



**UNICAMP**

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

Resfriamento a vácuo de alfaces hidropônicas  
(*Lactuca sativa* L.) cv. Salad Bowl: avaliação do  
processo e da vida pós-colheita

DOUTORANDO: Msc. Marcos Rodrigues Amorim Afonso  
ORIENTADOR: Prof. Dr. Vivaldo Silveira Junior

Tese de doutorado apresentada à  
comissão de pós-graduação da  
Faculdade de Engenharia de  
Alimentos para obtenção do título de  
doutor em Engenharia de Alimentos.

Campinas, SP.

Fevereiro/2005

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

Afonso, Marcos Rodrigues Amorim  
Af66r Resfriamento a vácuo de alfaces hidropônicas (*Lactuca sativa*.  
L.) cv. Salad bowl: avaliação do processo e da vida pós-colheita  
/ Marcos Rodrigues Amorim Afonso. – Campinas, SP : [s.n.],  
2005.

Orientador: Vivaldo Silveira Junior  
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas.  
Faculdade de Engenharia de Alimentos.

1. Resfriamento. 2. Alface. 3. Adsorção. I. Silveira Junior,  
Vivaldo. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de  
Engenharia de Alimentos. III. Título.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Vivaldo Silveira Júnior  
(Membro titular)

---

Prof. Dr. Antonio Marsaioli Júnior  
(Membro titular)

---

Dr. José Maria Monteiro Sigris  
(Membro titular)

---

Prof. Dr. Luís Augusto Barbosa Cortez  
(Membro titular)

---

Prof. Dr. Marcos David Ferreira  
(Membro titular)

---

Prof. Dr. João Borges Laurindo  
(Membro suplente)

---

Prof. Dr. Sylvio Luis Honório  
(Membro suplente)



*“Faça as coisas da maneira mais  
simples que puder, porém não as  
mais simples.”  
(Albert Einstein)*



## AGRADECIMENTOS

*Agradeço em primeiro lugar a Deus, por tudo e por todos.*

*Agradeço a minha família e a Tata pelo amor, confiança e paciência.*

*Agradeço ao Vivaldo pela orientação, dedicação e confiança no trabalho.*

*Agradeço aos amigos do laboratório pelo convívio e ajuda, desde o antigo LIC, onde os mais antigos já se foram, aos mais novos e recém chegados ao LACPA. São eles: Beto, Eliane, Flavia, Fabrício, Edson (cozinha), Jaime, Mauro, Flávio, Rogério, Bel, Anamaria, Marlei, Elisa, André, Carol, Patrícia (Maki), Patrícia, Lineu, Márcio, Karla, Silmar, Armando, Lena e Klícia.*

*Agradeço aos amigos do departamento, Sueli, Maurício, Daniel e Luciano.*

*Agradeço aos técnicos Izaías e Parreira pelo trabalho e pelo bate papo.*

*Agradeço ao Departamento de Engenharia de Alimentos, pela estrutura e pelo esforço em possibilitar meios que permitam uma pesquisa científica de qualidade.*

*Agradeço aos professores da FEA, Faculdade de Engenharia de Alimentos, pelo ensino e dedicação que direta ou indiretamente ajudaram neste trabalho e na minha formação acadêmica.*

*Agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, Fapesp, pelo apoio financeiro neste trabalho.*

*Grato  
Marcos*



## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	xiii
LISTA DE TABELAS .....	xviii
NOMENCLATURA.....	xxi
RESUMO GERAL .....	xxiii
ABSTRACT .....	xxv
INTRODUÇÃO GERAL .....	1
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA GERAL.....	3
<i>1 - CAPÍTULO I – Construção e Avaliação de um Sistema de Resfriamento a Vácuo .....</i>	<i>7</i>
Resumo .....	8
Abstract.....	9
1.1. Introdução.....	10
1.2. Revisão Bibliográfica .....	11
1.2.1. Método de Resfriamento a Vácuo .....	11
1.2.2. Variáveis Importantes do Resfriamento a Vácuo.....	14
1.2.2.1. Pressão interna da câmara.....	14
1.2.2.2. Tempo de Resfriamento .....	14
1.2.2.3. Perda de Água no Produto .....	15
1.2.3. Transferência de Massa no Resfriamento a Vácuo .....	18
1.2.4. Adsorção.....	19
1.2.4.1. Sílica gel/água .....	21
1.3. Materiais e Métodos .....	23
1.3.1. Montagem Experimental para Caracterização da Sílica-gel.....	23
1.3.2. Metodologia para a Caracterização da Sílica-gel .....	23
1.3.3. Montagem do Sistema de Resfriamento a Vácuo.....	26
1.3.3.1. Câmara.....	26
1.3.3.2. Trocador de Calor para Condensação do Vapor de Água .....	28
1.3.3.3. Linha de vácuo .....	28
1.3.3.4. Instrumentação do Sistema.....	29
1.3.4. Sistemas de Desumidificação .....	31
1.3.4.1. Sistema de desumidificação por condensação.....	31

---

1.3.4.2.	Sistema de desumidificação com leito de adsorção.....	33
1.3.5.	Montagem para Avaliação do Leito de Adsorção no Resfriamento a Vácuo .....	34
1.3.6.	Metodologia para Avaliação do Leito de Adsorção no Resfriamento a Vácuo .....	35
1.3.6.1.	Ensaio com a Câmara de Vácuo.....	35
1.3.6.2.	Ensaio com a Garrafa .....	36
1.3.7.	Planejamento dos ensaios preliminares .....	36
1.4.	Resultados e Discussões .....	39
1.4.1.	Caracterização da Sílica-gel .....	39
1.4.2.	Testes Preliminares com Sistema de Desumidificação por Condensação.....	44
1.4.2.1.	Perda de Massa ( $Y_1$ ) .....	48
1.4.2.2.	Temperatura Final ( $Y_2$ ).....	52
1.4.2.3.	Consumo de Energia ( $Y_3$ ).....	55
1.4.3.	Resultados da Avaliação do Leito de Adsorção no Resfriamento a Vácuo .....	57
1.4.3.1.	Ensaio com a Câmara de Vácuo .....	57
1.4.3.2.	Ensaio com a Garrafa .....	59
1.5.	Conclusões.....	61
1.6.	Referências Bibliográficas.....	62
2 -	<i>CAPÍTULO II - Sistema de Resfriamento a Vácuo de Alface, cv. Salad Bowl</i> .....	67
	Resumo .....	68
	Abstract.....	69
2.1.	Introdução.....	70
2.2.	Revisão Bibliográfica .....	72
2.2.1.	Resfriamento.....	72
2.2.2.	Comparação Entre o Resfriamento a Vácuo e Outros Métodos .....	73
2.2.3.	Aplicações do Resfriamento a Vácuo.....	77
2.3.	Materiais e Métodos .....	80
2.3.1.	Produto .....	80
2.3.2.	Planejamento dos Experimentos.....	81
2.3.3.	Preparo das Amostras .....	83
2.3.4.	Resfriamento a Vácuo: Montagem experimental .....	84
2.3.5.	Estocagem das Amostras .....	86

---

2.3.6. Avaliação da Vida Pós-colheita.....	86
2.4. Resultados e Discussões .....	87
2.4.1. Perfil das Temperaturas .....	87
2.4.2. Perfil das Pressões .....	91
2.4.3. Perfil das Potências.....	94
2.4.4. Perfil das Perdas de Massa .....	98
2.4.5. Resultados do Planejamento Experimental .....	101
2.4.5.1. Tempo de processo (Y <sub>1</sub> ) .....	103
2.4.5.2. Energia consumida (Y <sub>2</sub> ) .....	108
2.4.5.3. Perda de Massa (Y <sub>3</sub> ) .....	113
2.4.5.4. Vida Pós-colheita (Y <sub>4</sub> ).....	118
2.4.6. Transferência de Massa .....	122
2.5. Conclusões.....	125
2.6. Referências Bibliográficas.....	126
<i>3 - Capítulo III – Avaliação da Vida Pós-colheita de Alfaces Hidropônicas cv Salad Bowl em Relação ao Grau-hora Acumulado (“Degree-hour”)</i> .....	<i>131</i>
Resumo .....	132
Abstract.....	133
3.1. Introdução.....	134
3.2. Revisão Bibliográfica .....	136
3.2.1. Hortaliças e Refrigeração .....	136
3.2.2. Alface .....	139
3.2.3. Avaliação de Vida Pós-colheita.....	140
3.2.4. Grau-hora Acumulado (“Degree-Hour”).....	141
3.3. Materiais e Métodos .....	143
3.3.1. Experimentos .....	143
3.3.2. Produto .....	144
3.3.3. Avaliação da Vida Pós-colheita.....	145
3.3.4. Câmara de Estocagem .....	146
3.3.5. Cálculo do Grau-hora Acumulado (GH) .....	148
3.3.6. Cálculo do Déficit de Umidade Relativa Acumulada (UR100) .....	148

---

3.4.	Resultados e Discussão.....	150
3.4.1.	Resultados da Avaliação da Vida Pós-colheita .....	150
3.4.2.	Grau-hora Acumulado “GH” .....	152
3.4.3.	Grau-hora Acumulado Parcial.....	156
3.4.4.	Grau-hora Acumulado e Umidade Relativa .....	160
3.4.5.	Discussão Geral dos Resultados.....	162
3.5.	Conclusões.....	165
3.6.	Referências Bibliográficas.....	166
	CONCLUSÕES GERAIS .....	169
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	171
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAIS.....	173
	ANEXOS .....	175
	Anexo I.....	176
	Históricos dos Ensaios Preliminares.....	176
	Anexo II.....	183
	Curvas de calibração dos sensores de temperatura.....	183
	Anexo III .....	185
	Históricos das temperaturas dos ensaios de resfriamento a vácuo de alfaces discutidos no Capítulo 2.....	185
	Históricos das pressões da câmara dos ensaios de resfriamento a vácuo de alfaces discutidos no Capítulo 2. ....	187
	Históricos das potências dos ensaios de resfriamento a vácuo de alfaces discutidos no Capítulo 2.....	189
	Históricos das perdas de massa dos ensaios de resfriamento a vácuo de alfaces discutidos no Capítulo 2.....	191
	Regressões lineares para a determinação do produto $kS$ apresentado no Capítulo 2.....	193
	Anexo IV .....	195
	Ficha de Avaliação Sensorial – Alface .....	195
	Histórico das notas da avaliação sensorial.....	196
	Histórico de temperaturas das alfaces.....	199

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1.1 - Esquema básico de um resfriador a vácuo..... 11

Figura 1.2 - Perda de massa de hortaliças folhosas em função do decréscimo de temperatura (VANDIEVOET & FOURNIER, 1983). ..... 17

Figura 1.3 - Montagem experimental para caracterização do par sílica-gel/água ..... 23

Figura 1.4 - Conjunto de isósteras do par gel de sílica-água. (VODIANITSKAIA, 1984). 25

Figura 1.5 - Esquema simplificado da montagem experimental. .... 26

Figura 1.6 - (a) Detalhe do flange soldado para o trocador. (b) Trocador instalado dentro da câmara..... 27

Figura 1.7 - Entrada e saída do etileno-glicol de dentro da câmara de vácuo. .... 27

Figura 1.8 - (a) Trocador de calor com saída do ar na parte de cima; (b) Detalhe por onde a mistura ar/vapor entrará..... 28

Figura 1.9 - Instalação da válvula solenóide. .... 29

Figura 1.10 - Transmissores de pressão de vácuo instalados na câmara de vácuo..... 30

Figura 1.11 - Sensores de temperatura destacados (setas) na foto. .... 30

Figura 1.12 - Célula de carga com uma bandeja. .... 31

Figura 1.13 - Sistema adaptado para o resfriamento da solução de etileno-glicol. .... 32

Figura 1.14 - Detalhes do controlador da FullGauge e dos sensores de temperatura no reservatório. .... 32

Figura 1.15 - Reservatório para acondicionamento do leito de adsorção (sílica-gel). ..... 33

Figura 1.16 - Esquema da montagem experimental para avaliação das condições de operação do leito de adsorção..... 34

Figura 1.17 - Montagem experimental para checagem das condições de uso do leito de adsorção..... 35

Figura 1.18 - Dados experimentais (temperatura e pressão) do par sílica-gel/água..... 40

Figura 1.19 - Comparação entre os dados experimentais da saturação da água no leito e a saturação dada pela Equação de Wagner..... 40

Figura 1.20 - Ajuste do modelo de Dubinin-Astakhov na forma linearizada. .... 42

Figura 1.21 - Ajuste do Modelo de Freundlich na forma linearizada..... 42

Figura 1.22 - Comparação das isósteras para o par sílica-gel/água com outros autores. .... 43

Figura 1.23 - Isósteras do par Sílica-gel/água. .... 44

Figura 1.24 - Histórico da perda de massa no ensaio 9: área superficial ( $X_1$ ) =  $3,05E-1 \text{ m}^2$ , massa ( $X_2$ ) = 0,65 kg e vazão ( $X_3$ ) =  $22 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ . ..... 45

Figura 1.25 - Histórico de temperaturas no ensaio 9: área superficial ( $X_1$ ) =  $3,05E-1 \text{ m}^2$ , massa ( $X_2$ ) = 0,65 kg e vazão ( $X_3$ ) =  $22 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ . ..... 46

Figura 1.26 - Histórico de potência do ensaio 9: área superficial ( $X_1$ ) =  $3,05E-1 \text{ m}^2$ , massa ( $X_2$ ) = 0,65 kg e vazão ( $X_3$ ) =  $22 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ . ..... 47

Figura 1.27 - Histórico de pressão do ensaio 9: área superficial ( $X_1$ ) =  $3,05E-1 \text{ m}^2$ , massa ( $X_2$ ) = 0,65 kg e vazão ( $X_3$ ) =  $22 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ . ..... 48

Figura 1.28 - Influências das variáveis independentes sobre a variável dependente Perda de Massa ao nível de significância de 95 %. ..... 49

Figura 1.29 – Ilustração das bandejas com áreas diferentes ( $X_1$ ) e mesma massa de água ( $X_2$ ). ..... 50

Figura 1.30 - Relação entre valores experimentais e os preditos pelo modelo para a perda de massa ( $Y_1$ ). ..... 51

Figura 1.31 - Influências das variáveis independentes sobre a Temperatura Final. .... 52

Figura 1.32 - Relação entre valores experimentais e os preditos pelo modelo para a temperatura final ( $Y_2$ ). ..... 54

Figura 1.33 - Influências das variáveis independentes sobre o Consumo de Energia. .... 55

Figura 1.34 - Relação entre valores experimentais e os preditos pelo modelo para a energia consumida ( $Y_3$ ). ..... 57

Figura 1.35 - Pressões no ensaio com leito de adsorção (sílica-gel) e câmara de vácuo. .... 58

Figura 1.36 - Temperaturas no ensaio com leito de adsorção (sílica-gel) e câmara de vácuo. .... 58

Figura 1.37 - Pressões no ensaio com leito de adsorção (sílica-gel) e garrafa com água. .... 59

Figura 1.38 - Temperaturas no ensaio com leito de adsorção (sílica-gel) e garrafa com água. .... 60

Figura 2.1 - Energia requerida por diferentes tipos de resfriadores (KADER, 1992). .... 76

Figura 2.2 - Custos comparativos de diferentes tipos de resfriadores (KADER, 1992). .... 76

Figura 2.3 - Comparação da temperatura final no resfriamento a vácuo de diferentes hortaliças. Condições: pressão final de 3,98 a 4,58 mmHg, temperatura inicial de 20 a 22 °C e tempo de resfriamento de 25,2 a 30 minutos (ASHRAE, 2002). ..... 79

Figura 2.4 – Plantação de alface hidropônica, CIA das Hortaliças, Campinas-SP. .... 80

Figura 2.5 – Caixa plástica utilizada nos ensaios com as alfaces..... 81

Figura 2.6 – Esquemática da câmara de condicionamento da temperatura das alfaces.. 83

Figura 2.7 – Câmara de condicionamento da temperatura das amostras..... 84

Figura 2.8 – Esquema simplificado da montagem experimental..... 84

Figura 2.9 – Alfaces estocadas na câmara frigorífica..... 86

Figura 2.10 – Curvas de resfriamento à vazão de  $29 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ : (a) massa de alface 3,5 kg , tempo de espera 4h; (b) massa de alface 2,5 kg , tempo de espera 4 h; (c) massa de alface 3,5 kg, tempo de espera 2 h; (d) massa de alface 2,5 kg, tempo de espera 2 h. .... 88

Figura 2.11 – Curvas de resfriamento à vazão de  $15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ : (a) massa de alface 3,5 kg , tempo de espera 4 h; (b) massa de alface 2,5 kg , tempo de espera 4 h; (c) massa de alface 3,5 kg, tempo de espera 2 h; (d) massa de alface 2,5 kg, tempo de espera 2 h. .... 89

Figura 2.12 – Curvas de pressão à vazão de  $29 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ : (a) massa de alface 3,5 kg , tempo de espera 4 h; (b) massa de alface 2,5 kg , tempo de espera 4 h; (c) massa de alface 3,5 kg, tempo de espera 2 h; (d) massa de alface 2,5 kg , tempo de espera 2 h. .... 92

Figura 2.13 – Curvas de pressão à vazão de  $15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ : (a) massa de alface 3,5 kg , tempo de espera 4h; (b) massa de alface 2,5 kg , tempo de espera 4 h; (c) massa de alface 3,5 kg, tempo de espera 2 h; (d) massa de alface 2,5 kg , tempo de espera 2h. .... 93

Figura 2.14 – Curvas de potência à vazão de  $29 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ : (a) massa de alface 3,5kg , tempo de espera 4h; (b) massa de alface 2,5 kg , tempo de espera 4h; (c) massa de alface 3,5 kg, tempo de espera 2 h; (d) massa de alface 2,5 kg , tempo de espera 2 h. .... 95

Figura 2.15 – Curvas de potência à vazão de  $15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ : (a) massa de alface 3,5 kg , tempo de espera 4 h; (b) massa de alface 2,5 kg , tempo de espera 4 h; (c) massa de alface 3,5 kg, tempo de espera 2 h; (d) massa de alface 2,5 kg , tempo de espera 2h. .... 96

Figura 2.16 – Curvas de perda de massa à vazão de  $29 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ : (a) massa de alface 3,5kg , tempo de espera 4 h; (b) massa de alface 2,5 kg , tempo de espera 4 h; (c) massa de alface 3,5 kg, tempo de espera 2 h; (d) massa de alface 2,5 kg , tempo de espera 2 h. .... 99

Figura 2.17 – Curvas de perda de massa à vazão de  $15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ : (a) massa de alface 3,5 kg , tempo de espera 4 h; (b) massa de alface 2,5 kg , tempo de espera 4h; (c) massa de alface 3,5 kg, tempo de espera 2 h; (d) massa de alface 2,5kg , tempo de espera 2 h. .... 100

Figura 2.18 – Gráfico de Pareto, efeitos das variáveis independentes sobre o tempo de processo. .... 104

Figura 2.19 – Relação entre os tempos de processo observados e os preditos pelo modelo. .... 105

Figura 2.20 – Superfície de resposta para o tempo de processo ( $Y_1$ ) em função da massa de produto ( $X_1$ ) e da vazão de bombeamento ( $X_3$ )..... 107

Figura 2.21 – Superfície de resposta para o tempo de processo ( $Y_1$ ) em função do tempo de espera ( $X_2$ ) e da vazão de bombeamento ( $X_3$ )..... 107

Figura 2.22 – Superfície de resposta para o tempo de processo ( $Y_1$ ) em função do tempo de espera ( $X_2$ ) e da massa de alface ( $X_1$ )..... 108

Figura 2.23 - Gráfico de Pareto, efeitos das variáveis independentes sobre a energia consumida..... 109

Figura 2.24 – Relação entre os valores de energias consumidas observadas e os preditos pelo modelo. .... 110

Figura 2.25 – Superfície de resposta para a energia consumida ( $Y_2$ ) em função da massa de produto ( $X_1$ ) e da vazão de bombeamento ( $X_3$ )..... 112

Figura 2.26 – Superfície de resposta para a energia de consumida ( $Y_2$ ) em função do tempo de espera ( $X_2$ ) e da vazão de bombeamento ( $X_3$ ). .... 112

Figura 2.27 – Superfície de resposta para a energia consumida ( $Y_2$ ) em função do tempo de espera ( $X_2$ ) e da massa de alface ( $X_1$ )..... 113

Figura 2.28 - Gráfico de Pareto, efeitos das variáveis independentes sobre a perda de massa. .... 114

Figura 2.29 – Relação entre as perdas de massas observadas e as preditas pelo modelo... 115

Figura 2.30 – Superfície de resposta para a perda de massa ( $Y_3$ ) em função da massa de produto ( $X_1$ ) e da vazão de bombeamento ( $X_3$ )..... 117

Figura 2.31 – Superfície de resposta para a perda de massa ( $Y_3$ ) em função do tempo de espera ( $X_2$ ) e da vazão de bombeamento ( $X_3$ )..... 117

Figura 2.32 – Superfície de resposta para a perda de massa ( $Y_3$ ) em função do tempo de espera ( $X_2$ ) e da massa de alface ( $X_1$ )..... 118

Figura 2.33 - Gráfico de Pareto, efeitos das variáveis independentes sobre a vida pós-colheita. .... 119

Figura 2.34 – Relação entre as vidas pós-colheita observadas e as previstas pelo modelo.	120
Figura 2.35 – Cálculo de $kS$ no ensaio 5 (massa inicial de 3,5 kg) de acordo com equação 1.8. ....	123
Figura 2.36 – Valores de $kS$ em função da massa de alfaces submetidas ao resfriamento ao vácuo.....	124
Figura 3.1 – Exemplo de um histórico de temperaturas de um produto para o cálculo do grau-hora acumulado (GH) ou grau-dia acumulado.....	142
Figura 3.2 – Alfaces estocadas na câmara frigorífica.....	145
Figura 3.3 – Câmara de resfriamento e detalhe do sistema de refrigeração. ....	146
Figura 3.4 – Evaporador da câmara; detalhes dos sensores e bico aspersor. ....	147
Figura 3.5 – Câmara de estocagem (a) Sistema de umidificação do ar interno da câmara; (b) Sistema de monitoração de temperatura e controle eletrônico de umidade relativa. ....	147
Figura 3.6 – Histórico de notas da avaliação sensorial das alfaces submetidas ao resfriamento a vácuo: (a) ensaio 1, tempo de espera de 4 h; (b) ensaio 2, tempo de espera 4 h; (c) ensaio 3, tempo de espera 2 h; (d) ensaio 4, tempo de espera 2 h. ....	150
Figura 3.7 - Histórico das temperaturas das alfaces desde a colheita até o fim da vida pós-colheita: (a) ensaio 1, tempo de espera de 4 h; (b) ensaio 2, tempo de espera 4 h; (c) ensaio 3, tempo de espera 2 h; (d) ensaio 4, tempo de espera 2 h. ....	153
Figura 3.8 - Modelo ajustado ( $R^2 = 0,360$ ) para os dados de vida pós-colheita em função do grau-hora acumulado até o fim da estocagem (GHT). ....	155
Figura 3.9 – Exemplo de cálculo do grau-hora acumulado parcial (GHP). ....	156
Figura 3.10 - Modelo ajustado ( $R^2 = 0,790$ ) para os dados de vida pós-colheita em função do grau-hora acumulado até o início da estocagem (GHP). ....	158
Figura 3.11 - Modelo ajustado ( $R^2 = 0,957$ ) para os dados de vida pós-colheita em função do grau-hora acumulado até o início da estocagem (GHP), retirados os ensaios 11 e 16..	160
Figura 3.12 - Modelo ajustado ( $R^2 = 0,952$ ) para os dados de vida pós-colheita em função do grau-hora acumulado parcial (GHP) e déficit de umidade relativa (UR100). ....	162
Figura 3.13 – Taxa respiratória de alfaces expressa em produção de $CO_2$ em função da temperatura. (adaptado de HARDENBURG, 1990) .....	164

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resfriamento a vácuo de hortaliças com diferentes relações de área por volume (HARDENBURG, 1990).....	5
Tabela 1.1. - Propriedades do vapor de água sob baixas pressões (GEANKOPLIS, 1993).	13
Tabela 1.2. – Variáveis independentes e níveis utilizados no planejamento preliminar. ....	37
Tabela 1.3. Planejamento fatorial completo de ensaios de dois níveis.....	38
Tabela 1.4. – Quantidade de água adsorvida pela sílica-gel em cada abertura de válvula...	39
Tabela 1.5. – Quantidade de sílica-gel seca e capacidade máxima de adsorção. ....	39
Tabela 1.6. – Relação $\text{kg kg}^{-1}$ de cada isóstera. ....	39
Tabela 1.7. – Parâmetros do modelo de Dubinin-Astakhov.....	41
Tabela 1.8. – Parâmetros do modelo de Freundlich. ....	41
Tabela 1.9. – Resultados do planejamento fatorial completo de ensaios com água .....	45
Tabela 1.10. Modelo para a variável perda de massa ( $Y_1$ ).....	50
Tabela 1.11. – ANOVA para a variável perda de massa ( $Y_1$ ).....	51
Tabela 1.12. – Modelo para a variável temperatura final ( $Y_2$ ).....	53
Tabela 1.13. - ANOVA para a variável temperatura final ( $Y_2$ ).....	54
Tabela 1.14. - Modelo para a variável consumo de energia ( $Y_3$ ).....	56
Tabela 1.15. - ANOVA para a variável consumo de energia ( $Y_3$ ).....	56
Tabela 2.1 – Comparação entre cinco métodos de resfriamento utilizados para frutas e hortaliças (adaptado de THOMPSON <i>et al.</i> , 1998).....	75
Tabela 2.2 – Variáveis independentes e níveis utilizados. ....	81
Tabela 2.3 – Planejamento fatorial completo de ensaios de dois níveis.....	82
Tabela 2.4 – Resultado do planejamento fatorial completo dos ensaios com alfaces.....	102
Tabela 2.5 – Efeitos das variáveis independentes e suas interações sobre o tempo final de processo ( $Y_1$ ). ....	103
Tabela 2.6 – Comparação entre os valores de tempos de processo experimentais e os preditos pelo modelo. ....	105
Tabela 2.7 – ANOVA para o modelo de regressão do tempo de processo ( $Y_1$ ).....	106
Tabela 2.8 – Efeitos das variáveis independentes e suas interações sobre a energia consumida ( $Y_2$ ). ....	108

---

Tabela 2.9 – Comparação entre os valores de energias consumidas experimentais e os preditos pelo modelo. ....	110
Tabela 2.10 – ANOVA para o modelo de regressão da energia consumida ( $Y_2$ ). ....	111
Tabela 2.11 – Efeitos das variáveis independentes e suas interações sobre a perda de massa ( $Y_3$ ). ....	114
Tabela 2.12 – Comparação entre os valores de perdas de massas experimentais e os preditos pelo modelo. ....	116
Tabela 2.13 – ANOVA para o modelo de regressão da perda de massa ( $Y_3$ ). ....	116
Tabela 2.14 – Efeitos das variáveis independentes e suas interações sobre a vida pós-colheita ( $Y_4$ ). ....	119
Tabela 2.15 – Comparação entre os valores de vida pós-colheita experimentais e os preditos pelo modelo. ....	121
Tabela 2.16 – ANOVA para o modelo de regressão da vida pós-colheita ( $Y_4$ ). ....	121
Tabela 2.17 – Valores de $kS$ em função da massa de alfaces. ....	123
Tabela 3.1 – Experimentos realizados e seus tempos de espera. ....	143
Tabela 3.2 – Resultados da avaliação sensorial da vida pós-colheita. ....	151
Tabela 3.3 – Valores de grau-hora acumulado total (GHT) desde a colheita até o fim da vida pós-colheita. ....	154
Tabela 3.4 – ANOVA para o modelo de regressão da vida pós-colheita em função do grau-hora acumulado até o fim da estocagem (GHT). ....	155
Tabela 3.5 – Valores de graus-hora acumulados desde a colheita até o início da estocagem (GHP). ....	157
Tabela 3.6 – ANOVA para o modelo de regressão da vida pós-colheita em função do grau-hora acumulado até início da estocagem (GHP). ....	158
Tabela 3.7 – ANOVA para o modelo de regressão da vida pós-colheita em função do grau-hora acumulado até início da estocagem (GHP) sem os ensaios 11 e 16. ....	159
Tabela 3.8 – Valores de déficit de umidade relativa acumulada (UR100) desde a colheita até o início do resfriamento. ....	161
Tabela 3.9 – ANOVA para o modelo de regressão da vida pós-colheita em função do grau-hora acumulado parcial (GHP) e déficit de umidade relativa (UR100). ....	162



## NOMENCLATURA

$B$	constante específica do par adsorvente/adsorvato	
$\bar{C}$	calor específico médio	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
$D$	coeficiente de afinidade do par adsorvente/adsorvato, é a relação entre $B$ e $\beta'$ .	
$H_{fg}$	entalpia específica de vaporização	$\text{kJ kg}^{-1}$
$H_{sub}$	entalpia específica de sublimação	$\text{kJ kg}^{-1}$
$k$	coeficiente de transferência de massa	$\text{g s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{Pa}^{-1}$
$K$	quantidade de massa do adsorvato no adsorvente anidro	$\text{kg kg}^{-1}$
$K_o$	quantidade máxima de massa de adsorvato no adsorvente anidro	$\text{kg kg}^{-1}$
$m$	massa	$\text{Kg}$
$M$	massa molar	$\text{kg mol}^{-1}$
$n$	parâmetro de ajuste do par adsorvente/adsorvato	
$P$	pressão	$\text{Pa}$
$q$	quantidade de adsorvato por adsorvente	$\text{kg kg}^{-1}$
$q^\infty$	quantidade máxima de adsorvato por adsorvente	$\text{kg kg}^{-1}$
$Q$	calor	$\text{J}$
$R$	constante universal dos gases	$\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$
$S$	área superficial	$\text{cm}^2$
$t$	tempo	$\text{min}$
$T$	temperatura	$\text{K}$
$v$	volume de vapor de água	$\text{m}^3$
$V$	volume livre da câmara de vácuo	$\text{m}^3$
$W$	volume de microporos preenchidos	$\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$
$W_0$	volume máximo de adsorvente por unidade de adsorvido	$\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$
$Z$	vazão de bombeamento	$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$
$\beta$	coeficiente de afinidade do adsorvente	
$\rho$	densidade	$\text{kg m}^{-3}$
$\Delta m$	Variação de massa	$\text{kg}$

## Subscritos

$ar$	Ar
$c$	condição no estado crítico
$i$	Inicial
$f$	Final
$g$	Gelo
$p$	Produto
$sat$	Saturação
$w$	Água



## RESUMO GERAL

O resfriamento a vácuo é um método de refrigeração que utiliza a evaporação da água como princípio de resfriamento. Essa evaporação ocorre a baixas pressões, para atingir temperaturas de ebulição próximas a temperatura final desejada do produto. Sistemas de refrigeração por compressão são utilizados para a condensação do vapor de água oriundo do produto. Como alternativa na condensação dos vapores de água, a adsorção com sílica-gel, aparece como boa alternativa tecnológica. O resfriamento a vácuo apresenta algumas vantagens sobre outras técnicas de resfriamento: rapidez no resfriamento e uniformidade da temperatura final do produto. Neste trabalho foi construído um sistema de resfriamento a vácuo e alfaces hidropônicas (*Lactuca sativa* L.) do grupo Mimosa, cv. Salad Bowl, foram submetidas ao resfriamento a vácuo; foi feita a caracterização das condições de equilíbrio (temperatura e pressão) do par sílica-gel / água como um leito de adsorção. Através de um planejamento experimental foram investigadas as influências da vazão de bombeamento, da quantidade de alface e o tempo de espera sobre a perda de massa e vida pós-colheita das alfaces e sobre o tempo e consumo de energia do resfriamento. As alfaces foram estocadas em câmara de refrigeração com temperatura média de 1°C e umidade relativa de 95-100%. Antes da estocagem, foram adotados diferentes tempos de espera para início do resfriamento. A determinação da vida pós-colheita foi feita através de avaliação sensorial das alfaces. A temperatura das alfaces foi monitorada desde a colheita até o fim de suas vidas pós-colheita. Foram feitos cálculos de grau-hora acumulados (“degree-hour”) e ajustados modelos que os relacionem com a vida pós-colheita. Na caracterização da sílica-gel ambos os modelos apresentaram um bom ajuste dos dados experimentais com coeficientes de correlação ( $R^2$ ) de 0,991 para o modelo de Dubinin-Astakhov e 0,993 para o modelo de Freundlich. A quantidade de massa de alfaces e a vazão de bombeamento influenciaram significativamente ( $p < 0,05$ ) o tempo de processo, o consumo de energia e a perda de massa das alfaces. O tempo de processo variou de 16,9 minutos até 79 minutos, o consumo de energia de 0,59 kWh até 1,52 kWh, a perda de massa das alfaces de 3,01% até 5,44% e a vida de prateleira das alfaces de 19 dias até 23 dias. O modelo que melhor ajustou os dados de grau-hora acumulado obteve um coeficiente de correlação de 0,957 e um F calculado de 360,5 ( $p < 0,05$ ).

*Palavras-chave:* resfriamento a vácuo, alface, vida pós-colheita, grau-hora, adsorção



**ABSTRACT**

The principle of vacuum cooling process is based on the evaporation of water. The water evaporation occurs under low pressure and the boiling point temperature of water is lowered. Refrigeration systems are used for the condensation of the water vapor. For the condensation of water vapor, the adsorption appears as a good technological alternative. The vacuum cooling presents some advantages over other cooling techniques: cooling time and uniformity of the final temperature. In this work, a vacuum cooling system was made and the hydroponics lettuces (*Lactuca sativa* L.), Mimosa group, cv. Salad Bowl, were vacuum cooled. By experimental design, the influence of pumping rate of flow, mass lettuce and postharvest time (before vacuum cooling) on the mass loss, shelf life, operation time and energy consumption were investigated. The lettuces had been storage in cooling room with average temperature of 1°C. Before the storage, different periods of time between the harvest and the cooling were adopted. The determination of the shelf life was made through sensorial evaluation of the lettuces. The degree-hour (DH) was calculated and models were adjusted to relate the DH with the shelf life. In the characterization of the silica-gel, both equations showed good agreement with experimental data, the coefficients of regression ( $R^2$ ) were 0.991 on the Dubinin-Astakhov equation and 0.993 on the Freundlich equation. The mass lettuce and the pumping rate of flow had significant influence ( $p < 0.05$ ) on the operation time, the energy consumption and the lettuce mass loss. The operation time ranged from 16.9 to 79 minutes, the energy consumption changed from 0.59 to 1.52 kWh, the mass loss varied from 3.01% to 5.44% and the shelf life from 19 to 23 days. The degree-hour model that showed good agreement with the experimental data had a regression coefficient ( $R^2$ ) 0.957 and calculated F 360.5 ( $p < 0,05$ ).

*Keywords:* vacuum cooling, lettuce, shelf-life, degree-hour, adsorption;



## **INTRODUÇÃO GERAL**

A refrigeração é um eficiente método para a conservação de frutas e hortaliças, pois a diminuição da temperatura desses produtos afeta diretamente a qualidades e os períodos de comercialização. Quanto antes um produto vegetal atingir a sua temperatura ideal de estocagem, maior será sua vida pós-colheita e menores serão suas perdas durante a comercialização.

No Brasil, as perdas de produtos hortifrutícolas são altas, podendo chegar em valores de 35 % da produção total (MAARA, 1993 *apud* CORTEZ *et al.*, 2002). Grande parte dessa perda poderia ser evitada se fossem utilizados adequados métodos de tratamento pós-colheita e manutenção adequada da temperatura ideal de estocagem desde a colheita do produto até sua comercialização.

A tecnologia de refrigeração a vácuo foi inicialmente usada comercialmente em 1948 nos EUA (BELZILE, 1982). O resfriamento a vácuo tem sido utilizado desde então como tecnologia pós-colheita de certas hortaliças e flores. A remoção do calor desses produtos, logo após a colheita, preserva a qualidade dos mesmos por maior tempo.

THOMPSON *et al.* (1998) citam que o resfriamento a vácuo tem provado ser um caminho relativamente rápido na remoção do calor de campo de certas hortaliças. Por exemplo, em 1986 podia-se resfriar acima de 800 caixas de alface (24 cabeças em cada caixa) de 27 °C para 1 °C em 30 minutos.

Outra importante aplicação do resfriamento a vácuo é o resfriamento de cortes de carne cozidas (HUBER, 2004). Diversos autores têm estudado a influência do resfriamento a vácuo em produtos carneos após o cozimento (MC DONALD & SUN, 2000; SUN & WANG, 2000; DESMOND *et al.*, 2000).

O resfriamento dos produtos submetidos ao resfriamento a vácuo ocorre pela evaporação da água presente no produto ou intencionalmente aspergida, para diminuir a

perda de água pelo produto. A evaporação da água é alcançada pela diminuição da pressão local, onde os produtos são colocados (câmara de vácuo).

O objetivo principal deste trabalho foi o de construir e avaliar um processo de resfriamento a vácuo aplicado em alfaces (*Lactuca sativa L.*). Como objetivos específicos:

- Avaliar dois sistemas de retirada de vapores de água da linha de bombeamento: sistema de refrigeração com fluido secundário e sistema com leito adsorativo;
- Determinar as condições de equilíbrio do par sílica-gel/água através da construção das isósteras do par;
- Verificar o comportamento das variáveis envolvidas no resfriamento a vácuo e suas influências sobre o tempo de resfriamento, potência consumida e efeitos nas alfaces;
- Avaliar a relação da vida pós-colheita das alfaces resfriadas com diferentes tempos de espera da refrigeração com o fator grau-hora (“degree-time”).

## **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA GERAL**

O abaixamento da temperatura retarda consideravelmente os fenômenos associados à perda de qualidade dos produtos de origem animal e vegetal, tais como, crescimento microbiano, atividade enzimática e diversas reações bioquímicas. Métodos de resfriamento de frutas e hortaliças foram desenvolvidos para proporcionar a rapidez necessária no abaixamento da temperatura dos mesmos.

A refrigeração é recomendada para frutas e hortaliças porque pode retardar o envelhecimento, devido ao amadurecimento, reduzir as mudanças metabólicas indesejáveis e produção de calor pela respiração, diminuir a perda de umidade e a deterioração, devido às bactérias e fungos, e inibir crescimentos indesejáveis (brotamento, alongação de caules, etc) (CHITARRA & CHITARRA 1990).

Um resfriamento rápido imediatamente após a colheita pode reduzir significativamente a deterioração de frutas e hortaliças, prolongando suas vidas pós-colheita.

A produção de hortaliças no Brasil foi, segundo dados da FAO (2003), acima de 15,5 milhões de toneladas em 2002, representando 1,2 % da produção mundial e um valor de 2,5 bilhões de dólares. Apesar disso, o Brasil não pode ser considerado um grande exportador, devido à falta de qualidade e às perdas pós-colheita desses produtos.

Na região de Campinas o cultivo de hortaliças tem sido conhecido como “ouro verde”, devido à sua crescente importância econômica nos últimos anos, chegando a representar a principal exploração agrícola da região em 2003, com valores de produção que chegam aos 13 milhões de reais só com o cultivo de couve e alface (CORREIO POPULAR, 2004).

No Brasil, as perdas pós-colheita de produtos hortifrutícolas ainda são grandes. Apenas com as hortaliças entre os anos de 1990 e 1992, as perdas chegaram ao patamar de

35 % da produção, proporcionando um prejuízo de 500 milhões de dólares (MAARA, 1993 *apud* CORTEZ *et al.*, 2002).

No resfriamento a vácuo, a água, naturalmente presente no produto e/ou intencionalmente aspergida sobre ele, é que atua como refrigerante primário, sendo evaporada dentro de uma câmara a baixa pressão. O calor requerido para essa evaporação (calor latente de vaporização) é fornecido pelo produto (calor sensível). Portanto, o princípio básico é extrair calor sensível do produto pela evaporação da água (MALPAS, 1972).

HAAS & GUR (1987) descrevem os pontos básicos do processo de resfriamento a vácuo:

- A temperatura de ebulição da água é uma função da pressão absoluta. Dessa forma, diminuindo a pressão absoluta, a temperatura de evaporação da água irá diminuir;
- Na mudança do estado da água, de líquido para vapor, o calor latente de vaporização é fornecido pelas vizinhanças, removendo dessa forma o calor sensível do produto;
- O vapor de água evaporado do produto deve ser removido durante o processo para não danificar a bomba de vácuo e devido a seu alto volume específico;

Devido ao resfriamento evaporativo provocado pelo vácuo, a área de exposição ao vácuo tem influência direta no tempo e na eficiência do método, assim produtos com grande área superficial, por exemplo, hortaliças folhosas, são indicadas ao método. Além disso, produtos com altos coeficientes de transpiração podem ser resfriados rapidamente, mas aqueles com baixos coeficientes não são bem adaptados ao resfriamento a vácuo (THOMPSON *et al.*, 1998). Na Tabela 1 são apresentados alguns exemplos de tempos de resfriamento a vácuo para diferentes hortaliças.

**Tabela 1 – Resfriamento a vácuo de hortaliças com diferentes relações de área por volume (HARDENBURG, 1990).**

Relação: Área/Volume	Hortaliça	Tempo de Vácuo (min)	Temperatura do produto (°C)	
			Inicial	Final
A	Couve de Bruxelas	20	20	3
L	Alface	13	22	2
T	Espinafre	10	19	3
A				
M	Couve-flor	20	24	7
É	Aipo	13	21	8
D				
I	Milho verde	20	28	6
A				
P	Cenoura	45	19	16
E				
Q	Pepino	20	26	23
U				
E	Tomate	20	25	22
N				
A				

A perda de água ocasionada pela refrigeração a vácuo, obviamente pode representar um problema quando esta for elevada. Também não é desejável uma perda significativa de massa do produto. Porém, esta perda ocorre de maneira uniforme em todo produto, e não apenas uma certa região do produto é afetada. Segundo CHITARRA & CHITARRA (1990), a perda de água dos produtos no resfriamento a vácuo deve estar entre 1 % e 5 % da massa. Afonso (2000) obteve perdas de água de até 4,5 % em relação à massa original de alfaces resfriadas a vácuo, sem que houvesse alterações visuais perceptíveis ao consumidor.

Resfriadores a vácuo são muito eficientes em termos energéticos, pois retiram calor apenas dos produtos, diferentes de outros métodos que, além do produto, necessitam retirar calor das paredes, embalagens, iluminação, etc (THOMPSON *et al.*, 1998).

Um sistema de refrigeração a vácuo é composto de uma câmara, uma ou mais bombas de vácuo e um sistema para condensação dos vapores de água. O sistema de refrigeração é necessário para condensar os vapores de água oriundos dos produtos, evitando assim que estes atinjam a bomba de vácuo. Tal sistema é responsável pela maior

parte da energia elétrica consumida no processo de resfriamento a vácuo (THOMPSON *et al.*, 1998). Teoricamente apenas a bomba de vácuo e a câmara seriam necessárias, porém sob baixas pressões, o vapor de água apresenta um volume específico muito grande o que demandaria capacidades cada vez maiores das bombas. Assim o uso de um sistema para a condensação do vapor de água é economicamente viável (WANG & SUN, 2002).

A retirada dos vapores de água formados sob baixas pressões é o principal responsável pelo alto custo fixo dos equipamentos envolvidos, além do custo operacional. Dessa forma, melhorar ou descobrir alternativas da remoção desses vapores pode tornar o método acessível a um maior número de produtores rurais.

# **1 - CAPÍTULO I – Construção e Avaliação de um Sistema de Resfriamento a Vácuo**

## Resumo

O princípio do resfriamento a vácuo está na evaporação da água, do próprio produto e/ou intencionalmente aspergida sobre ele, realizada sob baixas pressões absolutas. A pressão da câmara de vácuo é reduzida através de uma bomba de vácuo e, conseqüentemente o ponto de ebulição da água é abaixado. Sistemas de refrigeração, geralmente com refrigerante secundário, são utilizados para a condensação do vapor de água oriundo do produto, para que este não atinja diretamente as bombas; esses sistemas representam um alto custo fixo e operacional. Como alternativa na condensação dos vapores de água, a adsorção aparece com boa alternativa tecnológica. A sílica-gel é um sólido microporoso que possui excelentes características na adsorção de vapores de água. Dois modelos de adsorção foram propostos para a caracterização das condições de equilíbrio (pressão e temperatura) do par sílica-gel/água: modelo de Dubinin-Astakhov e modelo de Freundlich. Foi feita uma montagem experimental de um sistema de resfriamento a vácuo e avaliação do sistema através de um planejamento experimental. Além disso, um leito de sílica-gel foi construído e suas condições de aplicação no resfriamento a vácuo foram testadas. A perda de massa e o consumo de energia tiveram como principal influência ( $p < 0,05$ ) a vazão de bombeamento, enquanto que a temperatura final teve a área de evaporação como principal influência ( $p < 0,05$ ). Na caracterização da sílica-gel ambos os modelos apresentaram um bom ajuste dos dados experimentais com coeficientes de correlação ( $R^2$ ) de 0,991 para o modelo de Dubinin-Astakhov e 0,993 para o modelo de Freundlich.

*Palavras-chave:* resfriamento, resfriamento a vácuo, vácuo, adsorção, sílica-gel;

**Abstract**

The principle of vacuum cooling process is based on the evaporation of water contained in product itself or prewetted products. The pressure in the vacuum chamber is reduced by a vacuum pump and the boiling point temperature of water is lowered. The refrigeration systems, generally with secondary cooling, are used for the condensation of the water vapor, so that this does not reach the pump directly; these systems represent high investment costs and high operational costs. For the condensation of water vapor, the adsorption appears as a good technological alternative. The silica-gel is a microporous solid that shows excellent characteristics in the adsorption of water vapor. Two models of adsorption had been considered for the characterization of the equilibrium conditions (pressure and temperature) of the pair silica-gel/water: model of Dubinin-Astakhov and model of Freundlich. The experimental apparatus of a vacuum cooling system was made and was evaluated by experimental design. A silica-gel bed was constructed and its conditions of application in the vacuum cooling were tested. The mass loss and the energy consumption had as main influence the pumping speed ( $p < 0,05$ ), whereas the final temperature had the evaporation area as the main influence ( $p < 0,05$ ). In the characterization of the silica-gel, both equations showed good agreement with experimental data, the coefficients of regression ( $R^2$ ) were 0,991 on the Dubinin-Astakhov equation and 0,993 on the Freundlich equation

*Keywords:* precooling, vacuum cooling, vacuum, adsorption, silica-gel;

## 1.1. Introdução

O resfriamento a vácuo é um método de resfriamento utilizado com frequência na comercialização de alfaces na Espanha e em diversos países da Europa, além dos Estados Unidos da América (ARTES & MARTINEZ, 1996). É um método que utiliza a evaporação da água do próprio produto, através de sua superfície e de seus poros, para realizar a remoção de calor do mesmo (McDONALD & SUN, 2000). Os produtos são colocados dentro de uma câmara cuja pressão é reduzida até valores de 4,5 mmHg, quando se deseja temperaturas próximas à 0 °C.

O resfriamento a vácuo tem como componentes principais uma câmara para baixas pressões, um sistema para condensação e / ou congelamento de vapores de água e bomba de vácuo.

Segundo THOMPSON *et al.* (1998) o sistema de condensação dos vapores de água é responsável pelo maior consumo de energia elétrica no resfriamento a vácuo. Uma redução no consumo de energia desses sistemas é interessante para a redução dos custos operacionais do processo. Ainda, o consumo de eletricidade pode ser reduzido se houver uma redução da capacidade de bombeamento ao longo do processo, se o produto tiver uma alta taxa de ocupação na câmara e redução da capacidade do sistema de condensação dos vapores de água no início do processo.

A adsorção dos vapores de água através de um leito adsortivo pode ser uma alternativa para a eliminação desses vapores na linha de bombeamento. A sílica-gel pode ser utilizada como leito, pois exibe boas características de adsorção do vapor de água (TAHAT, 2001).

Este trabalho teve como objetivo a montagem de um sistema de resfriamento a vácuo, avaliando-se a eficiência e a dinâmica do processo aplicado em bandejas, contendo água; montagem de um leito adsortivo, contendo sílica-gel, e uma montagem experimental para caracterização das condições de equilíbrio para o par sílica-gel / água.

## 1.2. Revisão Bibliográfica

### 1.2.1. Método de Resfriamento a Vácuo

O processo termodinâmico envolvido no resfriamento a vácuo pode ser dividido em duas fases distintas. Na primeira, com o produto carregado dentro da câmara à temperatura ambiente, a bomba de vácuo é acionada para reduzir a pressão interna da câmara. A temperatura do produto permanece constante até a câmara atingir a pressão de saturação, isto é, até a pressão na câmara atingir a pressão de vapor de água do produto. Com a temperatura de ebulição atingida, começa-se a evaporação e o vapor de água começa a ocupar o espaço do ar na câmara. A segunda fase começa simultaneamente com o fim da primeira, onde a saturação continua até o produto ser resfriado à temperatura desejada (ASHRAE, 2002).

Devido ao princípio do resfriamento a vácuo é possível controlar o resfriamento apenas controlando a pressão do interior da câmara, o que é uma vantagem em relação a outros métodos (McDONALD & SUN, 2000).

Os equipamentos básicos de um sistema de resfriamento a vácuo podem ser vistos na Figura 1.1.

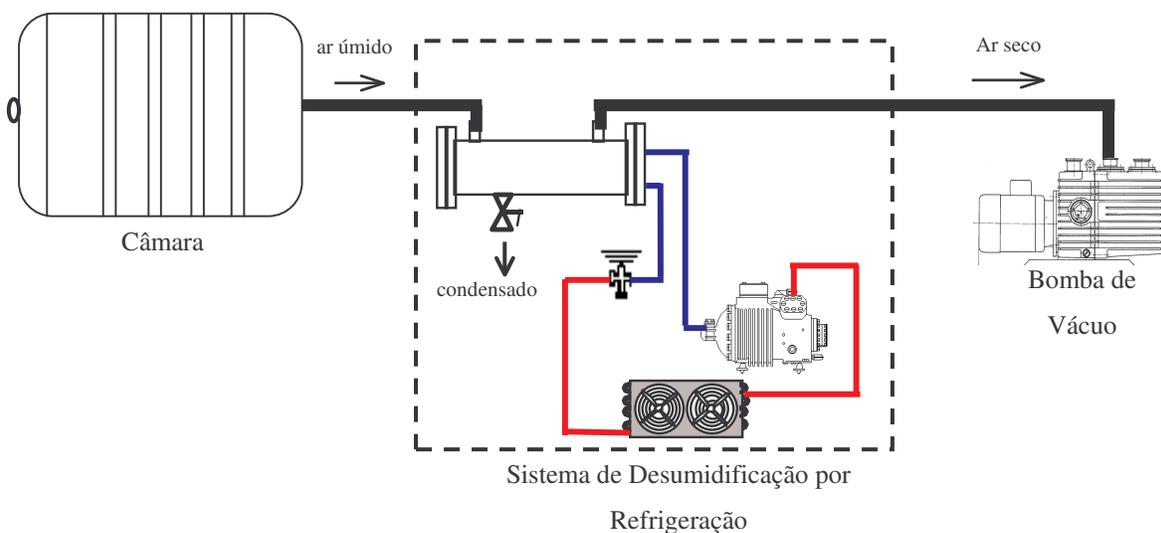


Figura 1.1 - Esquema básico de um resfriador a vácuo.

A câmara deve resistir à pressão atmosférica e as mais utilizadas são em formato cilíndrico e em forma de paralelepípedo, tendo esta última uma maior taxa de ocupação de produto (BELZILE, 1982).

Segundo VIGNEAULT & GOYETTE (1994) a pressão interna deve atingir a pressão de saturação correspondente à temperatura inicial do produto entre 5 e 8 minutos após o acionamento das bombas, a partir daí, começa efetivamente o resfriamento do produto. De acordo com RENNIE *et al.* (2001b), a câmara deve ser evacuada até a pressão desejada entre 5 e 10 minutos após início de bombeamento; ainda segundo os autores, a capacidade das bombas de vácuo deve ser a do volume da câmara utilizada por minuto, porém NEVES F<sup>o</sup> *et al.* (1997) sugerem que a bomba deve ter a capacidade mínima de 50 % do volume da câmara por minuto.

O vapor de água retirado do produto não deve atingir a bomba de vácuo, pois teria sua capacidade reduzida ou seria danificada, devendo ser excluído da linha de bombeamento. Outra razão para eliminá-lo é o seu elevado volume específico a baixas pressões, conforme mostrado na Tabela 1.1, que significariam bombas de grande capacidade (McDONALD & SUN, 2000). Para eliminar o vapor da linha de vácuo deve-se condensá-lo. Em plantas comerciais de refrigeração a vácuo é usual a utilização de um sistema de refrigeração auxiliar na condensação e remoção desse vapor de água. Resfriadores menores podem usar gelo para condensar o vapor de água e podem ser deslocados de um lugar a outro como um reboque (CORTEZ & LEAL, 1997).

Uma forma de quantificar o volume de vapor retirado durante o processo de resfriamento a vácuo é assumir o vapor como um gás ideal (SUN & WANG, 2001). Assim:

$$v = \frac{\Delta m_w \cdot R \cdot T}{M_w \cdot P} \quad (1.1)$$

Na Tabela 1.1 são mostrados alguns valores de calor a ser retirado do produto na evaporação da água e o volume específico do vapor de água, sob diferentes pressões de vácuo.

**Tabela 1.1. - Propriedades do vapor de água sob baixas pressões (GEANKOPLIS, 1993).**

Pressão absoluta (mmHg)	Temperatura de Evaporação (°C)	Entalpia específica de Vaporização (kJ kg <sup>-1</sup> )	Volume específico do Vapor (m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> )
760	100	2257,06	1,67
355,37	80	2308,79	3,41
31,84	30	2430,51	32,89
12,79	15	2465,91	77,93
5,68	3	2494,33	168,13

O sistema de refrigeração intermediário utilizado para a condensação do vapor de água pode ser feito por expansão direta em um evaporador ou por um refrigerante secundário circulando em um trocador, que é o mais utilizado. O sistema com o uso de um secundário traz algumas vantagens como atender a grandes variações de demanda de refrigeração e também de ser capaz de “estocar frio” (VIGNEAULT & GOYETTE, 1994). Porém, o uso de desumidificadores por adsorção também pode ser uma alternativa na retirada desse vapor de água.

Em termos de energia elétrica consumida o sistema de refrigeração usado para a desumidificação do ar representa gastos em torno de 60-70 % do total (THOMPSON *et al.*, 1998). É esta também, a parte mais cara, em termos de custos fixos, do equipamento para o resfriamento a vácuo.

RENNIE *et al.* (2001) discutem que uma forma de diminuir os custos fixos do sistema de refrigeração seria a diminuição da capacidade da bomba de vácuo, porém isso acarretaria um maior tempo de processo.

Considerando este aspecto energético do processo de resfriamento a vácuo, os desumidificadores adsorptivos podem ter grande utilidade na economia de energia, como substituto, parcial ou total, do sistema de refrigeração intermediário.

## **1.2.2. Variáveis Importantes do Resfriamento a Vácuo**

### **1.2.2.1. Pressão interna da câmara**

O resfriamento começa quando a pressão interna atinge a pressão de vapor do produto, quando a temperatura de evaporação da água atinge a temperatura do produto. Geralmente, isso ocorre entre 18 e 32 mmHg, que correspondem às temperaturas de evaporação da água de, respectivamente, 20 °C e 30 °C. O resfriamento termina quando a pressão mínima admissível de 4,6 mmHg para folhosas (ou seja, 0 °C de temperatura de evaporação da água) é atingida e, o produto se mantém nessa pressão por um tempo que irá variar de acordo com o tipo de produto. Para alfaces, por exemplo, esse tempo varia de 3 a 6 minutos (THOMPSON *et al.*, 1998).

A despressurização da câmara não deve ser feita rapidamente pois as folhas de hortaliças poderiam ser danificadas pelo deslocamento do ar. O problema pode ser eliminado fazendo-se uma despressurização mais lenta, por alguns minutos (THOMPSON *et al.*, 1998). O tempo de despressurização usado para alfaces é de 5 minutos (NEVES F<sup>o</sup> *et al.*, 1997).

### **1.2.2.2. Tempo de Resfriamento**

O tempo de resfriamento de um sistema comercial de refrigeração a vácuo é de 20 a 30 minutos para hortaliças folhosas, incluindo carga e descarga (BARTLETT, 1980; NEVES F<sup>o</sup> *et al.*, 1997; McDONALD & SUN, 2000; THOMPSON *et al.*, 1998). Similar ao encontrado por MELLOR (1980), onde alfaces foram resfriadas de 22 °C para 5 °C em 30 minutos. O tempo do resfriamento efetivo está em torno de 20 minutos para sistemas comerciais, mas dependerá da capacidade do sistema e da massa total da carga a ser resfriada (VIGNEAUT & GOYETTE, 1994).

O tempo de resfriamento depende da relação da área superficial pelo volume do produto, da facilidade com que a água é retirada do mesmo e da taxa de bombeamento a vácuo (SHAW & KUO, 1987). Dessas, a taxa de bombeamento é a única que pode ser controlada, seja pela capacidade de diferentes tipos de bombas ou pela associação em paralelo de duas ou mais bombas.

Através de um balanço de massa de ar no interior da câmara de vácuo pode-se chegar ao tempo para a câmara atingir a pressão de vapor do produto (HAAS & GUR 1987) pela seguinte equação:

$$\frac{dm_{ar}}{dt} = -Z\rho_{ar} = \frac{d(\rho_{ar} \cdot V)}{dt} \quad (1.2)$$

Considerando o ar, no interior da câmara, como gás ideal, tem-se que:

$$\rho_{ar} = \frac{PM}{RT} \quad (1.3)$$

Substituindo a equação 1.3 na equação 1.2 e integrando entre os tempos inicial e final e entre as pressões inicial e final, tem-se que o tempo para a câmara atingir a pressão de saturação do produto é:

$$t = \frac{60 \cdot V}{Z} \cdot \ln \frac{P_i}{P_f} \quad (1.4)$$

ou,

$$P_f = P_i \cdot e^{-\frac{Z}{60 \cdot V} \cdot t} \quad (1.5)$$

### 1.2.2.3. Perda de Água no Produto

De acordo com HOUSKA *et al.* (1996) o calor transferido durante a evaporação na superfície do alimento pode ser descrita pela equação:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{d(m_w H_{fg})}{dt} = \frac{dT}{dt} (m_p \cdot \bar{C}_p) \quad (1.6)$$

De acordo com SUN & WANG (2001) a equação 1.6 pode ser simplificada para a equação 1.7, considerando-se o calor específico como médio entre as temperaturas inicial e final do produto e a entalpia de vaporização da água constante. Assim, a massa de água evaporada necessária para o abaixamento da temperatura do produto pode ser predita pela equação 1.7.

$$\Delta m_w = \bar{C}_p \cdot m_p \frac{(T_f - T_i)}{H_{fg}} \quad (1.7)$$

Dessa forma, o resfriamento de um produto, indicado pela diferença entre sua temperatura inicial e final, é diretamente proporcional a massa de água evaporada do mesmo (ASHRAE, 2002).

A quantidade de água evaporada aceitável no resfriamento a vácuo de hortaliças folhosas representa entre 1 a 4 % da sua massa. Tais quantidades, segundo HAAS & GUR (1986) vão depender da temperatura final e inicial do produto, sendo que a cada 5,5 a 6 °C de resfriamento, tem-se aproximadamente 1 % da perda de massa para hortaliças folhosas. Estes valores também foram encontrados por OGAWA (1978), VANDIEVOET & FOURNIER (1983), GEESON (1988-1989) e THOMPSON *et al.* (1998). Para BARLETT (1980), a cada 10 °C de resfriamento, 1,8 % da massa do produto é perdida. Em peitos de frango, segundo MONCRIEFF *et al.* (1990), as perdas são da ordem de 1,2 % de massa para cada 7 °C. Na Figura 1.2, é mostrada uma relação da perda de massa do produto pelo abaixamento da temperatura.

