rc					CUMPRE NORMALIDADE	

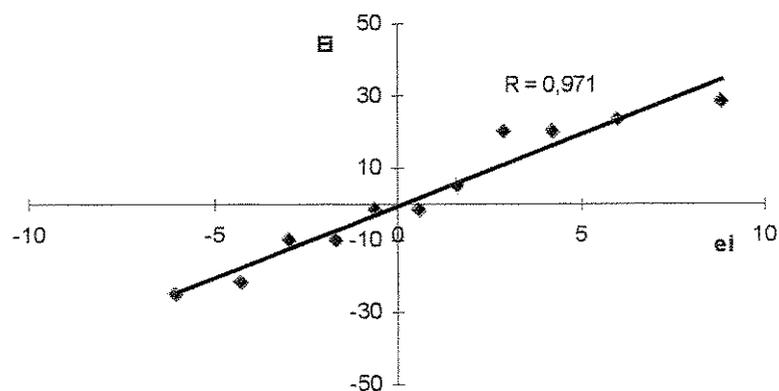


Figura 2: Gráfico de probabilidade normal (Ponto 1, caixa E)

Tabela 5: Valores das dimensões (cm) das laranjas (Experimento FAEI)

Experimento FAEI				
No	P ₁	L ₁	P ₂	L ₂
1	23,00	3,66	24,20	3,85
2	24,30	3,87	25,00	3,98
3	24,00	3,82	25,00	3,98
4	23,80	3,79	24,50	3,90
5	23,20	3,69	24,00	3,82
6	24,80	3,95	25,80	4,11
7	24,00	3,82	24,20	3,85
8	24,00	3,82	24,00	3,82
9	23,50	3,74	24,80	3,95
10	23,00	3,66	24,90	3,96
11	23,10	3,68	24,00	3,82
12	24,00	3,82	24,00	3,82
13	23,80	3,79	24,50	3,90
14	24,00	3,82	25,20	4,01
15	24,00	3,82	23,80	3,79
16	23,00	3,66	23,10	3,68
17	24,00	3,82	24,10	3,84
18	23,50	3,74	24,50	3,90
19	24,00	3,82	24,50	3,90
20	24,00	3,82	24,50	3,90
21	23,80	3,79	24,40	3,88
22	23,10	3,66	23,80	3,79
23	24,00	3,82	24,50	3,90
24	23,20	3,66	24,20	3,85
25	24,10	3,82	24,80	3,95
26	23,50	3,74	24,20	3,85
27	24,20	3,85	26,00	4,14
28	24,00	3,82	26,00	4,14
29	24,00	3,82	24,50	3,90

30	23,20	3,66	24,00	3,82
31	24,30	3,82	24,50	3,90
32	24,20	3,85	24,20	3,85
33	24,00	3,82	24,50	3,90
34	23,20	3,69	24,00	3,82
35	23,90	3,80	24,40	3,88
36	24,00	3,82	24,30	3,87
37	24,20	3,85	24,50	3,90
38	23,10	3,66	24,20	3,85
39	24,00	3,82	24,20	3,85
40	23,10	3,66	24,00	3,82
41	24,20	3,85	24,30	3,87
42	24,20	3,85	24,50	3,90
43	23,80	3,79	24,10	3,84
44	23,80	3,79	24,00	3,82
45	24,00	3,82	24,30	3,87
46	23,30	3,71	24,80	3,95
47	23,90	3,80	24,20	3,85
48	23,80	3,79	23,90	3,80
49	23,80	3,79	23,90	3,80
50	24,20	3,85	26,00	4,14
51	24,20	3,85	26,00	4,14
52	23,80	3,79	24,50	3,90
53	23,80	3,79	24,00	3,82
54	24,00	3,82	24,50	3,90
55	22,20	3,50	24,20	3,85
56	23,90	3,80	24,50	3,90
57	23,80	3,79	24,20	3,85
58	23,80	3,79	24,10	3,84
59	24,20	3,85	24,60	3,92
60	24,00	3,82	24,10	3,84
61	23,00	3,66	24,20	3,85
62	24,10	3,82	24,30	3,87
63	24,00	3,82	24,50	3,90
64	24,00	3,82	24,50	3,90
65	24,80	3,95	24,90	3,96
66	24,60	3,92	25,00	3,98
67	24,00	3,82	24,50	3,90
68	24,30	3,87	24,50	3,90
69	24,00	3,82	24,60	3,92
70	24,00	3,82	24,20	3,85
71	24,00	3,82	24,80	3,95
72	24,10	3,84	24,80	3,95
73	24,00	3,82	24,50	3,90
74	23,50	3,74	24,10	3,84
75	24,00	3,82	24,90	3,96
76	24,00	3,82	24,20	3,85
77	24,00	3,82	24,20	3,85
79	23,90	3,80	24,60	3,85
80	24,10	3,83	24,70	3,93
Média	23,80	3,78	24,43	3,89

DP	0,46	0,07	0,51	0,08
----	------	------	------	------

Tabela 6: Resumo das dimensões (cm) das laranjas em todos os tratamentos

Tratamento	L ₂	L ₁	L ₂ /L ₁
FAEI	3,89 ± 0,08	3,78 ± 0,07	1,03
FBEI	3,91 ± 0,07	3,81 ± 0,06	1,03
FCEI	3,87 ± 0,08	3,77 ± 0,06	1,03
FAEH	3,95 ± 0,08	3,81 ± 0,05	1,04
FBEH	3,91 ± 0,07	3,80 ± 0,06	1,03
FCEH	3,92 ± 0,07	3,80 ± 0,06	1,03
Média	3,91 ± 0,024	3,80 ± 0,015	1,03

Tabela 7: Peso das laranjas (g) antes e depois do resfriamento (Experimento FAEI)

Experimento FAEI				
No.	M _i	M _f	M _p , g	M _p , %
1	215,94	215,78	0,16	0,074
2	206,92	206,51	0,41	0,198
3	208,13	207,96	0,17	0,083
4	220,69	220,58	0,11	0,051
5	220,80	220,75	0,05	0,023
6	207,85	207,66	0,19	0,091
7	234,66	233,97	0,69	0,294
8	207,66	207,43	0,23	0,111
9	209,54	209,13	0,41	0,194
10	217,43	217,32	0,11	0,052
11	197,1	196,84	0,26	0,132
12	210,76	210,55	0,21	0,098
13	214,25	214,16	0,09	0,044
14	220,94	220,68	0,26	0,118
15	226,73	226,23	0,50	0,219
16	195,99	195,13	0,86	0,440
17	195,45	195,29	0,16	0,082
18	212,98	212,96	0,02	0,009
19	211,77	211,58	0,19	0,091
20	210,99	210,86	0,13	0,060
21	209,33	208,95	0,38	0,182
22	240,96	240,50	0,46	0,190
23	187,39	187,13	0,26	0,137
24	207,43	207,31	0,12	0,058
25	214,55	214,17	0,38	0,176
26	207,82	207,58	0,24	0,114
27	192,23	192,21	0,02	0,009
28	209,51	209,39	0,12	0,057
29	215,92	215,67	0,25	0,116
30	215,33	215,1	0,23	0,107
31	245,18	245,02	0,16	0,065
32	209,79	209,51	0,28	0,133
33	213,16	213,04	0,12	0,056
34	219,68	219,58	0,10	0,046

35	225,78	225,66	0,12	0,053
36	195,13	194,91	0,22	0,113
37	194,52	194,42	0,10	0,051
38	212,16	212,05	0,11	0,052
39	210,78	210,65	0,13	0,062
40	209,86	209,69	0,17	0,081
41	208,25	208,10	0,15	0,072
42	224,86	224,71	0,15	0,067
43	210,73	210,57	0,16	0,076
44	223,00	222,84	0,16	0,072
45	212,12	211,96	0,16	0,075
46	227,73	227,51	0,22	0,097
47	225,28	225,07	0,21	0,093
48	221,82	221,65	0,17	0,077
49	210,15	210,03	0,12	0,057
50	219,59	219,44	0,15	0,068
51	231,14	230,99	0,15	0,065
52	209,26	209,14	0,12	0,057
53	212,46	212,43	0,03	0,013
54	225,87	225,73	0,14	0,062
55	222,27	222,05	0,22	0,099
56	210,72	210,57	0,15	0,071
57	220,15	219,84	0,31	0,141
58	225,09	224,88	0,21	0,093
59	213,46	213,44	0,03	0,012
60	201,99	201,84	0,15	0,074
61	220,35	220,24	0,11	0,050
62	215,81	215,68	0,13	0,060
63	191,20	191,09	0,11	0,058
64	206,36	206,23	0,13	0,063
65	201,37	201,31	0,06	0,030
66	228,43	228,28	0,15	0,066
67	203,75	203,65	0,10	0,049
68	214,07	213,97	0,10	0,047
69	235,78	235,76	0,02	0,010
70	213,44	213,39	0,05	0,023
71	207,24	207,17	0,07	0,034
72	204,18	204,01	0,17	0,083
73	224,15	224,08	0,07	0,031
74	223,42	223,31	0,11	0,049
75	207,12	207,02	0,10	0,048
76	216,77	216,71	0,06	0,028
77	215,81	215,64	0,17	0,079
78	225,09	224,99	0,10	0,044
79	213,46	213,34	0,12	0,056
80	214,56	214,47	0,09	0,042
Média	214,04	213,86	0,18	0,084
DP	10,95	10,93	0,14	0,065

Experimentos com banana. Resultados para a caixa E

Tabela 8: Tempo de resfriamento (min) em todos os tratamentos (banana)

Tratamento	Ponto 1	Ponto 2
	TAT_{1/2}	
FAEI	50,00 ± 7,50	75,00 ± 7,50
FCEI	80,50 ± 5,00	120,00 ± 10,00
FAEII	65,00 ± 7,50	135,00 ± 5,00
FCEII	150,50 ± 7,50	180,00 ± 10,00
TAT_{7/8}		
FAEI	125,50 ± 5,00	150,50 ± 5,00
FCEI	230,00 ± 7,50	320,50 ± 5,00
FAEII	310,50 ± 10,00	330,00 ± 12,50
FCEII	450,50 ± 10,00	550,00 ± 12,50

Tabela 9: Resultados dos testes de hipóteses e da ANOVA (Ponto 1, TAT_{7/8})

Teste de Hipóteses	
Fc	25,00*
Ft (4, 3, 10%)	4,19
Hipóteses testadas	Ho: T1=T2=T3=T4 H1= T1 ≠ T2 ≠ T3 ≠ T4
Condição de rejeição da hipótese nula	Fc > Ft
Conclusão	REJEITA Ho
Desdobrando os tratamentos	
Fc (F)	288,00*
Fc (E)	312,50*
Fc (Fx E)	11,50*
Ft (F)	4,54
Ft (E)	4,54
Ft (Fx E) (4, 1, 10%)	4,54
Hipóteses testadas	Ho: Não dependência entre Fx E na VR H1= dependência entre Fx E na VR
Conclusão	REJEITA Ho
Efeito da embalagem	
Fc (E/FA)	121,00*
Fc (E/FC)	196,00*
Ft (4, 1, 10%)	4,54
Hipóteses testadas	Ho: FA=FC H1= FA ≠ FC
Conclusão	REJEITA Ho
Efeito do fluxo	
Fc (F/EI)	110,25*
Fc (F/EII)	182,25*
Ft (4,1, 10%)	4,54

Hipóteses testadas	Ho: EI = EII
	H1= EI ≠ EII
Conclusão	REJEITA Ho

Tabela 10: Resultados dos testes de hipóteses e da ANOVA (Ponto 3, TAT ^{7/8})

Teste de Hipóteses	
Fc	236,72*
Ft (4, 3, 10%)	4,19
Hipóteses testadas	Ho: T1=T2=T3=T4
	H1= T1 ≠ T2 ≠ T3 ≠ T4
Condição de rejeição da hipótese nula	Fc > Ft
Conclusão	REJEITA Ho
Desdobrando os tratamentos	
Fc (F)	249,45*
Fc (E)	459,45*
Fc (FxE)	8,27*
Ft (F)	4,54
Ft (E)	4,54
Ft (FxE) (4, 1, 10%)	4,54
Hipóteses testadas	Ho: Não dependência entre FxE na VR
	H1= dependência entre FxE na VR
Conclusão	REJEITA Ho
Efeito da embalagem	
Fc (E/FA)	206,18*
Fc (E/FC)	254,54*
Ft (4, 1, 10%)	4,54
Hipóteses testadas	Ho: FA=FC
	H1= FA ≠ FC
Conclusão	REJEITA Ho
Efeito do fluxo	
Fc (F/EI)	107,54*
Fc (F/EII)	143,18*
Ft (4,1, 10%)	4,54
Hipóteses testadas	Ho: EI = EII
	H1= EI ≠ EII
Conclusão	REJEITA Ho

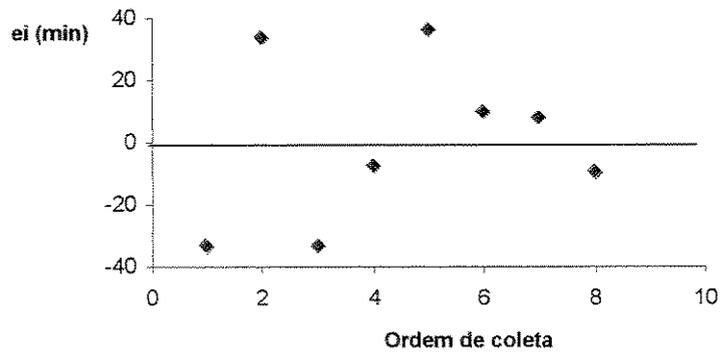


Figura 3: Gráfico de resíduos contra ordem de coleta

Tabela 11: Cálculo do coeficiente de correlação (Probabilidade normal)

Ordem	Resíduos (ei), min	Normalidade (Ei), min	F. normal (P), min	$(ei - em)^2$, min	$(Ei - Em)^2$, min	$(ei * Ei)$, min
1	-33,75	-8,20	-1,44	1168,73	67,27	277,06
2	-33,25	-4,90	-0,86	1134,84	23,96	163,01
3	-9,5	-2,73	-0,48	98,75	7,44	25,99
4	-7,5	-0,91	-0,16	63,00	0,81	6,84
5	7,5	0,91	0,16	91,44	0,84	9,12
6	10,00	2,67	0,47	132,25	7,21	20,09
7	33,75	4,90	0,86	1282,53	24,10	177,72
8	36,25	8,20	1,44	1109,72	67,50	277,06
Média	0,040	-0,0071	Σ	5081,33	199,18	956,92
Rt (10%, n)					0,918	
Rc					0,951	
Condição de normalidade Rt < Rc					CUMPRE NORMALIDADE	

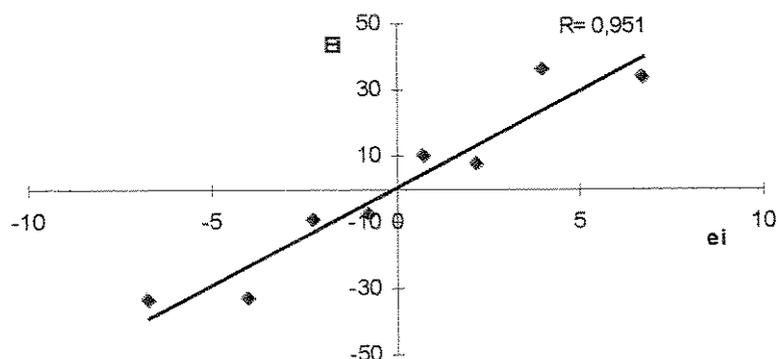


Figura 4: Gráfico de probabilidade normal

Tabela 11: Dimensões das bananas (cm) (Experimento FAEI)

Experimento FAEI						
No	Pe ₂ '	Pe ₂	Pe _{2m}	L ₂	P ₁	L ₁
1	18,00	14,00	16,00	8,00	13,00	2,07
2	16,50	14,50	15,50	7,75	13,20	2,10
3	15,50	14,80	15,15	7,58	13,00	2,07
4	14,80	14,20	14,50	7,25	13,00	2,07
5	16,10	14,00	15,05	7,53	13,00	2,07
6	18,00	13,00	15,50	7,75	12,50	1,99
7	18,00	14,10	16,05	8,03	13,10	2,08
8	17,20	15,50	16,35	8,18	12,50	1,99
9	18,30	15,30	16,80	8,40	13,30	2,12
10	15,30	14,30	14,80	7,40	12,40	1,97
11	15,20	14,80	15,00	7,50	12,90	2,05
12	15,60	13,20	14,40	7,20	12,9	2,05
13	14,80	13,80	14,30	7,15	12,50	1,99
14	18,50	17,50	18,00	9,00	12,60	2,01
15	17,90	16,30	17,10	8,55	13,10	2,08
16	18,00	17,50	17,75	8,88	13,50	2,15
17	18,00	15,80	16,90	8,45	12,50	1,99
18	17,50	16,40	16,95	8,48	12,80	2,04
19	18,20	15,60	16,90	8,45	12,50	1,99
20	14,80	13,20	14,00	7,00	13,00	2,07
21	16,10	14,20	15,15	7,58	12,80	2,04
22	18,00	16,40	17,20	8,60	12,60	2,01
23	18,00	13,20	15,60	7,80	12,50	1,99
24	17,20	14,20	15,70	7,85	12,90	2,05
25	18,30	14,50	16,40	8,20	13,60	2,16
26	15,30	13,50	14,40	7,20	12,80	2,04
27	15,30	13,30	14,30	7,15	12,60	2,01
28	15,20	13,80	14,50	7,25	12,90	2,05
29	15,60	13,20	14,40	7,20	12,80	2,04
30	14,80	12,50	13,65	6,83	12,60	2,01
Média	16,67	14,55	15,61	7,81	12,85	2,04
DP	1,35	1,30	1,18	0,59	0,30	0,05

Tabela 12: Resumo das dimensões das bananas (cm em todos os tratamentos)

Tratamento	L ₂	L ₁	L ₂ /L ₁
FAEI	7,81 ± 0,59	2,04 ± 0,05	3,83
FCEI	8,31 ± 0,48	1,98 ± 0,06	4,21
FAEII	8,53 ± 0,35	2,03 ± 0,08	4,20
FCEII	8,38 ± 0,51	2,05 ± 0,07	4,09
Média	8,26 ± 0,48	2,03 ± 0,07	4,08

Tabela 13: Peso dos frutos antes e depois do resfriamento (g)

Experimento FAEI				
No. Cacho	M _i	M _f	M _p , g	M _p , %
1	1,23	1,22	0,01	0,816
2	1,56	1,53	0,02	1,607
3	1,15	1,13	0,02	1,73
4	1,22	1,12	0,10	7,818
5	1,50	1,48	0,02	1,003
6	1,29	1,28	0,02	1,162
7	1,79	1,73	0,05	3,081
8	1,56	1,52	0,04	2,564
9	1,47	1,41	0,06	4,081
10	1,35	1,34	0,01	0,740
11	1,04	1,02	0,01	1,449
12	1,56	1,55	0,02	0,961
Média	1,39	1,35	0,031	2,252
DP	0,215	0,210	0,026	2,027

ANEXO C

Resultados da Modelagem Teórica

Experimentos com laranja. Ponto 3, caixa B.