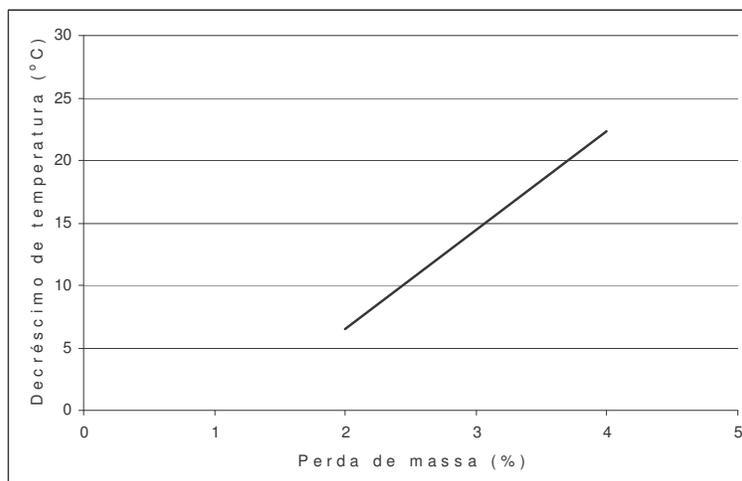


Figura 1.2 - Perda de massa de hortaliças folhosas em função do decréscimo de temperatura (VANDIEVOET & FOURNIER, 1983).

Assim, segundo VANDIEVOET & FOURNIER (1983), um resfriamento rápido a vácuo aplicado em uma hortaliça folhosa que se resfria de 20 °C até 2 °C (decréscimo de 18 °C), ocasionará uma perda de massa de 3,5 %.

ATKEY *et al* (1987) aplicaram o resfriamento a vácuo em cogumelos e não encontraram diferenças significativas, quanto à perda de água e na qualidade destes, quando comparados com os resfriados convencionalmente em resfriadores por ar forçado.

HAAS & GUR (1986) e ARTES & MARTÍNEZ (1996) relatam que o efeito da refrigeração a vácuo não foi significativo na perda de massa e turgor de alfaces. MALPAS (1972) cita que a perda de aproximadamente 3 % da água para hortaliças folhosas não causa perda de turgor ou qualquer outro tipo de dano característico a sua qualidade comercial.

BARTLETT (1980) explica que a perda de água pelo resfriamento a vácuo resulta de uma perda uniforme, e esta é muito menos notável que uma perda de massa similar em, por exemplo, folhas externas de uma alface refrigerada por ar forçado.

Uma forma de reduzir a perda de massa durante o resfriamento a vácuo é umedecer os produtos antes de colocá-los dentro da câmara (SHAW & KUO, 1987). O umedecimento

do produto resulta, algumas vezes, em um resfriamento mais rápido, mas sua principal vantagem é o de minimizar a perda de massa (CORTEZ & LEAL, 1997). Quando aplicado a flores do tipo narciso, resultou em uma diminuição da perda de massa de 2,5-3 % para 1,5 % (SUN & BROSANAN, 1999).

McDONALD & SUN (2000) indicam a aspersão de água sobre frutas e hortaliças antes do resfriamento a vácuo, a fim de diminuir a perda de massa e aumentar a taxa de resfriamento.

MALPAS (1972) aconselha a aspersão de água para umidificação do produto, e esta deve ser feita de forma uniforme em sua superfície, de maneira que, durante o resfriamento não haja locais preferenciais de evaporação, a fim de que não ocorram manchas localizadas causadas pela redução excessiva da temperatura.

### **1.2.3. Transferência de Massa no Resfriamento a Vácuo**

Diversos estudos sobre o resfriamento a vácuo têm buscado uma modelagem matemática que possa prever as temperaturas dos produtos e os tempos de processo. HOUSKA *et al.* (1996) desenvolveram um modelo para o resfriamento a vácuo de produtos líquidos. SUN & WANG (2002a) desenvolveram um modelo para avaliar a performance de um resfriador a vácuo, predizendo a redução da pressão dentro da câmara. SUN & WANG (2002b) desenvolveram um modelo baseado no método dos elementos finitos para a transferência de massa e calor no resfriamento a vácuo de carnes cozidas. SUN & HU (2001) fizeram simulações numéricas para prever a transferência de massa e calor de alimentos porosos e validaram os dados com o resfriamento a vácuo de cortes de carnes cozidas.

Na simulação e na predição das temperaturas de um alimento submetido ao resfriamento a vácuo é importante o conhecimento do coeficiente de transferência de massa. LANDFELD *et al.* (2002) e HUBER (2004) estimaram o produto do coeficiente de transferência de massa pela superfície de evaporação de alguns alimentos sólidos e correlacionaram com o volume desses alimentos.

HOUSKA *et al.* (1996) empregaram um modelo apresentado na equação 1.8 para prever a temperatura de alimentos líquidos. Segundo LANDFELD *et al.* (2002), o mesmo modelo pode ser empregado para alimentos sólidos.

$$\frac{dm}{dt} = kS(P - P_{sat}) \quad (1.8)$$

A evaporação da água do alimento durante o resfriamento a vácuo ocorre em sua superfície e nos poros internos. Segundo McDONALD & SUN (2000), a porosidade dos alimentos influencia diretamente as taxas de resfriamento em processos a vácuo; segundo os autores, ocorre um aumento de porosidade durante o resfriamento a vácuo. A porosidade de alimentos dificulta a aplicação da equação 1.8, pois a área de evaporação não pode ser determinada diretamente, assim, busca-se correlacionar a área de evaporação com volume das amostras como feito por LANDFELD *et al.* (2002) e HUBER (2004).

#### 1.2.4. Adsorção

A adsorção é um fenômeno físico definido como sendo a capacidade de uma substância de se ligar a uma superfície. O processo de atração e retenção de átomos ou moléculas de um gás (adsorvato) na superfície de uma substância sólida (adsorvente) é conhecido como adsorção física. A adsorção física é explicada pelas forças das moléculas ou átomos de um sólido que, quando desbalanceadas, possuem a capacidade de atrair partículas para sua superfície. As forças envolvidas na adsorção física podem ser tanto forças de Van der Waals (dispersão e repulsão) quanto interações eletrostáticas (DUBININ, 1967).

Pode-se classificar o mecanismo de adsorção em:

- Adsorção camada por camada;
- Condensação por capilaridade;
- Preenchimento de volume de microporos;

Os tipos de mecanismo de adsorção irão determinar os aspectos teóricos de abordagem e equacionamento do fenômeno. Para o caso de preenchimento de volume de microporos (diâmetro dos poros menor que 4nm, segundo classificação da IUPAC), a equação de Dubinin-Radushkevich (equação 1.9) e, outra mais geral, Dubinin-Astakhov (equação 1.10) citadas por OLIVEIRA (2001), SILVEIRA JR. (1990), BARBOSA (1993) e VODIANITSKAIA (1984), se baseiam em assumir que o microporo é preenchido durante o processo de adsorção e considera o máximo volume por unidade de massa de adsorvente,  $W_0$ , ocupado pelo adsorvato.

$$W = W_0 \exp \left\{ -B \left[ \frac{T}{\beta} \ln \left( \frac{P_{sat}}{P} \right) \right]^2 \right\} \quad (1.9)$$

$$W = W_0 \exp \left\{ -D \left[ T \cdot \ln \left( \frac{P_{sat}}{P} \right) \right]^n \right\} \quad (1.10)$$

Um outro modelo conhecido como equação de Freundlich, equação. 1.11, ou a “clássica” equação da isoterma de adsorção (SAHA *et al.*,1995) é muito usada para descrever as propriedades de equilíbrio do par sílica-gel/água. A equação de Freundlich é simples e, apesar disso, apresenta boa correlação com dados experimentais para esse par (CHO & KIM, 1992 ; CHIHARA & SUZUKI, 1983).

$$q = q^\infty \left( \frac{P}{P_{sat}} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (1.11)$$

A quantidade de vapor adsorvida por uma amostra de sólido microporoso é proporcional à massa da amostra e depende da temperatura e pressão do leito, além da natureza do sólido (adsorvente) e do vapor (adsorvato). Portanto, a escolha de um adsorvente dependerá do vapor que se quer adsorver, e também, da capacidade de retenção do adsorvente (relação de adsorvato por adsorvente,  $\text{kg kg}^{-1}$ ).

O processo de adsorção ocorre até que seja atingido o equilíbrio entre a pressão de vapor do adsorvato e a pressão da fase adsorvida. Alterando-se o estado de equilíbrio (por meio de um aumento de temperatura ou de uma redução de pressão) ocorre o processo inverso, denominado dessorção, reativação ou regeneração. Em geral, esse ciclo de adsorção-dessorção pode ser repetido inúmeras vezes sem alteração significativa das propriedades físico-químicas do adsorvente.

A adsorção de vapor de água pode ser feita por sólidos microporosos tais como zeólitas sintéticas, carvões ativados, sílica-gel, entre outros. Alguns aspectos como toxicidade, temperatura de regeneração, custo e, principalmente, capacidade adsortiva (relação de adsorvato por adsorvente,  $\text{kg kg}^{-1}$ ), devem ser considerados para a seleção do par adsorvente/adsorvato. O conhecimento do comportamento do par nas diversas condições de temperatura, pressão e relação das massas é essencial no projeto de um leito adsortivo.

Em virtude do grande consumo de energia elétrica pelo sistema de refrigeração, utilizado na desumidificação (por condensação) da mistura gasosa bombeada (ar e vapor de água), durante o processo de resfriamento a vácuo, a proposta de utilização do leito adsortivo pode ser uma boa alternativa em termos de custos. O leito adsortivo funcionaria como “banco de vácuo” para que vapores de água oriundos do produto sejam adsorvidos na linha de sucção, sendo que para a regeneração do leito, pode-se utilizar qualquer meio que forneça energia térmica. O processo pode ser explicado da seguinte maneira: as bombas de vácuo diminuiram a pressão da câmara até a pressão se igualar à pressão de vapor da água nos produtos, a partir desse ponto o leito seria conectado e as bombas desligadas; o “banco de vácuo” teria a função de adsorver os vapores de água e continuar a baixar a pressão da câmara até a pressão desejada.

#### **1.2.4.1. Sílica gel/água**

A sílica-gel é um sólido altamente poroso produzido a partir de ácido sulfúrico e silicato de sódio. É constituído de partículas que podem variar de 2-20 nm de tamanho. Cada  $1 \text{ m}^3$  de sílica-gel contém poros que somados possuem uma área superficial com cerca

de  $2.8 \times 10^7 \text{ m}^2$  (SAHA *et al.*, 2000); exibe uma grande capacidade de adsorver vapor de água, cerca de 35 a 40 % de sua massa seca, além de apresentar baixas temperaturas de regeneração (NG *et al.*, 2001 e TAHAT, 2001). Segundo TAHAT (2001) a sílica-gel é segura, não corrosiva, barata, abundante e tem sido largamente usada porque possui grande capacidade de adsorção e estabilidade química.

A sílica-gel adsorve vapor de água até seus poros estarem preenchidos na condição de pressão de vapor do líquido adsorvido nos poros, a uma dada temperatura, se equiparar com a pressão de vapor, na mesma temperatura, das vizinhanças. A natureza adsortiva da sílica –gel para vapores é um efeito físico; as partículas não mudam de tamanho nem de forma quando saturadas (SAHA *et al.*, 1995).

### 1.3. Materiais e Métodos

#### 1.3.1. Montagem Experimental para Caracterização da Sílica-gel

Na Figura 1.3 está ilustrada a montagem experimental realizada para os ensaios de caracterização da sílica-gel. A montagem é constituída por uma célula encamisada em aço inox, contendo flanges de vácuo e anéis de vedação, bomba de vácuo, banho termostático com circulação de óleo térmico para manter a temperatura da sílica constante, garrafa graduada contendo água destilada, 4 sensores de temperatura do tipo Pt100 ao longo da célula, dois sensores de pressão para vácuo além de válvulas esfera e conexões para vácuo.

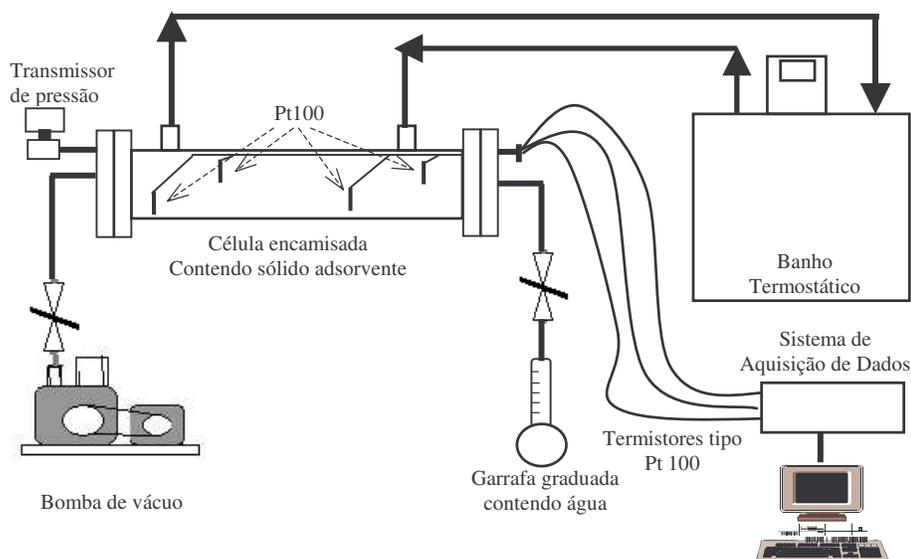


Figura 1.3 - Montagem experimental para caracterização do par sílica-gel/água

Para a aquisição dos dados de temperatura e pressão foi utilizado um sistema de aquisição de dados modelo HP3852A da Hewlett Packard e um microcomputador remoto, que através de um programa na linguagem HPBASIC aquisitou as medidas de temperatura e converteu os sinais dos dois transmissores em unidades de pressão durante os ensaios.

#### 1.3.2. Metodologia para a Caracterização da Sílica-gel

Para que se possam calcular as quantidades necessárias de sílica-gel e suas condições como leito adsorativo no processo, deve-se fazer sua caracterização, pela construção de isósteras (condições de equilíbrio em temperatura e pressão com mesma

relação de adsorvato por adsorvente,  $\text{kg kg}^{-1}$ ) do par sílica-gel/água. Para isso, ensaios experimentais foram feitos a fim de ajustar um modelo matemático que pudesse representar as diferentes isósteras sob diversas condições de pressão e temperatura.

Um modelo proposto é a equação de Dubinin-Astakhov (equação 1.10), que de acordo com OLIVEIRA (2001), pode-se, através de simples divisão pela densidade do adsorvato chegar na equação (1.12), e posterior linearização na equação (1.13):

$$K = K_0 \left\{ \exp - D \left[ T \cdot \text{Ln} \left( \frac{P_{sat}}{P} \right) \right]^n \right\} \quad (1.12)$$

Ou em sua forma linear:

$$\text{Ln}(K) = \text{Ln}(K_0) - D \left[ T \cdot \text{Ln} \left( \frac{P_{sat}}{P} \right) \right]^n \quad (1.13)$$

Variando-se a temperatura e pressão na equação 1.12, foram estimados os parâmetros  $X_0$ ,  $D$  e  $n$  através dos dados experimentais obtidos nos experimentos e ajustados, segundo um método de ajuste de curva. Após, foram construídas diversas isósteras do par sílica-gel/água.

De maneira similar, outro modelo proposto é a equação de Freundlich (equação 1.11), que foi linearizada (equação 1.14) e, da mesma forma que a equação 1.13, variando-se a temperatura e pressão foram estimados os valores de  $q^\infty$  e  $n$  e construídas as isósteras do par.

$$\text{Log}(q) = \text{Log}(q^\infty) + \frac{1}{n} \text{Log} \left( \frac{P}{P_{sat}} \right) \quad (1.14)$$

A Figura 1.4 apresenta um exemplo de isósteras obtidas para o par em questão.

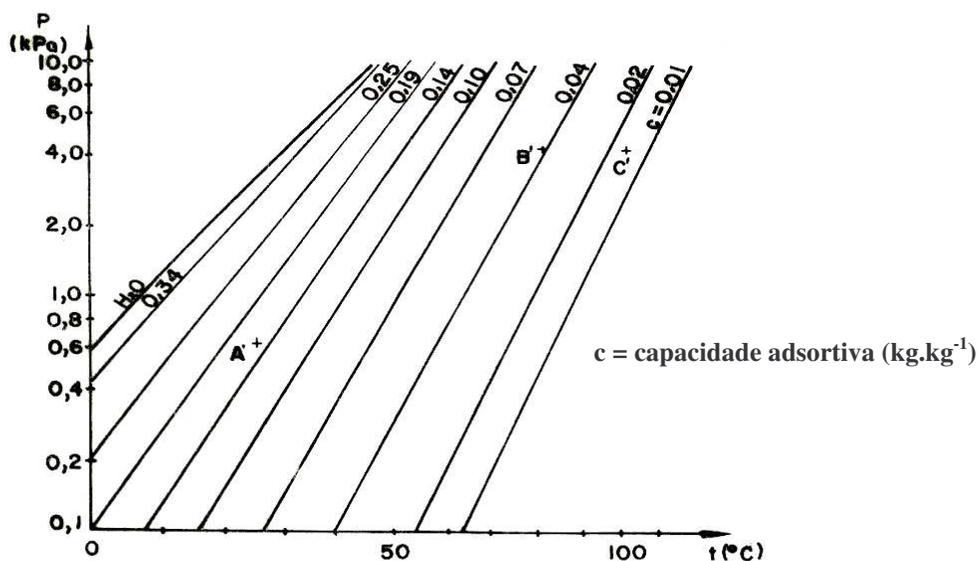


Figura 1.4 - Conjunto de isósteras do par gel de sílica-água. (VODIANITSKAIA, 1984).

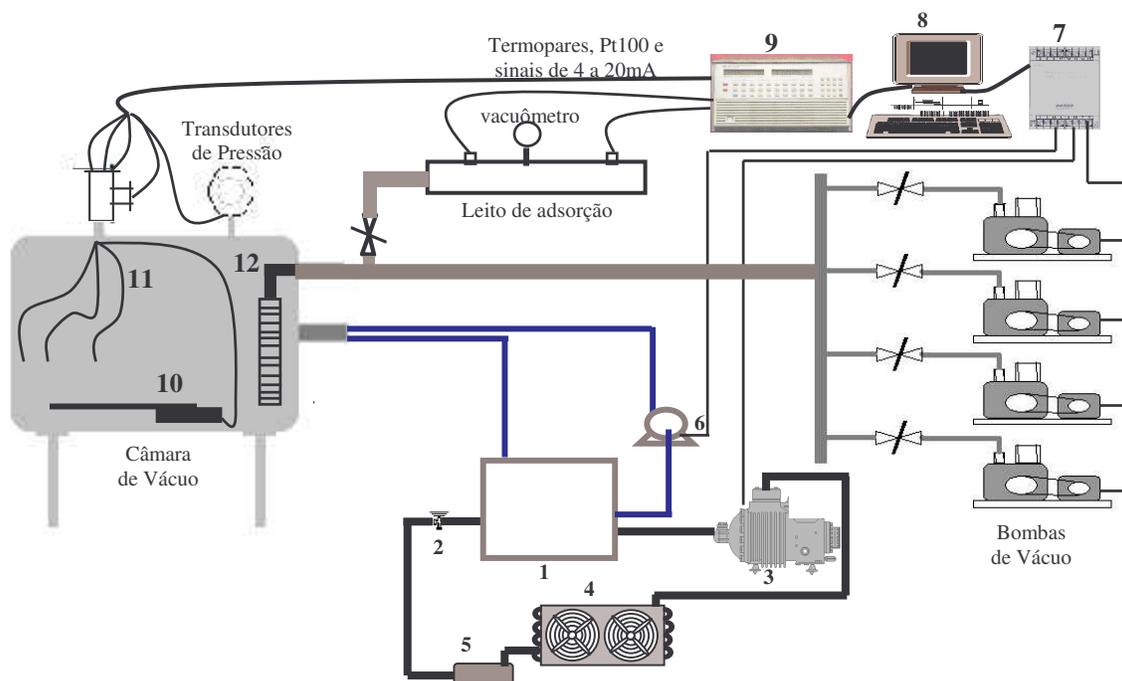
Para a obtenção dos dados experimentais, a sílica-gel foi colocada dentro da célula encamisada juntamente com os sensores de temperaturas e demais conexões. Primeiramente foi realizada a dessorção da sílica-gel através de aquecimento com óleo térmico (125 °C) aquecido no banho termostático e circulado na camisa da célula. Nessa etapa, uma válvula esfera conectada a célula encamisada foi mantida aberta até a temperatura do leito atingir 120 °C e, logo após, as bombas de vácuo foram acionadas para a retirada dos vapores formados; o sistema permaneceu assim por 24 horas (120 °C sob pressões menores que 0,013 kPa).

Após a etapa de dessorção, e posterior resfriamento do leito, a válvula conectada na garrafa contendo água destilada foi aberta e permaneceu assim até uma quantidade fixa de água ter sido adsorvida pelo leito de sílica-gel; dessa forma tem-se uma condição de kg de água adsorvida por kg de leito seco. Foram feitas sete aberturas de válvula, conseqüentemente, sete condições de kg de água por kg de sílica-gel foram definidas. Para cada uma das sete quantidades de água adsorvidas no leito de sílica-gel apresentadas foi variada a temperatura e medida a pressão correspondente no leito. Dessa forma, foi possível traçar os pontos do binômio pressão e temperatura em cada condição de água adsorvida e, assim, ajustar os pontos aos modelos propostos. Ao final da última quantidade a válvula da garrafa permaneceu aberta até que o leito de sílica-gel fosse saturado. Dessa forma, também

foi variada a temperatura e medida a pressão correspondente. Ao final dos experimentos a sílica-gel saturada foi imediatamente pesada; com o valor da massa e com a quantidade de água adsorvida conhecida pode-se calcular, por diferença, a quantidade sílica-gel seca contida inicialmente no leito, além da máxima capacidade de adsorção da sílica-gel

### 1.3.3. Montagem do Sistema de Resfriamento a Vácuo

A montagem experimental simplificada do sistema de resfriamento a vácuo é apresentada na Figura 1.5:



- |                                    |                                |
|------------------------------------|--------------------------------|
| 1 – Reservatório de etileno-glicol | 7 – Transdutor de potência     |
| 2 – Válvula de expansão            | 8 – Microcomputador            |
| 3 – Compressor                     | 9 – Aquisição de dados HP3852A |
| 4 – Condensador                    | 10 – Célula de carga           |
| 5 – Filtro                         | 11 – Termopares                |
| 6 – Bomba centrífuga               | 12 – Trocador de calor         |

Figura 1.5 - Esquema simplificado da montagem experimental.

#### 1.3.3.1. Câmara

A câmara utilizada é feita em chapa de aço doce e recoberta internamente com aço inoxidável AISI 304. Possui formato de paralelepípedo com os vértices arredondados,

volume interno de  $0,324 \text{ m}^3$ , com dimensões internas de 0,6 m de largura e altura e 0,9 m de comprimento. Seu fechamento é central por meio de volante montado sobre rolamentos, sendo a tampa e as dobradiças revestidas de aço inoxidável AISI 304. Possui quatro diferentes pontos de comunicação com o lado externo através de flanges soldadas, duas NW10, uma NW25 e outra NW40. Foi soldada uma conexão de vácuo NW40 internamente à câmara de vácuo com a finalidade de instalar um trocador de calor para a condensação do vapor de água, impedindo que esse vapor atinja as bombas de vácuo. A escolha da instalação do trocador de calor para a condensação do vapor de água na parte interna da câmara foi uma opção para que o protótipo se assemelhe aos sistemas encontrados em literatura, justificados pela simplicidade e baixo custo. A figura 1.6 apresenta detalhes.



Figura 1.6 - (a) Detalhe do flange soldado para o trocador. (b) Trocador instalado dentro da câmara.

Também foi feita uma adaptação, através de soldas, de um flange de vácuo NW25 para a passagem da tubulação de cobre de entrada e saída do fluido secundário (etileno-glicol 30 % em massa) que alimenta o trocador de calor, conforme detalhe na Figura 1.7.



Figura 1.7 - Entrada e saída do etileno-glicol de dentro da câmara de vácuo.

### 1.3.3.2. Trocador de Calor para Condensação do Vapor de Água

O trocador de calor escolhido, Figura 1.8, foi do tipo aletado de dimensões de 355x365x75 mm, encontrado em sistemas de refrigeração com condensação a ar. Foi trabalhado de forma que a mistura ar/vapor de água passasse ao longo de sua maior dimensão, como é visto na Figura 1.8(b). Para isso, chapas de acrílico foram coladas nos dois lados de maior dimensão do trocador, forçando assim, a mistura de ar/vapor de água ao longo do maior caminho entre os tubos e aletas do trocador. Dessa forma, foi feita uma armação em torno do trocador onde, em uma ponta era livre para entrada da mistura gasosa e, na outra, um flange de vácuo NW40.

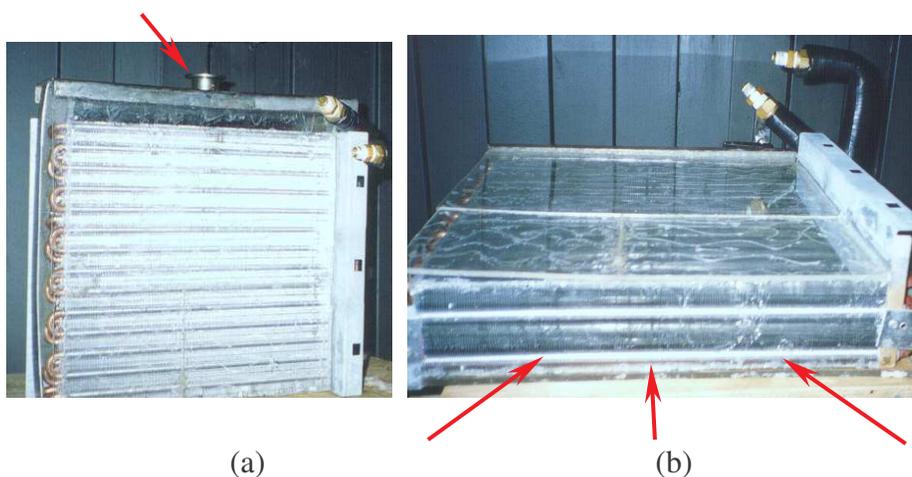


Figura 1.8 - (a) Trocador de calor com saída do ar na parte de cima; (b) Detalhe por onde a mistura ar/vapor entrará.

### 1.3.3.3. Linha de vácuo

Na linha de vácuo foi instalada uma válvula solenóide tipo “agulha” normalmente fechada. Essa válvula se fez necessária para que a pressão interna da câmara não atingisse pressão absoluta inferior a 0,6 kPa (4,5 mmHg) que é a pressão correspondente à temperatura de evaporação da água a 0 °C. Para os ensaios com produtos não se pode abaixar aquém dessa pressão, pois os produtos dentro da câmara poderiam ser congelados. A válvula é acionada, via software de aquisição de dados, conforme a pressão medida pelo sensor de pressão. A Figura 1.9 mostra a instalação da válvula solenóide.



Figura 1.9 - Instalação da válvula solenóide.

#### **1.3.3.4. Instrumentação do Sistema**

O sistema, esquematizado na Figura 1.5, foi instrumentado em temperatura, pressão, massa do produto e potência consumida, e os experimentos monitorados através de um sistema de aquisição de dados.

O sistema de aquisição de dados é composto pela aquisição HP3852A da Hewlett Packard e microcomputador remoto. A aquisição comunica-se com o microcomputador através uma linguagem de programação HPBASIC, e um programa nessa linguagem foi desenvolvido para as aquisições. Com ele pôde-se adquirir em tempo real os dados de temperaturas já corrigidas por suas curvas de calibração (termopares e Pt100), converter as leituras dos sinais dos transmissores de pressão em unidades de pressão (kPa), atuação de um relê para a abertura e fechamento da válvula solenóide de controle de pressão na câmara, converter os sinais do transmissor e indicador da célula de carga para unidades de massa (kg) e conversão do sinal do transdutor de potência para unidade de potência (W). Todos os dados puderam ser monitorados com uma frequência estipulada (0,1 Hz) e gravado em formato “.txt”, para serem, posteriormente, trabalhados em planilhas.

Foram colocados dois transmissores de pressão, sinais de saída de 4 a 20 mA, na câmara para a realização dos ensaios preliminares. Um deles, da marca Smar, calibrado para medir pressões absolutas de 0,5 kPa (3,76 mmHg) a 5 kPa (37,63mmHg) e o outro, da marca Zurich, para medir desde a pressão ambiente local até um diferencial de vácuo de 99,97 kPa (750 mmHg). Com o transmissor da Zurich, foi medida a pressão desde o início do processo até as pressões finais alcançadas. Porém, para as medidas em baixas pressões a

precisão desse transmissor não é suficiente, 0,25 kPa (1,88 mmHg). Assim, o transmissor da Smar foi utilizado nas medidas de pressão abaixo de 5 kPa (37,63 mmHg), pois apresenta uma maior precisão,  $9 \times 10^{-3}$  kPa (0,07 mmHg). Essa precisão é necessária para controlar a pressão interna da câmara não permitindo que abaixe mais que 0,6 kPa (4,5 mmHg) de pressão absoluta, limite para trabalho com produtos folhosos. A instalação desses sensores é apresentada na Figura 1.10.

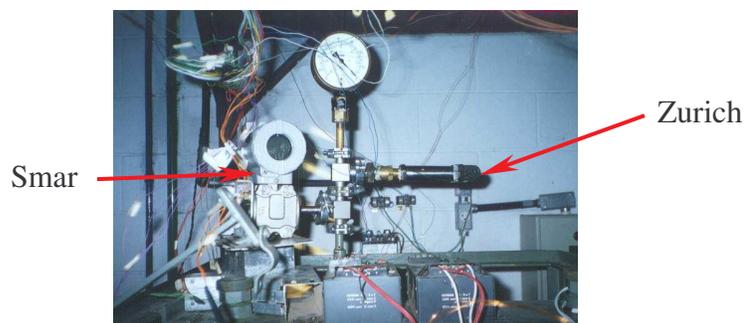


Figura 1.10 - Transmissores de pressão de vácuo instalados na câmara de vácuo.

Sensores de temperatura foram instalados internamente à câmara através de conexões próprias para vácuo de maneira a não apresentarem vazamentos para a câmara. São quatro termopares AGW20 do tipo “T” e um Pt100 os quais foram calibrados (curvas no Anexo II). Detalhes da instalação na Figura 1.11.

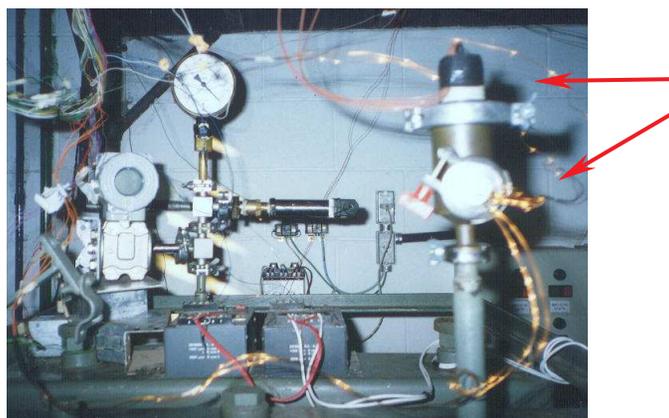


Figura 1.11 - Sensores de temperatura destacados (setas) na foto.

Uma célula de carga da marca Alfa Instrumentos Ltda. Modelo GL-5, com escala de 0 a 5 kg e precisão de 1 g, foi instalada dentro da câmara para a monitoração das massas durante os experimentos (Figura 1.12). A passagem dos fios da célula de carga para fora da câmara foi feita através dos mesmos flanges utilizados para os sensores de temperatura. A

célula de carga é ligada a um indicador e transmissor de massa com um sinal de saída de 4 a 20 mA.

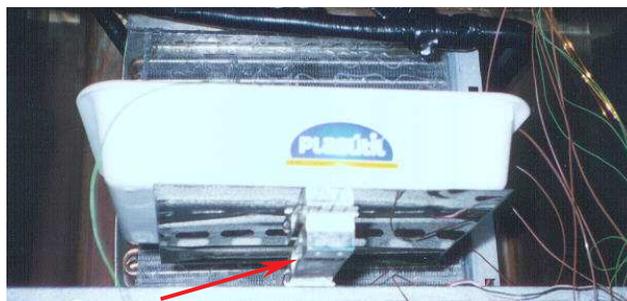


Figura 1.12 - Célula de carga com uma bandeja.

A potência foi monitorada através de um transdutor de potência com escala de 0 a 1000 W ligado a um transformador de corrente (TC) de 0 a 50 A para 0 a 5 A, com sinal de saída de 4 a 20 mA, instalado em uma linha elétrica que alimenta as bombas de vácuo e o sistema de desumidificação por condensação.

### 1.3.4. Sistemas de Desumidificação

A eliminação da linha de bombeamento do vapor de água originário da câmara foi feita por duas maneiras distintas:

- Sistema de desumidificação por condensação: refrigeração auxiliar com refrigerante secundário;
- Sistema de desumidificação com um leito de adsorção;

#### 1.3.4.1. Sistema de desumidificação por condensação

Para a condensação do vapor de água originário dos produtos foi utilizado um sistema de refrigeração para resfriamento de um fluido secundário. O sistema possui uma bomba, com vazão de  $3,9 \text{ L min}^{-1}$ , que circula uma solução de etileno-glicol estocada em um reservatório até um trocador de calor instalado dentro da câmara de vácuo. O reservatório é isolado e encamisado, dentro do qual, o refrigerante primário (R12) evapora. O sistema é composto de uma unidade condensadora a ar para baixa temperatura e capacidade de  $925 \text{ kcal h}^{-1}$  com temperatura de evaporação de  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ . A Figura 1.13 apresenta o sistema.

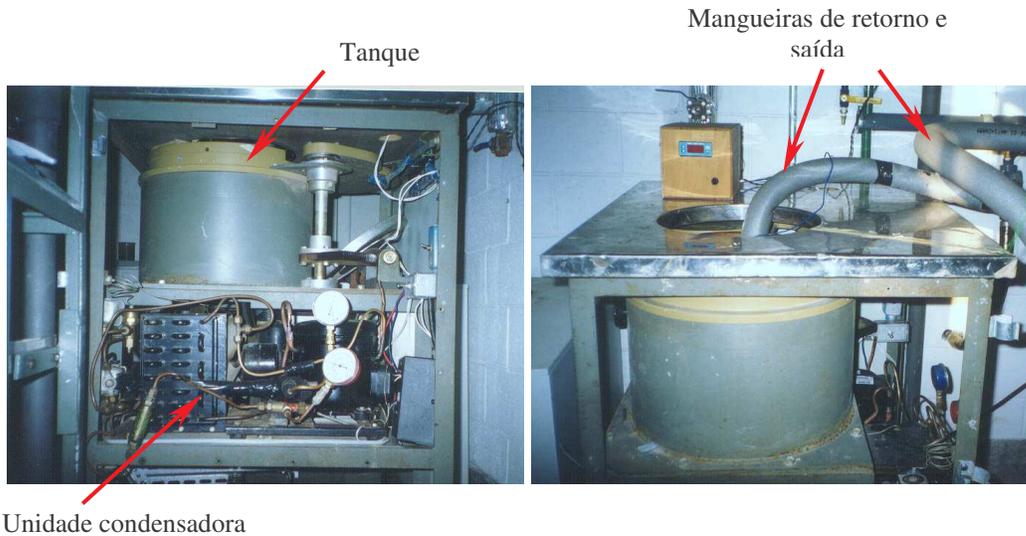


Figura 1.13 - Sistema adaptado para o resfriamento da solução de etileno-glicol.

Com o objetivo de controlar a temperatura da solução, foi instalado um controlador da empresa Full Gauge Controls do tipo “TC900 clock”, onde foi configurado o “set point” do sistema em  $-5,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Essa temperatura é lida no retorno da solução, isto é, após a solução ter passado pelo trocador dentro da câmara de vácuo. Dessa forma o compressor é ligado ou desligado, conforme a demanda térmica necessária. Além disso, três outros sensores de temperatura do tipo Pt100 foram calibrados (curvas no Anexo II) e colocados nesse sistema, um dentro do reservatório, um na saída do reservatório e outro no retorno ao reservatório, conforme apresentado na Figura 1.14.

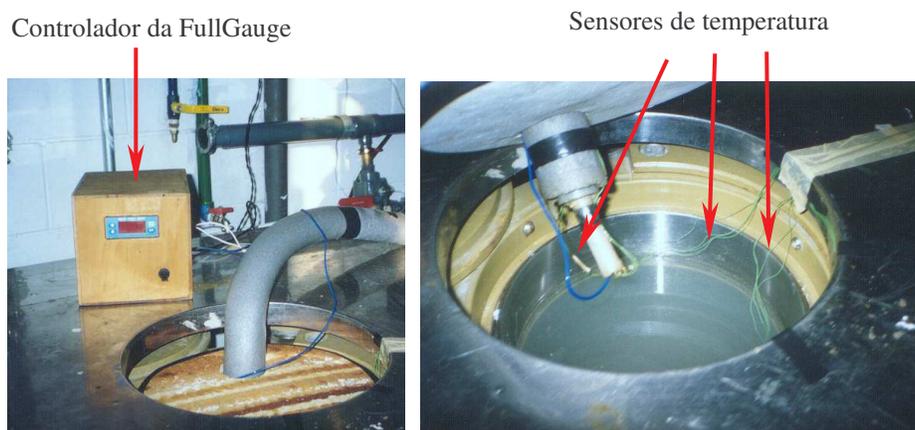


Figura 1.14 - Detalhes do controlador da FullGauge e dos sensores de temperatura no reservatório.

As tubulações, por onde a solução é bombeada, são mangueiras de 0,0254 m (1”) isoladas até a entrada na câmara, onde se conectam à tubulações de cobre soldadas em flange de vácuo e interligadas ao trocador de calor dentro da câmara.

#### 1.3.4.2. Sistema de desumidificação com leito de adsorção

O sólido microporoso escolhido para realizar a adsorção dos vapores de água provenientes dos produtos foi a sílica-gel. Além de largamente utilizada e encontrada no mercado, tem alta capacidade de adsorção para os vapores de água e temperatura de dessorção relativamente baixa.

Para a realização dos ensaios preliminares com o uso do leito de adsorção foi montado um reservatório cilíndrico com 0,205 m de diâmetro e 0,61 m de comprimento para acondicionar a sílica-gel. Trata-se na verdade de um trocador de calor, com quatro tubos internos de 1”, onde circulou-se um óleo térmico quente para dessorver a sílica antes dos ensaios e água à temperatura ambiente para resfriar em seguida. O reservatório foi soldado em suas partes e possui entrada e saída para os fluidos de aquecimento e resfriamento, além de duas conexões de rosca com um Pt100 cada, a fim de monitorar a temperatura do leito. Também foi soldado um flange de vácuo NW10 para medidas de pressão. Detalhes podem ser vistos na Figura 1.15.

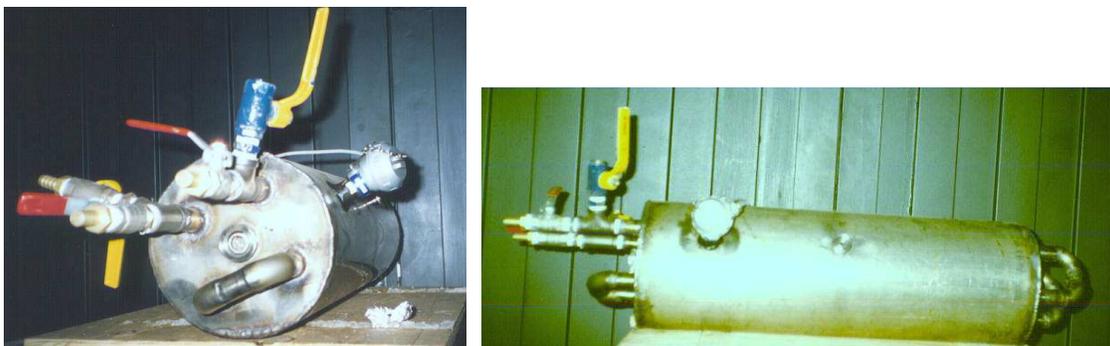


Figura 1.15 - Reservatório para acondicionamento do leito de adsorção (sílica-gel).

O desumidificador por adsorção tem dupla função: de “banco de vácuo”, como bombeamento e de desumidificador. A regeneração do leito adsortivo é feita por aquecimento nos períodos de parada do processo. Após o aquecimento, o compartimento do leito é fechado e, conseqüentemente, sua pressão interna diminui com seu resfriamento.

### 1.3.5. Montagem para Avaliação do Leito de Adsorção no Resfriamento a Vácuo

Na Figura 1.16 está ilustrado o esquema da montagem experimental realizada para os ensaios de avaliação das condições de um leito de sílica-gel para seu uso no resfriamento a vácuo. A montagem é constituída por um leito de adsorção (reservatório em aço inox contendo 14,24 kg de sílica-gel e um volume útil de 0,0177 m<sup>3</sup>), bomba de vácuo, garrafa contendo água destilada isolada termicamente, 4 sensores de temperatura (termopares tipo T) dentro da garrafa, 2 sensores de temperatura (Pt100) dentro do leito de adsorção, um sensor e transmissor de pressão do tipo Pirani (da marca BOC-Edwards), um sensor e transmissor de pressão do tipo célula capacitiva (da marca Smar), duas válvulas esfera, mangueiras e conexões para vácuo. Na Figura 1.17 é apresentada a montagem experimental. Para a aquisição dos dados de temperatura e pressão foi utilizado um sistema de aquisição de dados modelo HP3852A, marca da Hewlett Packard, e um microcomputador remoto, que através de um programa na linguagem HPBASIC aquisitou as medidas de temperatura e converteu os sinais dos dois transmissores em unidades de pressão durante os ensaios.

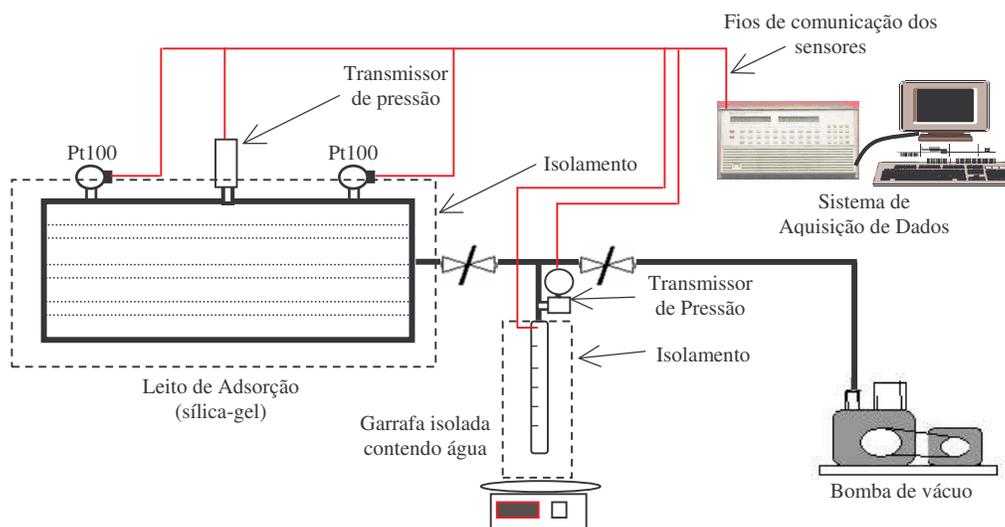


Figura 1.16 - Esquema da montagem experimental para avaliação das condições de operação do leito de adsorção.

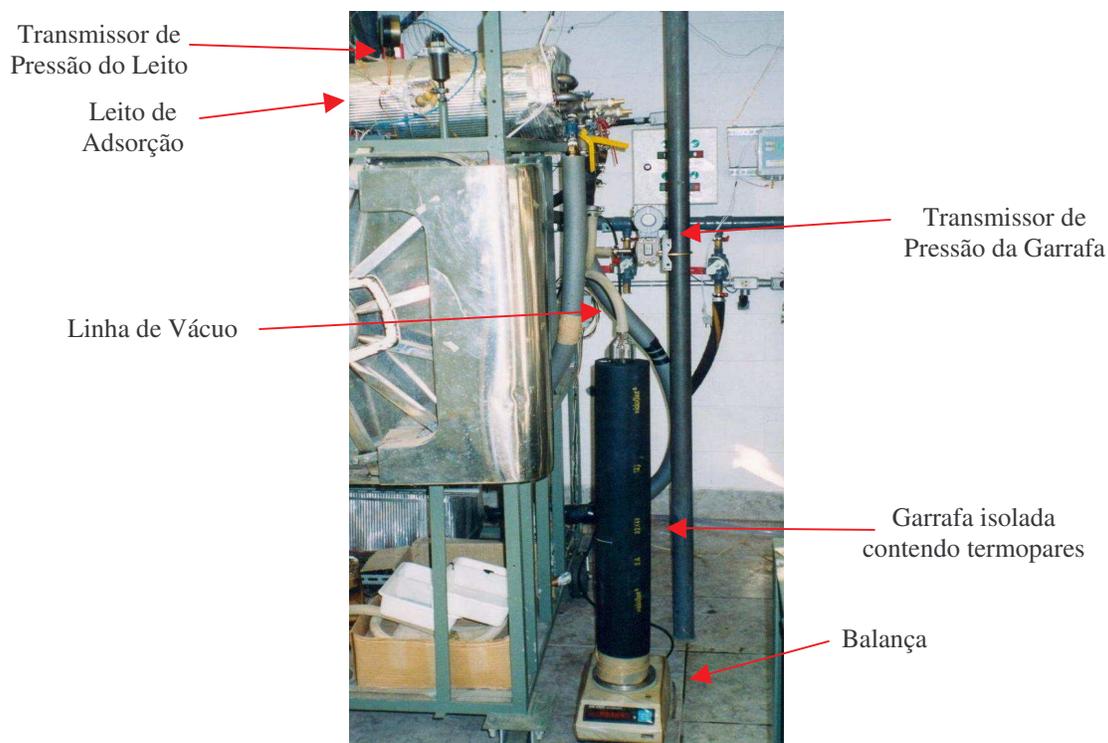


Figura 1.17 - Montagem experimental para checagem das condições de uso do leito de adsorção.

### 1.3.6. Metodologia para Avaliação do Leito de Adsorção no Resfriamento a Vácuo

Com o objetivo de verificar as condições de operação do leito adsorativo na aplicação do leito de adsorção, contendo sílica-gel, no resfriamento a vácuo, foram feitos dois ensaios:

- Leito de adsorção ligado à câmara de vácuo;
- Leito de adsorção ligado à garrafa contendo água;

#### 1.3.6.1. Ensaio com a Câmara de Vácuo

O ensaio utilizando um leito de adsorção e a câmara de vácuo utilizou duas bombas de vácuo ligada em paralelo com uma vazão total de bombeamento de  $22 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ . O produto a ser resfriado foi água com massa de 500 g colocadas em uma bandeja de  $1,94 \times 10^{-2} \text{ m}^2$

dentro da câmara (condições similares ao ensaio 4 do planejamento dos ensaios preliminares descrito, a seguir, no item 1.4.7). Foi monitorada a temperatura da água dentro da bandeja e do leito de adsorção, o consumo energético e pressão interna da câmara e do leito de adsorção. O ensaio consistiu em acionar as bombas de vácuo, abrir a válvula de conexão entre a linha de vácuo e a câmara. Quando a câmara atingiu uma pressão interna igual à pressão de vapor da água na bandeja na temperatura correspondente, essa válvula foi fechada. Imediatamente foi aberta a válvula que comunicava o leito de adsorção com a câmara. O processo continuou assim até seu término.

### **1.3.6.2. Ensaio com a Garrafa**

O segundo ensaio, através da montagem descrita no item 1.3.5, foi feito com uma garrafa de vidro contendo 997 g de água. Foi monitorada a temperatura e massa da água, pressão interna da garrafa e do leito de adsorção. Uma bomba foi acionada e a válvula que conecta a linha de vácuo à garrafa foi aberta; a válvula foi fechada assim que a pressão interna da garrafa atingiu a pressão de vapor da água presente na garrafa a uma determinada temperatura. Dessa forma, tem-se apenas vapor de água e água na garrafa. Assim, foi aberta a válvula que conecta a garrafa ao leito de adsorção e monitoradas as temperaturas e pressões ao longo do tempo.

### **1.3.7. Planejamento dos ensaios preliminares**

Para os ensaios preliminares foram utilizadas bandejas de água com áreas e massas definidas a fim de avaliar o sistema de resfriamento a vácuo.

Os ensaios preliminares com bandejas de água tiveram a duração de 30 minutos para cada experimento. Esse tempo se baseia nos tempos de resfriamento encontrados para alfaces submetidas ao resfriamento a vácuo. As configurações de ensaios e as condições de operação para os ensaios preliminares com bandejas de água que foram modificadas são:

- Taxa de bombeamento (através das associações das bombas em paralelo);
- Área superficial;
- Massa de água.

Em processos multivariáveis, como é o caso deste trabalho, é importante determinar as influências de cada variável do processo e as suas interações, entre si, sobre as respostas de interesse. A maximização deste processo, nas faixas de operação, visa à determinação dos valores ótimos de operação das variáveis independentes com relação às respostas (variáveis dependentes). Dentre os métodos de planejamento experimental, tem-se o planejamento fatorial com a análise de superfície de resposta. Esse planejamento permite a realização de vários experimentos, com alterações simultâneas das variáveis, combinando-as em diferentes condições operacionais passíveis de modificações. As modificações são feitas dentro das faixas pré-selecionadas para a realização de um número de ensaios, estatisticamente suficientes, afim de que os efeitos (individuais e de interações entre as variáveis) sobre as variáveis-resposta em observação sejam avaliados (BARROS NETO *et al.*, 2001)

Neste trabalho foi feito um planejamento experimental fatorial com a finalidade de analisar e quantificar as influências de cada variável para o processo. Foi utilizado o software “Statistica” para a realização do planejamento e suas análises estatísticas.

Para os ensaios preliminares foram usadas como variáveis independentes a área superficial ( $X_1$ ), massa de água ( $X_2$ ) e a taxa nominal de bombeamento ( $X_3$ ) com valores definidos na Tabela 1.2. As diferentes taxas de bombeamento foram conseguidas pela associação em paralelo de diferentes bombas.

**Tabela 1.2. – Variáveis independentes e níveis utilizados no planejamento preliminar.**

Variáveis independentes:	Níveis		
	-1	0	+1
Área Superficial [ $m^2$ ]- $X_1$	1,94E-2	3,05E-2	4,16E-2
Massa de Água [kg] – $X_2$	0,50	0,65	0,80
Taxa de Bombeamento [ $m^3 h^{-1}$ ] – $X_3$	15	22	29

Adotou-se um planejamento fatorial completo de ensaios:  $2^3$  mais 3 pontos centrais. As variáveis-resposta, medidas ao final de 30 minutos foram:

- Perda de massa ( $Y_1$ ): é a quantidade, em massa (kg), da água que foi evaporada durante o processo;
- Temperatura final ( $Y_2$ ): é a medida final de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) da água após o processo;
- Consumo de energia ( $Y_3$ ): é a quantidade, em kWh, de energia elétrica consumida pelas bombas de vácuo e pelo sistema de desumidificação durante o processo.

A Tabela 1.3 apresenta a combinação dos níveis das variáveis independentes em todos os 11 ensaios realizados.

**Tabela 1.3. Planejamento fatorial completo de ensaios de dois níveis.**

Ensaio	Variável Independente			Variável Dependente		
	Área superficial $X_1$ ( $\text{m}^2$ )	Massa de água $X_2$ (kg)	Vazão de bombeamento $X_3$ ( $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ )	Perda de massa $Y_1$ (kg)	Temperatura Final $Y_2$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Consumo de energia $Y_3$ (kWh)
01	+1	+1	+1			
02	-1	+1	+1			
03	+1	-1	+1			
04	-1	-1	+1			
05	+1	+1	-1			
06	-1	+1	-1			
07	+1	-1	-1			
08	-1	-1	-1			
09	0	0	0			
10	0	0	0			
11	0	0	0			

Após a realização de todos os ensaios, foram obtidas funções objetivo e analisadas através de Análises de Variância (ANOVA) e do testes F.

## 1.4. Resultados e Discussões

### 1.4.1. Caracterização da Sílica-gel

As quantidades de água que foram adsorvidas pela sílica-gel em cada abertura de válvula são apresentadas na Tabela 1.4.

**Tabela 1.4. – Quantidade de água adsorvida pela sílica-gel em cada abertura de válvula.**

	Abertura de válvula						
	1	2	3	4	5	6	7
Volume de água adsorvido (mL)	30,14	58,91	108,9	208,9	408,9	722,1	932,6
Massa de água adsorvida (kg)	0,030	0,059	0,109	0,208	0,407	0,720	0,930

Na Tabela 1.5 são apresentados os resultados experimentais da máxima capacidade de adsorção da sílica-gel e da quantidade de sílica-gel seca.

**Tabela 1.5. – Quantidade de sílica-gel seca e capacidade máxima de adsorção.**

Massa da sílica-gel saturada (kg)	Massa de água adsorvida (kg)	Massa inicial de sílica-gel seca (kg)	Capacidade máxima de adsorção em massa(%)
5,817	1,363	4,454	30,6

Dessa forma, foram calculadas as condições (kg de água  $\text{kg}^{-1}$  de sílica-gel) de cada isóstera pela simples divisão da quantidade adsorvida (kg) pela quantidade de sílica-gel seca (4,454 kg). A Tabela 1.6 apresenta os dados.

**Tabela 1.6. – Relação  $\text{kg kg}^{-1}$  de cada isóstera.**

Isóstera	Massa de água adsorvida (kg)	Relação (kg água $\text{kg}^{-1}$ sílica-gel)
1	0,030	0,007
2	0,059	0,013
3	0,109	0,024
4	0,208	0,047
5	0,407	0,092
6	0,720	0,162
7	0,930	0,209

Quando os dados experimentais de foram plotados, Figura 1.18, percebeu-se um desvio nos dados tanto para as temperaturas mais altas quanto para as temperaturas mais

baixas. Esse comportamento só foi percebido, pois na saturação do leito os dados de pressão versus temperatura, devem seguir o mesmo comportamento da água pura saturada, dada pela Equação de Wagner.

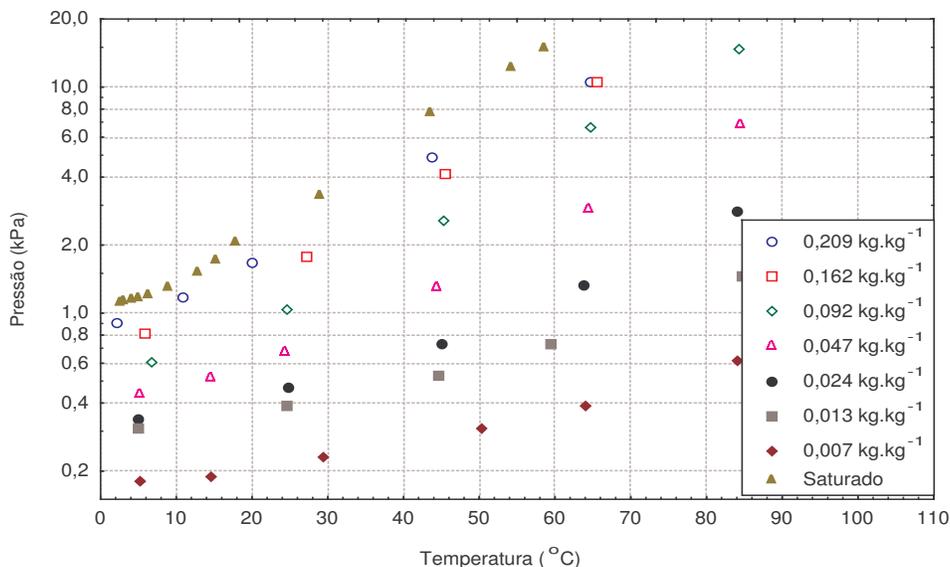


Figura 1.18 - Dados experimentais (temperatura e pressão) do par sílica-gel/água.

Quando foram plotados esses dados com a curva de saturação da água, dada pela equação de Wagner (equação 1.15), em diversas temperaturas, os desvios ficaram claros, Figura 1.19.

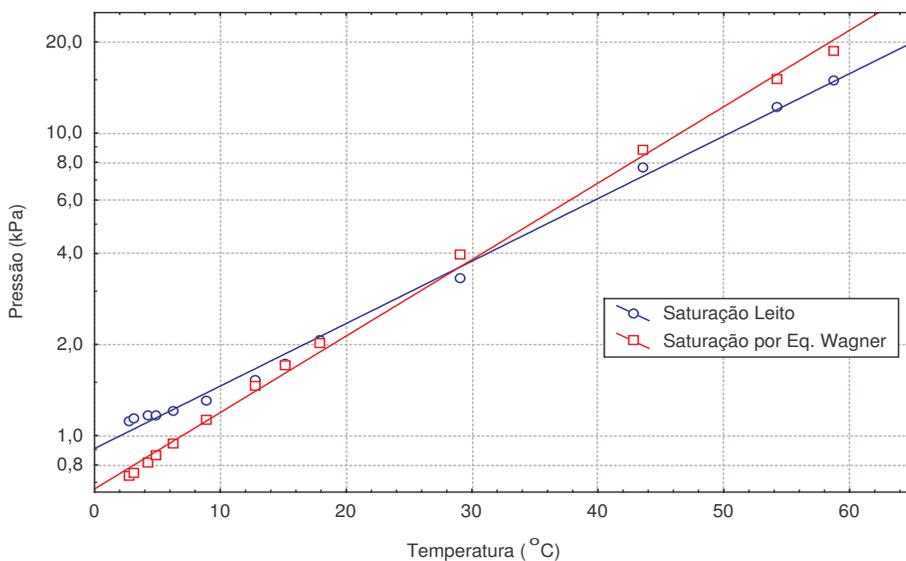


Figura 1.19 - Comparação entre os dados experimentais da saturação da água no leito e a saturação dada pela Equação de Wagner.

A Equação de Wagner para a saturação d água é apresentada a seguir:

$$\ln\left(\frac{P}{P_c}\right) = \frac{T_c}{T} \left[ -7,765 \cdot \left(1 - \frac{T}{T_c}\right) + 1,458 \cdot \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{1,5} - 2,776 \cdot \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^3 - 1,233 \cdot \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^6 \right] \quad (1.15)$$

A explicação para esses desvios está no fato dos sensores de pressão não estarem com seus elementos de medição (no caso, uma célula capacitiva) diretamente em contato com o leito, tendo entre esses elementos e o leito um espaço, ainda que pequeno, mas sensível à temperatura ambiente. Dessa forma, a temperatura nesses volumes, influenciada pelo ambiente, ocasionou um desvio nos dados de pressão medidos ao longo das isósteras (Figura 1.19) exceto aqueles pontos próximos da temperatura ambiente.

Assim, a solução encontrada para contornar esse problema foi a de utilizar apenas os pontos com temperatura próxima a ambiente no ajuste dos modelos (7 pontos). A partir das equações 1.13 e 1.14, apresentadas no item 1.3.2, e dos dados das sete isósteras foi utilizado o software Statistica 5.0 para estimar os parâmetros  $K_0$ ,  $D$  e  $n$  (equação 1.13) e os  $q^\infty$  e  $n$  (equação 1.14). A Tabela 1.7 apresenta os parâmetros estimados da equação Dubinin-Astakhov linearizada e a Tabela 1.8 os parâmetros da equação de Freundlich linearizada.