Experimentos FBEI

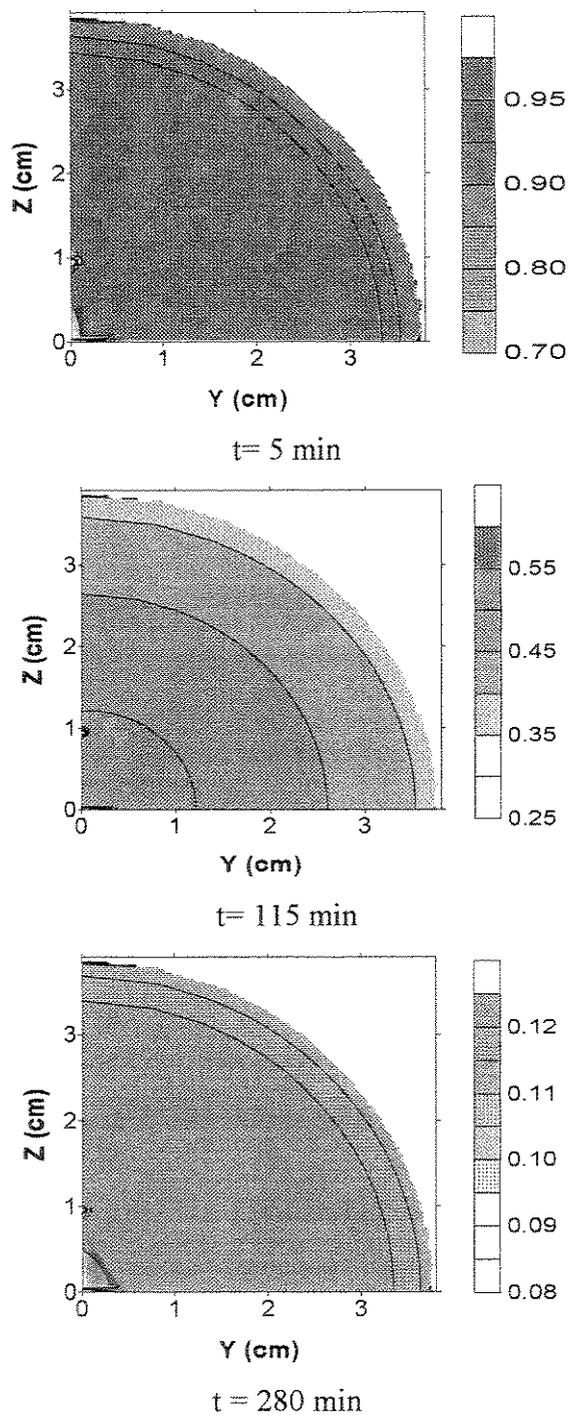


Figura 5: Distribuição da TAT no fruto para três instantes de tempo (ponto 3)

Experimento FCEI

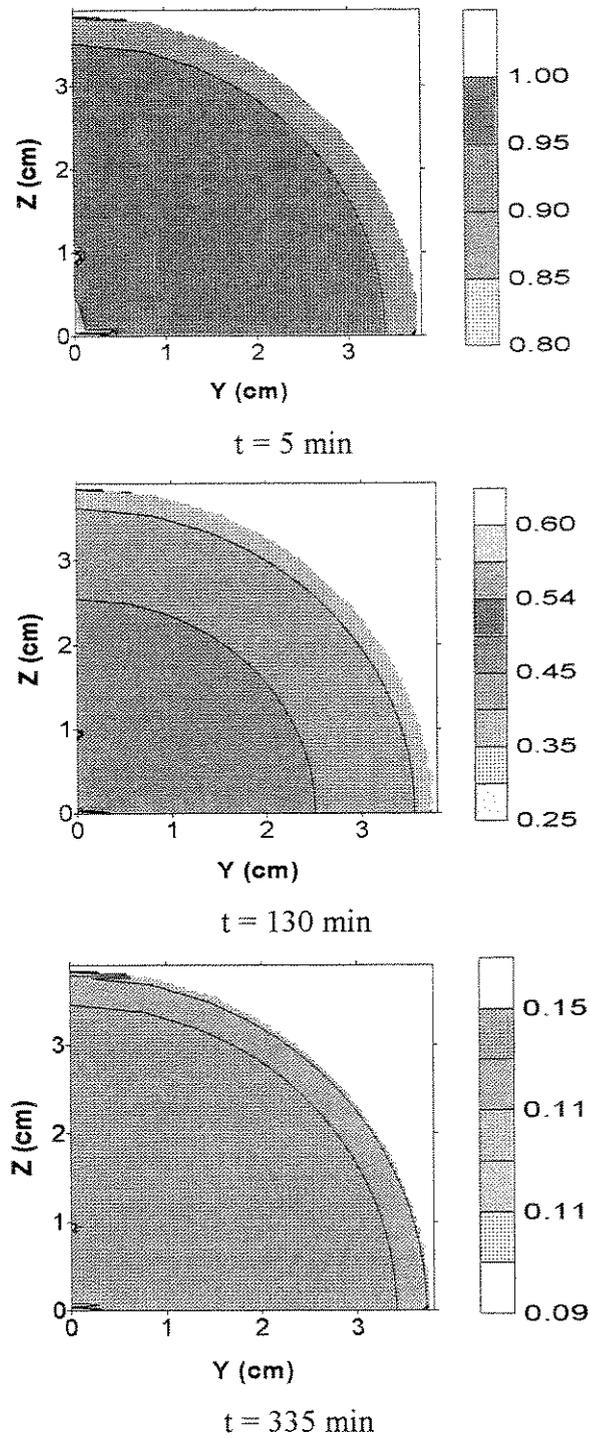
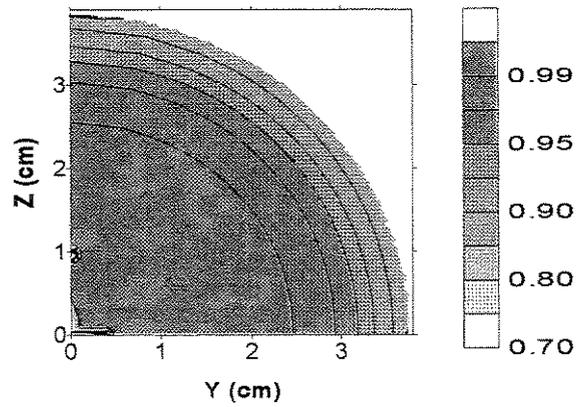
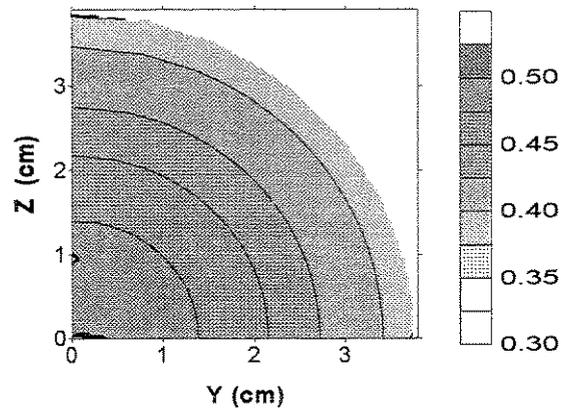


Figura 6: Distribuição da TAT no fruto para três instantes de tempo (ponto 3)

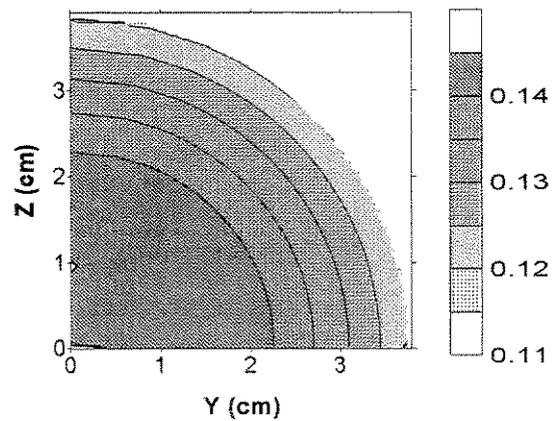
Experimento FAEII



t = 5 min



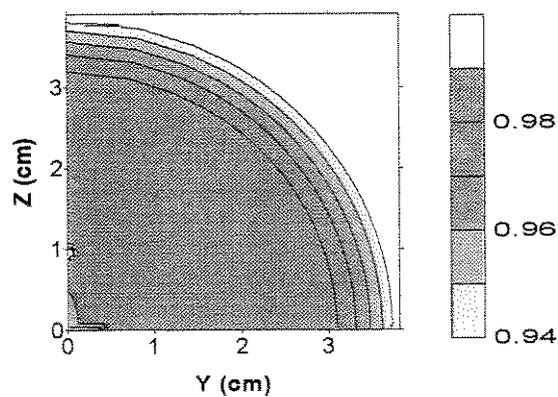
t = 115 min



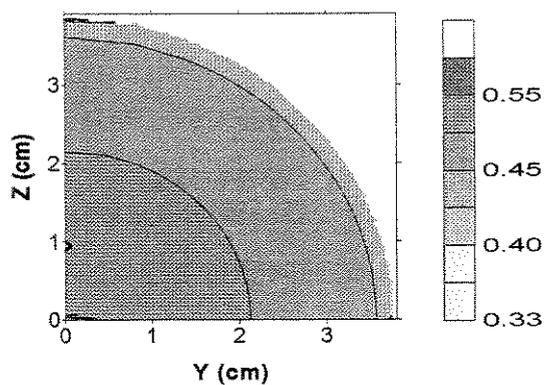
t = 300 min

Figura 7: Distribuição da TAT no fruto para três instantes de tempo (ponto 3)