**Tabela 1.7. – Parâmetros do modelo de Dubinin-Astakhov.**

Modelo	Parâmetros		
	$K_0$	$D$	$n$
Dubinin-Astakhov	0,301	2,26E-2	1,08

**Tabela 1.8. – Parâmetros do modelo de Freundlich.**

Modelo	Parâmetros	
	$q^\infty$	$n$
Freundlich	0,355	0,79

O modelo de Dubinin-Astakhov ajustou bem aos dados apresentando uma variância explicada de 99,1 % ( $R^2 = 0,991$ ). A Figura 1.20 apresenta a linearização.

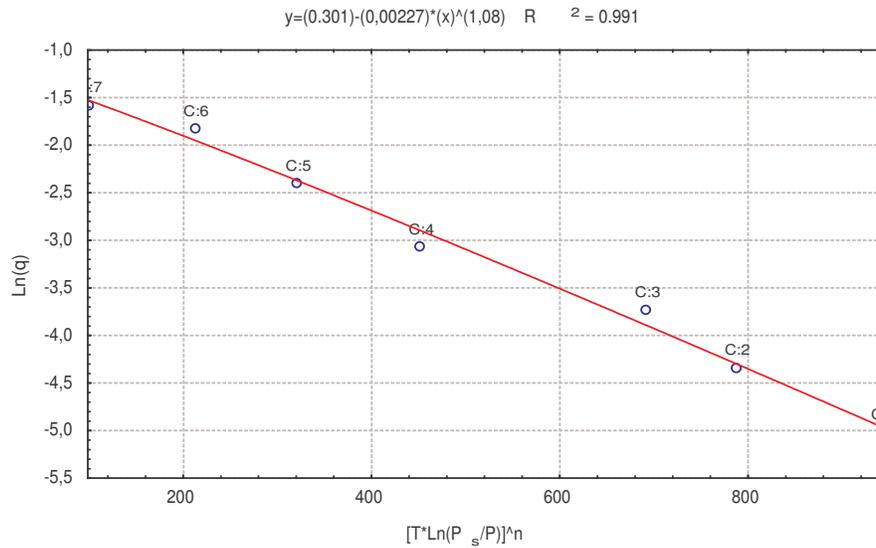


Figura 1.20 - Ajuste do modelo de Dubinin-Astakhov na forma linearizada.

O modelo de Freundlich também apresentou boa correlação com os dados experimentais com uma variância explicada de 99,3 % ( $R^2 = 0,993$ ). A Figura 1.21 apresenta o ajuste do modelo na forma linearizada.

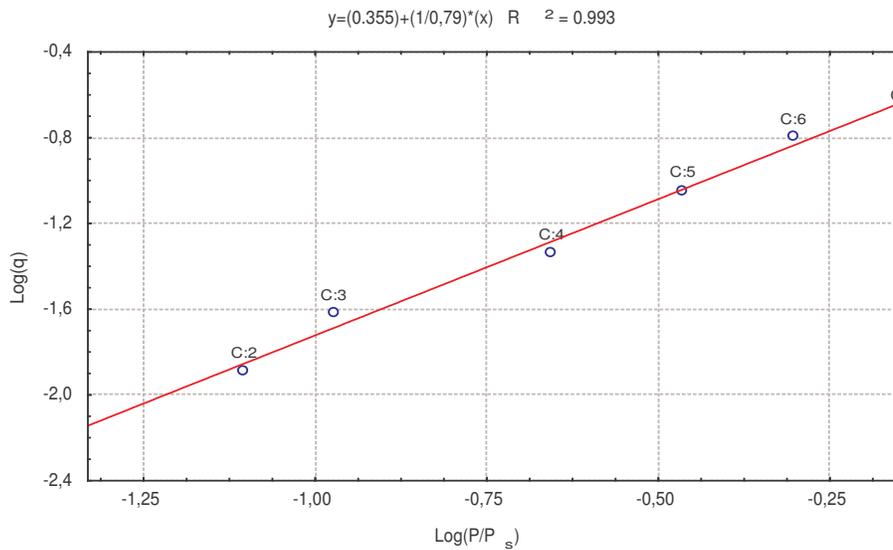


Figura 1.21 - Ajuste do Modelo de Freundlich na forma linearizada.

Como os dois modelos foram satisfatórios no ajuste dos dados optou-se por trabalhar com o modelo de Freundlich, pois além de ter um  $R^2$  ligeiramente mais alto é mais simples.

Com o modelo e os parâmetros definidos, duas isósteras foram traçadas e comparadas com outras duas dos trabalhos de CHO & KIM (1992) e CHIHARA & SUZUKI (1983), os quais utilizaram o mesmo modelo, conforme apresenta a Figura 1.22.

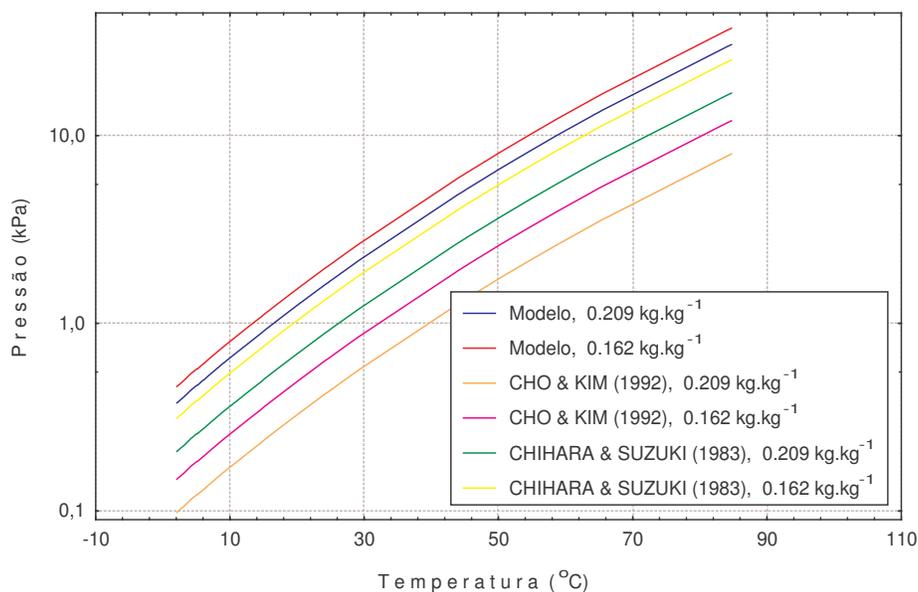


Figura 1.22 - Comparação das isósteras para o par sílica-gel/água com outros autores.

As diferenças nas medidas da pressão de uma mesma isósteras ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) entre os autores são comuns. Como se pode observar pela Figura 1.22 essas diferenças são nítidas, e esperadas, pois cada autor trabalhou com sílicas-gel de fabricantes diferentes. A explicação dessas diferenças está na capacidade de adsorção de cada sílica-gel, que é dependente de seu grau de ativação.

A Figura 1.23 apresenta as isósteras para a sílica-gel utilizada nesse trabalho a partir do modelo de Freundlich e dos parâmetros encontrados.

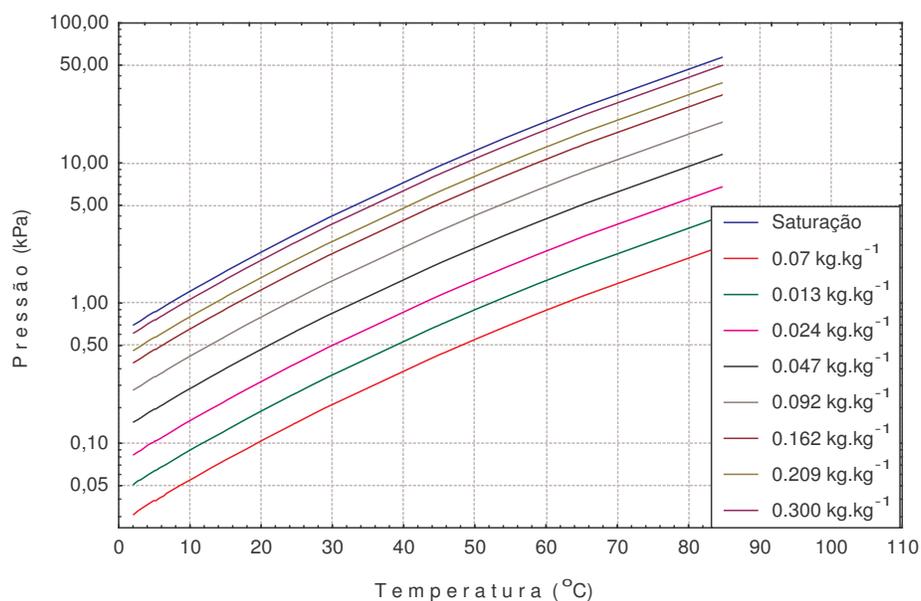


Figura 1.23 - Isósteras do par Sílica-gel/água.

Com essas isósteras (Figura 1.23) é possível ser traçado ciclo de adsorção e dessorção do leito de adsorção montado para a realização dos experimentos.

#### 1.4.2. Testes Preliminares com Sistema de Desumidificação por Condensação

De acordo com o planejamento experimental descrito no item 1.3.7, variou-se a área superficial ( $X_1$ ), massa de água na bandeja ( $X_2$ ) e taxa de bombeamento ( $X_3$ ) de acordo com os níveis apresentados na Tabela 1.2. Foram feitos 11 ensaios e medidas a perda de massa ( $Y_1$ ), a temperatura final na bandeja ( $Y_2$ ) e o consumo de energia ( $Y_3$ ) para cada ensaio ao final de 30 minutos, de acordo com a Tabela 1.9.

**Tabela 1.9. – Resultados do planejamento fatorial completo de ensaios com água .**

Ensaio	Variável Independente			Variável Dependente		
	Área superficial	Massa de água	Vazão de bombeamento	Perda de massa	Temperatura Final	Consumo de energia
	$X_1$ (m <sup>2</sup> )	$X_2$ (kg)	$X_3$ (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	$Y_1$ (kg)	$Y_2$ (°C)	$Y_3$ (kWh)
01	+1	+1	+1	0,083	0,4	0,93
02	-1	+1	+1	0,180	2,1	0,93
03	+1	-1	+1	0,036	0,1	0,88
04	-1	-1	+1	0,079	2,0	0,97
05	+1	+1	-1	0,029	2,4	0,63
06	-1	+1	-1	0,033	3,7	0,66
07	+1	-1	-1	0,022	0,8	0,61
08	-1	-1	-1	0,017	3,4	0,63
09	0	0	0	0,039	1,5	0,75
10	0	0	0	0,040	1,6	0,79
11	0	0	0	0,042	1,4	0,82

As medidas de perda de massa foram calculadas pela simples diferença entre a massa inicial e a massa ao final dos 30 minutos de processo, porém a massa também foi monitorada ao longo de todo processo, podendo ser identificados os períodos de maior ou menor perda ao longo do tempo. Um exemplo é o ensaio 9, apresentado na Figura 1.24.

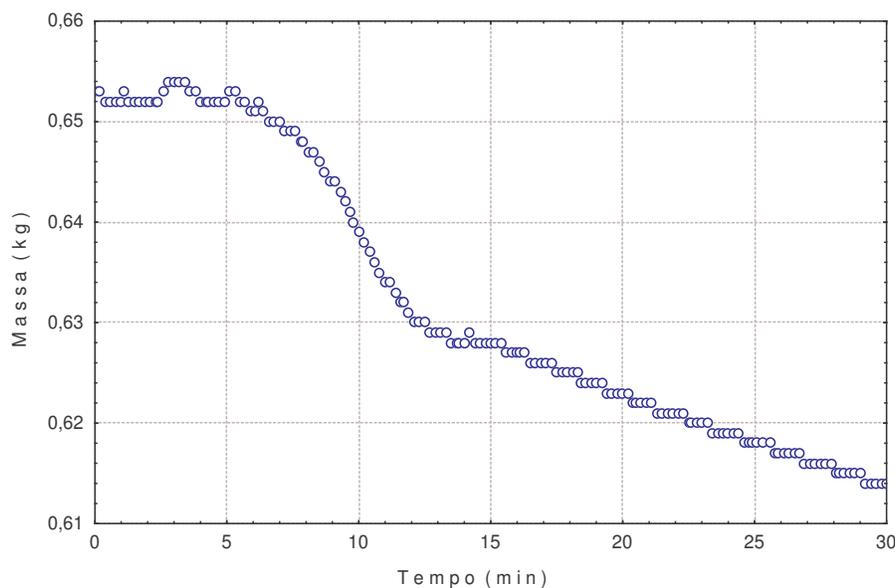


Figura 1.24 - Histórico da perda de massa no ensaio 9: área superficial ( $X_1$ ) = 3,05E-1 m<sup>2</sup>, massa ( $X_2$ ) = 0,65 kg e vazão ( $X_3$ ) = 22 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>.

Nessa Figura pode-se verificar que no início do processo, ocorre um deslocamento de ar que afeta a leitura da massa, porém logo é estabilizada e percebe-se a evaporação da água ao longo do tempo. A evaporação começa significativamente entre 5 e 8 minutos, pois é nesse tempo que a pressão interna da câmara atinge a pressão de vapor da água na temperatura da mesma.

As temperaturas foram medidas com quatro sensores dentro da bandeja com água, onde dois ficaram na superfície e outros dois no fundo da água, além de um colocado na superfície do trocador de calor. Em muitos ensaios, devido à evaporação, alguns sensores acabaram “saindo” da água e sua leitura ficou prejudicada. Porém, ao final do processo eles foram recolocados e a água agitada. Dessa forma, a temperatura final foi uma média dos quatro sensores após agitação imediatamente ao término do processo. A Figura 1.25 apresenta o ensaio 9, onde se pode verificar, além das temperaturas da água, a temperatura de superfície do trocador de calor dentro da câmara que, em alguns dos ensaios, chegou a subir bastante durante períodos de grande evaporação.

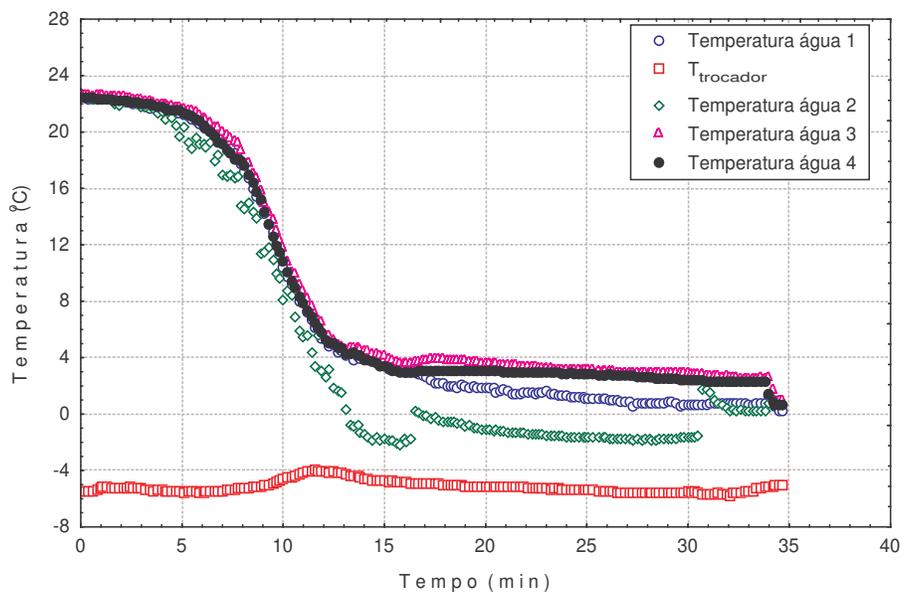


Figura 1.25 - Histórico de temperaturas no ensaio 9: área superficial ( $X_1$ ) =  $3,05E-1 \text{ m}^2$ , massa ( $X_2$ ) =  $0,65 \text{ kg}$  e vazão ( $X_3$ ) =  $22 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

Na Figura 1.26 é apresentado o histórico da potência ao longo do ensaio 9. Pela figura percebe-se o liga e desliga do compressor que, para esse ensaio, foi feito duas vezes.

No início do processo ocorre um aumento da potência, pois as bombas de vácuo estão evacuando o ar de dentro da câmara a partir da pressão ambiente e, enquanto a pressão é continuamente baixada, essa quantidade de ar também se reduz facilitando o trabalho das bombas que, por consequência, diminuem a potência consumida. Para a análise dos resultados do planejamento calculou-se a quantidade de kWh consumida para cada ensaio a partir das medidas de potência ao longo do tempo. Os resultados desse consumo foram apresentados na Tabela 1.9.

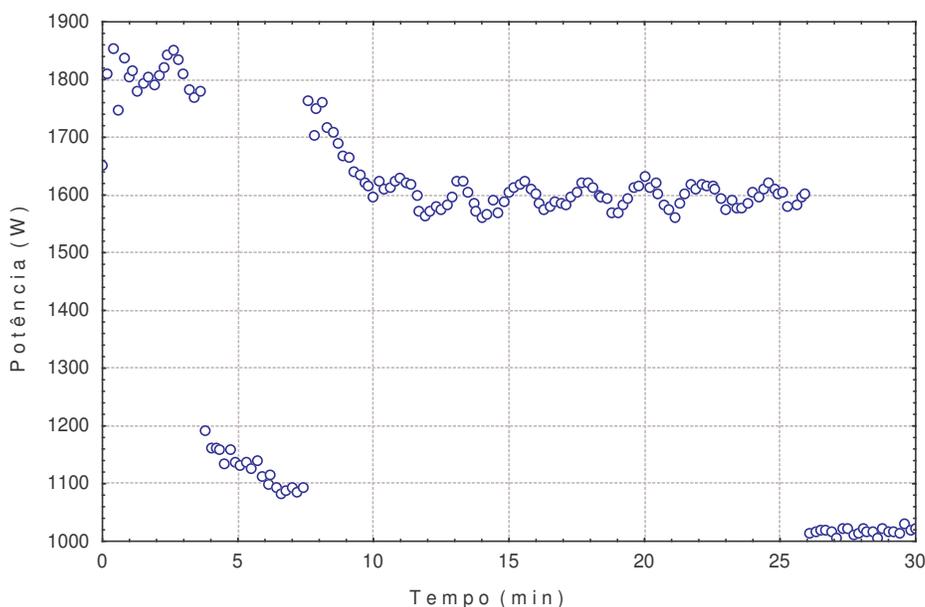


Figura 1.26 - Histórico de potência do ensaio 9: área superficial ( $X_1$ ) =  $3,05E-1 \text{ m}^2$ , massa ( $X_2$ ) =  $0,65 \text{ kg}$  e vazão ( $X_3$ ) =  $22 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

A pressão ao longo dos ensaios também foi medida desde a pressão ambiente até as pressões finais alcançadas em cada ensaio. A Figura 1.27 apresenta o histórico de pressões para o ensaio 9. As medidas de pressão da câmara fornecidas pelos dois sensores foram plotadas em um mesmo gráfico (Pressão 1 representa o sensor com maior escala e Pressão 2 representa o de menor escala).

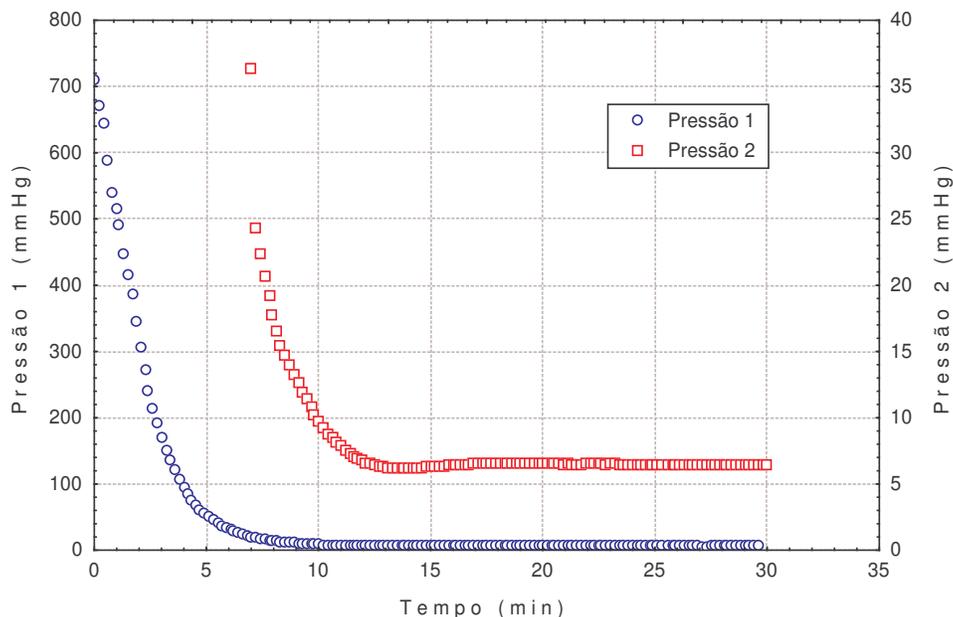


Figura 1.27 - Histórico de pressão do ensaio 9: área superficial ( $X_1$ ) =  $3,05E-1 \text{ m}^2$ , massa ( $X_2$ ) =  $0,65 \text{ kg}$  e vazão ( $X_3$ ) =  $22 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

Os históricos de todas as variáveis medidas em todos os outros 10 ensaios podem ser vistas no Anexo I.

Através do software Statistica 5.0 foi feita a análise do planejamento realizado, onde foi possível verificar a influência de cada variável independente ( $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$ ) sobre as respostas ( $Y_1$ ,  $Y_2$  e  $Y_3$ ) e ajustar um modelo que relaciona as variáveis. A seguir são apresentadas as análises para cada variável resposta do planejamento proposto.

#### 1.4.2.1. Perda de Massa ( $Y_1$ )

Para a variável resposta perda de massa ( $Y_1$ ) foram analisadas as influências das variáveis independentes e construída a Figura 1.28.

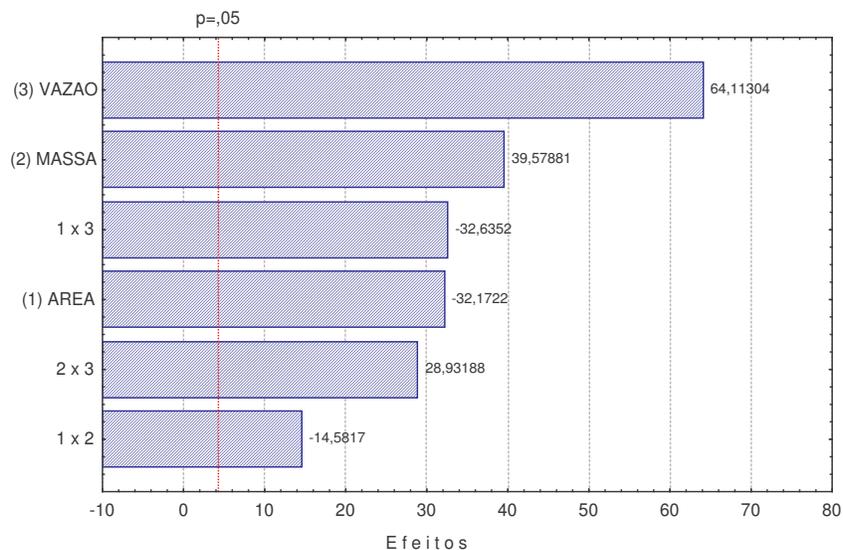


Figura 1.28 - Influências das variáveis independentes sobre a variável dependente Perda de Massa ao nível de significância de 95 %.

Pode-se observar que todas as variáveis independentes foram significativas, ao nível de 95 % de confiança, para a perda de massa. De acordo com o planejamento experimental, a principal influência foi a taxa de bombeamento (vazão) aplicada ao processo, de maneira que, uma maior vazão acarretou uma maior perda de massa. Devido ao procedimento adotado de fixar o tempo de processo em 30 minutos, quanto maior foi a vazão mais água foi evaporada e, conseqüentemente, maior foi a perda de massa.

Pela Figura 1.28, observa-se que a área teve influência negativa, ou seja, quanto maior a área, menor a perda de massa. A explicação para essa influência não esperada pode estar na altura da água dentro da bandeja. Mantendo a mesma vazão de bombeamento, a mesma quantidade de massa e alterando a área, tem-se que nas áreas maiores a altura da água será menor. Nas bandejas com áreas maiores, houve um congelamento da superfície, impedindo uma maior evaporação da água. Nas bandejas com áreas menores, a altura da água foi maior, favorecendo um gradiente de temperaturas ao longo dessa altura e, conseqüentemente, aumentando a convecção dentro da mesma, não permitindo o congelamento da superfície. Assim, nos ensaios onde as áreas foram menores, houve uma maior evaporação de água. A Figura 1.29 ilustra a explicação. Devido ao deslocamento dos

termopares nas bandejas ao longo dos ensaios não foi possível determinar exatamente esse gradiente, apenas a temperatura inicial e final da água.

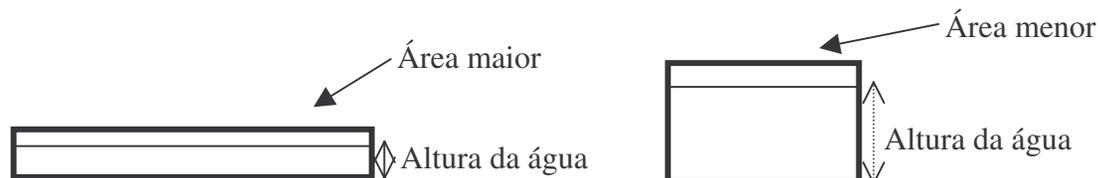


Figura 1.29 – Ilustração das bandejas com áreas diferentes ( $X_1$ ) e mesma massa de água ( $X_2$ ).

O congelamento foi ocasionado pela câmara atingir uma pressão abaixo da pressão de 4,5 mmHg (0,6 kPa). Essas pressões atingidas não foram constatadas pelos sensores de pressão utilizados que, apesar de calibrados de fábrica, apresentaram um erro maior que 1 mmHg. Uma outra consequência desse congelamento é a sublimação de parte da água durante o processo, que não pôde ser quantificada, mas pôde ser constatada, já que diversas medidas de temperatura indicaram valores abaixo de 0 °C (Anexo I).

A quantidade de massa presente influencia positivamente a perda de água, isto é, quanto maior a massa presente, maior foi a perda de água. Esse comportamento pode ser explicado, pois quanto maior a quantidade de massa mais tempo demorou a congelar ou não a superfície, sendo assim, houve maior evaporação da água.

Com o software Statistica 5.0 foi ajustado um modelo que representa a interação entre a variável independente perda de massa e as variáveis dependentes que tiveram uma influência significativa. A Tabela 1.10 apresenta o modelo.

**Tabela 1.10. Modelo para a variável perda de massa ( $Y_1$ )**

Variável resposta	Modelo linear	$R^2$
Perda de Massa (kg)	$Y_1 = -0,132 + 0,650X_1 - 0,04X_2 + 2,19E-3X_3 - 4,73X_1X_2 - 0,227X_3X_1 + 0,015X_2X_3$	0,950

Através de uma análise de variância (ANOVA) apresentada na tabela 1.11 avaliou-se a representatividade do modelo de regressão para a variável independente perda de massa ( $Y_1$ ).

**Tabela 1.11. – ANOVA para a variável perda de massa ( $Y_1$ ).**

Fonte de variação	SS	df	MS	F	f
Regressão	2,06E-2	6	3,43E-3	12,59	6,16
Resíduos	1,09E-3	4	2,73E-4		
Falta de Ajuste	1,09E-3	2	5,43E-4	232,78	19,00
Erro puro	4,67E-6	2	2,33E-3		
Total	2,17E-2	10			

SS: Soma quadrática; df: graus de liberdade; MS: Média quadrática; F: fator “F” calculado; f: fator “F” tabelado.

De acordo com a Tabela 1.11 o “F” calculado é pouco maior que o “f” tabelado, o que indicaria, em uma primeira análise que o modelo é estatisticamente significativo, porém o F calculado para a falta de ajuste apresentou-se muito maior que o f tabelado, indicando assim que o modelo não é bom. A causa para este alto valor da falta de ajuste está no problema apresentado pelo congelamento da superfície em alguns ensaios.

A Figura 1.30 apresenta os dados preditos pelo modelo e comparados com os dados experimentais para a variável perda de massa. Nessa figura pode-se observar que os dados preditos pelo modelo não correspondem adequadamente com os valores experimentais.

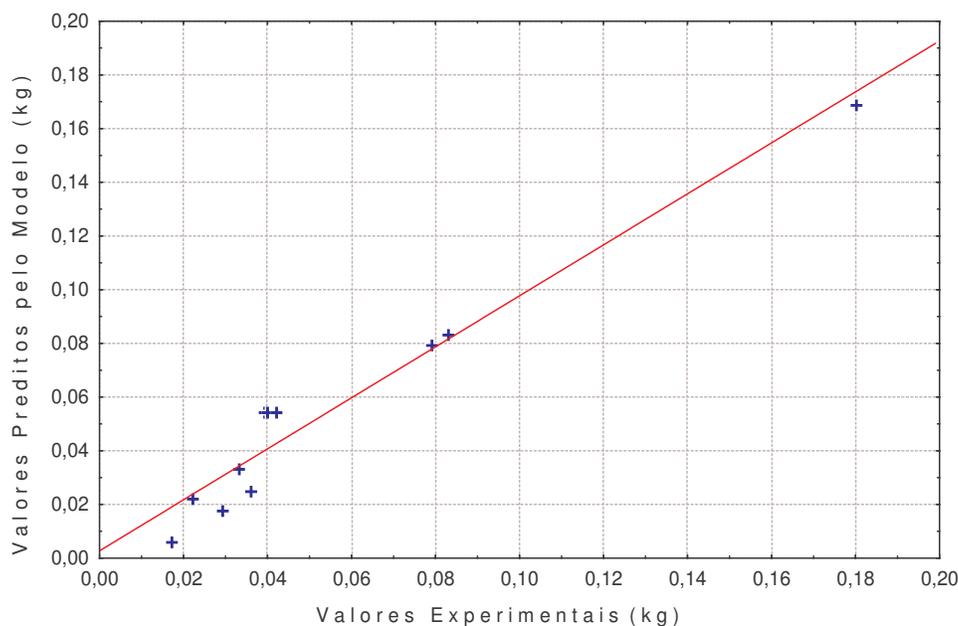


Figura 1.30 - Relação entre valores experimentais e os preditos pelo modelo para a perda de massa ( $Y_1$ ).

Analisando a perda de massa através das equações 1.6 e 1.7, verifica-se que estas representam a perda de massa durante a evaporação da água, porém não apresentam os termos correspondentes ao congelamento da superfície da água e posterior sublimação do gelo.

Assim, a perda total de massa no processo pode representada soma da massa de água evaporada no resfriamento, massa de água evaporada durante o congelamento e posterior massa evaporada na sublimação do gelo. A massa de água evaporada na sublimação do gelo acarreta não somente o abaixamento de sua temperatura, mas também o congelamento das camadas de água imediatamente inferiores.

Neste planejamento a perda de massa não foi calculada através de balanços de massa e energia devido à incerteza da quantidade de massa de gelo formada e pela necessidade de diversas medidas de temperatura ao longo da altura da água na bandeja.

#### 1.4.2.2. Temperatura Final ( $Y_2$ )

Para a variável resposta temperatura final da água ( $Y_2$ ) foram analisadas as influências das variáveis independentes e construída a Figura 1.31.

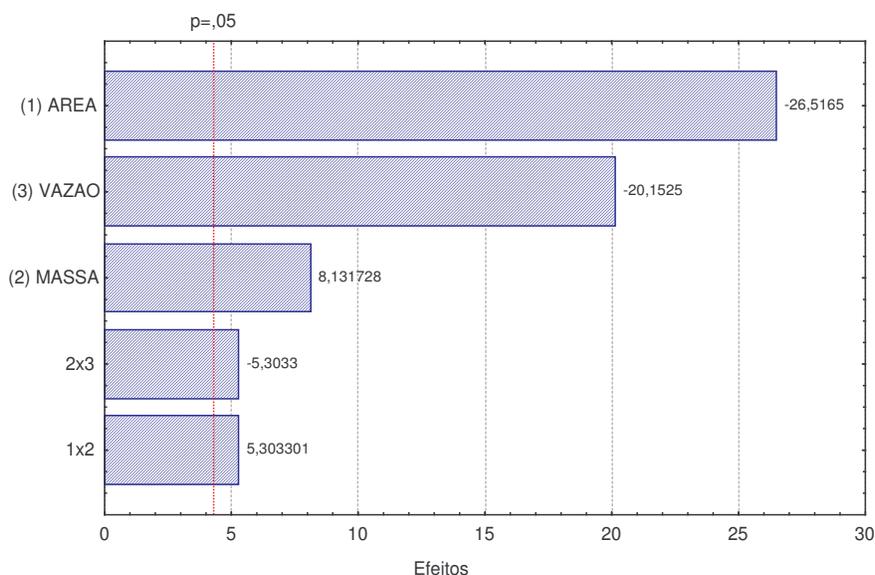


Figura 1.31 - Influências das variáveis independentes sobre a Temperatura Final.

Tanto a área quanto a vazão de bombeamento tiveram uma influência negativa e foram importantes no comportamento da temperatura final. Um aumento das mesmas ocasiona uma diminuição significativa da temperatura final. De acordo com as equações 1.4 e 1.5, percebe-se que um aumento da vazão acarretará em um tempo menor para atingir a pressão de saturação, permitindo que a temperatura seja abaixada mais rapidamente durante os 30 minutos de processo.

A massa teve uma influência direta e esperada sobre a temperatura final da água, isto é, quanto maior a massa de água, maior foi sua temperatura final. Outras influências significativas, mas bem menores que as outras, foram as interações entre a massa com a vazão, de maneira negativa, e a área com a massa de maneira positiva.

De maneira similar à efetuada com a variável perda de massa, foi feito um ajuste de modelo que relaciona a variável temperatura final e demais variáveis dependentes. O modelo é apresentado na Tabela 1.12.

**Tabela 1.12. – Modelo para a variável temperatura final ( $Y_2$ ).**

Variável resposta	Modelo linear	$R^2$
Temperatura Final ( $^{\circ}\text{C}$ )	$Y_2 = 5,01 - 157,7X_1 + 2,41X_2 + 0,0143X_3 + 112,6 X_1X_2 - 0,179 X_2X_3$	0,963

Na Tabela 1.13 é apresentada análise de variância do modelo ajustado. Pode-se observar que o F calculado para a regressão apresentou um valor cerca de 5 vezes maior que o f tabelado, além disso, o F calculado para a falta de ajuste mostrou-se não significativo, ou seja, seu valor foi menor que o f tabelado. Com esses valores e, conjuntamente, com o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) apresentado na Tabela 1.12, conclui-se que o modelo é preditivo para a variável temperatura final.

**Tabela 1.13. - ANOVA para a variável temperatura final (Y2).**

Fonte de variação	SS	df	MS	F	F
Regressão	12,32	5	2,46	26,25	5,05
Resíduos	0,47	5	0,09		
Falta de Ajuste	0,45	3	0,15	14,97	19,16
Erro puro	0,02	2	0,01		
Total	12,79	10			

SS: Soma quadrática; df: graus de liberdade; MS: Média quadrática; F: fator “F” calculado; f: fator “F” tabelado.

A Figura 1.32 apresenta graficamente uma comparação entre os dados experimentais e os valores preditos pelo modelo.

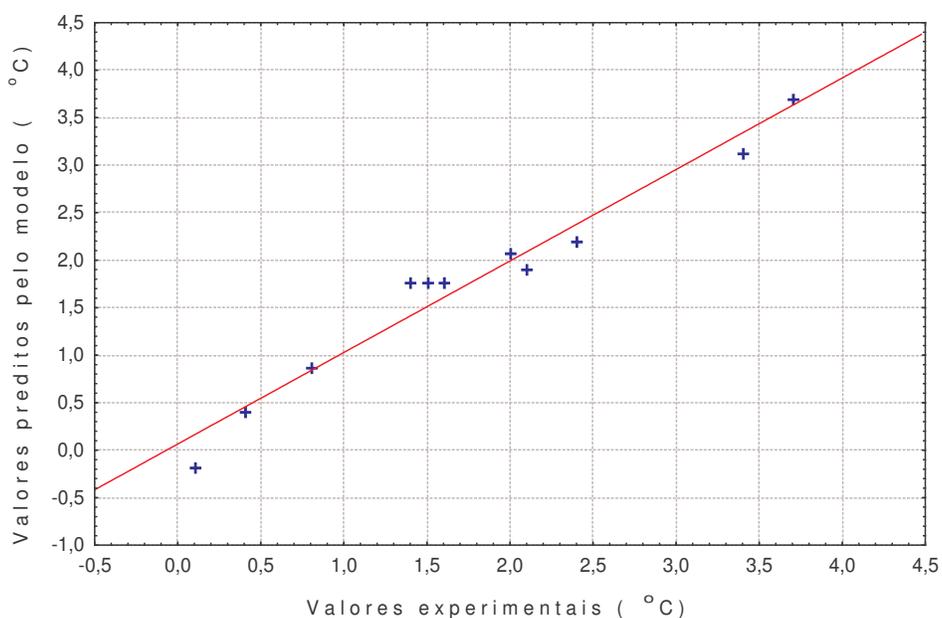


Figura 1.32 - Relação entre valores experimentais e os preditos pelo modelo para a temperatura final (Y<sub>2</sub>).

Analisando a temperatura final através da equação 1.7 percebe-se que, assim como na análise das influências das variáveis no planejamento experimental, a quantidade de massa inicial de água tem uma relação direta sobre esta. Considerando apenas a evaporação da água a equação 1.7 pode ser rearranjada da seguinte maneira:

$$T_f = T_i - \frac{\Delta m_w H_{fg}}{m_p \bar{C}_p} \quad (1.16)$$

Assim, percebe-se que quanto maior a massa de água inicial ( $m_p$ ) maior será a temperatura final ( $T_f$ ) da mesma. Através da equação 1.8, pode-se notar que quanto maior a área disponível para evaporação da água, maior será a quantidade de água evaporada por tempo. Sendo assim, através da equação 1.16, observa-se que quanto maior a massa de água evaporada ( $\Delta m_w$ ) menor será a temperatura final ( $T_f$ ).

Não foi possível calcular a temperatura final através de balanços devido ao desconhecimento da massa de gelo formada em alguns ensaios e das medidas de temperaturas ao longo da altura das bandejas.

#### 1.4.2.3. Consumo de Energia ( $Y_3$ )

Para a variável resposta consumo de energia ( $Y_3$ ) foram analisadas as influências das variáveis independentes e construída a Figura 1.33.

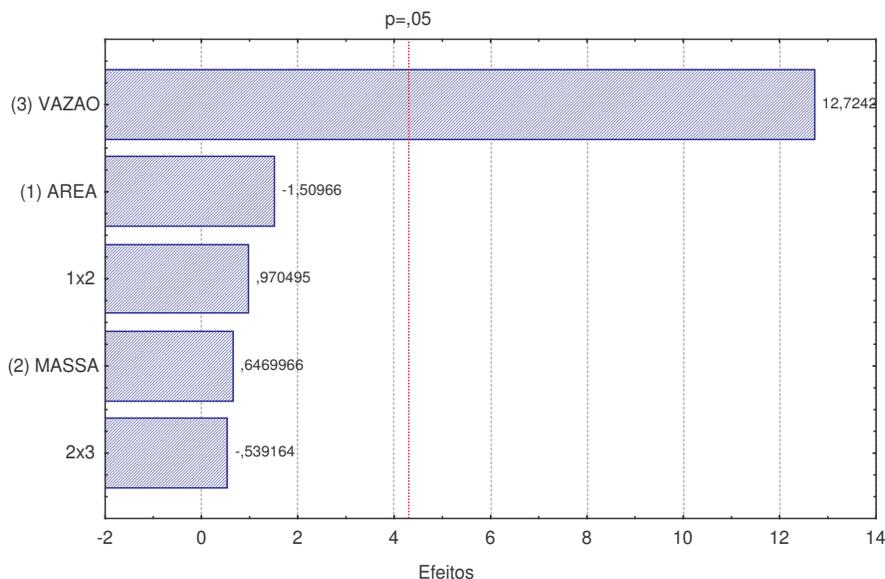


Figura 1.33 - Influências das variáveis independentes sobre o Consumo de Energia.

Para o consumo de energia a única variável que teve influência significativa foi a taxa de bombeamento (vazão). A alta demanda térmica dos experimentos não permitiu que o sistema de refrigeração da solução de etileno-glicol fosse desligado por muito tempo.

Dessa forma o que realmente diferenciou os consumos energéticos foram as bombas de vácuo. De acordo a taxa de bombeamento (vazão), duas ou mais bombas foram ligadas.

O modelo ajustado para a variável consumo de energia ( $Y_3$ ) é apresentado na Tabela 1.14. Observa-se a dependência apenas da vazão de bombeamento ( $X_1$ ), já que foi a única variável que influenciou significativamente o consumo de energia.

**Tabela 1.14. - Modelo para a variável consumo de energia ( $Y_3$ ).**

Variável resposta	Modelo linear	$R^2$
Consumo Energia (kWh)	$Y_3 = 0,317 + 0,021 X_3$	0,957

Também foi feita uma análise do modelo pela ANOVA, apresentada na Tabela 1.15. Pode-se observar que a regressão obteve um F calculado bem superior ao tabelado, assim como o F calculado para a falta de ajuste apresentou um valor bem inferior ao f tabelado. Conclui-se que o modelo é preditivo, pois além desses valores o coeficiente de correlação apresentou um valor alto, de 0,957.

**Tabela 1.15. - ANOVA para a variável consumo de energia ( $Y_3$ ).**

Fonte de variação	SS	df	MS	F	f
Regressão	0,17	1	0,17	200,24	5,12
Resíduos	0,01	9	0,00		
Falta de Ajuste	0,01	7	0,00	0,75	19,35
Erro puro	0,00	2	0,00		
Total	0,18	10			

SS: Soma quadrática; df: graus de liberdade; MS: Média quadrática; F: fator “F” calculado; f: fator “F” tabelado.

A Figura 1.34 apresenta graficamente uma comparação entre os dados experimentais e os valores preditos pelo modelo.

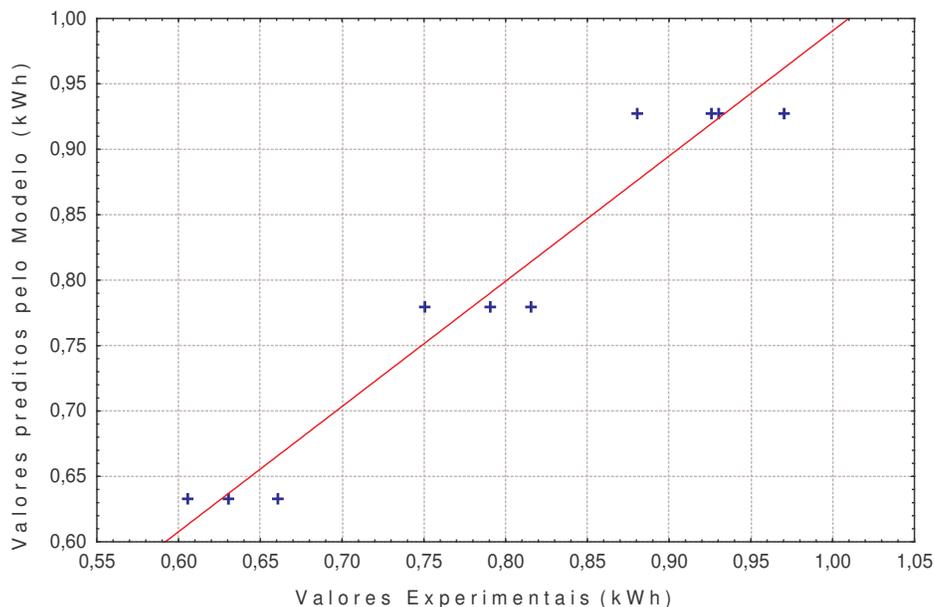


Figura 1.34 - Relação entre valores experimentais e os preditos pelo modelo para a energia consumida ( $Y_3$ ).

### 1.4.3. Resultados da Avaliação do Leito de Adsorção no Resfriamento a Vácuo

#### 1.4.3.1. Ensaio com a Câmara de Vácuo

A Figura 1.35 apresenta o comportamento das pressões da câmara de vácuo e do leito adsorativo. Através da figura pode-se observar que a pressão do leito, quase que instantaneamente, se iguala à pressão da câmara de vácuo impedindo assim que o processo de resfriamento atinja pressões na ordem daquelas necessárias ao resfriamento a vácuo (próximas de 5 mmHg). O processo de adsorção do vapor de água presente na câmara continua, porém muito vagorosamente.

Na Figura 1.36 é apresentado o comportamento da temperatura da água na bandeja, do interior da câmara de vácuo e do leito adsorativo.

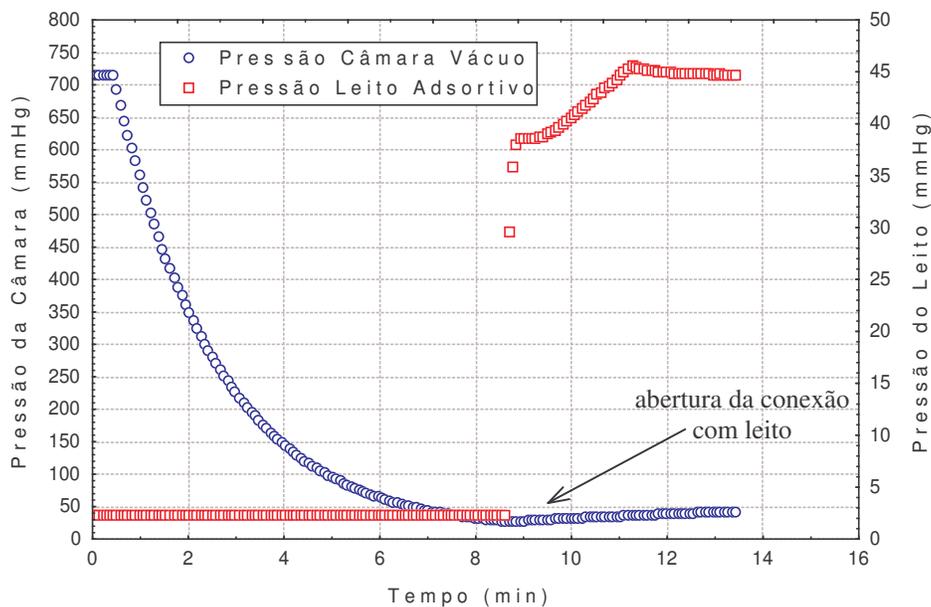


Figura 1.35 - Pressões no ensaio com leito de adsorção (sílica-gel) e câmara de vácuo.

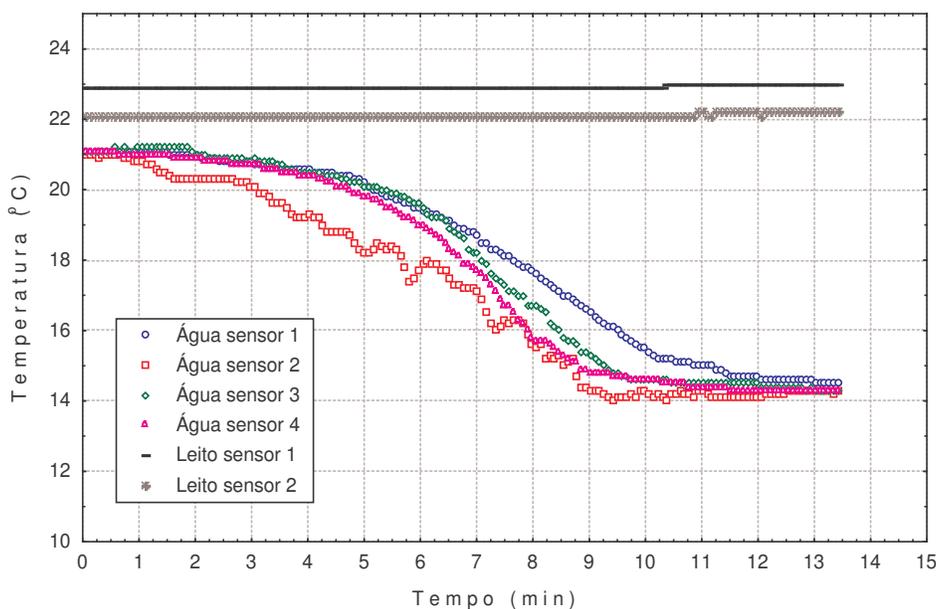


Figura 1.36 - Temperaturas no ensaio com leito de adsorção (sílica-gel) e câmara de vácuo.

Pode-se perceber que a temperatura começa a baixar logo no começo pela simples evacuação do ar pela bomba de vácuo, que promove um gradiente de pressões de vapor favorecendo a evaporação da água. Após o desligamento da bomba e abertura da conexão com o leito (próximo dos 9 minutos) percebe-se que a temperatura se estabiliza e desce

vagarosamente. Não havendo mais a rápida retirada do vapor, o gradiente decresce, e a adsorção acontece vagarosamente.

### 1.4.3.2. Ensaio com a Garrafa

Na figura 1.37 é apresentado o comportamento das pressões do leito e da garrafa após a abertura da válvula que conecta os dois compartimentos.

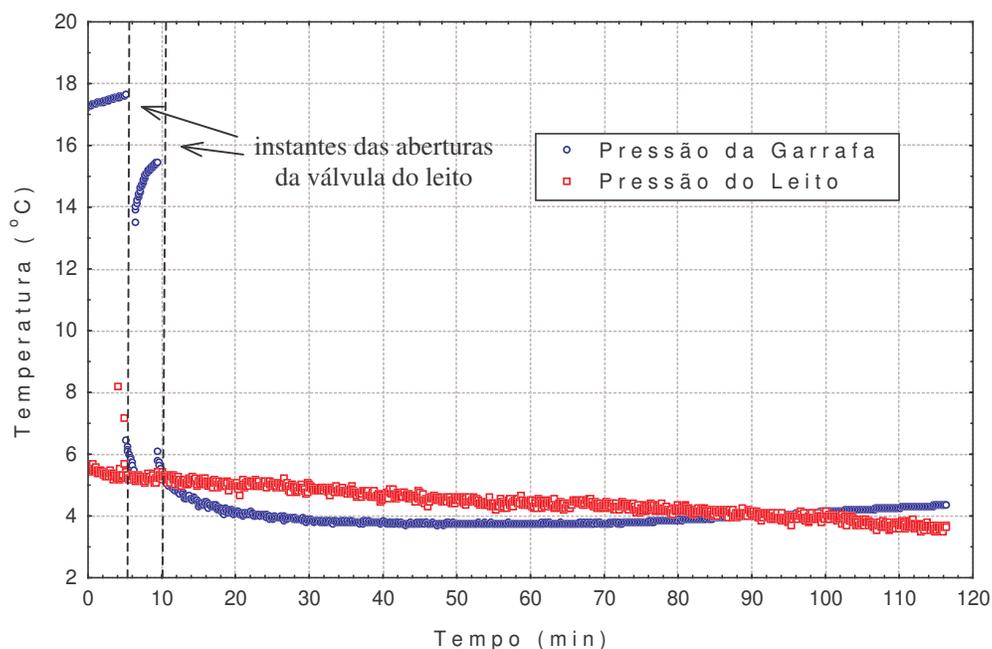


Figura 1.37 - Pressões no ensaio com leito de adsorção (sílica-gel) e garrafa com água.

Na Figura 1.37, logo no início, após abertura da válvula, e deixada assim alguns segundos, ela foi novamente fechada. Isso foi feito apenas para observar que a pressão da garrafa retoma seu patamar inicial se o leito deixar de adsorver a água oriunda da garrafa. As setas indicativas na Figura 1.37 mostram esse comportamento. Logo após, a válvula foi aberta e deixada assim até que a temperatura da superfície atingisse 0 °C.

Pela Figura 1.38 percebe-se que a temperatura da superfície cai até os 4 °C em aproximadamente 20 minutos. Por outro lado, percebe-se também um aumento da temperatura do leito, medida através de dois sensores de temperatura. Esse aumento ocorre,

pois a reação de adsorção da água na superfície da sílica-gel é exotérmica, isto é, libera calor para o meio.

O leito apresenta uma compactação que influencia na adsorção de água impedindo que esta ocorra de maneira uniforme por toda a sílica-gel presente, dessa forma a compactação influencia a velocidade do processo. Na construção do leito foi feito um canal interno para permitir uma melhor homogeneidade de adsorção. Ainda assim, percebe-se, pela Figura 1.38, que os sensores de temperatura do leito apresentaram uma diferença de temperatura ao longo do processo, evidenciando assim, uma diferença na adsorção dependendo da posição dentro do leito.

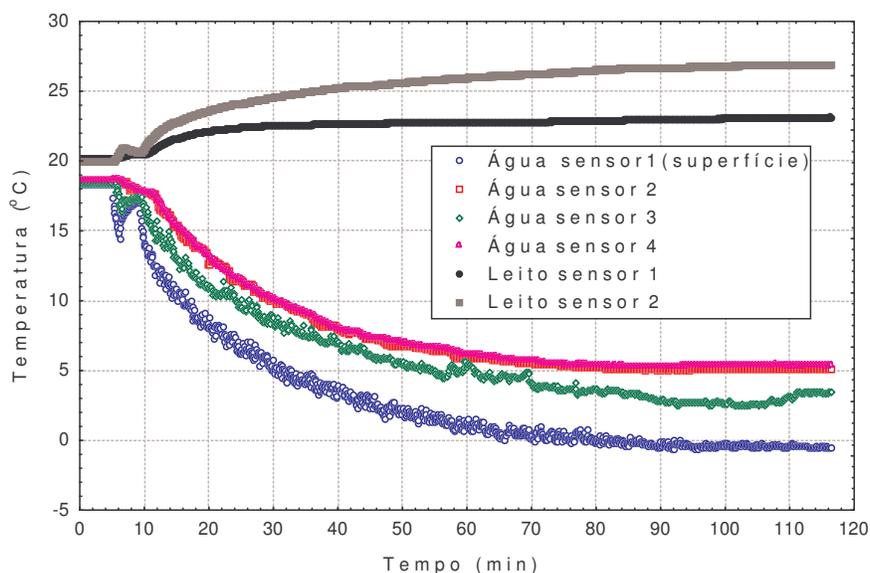


Figura 1.38 - Temperaturas no ensaio com leito de adsorção (sílica-gel) e garrafa com água.

Pelas medidas das temperaturas finais alcançadas e pelo comportamento das pressões pode-se perceber o potencial de aplicação do leito, porém as condições para que isso ocorra no resfriamento a vácuo devem ser avaliadas. Em uma análise rápida deve-se ater na quantidade de ar residual quando se atinge a pressão de saturação da água, na garrafa essa quantidade é bem menor do que na câmara de vácuo. Esse ar residual dificulta a adsorção dos vapores de água. Outro aspecto é relação de volumes entre o leito e a câmara, quanto maior essa relação, mais a pressão final de equilíbrio se aproximará da pressão do leito, do contrário a pressão final se aproximará da pressão da câmara.

## 1.5. Conclusões

Na caracterização do par sílica-gel/água deste trabalho a máxima adsorção encontrada experimentalmente foi de 30,6 % . Segundo os modelos propostos, 30,1 % ( $K_0$ ), no de Dubinin-Astakhov e 35,5 % ( $q^\infty$ ) no de Freundlich. Apesar dessa diferença, ambos os modelos propostos apresentaram um bom ajuste dos dados com altos coeficientes de correlação, 0,991 e 0,993 respectivamente. Foi escolhido o modelo de Freundlich para a construção das isósteras devido sua simplicidade.

Na utilização do leito de sílica-gel no resfriamento a vácuo a pressão da câmara não se reduziu até os patamares desejados, e conseqüentemente, a temperatura da água não diminuiu tão rápido quanto se esperava. Conclui-se que o leito não é capaz de ser utilizado da forma proposta inicialmente, necessitando assim, de um correto dimensionamento a fim de que possa se equiparar às bombas de vácuo mecânicas. Porém, no ensaio com a garrafa contendo água, pôde-se perceber a viabilidade técnica do leito de sílica-gel no resfriamento a vácuo, necessitando apenas de um correto dimensionamento.

Nos ensaios de resfriamento a vácuo das bandejas de água utilizando um sistema de refrigeração na condensação dos vapores percebe-se que a vazão de bombeamento foi a variável mais importante para o processo. Porém esta importância deve-se ao fato dos ensaios realizados terem um tempo fixo de duração. Teoricamente, por mais baixa que seja a vazão de bombeamento, é possível atingir as temperaturas desejadas, porém em tempos cada vez maiores. A área de exposição é muito importante para a temperatura final uma vez que a evaporação da água é diretamente proporcional à área. Assim, conclui-se que no dimensionamento de qualquer aplicação do resfriamento a vácuo deve-se levar em consideração, além da vazão de bombeamento e da área para a evaporação da água, a massa total de produto a ser resfriada. Pode-se, com essas variáveis, prever tempo e perda de massa dos produtos.

## 1.6. Referências Bibliográficas

- ARTÉS, F. & MARTÍNEZ, J. A. Influence of packaging treatments on the keeping quality of Salinas lettuce. **Food Science and Technology/Lebensmittel-Wissenschaft Technologie**, v.29, n.7, p.664-668, January, 1996.
- ASHRAE. Methods of precooling fruits, vegetables and cut flowers. **Refrigeration Handbook**, Chapter 14, Atlanta, Georgia (USA), 2002.
- ATKEY, P. T. ; FROST, C. E. ; BURTON, K. S. Effect of vacuum cooling on mushroom browning. **International Journal of Food Science and Technology**, v.22, n.6, December, 1987.
- BARBOSA, G. **Modelagem e Simulação de um Refrigerador Solar por Adsorção Física**. Campinas, 1993. 75p. Tese (Mestre em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.
- BARROS NETO, B. ; SCARMINIO, I. S. ; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 1ª edição, Campinas: Editora da UNICAMP, 2001. 401p.
- BARTLETT, D. Practical temperature control and cooling methods in relation to crop preservation. **Progress in Food and Nutrition Science**, v.4, n.3-4, p. 47-53, 1980.
- BELZILE, G. Le refroidissement des legumes. **10<sup>e</sup> Colóquio de Génie Rural**, Université Laval, janvier, 1982.
- CHIHARA, K. & SUZUKI, M. Air drying by pressure swing adsorption. **Journal Chemical Engineering Japan**. v.16, n.4, p. 293-298, 1983.
- CHO, S.H. & KIM, J.N. Modeling of silica gel/water adsorption-cooling system. **Energy**. v. 17, n. 9, p. 829-839, 1992.

- CORTEZ, L. A. B. & LEAL, P. A. M. Métodos de pré-resfriamento de frutas e hortaliças. **II Curso de Atualização em Tecnologia de Resfriamento de Frutas e Hortaliças**, Campinas, Brasil, 1997.
- DUBININ, M. M. Adsorption in micropores. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 23, p.487-499, 1967.
- GEANKOPLIS, C.J. Transport Processes and Unit Operations. New Jersey: Prentice Hall. Third Edition, 1993. 921p.
- GEESON, J. D. Cooling and storage of fruits and vegetables. **The Proceedings of The Institute of Refrigeration**, v.85, p.65-74, 1988-1989.
- HAAS, E. & GUR, G. Factors affecting the cooling rate of lettuce in vacuum cooling installations. **International journal of Refrigeration**, v.10, n.2, p.82-86, March 1987.
- HOUSKA, M.; PODLOUCKY, S. ; ZITNY, R. ; GREE, R. ; SESTAK, J. ; DOSTAL, M. ; BURFOOT, D. Mathematical model of the vacuum cooling of liquids. **Journal of Food Engineering**, v.29, n.3-4, p. 339-348, 1996.
- HUBER, E. **Resfriamento a vácuo de cortes de carnes após o cozimento**. Florianópolis 2004. Tese (Mestre em Engenharia de Alimentos) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- LANDFELD, A. ; HOUSKA, M. ; KYHOS, K. ; JIANG-QIBIN Mass transfer experiments on vacuum cooling of selected pre-cooked solid foods. **Journal of Food Engineering**, n. 52, p.207-210, 2002.
- MALPAS, E. W. Vacuum equipment for evaporative cooling. **Process Biochemistry**, v.7, n.10, p.15-17, October 1972.
- McDONALD, K ; SUN, D-W. Vacuum cooling technology for the food processing industry: a review. **Journal of Food Engineering**, v.45, n.2, p.55-65, 2000.

- MELLOR, J. D. Vacuum techniques in food industry. **Food Technology in Australia**, v.32, n.8. p.397-398, August 1980.
- MONCRIEFF, C. B. ; BURFOOT, D. ; NUTE, G. R. ; SELF, K. P. Effect of pressure cooking and pressure rate change during cooling in vacuum on chicken breast quality and yield. **Journal of Food Science**, v.55, n.6, p.1531-1535,1551, 1990.
- NEVES F<sup>o</sup>, L. C. ; VIGNEAULT, C. ; CORTEZ, L. A. B. Análise econômica preliminar de uma unidade de resfriamento a vácuo de alface. **XXVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola-CONBEA**, Campina Grande, PB, julho 1997.
- NG, K. C. ; CHUA, H. T. ; CHUNG, C. Y. ; LOKE, C.H. ; KASHIWAGI, T. ; AKISAWA, A. ; SAHA, B. B. Experimental investigation of the silicagel-water adsorption isotherm characteristics. **Applied Thermal Engineering**, n. 21, p. 1631-1642, 2001.
- OGAWA, K. Precooling before shipment for preserving post-harvest quality of vegetables in Japan. **Japan Agricultural Research Quarterly (JARQ)**, v.12, n.1, p.14-16, 1978.
- OLIVEIRA, R. G. ; TAMAINOT-TELTO, Z. ; SILVEIRA JR., V. Equilibrium characterization of carbon C119-ammonia and carbon c119-dimethyl ether pairs and application in adsorption refrigeration system design. **Artigo aceito no COBEM 2001 – Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica**. 2001.
- RENNIE, T.J.; RAGHAVAN, G.S.V.; VIGNEAULT, C.; GARIEPY, Y. Effects of Pressure Reduction Rate on Vacuum Cooled Lettuce Quality During Storage. *Canadian Biosystems Engineering*, v. 43, p. 3.39-3.43, 2001a.
- RENNIE, T.J.; RAGHAVAN, G.S.V.; VIGNEAULT, C.; GARIEPY, Y. Vacuum Cooling of Lettuce with Various Rates of Pressure Reduction. *Transactions of the ASAE*, n.1, v. 44, p. 89-93, 2001b.
- SAHA, B.B. ; BOELMAN, E.C. ; KASHIWAGI, T. Computer simulation of a silica gel-water adsorption refrigeration cycle-the influence of operating conditions on cooling output and COP. **ASHRAE Transactions: Research**. V.101, n.1, p. 348-357, 1995.

- SAHA, B.B. ; AKISAWA, A. ; KASHIWAGI, T. Solar/waste heat driven two-stage adsorption chiller: the prototype. **Renewable Energy**. V.23, p. 93-101, 2000
- SHAW, J. & KUO, C. Vacuum precooling green onion and celery. **American Society of Agricultural Engineers-ASAE**, Paper 87-5522, St. Joseph, MI. USA, 1987.
- SILVEIRA JR., V. **Montagem e teste de desempenho de um refrigerador solar por adsorção física com produção de gelo**. Campinas 1990. Tese (Mestre em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.
- SUN, D-W. ; HU, Z. CFD simulation of coupled heat and mass transfer through porous foods during vacuum cooling process. **International Journal of Refrigeration**, v.26, p.19-27, 2002.
- SUN, D-W. ; BROSANAN, T. Extension of the vase life of cut daffodil flowers by rapid vacuum cooling. **International Journal of Refrigeration**, v.22, n.6, p.472-478, 1999.
- SUN, D-W. ; WANG, L. Rapid cooling of porous and moisture foods by using vacuum cooling technology. **Food Science and Technology**, v.12, p.174-184, 2001.
- SUN, D-W. ; WANG, L. Modeling vacuum process of cooked meat – part 1: analysis of vacuum cooling system. **International Journal of Refrigeration**, v.25, p.854-861, 2002a.
- SUN, D-W. ; WANG, L. Modeling vacuum process of cooked meat – part 2: mass and heat transfer of cooked meat under vacuum pressure. **International Journal of Refrigeration**, v.25, p.862-871, 2002b.
- TAHAT, M. A. Heat-pump/energy-store using silica gel and water as a working pair. **Applied Energy**, n. 69, p. 19-27, 2001
- THOMPSON, J. F. ; MITCHELL, F. G. ; RUMSEY, T. R. ; KASMIRE, R. F. ; CRISOSTO, C. H. **Commercial Cooling of Fruits, Vegetables and Flowers**, Cap. 4 e

5. Universidade da Califórnia – Divisão de agricultura e recursos naturais, Publicação 21567, p.33-34, 1998

VANDIEVOET, A. C. & FOURNIER P. La pré-réfrigération rapide par le vide à la convergence des tests aéronautiques et de l'agro-alimentaire. **Industries Alimentaires et Agricoles**, v.10, n.100, p.691-695, 1983.

VIGNEAULT, C. ; GOYETTE, B. Fruit and Vegetable Precooling. **A Training Seminar of the NB Fruit Growers Association Inc.** Québec, Canadá. Fevereiro, 1994.

VODIANITSKAIA, P. **Desenvolvimento Experimental de um Refrigerador Solar a Adsorção Utilizando o Par Frigorífico Gel de Sílica-Água.** Paraíba, 1984. 80p. Tese (Mestre em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba.

**2 - CAPÍTULO II - Sistema de Resfriamento a Vácuo de  
Alface, cv. Salad Bowl**

**Resumo**

A refrigeração é um eficiente método de conservação de frutas e hortaliças, pois a diminuição da temperatura desses produtos afeta diretamente suas qualidades e os períodos de comercialização. Quanto maior for o período pós-colheita para uma hortaliça ou fruta atingir a sua temperatura ideal de estocagem, menor será sua vida pós-colheita e maiores serão suas perdas durante a comercialização. Métodos de resfriamento de hortaliças foram desenvolvidos para proporcionar a rapidez necessária no abaixamento da temperatura e para a conservação dos mesmos. O resfriamento a vácuo apresenta algumas vantagens sobre outras técnicas de resfriamento: rapidez e uniformidade da temperatura final do produto. O método é indicado para produtos que tenham alta relação de área superficial por volume. Sua aplicação típica são para as hortaliças folhosas, como a alface (*Lactuca sativa* L.), que é uma das hortaliças mais consumidas no Brasil. Neste trabalho, alfaces hidropônicas do grupo Mimosa, cv. Salad Bowl, foram submetidas ao resfriamento a vácuo. Através de um planejamento experimental completo de dois níveis foram investigadas as influências da vazão da bomba de vácuo, massa de alface e tempo de espera sobre a perda de massa e vida de pós-colheita das alfaces e sobre o tempo e consumo de energia do processo. A quantidade de massa de alface e a vazão de bombeamento influenciaram significativamente ( $p < 0,05$ ) o tempo de processo, o consumo de energia e a perda de massa das alfaces. O tempo de processo variou de 16,9 minutos até 79 minutos para abaixar a temperatura das folhas de 21 °C a 2 °C, o consumo de energia de 0,59 kWh até 1,52 kWh, a perda de massa das alfaces de 3,01 % até 5,44 % e a vida pós-colheita das alfaces de 19 a 23 dias.

*Palavras-chave:* Resfriamento a vácuo, resfriamento, alface, vácuo;

**Abstract**

The refrigeration is an efficient method for conservation of fruits and vegetables. The product temperature affects directly its quality and its storage life. The longer the product takes to reach its ideal temperature of storage, the shorter will be its shelf life and the bigger will be losses during the commercialization. Cooling methods has been developed to provide a rapid decrease in the temperature of fruits and vegetables. The vacuum cooling presents some advantages over other cooling techniques: cooling time and uniformity of the final temperature. This method is indicated for products that have a high superficial area to volume ratio. The typical application is for leafy vegetables, like lettuce (*Lactuca sativa L.*), economically important product in Brazil. In this work, hydroponics lettuces (Mimosa group, cv. Salad Bowl) were vacuum cooled. By experimental design, the influence of pumping rate of flow, mass lettuce and delay time for cooling on the mass loss, shelf life, operation time and energy consumption were investigated. The mass lettuce and the pumping rate of flow had a significant influence ( $p < 0.05$ ) on the operation time, energy consumption and mass loss of the lettuces. The processing time ranged from 16.9 to 79 minutes to cooling from 21 to 2 °C, the consumption of energy changed from 0.59 to 1.52 kWh, the mass loss varied from 3.01 to 5.44 % and the shelf life from 19 to 23 days.

*Keywords:* vacuum cooling, cooling, lettuce, vacuum;

## 2.1. Introdução

A temperatura é o fator mais importante a ser controlado na pós-colheita dos produtos hortifrutícolas. O tempo de espera na refrigeração desses produtos influi diretamente na vida pós-colheita e na qualidade dos mesmos (TURK & CELIK, 1993 e SHEWFELT, 1986). Portanto, quanto antes o produto for submetido ao resfriamento, mais tempo ela se conservará em condições de comercialização. Além disso, quanto mais a hortaliça for perecível, maior a necessidade da refrigeração imediata.

Segundo BRANCH (1986), as hortaliças começam a se deteriorar logo após sua colheita e, para que mantenham uma boa qualidade e tenham uma maior vida pós-colheita, devem ter seu calor de campo removido logo após sua colheita e sua temperatura mantida apropriadamente até sua comercialização.

A falta de uma tecnologia pós-colheita ou sua aplicação inadequada são importantes causas das perdas de produtos hortícolas. Estima-se que essas perdas estejam entre 5 a 25 % em países desenvolvidos e entre 20 a 50 % nos países em desenvolvimento (FAO, 1991 citado por NEVES F<sup>o</sup> *et al*, 1997). Ainda segundo NEVES F<sup>o</sup> *et al* (1997), as perdas para produtos hortifrutícolas no Estado de São Paulo em 1992 foram da ordem de 35 %, representando um prejuízo de aproximadamente US\$ 1 bilhão para o estado.

O resfriamento de hortaliças vem ao encontro da necessidade de um resfriamento antes da estocagem refrigerada. A colocação do produto diretamente na câmara de estocagem sem resfriá-lo, não é suficiente para a retirada do “calor de campo” desses produtos de forma rápida, pois as câmaras de estocagem em sua maioria, não dispõem de equipamentos adequados (CORTEZ & LEAL, 1997). Como consequência, mesmo dentro da câmara, o excessivo tempo de espera para que a hortaliça atinja sua temperatura ideal de estocagem, faz com que esta perca qualidade e diminua seu tempo de comercialização.

O resfriamento a vácuo vem atender à necessidade de um método rápido e eficiente no resfriamento de hortaliças folhosas, como a alface. Trata-se de um método cuja rapidez e uniformidade final de temperatura destacam-se sobre os outros métodos de resfriamento.

A alface, *Lactuca sativa L.*, é a hortaliça folhosa de maior consumo no Brasil possuindo assim, uma importância econômica destacada. Cada paulistano consome quase dois quilos de alface por ano, isso representa 40 % de seus gastos totais com hortaliças (CEAGESP, 1999).

O objetivo desta pesquisa foi o de avaliar as influências da vazão de bombeamento, da quantidade de massa de alface e do tempo de espera da alface para a refrigeração sobre o tempo de resfriamento, consumo energético, perda de massa e vida pós-colheita da alface utilizando o processo de resfriamento vácuo.

## 2.2. Revisão Bibliográfica

### 2.2.1. Resfriamento

Na língua inglesa, ainda utiliza-se do termo “precooling” para designar o resfriamento de produtos hortifrutícolas antes do transporte refrigerado ou estocagem refrigerada (PENTZER, 1970).

O objetivo principal dos processos de resfriamento é o de resfriar o produto até temperaturas próximas da ideal de estocagem, para estocá-lo ou distribuí-lo em condições adequadas temperatura.

O resfriamento de produtos hortifrutícolas refere-se a rápida remoção do “calor de campo” desses produtos, antes de sua estocagem ou transporte para a comercialização. Feito de maneira apropriada, ajuda a diminuir as perdas pós-colheita e manter a qualidade dos produtos (HARDENBURG *et al.*, 1990).

Métodos de resfriamento foram desenvolvidos para atender a necessidade, que a grande maioria dos produtos de origem vegetal possuem, de serem resfriados no menor tempo possível após sua colheita, a fim de minimizar e retardar sua deterioração. Segundo CORTEZ & LEAL (1997), o objetivo principal desses métodos é o de fornecer a rapidez no resfriamento das frutas e hortaliças, logo após a colheita, a fim de proporcionar rápida retirada do “calor de campo”.

Segundo o CEAGESP (1999), a fim de minimizar as perdas, em muitos casos, é aconselhável a realização de um resfriamento antes da armazenagem. Essa operação remove rapidamente o calor dos produtos perecíveis e sua temperatura fica próxima daquela que será utilizada durante o período de armazenamento ou transporte.

Frutas e hortaliças deveriam ser submetidas aos métodos de resfriamento tão logo seja feita sua colheita e imediatamente estocados em condições ótimas de temperatura para atingirem a máxima vida pós-colheita (HARDENBURG *et al.*, 1990).

O resfriamento minimiza as perdas das hortaliças e aumenta seu tempo de comercialização pela redução das taxas de respiração e transpiração, e diminuição da atividade dos microrganismos. Segundo OGAWA (1978), a combinação de um resfriamento, logo após a colheita, com o transporte refrigerado permite a comercialização de frutas e hortaliças de qualidade a longas distâncias.

Deve-se notar que métodos de resfriamento de frutas e hortaliças são operações bem diferentes daquela proporcionada pelo armazenamento (estocagem a baixas temperaturas) e, portanto, requerem instalações e equipamentos distintos. É a primeira fase de conservação, onde se aplica a redução da temperatura desses produtos (CORTEZ & LEAL, 1997).

### **2.2.2. Comparação Entre o Resfriamento a Vácuo e Outros Métodos**

Dentre os métodos mais comuns utilizados no resfriamento de hortaliças estão: resfriamento em câmaras frigoríficas, resfriamento por ar forçado, resfriamento por água gelada, resfriamento com gelo-água e resfriamento a vácuo (KADER, 1992).

O resfriamento em câmaras frigoríficas é muito lento para a maioria dos produtos hortifrutícolas, tornando-se prejudicial a produtos muito perecíveis e requerendo muito espaço para uma armazenagem. Muitas câmaras não são projetadas para a rápida remoção do calor dos produtos nem apresentam uma capacidade de movimentação de ar adequada (HARDENBURG et al., 1990). Além disso, o uso do mesmo compartimento para o resfriamento e armazenamento expõe produtos armazenados a altas velocidades de ar e temperaturas não constantes, causando sérios problemas em relação a sua perda de massa.

O resfriamento por ar forçado resfria o produto com 1/4 a 1/10 do tempo necessário para o resfriamento em câmaras, mas é de 2 a 3 vezes mais lento que o a água ou a vácuo. Dificulta o uso de embalagens secundárias e ocasiona um resfriamento desigual do produto e perdas de massa (SPAGNOL & SIGRIST, 1992).

O resfriamento por água gelada apesar de ser um método barato, pode danificar o produto, requer embalagens que não absorvam água, além da necessidade do uso de desinfetantes. O resfriamento com gelo-água é limitado a produtos que não se danifiquem com o gelo, que contenham embalagens não absorvedoras de água e apresenta o problema da água oriunda do degelo (CORTEZ & LEAL, 1997).

Já o resfriamento a vácuo permite um resfriamento uniforme de todo o produto, permite o uso de embalagens, desde que estas não representem uma barreira ao vapor de água, além de ser um método muito rápido. O resfriamento a vácuo vem solucionar vários problemas apresentados pelos métodos convencionais, quando estes são aplicados em hortaliças folhosas.

O resfriamento a vácuo pode encurtar significativamente o tempo de resfriamento pois ele remove rapidamente o “calor de campo” dos produtos e, conseqüentemente, pode manter a qualidade e aumentar o tempo de comercialização desses produtos (SUN & BROSAN, 1999). De acordo com McDONALD & SUN (2000) as principais vantagens do resfriamento a vácuo em frutas e hortaliças são o incremento do tempo de comercialização, o rápido resfriamento resultando em uma rápida distribuição, grande precisão no controle de temperatura e baixo custo operacional; por outro lado as principais desvantagens são a limitação do método aos produtos folhosos, perda de água do produto e alto investimento inicial.

O resfriamento a vácuo é um método cuja rapidez e uniformidade são conseguidas pelo seu princípio de transferência de calor. O calor é retirado do produto pela evaporação de parte da água do próprio produto e/ou da água, intencionalmente aspergida em sua superfície. A evaporação da água é conseguida com a diminuição da pressão dentro de uma câmara, onde o produto é colocado.

A Tabela 2.1 apresenta uma comparação entre os mais comuns métodos usados como resfriamento de frutas e hortaliças.

**Tabela 2.1 – Comparação entre cinco métodos de resfriamento utilizados para frutas e hortaliças (adaptado de THOMPSON *et al.*, 1998)**

Características	Ar Forçado	Água Gelada	Vácuo	Gelo	Câmara
Tempo (h)	1-10	0.1-1	0.3-2.0	0.1-0.3	20-100
Perda Umidade (%)	0.1-2.0	0-0.5	2.0-4.0	-----	0.1-2.0
Contato c/ água	pode ter	sim	não*	Sim	pode ter
Custos	baixo	baixo	médio	Alto	baixo
Eficiência energética	baixa	alta	alta	baixa	Baixa
Embalagem resistente à água	pode ter	sim	não*	Sim	Não
Portátil	Às vezes	raramente	comum	comum	Não
Resfriamento contínuo	raramente	sim	não	não	não

\*quando não é aspergida água sobre o produto.

Na Figura 2.1 são comparados alguns métodos de resfriamento em termos de requerimentos energéticos. Nota-se a alta eficiência em termos de conversão de energia para o resfriamento a vácuo. O coeficiente de energia (EC) é definido como:

$$EC = \frac{\text{Trabalho feito no resfriamento (kWh)}}{\text{Energia elétrica requerida (kWh)}} \quad (2.1)$$

A eficiência energética do resfriamento a vácuo é alta pois o resfriamento retira apenas calor do produto, ao contrário do, por exemplo, resfriamento por ar forçado que retira calor dos ventiladores, das embalagens, das paredes, de ar infiltrado além de retirar calor do produto (THOMPSON *et al.*, 1998).

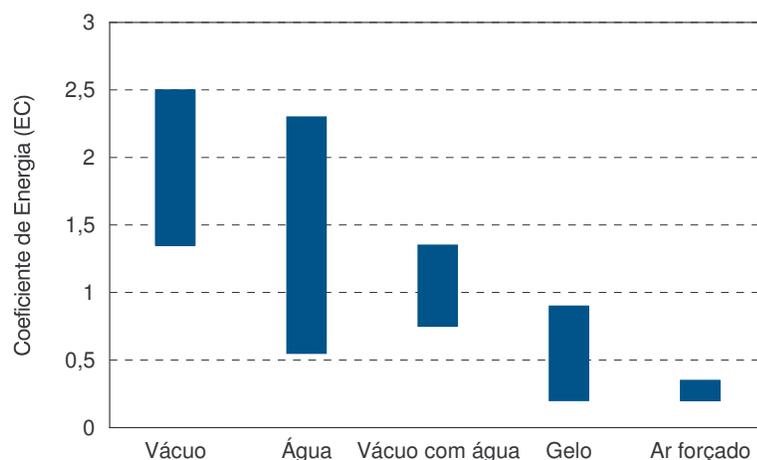


Figura 2.1 - Energia requerida por diferentes tipos de resfriadores (KADER, 1992).

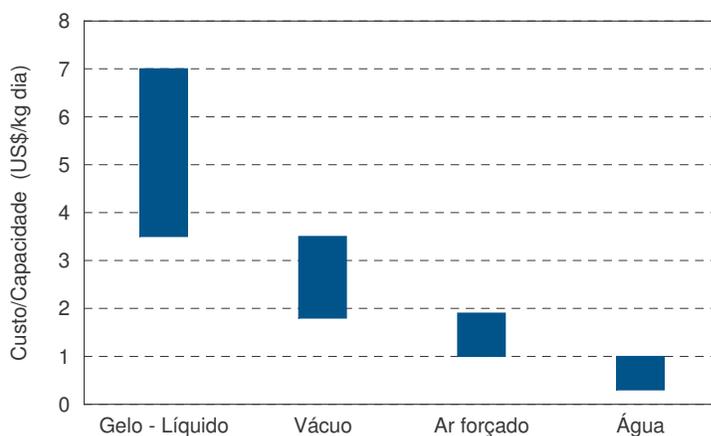


Figura 2.2 - Custos comparativos de diferentes tipos de resfriadores (KADER, 1992).

Em termos de custos fixos, o resfriamento a vácuo tem valores significativos. Quanto à relação custo/capacidade, apesar de não ser o mais elevado quando comparado a outros métodos, conforme mostrado na Figura 2.2, ele ainda é um investimento alto. Segundo NEVES F<sup>o</sup> *et al.* (1997), estes sistemas só se viabilizam para grandes quantidades de produto. BRANCH (1986) afirma que resfriadores a vácuo são caros e necessitam de 8 a 10 meses de uso por ano para justificar o investimento.

Uma maneira de tornar viável o investimento de um resfriador a vácuo é sua montagem em trailers que são deslocados para diversas propriedades de uma mesma área;

podem ser construídos pequenos o suficiente para um pallet ou grandes para até 60 pallets (THOMPSON et al., 1998).

### 2.2.3. Aplicações do Resfriamento a Vácuo

O Resfriamento a vácuo é um método padrão para o resfriamento de alfaces nos EUA e diversos países da Europa (McDONALD & SUN, 2000). Segundo AHARONI & YEHOSHUA (1973), o método mais adequado para um resfriamento rápido de alfaces é o resfriamento a vácuo. Sua primeira aplicação comercial foi em 1948 para resfriar 34 vagões carregados de alface em Salinas, Califórnia (EUA) (HARDENBURG, et al., 1990).

BARLETT (1980), IWAMOTO (1981) e NEVES F<sup>o</sup> et al. (1997) explicam que o custo fixo inicial tem limitado a aplicação da refrigeração a vácuo a situações onde a produção é de larga escala, por longos períodos do ano.

Esta técnica de refrigeração é muito utilizada para produtos folhosos, cuja relação da área superficial por volume é alta (HAAS & GUR, 1987), pois sua eficiência depende muito da área de exposição e quantidade de água no produto. Neste conceito, adequam-se perfeitamente as hortaliças folhosas. De acordo com MELLOR (1980), o produto deve ter também alto conteúdo de umidade e não apresentar queda em seu valor de comercialização, devido a possível perda de água ocasionada pelo processo.

Desde sua primeira aplicação comercial em 1948, as vantagens foram grandes, e já a partir de 1954, entre 40 e 85 % da alface produzida na Califórnia e no Arizona, EUA, eram refrigeradas a vácuo. Hoje, estima-se que grande parte de toda alface produzida nos EUA seja resfriada a vácuo (NEVES F<sup>o</sup> et al. 1997).

O resfriamento a vácuo tem sido aplicado com sucesso em alface, repolho, couve-flor, cogumelos, espinafre, aipo, aspargo, milho-doce (MALPAS, 1972). Chicória, escarola e salsa, são possíveis de serem submetidas ao resfriamento a vácuo. Hortaliças menos suscetíveis, mas adaptáveis com umidificação são: aspargo, brócolis, couve de bruxelas,

repolho, aipo, couve-flor, ervilhas, milho doce, alho e cogumelos. Desses, somente couve-flor, aipo, repolho e cogumelos são resfriados a vácuo comercialmente na Califórnia, EUA, (ASHRAE, 2002). Este método não se mostrou eficiente quando aplicado a frutas, devido, principalmente, à sua baixa relação de área superficial por volume. REDIT (1969), citado por JOHNSON *et al* (1974), recomenda o uso de resfriamento a vácuo em aipo até 4,4 °C, pois este é um produto extremamente perecível. Ervilha, couve, vagem e alcachofra também podem ser resfriadas a vácuo (BLEINROTH, 1970).

Encontra-se ainda aplicação do resfriamento a vácuo em diversos tipos de flores e ervas aromáticas (VANDIEVOET & FOURNIER, 1983). De acordo com SUN & BROSNAN (1999), flores do tipo narciso tiveram sua vida de vaso aumentada em até 200 % quando submetidas ao resfriamento a vácuo.

O resfriamento a vácuo pode ainda ser aplicado na indústria de panificação (GUEST, 1979 e BRADSHAW, 1976). MONCRIEFF *et al*, (1990) utilizaram o resfriamento a vácuo em peito de frango após seu cozimento. SUN & WANG (2000) e DESMOND *et al*.(2000) investigaram a viabilidade do método aplicado em quartos de carne de porco cozida (presunto cozido) encontrando tempos de resfriamento menores quando comparados a outros métodos. SUN & ZHANG (2003) aplicaram o método em cenouras cozidas e cortadas.

O método de resfriamento a vácuo pode ser aplicado com sucesso nesses produtos embalados ou pré-embalados em caixas de papelão, arranjados em “pallets”, entre outros, desde que não restrinjam a passagem do vapor de água. BARTLETT (1980) e GEESON (1988-1989) afirmam que no resfriamento a vácuo o produto pode ser resfriado já em sua embalagem de comercialização, desde que providas de pequenos orifícios, pois a uniformidade do resfriamento não depende de seu arranjo na câmara.

A comparação da temperatura final no resfriamento a vácuo de diferentes hortaliças, resfriados nas mesmas condições é mostrada na Figura 2.4 (ASHRAE, 2002).

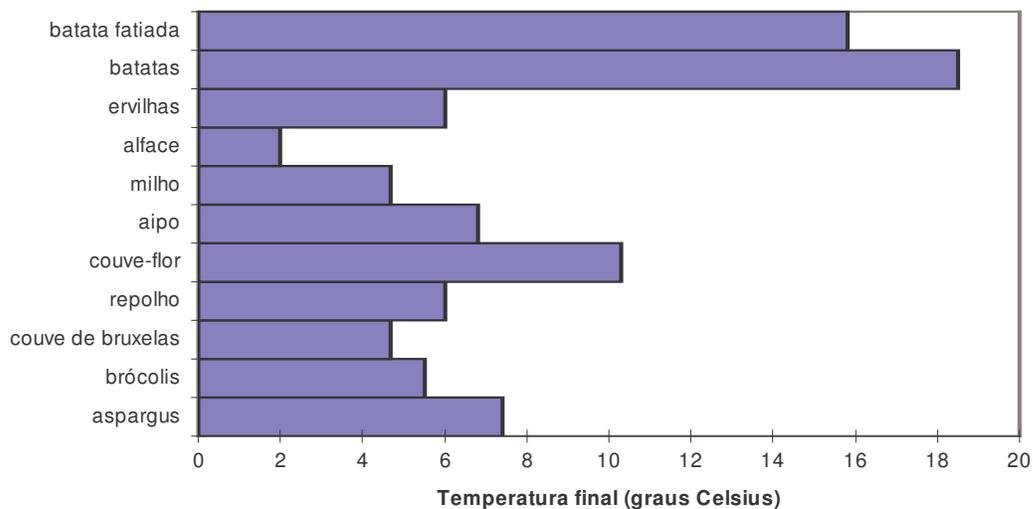


Figura 2.3 - Comparação da temperatura final no resfriamento a vácuo de diferentes hortaliças. Condições: pressão final de 3,98 a 4,58 mmHg, temperatura inicial de 20 a 22 °C e tempo de resfriamento de 25,2 a 30 minutos (ASHRAE, 2002).

## 2.3. Materiais e Métodos

### 2.3.1. Produto

Para este trabalho foi escolhida a alface hidropônica do grupo Mimosa cv. Salad Bowl, devido sua disponibilidade ao longo dos meses de experimentos. Em todos os experimentos as alfaces foram colhidas entre 28 e 31 dias após o transplântio das mudas, sempre pela manhã às 8:00 horas, embaladas em filme plástico de polipropileno perfurado em forma de cone. Foram adquiridas junto à empresa CIA das Hortaliças, localizada no Sítio São Luis da Tapera, no bairro Von Zuben na cidade de Campinas-SP (Figura 2.4).



Figura 2.4 – Plantação de alface hidropônica, CIA das Hortaliças, Campinas-SP.

As temperaturas e umidades relativas do ar durante a colheita, transporte, resfriamento e estocagem foram medidas para cada lote de experimentos. Durante a colheita e transporte até o Laboratório de Automação e Controle de Processos de Alimentos foi utilizado um medidor de temperatura e umidade relativa da Cole-Parmer Instrument Company, modelo Trisense Meter.

As alfaces foram transportadas em caixas plásticas modelo CN48, da marca LINPAC Pisani, de dimensões 610x410x250 mm (Figura 2.5). O tempo de transporte entre a colheita e a chegada ao Laboratório de Instrumentação e Controle de Processos de Alimentos na Faculdade de Engenharia de Alimentos foi de 20 minutos, em média.



Figura 2.5 – Caixa plástica utilizada nos ensaios com as alfases

### 2.3.2. Planejamento dos Experimentos

Para a realização dos experimentos foi utilizado um planejamento fatorial completo de dois níveis, cujas condições de operação modificadas (variáveis independentes) foram:

- Massa de alface;
- Tempo de espera da refrigeração após colheita;
- Taxa de bombeamento (através das associações das bombas em paralelo);

O planejamento fatorial completo de dois níveis representa a mínima variação necessária para avaliar o comportamento de uma variável em estudo, ou seja, é necessário pelo menos variar em dois níveis uma variável em questão para estudar seus efeitos sobre um processo qualquer. Dessa forma, o planejamento necessitará de  $2 \times 2 \dots \times 2 = 2^n$  ensaios, onde  $n$  é o número de variáveis independentes. Neste trabalho foram feitos  $2^3$  ensaios, mais três ensaios no ponto central (nível 0) para avaliação do erro experimental. Também foram feitos ensaios complementares que representam os pontos axiais do planejamento experimental, com o objetivo de construir modelos empíricos de 2ª ordem e superfícies-resposta para cada variável. A Tabela 2.2 apresenta os valores adotados para as variáveis independentes de acordo com os níveis adotados.

**Tabela 2.2 – Variáveis independentes e níveis utilizados.**

Variáveis independentes	Níveis				
	-1,68	-1	0	+1	1,68
Massa de alface [kg] – $X_1$	2,16	2,5	3,0	3,5	3,84
Tempo de espera para refrigeração [min]– $X_2$	79	120	180	240	280
Taxa de Bombeamento [ $m^3 h^{-1}$ ] – $X_3$	7	15	22	29	36*

\*Esse valor representa o nível 2,0.

As variáveis de interesse no estudo, ou seja, as variáveis-respostas foram o tempo de processo ( $Y_1$ ), consumo de energia do sistema ( $Y_2$ ), perda de água da alface ( $Y_3$ ) e vida pós-colheita ( $Y_4$ ) em câmara de estocagem com temperatura média de 1 °C e umidade relativa de 95-100 %. A Tabela 2.3 apresenta todos os ensaios com suas combinações.

**Tabela 2.3 – Planejamento fatorial completo de ensaios de dois níveis.**

Ensaios	Variável Independente			Variável Dependente			
	Massa de alface $X_1$	Tempo de espera $X_2$	Vazão de bombeamento $X_3$ ( $m^3 h^{-1}$ )	Tempo de processo $Y_1$ (min)	Consumo de energia $Y_2$ (kWh)	Perda de água $Y_3$ (%)	Vida pós-colheita $Y_4$ (dia)
01	+1	+1	+1				
02	-1	+1	+1				
03	+1	-1	+1				
04	-1	-1	+1				
05	+1	+1	-1				
06	-1	+1	-1				
07	+1	-1	-1				
08	-1	-1	-1				
09	0	0	0				
10	0	0	0				
11	0	0	0				
12	-1,68	0	0				
13	+1,68	0	0				
14	0	-1,68	0				
15	0	+1,68	0				
16	0	0	-2,00				
17	0	0	+2,00				

O tempo de processo foi medido a partir do início do acionamento das bombas de vácuo até o momento em que uma das temperaturas dos sensores das alfaces chegou aos 2 °C. O consumo de energia foi calculado pelos dados da potência adquiridos durante o resfriamento. A perda de massa foi calculada pela subtração da massa inicial de alfaces

colocadas dentro da câmara de vácuo menos a massa final de alfaces após o término do resfriamento a vácuo. A vida pós-colheita foi determinada por uma análise sensorial.

Com a realização dos 17 ensaios (Tabela 2.3) foi possível a construção de curvas de resfriamento, de queda de pressão, de perda de massa e consumo de energia para cada ensaio. Com isso foi possível uma discussão sobre o comportamento das mesmas frente ao processo de resfriamento adotado.

### 2.3.3. Preparo das Amostras

Para manter uma uniformidade de condições das amostras nos diferentes experimentos, de acordo com os tempos de espera da refrigeração propostos no planejamento experimental, foi utilizada uma câmara de condicionamento. Assim que as alfaces chegaram ao laboratório foram imediatamente colocadas nessa câmara de condicionamento para uniformização da temperatura. A câmara manteve as amostras sob temperaturas de  $21\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa do ar entre 70-75 %. Um esquema da câmara é apresentado na Figura 2.6.

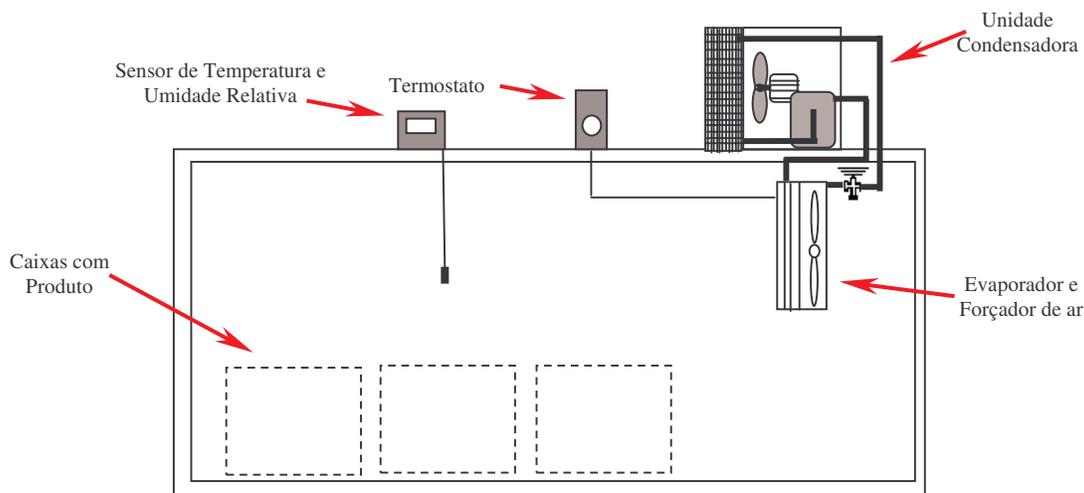


Figura 2.6 – Esquematização da câmara de condicionamento da temperatura das alfaces.

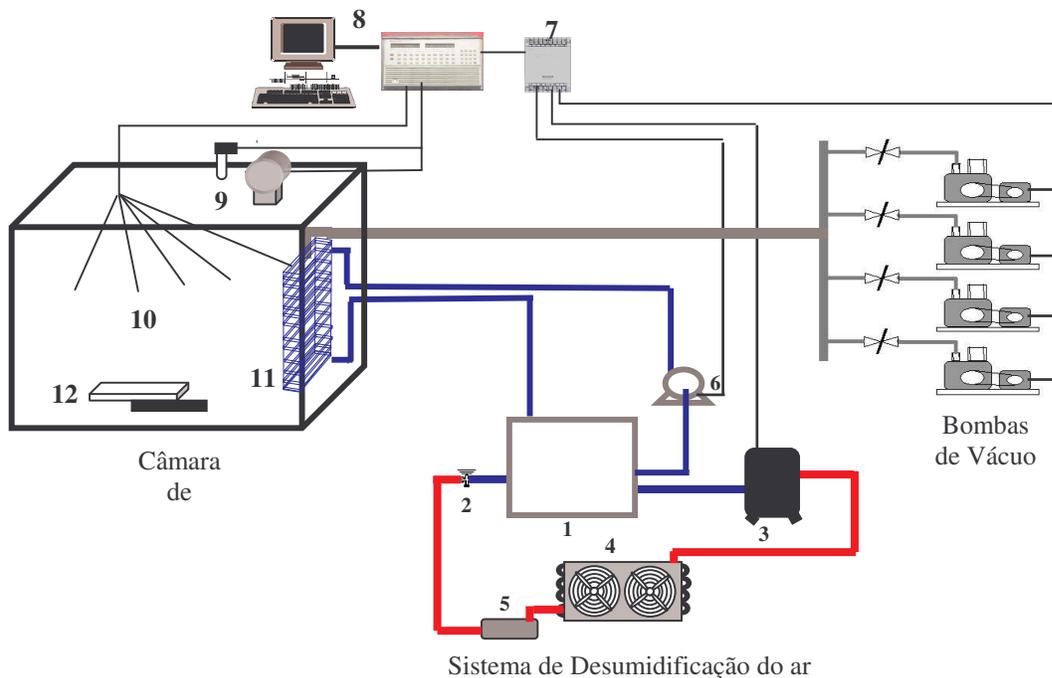
A câmara de condicionamento de temperatura para as amostras é composta de um sistema de refrigeração com uma unidade condensadora da marca Elgin, modelo TCA 1028-D, evaporador e forçador de ar da marca MacQuay modelo MAC23A, além de um termostato eletrônico da marca FullGauge, modelo FE-05. A Figura 2.7 apresenta a câmara.



Figura 2.7 – Câmara de condicionamento da temperatura das amostras.

### 2.3.4. Resfriamento a Vácuo: Montagem experimental

Um esquema da montagem experimental utilizada no resfriamento a vácuo pode ser visto na Figura 2.8, e os detalhes da instalação foram apresentados no Capítulo I.



- |                                    |                                |
|------------------------------------|--------------------------------|
| 1 – Reservatório de etileno-glicol | 7 – Transdutor de potência     |
| 2 – Válvula de expansão            | 8 – Sistema aquisição de dados |
| 3 – Compressor Hermético           | 9 – Sensores de pressão        |
| 4 – Condensador                    | 10 – Sensores de Temperatura   |
| 5 – Filtro                         | 11 – Trocador de calor         |
| 6 – Bomba centrífuga               | 12 – Célula de carga           |

Figura 2.8 – Esquema simplificado da montagem experimental.

As bombas de vácuo utilizadas são bombas mecânicas de paletas rotativas da HF-Vácuo Ltda. Foram utilizadas três bombas de vazões de  $7 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  e uma com  $15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  associadas em paralelo, de tal forma que, obedeçam ao planejamento experimental.

As alfaces foram retiradas da câmara de condicionamento e imediatamente pesadas até a massa correspondente a cada ensaio de acordo com o planejamento experimental descrito anteriormente. Após a pesagem, foi aspergida água sobre as alfaces em quantidade fixa de 1 % sobre a massa das amostras. Foram então colocadas em caixa plástica e introduzidas dentro da câmara de vácuo. Três termopares foram colocados nas folhas (sendo um para cada alface distinta) e outro inserido no pedicelo de uma alface. As bombas foram ligadas e a válvula de comunicação entre a linha de vácuo e a câmara foi aberta.

As massas das alfaces durante todo o processo de resfriamento a vácuo foram medidas por uma célula de carga remota a um indicador e transmissor.

O término de cada processo de resfriamento a vácuo foi determinado pela temperatura das folhas, pois elas se resfriam mais rápido que o pedicelo e podem congelar caso o resfriamento continue. Ao alcançarem os  $2 \text{ }^\circ\text{C}$  o processo foi interrompido; a válvula de comunicação fechada e as bombas desligadas. Uma válvula de alívio foi aberta de forma que o ar entrasse na câmara e a pressão da mesma se igualasse com a ambiente de uma maneira não abrupta. Imediatamente as alfaces foram transferidas para a câmara de estocagem.

Durante todo o processo de resfriamento a vácuo a massa total (alface, água aspergida e embalagem), a temperatura das alfaces, a pressão interna da câmara e o consumo energético foram medidos em tempo real através de um sistema de aquisição de dados composto por microcomputador e uma aquisição modelo HP 3852A.

A potência consumida no processo de resfriamento a vácuo foi monitorada ao longo de todos os ensaios, desde o acionamento das bombas de vácuo até o término do processo. O sistema de refrigeração para a desumidificação do ar foi ligado antes do início dos

ensaios para que a temperatura do trocador de calor, interno à câmara, estivesse na temperatura de  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  no início do bombeamento.

### 2.3.5. Estocagem das Amostras

Após o resfriamento as alfaces foram colocadas na câmara de estocagem. A câmara manteve-se na temperatura média de  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa entre 95-100 %. Segundo HARDENBURG *et al.* (1990) e THOMPSON *et al.* (1998) a temperatura ideal de estocagem para alfaces é de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , porém nessa condição, devido à grande variação de temperatura em torno do “set-point” ocasionada pelo sistema de refrigeração da câmara, as alfaces poderiam congelar. Dessa forma optou-se pela temperatura média de estocagem de  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Na Figura 2.9 podem ser vistas as alfaces estocadas e acondicionadas dentro das caixas plásticas.

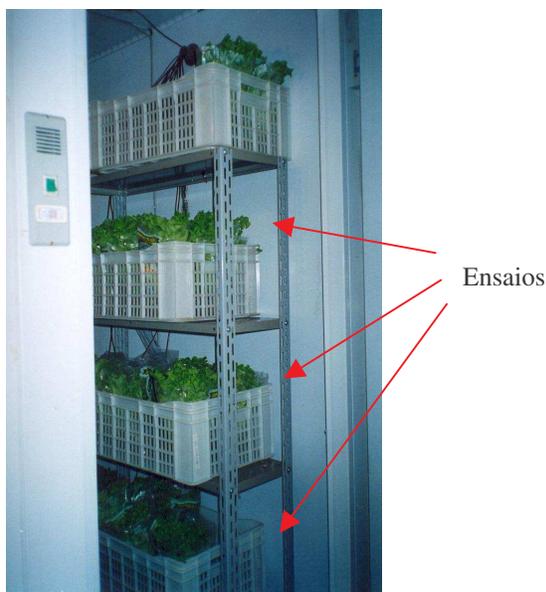


Figura 2.9 – Alfaces estocadas na câmara frigorífica.

### 2.3.6. Avaliação da Vida Pós-colheita

As amostras tiveram suas vidas pós-colheita determinadas através de uma avaliação sensorial. A avaliação sensorial consistiu de uma análise visual das amostras quanto sua qualidade geral, onde foi utilizado um teste de escala hedônica, e outro teste quanto à intenção de compra. Maiores detalhes sobre a análise e resultados são apresentados no Capítulo 3.

## 2.4. Resultados e Discussões

### 2.4.1. Perfil das Temperaturas

Houve uma diferença entre as temperaturas das folhas devido a dificuldade de inserir o termopar na folha sempre no mesmo ponto e também, por vezes, alguns se deslocaram, devido à movimentação de ar dentro da câmara, durante o processo de vácuo soltando-se das folhas. Algumas repetições de experimentos foram necessárias devido a esse problema.

A temperatura do pedicelo em todos os ensaios permaneceu maior que das folhas, como já era esperado, devido à relação da área superficial pelo volume não ser tão alta quanto à das folhas. A temperatura da superfície do trocador interno sobe rapidamente enquanto a temperatura da alface desce, essa grande demanda de carga térmica liberada para o sistema de refrigeração ocorre no momento em que se atinge a pressão de vapor da água na alface (“flash point”). O aumento da temperatura da superfície do trocador de calor se deve a grande quantidade de vapor de água oriunda das alfaces que, em seguida, é condensada e congelada no trocador de calor, transferindo calor latente para este e para o fluido refrigerante secundário (etileno-glicol).

Na Figura 2.10 são apresentadas as curvas dos quatro primeiros ensaios do planejamento experimental (Tabela 2.3). Nelas pode-se notar que os ensaios, onde as massas de alface foram menores, curvas (b) e (d), o tempo de processo foi menor quando comparado com os ensaios, onde as massas de alface foram maiores, curvas (a) e (c). Esse comportamento indica, para essa montagem experimental, uma influência direta da quantidade de produto a ser resfriada sobre o tempo do processo de resfriamento a vácuo.

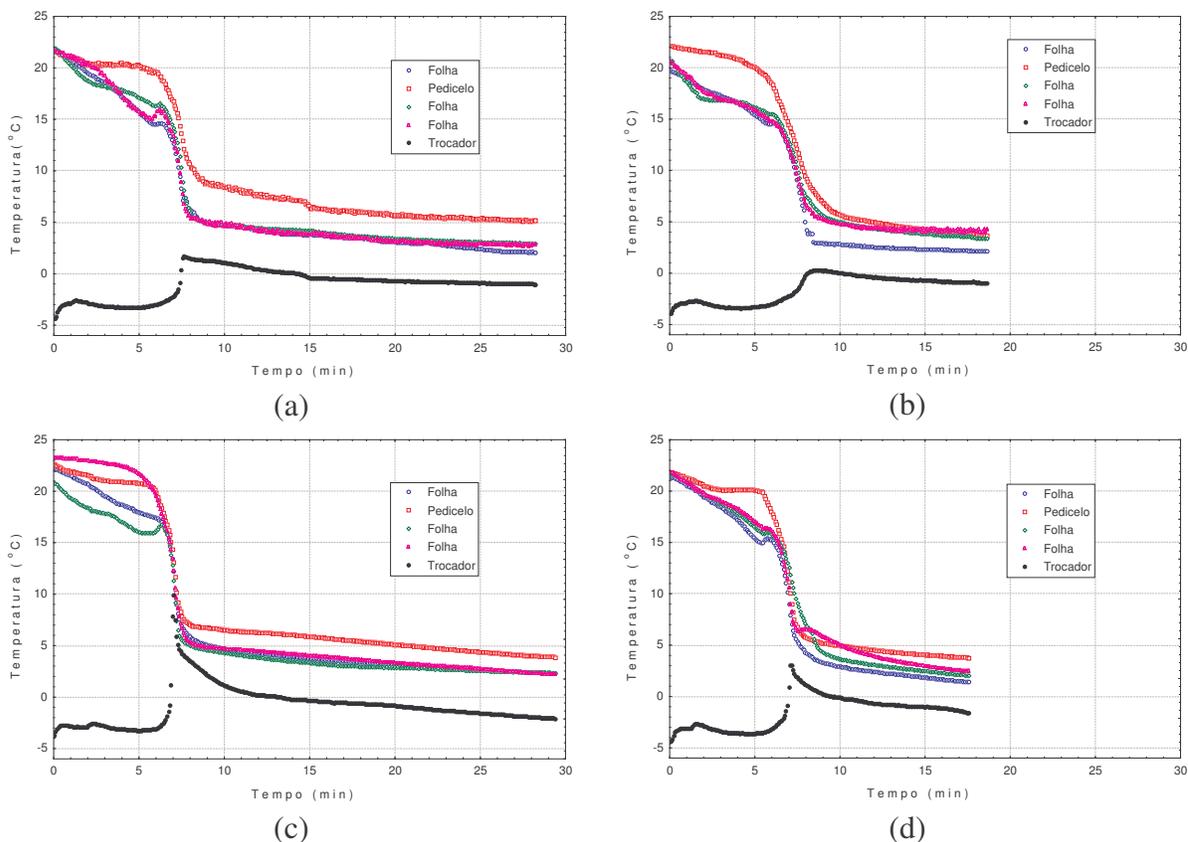


Figura 2.10 – Curvas de resfriamento à vazão de  $29 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ : (a) massa de alface 3,5 kg , tempo de espera 4h; (b) massa de alface 2,5 kg , tempo de espera 4 h; (c) massa de alface 3,5 kg, tempo de espera 2 h; (d) massa de alface 2,5 kg, tempo de espera 2 h.

Na Figura 2.11, de maneira similar a Figura 2.10, os ensaios onde as massas foram menores ocasionaram um tempo menor de processo, porém quando se comparam as duas figuras (2.10 com 2.11), percebe-se que a vazão, assim como a massa, foi decisiva no tempo de processo, já que os valores de tempo na Figura 2.11 foram superiores que aos da Figura 2.10. A razão dessa diferença está na capacidade de retirada e, posterior, condensação dos vapores de água; quanto maior a vazão, maior essa capacidade de retirada e, por consequência, a água será evaporada do produto com maior velocidade.

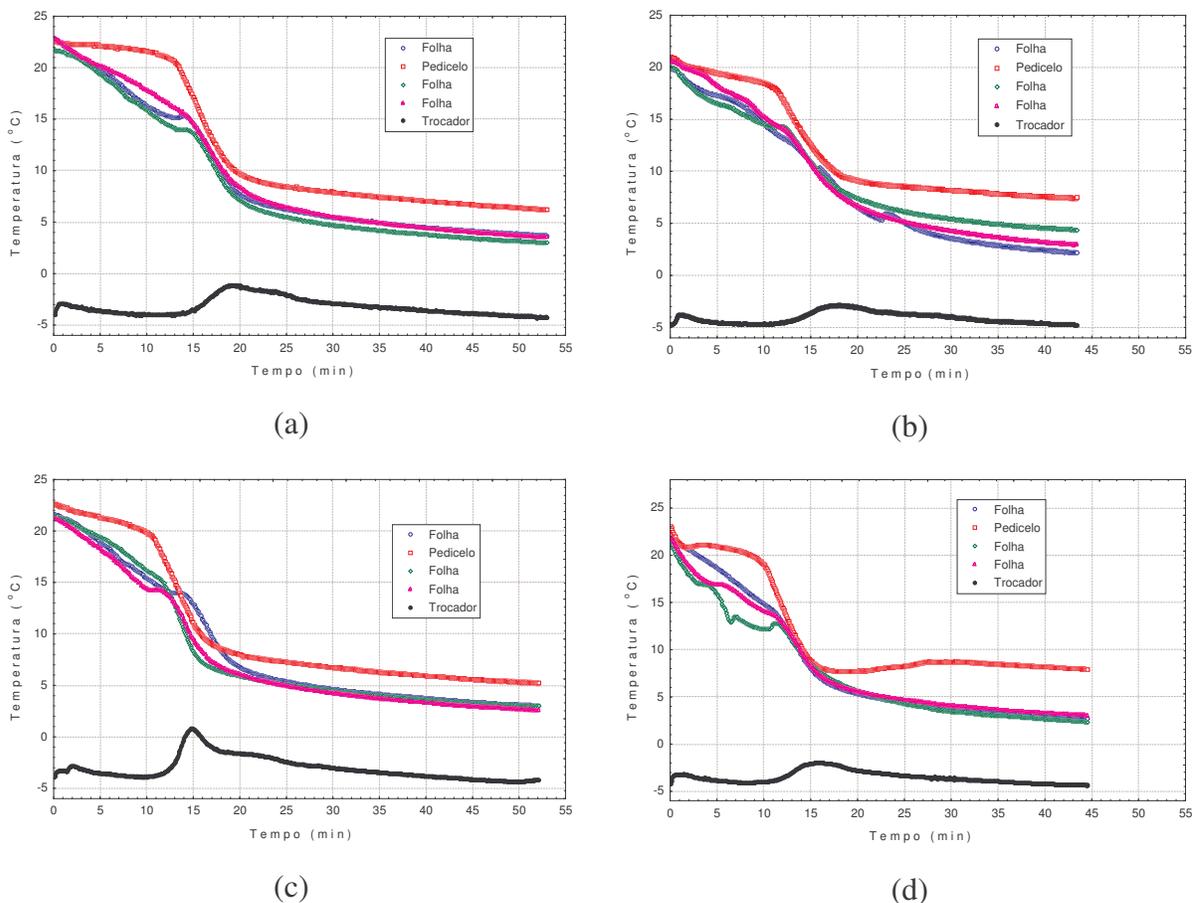


Figura 2.11 – Curvas de resfriamento à vazão de  $15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ : (a) massa de alface 3,5 kg , tempo de espera 4 h; (b) massa de alface 2,5 kg , tempo de espera 4 h; (c) massa de alface 3,5 kg, tempo de espera 2 h; (d) massa de alface 2,5 kg, tempo de espera 2 h.

Ainda na Figura 2.11, observa-se que a temperatura do trocador, assim como na Figura 2.10, aumenta no momento em que o vapor de água formado na câmara é condensado e/ou congelado na superfície do trocador. Esse aumento não foi tão alto como nos ensaios da Figura 2.10, devido a menor vazão utilizada, e conseqüente, menor “pico” de demanda térmica.

Os demais históricos dos ensaios são apresentados no Anexo III. A Figura 1 do Anexo III, corresponde aos dois ensaios dos pontos axiais da variável independente vazão de bombeamento ( $X_3$ ), de acordo com o planejamento experimental descrito na Tabela 2.3. Entre eles apenas variou-se a vazão de bombeamento tendo, como conseqüência direta, diferença no tempo de resfriamento e na temperatura do trocador de calor. Na maior vazão

(curva *b*), o tempo de término de processo foi 4,7 vezes menor que no ensaio com menor vazão, em contrapartida a vazão maior foi 5,1 vezes maior que a vazão menor.

A temperatura do trocador de calor teve um “pico” no ensaio de maior vazão (curva *b*) evidenciando, ainda mais que os outros ensaios, a demanda térmica gerada pela condensação da grande quantidade de vapor de água oriunda das alfaces quando a pressão de saturação é atingida. A vazão de bombeamento determina a capacidade de retirada e condensação desses vapores de água da câmara, que possuem, devido à baixa pressão, um alto volume específico (cerca de  $85 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  à pressão absoluta de 5,0 mmHg). Dessa forma, quanto maior for a vazão de bombeamento, maior será o pico de demanda térmica do sistema de refrigeração usado na desumidificação da linha de vácuo.

A Figura 2 do Anexo III corresponde aos dois ensaios dos pontos axiais da variável independente massa de alface ( $X_1$ ), de acordo com o planejamento experimental apresentado na Tabela 2.3. Nesses ensaios (curvas *a* e *b*) variou-se apenas a massa de alface resfriada, sendo mantidas iguais as demais variáveis. Como resultado teve-se um maior tempo de processo no ensaio onde a massa foi maior, e também maior pico de demanda térmica no trocador.

A maior quantidade de massa significou um maior tempo de processo já que, mantida as outras variáveis fixas, é necessário que uma maior quantidade de água seja evaporada para atingir a mesma temperatura do outro ensaio com menor quantidade de alface.

A temperatura do trocador de calor atingiu um valor mais alto no ensaio de maior massa, pois a quantidade de vapor oriunda do produto foi maior, o que significou uma maior condensação no trocador de calor e, portanto, maior quantidade de calor transferido.

Na Figura 3 do Anexo III são apresentadas as curvas de resfriamento dos ensaios correspondentes aos pontos axiais da variável tempo de espera ( $X_2$ ), de acordo com o planejamento apresentado da Tabela 2.3. Nesses ensaios (curvas *a* e *b*) os tempos de

processo e as demais condições foram similares. Como se variou apenas o tempo à espera do resfriamento, estando as alfaces sempre condicionadas em temperatura e umidade relativa antes do início dos processos, já era de se esperar que os resultados entre esses dois ensaios fossem similares.

Apenas houve uma acentuada diferença entre as curvas de resfriamento das folhas do ensaio 15 no início do processo, que pode ser explicada pela dificuldade de se inserir o termopar nas folhas de maneira estável, resultado em diferenças no mesmo ensaio no início do bombeamento, onde o deslocamento de ar dentro da câmara é mais intenso.

A Figura 4 do Anexo III apresenta as curvas de resfriamento dos ensaios correspondentes aos pontos centrais do planejamento experimental, de acordo com a Tabela 2.3. Nesses experimentos não se variou nenhuma das variáveis controladas, tendo como objetivo avaliar a capacidade de repetição dos ensaios e, posterior, cálculo do erro experimental dentro da análise do planejamento experimental.

Pelas curvas apresentadas nessa Figura 4, pode-se verificar que os tempos de processo e as curvas de resfriamento entre os três ensaios apresentados são muito similares, ocorrendo o mesmo entre as temperaturas do trocador de calor.

#### **2.4.2. Perfil das Pressões**

As curvas de pressões apresentadas a seguir (Figuras 2.12 e 2.13) apresentam as medidas em duas escalas distintas, uma mais abrangente, desde valores ambientes até as medidas finais alcançadas na câmara de vácuo; outra mais restrita, desde valores abaixo de 40 mmHg até os valores finais alcançados.

Na Figura 2.12 mostrada a seguir, variou-se a massa de alface ( $X_1$ ) e o tempo de espera ( $X_2$ ) de acordo com o planejamento experimental (Tabela 2.3), percebe-se que as pressões finais alcançadas, assim como, a queda da pressão ao longo do processo, não apresentaram muitas diferenças entre si. Esse comportamento indica que a variação da

massa, nessas condições de ensaios, não influenciou a queda da pressão, apesar de que quanto maior a massa, maior a área superficial e, conseqüentemente, maior quantidade de vapor se forma. Ou seja, a vazão de bombeamento utilizada foi capaz de retirar os vapores de água formados dentro da câmara de forma semelhante nas duas condições de massa.