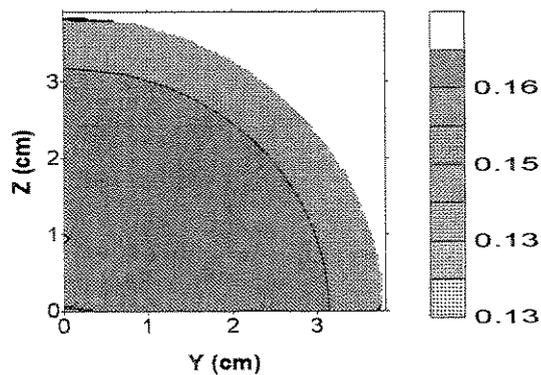
Experimento FBELI



t = 5 min



t = 170 min



t = 395 min

Figura 8: Distribuição da TAT no fruto para três instantes de tempo (ponto 3)

Experimento FCEII

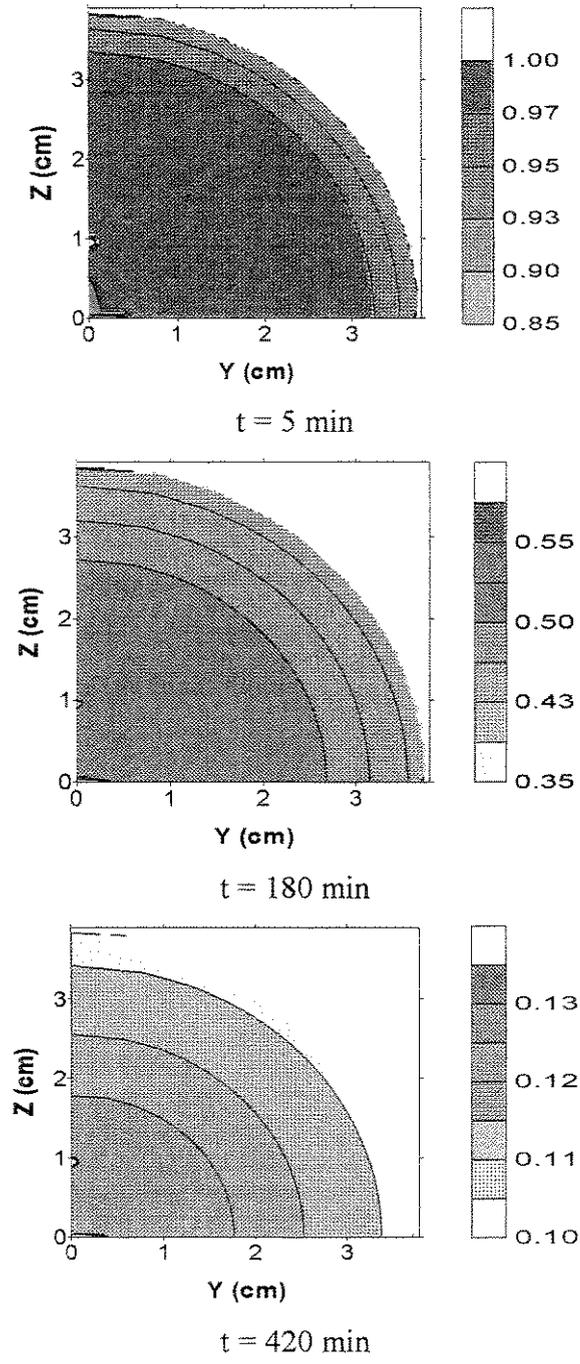


Figura 9: Distribuição da TAT no fruto para três instantes de tempo (ponto 3)

TEMPO DE RESFRIAMENTO= 2000.000000 FORIER= 2.499702
FORIER= 1.468144E-01

TPMÉDIO= 3.875597E-01 BIOT= 8.967895E-01

.000	.715	.714	.714	.713	.712	.711	.710	.708	.707	.705	.703	.700	.697	.694	.691	.687	.683	.678	.000
.701	.701	.701	.700	.700	.699	.698	.697	.695	.694	.692	.690	.688	.685	.683	.680	.677	.673	.670	.667
.686	.686	.686	.686	.685	.684	.683	.682	.681	.679	.677	.675	.673	.671	.668	.666	.663	.659	.656	.653
.669	.669	.669	.669	.668	.667	.666	.665	.664	.662	.661	.659	.657	.654	.652	.649	.646	.643	.640	.637
.650	.650	.650	.650	.649	.648	.647	.646	.645	.643	.642	.640	.638	.636	.633	.631	.628	.625	.622	.619
.629	.629	.629	.628	.628	.627	.626	.625	.624	.623	.621	.619	.617	.615	.613	.610	.608	.605	.602	.599
.606	.606	.606	.605	.605	.604	.603	.602	.601	.600	.598	.597	.595	.593	.590	.588	.586	.583	.580	.577
.581	.581	.581	.580	.580	.579	.578	.577	.576	.575	.574	.572	.570	.568	.566	.564	.562	.559	.556	.554
.554	.554	.554	.553	.553	.552	.552	.551	.550	.549	.547	.546	.544	.542	.540	.538	.536	.534	.531	.529
.526	.525	.525	.525	.525	.524	.523	.523	.522	.520	.519	.518	.516	.515	.513	.511	.509	.507	.504	.502
.496	.496	.495	.495	.495	.494	.494	.493	.492	.491	.490	.488	.487	.485	.484	.482	.480	.478	.476	.474
.464	.464	.464	.464	.464	.463	.462	.462	.461	.460	.459	.458	.456	.455	.453	.452	.450	.448	.446	.444
.432	.432	.432	.431	.431	.431	.430	.430	.429	.428	.427	.426	.425	.423	.422	.421	.419	.417	.415	.414
.398	.398	.398	.398	.398	.397	.397	.396	.396	.395	.394	.393	.392	.391	.390	.388	.387	.385	.384	.382
.364	.364	.364	.364	.364	.363	.363	.362	.362	.361	.360	.360	.359	.358	.357	.355	.354	.353	.351	.350
.329	.329	.329	.329	.329	.328	.328	.327	.327	.326	.326	.325	.324	.323	.322	.321	.320	.319	.317	.317
.294	.294	.294	.294	.294	.294	.293	.293	.292	.292	.291	.290	.290	.289	.288	.287	.286	.285	.284	.284
.259	.259	.259	.259	.259	.259	.258	.258	.258	.257	.257	.256	.256	.255	.254	.254	.253	.252	.251	.251
.224	.224	.224	.224	.224	.224	.224	.223	.223	.223	.222	.222	.222	.221	.221	.220	.219	.219	.218	.218
.000	.207	.207	.207	.207	.207	.207	.206	.206	.206	.205	.205	.205	.204	.204	.203	.203	.202	.202	.000

NUMERO DE ITERACOES NO ESPACO= 201
NUMERO DE ITERACOES NO TEMPO= 150 L2/L1= 1.028947
TEMPO DE RESFRIAMENTO= 2500.000000 FORIER= 3.749553
FORIER= 2.202216E-01

TPMÉDIO= 2.538930E-01 BIOT= 8.967895E-01

.000	.484	.484	.483	.483	.482	.481	.480	.479	.478	.476	.475	.473	.471	.468	.466	.463	.460	.456	.000
.474	.474	.473	.473	.473	.472	.471	.470	.469	.468	.467	.465	.463	.462	.460	.458	.455	.453	.450	.448
.463	.463	.462	.462	.462	.461	.460	.459	.458	.457	.456	.454	.453	.451	.449	.447	.445	.442	.440	.438
.450	.450	.450	.449	.449	.448	.448	.447	.446	.445	.444	.442	.440	.439	.437	.435	.433	.430	.428	.426
.436	.436	.436	.435	.435	.434	.434	.433	.432	.431	.430	.428	.427	.425	.423	.421	.419	.417	.415	.413
.420	.420	.420	.420	.420	.419	.418	.418	.417	.416	.414	.413	.412	.410	.408	.407	.405	.402	.400	.398
.404	.404	.404	.403	.403	.402	.402	.401	.400	.399	.398	.397	.395	.394	.392	.391	.389	.387	.385	.383
.386	.386	.386	.385	.385	.385	.384	.383	.382	.381	.380	.379	.378	.377	.375	.373	.372	.370	.368	.366
.367	.367	.367	.366	.366	.366	.365	.364	.364	.363	.362	.361	.359	.358	.357	.355	.353	.352	.350	.348
.347	.347	.347	.347	.346	.346	.345	.345	.344	.343	.342	.341	.340	.339	.337	.336	.334	.333	.331	.329
.326	.326	.326	.326	.325	.325	.325	.324	.323	.323	.322	.321	.320	.319	.317	.316	.315	.313	.312	.310
.305	.305	.304	.304	.304	.304	.303	.303	.302	.301	.301	.300	.299	.298	.297	.295	.294	.293	.291	.290
.283	.282	.282	.282	.282	.282	.281	.281	.280	.280	.279	.278	.277	.276	.275	.274	.273	.272	.270	.269
.260	.260	.260	.260	.260	.259	.259	.258	.258	.257	.257	.256	.255	.254	.254	.253	.252	.250	.249	.248
.237	.237	.237	.237	.237	.236	.236	.236	.235	.235	.234	.234	.233	.232	.231	.231	.230	.229	.228	.227
.214	.214	.214	.214	.214	.214	.213	.213	.213	.212	.212	.211	.211	.210	.209	.208	.207	.206	.205	.205
.191	.191	.191	.191	.191	.191	.190	.190	.190	.189	.189	.189	.188	.188	.187	.186	.186	.185	.184	.183
.168	.168	.168	.168	.168	.168	.168	.167	.167	.167	.166	.166	.166	.165	.165	.164	.164	.163	.162	.162
.145	.145	.145	.145	.145	.145	.145	.145	.145	.144	.144	.144	.143	.143	.143	.142	.142	.141	.141	.141
.000	.134	.134	.134	.134	.134	.134	.134	.134	.133	.133	.133	.133	.132	.132	.131	.131	.130	.130	.000

NUMERO DE ITERACOES NO ESPACO= 191
NUMERO DE ITERACOES NO TEMPO= 200 L2/L1= 1.028947
TEMPO DE RESFRIAMENTO= 3000.000000 FORIER= 4.999404
FORIER= 2.936288E-01