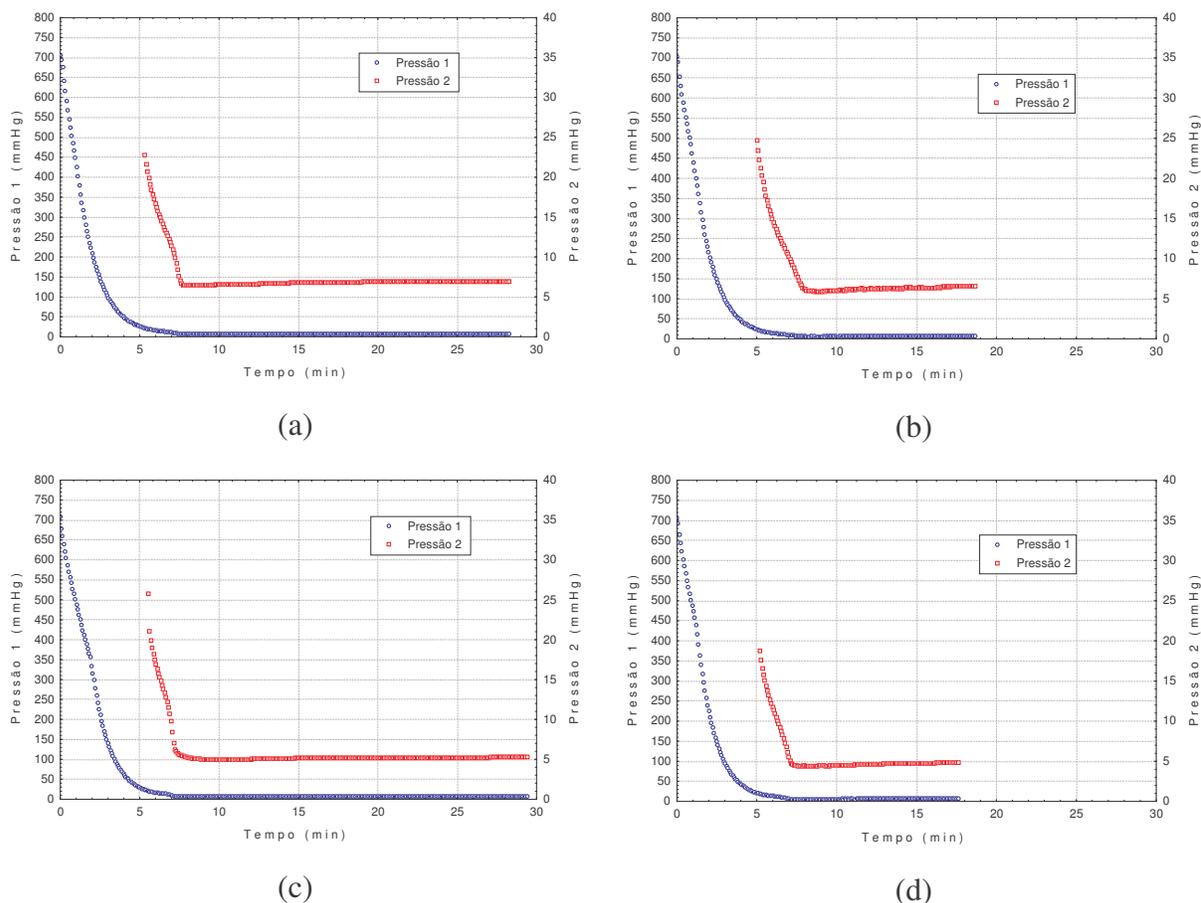


Figura 2.12 – Curvas de pressão à vazão de  $29 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ : (a) massa de alface 3,5 kg, tempo de espera 4 h; (b) massa de alface 2,5 kg, tempo de espera 4 h; (c) massa de alface 3,5 kg, tempo de espera 2 h; (d) massa de alface 2,5 kg, tempo de espera 2 h.

Na Figura 2.13 são apresentadas as curvas de pressão onde novamente variou-se as massas de produto ( $X_1$ ) e o tempo de espera ( $X_2$ ) entre os ensaios, de acordo com o planejamento experimental (Tabela 2.3). Assim como na Figura 2.12, os ensaios da Figura 2.13, não apresentaram maiores diferenças entre si em relação as suas pressões finais e no formato das curvas. Entretanto, quando se comparam as duas Figuras, 2.12 com a 2.13, os tempos de processo foram maiores e as pressões finais, ligeiramente superiores na Figura

2.13. Isso acontece, pois as vazões utilizadas na Figura 2.13 são inferiores, diminuindo a capacidade de retirada dos vapores de água ocasionando um ligeiro aumento nas pressões finais.

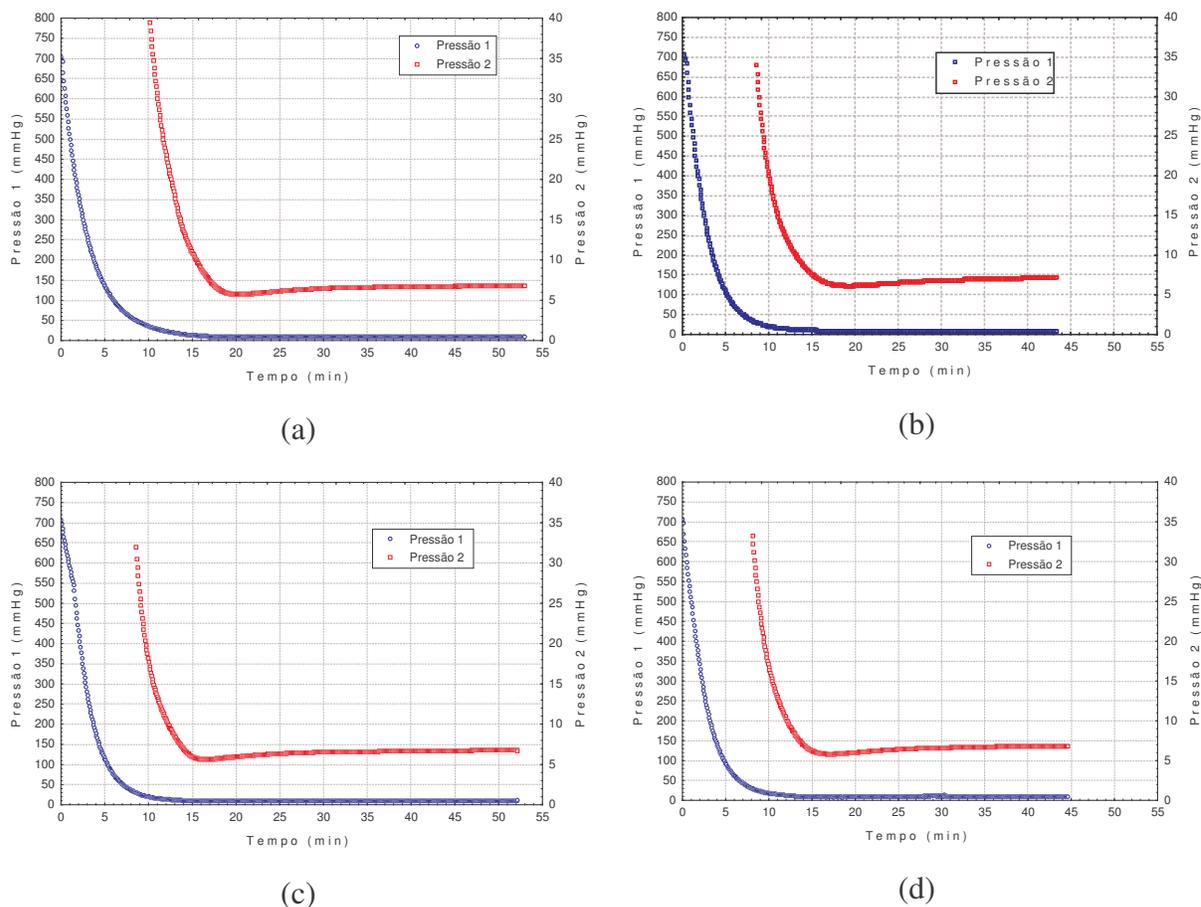


Figura 2.13 – Curvas de pressão à vazão de  $15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ : (a) massa de alface 3,5 kg , tempo de espera 4h; (b) massa de alface 2,5 kg , tempo de espera 4 h; (c) massa de alface 3,5 kg, tempo de espera 2 h; (d) massa de alface 2,5 kg , tempo de espera 2h.

Os históricos de pressão do restante dos ensaios são apresentados no Anexo III. Na Figura 5 do Anexo III variou-se apenas a vazão de bombeamento ( $X_3$ ) entre os dois ensaios (curvas *a* e *b*), de acordo com o planejamento experimental (Tabela 2.3). Comparando-se as pressões monitoradas nos ensaios dessa figura, fica ainda mais evidente a importância da vazão no tempo e também no valor final da pressão atingida. Na curva *a*, a pressão final foi maior que na curva *b*, inclusive apresentando uma discreta oscilação durante o tempo.

Na Figura 6 do Anexo III variou-se apenas a massa de alface ( $X_1$ ) entre os dois ensaios (curvas *a* e *b*), de acordo com o planejamento experimental (Tabela 2.3). Pode-se notar que as pressões finais entre os ensaios foram similares assim como, a queda da pressão ao longo do tempo. Apenas o tempo de processo foi maior no ensaio com maior massa (curva *b*), pois quanto maior a massa maior quantidade de calor deve ser retirado da amostra.

A Figura 7 do Anexo III apresenta os ensaios 14 e 15 onde, de acordo com o planejamento experimental (Tabela 2.3), variou-se apenas o tempo de espera da refrigeração ( $X_2$ ). Comparando-se as curvas entre os dois ensaios não foi notada nenhuma grande diferença, tanto nas pressões finais atingidas quanto no perfil de queda das pressões. Evidenciando que o tempo de espera ( $X_2$ ) não deve influenciar as variáveis do processo estudadas.

Na Figura 8 do Anexo III são apresentados os ensaios relativos aos pontos centrais do planejamento experimental correspondentes aos ensaios 9, 10 e 11, conforme Tabela 2.3. Entre eles são mantidos os mesmos valores das variáveis independentes: massa de alface ( $X_1$ ), tempo de espera ( $X_2$ ) e vazão de bombeamento ( $X_3$ ). Pela Figura observa-se que não houve maiores diferenças entre os ensaios, reafirmando assim, a boa capacidade de repetição do sistema experimental montado, de maneira semelhante ao que aconteceu na Figura 4.

### 2.4.3. Perfil das Potências

Para a utilização dos dados da potência consumida no planejamento experimental proposto, foram calculados os consumos em kWh's relativos a cada ensaio realizado a partir dos dados de potência adquiridos ao longo do tempo de processo.

Em todos os ensaios a potência consumida foi maior no início dos processos, isso ocorreu devido à grande quantidade de ar retirada de dentro da câmara à pressão ambiente. Quanto maiores as vazões utilizadas (22, 29 e 36 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>) maiores foram os picos iniciais. À

medida que a pressão cai, com a retirada do ar de dentro da câmara, a potência consumida se estabiliza em um patamar, diferente entre os ensaios, devido as diferentes vazões adotadas, e também devido ao sistema de refrigeração para a desumidificação do ar.

A Figura 2.14 apresenta as potências consumidas nos ensaios em que apenas as massas de produto ( $X_1$ ) e tempos de espera ( $X_2$ ) foram alteradas.

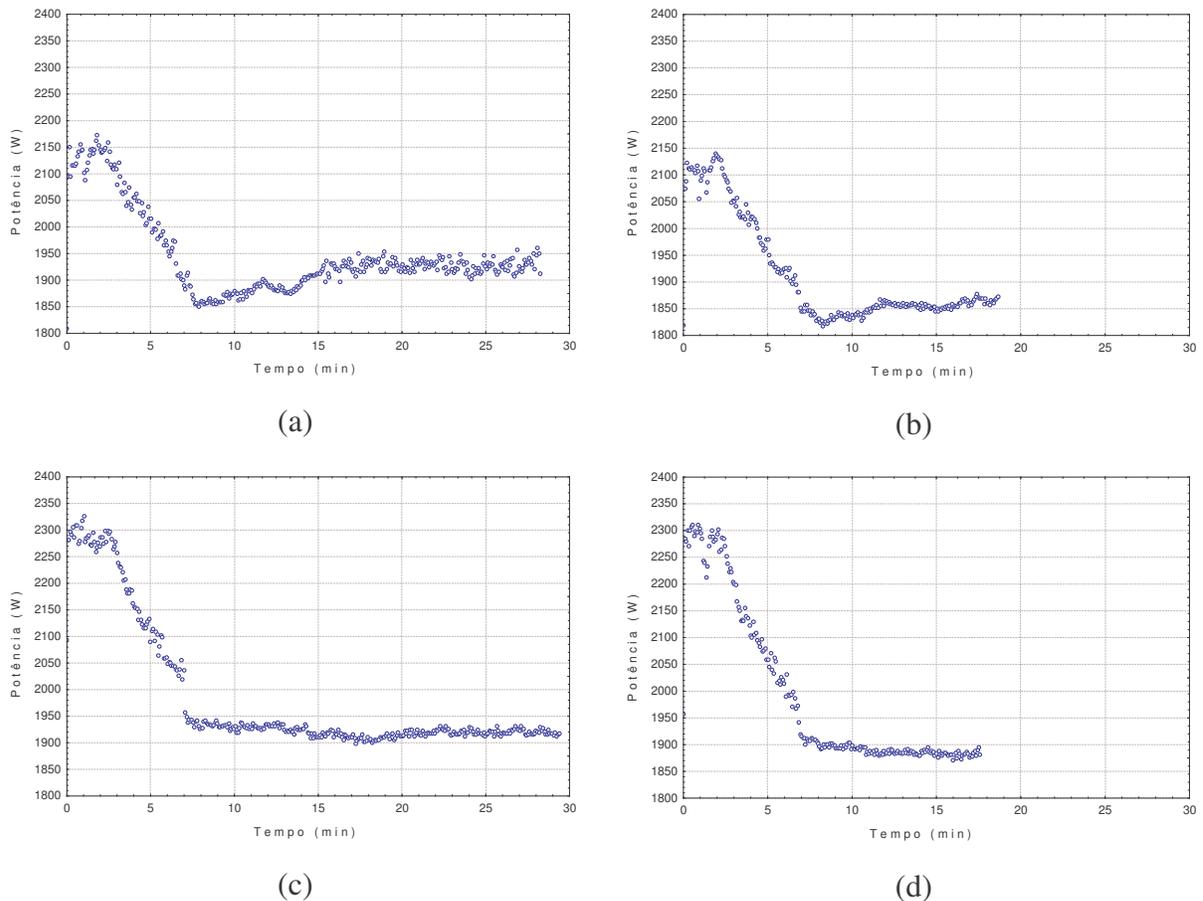


Figura 2.14 – Curvas de potência à vazão de  $29 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ : (a) massa de alface 3,5kg , tempo de espera 4h; (b) massa de alface 2,5 kg , tempo de espera 4h; (c) massa de alface 3,5 kg, tempo de espera 2 h; (d) massa de alface 2,5 kg , tempo de espera 2 h.

Observa-se na Figura 2.14 que o formato das curvas são muito semelhantes entre si, apenas o tempo de duração de cada processo diferenciou-as. Nota-se nas quatro curvas que o sistema de refrigeração não se desligou em nenhum momento durante os ensaios. O sistema começa ligado e as bombas começam a retirar o ar de dentro da câmara, a

temperatura de retorno do etileno-glicol sobe, fazendo com que o sistema não se desligue durante os minutos subseqüentes. O liga/desliga do sistema de refrigeração foi controlado pelas medidas da temperatura de retorno da solução de etileno-glicol ao reservatório.

Na Figura 2.15, variou-se novamente as massas de alface ( $X_1$ ) e tempos de espera ( $X_2$ ), porém com vazão de bombeamento menor que as da Figura 2.14.

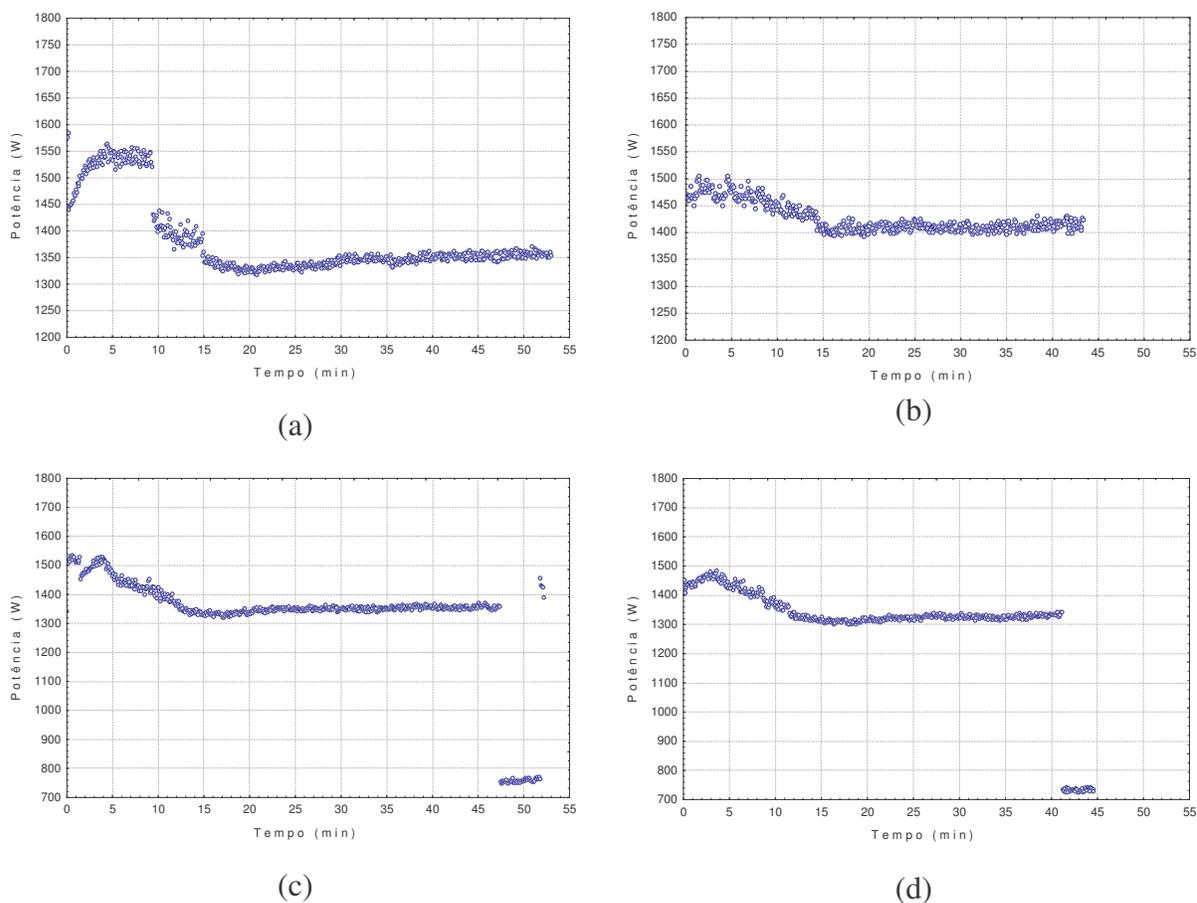


Figura 2.15 – Curvas de potência à vazão de  $15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ : (a) massa de alface 3,5 kg , tempo de espera 4 h; (b) massa de alface 2,5 kg , tempo de espera 4 h; (c) massa de alface 3,5 kg, tempo de espera 2 h; (d) massa de alface 2,5 kg , tempo de espera 2h.

Assim como na figura anterior, na Figura 2.15 as curvas não apresentaram grandes diferenças entre si, apenas nas curvas (c) e (d) o sistema de refrigeração desligou-se uma vez perto do término no processo. Quando se comparam as Figuras 2.14 e 2.15, percebe-se

que nessa última as curvas apresentaram valores de potência inferiores aos da Figura 2.14, devido as menores vazões de bombeamento.

Os históricos de potência dos demais ensaios são apresentados no Anexo III. A Figura 9 do Anexo III apresenta os ensaios em que se variou apenas a vazão de bombeamento ( $X_3$ ) segundo o planejamento experimental proposto (Tabela 2.3). Na curva (a) percebe-se o desligamento do sistema de refrigeração três vezes, já na curva (b) o acionamento do sistema de refrigeração continuou até o fim do resfriamento. A razão para o liga/desliga na curva (a) do sistema de refrigeração está na baixa vazão de bombeamento adotada ( $7 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ), insuficiente para permitir uma rápida retirada dos vapores de água das alfaces e posterior condensação/congelamento no trocador de calor. Com isso, a demanda térmica do sistema foi menor e o sistema desligou-se automaticamente pelo controlador utilizado.

Na figura 10 do Anexo III são apresentados os ensaios nos quais variou-se a massa de alface ( $X_1$ ), curvas (a) e (b), e os ensaios, onde apenas variou-se o tempo de espera ( $X_2$ ) da refrigeração das alfaces, curvas (c) e (d). Com exceção da curva (b), onde o tempo de processo foi maior, as demais curvas não apresentaram muitas diferenças com relação à potência consumida ao longo do tempo. A curva (b) teve um maior tempo de processo devida a maior massa de alface utilizada no ensaio. Nessas curvas o sistema de refrigeração para desumidificação do ar não foi desligado em nenhum instante após início do processo.

Na Figura 11 do Anexo III foi feita a repetição dos ensaios, de acordo com o planejamento experimental (Tabela 2.3), para a determinação da capacidade de repetição dos ensaios com relação à variável resposta potência consumida. Nessa Figura pode-se perceber a boa repetição desses ensaios (curvas a, b e c), pois não há diferenças significativas entre elas.

#### 2.4.4. Perfil das Perdas de Massa

Os resultados das perdas de massa durante o resfriamento a vácuo apresentaram um comportamento não esperado, onde os valores das massas na maioria dos experimentos aumentaram no início do processo. Esse aumento deveu-se ao deslocamento abrupto do ar dentro da câmara, e posterior formação de um gradiente de pressões, devido à ocupação da câmara pelas alfaces na caixa plástica e a localização da saída de ar da câmara que é feita na altura da célula de carga.

Esse comportamento foi tanto mais acentuado, quanto maiores foram as vazões e as massas iniciais. Com isso, muitos ensaios apresentaram um “pico” de massa no início do processo para depois, gradualmente, diminuir ao longo do resfriamento.

Outro comportamento não esperado foi o desvio apresentado no fim do resfriamento e início da pressurização da câmara. Após a temperatura de 2 °C do produto ser alcançada, uma válvula de alívio foi aberta para igualar a pressão da câmara de vácuo com a pressão ambiente. Durante a entrada do ar na câmara a célula de carga apresentou uma variação nos valores das massas para depois, estabilizar em um patamar diferente daquele pouco antes do fim do processo. Esse comportamento foi resultado da constante movimentação de ar e vapor no interior da câmara durante o bombeamento, interferindo na real medida da massa de alface.

Apesar destes comportamentos, o valor final medido, após a estabilização, correspondeu ao real valor da massa final de alface, sendo este, utilizado para a análise do planejamento experimental proposto e discutido no próximo item.

As Figuras a seguir (2.16 e 2.17) apresentam o comportamento das massas durante os comportamentos. Na Figura 2.16 são apresentados os ensaios de vazão  $29 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  onde se variaram as massas de alface ( $X_1$ ) e os tempos de espera ( $X_2$ ) de acordo com planejamento experimental (Tabela 2.3).

Nota-se na Figura 2.16 que a queda mais acentuada da massa esteve entre os tempos de 5 e 10 minutos, tempo em que a pressão de saturação da água no produto foi alcançada acelerando assim a vaporização da água do produto.

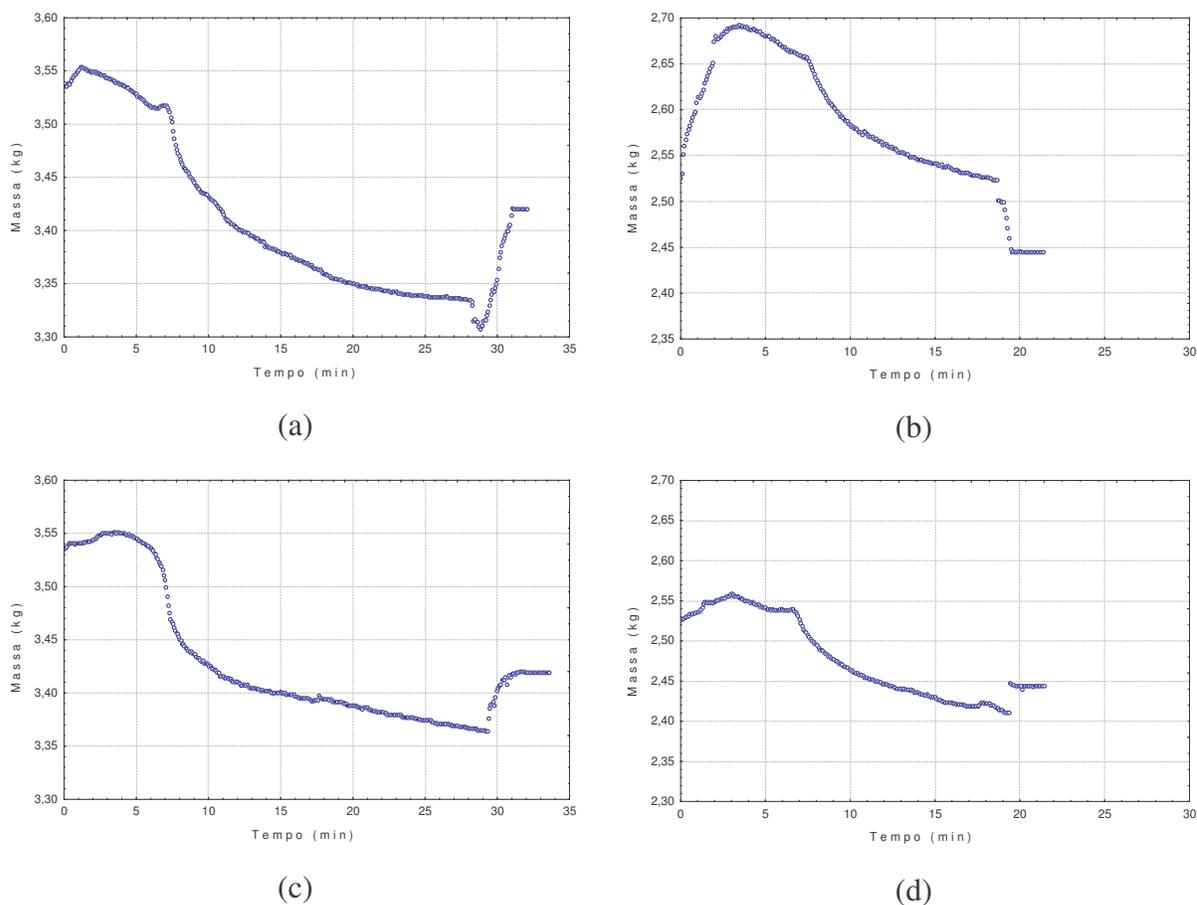


Figura 2.16 – Curvas de perda de massa à vazão de  $29 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ : (a) massa de alface 3,5kg , tempo de espera 4 h; (b) massa de alface 2,5 kg , tempo de espera 4 h; (c) massa de alface 3,5 kg, tempo de espera 2 h; (d) massa de alface 2,5 kg , tempo de espera 2 h.

Na Figura 2.17 novamente variaram-se as massas de alface ( $X_1$ ) e os tempos de espera ( $X_2$ ), porém a vazão de bombeamento foi menor,  $15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ . Em comparação com a Figura 2.16, além dos tempos de processo terem sido maiores, a perda de massa foi mais acentuada em tempos maiores, entre 15 e 20 minutos, ou seja, a pressão de saturação foi alcançada após um tempo maior.

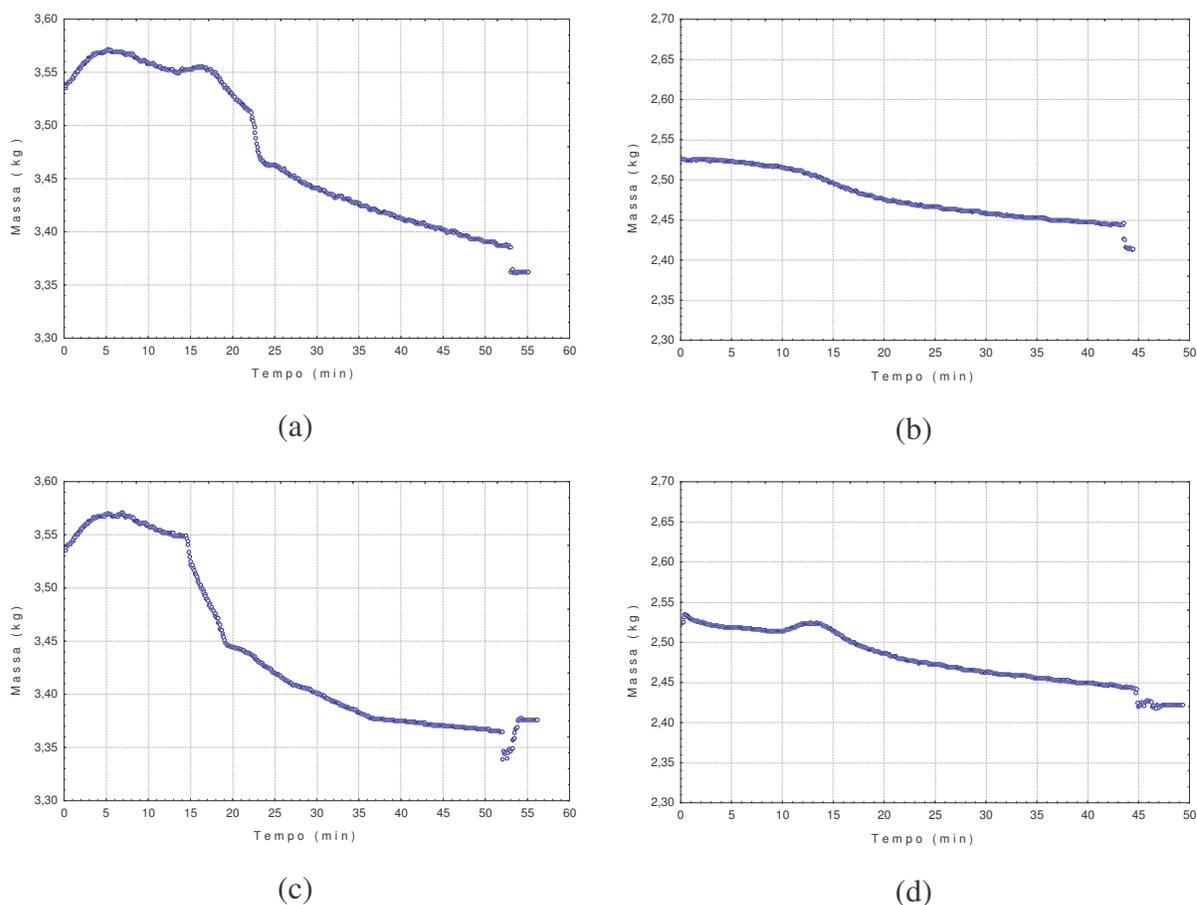


Figura 2.17 – Curvas de perda de massa à vazão de  $15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ : (a) massa de alface 3,5 kg , tempo de espera 4 h; (b) massa de alface 2,5 kg , tempo de espera 4h; (c) massa de alface 3,5 kg, tempo de espera 2 h; (d) massa de alface 2,5kg , tempo de espera 2 h.

As demais figuras apresentando o histórico da perda de massa dos ensaios são apresentados no Anexo III. Na Figura 12 do Anexo III, as vazões de bombeamento ( $X_3$ ) foram alteradas mantendo-se as mesmas massas. No ensaio 17 (curva *b*), onde a vazão foi de  $36 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , nota-se que a pressão de saturação da água no produto foi atingida logo após os 5 minutos de processo, acarretando uma queda acentuada na massa. Já no ensaio 16, (curva *a*), onde a vazão foi de  $7 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ , a perda de massa praticamente manteve-se constante após o “pico de massa”, isso ocorreu porque a baixa vazão não permitiu que a pressão de saturação da água na alface fosse alcançada; assim, a perda de massa foi gradual e em decorrência apenas do diferencial de pressões de vapor de água entre o ambiente da câmara e a alface.

Na Figura 13 do Anexo III estão os ensaios, variou-se a massa de alface ( $X_1$ ), curvas *a* e *b*. Nelas pode-se perceber a queda mais acentuada de massa entre os 8 e 15 minutos de processo e, apesar dos tempos finais de processo serem diferentes, o comportamento das curvas são bem semelhantes. Ainda nessa Figura 13, são apresentadas as curvas *c* e *d* de perda de massa, onde apenas o tempo de espera ( $X_2$ ) foi variado; essas curvas apresentaram uma pequena diferença entre si devido aos problemas apresentados nas medições de massa pela célula de carga e explicados no início deste item, ainda assim, ambas apresentaram uma maior perda de massa entre os tempos de 8 e 13 minutos de processo e tiveram valores finais de massa muito semelhantes.

Na Figura 14 (do Anexo III), estão os ensaios de repetição, isto é, nas mesmas condições de vazão, massa e tempo de espera. Assim como na Figura anterior os problemas apresentados pela célula de carga, impediu que as curvas fossem muito semelhantes entre si, porém as medidas finais de perda de massa foram muito próximas, não interferindo no planejamento experimental proposto e analisado a seguir.

#### **2.4.5. Resultados do Planejamento Experimental**

Os resultados do planejamento experimental fatorial completo de dois níveis, realizado de acordo com Tabela 2.3 e discutido no item 2.3.2, são apresentados na Tabela 2.4.

As variáveis monitoradas foram adquiridas pelo sistema de aquisição de dados e posteriormente trabalhadas em planilhas para computação final de seus valores. A variável energia consumida foi calculada pelos valores de potência ao longo do tempo em cada ensaio. A variável perda de massa foi calculada pela diferença da massa inicial e final em cada ensaio. A vida pós-colheita foi determinada pela avaliação sensorial descrita no item 2.3.6.

**Tabela 2.4 – Resultado do planejamento fatorial completo dos ensaios com alfices.**

Ensaio	Variável Independente			Variável dependente			
	Massa de alfice X <sub>1</sub> (kg)	Tempo de espera X <sub>2</sub> (min)	Vazão de bombeamento X <sub>3</sub> (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	Tempo de processo Y <sub>1</sub> (min)	Consumo de energia Y <sub>2</sub> (kWh)	Perda de massa Y <sub>3</sub> (%)	Vida pós- colheita Y <sub>4</sub> (dia)
01	3,50	240	29	28,25	0,92	3,25	20
02	2,50	240	29	18,65	0,60	3,15	20
03	3,50	120	29	29,40	0,98	3,28	22
04	2,50	120	29	17,60	0,59	3,23	22
05	3,50	240	15	53,00	1,22	4,91	20
06	2,50	240	15	43,37	1,03	4,02	20
07	3,50	120	15	52,15	1,15	4,52	22
08	2,50	120	15	44,60	0,97	4,10	22
09	3,00	180	22	25,03	0,71	3,57	21
10	3,00	180	22	25,23	0,69	3,47	21
11	3,00	180	22	25,93	0,74	3,82	22
12	2,16	180	22	21,45	0,61	3,17	21
13	3,84	180	22	52,52	1,51	4,38	21
14	3,00	79	22	24,65	0,71	3,37	23
15	3,00	280	22	25,35	0,71	3,38	19
16	3,00	180	7	79,99	1,52	5,44	19
17	3,00	180	36	16,90	0,64	3,01	21

Os resultados apresentados na Tabela 2.4 foram analisados no software Statistica 5.0 que forneceu modelos quadráticos empíricos para cada variável-resposta. Esses modelos descrevem o processo de resfriamento a vácuo dentro dos níveis utilizados nas variáveis independentes. As análises estatísticas dos modelos e as influências de cada variável independente sobre as variáveis dependentes são apresentadas a seguir.

### 2.4.5.1. Tempo de processo ( $Y_1$ )

Na determinação de quais as variáveis independentes, juntamente com suas interações, possuem influência sobre o tempo do resfriamento a vácuo o planejamento experimental apresentado na Tabela 2.4 foi analisado no software Statistica.

A Tabela 2.5 e a Figura 2.18 apresentam os resultados das influências sobre o tempo do processo. As variáveis significativas estão anotadas com um asterisco (\*) na Tabela 2.5. Dentre as variáveis estudadas a massa de produto ( $X_3$ ) e a vazão de bombeamento ( $X_1$ ), tanto na sua forma linear quanto na quadrática, foram as que influenciaram no tempo final do resfriamento ( $Y_1$ ). Assim, o tempo de espera antes de início do resfriamento da alface não teve influência significativa sobre o tempo de processo..

**Tabela 2.5 – Efeitos das variáveis independentes e suas interações sobre o tempo final de processo ( $Y_1$ ).**

Interação	Efeito	Erro
Média/Interação*	25,44	0,27
$X_1$ - Massa (linear)*	13,30	0,26
$X_1$ - Massa (quadrático)*	8,50	0,29
$X_2$ - Tempo de espera (linear)	0,10	0,26
$X_2$ - Tempo de espera (quadrático)	0,03	0,29
$X_3$ - Vazão (linear)*	-28,18	0,24
$X_3$ - Vazão (quadrático)*	11,67	0,21
Massa ( $X_1$ ) x Tempo de Espera ( $X_2$ )	-0,03	0,33
Massa ( $X_1$ ) x Vazão ( $X_3$ )	1,06	0,33
Tempo de Espera ( $X_2$ ) x Vazão ( $X_3$ )	0,07	0,33

\*efeito significativo ao nível de 95 %.

Pela Figura 2.18 se percebe mais claramente as variáveis que influenciaram no tempo de processo, onde o limite da significância de 95 % ( $p = 0,05$ ) foi traçado. Observa-se ainda nessa figura que a interação entre a massa e vazão ( $1x3$ ) esteve perto de ser significativa a 95 %. Apesar das duas variáveis sozinhas serem significativas, a interação entre elas não foi importante para o tempo final de processo.

A vazão de bombeamento apresentou uma influência negativa sobre o tempo, isto é, um aumento da mesma significará uma diminuição do tempo final de processo. O mesmo

não ocorre com a massa, onde um aumento da mesma significará um aumento do tempo de processo.

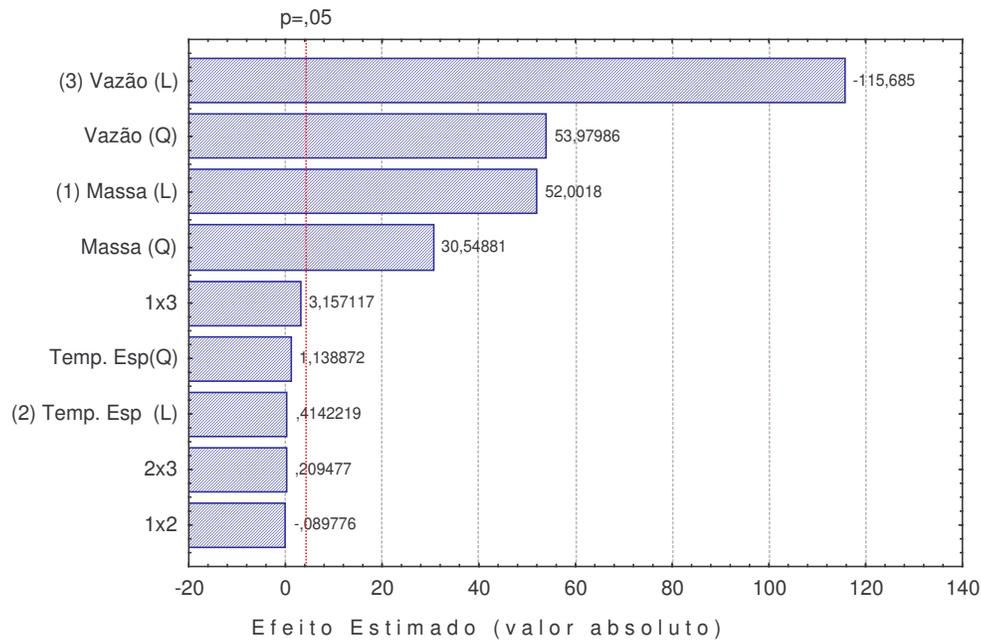


Figura 2.18 – Gráfico de Pareto, efeitos das variáveis independentes sobre o tempo de processo.

Analisados os efeitos sobre o tempo final de processo e retiradas as variáveis que não tiveram influência, ajustou-se um modelo empírico para essa variável dependente através do software Statistica. A equação 2.2 representa o modelo ajustado para a variável tempo de processo ( $Y_1$ ):

$$Y_1 = 236,85 - 91,24X_1 + 17,42X_1^2 - 6,65X_3 + 0,11X_3^2 \tag{2.2}$$

O modelo (equação 2.2) apresentou um coeficiente de correlação ( $R^2$ ) de 0,976, o que explica 97,6 % da variação dos dados experimentais em torno da média. A Figura 2.19 apresenta a relação entre os valores experimentais e os valores preditos pelo modelo e a Tabela 2.6 seus valores numéricos juntamente com o erro relativo ao valor experimental.

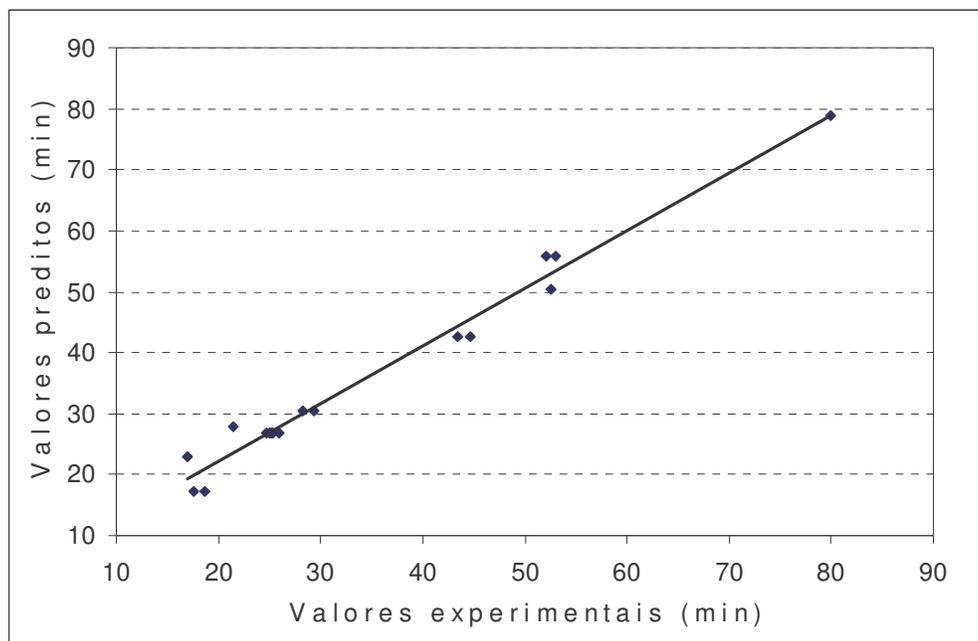


Figura 2.19 – Relação entre os tempos de processo observados e os preditos pelo modelo.

**Tabela 2.6 – Comparação entre os valores de tempos de processo experimentais e os preditos pelo modelo.**

Ensaio	Valor experimental (min)	Valor Predito pelo Modelo (min)	Erro (%)
1	28,25	30,57	8,19
2	18,65	17,29	-7,32
3	29,40	30,57	3,96
4	17,60	17,29	-1,79
5	53,00	55,91	5,48
6	43,37	42,63	-1,72
7	52,15	55,91	7,20
8	44,60	42,63	-4,43
9	25,03	26,85	7,27
10	25,23	26,85	6,42
11	25,93	26,85	3,55
12	21,45	27,99	30,47
13	52,52	50,30	-4,23
14	24,65	26,85	8,92
15	25,35	26,85	5,92
16	79,99	78,75	-1,55
17	16,90	23,07	36,51

Observa-se, pela Tabela 2.6, que os ensaios 12 e 17 destacam-se pelos altos valores de seus erros. Tanto o ensaio 12 quanto o ensaio 17 fazem parte dos extremos do planejamento, isto é, são pontos axiais. Dessa forma, o modelo torna-se ruim quando se aproxima dos limites estipulados no planejamento (níveis +2 e -2). Porém dentro dos níveis +1 e -1 (ensaios de 1 ao 11) o modelo apresentou baixos valores de erro com um máximo de 8,19 %.

Para validar estatisticamente o modelo e verificar se é preditivo faz-se necessário uma análise da regressão e da falta de ajuste do modelo. Essa análise foi feita através da ANOVA e do “teste F”. A Tabela 2.7 apresenta a análise estatística do modelo para a variável tempo de processo. Quanto à análise da regressão do modelo, o valor de F calculado foi bem superior ao f tabelado e, ainda que o F calculado para a falta de ajuste tenha sido superior ao f tabelado, pode-se dizer que o modelo é preditivo no intervalo de variação dos níveis entre +1 e -1 das variáveis estudadas.

**Tabela 2.7 – ANOVA para o modelo de regressão do tempo de processo (Y1).**

Fonte de variação	SS	df	MS	F	f
Regressão	4784,57	4	1196,14	122,35	3,26
Resíduos	117,32	12	9,78		
Falta de Ajuste	116,87	10	11,69	52,33	19,40
Erro puro	0,45	2	0,22		
Total	4901,89	16			

SS: Soma quadrática; df: graus de liberdade; MS: Média quadrática; F: fator “F” calculado; f: fator “F” tabelado

Com o modelo estabelecido na equação 2.2 foi possível construir a Figura 2.20. Nessa figura pode-se visualizar uma faixa, onde o tempo de processo ( $Y_1$ ) é minimizado de acordo com as duas variáveis independentes, massa de produto ( $X_1$ ) e vazão de bombeamento ( $X_3$ ).

Ainda, segundo a Figura 2.20, pode-se perceber que a variável tempo de processo ( $Y_1$ ) sofre maior variação em função da vazão de bombeamento ( $X_3$ ) do que da massa de produto ( $X_1$ ).

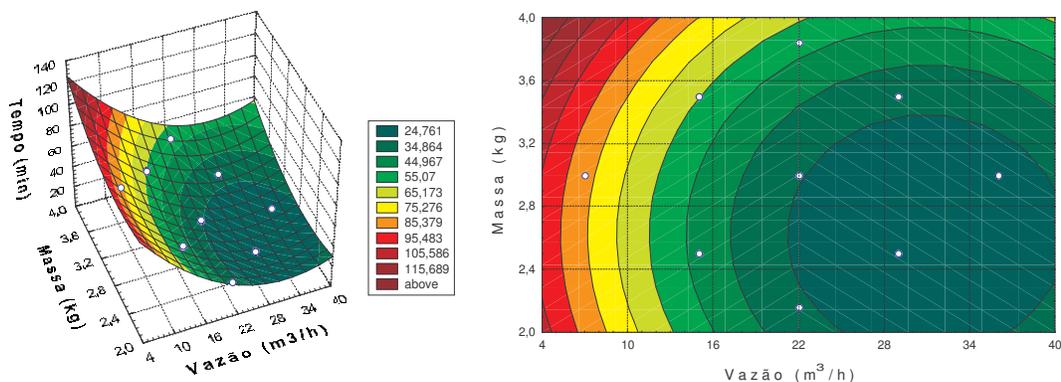


Figura 2.20 – Superfície de resposta para o tempo de processo ( $Y_1$ ) em função da massa de produto ( $X_1$ ) e da vazão de bombeamento ( $X_3$ ).

Pela Figura 2.20, os pontos ótimos do processo, isto é, aqueles em que a resposta tempo de processo ( $Y_1$ ) é mínima, são os seguintes:

- Massa de produto ( $X_1$ ) = 2,6 kg;
- Vazão de bombeamento ( $X_3$ ) =  $31 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ;

Também foram construídas, para a variável dependente tempo de processo ( $Y_1$ ), as Figuras 2.21 e 2.22. Na Figura 2.21 pode-se observar que o tempo de processo ( $Y_1$ ) é praticamente constante mesmo quando se varia o tempo de espera ( $X_2$ ) em função da vazão de bombeamento ( $X_3$ ). Tal fato concorda com a análise das influencias, onde o tempo de espera não foi significativo.

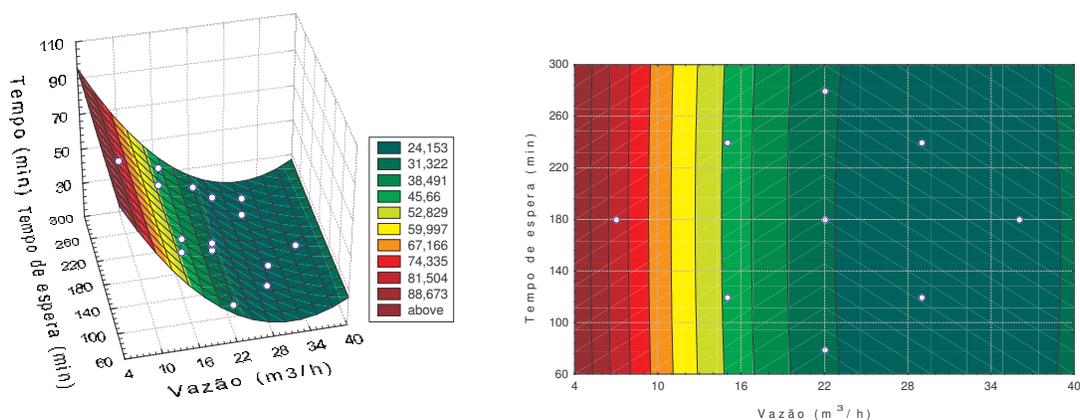


Figura 2.21 – Superfície de resposta para o tempo de processo ( $Y_1$ ) em função do tempo de espera ( $X_2$ ) e da vazão de bombeamento ( $X_3$ ).

Na Figura 2.22, onde o tempo de espera ( $X_2$ ) é plotado com a massa de alface ( $X_1$ ), observa-se, de maneira similar a Figura 2.21, que o tempo de processo ( $Y_1$ ) praticamente não variou com a mudança do tempo de espera em função da massa de alface ( $X_1$ ).

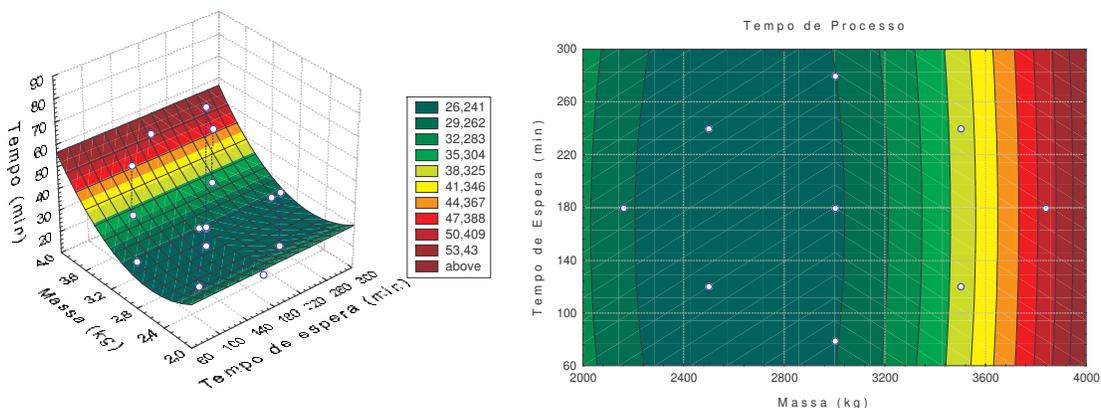


Figura 2.22 – Superfície de resposta para o tempo de processo ( $Y_1$ ) em função do tempo de espera ( $X_2$ ) e da massa de alface ( $X_1$ ).

#### 2.4.5.2. Energia consumida ( $Y_2$ )

Na variável dependente energia consumida ( $Y_2$ ) percebe-se, através da Tabela 2.8, que a vazão de bombeamento ( $X_1$ ) e a quantidade de massa de alface ( $X_3$ ) foram as variáveis que mais influenciaram no consumo da energia durante o resfriamento. Além disso, a interação entre essas duas variáveis ( $X_1$  versus  $X_3$ ) dependentes também apresentou uma influência significativa

**Tabela 2.8 – Efeitos das variáveis independentes e suas interações sobre a energia consumida ( $Y_2$ ).**

Interação	Efeito	Erro
Média/Interação*	0,71	0,01
$X_1$ - Massa (linear)*	0,38	0,01
$X_1$ - Massa (quadrático)*	0,25	0,02
$X_2$ - Tempo de espera (linear)	0,01	0,01
$X_2$ - Tempo de espera (quadrático)	0,00	0,02
$X_3$ - Vazão (linear)*	-0,38	0,01
$X_3$ - Vazão (quadrático)*	0,18	0,01
Massa ( $X_1$ ) x Tempo de Espera ( $X_2$ )	-0,02	0,02
Massa ( $X_1$ ) x Vazão ( $X_3$ )*	0,09	0,02
Tempo de Espera ( $X_2$ ) x Vazão ( $X_3$ )	-0,04	0,02

\*efeito significativo ao nível de 95 %.

Na Figura 2.23 estão apresentadas as influências das variáveis dependentes de forma gráfica. Observa-se que a variável vazão de bombeamento e a variável massa de alface (ambas na sua forma linear) foram as que apresentaram maior influência sobre o consumo energético.

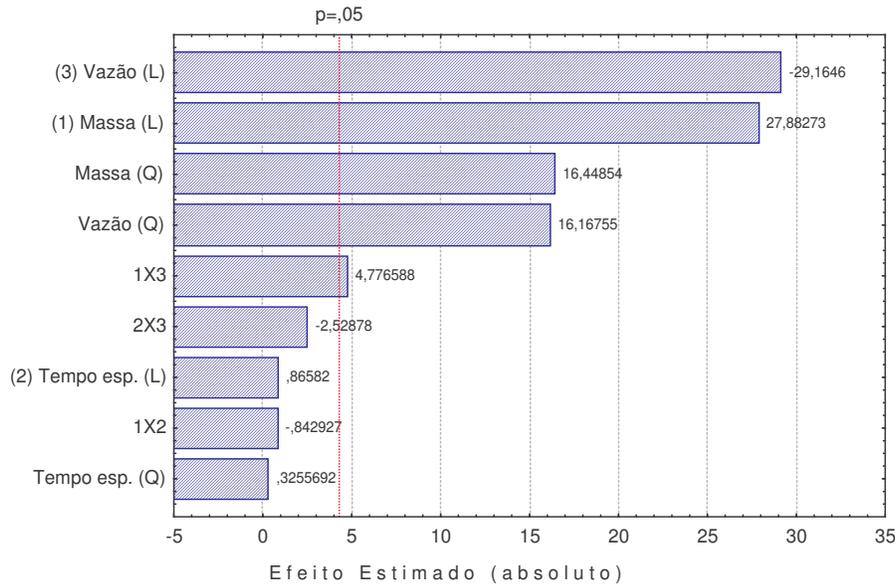


Figura 2.23 - Gráfico de Pareto, efeitos das variáveis independentes sobre a energia consumida.

As variáveis independentes que não apresentaram influência significativa foram retiradas e um modelo para o consumo de energia foi ajustado. A equação 2.3 apresenta o modelo. O modelo apresentado possui um coeficiente de correlação ( $R^2$ ) de 0,950 explicando assim, 95 % da variação em torno da média. A Figura 2.24 apresenta a relação entre os valores preditos pelo modelo com os valores experimentais.

$$Y_2 = 6,30 - 2,90X_1 + 0,503X_1^2 - 0,138X_3 + 1,71 \cdot 10^{-3} X_3^2 + 1,21 \cdot 10^{-2} X_1 \cdot X_3 \quad (2.3)$$

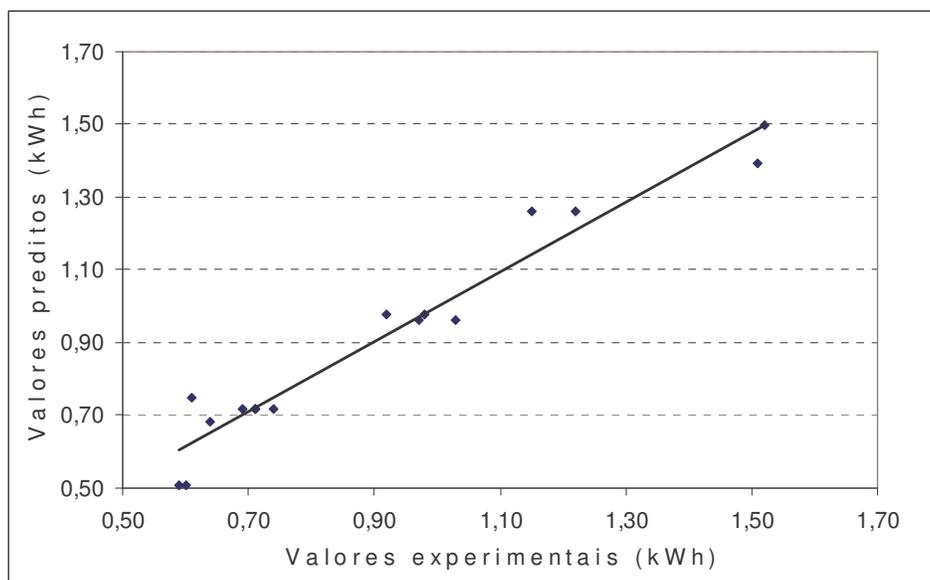


Figura 2.24 – Relação entre os valores de energias consumidas observadas e os previstos pelo modelo.

A Tabela 2.9 apresenta os valores numéricos apresentados na Figura 2.24 juntamente com os erros relativos aos dados experimentais.

**Tabela 2.9 – Comparação entre os valores de energias consumidas experimentais e os previstos pelo modelo.**

Ensaio	Valor experimental (kWh)	Valor Predito pelo Modelo (kWh)	Erro (%)
1	0,92	0,98	-6,09
2	0,6	0,51	15,48
3	0,98	0,98	0,41
4	0,59	0,51	14,05
5	1,22	1,26	-3,42
6	1,03	0,96	6,58
7	1,15	1,26	-9,72
8	0,97	0,96	0,80
9	0,71	0,72	-1,02
10	0,69	0,72	-3,95
11	0,74	0,72	3,08
12	0,61	0,75	-22,86
13	1,51	1,39	7,62
14	0,71	0,72	-1,02
15	0,71	0,72	-1,02
16	1,52	1,50	1,39
17	0,64	0,68	-6,56

Observa-se que o erro máximo encontrado de 22,86 % está no ensaio 12 que, assim como na variável tempo de processo ( $Y_1$ ), representa um ponto limite do planejamento. Nesta variável, apesar do grande erro encontrado no ensaio 12 os demais ensaios apresentam erros satisfatórios, de forma que, na análise estatística (Tabela 2.10), o modelo é validado em toda a faixa de estudo do planejamento, dos níveis -2 ao +2.

Para avaliar estatisticamente se o modelo de regressão (equação 2.3) está bem ajustado aos dados, isto é, se é preditivo, foi feita a análise de variância (ANOVA) do modelo juntamente com o teste F. A Tabela 2.10 apresenta os resultados da ANOVA para o modelo da energia consumida ( $Y_2$ ).

**Tabela 2.10 – ANOVA para o modelo de regressão da energia consumida ( $Y_2$ ).**

Fonte de variação	SS	df	MS	F	f
Regressão	1,47	5	0,29	40,26	3,20
Resíduos	0,08	11	0,01		
Falta de Ajuste	0,08	9	0,01	13,84	19,38
Erro puro	1,27E-3	2	6,33E-4		
Total	1,55	16			

SS: Soma quadrática; df: graus de liberdade; MS: Média quadrática; F: fator “F” calculado; f: fator “F” tabelado.

Como pode ser visto na Tabela 2.10, o modelo é válido estatisticamente dentro da faixa de variação utilizada, tendo em vista que, a regressão apresenta um F calculado maior que o f tabelado e a falta de ajuste apresenta um F calculado menor que o tabelado.

Através da equação 2.3 foi construída a Figura 2.25 que representa a dependência da variável energia consumida ( $Y_2$ ) em relação à massa de produto ( $X_1$ ) e à vazão de bombeamento ( $X_3$ ). Essa Figura é muito semelhante à Figura 2.20 porque as variáveis que influenciam significativamente a energia consumida são as mesmas. Dessa forma, assim como no tempo de processo, a energia consumida varia mais com uma variação da vazão de bombeamento do que com uma variação da massa.

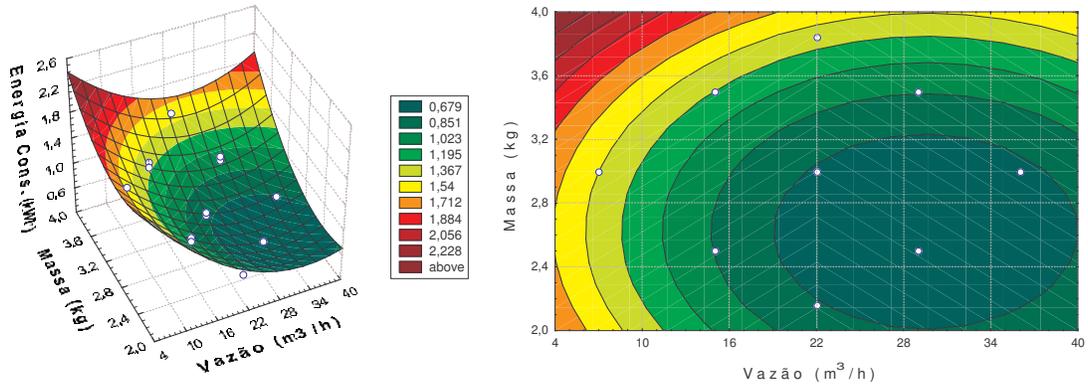


Figura 2.25 – Superfície de resposta para a energia consumida ( $Y_2$ ) em função da massa de produto ( $X_1$ ) e da vazão de bombeamento ( $X_3$ ).