TPMÉDIO= 1.668066E-01 BIOT= 8.967895E-01

.000	.320	.320	.320	.320	.319	.319	.318	.317	.316	.315	.314	.313	.311	.310	.308	.306	.304	.302	.000
.313	.313	.313	.313	.313	.312	.312	.311	.310	.310	.309	.308	.306	.305	.304	.302	.301	.299	.298	.296
.306	.306	.306	.306	.305	.305	.304	.304	.303	.302	.301	.300	.299	.298	.297	.295	.294	.292	.290	.289
.297	.297	.297	.297	.297	.296	.296	.295	.295	.294	.293	.292	.291	.290	.288	.287	.286	.284	.282	.281
.288	.288	.288	.288	.287	.287	.286	.286	.285	.284	.284	.283	.282	.281	.279	.278	.277	.275	.274	.272
.278	.277	.277	.277	.277	.277	.276	.276	.275	.274	.273	.272	.270	.269	.268	.267	.265	.264	.262	.262
.266	.266	.266	.266	.266	.265	.265	.264	.264	.263	.262	.262	.261	.260	.258	.257	.256	.255	.253	.252
.254	.254	.254	.254	.253	.253	.253	.252	.251	.251	.250	.249	.248	.247	.246	.245	.243	.242	.241	.241
.242	.242	.242	.241	.241	.241	.240	.240	.239	.238	.237	.237	.236	.235	.234	.233	.231	.230	.229	.229
.228	.228	.228	.228	.228	.227	.227	.226	.226	.225	.224	.224	.223	.222	.221	.220	.219	.218	.216	.216
.215	.214	.214	.214	.214	.214	.213	.213	.212	.212	.211	.210	.209	.209	.208	.207	.206	.205	.203	.203
.200	.200	.200	.200	.200	.199	.199	.199	.198	.198	.197	.196	.196	.195	.194	.193	.192	.191	.190	.190
.186	.186	.186	.185	.185	.185	.184	.184	.184	.183	.183	.182	.181	.181	.180	.179	.178	.177	.176	.176
.171	.171	.171	.171	.170	.170	.170	.169	.168	.168	.167	.167	.166	.166	.165	.164	.163	.163	.163	.163
.156	.156	.156	.155	.155	.155	.155	.154	.154	.154	.153	.153	.152	.152	.151	.150	.150	.149	.148	.148
.140	.140	.140	.140	.140	.140	.140	.139	.139	.139	.138	.138	.138	.137	.137	.136	.135	.135	.134	.134
.125	.125	.125	.125	.125	.125	.125	.124	.124	.124	.123	.123	.122	.122	.122	.121	.121	.121	.120	.120
.110	.110	.110	.110	.110	.110	.110	.109	.109	.109	.109	.108	.108	.108	.108	.107	.107	.106	.106	.106
.095	.095	.095	.095	.095	.095	.095	.095	.095	.094	.094	.094	.094	.093	.093	.093	.093	.092	.092	.092
.000	.088	.088	.088	.088	.088	.088	.087	.087	.087	.087	.087	.087	.086	.086	.086	.086	.085	.085	.000

NUMERO DE ITERACOES NO ESPACO= 186
NUMERO DE ITERACOES NO TEMPO= 225 L2/L1= 1.028947
TEMPO DE RESFRIAMENTO= 4000.000000 FORIER= 5.624330
FORIER= 3.303324E-01

TPMÉDIO= 1.352455E-01 BIOT= 8.967895E-01

.000	.260	.260	.260	.259	.259	.259	.258	.257	.257	.256	.255	.254	.253	.251	.250	.249	.247	.245	.000
.254	.254	.254	.254	.253	.253	.253	.252	.251	.251	.250	.249	.248	.247	.245	.244	.243	.241	.240	.240
.248	.248	.248	.248	.248	.247	.247	.246	.246	.245	.245	.244	.243	.242	.241	.240	.238	.237	.236	.234

.241 .241 .241 .241 .241 .241 .240 .240 .239 .238 .238 .237 .236 .235 .234 .233 .232 .231 .229 .228
.234 .234 .234 .233 .233 .233 .232 .232 .231 .231 .230 .229 .229 .228 .227 .226 .224 .223 .222 .221
.225 .225 .225 .225 .225 .224 .224 .224 .223 .222 .222 .221 .220 .219 .218 .217 .216 .215 .214 .213
.216 .216 .216 .216 .216 .215 .215 .215 .214 .214 .213 .212 .211 .210 .209 .208 .207 .205 .204
.206 .206 .206 .206 .206 .206 .205 .205 .204 .204 .203 .202 .201 .200 .199 .198 .197 .196 .195
.196 .196 .196 .196 .196 .195 .195 .195 .194 .194 .193 .193 .192 .191 .190 .189 .189 .188 .187 .186
.185 .185 .185 .185 .185 .185 .184 .184 .184 .183 .183 .182 .181 .181 .180 .179 .178 .177 .176 .175
.174 .174 .174 .174 .174 .173 .173 .173 .172 .172 .171 .170 .170 .169 .168 .168 .167 .166 .165
.162 .162 .162 .162 .162 .162 .162 .161 .161 .161 .160 .160 .159 .159 .158 .157 .157 .156 .155 .154
.150 .150 .150 .150 .150 .150 .150 .150 .149 .149 .148 .148 .148 .147 .146 .146 .145 .144 .144 .143
.138 .138 .138 .138 .138 .138 .138 .138 .137 .137 .137 .136 .136 .135 .135 .134 .134 .133 .132 .132
.126 .126 .126 .126 .126 .126 .126 .125 .125 .125 .125 .124 .124 .123 .123 .122 .122 .121 .121 .120
.114 .114 .114 .114 .114 .114 .113 .113 .113 .113 .112 .111 .111 .111 .110 .110 .110 .109 .109 .109
.102 .102 .102 .101 .101 .101 .101 .101 .101 .101 .100 .100 .100 .100 .099 .099 .098 .098 .098 .097
.089 .089 .089 .089 .089 .089 .089 .089 .089 .089 .088 .088 .088 .088 .087 .087 .087 .086 .086 .086
.077 .077 .077 .077 .077 .077 .077 .077 .077 .077 .076 .076 .076 .076 .076 .076 .075 .075 .075 .074
.000 .071 .071 .071 .071 .071 .071 .071 .071 .071 .071 .070 .070 .070 .070 .070 .069 .069 .069 .000

NUMERO DE ITERACOES NO ESPACO= 160
NUMERO DE ITERACOES NO TEMPO= 350 L2/L1= 1.028947
TEMPO DE RESFRIAMENTO= 7000.000000 FORIER= 8.748958
FORIER= 5.138505E-01
TPMÉDIO= 4.741485E-02 BIOT= 8.967895E-01

.000 .091 .091 .091 .091 .091 .091 .091 .090 .090 .090 .089 .089 .089 .088 .088 .087 .087 .086 .000
.089 .089 .089 .089 .089 .089 .089 .089 .088 .088 .088 .088 .087 .087 .087 .086 .086 .085 .085 .084
.087 .087 .087 .087 .087 .087 .087 .087 .086 .086 .086 .086 .085 .085 .084 .084 .083 .083 .083 .082
.085 .085 .085 .085 .085 .084 .084 .084 .084 .083 .083 .083 .082 .082 .082 .081 .081 .081 .080 .080
.082 .082 .082 .082 .082 .082 .082 .081 .081 .081 .081 .080 .080 .080 .079 .079 .079 .078 .078 .077
.079 .079 .079 .079 .079 .079 .079 .078 .078 .078 .078 .077 .077 .077 .076 .076 .076 .075 .075 .075
.076 .076 .076 .076 .076 .076 .075 .075 .075 .075 .075 .074 .074 .074 .074 .073 .073 .072 .072 .072
.072 .072 .072 .072 .072 .072 .072 .072 .072 .072 .071 .071 .071 .071 .070 .070 .070 .069 .069 .068
.069 .069 .069 .069 .069 .069 .068 .068 .068 .068 .068 .067 .067 .067 .066 .066 .066 .065 .065 .065
.065 .065 .065 .065 .065 .065 .065 .065 .064 .064 .064 .064 .064 .063 .063 .063 .062 .062 .062 .062
.061 .061 .061 .061 .061 .061 .061 .061 .060 .060 .060 .060 .060 .060 .059 .059 .059 .058 .058 .058
.057 .057 .057 .057 .057 .057 .057 .057 .056 .056 .056 .056 .056 .056 .055 .055 .055 .055 .054 .054
.053 .053 .053 .053 .053 .053 .053 .052 .052 .052 .052 .052 .052 .052 .051 .051 .051 .051 .050 .050
.049 .049 .048 .048 .048 .048 .048 .048 .048 .048 .048 .048 .048 .047 .047 .047 .047 .046 .046 .046
.044 .044 .044 .044 .044 .044 .044 .044 .044 .044 .044 .044 .043 .043 .043 .043 .043 .042 .042 .042
.040 .040 .040 .040 .040 .040 .040 .040 .040 .040 .039 .039 .039 .039 .039 .039 .039 .038 .038 .038
.036 .036 .036 .036 .036 .035 .035 .035 .035 .035 .035 .035 .035 .035 .035 .034 .034 .034 .034 .034
.031 .031 .031 .031 .031 .031 .031 .031 .031 .031 .031 .031 .031 .031 .031 .030 .030 .030 .030 .030
.027 .027 .027 .027 .027 .027 .027 .027 .027 .027 .027 .027 .027 .027 .026 .026 .026 .026 .026 .026
.000 .025 .025 .025 .025 .025 .025 .025 .025 .025 .025 .025 .025 .025 .025 .024 .024 .024 .024 .000

NUMERO DE ITERACOES NO ESPACO= 107
NUMERO DE ITERACOES NO TEMPO= 900 L2/L1= 1.028947
TEMPO DE RESFRIAMENTO= 18000.000000 FORIER= 22.497320
FORIER= 1.321330
TPMÉDIO= 1.526361E-02 BIOT= 3.370900E-01

.000 .022 .022 .022 .022 .021 .021 .021 .021 .021 .021 .021 .021 .021 .021 .021 .021 .021 .021 .000
.021
.021 .021 .021 .021 .021 .021 .021 .021 .021 .021 .021 .021 .021 .021 .021 .021 .020 .020 .020 .020
.021 .021 .021 .021 .021 .021 .021 .021 .021 .021 .021 .020 .020 .020 .020 .020 .020 .020 .020 .020
.020
.019
.019 .019 .019 .019 .019 .019 .019 .019 .019 .019 .019 .019 .019 .019 .019 .019 .019 .019 .018 .018
.018
.018 .018 .018 .018 .018 .018 .018 .018 .018 .018 .018 .018 .018 .018 .018 .018 .018 .018 .017 .017
.017
.016
.016 .016 .016 .016 .016 .016 .016 .015 .015 .015 .015 .015 .015 .015 .015 .015 .015 .015 .015 .015
.015
.014
.014 .014 .013 .013 .013 .013 .013 .013 .013 .013 .013 .013 .013 .013 .013 .013 .013 .013 .013 .013
.013
.012
.000 .012 .012 .012 .012 .012 .012 .012 .012 .012 .012 .012 .012 .012 .012 .012 .012 .012 .012 .000

Arquivo de ajuste de hc

Tempo	TATnum	TATexp
0	1	1
300	1	1
600	0.996	0.932
900	0.971	0.853
1200	0.92	0.799
1500	0.852	0.727
1800	0.776	0.670
2100	0.7	0.622

2400	0.628	0.581
2700	0.56	0.538
3000	0.499	0.476
3300	0.443	0.436
3600	0.394	0.400
3900	0.349	0.381
4200	0.31	0.351
4500	0.274	0.299
4800	0.243	0.285
5100	0.216	0.263
5400	0.191	0.219
5700	0.169	0.214
6000	0.15	0.178
6300	0.133	0.164
6600	0.118	0.142
6900	0.104	0.137
7200	0.092	0.145
7500	0.082	0.122
7800	0.073	0.098
8100	0.064	0.096
8400	0.057	0.076
8700	0.051	0.101
9000	0.045	0.057
9300	0.04	0.071
9600	0.035	0.074
9900	0.031	0.057
10200	0.028	0.054
10500	0.024	0.049
10800	0.022	0.049
11100	0.019	0.035
11400	0.017	0.03
11700	0.015	0.016
12000	0.013	0.022
12300	0.012	0.002
12600	0.011	0.002
12900	0.009	0.013
13200	0.008	0.003
13500	0.007	0.019
13800	0.006	0.016
14100	0.006	0.002
14400	0.005	0.005
14700	0.005	0.005
15000	0.004	0.019
15300	0.004	0.009
15600	0.003	0.008
15900	0.003	0.012
16200	0.002	0.002
16500	0.002	0.013
16800	0.002	0.02
17100	0.002	0.006
17400	0.002	0.021
17700	0.001	0.009
18000	0.001	0.008

ERQ= 7.788920E-02 α = 1.060000E-03 hc= 5.210000E-03 S2= 1.342863E-3

Experimentos com banana. Ponto 3, caixa B.

Experimento FBEI

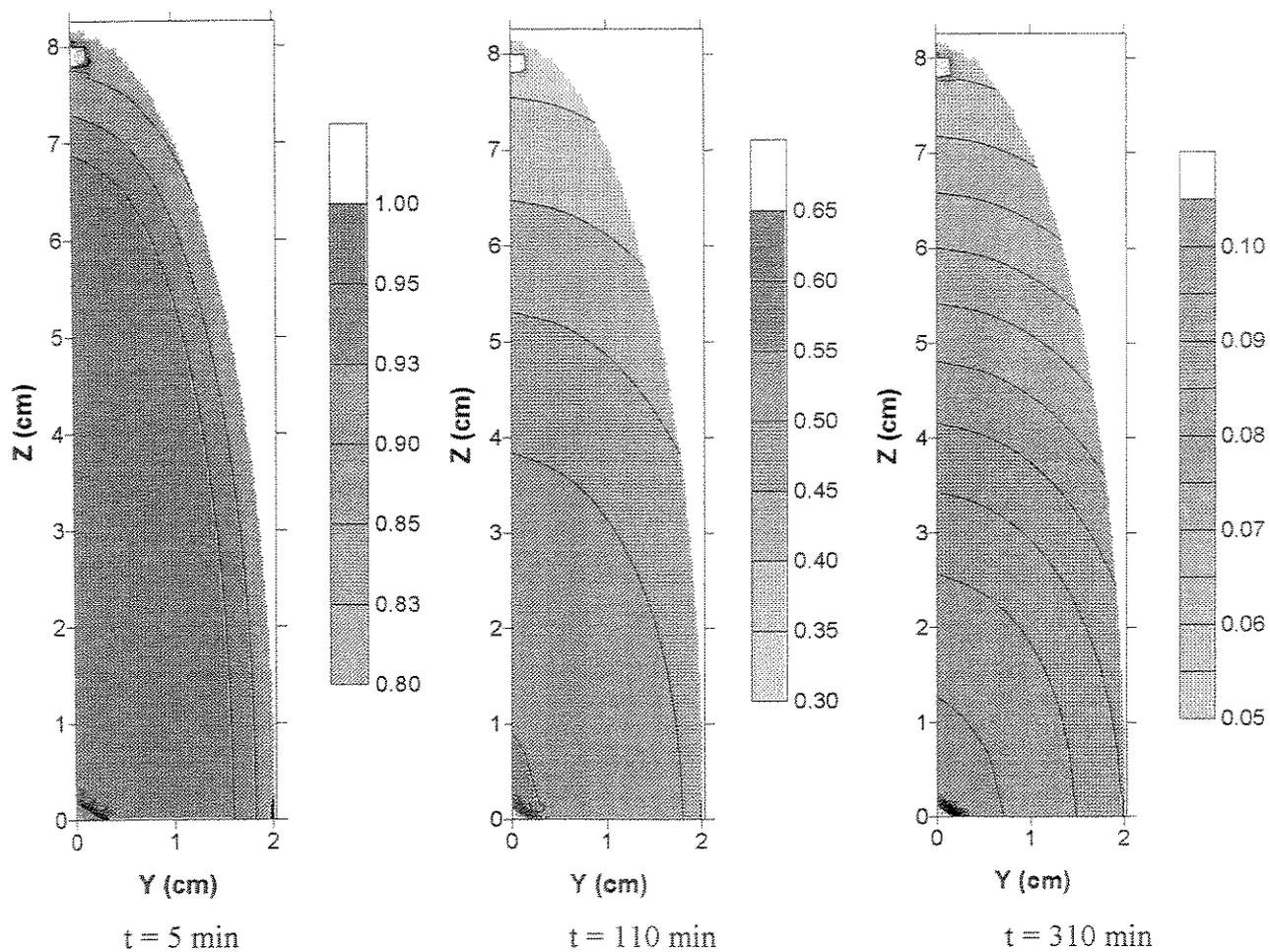


Figura 10: Distribuição da TAT no fruto para três instantes de tempo (ponto 3)