Pela Figura 2.25, os pontos ótimos do processo, isto é, aqueles em que a resposta energia consumida ( $Y_2$ ) é mínima, são os seguintes:

- Massa de produto ( $X_1$ ) = 2,6 kg;
- Vazão de bombeamento ( $X_3$ ) = 29 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>;

As demais superfícies construídas são apresentadas nas Figuras 2.26 e 2.27. Na Figura 2.26 estão plotadas as variáveis tempo de espera ( $X_2$ ) e vazão de bombeamento ( $X_3$ ). Nessa Figura percebe-se que a energia consumida ( $Y_2$ ) varia pouco como tempo de espera ( $X_2$ ), porém varia muito em função da vazão de bombeamento ( $X_3$ ).

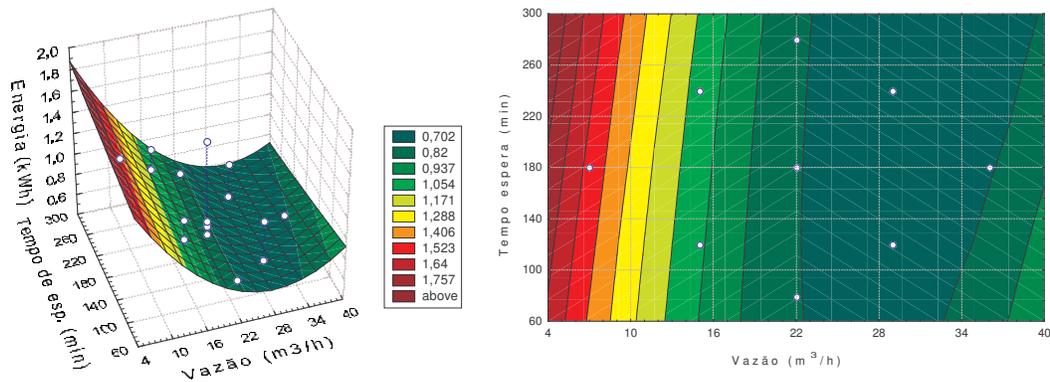


Figura 2.26 – Superfície de resposta para a energia de consumida ( $Y_2$ ) em função do tempo de espera ( $X_2$ ) e da vazão de bombeamento ( $X_3$ ).

Na Figura 2.27 o tempo de espera ( $X_2$ ) é plotado com a massa de alface ( $X_1$ ). Nessa figura observa-se também que o tempo de espera ( $X_2$ ) não tem muita influência no consumo de energia ( $Y_2$ ).

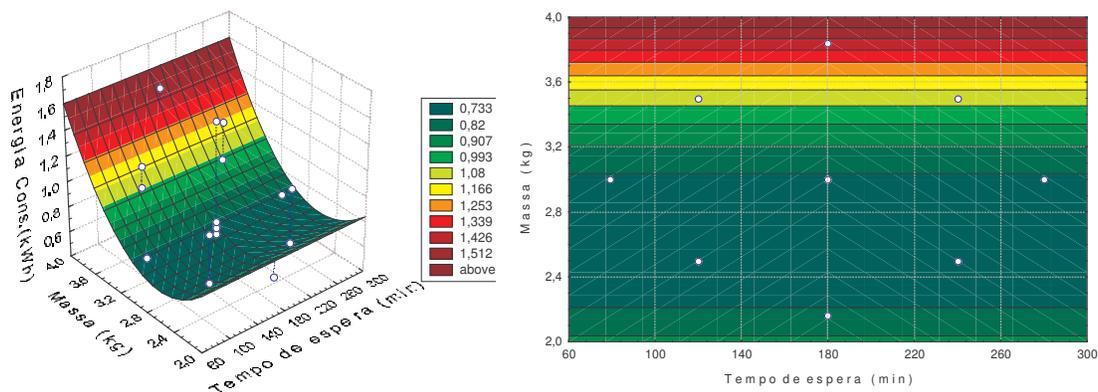


Figura 2.27 – Superfície de resposta para a energia consumida ( $Y_2$ ) em função do tempo de espera ( $X_2$ ) e da massa de alface ( $X_1$ ).

#### 2.4.5.3. Perda de Massa ( $Y_3$ )

Através da Tabela 2.11 observa-se que as variáveis independentes que influenciaram significativamente ( $p < 0,05$ ) a perda de massa ( $Y_3$ ) durante o resfriamento foram a quantidade de massa ( $X_1$ ) e a vazão de bombeamento ( $X_3$ ).

Na Figura 2.28 pode ser visto as influências das variáveis independentes sobre a perda de massa. Percebe-se que a vazão de bombeamento na sua forma quadrática esteve perto de ser significativa. Na retirada das variáveis não significativas para compor o modelo de regressão notou-se que a variável vazão de bombeamento na forma quadrática tornava-se significativa com a retirada da variável tempo de espera ( $X_2$ ), sendo assim, deve fazer parte do modelo de regressão ajustado.

**Tabela 2.11 – Efeitos das variáveis independentes e suas interações sobre a perda de massa ( $Y_3$ ).**

Interação	Efeito	Erro
Média/Interação*	3,63	0,10
$X_1$ - Massa (linear)*	0,51	0,10
$X_1$ - Massa (quadrático)	0,15	0,11
$X_2$ - Tempo de espera (linear)	0,03	0,10
$X_2$ - Tempo de espera (quadrático)	-0,14	0,11
$X_3$ - Vazão (linear)*	-1,15	0,09
$X_3$ - Vazão (quadrático)	0,28	0,07
Massa ( $X_1$ ) x Tempo de Espera ( $X_2$ )	0,13	0,13
Massa ( $X_1$ ) x Vazão ( $X_3$ )	-0,29	0,13
Tempo de Espera ( $X_2$ ) x Vazão ( $X_3$ )	-0,11	0,13

\*efeito significativo ao nível de 95 %

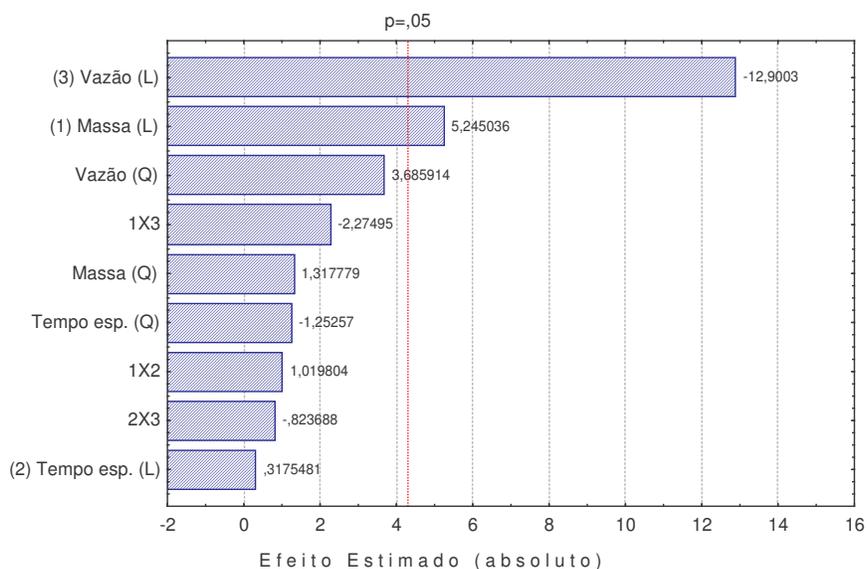


Figura 2.28 - Gráfico de Pareto, efeitos das variáveis independentes sobre a perda de massa.

Após a definição das variáveis que compõe o modelo de regressão para a variável perda de massa o modelo foi ajustado pelo software Statistica. A equação 2.4 apresenta o modelo.

$$Y_3 = 5,25 + 0,512X_1 - 0,205X_3 + 2,81 \cdot 10^{-3} X_3^2 \quad (2.4)$$

O modelo acima apresenta um coeficiente de correlação ( $R^2$ ) de 0,923. Foi feita a análise estatística do modelo de regressão juntamente com sua falta de ajuste. A Figura 2.29

apresenta a relação entre os valores das perdas de massas experimentais e os valores preditos pelo modelo de regressão.

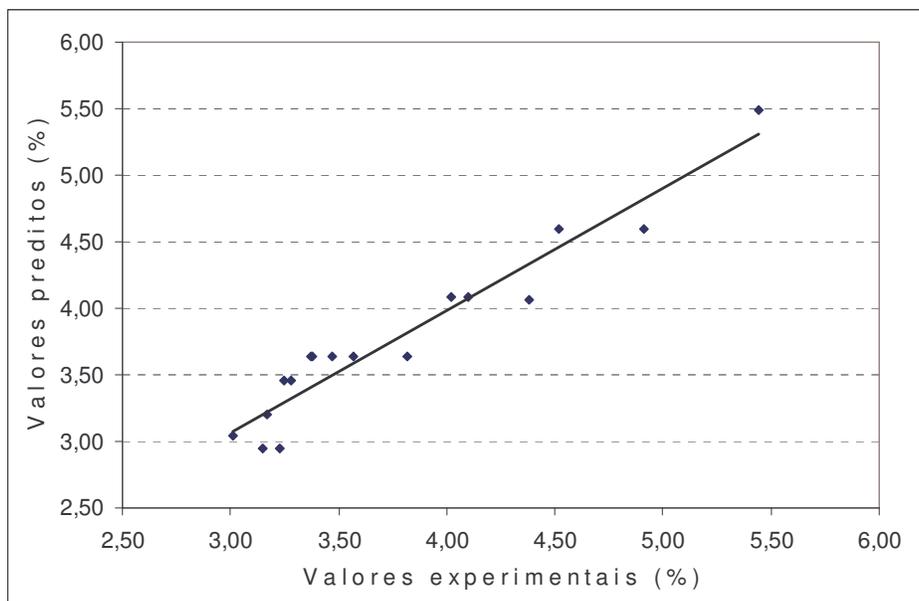


Figura 2.29 – Relação entre as perdas de massas observadas e as preditas pelo modelo.

Na Tabela 2.12 são apresentados os valores preditos pelo modelo (equação 2.4) e os valores de perda de massa de acordo com a equação 1.7 (Capítulo I) e seus respectivos erros.

Na Tabela 2.12 pode-se verificar que o máximo erro encontrado para o modelo ajustado (equação 2.4) para a variável perda de massa ( $Y_3$ ) foi de 8,72 %. O bom comportamento do modelo foi confirmado na análise estatística do modelo (Tabela 2.13).

Ainda na Tabela 2.12, nota-se que os valores preditos pela equação 1.7, encontra-se um erro máximo de 38% e, de maneira geral, os erros são bem maiores que os apresentados pelo modelo fornecido pelo planejamento experimental. Os maiores erros aconteceram nos ensaios de menor vazão e maiores massas, onde os tempos de resfriamento foram maiores. Nesses casos pode ter havido uma maior transferência de calor das embalagens e da caixa para as alfaces, acarretando em uma maior perda de massa pelas alfaces.

**Tabela 2.12 – Comparação entre os valores de perdas de massas experimentais e os preditos pelo modelo.**

Ensaio	Valor experimental (%)	Valor Predito pelo Modelo (%)	Erro (%)	Valor Predito pela Equação 1.7 (%)	Erro (%)
1	3,25	3,46	-6,47	3,33	2,43
2	3,15	2,95	6,41	3,18	0,86
3	3,28	3,46	-5,49	3,41	4,07
4	3,23	2,95	8,72	3,38	4,64
5	4,91	4,60	6,33	3,46	-29,44
6	4,02	4,09	-1,67	3,13	-22,23
7	4,52	4,60	-1,75	3,33	-26,35
8	4,10	4,09	0,31	3,35	-18,39
9	3,57	3,64	-1,85	3,45	8,75
10	3,47	3,64	-4,79	3,36	-23,22
11	3,82	3,64	4,82	3,06	-9,24
12	3,17	3,21	-1,13	3,14	-7,01
13	4,38	4,07	7,17	3,36	-38,18
14	3,37	3,64	-7,89	3,28	8,92
15	3,38	3,64	-7,58	3,14	-11,96
16	5,44	5,49	-0,90	3,33	-4,06
17	3,01	3,05	-1,25	3,13	-18,16

A ANOVA do modelo (equação 2.4) para a variável perda de massa é apresentada na Tabela 2.13. Nessa Tabela pode-se observar a validade estatística do modelo, onde o F calculado foi maior que o f tabelado para a regressão e na falta de ajuste o F calculado foi menor que o f tabelado. Esses resultados indicam a boa predição do modelo ajustado.

**Tabela 2.13 – ANOVA para o modelo de regressão da perda de massa ( $Y_3$ ).**

Fonte de variação	SS	df	MS	F	f
Regressão	7,16	3	2,39	51,76	3,41
Resíduos	0,60	13	0,05		
Falta de Ajuste	0,53	11	0,05	1,50	19,40
Erro puro	0,06	2	0,03		
Total	7,76	16			

SS: Soma quadrática; df: graus de liberdade; MS: Média quadrática; F: fator “F” calculado; f: fator “F” tabelado.

Através da equação 2.4 foi construída a Figura 2.30, onde se pode observar a relação entre a perda de massa ( $Y_3$ ) com a massa de produto ( $X_1$ ) e a vazão de

bombeamento ( $X_3$ ). Pela Figura 2.30 percebe-se que a vazão de bombeamento ( $X_3$ ) é muito mais importante para a perda de massa do que a quantidade de massa de produto ( $X_1$ ).

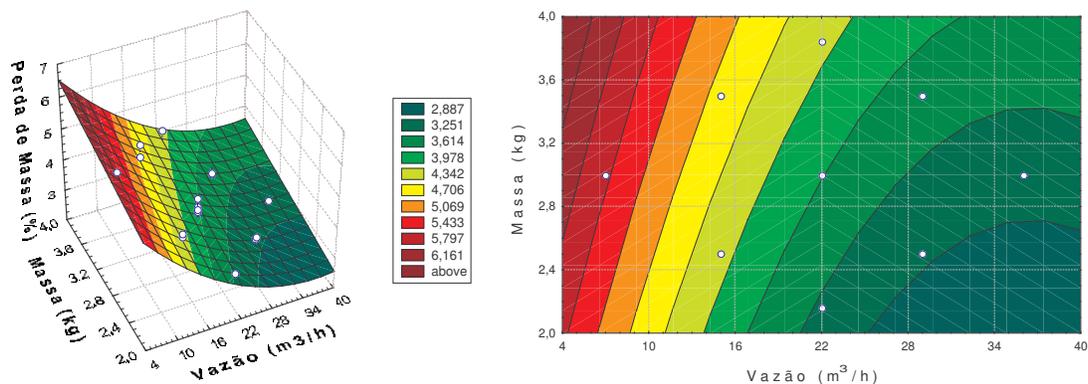


Figura 2.30 – Superfície de resposta para a perda de massa ( $Y_3$ ) em função da massa de produto ( $X_1$ ) e da vazão de bombeamento ( $X_3$ ).

Pela Figura 2.30 pode-se ainda observar que o ponto onde a perda de massa é mínima está fora dos limites do planejamento. Dessa forma não se pode definir esse ponto, apenas supor que ele esteja nas faixas de vazões mais altas e nas quantidades de massa menores que as definidas no planejamento experimental.

Na Figura 2.31 é apresentada a superfície que relaciona a perda de massa ( $Y_3$ ) com as variáveis tempo de espera ( $X_2$ ) e vazão de bombeamento ( $X_3$ ). Através dessa figura, observa-se que o tempo de espera ( $X_2$ ) não influencia na perda de massa das alfaces ( $Y_3$ ).

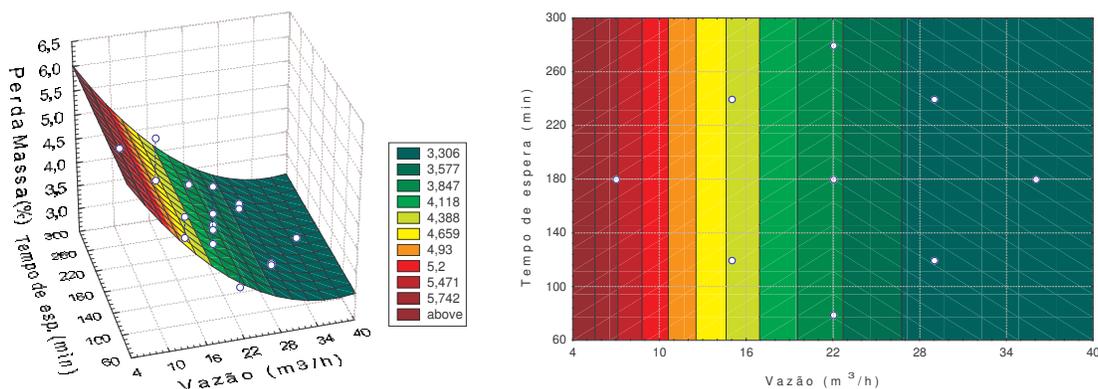


Figura 2.31 – Superfície de resposta para a perda de massa ( $Y_3$ ) em função do tempo de espera ( $X_2$ ) e da vazão de bombeamento ( $X_3$ ).

Na Figura 2.32 a perda de massa ( $Y_3$ ) é relacionada graficamente com a massa de alface ( $X_3$ ) e o tempo de espera ( $X_2$ ). Novamente, o tempo de espera ( $X_2$ ) não apresenta influência sobre a perda de massa das alfaces ( $Y_3$ ), apenas a massa de alface ( $X_1$ ) varia a resposta perda de massa ( $Y_3$ ) das alfaces.

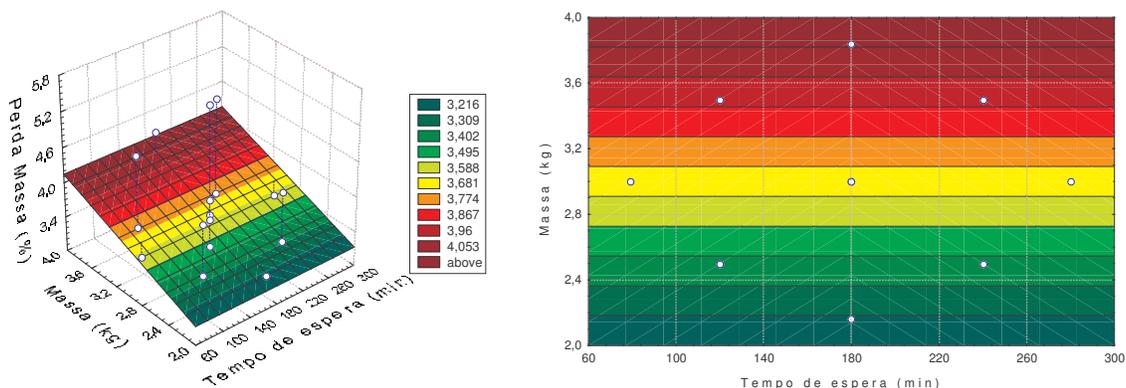


Figura 2.32 – Superfície de resposta para a perda de massa ( $Y_3$ ) em função do tempo de espera ( $X_2$ ) e da massa de alface ( $X_1$ ).

#### 2.4.5.4. Vida Pós-colheita ( $Y_4$ )

Na variável dependente vida pós-colheita ( $Y_4$ ), apenas o tempo de espera ( $X_2$ ) teve influência significativa ( $p < 0,05$ ) sobre essa variável. A Tabela 2.14 apresenta o resultado das influências de todas as variáveis independentes. Esse resultado indica que, dentro dos limites adotados para as variáveis independentes, a vida pós-colheita das alfaces submetidas ao resfriamento a vácuo não tem relação com a quantidade de massa adotada nem com a vazão de bombeamento utilizada. A vida pós-colheita pode ser explicada, nesses ensaios, apenas pelo tempo de espera da refrigeração e das condições ambientais, por exemplo, temperatura e umidade relativa, em que essas alfaces estiveram submetidas durante a espera.

**Tabela 2.14 – Efeitos das variáveis independentes e suas interações sobre a vida pós-colheita ( $Y_4$ ).**

Interação	Efeito	Erro
Média/Interação*	21,34	0,33
$X_1$ - Massa (linear)	0	0,31
$X_1$ - Massa (quadrático)	-0,14	0,35
$X_2$ - Tempo de espera (linear)*	-2,16	0,31
$X_2$ - Tempo de espera (quadrático)	-0,14	0,35
$X_3$ - Vazão (linear)	0,50	0,29
$X_3$ - Vazão (quadrático)	-0,62	0,26
Massa ( $X_1$ ) x Tempo de Espera ( $X_2$ )	0	0,41
Massa ( $X_1$ ) x Vazão ( $X_3$ )	0	0,41
Tempo de Espera ( $X_2$ ) x Vazão ( $X_3$ )	0	0,41

\*efeito significativo ao nível de 95 %.

Na Figura 2.33 são apresentados todos os efeitos das variáveis independentes e suas interações sobre a vida pós-colheita. De acordo com essa Figura e com a Tabela 2.14 apenas o tempo de espera ( $X_2$ ), em sua forma linear, deve explicar o comportamento da variável resposta vida pós-colheita ( $Y_4$ ).

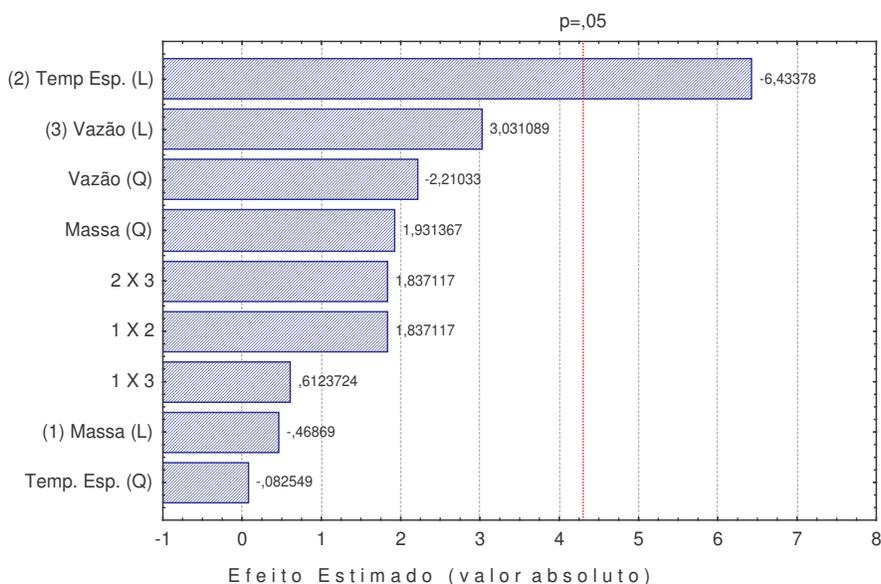


Figura 2.33 - Gráfico de Pareto, efeitos das variáveis independentes sobre a vida pós-colheita.

As variáveis não significativas foram então retiradas e o modelo ajustado pelo software Statistica é apresentado na Equação 2.5.

$$Y_4 = 23,07 - 0,0119X_2 \quad (2.5)$$

O modelo assim ajustado apresentou um coeficiente de correlação ( $R^2$ ) muito baixo, com um valor de 0,758, ou seja, explica 75,8 % da variação dos dados. A Figura 2.34 apresenta a relação entre os valores preditos por esse modelo e os valores observados, onde se pode notar os desvios entre os valores observados com relação aos que foram fornecidos pelo modelo.

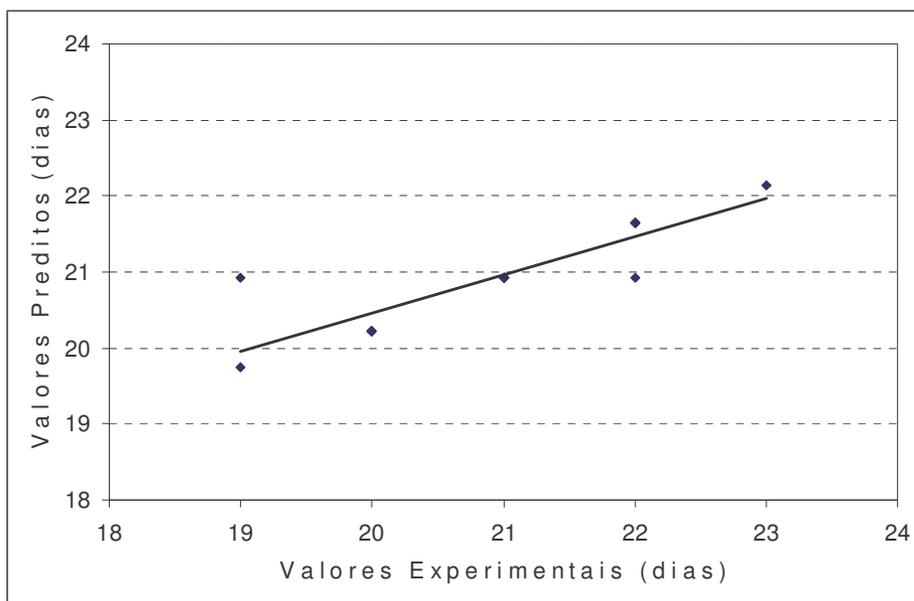


Figura 2.34 – Relação entre as vidas pós-colheita observadas e as preditas pelo modelo.

A Tabela 2.15 apresenta os valores preditos pelo modelo juntamente com seus erros relativos. O máximo valor de erro encontrado foi 10,15 % no ensaio 16. A análise estatística do modelo (equação 2.5) é apresentada na Tabela 2.16 através da análise de variância (ANOVA).

**Tabela 2.15 – Comparação entre os valores de vida pós-colheita experimentais e os preditos pelo modelo.**

Ensaio	Valor experimental (dias)	Valor Predito pelo Modelo (dias)	Erro (%)
1	20	20,21	-1,07
2	20	20,21	-1,07
3	22	21,64	1,63
4	22	21,64	1,63
5	20	20,21	-1,07
6	20	20,21	-1,07
7	22	21,64	1,63
8	22	21,64	1,63
9	21	20,93	0,34
10	21	20,93	0,34
11	22	20,93	4,87
12	21	20,93	0,34
13	21	20,93	0,34
14	23	22,13	3,78
15	19	19,74	-3,88
16	19	20,93	-10,15
17	21	20,93	0,34

**Tabela 2.16 – ANOVA para o modelo de regressão da vida pós-colheita ( $Y_4$ ).**

Fonte de variação	SS	df	MS	F	f
Regressão	15,88	1	15,88	47,08	4,54
Resíduos	5,06	15	0,34		
Falta de Ajuste	4,39	13	0,34	1,01	19,41
Erro puro	0,67	2	0,34		
Total	20,94	16			

SS: Soma quadrática; df: graus de liberdade; MS: Média quadrática; F: fator “F” calculado; f: fator “F” tabelado.

O valor de F calculado para a regressão é maior que o tabelado; esse comportamento poderia indicar que o modelo é bom para a variável em estudo, porém deve-se atentar para o número de graus de liberdade da regressão. Como a análise do planejamento indicou que apenas o tempo de espera ( $X_2$ ) influenciou a vida pós-colheita ( $Y_4$ ), as demais variáveis foram retiradas do modelo gerando assim um número de graus de liberdade muito baixo, favorecendo o valor absoluto do F para cima. Já para a falta de ajuste do modelo, apesar do

valor da soma quadrática tender a aumentar com a retirada das demais variáveis não significativas, o aumento dos graus de liberdade ocasionou diminuição no F calculado, fazendo com que este fosse menor que o tabelado. Dessa maneira, o modelo parece excelente, porém na análise de um modelo deve-se levar em conta todos os parâmetros estatísticos disponíveis. Visto que o coeficiente de correlação não foi muito alto e pela Figura 2.36, conclui-se que o modelo não é bom, ou seja, não é preditivo.

Dessa forma para a variável vida pós-colheita ( $Y_4$ ) não foi possível estabelecer um modelo nem tampouco construir superfícies que relacionassem as variáveis independentes.

#### 2.4.6. Transferência de Massa

Através da Equação 1.8 e dos ensaios realizados de acordo com o planejamento experimental (Tabela 2.4) foram determinados os valores de  $kS$  para as diferentes condições de massa de acordo com a Tabela 2.17.

Foi feita uma regressão linear dos dados de perda de massa ao longo do tempo como função da diferença entre a pressão absoluta e da pressão de vapor de acordo com equação 1.8. Através dessa regressão os valores de  $kS$  são determinados pelos coeficientes de inclinação das retas.

Nenhuma das regressões apresentou bons coeficientes de correlação. A Figura 2.35 apresenta um exemplo. As demais são apresentadas no Anexo III.

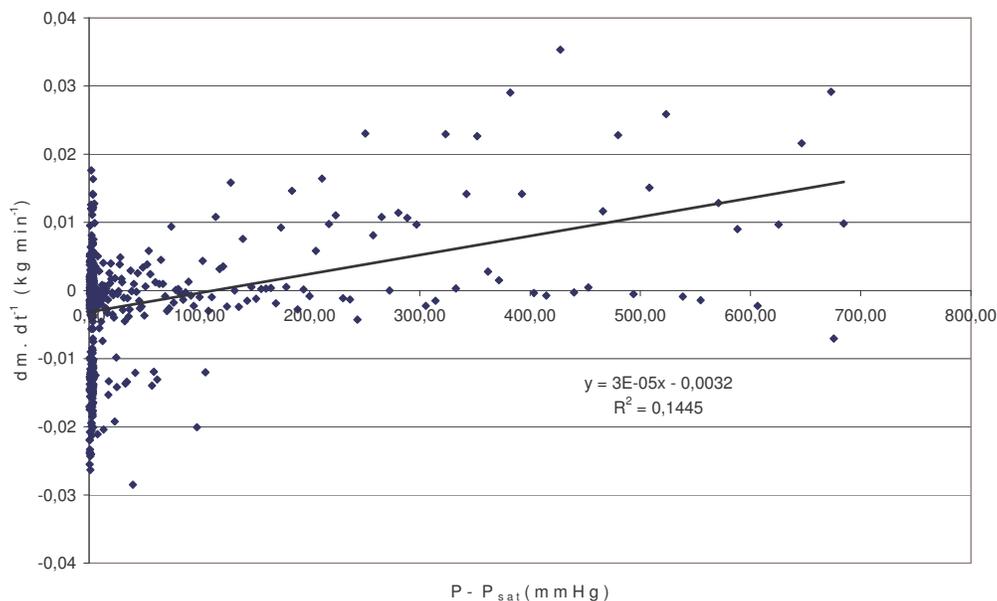


Figura 2.35 – Cálculo de  $kS$  no ensaio 5 (massa inicial de 3,5 kg) de acordo com equação 1.8.

O problema pode estar nos valores de perda de massa medidos pela célula de carga, que apresentou problemas de medida como discutido no item 2.4.4. Ainda assim, decidiu-se relacionar os valores de  $kS$  com a massa das alfaces, e de acordo com a Tabela 2.17, foi construída a Figura 2.36.

**Tabela 2.17 – Valores de  $kS$  em função da massa de alfaces.**

$kS$ ( $\text{kg min}^{-1} \text{ mmHg}^{-1}$ )	Massa (kg)	Ensaio
4,00E-05	3,5	1
2,00E-05	3,5	3
3,00E-05	3,5	5
3,00E-05	3,5	7
4,00E-06	2,5	6
1,00E-07	2,5	8
2,00E-07	3	9
3,00E-05	3	11
2,00E-05	3	14
1,00E-05	3	15
1,00E-06	2,16	12
6,00E-05	3,84	13

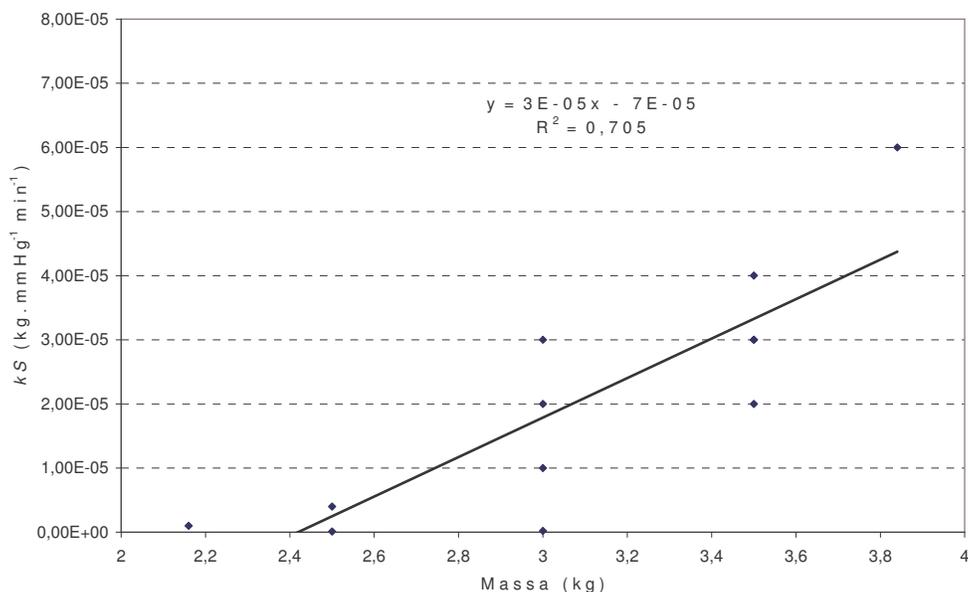


Figura 2.36 – Valores de  $kS$  em função da massa de alfaces submetidas ao resfriamento ao vácuo.

Apesar do coeficiente de correlação, apresentado na Figura 2.36, ser razoavelmente baixo ( $R^2 = 0,705$ ), este não difere muito daqueles encontrados na literatura. No trabalho de LANDFELD *et al.* (2002), feito com alguns tipos de alimentos e correlacionado o produto  $KS$  pelo volume da amostra, os coeficientes de correlação variaram de 0,0069 à 0,7744. Já no trabalho de HUBER (2004) os coeficientes variaram de 0,6448 à 0,8455.

## 2.5. Conclusões

Através do planejamento experimental realizado conclui-se que as variáveis massa de alface e vazão de bombeamento são as que determinam o tempo e o consumo energético do processo de resfriamento a vácuo e a perda de massa das alfaces ocasionada pelo resfriamento. É importante salientar que as conclusões descritas são válidas dentro dos limites utilizados no planejamento experimental.

Quanto à vida pós-colheita conclui-se que dentre as variáveis estudadas a única que teve influência foi o tempo de espera da refrigeração, assim sendo, a vida pós-colheita não dependeu das condições adotadas no processo de resfriamento a vácuo.

A obtenção dos valores de  $kS$  para as alfaces neste trabalho não foi conclusiva, necessitando de uma maior variação nas massas para obtenção de um modelo mais confiável.

## 2.6. Referências Bibliográficas

- AHARONI, N. ; YEHOSHUA, S. B. Delaying deterioration of romaine lettuce by vacuum cooling and modified atmosphere produced in polyethylene packages. **Journal American Society Horticultural Science**. V.98, n.5, p.464-468, 1973
- ASHRAE. Methods of precooling fruits, vegetables and cut flowers. **Refrigeration Systems and Applications Handbook**, Chapter 14, Atlanta, Georgia (USA), 2002.
- BARTLETT, D. Practical temperature control and cooling methods in relation to crop preservation. **Progress in Food and Nutrition Science**, v.4, n.3-4, p. 47-53, 1980.
- BLISKA Jr, A. **Alface (*Lactuca sativa L.*): distintos sistemas de produção, conservação e avaliação pós-colheita**. Campinas 1998. Tese (Mestre em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas.
- BRADSHAW, W. Modulated vacuum cooling for bakery products. **The Bakers Digest**, v.50, n.1, p.26-31, February 1976.
- BRANCH, B. Follow cooling basics to preserve quality. **American Vegetable Grower**, v.34, n.11, p.20-23, november 1986.
- CEAGESP ; Dicas para evitar o desperdício, INTERNET: [www.ceagesp.com.br](http://www.ceagesp.com.br) ,1999
- CORTEZ, L. A. B. & LEAL, P. A. M. Métodos de pré-resfriamento de frutas e hortaliças. **II Curso de Atualização em Tecnologia de Resfriamento de Frutas e Hortaliças**, Campinas, Brasil, 1997.
- CORTEZ, L.A.B.; HONORIO,S.L.; MORETTI,C;L. **Resfriamento de Frutas e Hortaliças**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2002.
- DESMOND, E. M. ; KENNY, T. A. ; WARD, P. ; SUN, D-W. Effect of rapid and conventional cooling methods on the quality of cooked ham joints. **Meat Science**, v.56, n.3, p.271-277, 2000.

- GEESON, J. D. Cooling and storage of fruits and vegetables. **The Proceedings of The Institute of Refrigeration**, v.85, p.65-74, 1988-1989.
- GUEST, E. The pro's and cons of vacuum cooling. **Food Manufacture**, p.21-25, October 1979.
- HAAS, E. & GUR, G. Factors affecting the cooling rate of lettuce in vacuum cooling installations. **International Journal of Refrigeration**, v.10, n.2, p.82-86, March 1987.
- HARDENBURG, R. E.; WATADA, A. E.; WANG, C. Y. **The Commercial Storage of Fruits, Vegetables, and Florist and Nursery Stocks**. United States Department of Agriculture, Agriculture Handbook n. 66, 1990.
- HUBER, E. **Resfriamento a vácuo de cortes de carnes após o cozimento**. Florianópolis 2004. Tese (Mestre em Engenharia de Alimentos) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- IWAMOTO, M. Role of agricultural engineering in post-harvest technology for fruits and vegetables in Japan. **Japan Agricultural Research Quarterly (JARQ)**, v.14, n.4, p.239-243, 1981.
- JOHNSON, C. E. ; von ELBE, J. H. ; LINDSA, R. C. Extension of post-harvest storage life sliced celery. **Journal of Food Science**, v.39, n.4, p.678-680, July/August 1974.
- KADER, A. A. **Postharvest Technology of Horticultural Crops**, 2nd edition, Coop. Ext. Uni. of Ca. Division of Agriculture and Natural Resources. Universidade da Califórnia. Publ. n.3311, 295p., 1992.
- LANDFELD, A. ; HOUSKA, M. ; KYHOS, K. ; JIANG-QIBIN Mass transfer experiments on vacuum cooling of selected pre-cooked solid foods. **Journal of Food Engineering**, n. 52, p.207-210, 2002.
- MALPAS, E. W. Vacuum equipment for evaporative cooling. **Process Biochemistry**, v.7, n.10, p.15-17, October 1972.

- MCDONALD, K ; SUN, D-W. Vacuum cooling technology for the food processing industry: a review. **Journal of Food Engineering**, v.45, n.2, p.55-65, 2000.
- MCDONALD, K ; SUN, D-W. The formation of pores and their effects in a cooked beef product on the efficiency of vacuum cooling. **Journal of Food Engineering**, v.47, p.175-183, 2001.
- MELLOR, J. D. Vacuum techniques in food industry. **Food Technology in Australia**, v.32, n.8, p.397-398, August 1980.
- MONCRIEFF, C. B. ; BURFOOT, D. ; NUTE, G. R. ; SELF, K. P. Effect of pressure cooking and pressure rate change during cooling in vacuum on chicken breast quality and yield. **Journal of Food Science**, v.55, n.6, p.1531-1535,1551, 1990.
- NEVES F<sup>o</sup>, L. C. ; VIGNEAULT, C. ; CORTEZ, L. A. B. Análise econômica preliminar de uma unidade de resfriamento a vácuo de alface. **XXVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola-CONBEA**, Campina Grande, PB, julho 1997.
- OGAWA, K. Precooling before shipment for preserving post-harvest quality of vegetables in Japan. **Japan Agricultural Research Quarterly (JARQ)**, v.12, n.1, p.14-16, 1978.
- PENTZER, W. T. Armazenagem a frio, pré-resfriamento, transporte refrigerado e distribuição de frutas e vegetais. **Abrava**, n.46, p.7-1970
- SHEWFELT, R. L. ; Postharvest treatment for extending the shelf life of fruits and vegetables. **Food Technology**, v.40, n.5, May, 1986.
- SPAGNOL, W. A ; SIGRIST, J. M. M. Pré-resfriamento. **Tecnologia Pós-colheita de Frutas Tropicais**. Manual n.9. ITAL, Campinas 1992.
- SUN, D-W. ; BROSANAN, T. Extension of the vase life of cut daffodil flowers by rapid vacuum cooling. **International Journal of Refrigeration**, v.22, n.6, p.472-478, 1999.
- SUN, D-W. ; WANG, L. Heat transfer characteristics of cooked meats using different cooling methods. **International Journal of Refrigeration**, v.23, n.7, p.508-516, 2000.

- SUN, D-W. ; ZHANG, Z. Temperature and weight loss profiles of vacuum cooling of sliced cooked carrot. **21<sup>o</sup> International Congress of Refrigeration**, Washington, D.C., 2003.
- TEIXEIRA, N.T. **Hidroponia: uma alternativa para pequenas áreas**. Guaíba: Editora e Livraria Agropecuária Ltda, 1996. 86p.
- THOMPSON, J. F. ; MITCHELL, F. G. ; RUMSEY, T. R. ; KASMIRE, R. F. ; CRISOSTO, C. H. **Commercial Cooling of Fruits, Vegetables and Flowers**, Cap. 4 e 5. Universidade da Califórnia – Divisão de agricultura e recursos naturais, Publicação 21567, p.33-34, 1998
- TURK, R. & CELIK E. The effect of vacuum precooling on the half cooling period and quality characteristic of Iceberg lettuce. **ACTA Horticulturae**, n.343, p.321-324, June, 1993.
- VANDIEVOET, A. C. & FOURNIER P. La pré-réfrigération rapide par le vide à la convergence des tests aéronautiques et de l'agro-alimentaire. **Industries Alimentaires et Agricoles**, v.10, n.100, p.691-695, 1983.



**3 - Capítulo III – Avaliação da Vida Pós-colheita de  
Alfaces Hidropônicas cv Salad Bowl em Relação ao  
Grau-hora Acumulado (“Degree-hour”)**

**Resumo**

As hortaliças tem tido crescente importância econômica dentro do setor agrícola no Brasil nos últimos anos. A produção de hortaliças em 2002 superou os 15 milhões de toneladas. A qualidade da hortaliça é determinante na sua vida pós-colheita. O controle da temperatura desses produtos tem papel fundamental na manutenção dessa qualidade. A redução da temperatura das hortaliças implica em uma redução da sua taxa respiratória e demais processos bioquímicos e fisiológicos. Alfaces, *Lactuca sativa L.* (grupo Mimosa, cv. Salad Bowl), foram estocadas em câmara de refrigeração com temperatura média de 1 °C e umidade relativa de 95-100 %. Antes da estocagem, foram adotados diferentes tempos de espera (1,32 h; 2 h; 3 h; 4 h; 4,68 h) para início do processo de resfriamento. Algumas amostras foram colocadas diretamente na câmara de estocagem; e outras submetidas ao resfriamento a vácuo antes da estocagem. A determinação da vida pós-colheita foi feita através de avaliação sensorial das alfaces. A temperatura das alfaces foi monitorada desde a colheita até o fim de suas vidas pós-colheitas. Foram feitos cálculos do grau-hora acumulado (“degree-hour”) e ajustados modelos que relacionam o grau-hora acumulado com a vida pós-colheita. Os valores de grau-hora acumulado variaram de 531,2 °C h a 596,0 °C h, considerando o tempo até o fim da vida pós-colheita e de 34,14 °C h a 103,9 °C h considerando a tempo até o início da estocagem. O modelo que se ajustou bem aos dados obteve coeficiente de correlação de 0,957 e um F calculado de 360,5 ( $p < 0,05$ ).

*Palavras-chave:* pós-colheita, alface, grau-hora, vida pós colheita;

**Abstract**

The vegetables have increasing economic importance inside of the agricultural sector in Brazil in the last years. The production of vegetables in 2002 was about 15 million tons. The vegetable quality is determinative in its shelf life. The control of the vegetables temperature is very important to keep its quality. The reduction of the vegetable temperature implies in a reduction of its respiratory rate and other physiological and biochemical processes. The lettuces, *Lactuca sativa* L. (Mimosa group, cv. Salad Bowl), were stored in cooled room with average temperature of 1 °C and relative humidity of 95-100%. Before the storage, different periods of time (1.32 h; 2 h; 3 h; 4 h; 4.68 h) between the harvest and the beginning of temperature reduction were adopted. Some samples were placed directly in the storage room and others were submitted to the vacuum cooling before the storage. The determination of the shelf life was made through sensory evaluation of the lettuces. The temperature of the lettuces was monitored from the harvest to the end of its shelf life. The degree hour (DH) was calculated and models were adjusted to relate the DH with the shelf life. The values of heat accumulated were from 531.2 to 596.0 °C h, considering the time until the end of shelf life (total heat) and from 34.14 to 103.9 °C h, considering the time until the beginning of the storage (partial heat). The model that showed good agreement with the experimental data had a coefficient of regression ( $R^2$ ) 0.957 and calculated F 360.5 ( $p < 0.05$ ).

*Keywords:* postharvest, lettuce, shelf-life, degree-hour;

### 3.1. Introdução

A partir do momento em que uma hortaliça é colhida, ocorre uma série de processos fisiológicos que levam à perda de qualidade do produto e, influenciando, sua vida pós-colheita chegará ao fim. A velocidade desses processos está diretamente relacionada à vida pós-colheita desses produtos. Conseguir uma diminuição dessa velocidade aumentará a vida pós-colheita da hortaliça trazendo vantagens tanto para os produtores quanto para os consumidores. Segundo BRANCH (1986), as hortaliças começam a se deteriorar rapidamente após sua colheita e, para que tenham uma alta qualidade e longo tempo de comercialização, devem ter seu calor de campo removido logo após sua colheita e sua temperatura ótima de estocagem mantida até sua comercialização.

A redução da temperatura das hortaliças pós-colhidas produz uma redução na velocidade da taxa respiratória, principal responsável pela diminuição da qualidade desses produtos (KADER, 1992). Frutas e hortaliças contêm elevado teor de água e estão sujeitas aos danos mecânicos, microbiológicos e a variações de temperatura e umidade do ambiente onde se encontram (CORTEZ *et al.*, 2002). Esses produtos perdem água para o ambiente constantemente; quando colhidos a água não mais pode ser reposta pela planta (exceção a flores e alguns produtos folhosos) gerando perda de massa e alguns defeitos visíveis como a perda de turgor das células (KADER, 1992). Dessa forma, o controle da temperatura e da umidade pós-colheita das hortaliças pode significar um importante passo na conservação de suas qualidades sensoriais e nutricionais.

A perda pós-colheita de frutas e hortaliças frescas é estimada entre 5 a 25 % em países desenvolvidos e entre 20 a 50 % nos países em desenvolvimento (FAO, 1991 *apud* NEVES F<sup>o</sup> *et al.*, 1997), e ainda, as perdas para produtos hortifrutícolas no Estado de São Paulo em 1992 foram da ordem de 35 %, representando um prejuízo de aproximadamente US\$ 1 bilhão para o estado. No Brasil, estima-se que a perda de hortaliças folhosas seja de 40,6 % com base na média dos anos de 1990 a 1992, o que representou uma perda de 1786 mil toneladas anuais e um prejuízo de US\$ 519,5 milhões (BLISKA, 1998).

Uma meta a ser alcançada pelo Brasil é a diminuição das perdas pós-colheita; uma das razões pelo qual o Brasil, apesar de grande produtor de produtos hortifrutícolas, não é um grande exportador.

O objetivo deste trabalho foi o de quantificar a vida pós-colheita de alfaces hidropônicas resfriadas após diferentes tempos de espera e estocadas à 1 °C, e correlacioná-la com o “grau-hora acumulado” (“degree-hour”) pelo produto, ou seja, com o binômio tempo / temperatura calculado desde sua colheita até o início da estocagem e até o término da vida pós-colheita.

## 3.2. Revisão Bibliográfica

### 3.2.1. Hortaliças e Refrigeração

A primeira etapa a se considerar na qualidade de hortaliças é uma colheita adequada. Esta, deve ser feita nas primeiras horas da manhã para evitar as altas temperaturas; o produto deve ir o mais breve possível para a sombra e o uso de pequenos caminhões ou trailers para embalar e resfriar o produto tão logo seja colhido, evitando assim, a espera da colheita de grandes quantidades, deve ser considerado (BRANCH, 1986).

Os produtos hortifrutícolas são constituídos de células vegetais vivas que liberam energia após sua colheita, devido à respiração. A energia liberada é resultado da transformação de substâncias presentes no tecido vegetal, que por sua vez estão diretamente ligados à vida pós-colheita desses tipos de produtos (CORTEZ *et al.*, 2002).

O “calor de campo” é um termo usado para fazer referência à incidência dos raios solares sobre as frutas e hortaliças no momento de sua colheita, onde grande parte das vezes, o produto colhido, permanece sob o sol à espera da refrigeração. Segundo BLEINROTH (1970), quando a colheita é efetuada nas horas mais quentes do dia, a temperatura interna das frutas pode alcançar 8 a 9 °C a mais do que a temperatura ambiente.

Segundo GEESON (1988-1989), a deterioração de frutas e hortaliças é resultado de:

- Transpiração;
- Mudanças fisiológicas e bioquímicas;
- Ação de microorganismos;
- Danos físicos.

As hortaliças são produtos “vivos”, ou seja, mesmo após sua colheita as células de seu tecido continuam realizando reações metabólicas. As hortaliças desenvolvem processos biológicos essenciais para sua manutenção, a partir das reservas acumuladas durante o período pré-colheita. O processo em que tais reservas são convertidas em energia é chamado de respiração. Durante a respiração tem-se o consumo de O<sub>2</sub> como reação de

decomposição oxidativa de compostos mais complexos (por exemplo, amido, açúcares e ácidos orgânicos), com a produção de CO<sub>2</sub>, vapor de água, e liberação de energia na forma de calor (CORTEZ *et al.*, 2002; NEVES F<sup>o</sup> *et al.*, 1993; KADER, 1992).

Quanto maior a taxa de respiração, maiores serão as conseqüências no produto, como perda de aromas, sabor, textura, cor e demais atributos de qualidade do produto (HONORIO, 1992). As taxas dependem de fatores relacionados ao próprio produto, tais como espécie, maturidade, período; e de fatores externos como danos mecânicos e, principalmente, a sua temperatura (GEESON, 1988-1989; VIGNEAULT & GOYETTE, 1994).

A temperatura é o fator ambiental mais importante no controle das taxas dos processos biológicos das hortaliças. De maneira geral, cada 10 °C de redução na temperatura do produto acarreta uma redução de 2 a 4 vezes na sua taxa de respiração, porém essa redução varia com o tipo de produto (VIGNEAULT & GOYETTE, 1994; KADER, 1992; CHITARRA & CHITARRA, 1990).

GERMANO *et al.* (1996), estudaram a influência da temperatura sobre a vida pós-colheita de abacates sendo que, aqueles deixados sob temperatura ambiente tiveram uma vida média pós-colheita de 7 dias, enquanto que, aqueles sob refrigeração tiveram uma vida média pós-colheita de 27 dias.

Segundo HARDENBURG *et al.* (1990), a alface respira aproximadamente 3 vezes mais rápido a 10 °C do que a 0 °C e de 2 a 3 vezes mais rápido a 20 °C do que a 10 °C. A maior parte da energia gerada pela respiração se converte em calor “vital” liberado, portanto, quanto maior a temperatura maior a quantidade de calor liberada. Assim, a refrigeração pós-colheita de alfaces representa um passo importante para sua conservação.

FREIRE JUNIOR *et al.* (2002) estudaram as alterações sensoriais de alface minimamente processada e estocada sob duas diferentes temperaturas, encontrando uma

vida pós-colheita de 7 dias nas estocadas sob temperatura de 2 °C e apenas 3 dias naquelas estocadas sob temperatura de 10 °C.

As taxas respiratórias são muito variadas dependendo de cada tipo de produto, a alface, segundo HARDENBURG *et al.* (1990), apresenta alta taxa respiratória sendo considerada um produto altamente perecível.

O período de espera após a colheita, antes da etapa de refrigeração, influenciará na deterioração desses produtos (HARDENBURG *et al.*, 1990). Para preservar a qualidade e prolongar a vida pós-colheita de produtos hortícolas é essencial fazer um resfriamento até a temperatura próxima de estocagem (SPAGNOL & SIGRIST, 1992). Quanto antes uma hortaliça atingir a sua temperatura ideal de estocagem, maior será sua vida pós-colheita e menores serão suas perdas durante a comercialização.

SHEWFELT & BRENNAN (1989) encontraram diferenças significativas na vida pós-colheita de brócolis resfriadas após dois diferentes tempos de espera para o resfriamento, 0,5 h e 3 h.

Segundo HARDENBURG (1990), muitos produtos de origem vegetal devem ser submetidos aos métodos de resfriamento e, todos, estocados em condições ótimas imediatamente após a colheita para atingirem o tempo máximo de vida pós-colheita.

A estocagem sob condições ótimas inclui, além do controle da temperatura, o controle da umidade relativa. Uma estocagem sob condições desfavoráveis de umidade relativa do ambiente pode alterar a qualidade de frutas e hortaliças. JORDAN *et al.* (2002) observaram uma perda significativa da qualidade de alfaces estocadas por 15 dias em câmara de refrigeração sem controle de umidade, quando comparadas com as alfaces estocadas em câmara de refrigeração com controle de umidade relativa (93%).

Um outro aspecto importante no controle da temperatura é o crescimento de microrganismos. A temperatura pode afetar significativamente o crescimento de diversos microrganismos de tal forma que, a sua diminuição inibe ou reduz esse crescimento.

### 3.2.2. Alface

Originária da Ásia e trazida para o país pelos portugueses, no século XVI, a alface, *Lactuca Sativa L.*, é a hortaliça folhosa de maior consumo no Brasil (CEAGESP, 1999).

A alface é uma planta herbácea com pedicelo diminuto, não ramificado, no qual se prendem as folhas. As folhas são grandes, lisas ou crespas, fechando-se ou não na forma de uma “cabeça”; possui raízes do tipo pivotante, ramificações delicadas, finas e curtas. (FIGUEIRA, 2002). Dos inúmeros cultivares existentes no mundo pode-se agrupá-las em 6 grupos diferentes, considerando o aspecto das folhas e o fato das folhas se agruparem ou não para formarem uma “cabeça” repolhuda:

- *Repolhuda manteiga*: apresentam folhas lisas, delicadas, “amanteigadas” formando uma típica cabeça repolhuda compacta;
- *Repolhuda crespa (americana)*: as folhas são crespas, consistentes, formando uma cabeça compacta;
- *Solta lisa*: folhas lisas e soltas, não formando cabeça compacta;
- *Solta crespa*: folhas crespas, consistentes, soltas, não formando cabeça;
- *Mimosa*: folhas soltas com as bordas recortadas, não formando cabeça;
- *Romana*: folhas tipicamente alongadas, duras, com nervuras claras e protuberantes, formam uma cabeça fofa, alongada.

Segundo classificação comercial, de acordo com o Programa Brasileiro para a Modernização da Horticultura, a alface pode ser agrupada em cinco grupos:

- *Crespas*: folhas crespas de bordas recortadas e irregulares, não formam cabeça;
- *Lisa*: folhas lisas e delicadas de bordas arredondadas, podendo ou não formar cabeça;

- *Americana*: folhas lisas ou crespas, consistentes, quebradiças, verde esbranquiçadas e curvas, formando cabeças de alta compacidade;
- *Romana*: folhas tipicamente alongadas, duras, com nervuras claras e protuberantes, formam uma cabeça fofa e alongada;
- *Mimosa*: folhas lisas muito recortadas.

No Estado de São Paulo, a alface ocupa 7.859 hectares, com produção de 137 mil toneladas/ano, gerando mais de 6.000 empregos. A cultura da alface apresenta alto grau tecnológico, sendo comuns as práticas de produção em estufa, hidroponia e cultivo orgânico, que permitem obter produtos de qualidade durante o ano todo. A alface é um produto rico em Vitaminas A e C, Cálcio e Fósforo; na medicina popular é recomendada como calmante. Hortaliça tipicamente folhosa é consumida *in natura*, frescor e limpeza são as características mais valorizadas pelo consumidor (CEAGESP, 1999).

### 3.2.3. Avaliação de Vida Pós-colheita

Para a avaliação da vida pós-colheita de produtos alimentícios pode ser utilizado um método de avaliação sensorial afetivo, identificando quantitativamente o quanto um consumidor gostou ou desgostou de uma amostra. Testes afetivos de escala são utilizados para avaliação de novos produtos, avaliação da qualidade, níveis de intensidade de um atributo e ainda para acompanhamento de produtos armazenados (MONTEIRO, 1984).

A escala hedônica é uma escala muito utilizada, onde é possível atribuir valores numéricos que são relacionados a características sensoriais pelos provadores. A palavra “hedônica” está relacionada com os estados psicológicos conscientes agradáveis ou desagradáveis. Nessa escala, as respostas afetivas dos provadores, isto é, os estados psicológicos de gosto ou desgosto são medidos por uma escala de pontos, por isso, muitas vezes são chamados de testes afetivos. São testes que consistem de um “continuum” criado para quantificar julgamentos e são úteis para provadores não treinados ou para aqueles que não tem experiência na utilização de escalas (MONTEIRO, 1984 e TEIXEIRA *et al.*, 1987).

Tais testes são indicados para determinação de vida pós-colheita, segundo a ASTM (1993). O teste de escala hedônica possui uma escala de notas de 9 a 1, representando o quanto o provador gostou ou desgostou da amostra, são distribuídas da seguinte forma:

- 9 – Gostei muitíssimo;
- 8 – Gostei muito;
- 7 – Gostei moderadamente;
- 6 – Gostei ligeiramente;
- 5 – Nem gostei / Nem desgostei;
- 4 – Desgostei ligeiramente;
- 3 – Desgostei moderadamente;
- 2 – Desgostei muito;
- 1 – Desgostei muitíssimo.

Na mesma avaliação sensorial pode-se efetuar um teste de intenção de compra. O teste é similar à escala hedônica, porém com uma escala de 5 a 1, representando a possibilidade do provador comprar a amostra, a escala utilizada é apresentada a seguir:

- 5 – certamente compraria;
- 4 – provavelmente compraria;
- 3 – talvez comprasse / talvez não comprasse;
- 2 – provavelmente não compraria;
- 1 – certamente não compraria.

O uso conjunto das duas escalas é indicado e utilizado na avaliação de vida pós-colheita de produtos, e segundo MEILGAARD *et al.* (1999) seu uso é classificado como um teste de aceitação, onde a intenção é determinar o “grau de afetividade” do produto.

#### **3.2.4. Grau-hora Acumulado (“Degree-Hour”)**

O “degree-hour” (DH) ou “degree-day” (DD) é um conceito que relaciona, indiretamente, a quantidade de calor acumulado por um certo produto ou ambiente durante

horas (DH) ou dias (DD). Tem sido usado como estudo para requerimentos energéticos aplicados a indústrias e residências como no trabalho DURMAYAS *et al.* (2000).

O conceito “degree-hour” também tem tido uma recente aplicação em avaliação de qualidade de pré e pós-colheita de alimentos vegetais correlacionando o valor DH a um parâmetro específico do alimento. HURST *et al.* (1998), trabalharam na avaliação da vida pós-colheita de aspargos correlacionando o DH com a concentração do aminoácido arpargina, chegando a valores limites de 650 °C h para a qualidade do aspargo. Neste trabalho, utiliza-se preferencialmente o termo “grau-hora acumulado” (GH) para designar esse binômio tempo / temperatura a que os produtos são expostos após a colheita.