Experimento FAEH

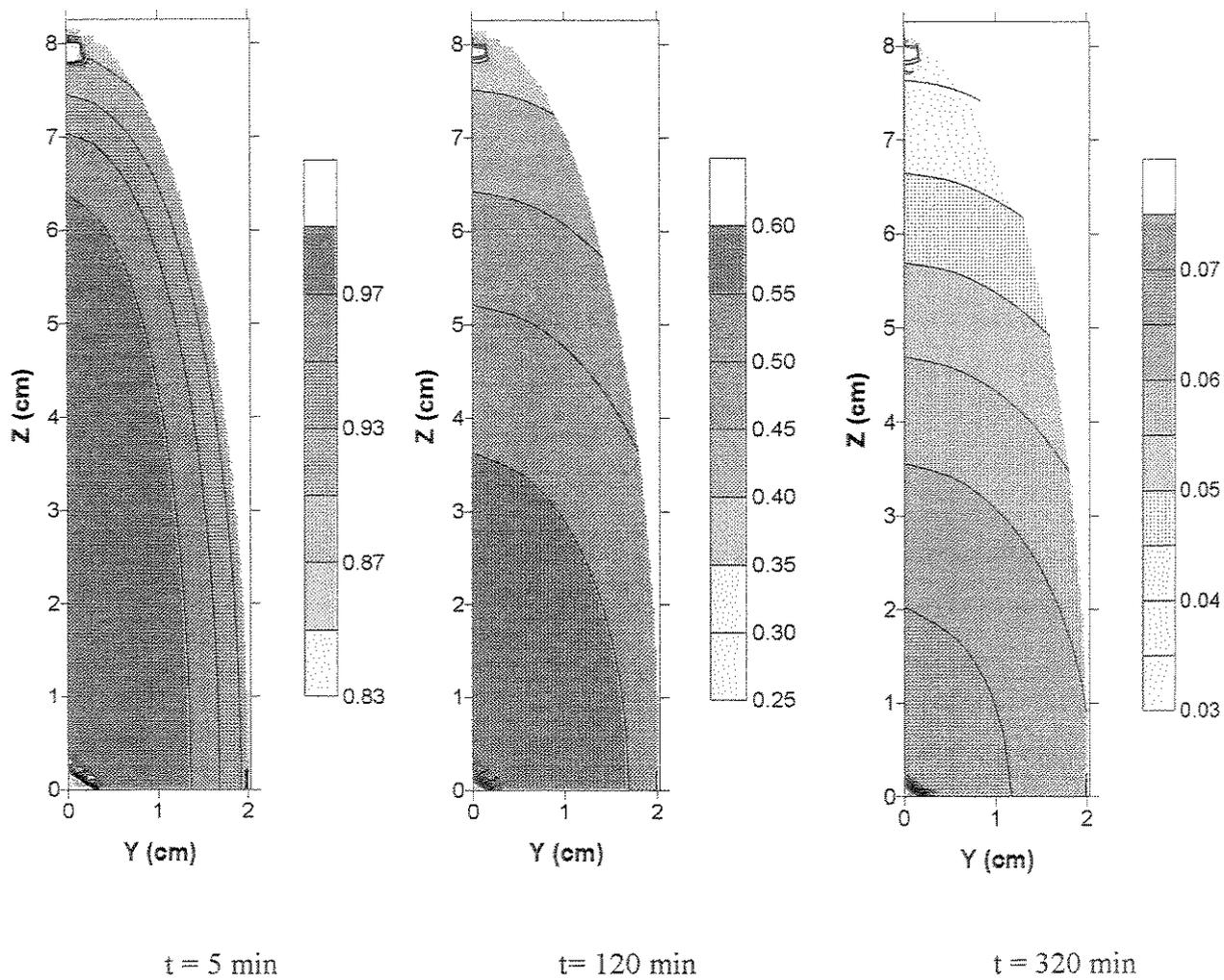


Figura 11: Distribuição da TAT no fruto para três instantes de tempo (ponto 3)

Experimento FCEII

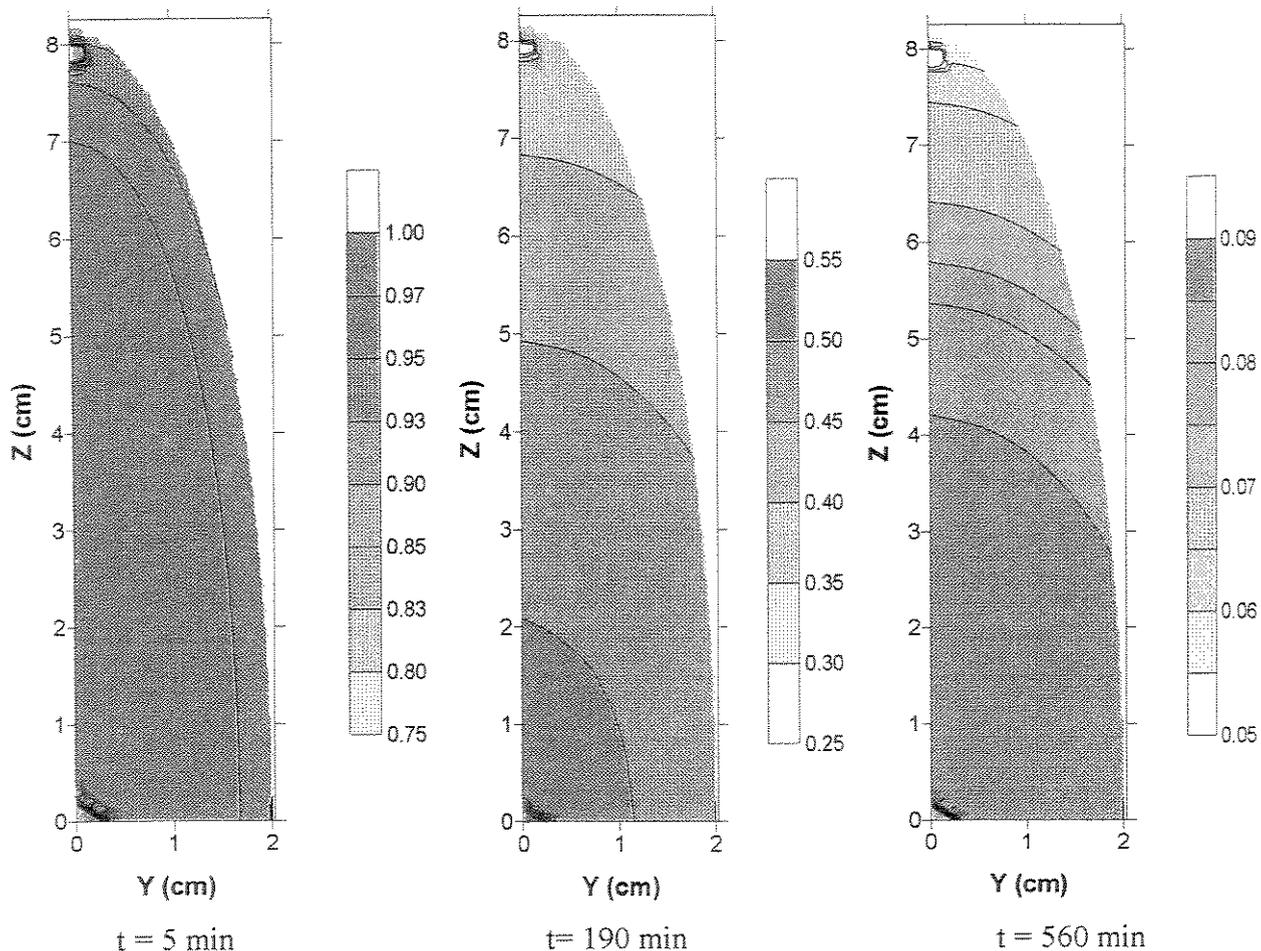


Figura 12: Distribuição da TAT no fruto para três instantes de tempo (ponto 3)

Tabela 15: Valores do h_c , de ERQ e do S, em todos os tratamentos (banana)

Tratamento	Ponto 1			Ponto 2		
	h_c ($W/m^2\text{°C}$)	ERQ	S	h_c ($W/m^2\text{°C}$)	ERQ	S
FAEI	12,10	$1,080^{-1}$	$4,27^{-2}$	7,67	$1,990^{-2}$	$1,83^{-2}$
FCEI	5,01	$8,821^{-2}$	$3,34^{-2}$	3,92	$7,921^{-2}$	$3,16^{-2}$
FAEII	4,98	$6,700^{-2}$	$2,91^{-2}$	4,09	$1,200^{-1}$	$3,89^{-2}$
FCEII	3,19	$1,147^{-1}$	$2,87^{-2}$	2,85	$1,142^{-1}$	$2,86^{-2}$

.473 .472 .471 .469 .466 .462 .457 .451 .443 .433 .421 .408 .392 .374 .354 .332 .308 .283 .259 .242
 .465 .465 .464 .462 .459 .455 .450 .444 .436 .427 .416 .402 .387 .370 .350 .328 .305 .281 .258 .241
 .000 .461 .460 .458 .455 .452 .447 .441 .433 .424 .413 .400 .385 .367 .348 .327 .304 .280 .257 .000

NUMERO DE ITERACOES

S NO ESPACO= 780

NUMERO DE ITERACOES NO TEMPO= 150 L2/L1= 4.068966

TEMPO DE RESFRIAMENTO= 3000.000000 FORIER= 5.849622E-02

FORIER= 9.099954E-01

TPMEDIO= 3.347312E-01 BIOT= 2.271891

.000	.438	.437	.433	.428	.421	.412	.402	.389	.375	.358	.340	.320	.298	.275	.251	.226	.202	.178	.000
.433	.432	.431	.427	.422	.416	.407	.397	.384	.370	.354	.336	.316	.295	.272	.248	.224	.200	.177	.165
.427	.426	.425	.422	.417	.410	.402	.391	.379	.365	.350	.332	.313	.292	.269	.246	.222	.199	.176	.164
.421	.421	.419	.416	.411	.404	.396	.386	.375	.361	.345	.328	.309	.289	.267	.244	.221	.197	.175	.163
.415	.415	.413	.410	.405	.399	.391	.381	.370	.356	.341	.324	.306	.285	.264	.242	.219	.196	.174	.162
.409	.409	.407	.404	.400	.393	.386	.376	.365	.352	.337	.320	.302	.282	.261	.239	.217	.195	.173	.161
.404	.403	.401	.398	.394	.388	.380	.371	.360	.347	.333	.317	.299	.279	.259	.237	.215	.193	.173	.160
.398	.397	.396	.393	.388	.383	.375	.366	.355	.343	.329	.313	.295	.276	.256	.235	.213	.192	.172	.159
.392	.391	.390	.387	.383	.377	.370	.361	.351	.338	.324	.309	.292	.273	.253	.233	.212	.191	.171	.158
.386	.386	.384	.381	.377	.372	.365	.356	.346	.334	.320	.305	.288	.270	.251	.231	.210	.189	.170	.157
.381	.380	.379	.376	.372	.366	.360	.351	.341	.329	.316	.301	.285	.267	.248	.228	.208	.188	.169	.157
.375	.374	.373	.370	.366	.361	.354	.346	.336	.325	.312	.298	.282	.264	.246	.226	.206	.187	.168	.156
.369	.369	.367	.365	.361	.356	.349	.341	.332	.321	.308	.294	.278	.261	.243	.224	.205	.185	.167	.155
.364	.363	.362	.359	.356	.351	.344	.336	.327	.316	.304	.290	.275	.258	.240	.222	.203	.184	.166	.154
.358	.357	.356	.354	.350	.345	.339	.332	.322	.312	.300	.286	.271	.255	.238	.220	.201	.183	.165	.153
.352	.352	.351	.348	.345	.340	.334	.327	.318	.308	.296	.283	.268	.252	.235	.217	.199	.181	.164	.153
.347	.346	.345	.343	.340	.335	.329	.322	.313	.303	.292	.279	.265	.249	.233	.215	.198	.180	.164	.152
.341	.341	.340	.338	.334	.330	.324	.317	.309	.299	.288	.275	.262	.246	.230	.213	.196	.179	.163	.151
.336	.335	.334	.332	.329	.325	.319	.312	.304	.295	.284	.272	.258	.243	.228	.211	.194	.177	.162	.151
.000	.333	.332	.330	.326	.322	.317	.310	.302	.293	.282	.270	.257	.242	.226	.210	.193	.177	.161	.000