A Figura 3.1 apresenta um exemplo de cálculo do valor do grau-hora acumulado por um certo produto. A área abaixo da curva de temperaturas do produto representa esse valor, podendo ser calculado como grau-hora ou grau-dia, dependendo da unidade que se queira utilizar. Nesse exemplo a temperatura de 0 °C é tomada como referência no cálculo, isto é, a área calculada está entre a curva de temperaturas do produto e o eixo “x” que cruza no valor de temperatura 0 °C.

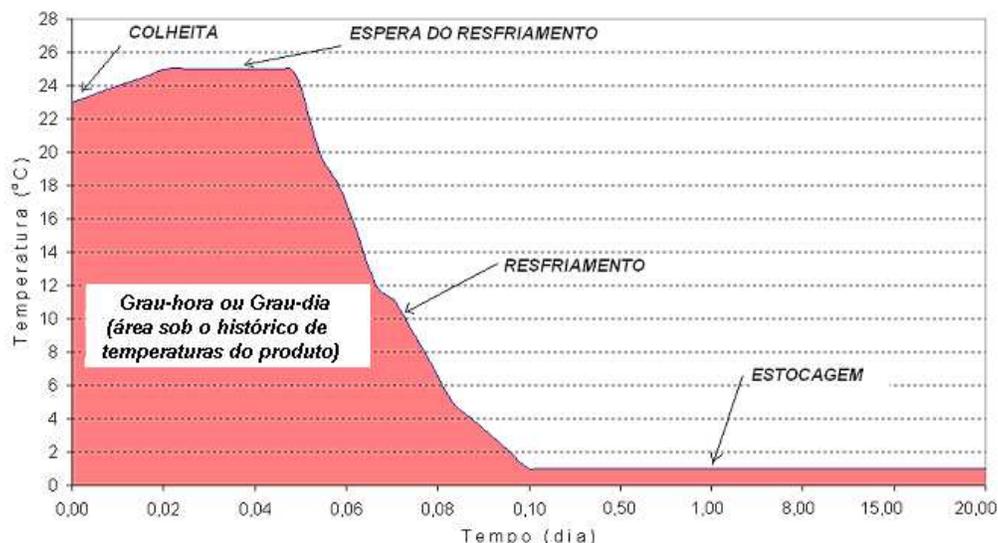


Figura 3.1 – Exemplo de um histórico de temperaturas de um produto para o cálculo do grau-hora acumulado (GH) ou grau-dia acumulado.

### 3.3. Materiais e Métodos

#### 3.3.1. Experimentos

Para a realização deste estudo foram utilizados os 17 ensaios de resfriamento a vácuo descritos no capítulo II deste trabalho. Entre eles variou-se a massa de alface, a vazão de bombeamento e o tempo de espera para o resfriamento (Tabela 2.4, Capítulo II). No capítulo II não foi possível estabelecer um bom modelo que descrevesse a vida pós-colheita das alfaces submetidas ao resfriamento a vácuo. Na tentativa de estabelecer um melhor modelo foi feito o cálculo do grau-hora acumulado desses produtos, desde sua colheita até o início da estocagem e até fim da vida pós-colheita. Além dos 17 ensaios foram adicionados 3 outros ensaios denominados A, B e C, onde as alfaces foram colocadas diretamente na câmara de estocagem, ou seja, sem serem submetidas ao resfriamento. A Tabela 3.1 apresenta os ensaios realizados.

**Tabela 3.1 – Experimentos realizados e seus tempos de espera.**

Ensaio	Resfriamento a Vácuo	Tempo de Espera (h)
1	sim	4
2	sim	4
3	sim	2
4	sim	2
5	sim	4
6	sim	4
7	sim	2
8	sim	2
9	sim	3
10	sim	3
11	sim	3
12	sim	3
13	sim	3
14	sim	1,32
15	sim	4,68
17	sim	3
A	não	2
B	não	3
C	não	4

### 3.3.2. Produto

Alface hidropônica do grupo Mimosa, cv. Salad Bowl, foi utilizada neste trabalho. Foram colhidas entre 28 e 31 dias após o transplante das mudas, sempre pela manhã às 8:00 horas, embaladas em filme plástico de polipropileno perfurado em forma de cone. Foram adquiridas junto à empresa Cia das Hortaliças, localizada no Sítio São Luis da Tapera, no bairro Von Zuben na cidade de Campinas-SP.

As alfaces foram transportadas até o laboratório e colocadas em uma câmara de condicionamento para uniformização da temperatura das mesmas, porém sem controle de umidade relativa. A câmara manteve as amostras sob temperaturas de  $21\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , em função do sistema de refrigeração existente nessa câmara e umidade relativa do ar entre 70-75 %, com umidificação do ar através de uma bandeja contendo água. Ficaram nessa câmara de condicionamento em diferentes tempos de espera e então submetidas a um resfriamento a vácuo.

Após o resfriamento, as alfaces foram colocadas na câmara de estocagem. A câmara manteve-se na temperatura média de  $1\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa entre 95-100 %. Segundo HARDENBURG *et al.* (1990) e THOMPSON *et al.* (1998) a temperatura ideal de estocagem para alfaces é de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , porém nessa condição, devido à variação de temperatura em torno do “set-point”, ocasionada pelo sistema de refrigeração da câmara, as folhas das alfaces poderiam congelar. Dessa forma optou-se pela temperatura de estocagem de  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Na Figura 3.2 podem ser vistas as alfaces estocadas e acondicionadas dentro das caixas plásticas.

Na colheita e no transporte até o Laboratório de Automação e Controle de Processos de Alimentos foi utilizado um medidor da Cole-Parmer Instrument Company, modelo Trisense Meter, para registro de temperatura e umidade relativa do ambiente. Na câmara de condicionamento foram utilizados termopares do tipo “T” e mesmo medidor de umidade relativa. Durante o resfriamento a vácuo e na estocagem das amostras foram utilizados termopares do tipo “T” para medir as temperaturas das folhas e do interior da câmara. No

controle de umidade relativa da câmara de estocagem foi utilizado um controlador e medidor de umidade relativa do tipo “psicrométrico” da marca FullGauge.



Figura 3.2 – Alfaces estocadas na câmara frigorífica.

### 3.3.3. Avaliação da Vida Pós-colheita

As amostras foram retiradas da câmara de estocagem em número de uma por ensaio de cada lote. Isto é, a cada análise sensorial foi avaliada uma alface correspondente ao ensaio realizado de acordo com o planejamento experimental. No início, as avaliações foram feitas em dias não específicos, devido às variações de quantidade e dia de processamento. Outra razão, foi a decisão de se fazer o teste de avaliação sensorial em certo dia foi baseada na observação constante dos lotes estocados.

Quanto ao tipo de teste para avaliação sensorial das alfaces foi utilizado um teste afetivo do tipo escala hedônica, onde se atribui um valor numérico a uma característica do produto a ser analisado. Juntamente com o teste de escala hedônica foi utilizado um teste de intenção de compra, que se utiliza também de uma escala estruturada. Foram utilizados de 25-30 provadores não treinados, como indicado por STONE & SIDEL (1993). Um exemplo da ficha aplicada neste trabalho pode ser vista no Anexo IV.

O limite da vida pós-colheita para as alfaces foi estabelecido na nota inferior a 5,0 (50 % da escala) na média da amostra para o teste da escala hedônica ou 3,0 (50 % da escala) na média da amostra no teste de intenção de compra ou ainda, quando mais que 50 % dos provadores classificar com notas abaixo de 5 para a escala hedônica ou 3 na intenção de compra. A nota 100 % para ambos os testes foi admitida como sendo a nota da colheita, isto é, a máxima qualidade do produto foi adotada como sendo aquela da sua colheita.

#### 3.3.4. Câmara de Estocagem

Com a finalidade de estocar os produtos e avaliar a vida pós-colheita foi utilizada uma câmara de refrigeração da marca Dânica Tupiniquin. A câmara é composta de painéis de poliuretano e possui equipamento de refrigeração do tipo “plug in” da marca KitFrigor. A Figura 3.3 apresenta a câmara de estocagem.

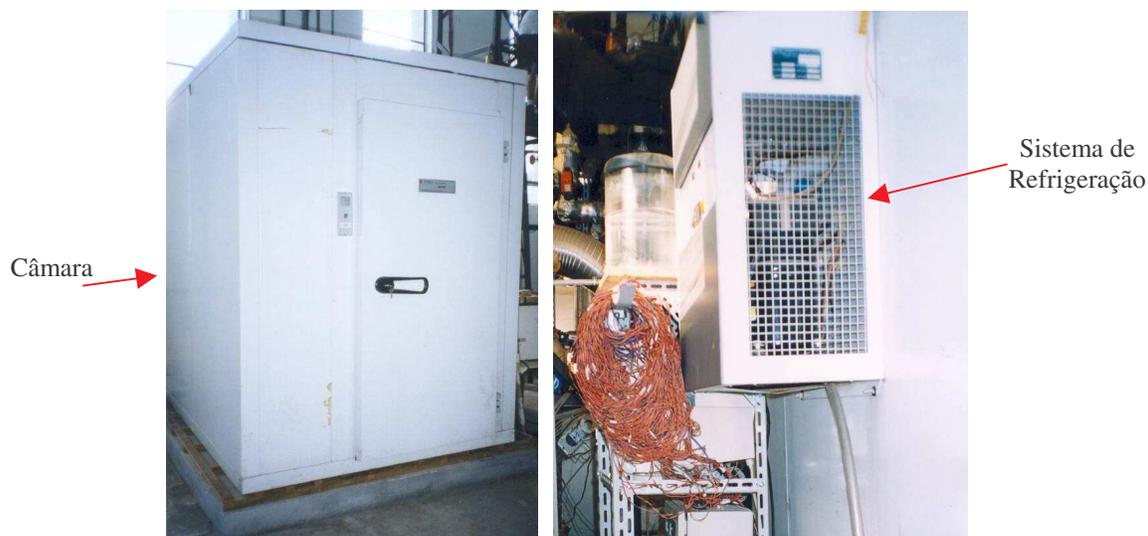


Figura 3.3 – Câmara de resfriamento e detalhe do sistema de refrigeração.

Foi montado um sistema de umidificação por ar comprimido na câmara de armazenamento. Tal sistema consiste em um bico aspersor da marca Bikos, um controlador e sensor psicrométrico de umidade e temperatura da empresa FullGauge Controls, modelo AHC-40, reservatório de água, linha de ar comprimido e duas válvulas solenóides.

Para a monitoração das temperaturas e umidade relativa do ar da câmara foi utilizado um sistema de aquisição de dados composto de um microcomputador Pentium 133 MHz, software Sitrad 3.1, fornecido pela empresa FullGauge Controls. Com o software e o controlador foi possível o controle e a monitoração da umidade relativa durante todos os experimentos. As Figuras 3.4 e 3.5 apresentam esses sistemas.

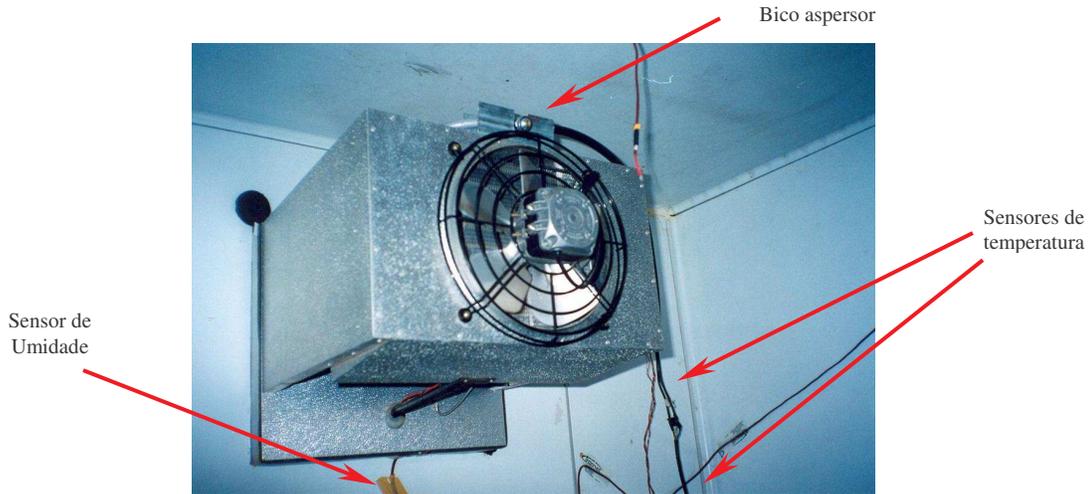


Figura 3.4 – Evaporador da câmara; detalhes dos sensores e bico aspersor.

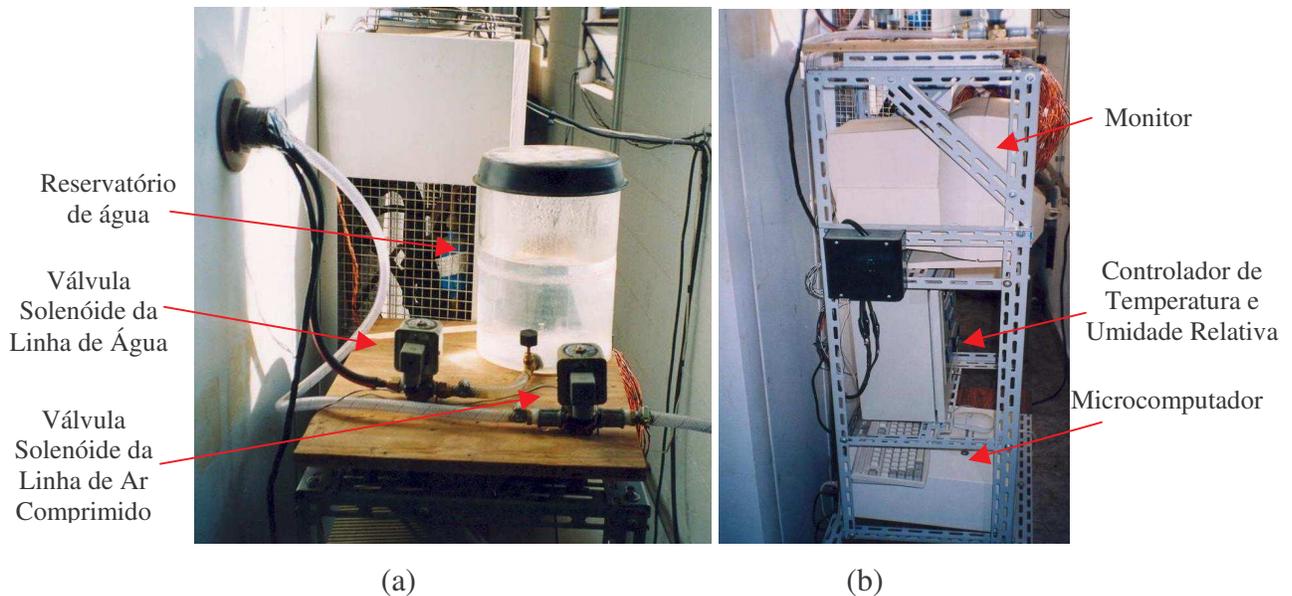


Figura 3.5 – Câmara de estocagem (a) Sistema de umidificação do ar interno da câmara; (b) Sistema de monitoração de temperatura e controle eletrônico de umidade relativa.

### 3.3.5. Cálculo do Grau-hora Acumulado (GH)

Neste trabalho foi calculado o grau-hora acumulado (GH) através do histórico de temperaturas dos lotes de produtos. Com os dados de temperatura em função do tempo foi calculado para cada intervalo de tomada dos dados um valor de GH, tendo como temperatura de referência 0 °C, que é a temperatura ótima de estocagem das alfaces. O cálculo do GH acumulado foi feito de acordo com equação 3.1, apresentada a seguir.

$$GH = \sum_{i=0}^n \frac{(T_{i+1} + T_i) \cdot (t_{i+1} - t_i)}{2} \quad (3.1)$$

onde,

$t$  = tempo após a colheita, (h);

$T$  = temperatura do produto, (°C).

Após o cálculo dos valores de GH em cada instante de medida de tempo e temperatura, o valor final do GH acumulado para cada ensaio foi estabelecido através da simples soma algébrica de todos os instantes dentro de um intervalo de tempo pré-definido. Foram tomados dois intervalos de tempo, um que compreendeu desde a colheita das alfaces até o fim de suas vidas pós-colheita, resultando no grau-hora acumulado total (GHT); e outro intervalo que compreendeu desde a colheita das alfaces até o início da estocagem, resultando no grau-hora acumulado parcial (GHP). A soma algébrica dos valores de GH em cada instante de medida de tempo e temperatura é igual a área sob a curva do histórico de temperaturas de cada ensaio, tomando-se uma temperatura inferior como referência, neste trabalho foi utilizada a temperatura de 0 °C.

### 3.3.6. Cálculo do Déficit de Umidade Relativa Acumulada (UR100)

A temperatura das hortaliças é um importante parâmetro de controle para suas qualidades, porém outros parâmetros também devem ser levados em consideração, tais como, uma colheita adequada, manuseio adequado, exposição em ambientes com umidade relativa adequada, etc. A umidade relativa indicada na estocagem de alfaces é de 98-100% (HARDENBURG *et al.*, 1990), se uma alface for exposta a umidades relativas baixas, pode

haver uma grande perda de água, afetando assim sua qualidade e vida pós-colheita. Dessa forma, com os dados de umidades relativas adquiridas em todos os ensaios desde a colheita até o fim da vida pós-colheita, decidiu-se por estabelecer uma interação entre os valores de GH com os valores de umidade relativa. Para tanto, decidiu-se pelo uso de uma variável que indicasse a diferença entre a máxima umidade relativa indicada (100% para alfaces) pela umidade na qual as alfaces foram expostas, chamando-a de “déficit” de umidade relativa.

Consideram-se todos os instantes medidos de umidade relativa desde a colheita até o início da estocagem para o cálculo do déficit, somam-se algebricamente esses valores para obter-se o déficit de umidade relativa acumulada (UR100) de cada ensaio. A equação 3.2 apresenta o cálculo:

$$UR100 = \sum_{i=0}^n (100 - UR_i) \quad (3.2)$$

onde,

$UR100$  = déficit de umidade relativa acumulada (%);

$UR$  = umidade relativa do ambiente (%).

Após o cálculo de umidade relativa acumulada em cada ensaio (UR100), foi feita a multiplicação entre os valores de UR100 com o valor de GHP. Assim, correlacionou-se essa interação, chamada de GHPUR, com a vida pós-colheita das alfaces.

### 3.4. Resultados e Discussão

#### 3.4.1. Resultados da Avaliação da Vida Pós-colheita

Os resultados de cada avaliação sensorial para cada ensaio são apresentados a seguir na forma de figuras, pelas quais pode-se visualizar o comportamento sensorial ao longo da vida pós-colheita de cada ensaio.

Na Figura 3.6 são apresentadas as avaliações sensoriais dos ensaios de 1 ao 4 de acordo com a Tabela 3.1. Verifica-se uma semelhança no comportamento das notas em todos os ensaios, apenas o tempo final, onde as amostras tiveram fim à sua vida pós-colheita, variou em cada ensaio.

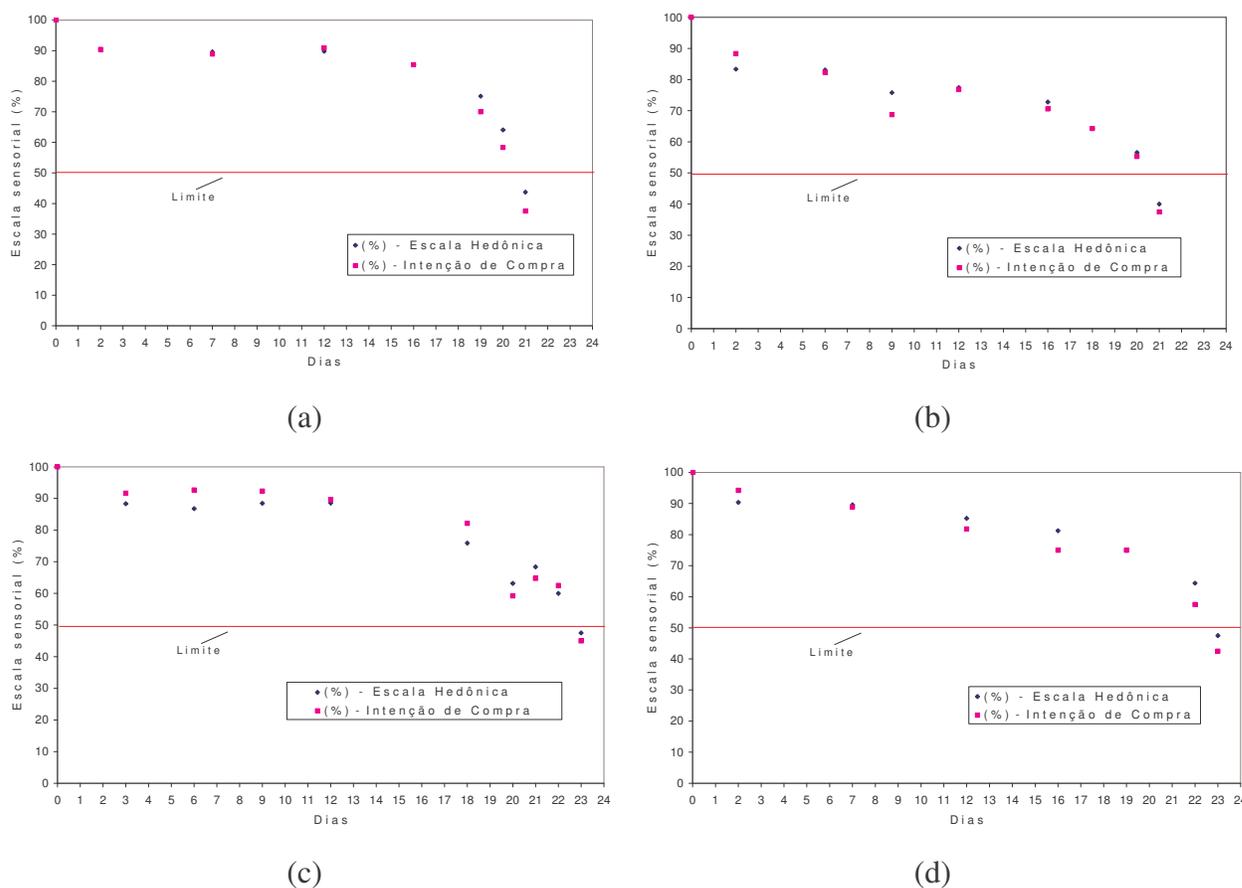


Figura 3.6 – Histórico de notas da avaliação sensorial das alfaces submetidas ao resfriamento a vácuo: (a) ensaio 1, tempo de espera de 4 h; (b) ensaio 2, tempo de espera 4 h; (c) ensaio 3, tempo de espera 2 h; (d) ensaio 4, tempo de espera 2 h.

Observa-se na Figura 3.6 que a vida pós-colheita foi maior nos ensaios 3 e 4, representados pelas curvas (c) e (d), com 22 dias. Os ensaios 1 e 2, representados pelas curvas (a) e (b), apresentaram uma vida pós-colheita de 20 dias. Assim percebe-se que um período de espera de 2 horas a mais foi responsável por essa diferença na vida pós-colheita.

Os históricos da avaliação sensorial para o restante dos ensaios estão no Anexo IV. Nas Figuras 1, 2, 3 e 4 do Anexo IV, os comportamentos se assemelham com a Figura 3.6. As notas da escala hedônica, referente à qualidade, acompanha as notas da escala de intenção de compra na maioria das avaliações, poucos pontos apresentaram uma diferença grande. Na Figura 5 do Anexo IV, encontram-se ainda os ensaios A, B e C, sendo que, nos quais as alfaces foram colocadas diretamente na câmara de estocagem, em tempos de espera pré-determinados, sem serem submetidas ao resfriamento a vácuo.

Na Tabela 3.2 estão os resultados da vida pós-colheita para todos os ensaios realizados.

**Tabela 3.2 – Resultados da avaliação sensorial da vida pós-colheita.**

Ensaio	Vida pós-colheita (dias)
1	20
2	20
3	22
4	22
5	20
6	20
7	22
8	22
9	21
10	21
11	22
12	21
13	21
14	23
15	19
16	19
17	21
A	22
B	21
C	20

Observa-se na Tabela 3.2 uma variação da vida pós-colheita de no máximo 4 dias, devido as diferenças dos tempos de espera da refrigeração adotados. Nos ensaios, onde não houve resfriamento antes da estocagem (ensaios A, B e C), os tempos de vida pós-colheita foram similares aos ensaios com resfriamento a vácuo.

### 3.4.2. Grau-hora Acumulado “GH”

A seguir é apresentada a Figura 3.7, onde estão os históricos de temperatura das alfaces, desde a colheita até o fim da vida pós-colheita, dos 4 primeiros ensaios de acordo com a Tabela 3.1 do item Materiais e Métodos. Foram evidenciados, de forma desproporcional, os tempos iniciais dos históricos, desde a colheita até o fim do resfriamento, visto que, após a temperatura de estocagem ser atingida esta se mantém até o fim da vida pós-colheita.

Pela Figura 3.7, percebe-se que as diferenças na área sob as curvas, ou seja, o grau-hora acumulado (GH), estão determinadas pelo tempo de espera e pela vida pós-colheita de cada ensaio. Em todos os históricos de temperatura, pode-se observar um primeiro patamar de temperatura que representa a temperatura de colheita, um segundo que representa a temperatura de transporte, um terceiro que representa a temperatura na câmara de estabilização, a seguir, a curva de resfriamento da alface e, logo em seguida, o último patamar de temperatura que representa a temperatura na câmara de estocagem.

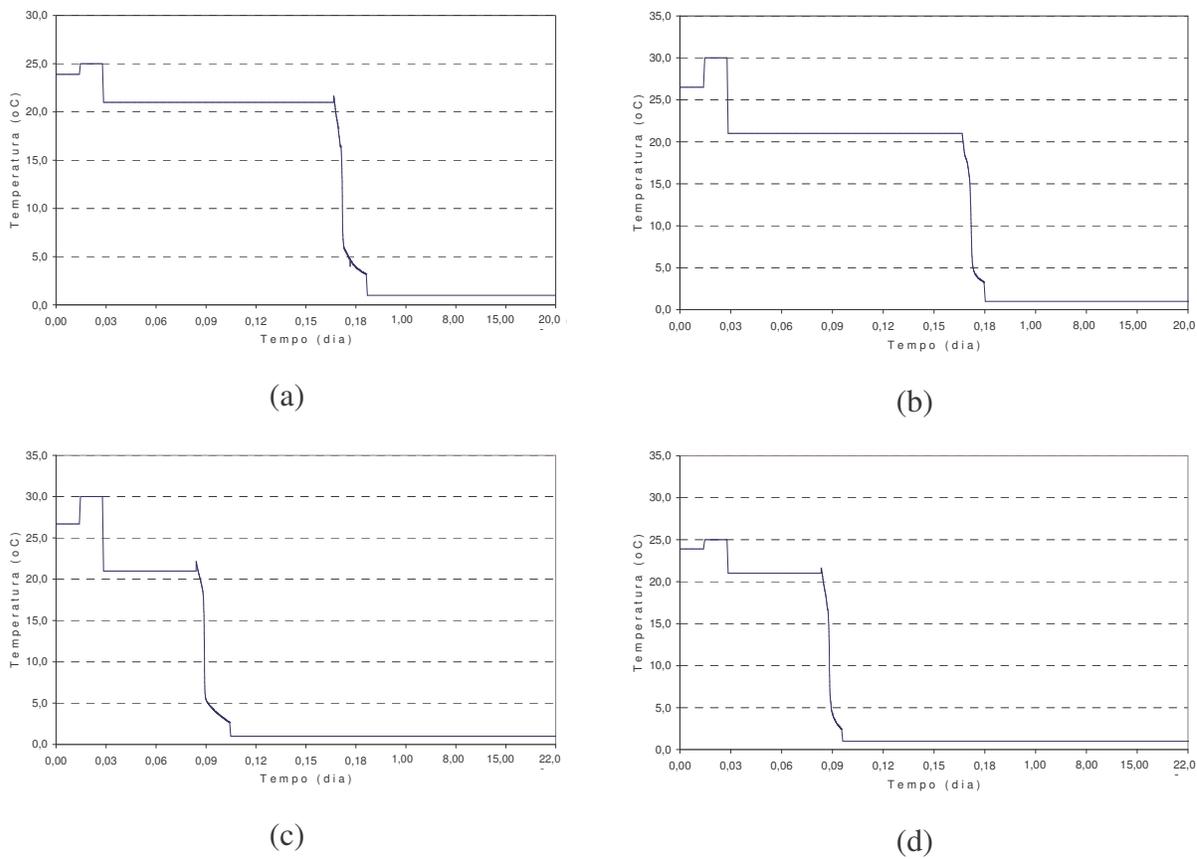


Figura 3.7 - Histórico das temperaturas das alfaces desde a colheita até o fim da vida pós-colheita: (a) ensaio 1, tempo de espera de 4 h; (b) ensaio 2, tempo de espera 4 h; (c) ensaio 3, tempo de espera 2 h; (d) ensaio 4, tempo de espera 2 h.

Os históricos de temperaturas dos demais ensaios estão no Anexo IV, representados pelas Figuras 6, 7, 8, 9 e 10. Assim como na Figura 3.7, a temperatura durante o transporte das alfaces foi a maior temperatura a que foram submetidas (corresponde ao patamar mais alto de temperaturas nos históricos). Observa-se que a temperatura de colheita foi maior que a da câmara de estabilização na maioria dos ensaios, exceto no ensaio 9 (Figura 7, Anexo IV).

Na Figura 10 do Anexo IV, estão os históricos de temperatura dos ensaios A, B e C. Nestes ensaios, percebe-se que o resfriamento das alfaces se dá de maneira mais suave e também que a temperatura de estocagem foi atingida após um maior tempo, se comparadas aos demais ensaios. Isso ocorreu pois nestes ensaios não houve o resfriamento a vácuo, e as amostras foram colocadas diretamente na câmara de estocagem.

Os cálculos dos graus-hora acumulados, desde a colheita até o fim da vida pós-colheita, são chamados aqui de “grau-hora acumulado total (GHT)”. A Tabela 3.3 apresenta os valores de GHT para todos os ensaios.

**Tabela 3.3 – Valores de grau-hora acumulado total (GHT) desde a colheita até o fim da vida pós-colheita.**

Ensaio	Vida pós-colheita (dias)	Grau-hora acumulado total GHT (°C.h)
1	20	570,1
2	20	571,9
3	22	579,1
4	22	575,2
5	20	576,6
6	20	572,5
7	22	579,9
8	22	580,8
9	21	574,6
10	21	573,4
11	22	596,8
12	21	576,1
13	21	578,9
14	23	586,1
15	19	559,9
16	19	531,2
17	21	572,0
A	22	607,4
B	21	599,3
C	20	596,8

Os resultados do GHT apontam para uma aparente incoerência, na qual os seus maiores valores estão nos ensaios de maior vida pós-colheita. Assim, ensaios onde a vida pós-colheita foi maior apresentaram um GHT maior, contradizendo o conceito de que produtos com maior GHT apresentariam menor vida pós-colheita.

Outro problema apresentado está na tentativa de ajustar esses dados através de um modelo que represente a vida pós-colheita em função do GHT. Como a maior parte do valor de GHT de cada ensaio é devido ao tempo de estocagem, o tempo de espera da refrigeração acaba tendo uma importância insignificante nesse valor. Dessa forma o modelo ajustado, equação 3.3, apresentou um baixo coeficiente de correlação,  $R^2 = 0,360$ .

$$VP = -2,88 + 0,04123 * GHT \tag{3.3}$$

onde,

VP = vida pós-colheita (dia);

GHT = grau-hora acumulado total (°C h);

A Tabela 3.4 apresenta a análise de variância do modelo ajustado juntamente com o teste F. A Figura 3.8 apresenta graficamente os dados de vida pós-colheita com os valores dos GHT's juntamente com o modelo proposto (reta).

**Tabela 3.4 – ANOVA para o modelo de regressão da vida pós-colheita em função do grau-hora acumulado até o fim da estocagem (GHT).**

Fonte de variação	SS	df	MS	F	F
Regressão	8,22	1	8,22	10,02	4,41
Resíduos	14,73	18	0,82		
Total	22,95	19			

SS: Soma quadrática; df: graus de liberdade; MS: Média quadrática; F: fator “F” calculado; f: fator “F” tabelado.

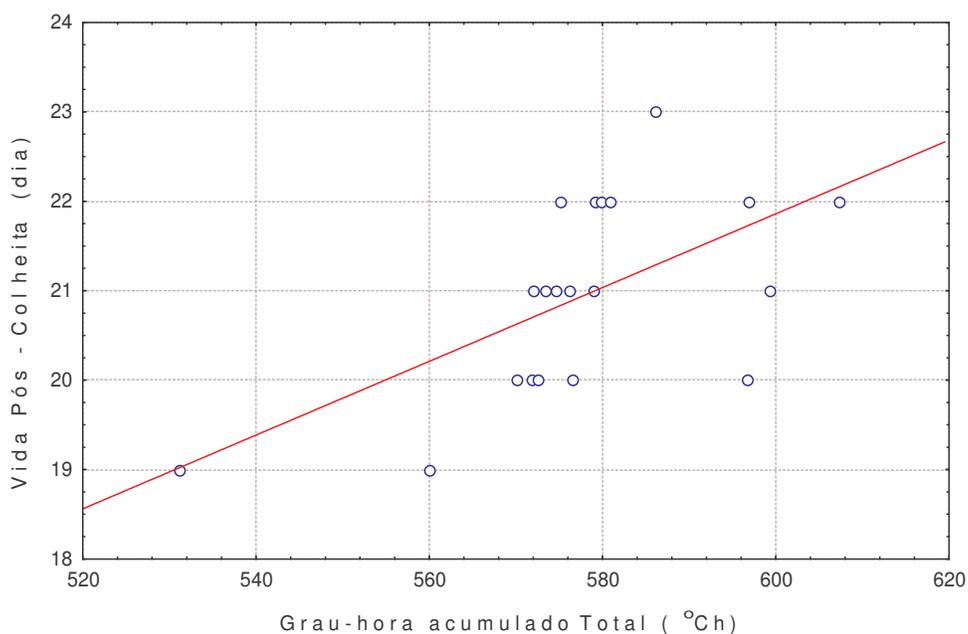


Figura 3.8 - Modelo ajustado ( $R^2 = 0,360$ ) para os dados de vida pós-colheita em função do grau-hora acumulado até o fim da estocagem (GHT).

### 3.4.3. Grau-hora Acumulado Parcial

Devido aos parâmetros estatísticos ruins do modelo da equação 3.3, o intervalo de tempo para o cálculo do grau-hora acumulado foi modificado. Foram agora considerados apenas os valores de grau-hora acumulado em cada instante desde a colheita até o início da estocagem na câmara, chamando-se este de “grau-hora acumulado parcial (GHP)”. Assim, os valores dos graus-hora acumulados são tanto maiores quanto mais demorado for para as temperaturas dos produtos atingirem a temperatura final. Dessa forma, chamou-se de grau-hora acumulado parcial (GHP) a área sob a curva do histórico das temperaturas até o início da estocagem das amostras, onde a temperatura indicada foi de 1 °C, sempre adotando a temperatura de referência de 0 °C. A Figura 3.9 ilustra como foi feito o cálculo do GHP.

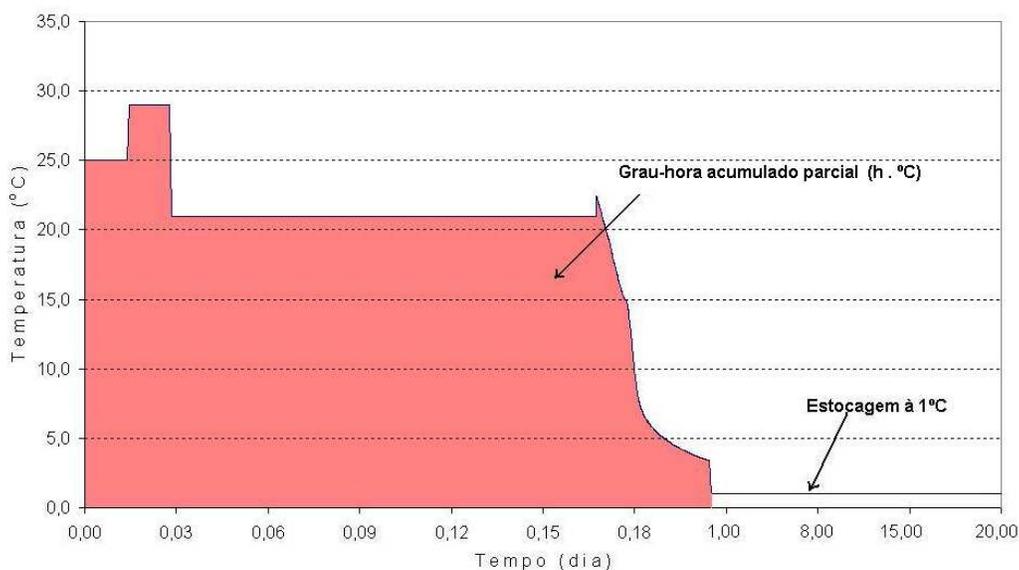


Figura 3.9 – Exemplo de cálculo do grau-hora acumulado parcial (GHP).

Assim, os valores de GHP's apresentaram uma relação coerente, facilmente perceptível, com a vida pós-colheita (Tabela 3.5). De forma que, os maiores graus-hora acumulados significaram as maiores vidas pós-colheitas. Além disso, observa-se, pela Tabela 3.5, que valores próximos de GHP correspondem a valores iguais de vida pós-colheita. Os valores para todos os ensaios podem ser vistos na Tabela 3.5.

**Tabela 3.5 – Valores de graus-hora acumulados desde a colheita até o início da estocagem (GHP).**

Ensaio	Vida pós-colheita (dias)	Grau-hora acumulado, GHP (°C h)
1	20	90,14
2	20	91,89
3	22	51,12
4	22	47,17
5	20	96,57
6	20	92,53
7	22	51,9
8	22	52,82
9	21	65,5
10	21	69,39
11	22	68,85
12	21	72,14
13	21	74,88
14	23	34,14
15	19	103,9
16	19	75,17
17	21	68,02
A	22	57,01
B	21	77,10
C	20	100,03

Com os dados da Tabela 3.5 foi feito um ajuste apresentado na equação 3.4 e representado na Figura 3.10. O modelo apresentou um coeficiente de correlação de 0,790.

$$VP = 24,58 - 0,0504 * GHP \quad (3.4)$$

onde,

$VP$  = vida pós-colheita (dia);

$GHP$  = grau-hora acumulado parcial (°C h);

Na Tabela 3.6 é apresentada a análise de variância do modelo proposto (equação 3.4). Pode-se observar que o F calculado foi alto se comparado ao tabelado. Os valores dos graus-hora acumulados parciais foram plotados com os valores de vida pós-colheita, juntamente com o modelo proposto (Figura 3.10).

**Tabela 3.6 – ANOVA para o modelo de regressão da vida pós-colheita em função do grau-hora acumulado até início da estocagem (GHP).**

Fonte de variação	SS	df	MS	F	f
Regressão	18,13	1	18,13	67,75	4,41
Resíduos	4,82	18	0,27		
Total	22,95	19			

SS: Soma quadrática; df: graus de liberdade; MS: Média quadrática; F: fator “F” calculado; f: fator “F” tabelado

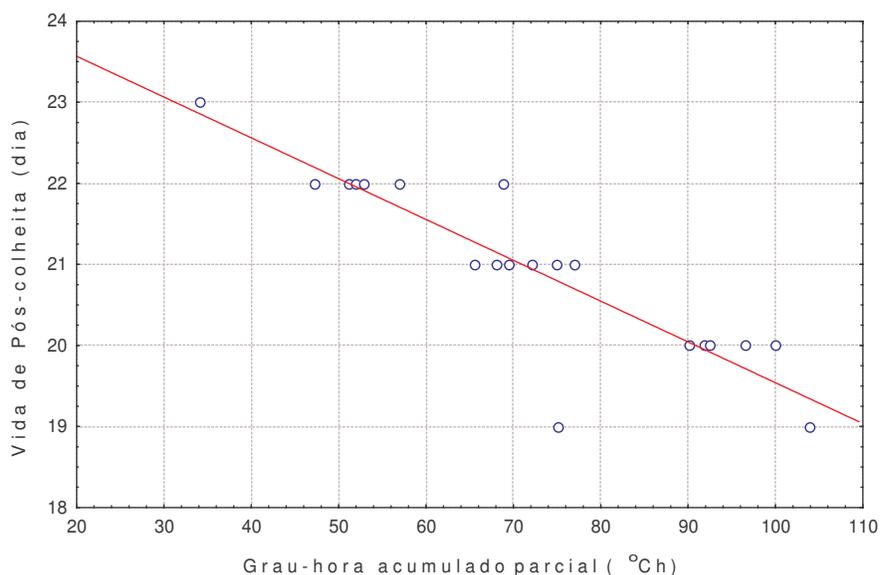


Figura 3.10 - Modelo ajustado ( $R^2 = 0,790$ ) para os dados de vida pós-colheita em função do grau-hora acumulado até o início da estocagem (GHP).

De acordo com a Figura 3.10, observa-se que dois pontos estão mais distantes da reta que representa o modelo da equação 3.4 e, portanto, são os responsáveis pelo modelo não apresentar um melhor ajuste. São os ensaios de número 11 e 16. O ensaio 11 é um ponto central do planejamento experimental feito no Capítulo 2 e, portanto, juntamente com os ensaios 9 e 10 representam o erro experimental do planejamento. Quanto ao ensaio 16, a explicação está no excessivo tempo de processo de resfriamento a vácuo, consequência da pequena vazão de bombeamento adotada durante este ensaio (Tabela 2.3, Capítulo 2). Esse excessivo tempo de processo significou uma perda de massa excessiva o que afetou a qualidade das alfaces e, por consequência, a vida pós-colheita diminuiu.

Assim, propõe-se a desconsideração do ponto 11 por representar uma condição de erro experimental. Propõe-se ainda, a desconsideração do ensaio 16, já este não representa uma condição normal de processo de resfriamento. Com isso, ajustou-se um novo modelo, que é apresentado na equação 3.5.

$$VP = 24,54 - 0,0491 * GHP \quad (3.5)$$

onde,

$VP$  = vida pós-colheita (dia);

$GHP$  = grau-hora acumulado ( $^{\circ}C$  h);

O novo modelo apresenta um coeficiente de correlação ( $R^2$ ) de 0,957 bem superior aos das equações 3.3 e 3.4. A Tabela 3.7 apresenta a análise de variância para o novo modelo. Nessa tabela o valor de F calculado é bem superior ao tabelado, indicando uma boa predição do modelo.

**Tabela 3.7 – ANOVA para o modelo de regressão da vida pós-colheita em função do grau-hora acumulado até início da estocagem (GHP) sem os ensaios 11 e 16.**

Fonte de variação	SS	df	MS	F	f
Regressão	17,23	1	17,23	360,05	4,49
Resíduos	0,77	16	0,048		
Total	18,00	17			

SS: Soma quadrática; df: graus de liberdade; MS: Média quadrática; F: fator “F” calculado; f: fator “F” tabelado.

A Figura 3.11 apresenta o modelo juntamente com os valores de vida pós-colheita e os graus-hora acumulados parciais, desconsiderando-se os valores dos ensaios 11 e 16. A Figura 3.11 mostra uma melhor distribuição dos pontos experimentais em torno do modelo proposto (equação 3.5) se comparada com as distribuições apresentadas nas Figura 3.9 e 3.10.

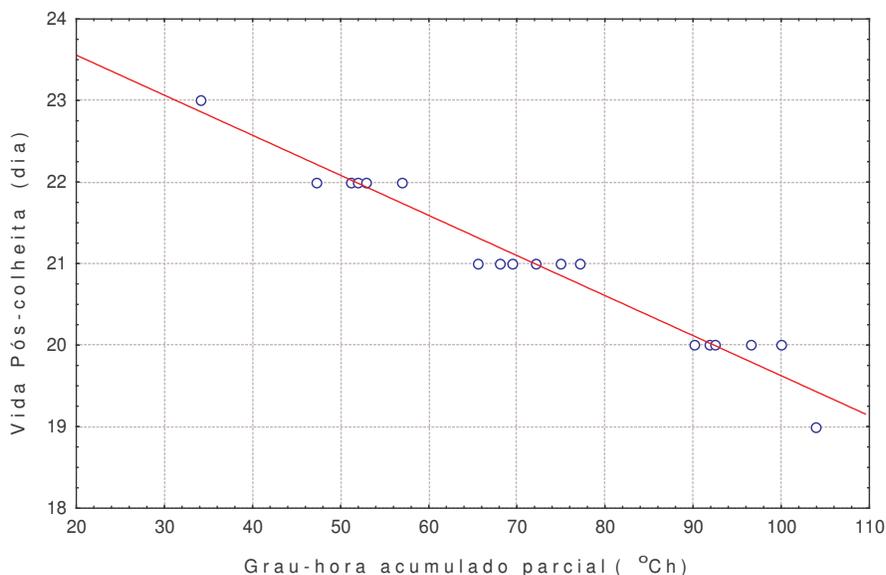


Figura 3.11 - Modelo ajustado ( $R^2 = 0,957$ ) para os dados de vida pós-colheita em função do grau-hora acumulado até o início da estocagem (GHP), retirados os ensaios 11 e 16.

#### 3.4.4. Grau-hora Acumulado e Umidade Relativa

A Tabela 3.8 apresenta os valores do déficit de umidade relativa acumulada (UR100) desde a colheita até o início do resfriamento das alfaces.

De acordo com a Tabela 3.8, as alfaces que foram expostas às umidades relativas mais baixas e tiveram um tempo de espera menor, apresentaram valores acumulados de “déficit” de umidade relativa menores. Dessa forma, pode-se associar esses valores acumulados de déficit de umidade relativa (UR100) com os valores de graus-hora acumulados parciais (GHP) constantes na Tabela 3.5 e chegar a valores que representem esses dois parâmetros conjuntamente (GHPUR). A Tabela 3.8 apresenta a multiplicação entre os valores de UR100 e GHP, ou seja, GHPUR.

**Tabela 3.8 – Valores de déficit de umidade relativa acumulada (UR100) desde a colheita até o início do resfriamento.**

Ensaio	Vida pós-colheita (dias)	Déficit de Umidade Relativa Acumulada, UR100, (%)	GHPUR (°C.h.%)
1	20	7286	656760
2	20	8113	745503
3	22	4577	233976
4	22	3926	185189
5	20	7527	726882
6	20	7622	705263
7	22	4052	210298
8	22	4753	251053
9	21	5299	347084
10	21	5606	389000
12	21	6257	451380
13	21	6461	483799
14	23	3237	110511
15	19	8770	911203
17	21	5732	389890
A	22	3747	213616
B	21	5819	448644
C	20	7412	741422

Com os dados de GHPUR foi possível obter um modelo que os correlacionasse com a vida pós-colheita. O modelo é apresentado na equação 3.6.

$$VP = 22,91 - 4,2 \cdot 10^{-6} * GHPUR \quad (3.6)$$

onde,

*VP* = vida pós-colheita (dia);

*GHPUR* = grau-hora acumulado e déficit de umidade relativa (°C h %).

O modelo representado pela equação 3.6 apresenta um coeficiente de correlação ( $R^2$ ) de 0,952. A Tabela 3.9 apresenta a análise de variância do modelo. O F calculado foi bem superior ao tabelado o que, juntamente com o coeficiente de correlação, indica que o modelo tem boa predição.

**Tabela 3.9 – ANOVA para o modelo de regressão da vida pós-colheita em função do grau-hora acumulado parcial (GHP) e déficit de umidade relativa (UR100).**

Fonte de variação	SS	df	MS	F	f
Regressão	17,13	1	17,13	316,7	4,49
Resíduos	0,87	16	0,05		
Total	18,00				

SS: Soma quadrática; df: graus de liberdade; MS: Média quadrática; F: fator “F” calculado; f: fator “F” tabelado.

A Figura 3.12 apresenta os dados de vida pós-colheita juntamente com os dados de GHPUR e o modelo ajustado. Assim como a Figura 3.11, os dados se aproximam bem do modelo.

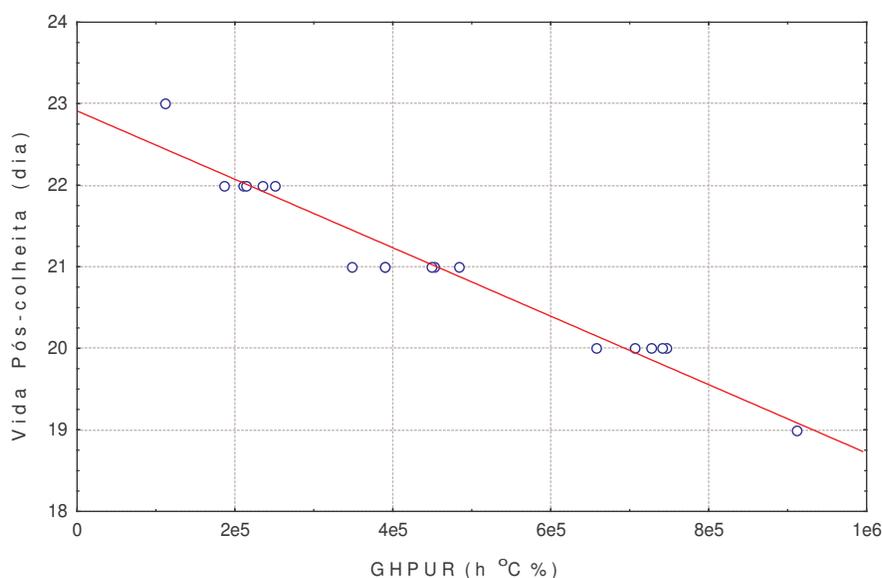


Figura 3.12 - Modelo ajustado ( $R^2 = 0,952$ ) para os dados de vida pós-colheita em função do grau-hora acumulado parcial (GHP) e déficit de umidade relativa (UR100).

### 3.4.5. Discussão Geral dos Resultados

De acordo com os resultados da vida pós-colheita, o fato das alfaces terem sido submetidas ao resfriamento a vácuo não significou um aumento da vida pós-colheita. Esse comportamento pode indicar, em uma primeira análise, que um resfriamento antes da estocagem, não influenciará na vida pós-colheita desses produtos, sendo assim, dispensável. Porém, é preciso notar que a quantidade de alfaces colocadas diretamente na câmara

(ensaios A, B e C) representa uma carga térmica muito pequena se comparada à capacidade do sistema de refrigeração da câmara para estocagem. Dessa forma, essas alfaces atingiram a temperatura de estocagem rapidamente e, conseqüentemente, a vida pós-colheita foi pouco influenciada.

Dos modelos apresentados para predizer a vida pós-colheita das alfaces, tanto o modelo representado pela equação 3.5, quanto o representado pela equação 3.6 apresentaram coeficientes lineares semelhantes, 24,54 dias e 22,9 dias respectivamente, aproximando-se de valores encontrados em literatura para a vida pós-colheita de alfaces estocadas sob condições ótimas.

É preciso destacar que neste trabalho, as temperaturas das alfaces não ultrapassaram 30 °C e, mesmo este, só foi atingido em um dos ensaios por um curto período de tempo. Como, por definição, o grau-hora é calculado pela multiplicação entre a temperatura e o tempo no qual o produto esteve exposto a essa temperatura, pode-se imaginar a seguinte situação: um produto qualquer durante 60 h sob temperatura de 1 °C, ou seja, um GH de 60 °C h. Em outra situação: o mesmo produto durante 1 h sob temperatura de 60 °C, ou seja, os mesmos 60 °C h. Dessa forma, pelos modelos aqui apresentados, nas duas situações tem-se uma mesma vida pós-colheita, o que não corresponde com a realidade.

A vida pós-colheita de frutas e hortaliças está diretamente ligada as suas taxas respiratórias que, por sua vez, estão diretamente relacionadas as suas temperaturas, porém não linearmente. Na Figura 3.13, adaptada de HARDENBURG (1990), pode-se verificar que as taxas respiratórias das alfaces variam de uma maneira exponencial em função da temperatura. Assim, percebe-se que uma redução de temperatura de uma alface em 5 °C será mais significativa para sua vida pós-colheita, quando esta se der de 25 °C para 20 °C do que de 5 °C para 0 °C.

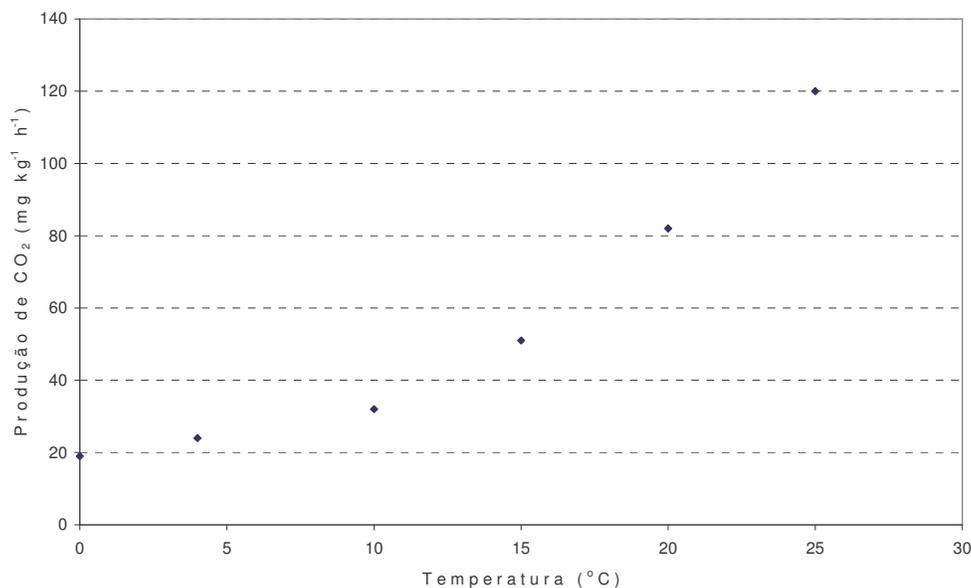


Figura 3.13 – Taxa respiratória de alfaces expressa em produção de CO<sub>2</sub> em função da temperatura. (adaptado de HARDENBURG, 1990)

Dessa forma, em todos os modelos aqui apresentados e baseados nos cálculos dos graus-hora, além da temperatura de referência (0 °C), adotada para o cálculo, deve-se atentar para a temperatura de estocagem das alfaces (1 °C) e para as temperaturas nas quais as alfaces estiveram expostas antes do resfriamento. Apenas nestas condições, se pode prever a vida pós-colheita dessas alfaces utilizando esses modelos.

### 3.5. Conclusões

O modelo baseado no conceito de grau-hora acumulado total (“degree-hour”) não apresentou uma boa correlação com a vida pós-colheita, necessitando de uma abordagem diferente, como a do grau-hora acumulado parcial.

Neste trabalho, o melhor modelo, equação 3.5, foi aquele em que ajusta a vida pós-colheita com os graus-hora acumulados parciais (GHP), calculados até o tempo em que as alfaces atingiram a temperatura de estocagem da câmara (1 °C), descartando-se o tempo em que permaneceram estocadas até o fim da vida pós-colheita.

Outro bom modelo encontrado, equação 3.6, foi aquele que relacionou a vida pós-colheita com a interação entre o grau-hora acumulado parcial (GHP) e o déficit de umidade relativa (UR100).

### 3.6. Referências Bibliográficas

ASTM, American Society for Testing and Materials **Proposed Standard Guide for Shelf Life Determination**. Standard Guide for the Shelf Life Determination of Consumer Products by Sensory Evaluation, n.E18.06.07, 1993

BLEINROTH, E. W. Condições requeridas para a refrigeração e armazenamento de alimentos, congelamento, pré-resfriamento e maturação de frutas e hortaliças. **Abrava** n.47, p.14-18, abril 1970.

BLISKA Jr, A. **Alface (*Lactuca sativa L.*): distintos sistemas de produção, conservação e avaliação pós-colheita**. Campinas 1998. Tese (Mestre em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas.

BRANCH, B. Follow cooling basics to preserve quality. **American Vegetable Grower**, v.34, n.11, p.20-23, november 1986.

CEAGESP ; Dicas para evitar o desperdício, INTERNET: [www.ceagesp.com.br](http://www.ceagesp.com.br) ,1999

CHITARRA, M. I. F.; CHITARRA, A. B. **Pós-colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio**. Lavras: ESAL-FAEPE, 1990. 293p.

CORREIO POPULAR, Campinas, SP, 2 de abr., 2004, caderno de Economia, 1p.

CORTEZ, L.A.B.; HONORIO,S.L.; MORETTI,C;L. **Resfriamento de Frutas e Hortaliças**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2002.

DURMAYAS, A.; KADIOGLU, M. ; SEN, Z. An application of the degree/hours method to estimate to the residential heating energy requirement and fuel consumption in Istanbul. **Energy**, v.25, p.1245-1256, 2000.

FAO, FAOSTAT Data. Disponível em <<http://apps.fao.org/default.jsp>>. Acesso em 3 de fev., 2003.

- FIGUEIRA, F.A.R. **Novo Manual de Olericultura - Agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. 2ª edição. Viçosa: Editora Universidade Federal de Viçosa 2002. 412p.
- FREIRE JUNIOR, M.; DELIZA, R.; CHITARRA, A. B. Alterações sensoriais em alface hidropônica cv. Regina minimamente processada e armazenada sob refrigeração. **Horticultura Brasileira**. v.20, n.1, mar., 2002.
- GEESON, J. D. Cooling and storage of fruits and vegetables. **The Proceedings of The Institute of Refrigeration**, v.85, p.65-74, 1988-1989.
- GERMANO, R. M. A.; ARTHUR, V.; WIENDL, F. M. Conservação pós-colheita de abacates *Persia americana* Mill, variedades Fortuna e Quintal por irradiação. *Scientia Agrícola*, v.53, n. 2-3, Maio/Dez, 1996.
- HARDENBURG, R. E.; WATADA, A. E.; WANG, C. Y. **The Comercial Storage of Fruits, Vegetables, and Florist and Nursery Stocks**. United States Department of Agriculture, Agriculture Handbook n. 66, 1990.
- HONORIO, S. L. Efeitos da temperatura no tecido vegetal. **Revista Abrava**, n.127, p.29-30, junho 1992.
- JORDAN, R. A.; CASTRO, L. R.; MEDEROS, B. T.; CORTEZ, L. A. B.; NEVES Fo, L. C. Avaliação do resfriamento rápido e armazenagem com sistema de umidificação de alface (Vera): parte II, avaliação da qualidade. Artigo apresentado no **MERCOFRIO 2002** – Congresso de ar condicionado, refrigeração, aquecimento e ventilação do mercosul, Florianópolis - SC, 2002.
- KADER, A. A. **Postharvest Technology of Horticultural Crops**, 2nd edition, Coop. Ext. Uni. of Ca. Division of Agriculture and Natural Resources. Universidade da Califórnia. Publ. n.3311, 295p., 1992.
- MEILGAARD, ; M. CIVILLE, G. V. ; CARR, B. T. *Sensory Evaluation Techniques* 3<sup>rd</sup> ed. USA: CRC Press, 1999.