NUMERO DE ITERACOES NO ESPACO= 692

NUMERO DE ITERACOES NO TEMPO= 200 L2/L1= 4.068966

TEMPO DE RESFRIAMENTO= 4000.000000 FORIER= 7.799497E-02

FORIER= 1.213327

TPMEDIO= 2.343560E-01 BIOT= 2.271891

.000	.314	.313	.310	.305	.299	.291	.282	.272	.260	.246	.232	.216	.200	.183	.166	.149	.132	.116	.000
.311	.310	.309	.306	.301	.295	.288	.279	.268	.256	.243	.229	.214	.198	.181	.164	.147	.131	.115	.108
.307	.306	.304	.301	.297	.291	.284	.275	.265	.253	.240	.227	.212	.196	.179	.163	.146	.130	.115	.107
.302	.302	.300	.297	.293	.287	.280	.271	.261	.250	.238	.224	.209	.194	.178	.161	.145	.129	.114	.106
.298	.297	.296	.293	.289	.283	.276	.268	.258	.247	.235	.221	.207	.192	.176	.160	.144	.128	.114	.105
.294	.293	.292	.289	.285	.279	.272	.264	.255	.244	.232	.219	.204	.190	.174	.158	.143	.127	.113	.105
.290	.289	.288	.285	.281	.276	.269	.261	.251	.241	.229	.216	.202	.187	.172	.157	.141	.127	.113	.104
.285	.285	.283	.281	.277	.272	.265	.257	.248	.238	.226	.213	.200	.185	.171	.155	.140	.126	.112	.103
.281	.281	.279	.277	.273	.268	.261	.254	.245	.234	.223	.211	.197	.183	.169	.154	.139	.125	.111	.103
.277	.277	.275	.273	.269	.264	.258	.250	.241	.231	.220	.208	.195	.181	.167	.152	.138	.124	.111	.102
.273	.272	.271	.269	.265	.260	.254	.247	.238	.228	.217	.206	.193	.179	.165	.151	.137	.123	.110	.102
.269	.268	.267	.265	.261	.256	.250	.243	.235	.225	.215	.203	.190	.177	.164	.150	.136	.122	.110	.101
.265	.264	.263	.261	.257	.253	.247	.240	.232	.222	.212	.200	.188	.175	.162	.148	.134	.121	.109	.101
.261	.260	.259	.257	.254	.249	.243	.236	.228	.219	.209	.198	.186	.173	.160	.147	.133	.120	.108	.100
.257	.256	.255	.253	.250	.245	.240	.233	.225	.216	.206	.195	.184	.171	.158	.145	.132	.119	.108	.100
.253	.252	.251	.249	.246	.242	.236	.230	.222	.213	.203	.193	.181	.169	.157	.144	.131	.119	.107	.099
.249	.248	.247	.245	.242	.238	.233	.226	.219	.210	.201	.190	.179	.167	.155	.142	.130	.118	.107	.099
.245	.245	.243	.241	.238	.234	.229	.223	.216	.207	.198	.188	.177	.165	.153	.141	.129	.117	.106	.098
.241	.241	.240	.238	.235	.231	.226	.219	.212	.204	.195	.185	.175	.163	.152	.140	.128	.116	.106	.098
.000	.239	.238	.236	.233	.229	.224	.218	.211	.203	.194	.184	.174	.162	.151	.139	.127	.116	.105	.000

NUMERO DE ITERACOES NO ESPACO= 491

NUMERO DE ITERACOES NO TEMPO= 350 L2/L1= 4.068966

TEMPO DE RESFRIAMENTO= 7000.000000 FORIER= 1.364912E-01

FORIER= 2.123322

TPMEDIO= 8.102968E-02 BIOT= 2.271891

.000	.113	.112	.111	.108	.106	.102	.098	.093	.088	.083	.077	.071	.065	.059	.052	.047	.041	.036	.000
.112	.111	.111	.109	.107	.104	.101	.097	.092	.087	.082	.076	.070	.064	.058	.052	.046	.041	.036	.033
.110	.110	.109	.108	.106	.103	.099	.095	.091	.086	.081	.075	.069	.063	.057	.052	.046	.041	.036	.033
.109	.108	.108	.106	.104	.101	.098	.094	.090	.085	.080	.074	.068	.063	.057	.051	.046	.040	.036	.033
.107	.107	.106	.105	.103	.100	.097	.093	.089	.084	.079	.073	.068	.062	.056	.051	.045	.040	.035	.033
.106	.105	.105	.103	.101	.099	.095	.092	.087	.083	.078	.072	.067	.061	.056	.050	.045	.040	.035	.032
.104	.104	.103	.102	.100	.097	.094	.090	.086	.082	.077	.072	.066	.061	.055	.050	.044	.039	.035	.032
.103	.102	.102	.100	.098	.096	.093	.089	.085	.081	.076	.071	.065	.060	.055	.049	.044	.039	.035	.032
.101	.101	.100	.099	.097	.095	.092	.088	.084	.080	.075	.070	.065	.059	.054	.049	.044	.039	.035	.032
.100	.099	.099	.097	.096	.093	.090	.087	.083	.079	.074	.069	.064	.059	.053	.048	.043	.039	.034	.032
.098	.098	.097	.096	.094	.092	.089	.086	.082	.077	.073	.068	.063	.058	.053	.048	.043	.038	.034	.032
.097	.096	.096	.095	.093	.091	.088	.084	.081	.076	.072	.067	.062	.057	.052	.047	.043	.038	.034	.031
.095	.095	.094	.093	.091	.089	.086	.083	.079	.075	.071	.066	.062	.057	.052	.047	.042	.038	.034	.031
.094	.093	.093	.092	.090	.088	.085	.082	.078	.074	.070	.066	.061	.056	.051	.046	.042	.038	.034	.031
.092	.092	.091	.090	.089	.087	.084	.081	.077	.073	.069	.065	.060	.055	.051	.046	.041	.037	.034	.031
.091	.091	.090	.089	.087	.085	.083	.080	.076	.072	.068	.064	.059	.055	.050	.046	.041	.037	.033	.031
.089	.089	.089	.088	.086	.084	.081	.078	.075	.071	.067	.063	.059	.054	.050	.045	.041	.037	.033	.031
.088	.088	.087	.086	.085	.083	.080	.077	.074	.070	.066	.062	.058	.053	.049	.045	.040	.036	.033	.031
.087	.086	.086	.085	.083	.081	.079	.076	.073	.069	.065	.061	.057	.053	.048	.044	.040	.036	.033	.030
.000	.086	.085	.084	.083	.081	.078	.076	.072	.069	.065	.061	.057	.053	.048	.044	.040	.036	.033	.000

NUMERO DE ITERACOES NO ESPACO= 46
 NUMERO DE ITERACOES NO TEMPO= 900 L2/L1= 4.068966
 TEMPO DE RESFRIAMENTO= 18000.000000 FORIER= 3.509773E-01
 FORIER= 5.459972
 TPMEDIO= 1.828137E-03 BIOT= 2.271891

.000 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .001 .001 .001 .001 .001 .000
 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .001 .001 .001 .001 .001 .001
 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .001 .001 .001 .001 .001 .001
 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .001 .001 .001 .001 .001 .001
 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .001 .001 .001 .001 .001 .001
 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .001 .001 .001 .001 .001 .001
 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .001 .001 .001 .001 .001 .001
 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .001 .001 .001 .001 .001 .001
 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .001 .001 .001 .001 .001 .001
 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .001 .001 .001 .001 .001 .001
 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .001 .001 .001 .001 .001 .001
 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .001 .001 .001 .001 .001 .001
 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .001 .001 .001 .001 .001 .001
 .000 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .002 .001 .001 .001 .001 .001 .001 .001 .001 .000

Arquivo de ajuste de hc

Tempo	TATnum	TATexp
0	1	1
300	0.991	1
600	0.934	0.931
900	0.858	0.824
1200	0.783	0.739
1500	0.712	0.653
1800	0.647	0.618
2100	0.588	0.572
2400	0.533	0.543
2700	0.484	0.526
3000	0.438	0.461
3300	0.397	0.478
3600	0.359	0.415
3900	0.325	0.402
4200	0.294	0.371
4500	0.266	0.322
4800	0.240	0.299
5100	0.217	0.234
5400	0.196	0.188
5700	0.177	0.178
6000	0.159	0.163
6300	0.144	0.133
6600	0.130	0.129
6900	0.117	0.122
7200	0.105	0.112
7500	0.095	0.091
7800	0.086	0.062
8100	0.077	0.085
8400	0.069	0.068
8700	0.063	0.073
9000	0.056	0.068
9300	0.051	0.067
9600	0.046	0.004
9900	0.041	0.038
10200	0.037	0.044
10500	0.033	0.044
10800	0.030	0.028

11100	0.027	0.016			
11400	0.024	0.009			
11700	0.022	0.028			
12000	0.020	0.022			
12300	0.018	0.028			
12600	0.016	0.028			
12900	0.014	0.010			
13200	0.013	0.028			
13500	0.012	0.022			
13800	0.010	0.040			
14100	0.009	0.028			
14400	0.008	0.022			
14700	0.008	0.004			
15000	0.007	0.016			
15300	0.006	0.034			
15600	0.006	0.028			
15900	0.005	0.022			
16200	0.005	0.010			
16500	0.004	0.016			
16800	0.004	0.022			
17100	0.003	0.034			
17400	0.003	0.022			
17700	0.003	0.022			
18000	0.002	0.010			
ERQ=	4.821443E-2	alfa = 1.250000E-03	hc= 1.362000E-03	S2= 8.312832E-4	