- MONTEIRO, C. L. B. **Técnicas de Avaliação Sensorial** 2.ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, CEPPA, 1984. 101p.
- NEVES Fo, L. C. ; VISSOTTO, F. Z. ; ALVES, C. R. G. Resfriamento rápido de frutas e hortaliças. **Revista Abrava**, n.133, p.22-29, junho 1993.
- NEVES F<sup>o</sup>, L. C. ; VIGNEAULT, C. ; CORTEZ, L. A. B. Análise econômica preliminar de uma unidade de resfriamento a vácuo de alface. **XXVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola-CONBEA**, Campina Grande, PB, julho 1997.
- SHEWFELT, R. L.; BRENNAN, P. S. Effect of cooling delay at harvest on broccoli quality during postharvest storage. **Journal of Food Quality**, n. 12, p. 13-22, 1989.
- SPAGNOL, W. A ; SIGRIST, J. M. M. Pré-resfriamento. **Tecnologia Pós-colheita de Frutas Tropicais**. Manual n.9. ITAL, Campinas 1992.
- STONE, H. ; SIDEL, J. L. Sensory Evaluation Practices. Academic Press, INC. 1993. 338p.
- TEIXEIRA, E. ; MEINERT, E. M. ; BARBETTA, P. A. Métodos sensoriais. **Análise Sensorial de Alimentos**. Cap. III, p.65-119, Florianópolis, Editora da UFSC, 1987.
- TEIXEIRA, N.T. **Hidroponia: uma alternativa para pequenas áreas**. Guaíba: Editora e Livraria Agropecuária Ltda, 1996. 86p.
- VIGNEAULT, C. ; GOYETTE, B. Fruit and Vegetable Precooling. A **Training Seminar of the NB Fruit Growers Association Inc. Québec**, Canadá. Fevereiro, 1994.

## **CONCLUSÕES GERAIS**

A caracterização do par sílica-gel/água através dos modelos de Dubinin-Astakhov e de Freundlich apresentou bons resultados. O leito de adsorção contendo sílica-gel é tecnicamente viável na aplicação do resfriamento a vácuo.

Nos experimentos com alfaces, as variáveis independentes, vazão de bombeamento e massa de alface, são as que influenciam significativamente o tempo de processo, a energia consumida e a perda de massa das alfaces. Porém, a vida pós-colheita não se mostrou influenciada por essas variáveis independentes, apenas pela variável tempo de espera. Assim, pode-se concluir que o tempo de resfriamento das alfaces não influenciou a vida pós-colheita. Uma razão para esse ocorrido pode estar no fato dos tempos de resfriamento não terem variado consideravelmente entre os ensaios, não influenciando assim, a vida pós-colheita das amostras. A vida pós-colheita alfaces também não apresentou diferença entre aquelas submetidas ao resfriamento a vácuo e aquelas colocadas diretamente na câmara de estocagem.

O fato das vidas pós-colheita das alfaces colocadas diretamente na câmara de estocagem serem similares as das alfaces que foram submetidas ao resfriamento a vácuo podem ser explicadas pela pouca quantidade de produtos estocados na câmara.

Os modelos para prever a vida pós-colheita das alfaces apresentam bons resultados, porém deve-se ter atenção na temperatura de referência adotada no cálculo do grau-hora, na temperatura de estocagem das alfaces e na faixa de temperaturas na qual as alfaces estiveram expostas.



## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A substituição do sistema de refrigeração na linha de vácuo, para eliminação dos vapores de água, por um leito de adsorção necessita de um estudo específico. No dimensionamento do leito adsortivo utilizado neste projeto foi levado em consideração apenas a capacidade de adsorção da sílica-gel (relação de água adsorvida por sílica-gel,  $\text{kg.kg}^{-1}$ ) e a quantidade de água (kg) necessária a ser retirada em um processo de resfriamento a vácuo de alfaces. Assim, vê-se necessário levar em consideração outras variáveis como relação de volumes, quantidade de ar residual e taxa de adsorção. Porém, através deste trabalho, percebe-se que tecnicamente essa tecnologia é viável. Assim, sugere-se:

- Calcular a quantidade necessária de sílica-gel para um leito de adsorção que permita a realização de um estudo do comportamento de sua aplicação em um processo de resfriamento a vácuo.

No estudo do coeficiente de transferência de massa no resfriamento a vácuo de alface, a determinação do  $kS$  necessita da realização de um estudo, onde se variem as quantidades de alface para a validação estatística de um modelo. A obtenção de um modelo que relacione o produto  $kS$  pela massa de alface pode ser útil nos estudos de simulação de um processo de resfriamento a vácuo e também no dimensionamento de protótipos comerciais. Assim, sugere-se:

- Variar a quantidade de massa de alfaces a fim de determinar um modelo que correlacione o produto  $kS$  com massa das amostras;

Os conceitos de grau-hora acumulado e déficit de umidade relativa podem ser considerados bons parâmetros na avaliação da vida pós-colheita de hortaliças desde que se mantenham certas condições de temperatura adotadas neste trabalho. Assim, sugere-se um estudo em que sejam feitos experimentos que variem as temperaturas nas quais os produtos estiverem expostos de forma controlada, a fim de quantificar e ponderar a variável temperatura no cálculo do GH. Uma boa partida para esse estudo pode ser através da taxa

respiratória das hortaliças, cujo aumento exponencial se assemelha ao crescimento de um microorganismo. Assim, sugere-se:

- Variar a temperatura de referência para o cálculo dos graus-hora acumulados, assim como a de estocagem da amostras, com o objetivo de ajustar um modelo que contemple esses dois parâmetros;
- Variar as temperaturas de exposição dos produtos antes do início do resfriamento em amplas faixas com o intuito de determinar a sua importância e ajustar um modelo que pondere de forma realista essa variável;
- Variar a umidade relativa de exposição dos produtos, a fim de ajustar um modelo com maior faixa de aplicação.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAIS**

- AFONSO, M. R. A. Resfriamento Rápido a Vácuo em Alfaces. Campinas 2000. 104p. Tese (Mestre em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.
- BELZILE, G. Le refroidissement des legumes. **10<sup>e</sup> Coloque de Génie Rural**, Université Laval, janvier, 1982.
- CORTEZ, L.A.B.; HONORIO,S.L.; MORETTI,C;L. **Resfriamento de Frutas e Hortaliças**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2002.
- CHITARRA, M.I.F. & CHITARRA, A.B. Pós-colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio. Lavras, ESAL/FAEPE, 1990. 290p.
- DESMOND, E. M. ; KENNY, T. A. ; WARD, P. ; SUN, D-W. Effect of rapid and conventional cooling methods on the quality of cooked ham joints. **Meat Science**, v.56, n.3, p.271-277, 2000.
- HAAS, E. & GUR, G. Factors affeting the cooling rate of lettuce in vacuum cooling installations. **International journal of Refrigeration**, v.10, n.2, p.82-86, March 1987.
- HARDENBURG, R. E.; WATADA, A. E.; WANG, C. Y. The Comercial Storage of Fruits, Vegetables, and Florist and Nursery Stocks. United States Department of Agriculture, Agriculture Handbook n. 66, 1990.
- HUBER, E. **Resfriamento a Vácuo de Cortes de Carnes após o Cozimento**. Florianópolis, 2004. 74p. Tese (Mestre em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina.
- MALPAS, E. W. Vacuum equipment for evaporative cooling. **Process Biochemistry**, v.7, n.10, p.15-17, October 1972.
- MCDONALD, K ; SUN, D-W. Vacuum cooling technology for the food processing industry: a review. **Journal of Food Engineering**, v.45, n.2, p.55-65, 2000.

- NEVES F<sup>o</sup>, L. C. **Refrigeração e Alimentos**. Apostila de refrigeração do curso de refrigeração da Faculdade de Engenharia de Alimentos. Universidade Estadual de Campinas, 2000.
- RENNIE, T.J.; RAGHAVAN, G.S.V.; VIGNEAULT, C.; GARIEPY, Y. Effects of Pressure Reduction Rate on Vacuum Cooled Lettuce Quality During Storage. *Canadian Biosystems Engineering*, v. 43, p. 3.39-3.43, 2001a.
- SUN, D-W. ; WANG, L. Heat transfer characteristics of cooked meats using different cooling methods. *International Journal of Refrigeration*, v.23, n.7, p.508-516, 2000.
- THOMPSON, J. F. ; MITCHELL, F. G. ; RUMSEY, T. R. ; KASMIRE, R. F. ; CRISOSTO, C. H. Commercial Cooling of Fruits, Vegetables and Flowers, Cap. 4 e 5. Universidade da Califórnia – Divisão de agricultura e recursos naturais, Publicação 21567, p.33-34, 1998
- WANG, L; SUN, D-W.:. Modelling vacuum cooling process of coked meat – part 1: analysis of vacuum cooling system. *International Journal of Refrigeration*, v.25, p.854-861, 2002.

## **ANEXOS**

**Anexo I**  
Históricos dos Ensaio Preliminares

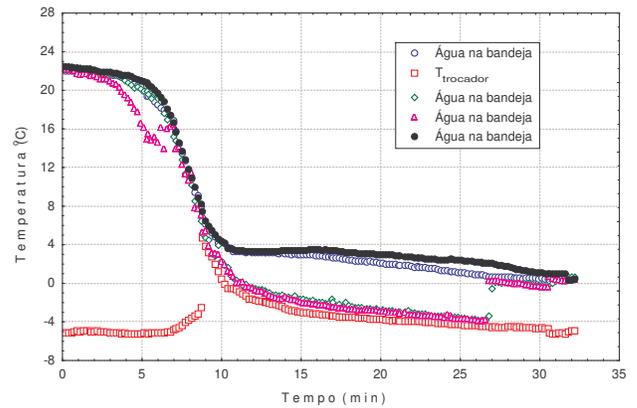
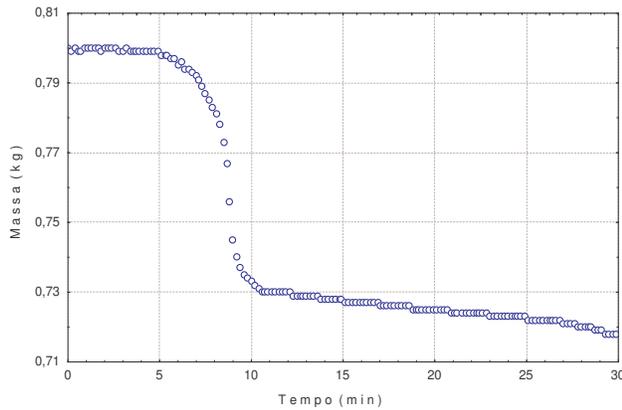


Figura 1 – Histórico da perda de massa no ensaio 1: área superficial,  $X_1= 4,16E-2 \text{ m}^2$  ; massa,  $X_2=0,80 \text{ kg}$  ; vazão,  $X_3= 29 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

Figura 2 – Histórico das temperaturas no ensaio 1: área superficial,  $X_1= 4,16E-2 \text{ m}^2$  ; massa,  $X_2=0,80 \text{ kg}$  ; vazão,  $X_3= 29 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

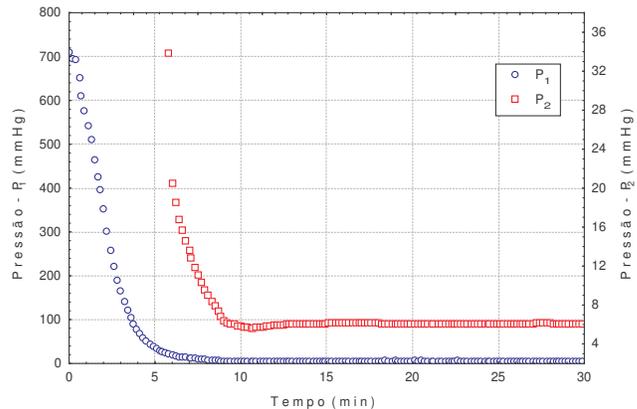
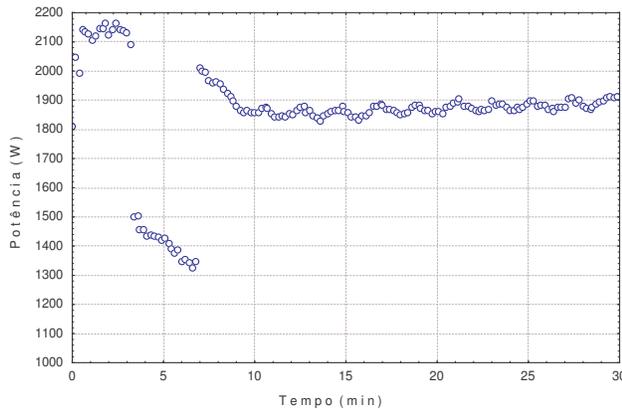


Figura 3 – Histórico da potência no ensaio 1: área superficial,  $X_1= 4,16E-2 \text{ m}^2$  ; massa,  $X_2=0,80 \text{ kg}$  ; vazão,  $X_3= 29 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

Figura 4 – Histórico da pressão no ensaio 1: área superficial,  $X_1= 4,16E-2 \text{ m}^2$  ; massa,  $X_2=0,80 \text{ kg}$  ; vazão,  $X_3= 29 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

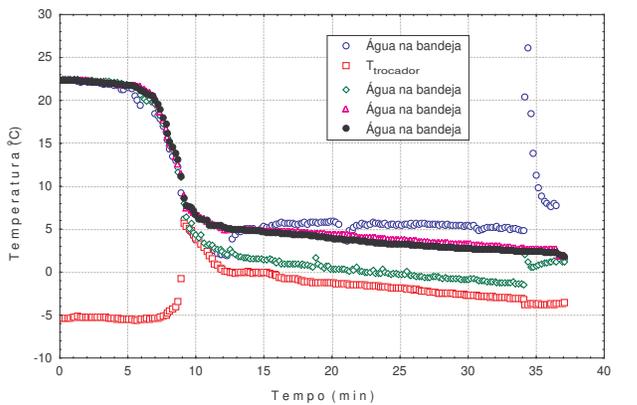
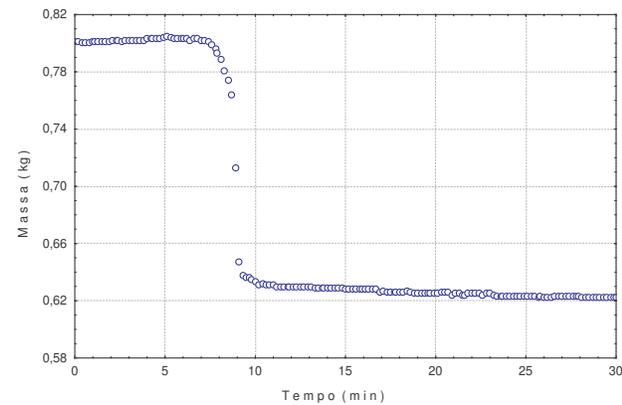


Figura 5 – Histórico da perda de massa no ensaio 2: área superficial,  $X_1= 4,16E-2 \text{ m}^2$  ; massa,  $X_2=0,80 \text{ kg}$  ; vazão,  $X_3= 15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

Figura 6 – Histórico das temperaturas no ensaio 2: área superficial,  $X_1= 4,16E-2 \text{ m}^2$  ; massa,  $X_2=0,80 \text{ kg}$  ; vazão,  $X_3= 15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

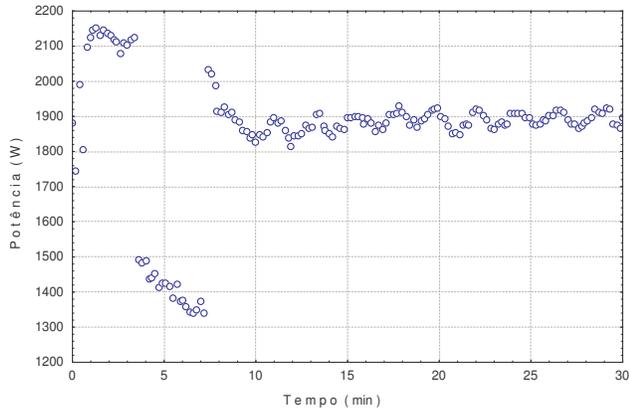


Figura 7 – Histórico da potência no ensaio 2: área superficial,  $X_1= 4,16E-2 \text{ m}^2$  ; massa,  $X_2=0,80 \text{ kg}$  ; vazão,  $X_3= 15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

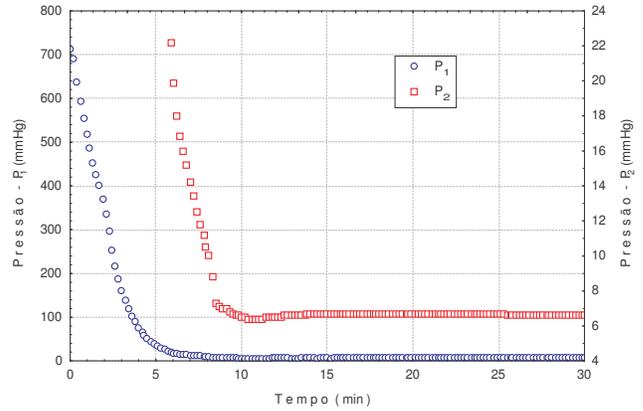


Figura 8 – Histórico da pressão no ensaio 2: área superficial,  $X_1= 4,16E-2 \text{ m}^2$  ; massa,  $X_2=0,80 \text{ kg}$  ; vazão,  $X_3= 15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

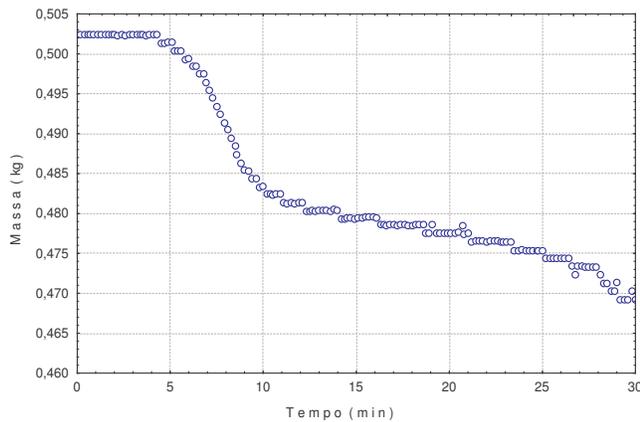


Figura 9 – Histórico da perda de massa no ensaio 3: área superficial,  $X_1= 4,16E-2 \text{ m}^2$  ; massa,  $X_2= 0,50 \text{ kg}$  ; vazão,  $X_3= 29 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

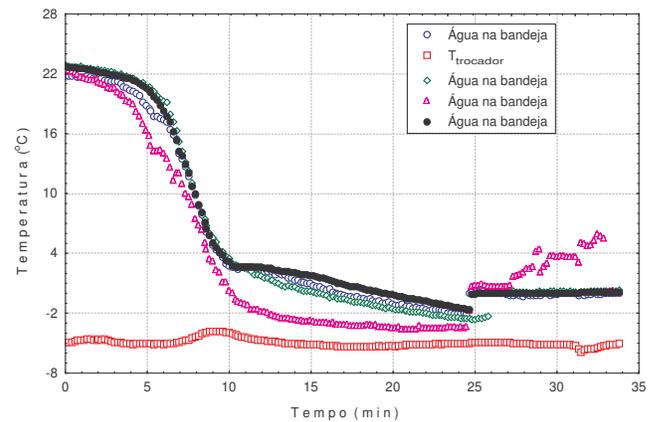


Figura 10 – Histórico das temperaturas no ensaio 3: área superficial,  $X_1= 4,16E-2 \text{ m}^2$  ; massa,  $X_2= 0,50 \text{ kg}$  ; vazão,  $X_3= 29 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

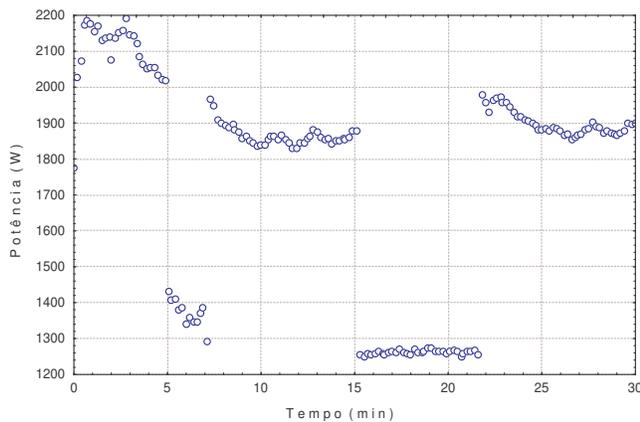


Figura 11 – Histórico da potência no ensaio 3: área superficial,  $X_1= 4,16E-2 \text{ m}^2$  ; massa,  $X_2= 0,50 \text{ kg}$  ; vazão,  $X_3= 29 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

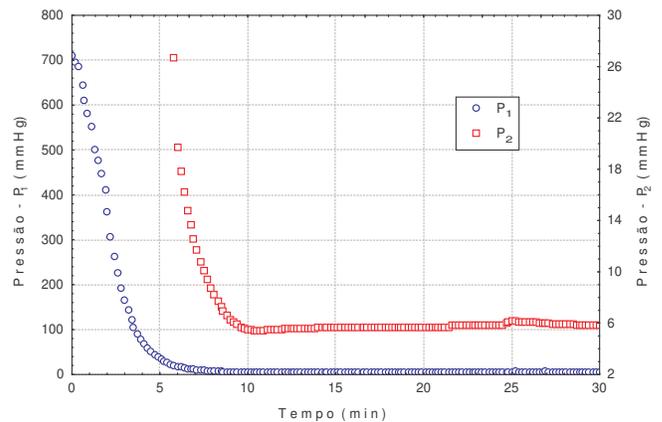


Figura 12 – Histórico da pressão no ensaio 3: área superficial,  $X_1= 4,16E-2 \text{ m}^2$  ; massa,  $X_2= 0,50 \text{ kg}$  ; vazão,  $X_3= 29 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

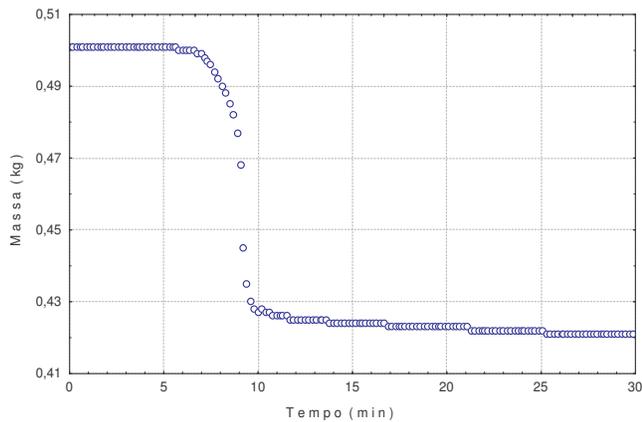


Figura 13 – Histórico da perda de massa no ensaio 4: área superficial,  $X_1= 4,16E-2 \text{ m}^2$  ; massa,  $X_2=0,50 \text{ kg}$  ; vazão,  $X_3= 15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

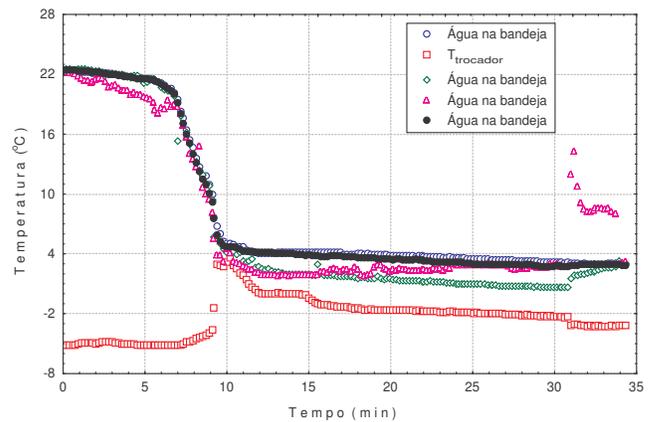


Figura 14 – Histórico da temperatura no ensaio 4: área superficial,  $X_1= 4,16E-2 \text{ m}^2$  ; massa,  $X_2=0,50 \text{ kg}$  ; vazão,  $X_3= 15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

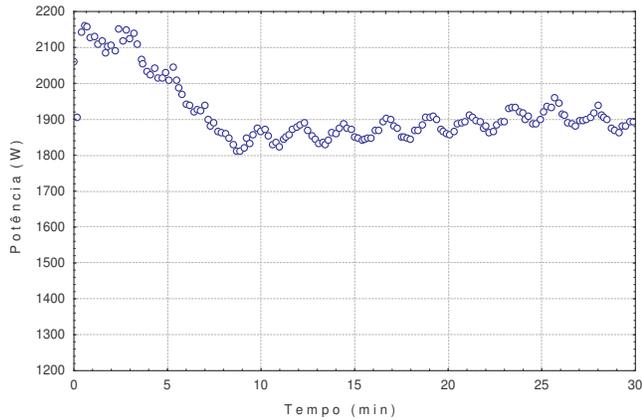


Figura 15 – Histórico da potência no ensaio 4: área superficial,  $X_1= 4,16E-2 \text{ m}^2$  ; massa,  $X_2=0,50 \text{ kg}$  ; vazão,  $X_3= 15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

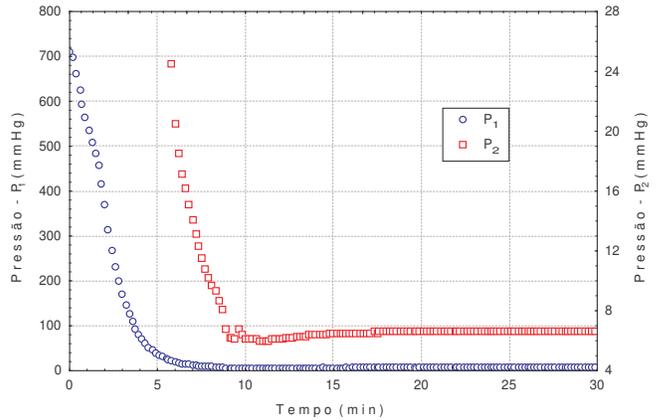


Figura 16 – Histórico da pressão no ensaio 4: área superficial,  $X_1= 4,16E-2 \text{ m}^2$  ; massa,  $X_2=0,50 \text{ kg}$  ; vazão,  $X_3= 15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

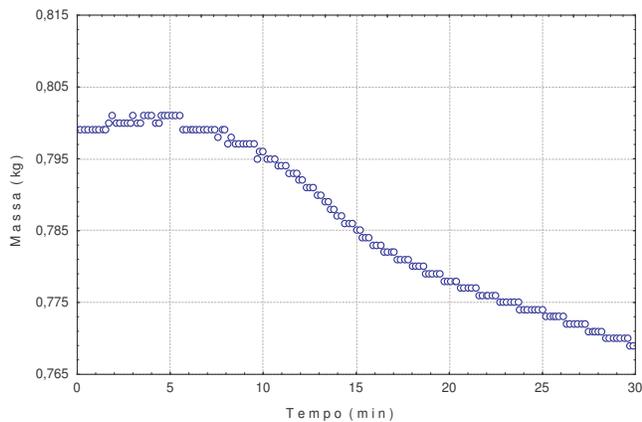


Figura 17 – Histórico da perda de massa no ensaio 5: área superficial,  $X_1= 1,94E-2 \text{ m}^2$  ; massa,  $X_2= 0,80 \text{ kg}$  ; vazão,  $X_3= 29 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

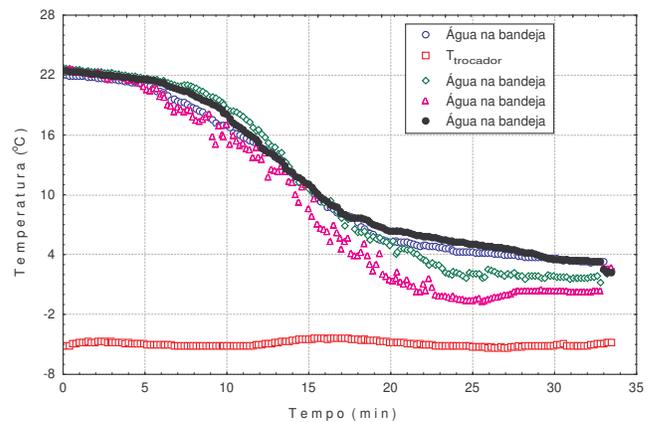


Figura 18 – Histórico da temperatura no ensaio 5: área superficial,  $X_1= 1,94E-2 \text{ m}^2$  ; massa,  $X_2= 0,80 \text{ kg}$  ; vazão,  $X_3= 29 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

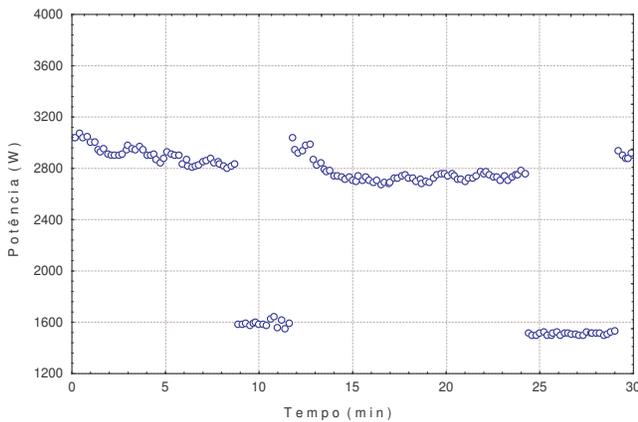


Figura 19 – Histórico da potência no ensaio 5: área superficial,  $X_1 = 1,94E-2 \text{ m}^2$  ; massa,  $X_2 = 0,80 \text{ kg}$  ; vazão,  $X_3 = 29 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

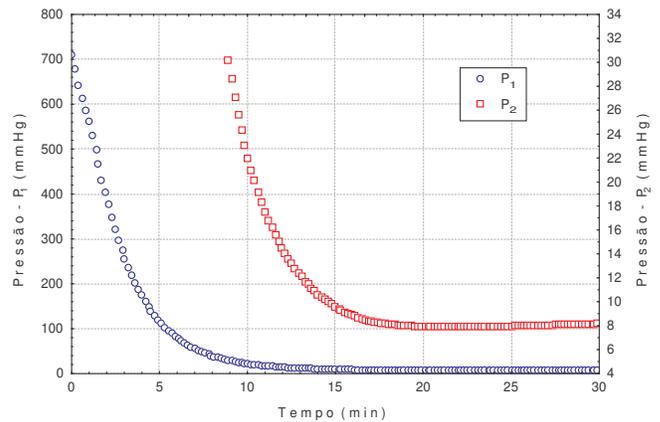


Figura 20 – Histórico da pressão no ensaio 5: área superficial,  $X_1 = 1,94E-2 \text{ m}^2$  ; massa,  $X_2 = 0,80 \text{ kg}$  ; vazão,  $X_3 = 29 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

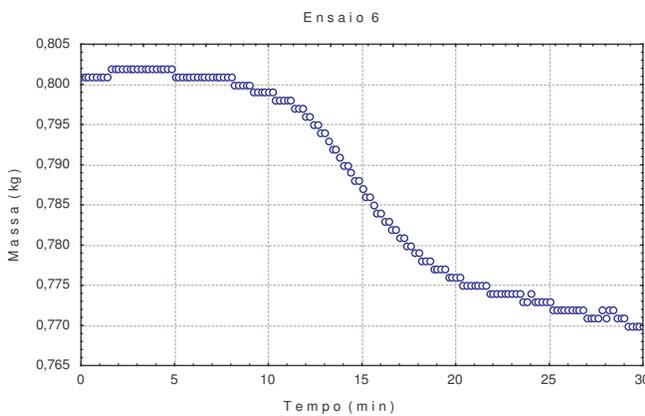


Figura 21 – Histórico da perda de massa no ensaio 6: área superficial,  $X_1 = 1,94E-2 \text{ m}^2$  ; massa,  $X_2 = 0,80 \text{ kg}$  ; vazão,  $X_3 = 15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

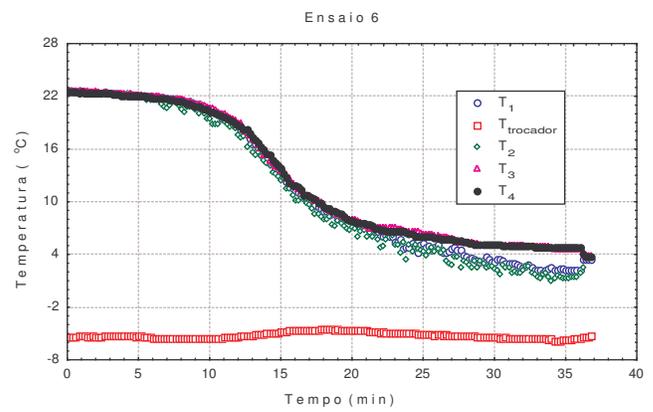


Figura 22 – Histórico da temperatura no ensaio 6: área superficial,  $X_1 = 1,94E-2 \text{ m}^2$  ; massa,  $X_2 = 0,80 \text{ kg}$  ; vazão,  $X_3 = 15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

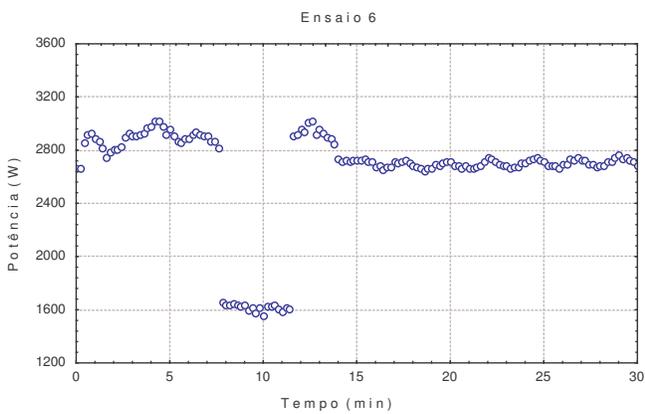


Figura 23 – Histórico da potência no ensaio 6: área superficial,  $X_1 = 1,94E-2 \text{ m}^2$  ; massa,  $X_2 = 0,80 \text{ kg}$  ; vazão,  $X_3 = 15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

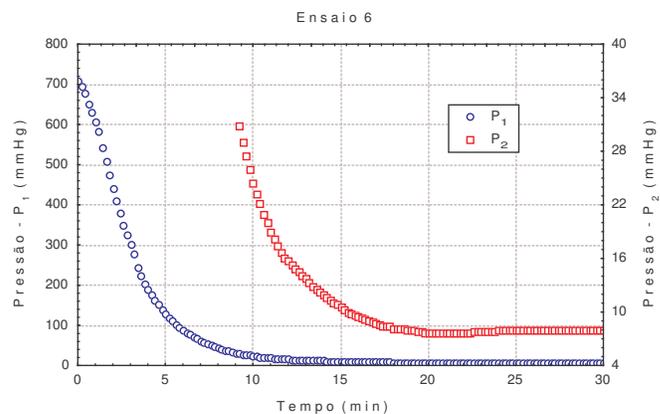


Figura 24 – Histórico da pressão no ensaio 6: área superficial,  $X_1 = 1,94E-2 \text{ m}^2$  ; massa,  $X_2 = 0,80 \text{ kg}$  ; vazão,  $X_3 = 15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

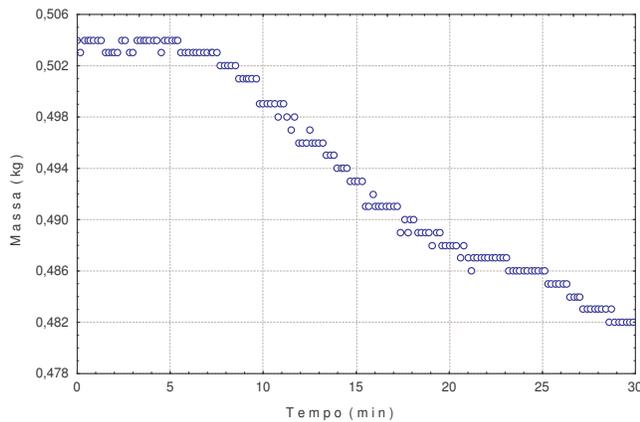


Figura 25 – Histórico da perda de massa no ensaio 7: área superficial,  $X_1=1,94E-2\text{ m}^2$  ; massa,  $X_2=0,50\text{ kg}$  ; vazão,  $X_3=29\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$ .

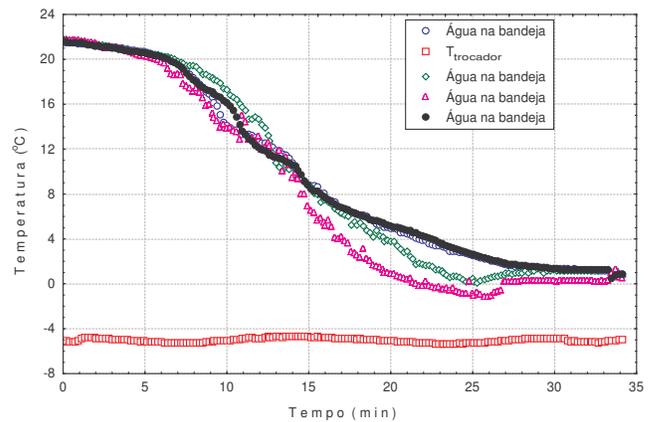


Figura 26 – Histórico da temperatura no ensaio 7: área superficial,  $X_1=1,94E-2\text{ m}^2$  ; massa,  $X_2=0,50\text{ kg}$  ; vazão,  $X_3=29\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$ .

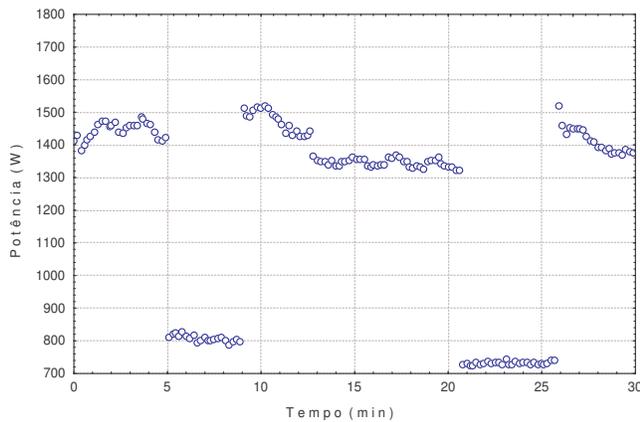


Figura 27 – Histórico da potência no ensaio 7: área superficial,  $X_1=1,94E-2\text{ m}^2$  ; massa,  $X_2=0,50\text{ kg}$  ; vazão,  $X_3=29\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$ .

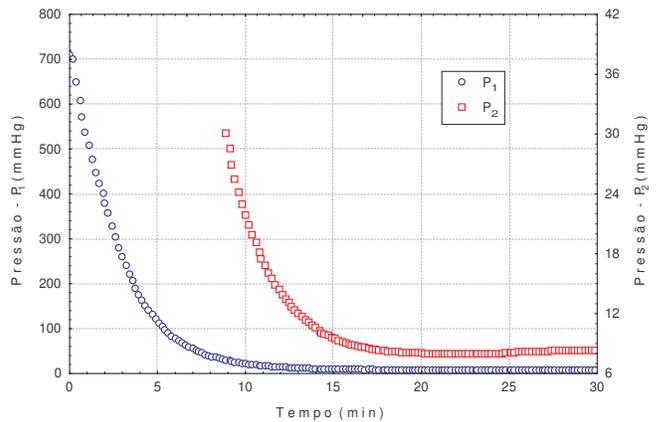


Figura 28 – Histórico da pressão no ensaio 7: área superficial,  $X_1=1,94E-2\text{ m}^2$  ; massa,  $X_2=0,50\text{ kg}$  ; vazão,  $X_3=29\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$ .

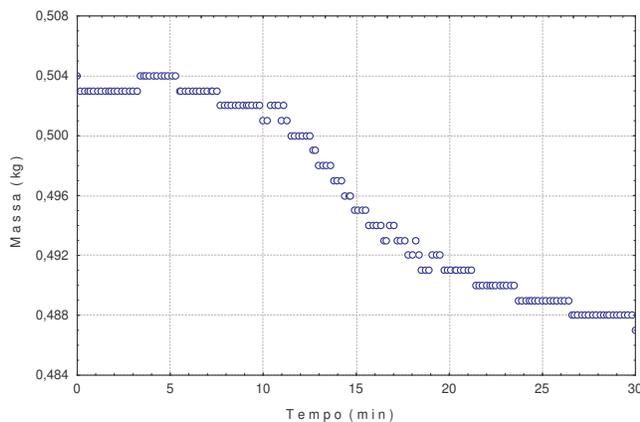


Figura 29 – Histórico da perda de massa no ensaio 8: área superficial,  $X_1=1,94E-2\text{ m}^2$  ; massa,  $X_2=0,50\text{ kg}$  ; vazão,  $X_3=15\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$ .

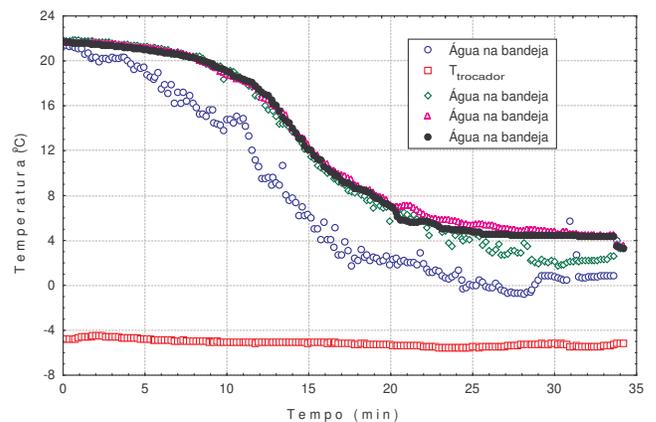


Figura 30 – Histórico da temperatura no ensaio 8: área superficial,  $X_1=1,94E-2\text{ m}^2$  ; massa,  $X_2=0,50\text{ kg}$  ; vazão,  $X_3=15\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$ .

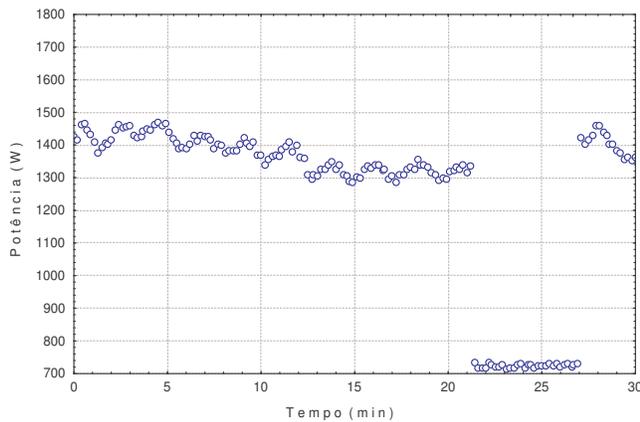


Figura 31 – Histórico da potência no ensaio 8: área superficial,  $X_1 = 1,94E-2 \text{ m}^2$  ; massa,  $X_2 = 0,50 \text{ kg}$  ; vazão,  $X_3 = 15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

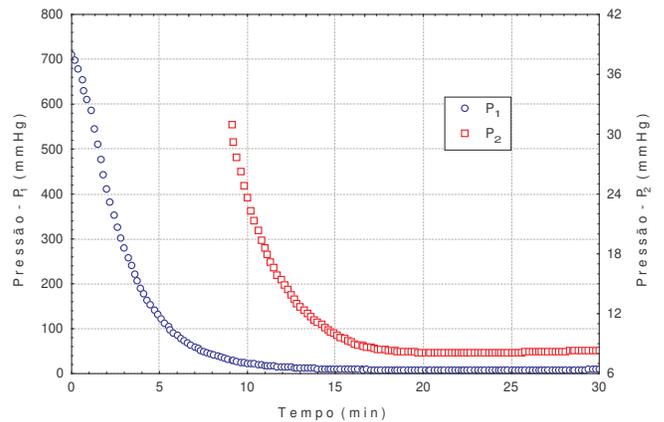


Figura 32 – Histórico da pressão no ensaio 8: área superficial,  $X_1 = 1,94E-2 \text{ m}^2$  ; massa,  $X_2 = 0,50 \text{ kg}$  ; vazão,  $X_3 = 15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

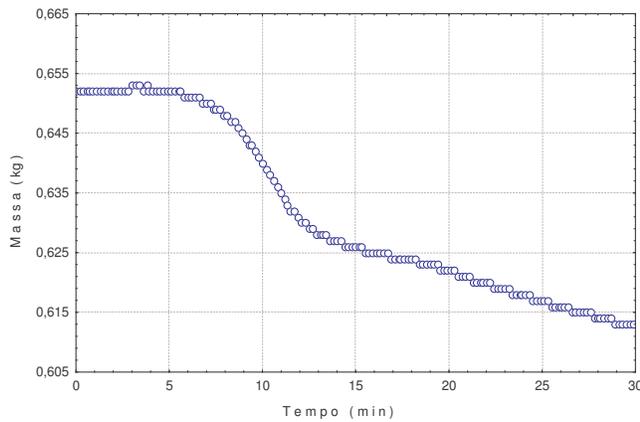


Figura 33 – Histórico da perda de massa no ensaio 10: área superficial,  $X_1 = 3,05E-2 \text{ m}^2$  ; massa,  $X_2 = 0,65 \text{ kg}$  ; vazão,  $X_3 = 22 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

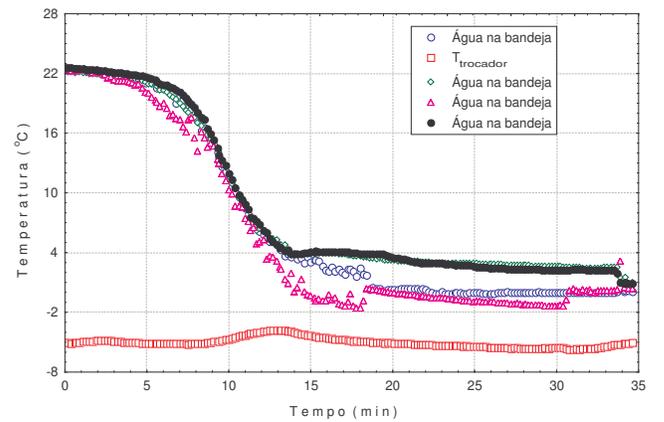


Figura 34 – Histórico da temperatura no ensaio 10: área superficial,  $X_1 = 3,05E-2 \text{ m}^2$  ; massa,  $X_2 = 0,65 \text{ kg}$  ; vazão,  $X_3 = 22 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

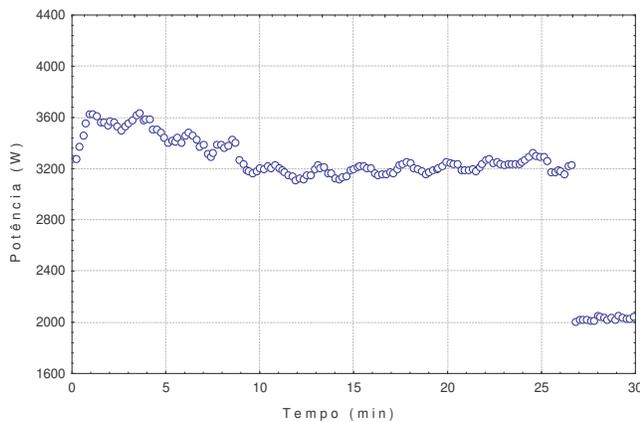


Figura 35 – Histórico da potência no ensaio 10: área superficial,  $X_1 = 3,05E-2 \text{ m}^2$  ; massa,  $X_2 = 0,65 \text{ kg}$  ; vazão,  $X_3 = 22 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

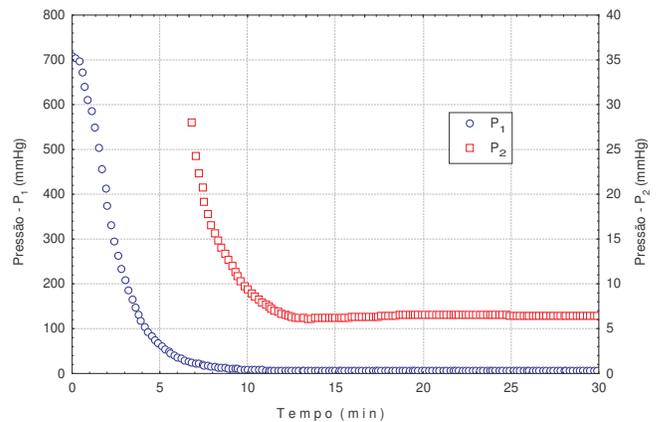


Figura 36 – Histórico da pressão no ensaio 10: área superficial,  $X_1 = 3,05E-2 \text{ m}^2$  ; massa,  $X_2 = 0,65 \text{ kg}$  ; vazão,  $X_3 = 22 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

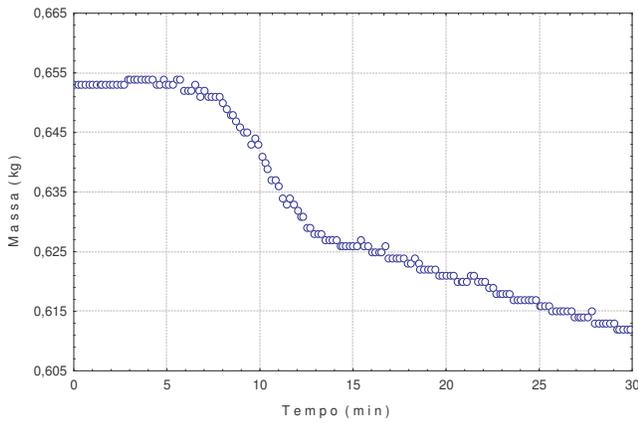


Figura 37 – Histórico da perda de massa no ensaio 11: área superficial,  $X_1= 3,05E-2 \text{ m}^2$  ; massa,  $X_2 = 0,65 \text{ kg}$  ; vazão,  $X_3 = 22 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

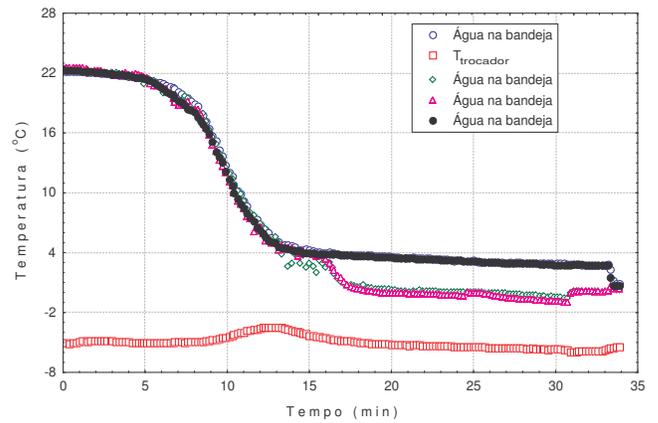


Figura 38 – Histórico da temperatura no ensaio 11: área superficial,  $X_1= 3,05E-2 \text{ m}^2$  ; massa,  $X_2 = 0,65 \text{ kg}$  ; vazão,  $X_3 = 22 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

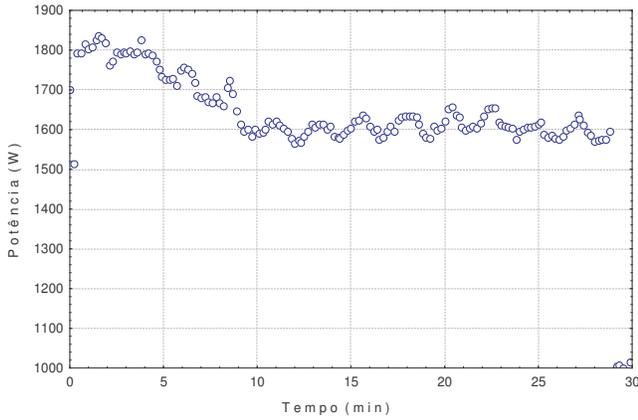


Figura 39 – Histórico da potência no ensaio 11: área superficial,  $X_1= 3,05E-2 \text{ m}^2$  ; massa,  $X_2 = 0,65 \text{ kg}$  ; vazão,  $X_3 = 22 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

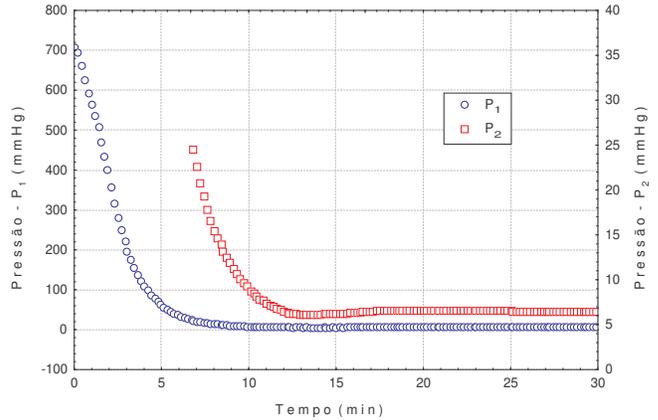


Figura 40 – Histórico da pressão no ensaio 11: área superficial,  $X_1= 3,05E-2 \text{ m}^2$  ; massa,  $X_2 = 0,65 \text{ kg}$  ; vazão,  $X_3 = 22 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

## Anexo II

## Curvas de calibração dos sensores de temperatura

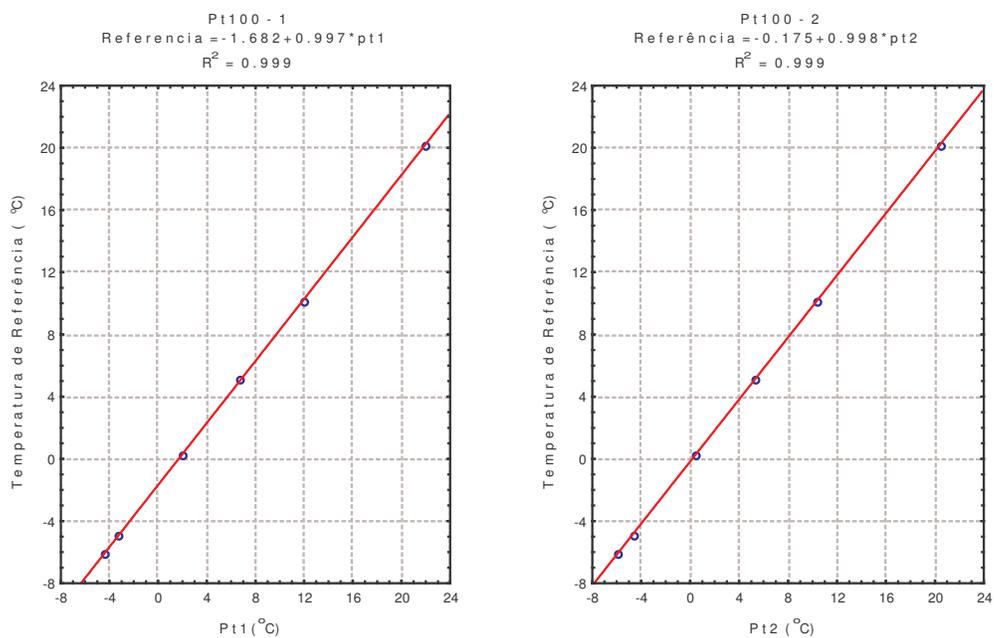


Figura 1 – Curva de calibração dos sensores Pt100 1 e 2.

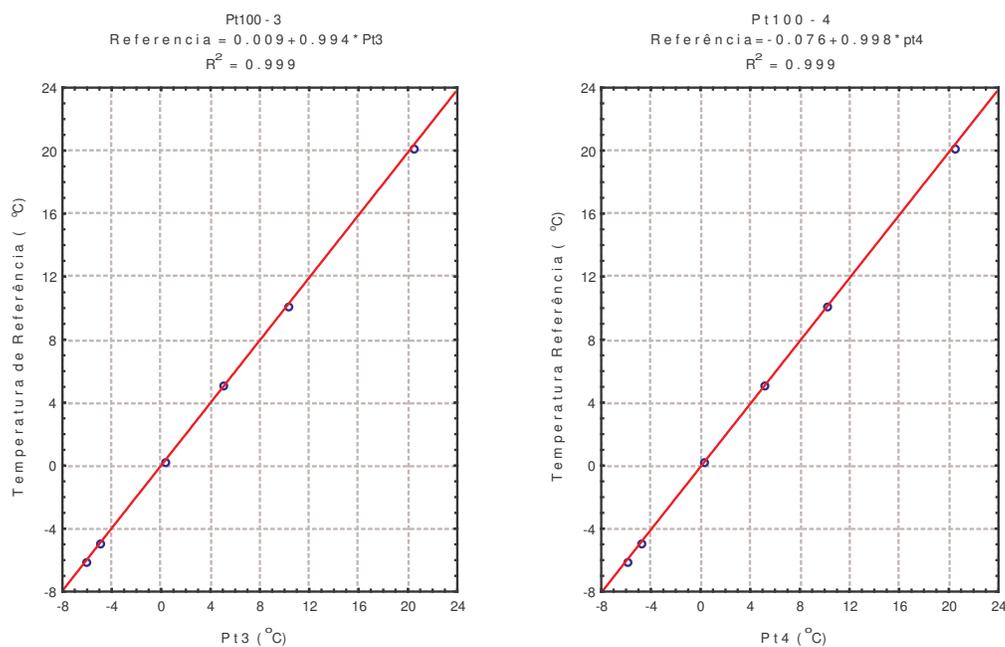


Figura 2 – Curva de calibração dos sensores Pt100 3 e 4.

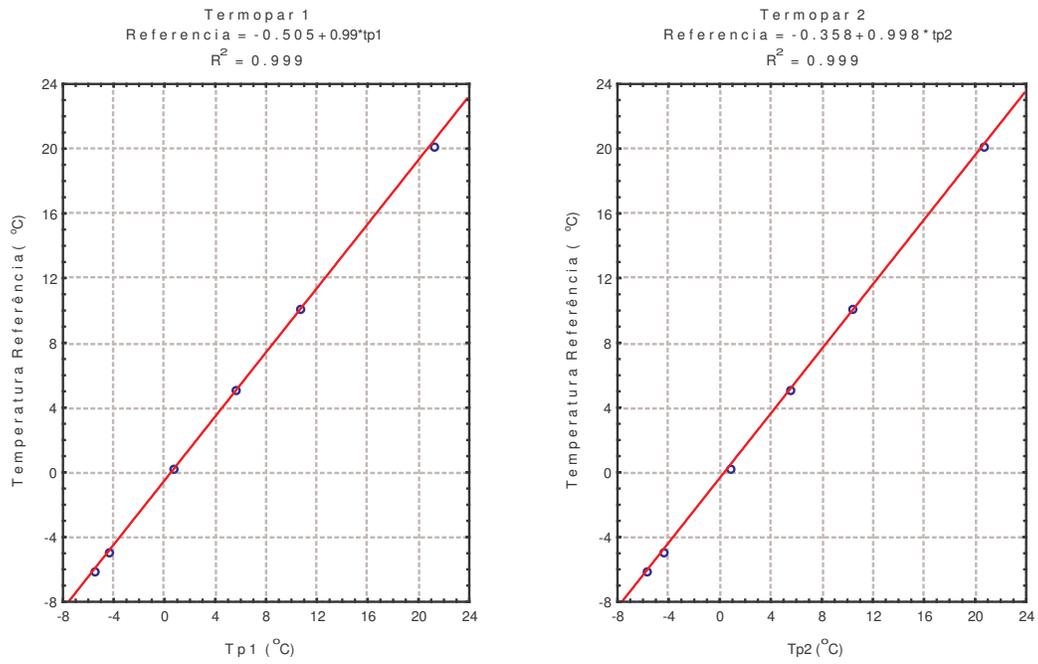


Figura 3 – Curva de calibração dos sensores termopares 1 e 2.

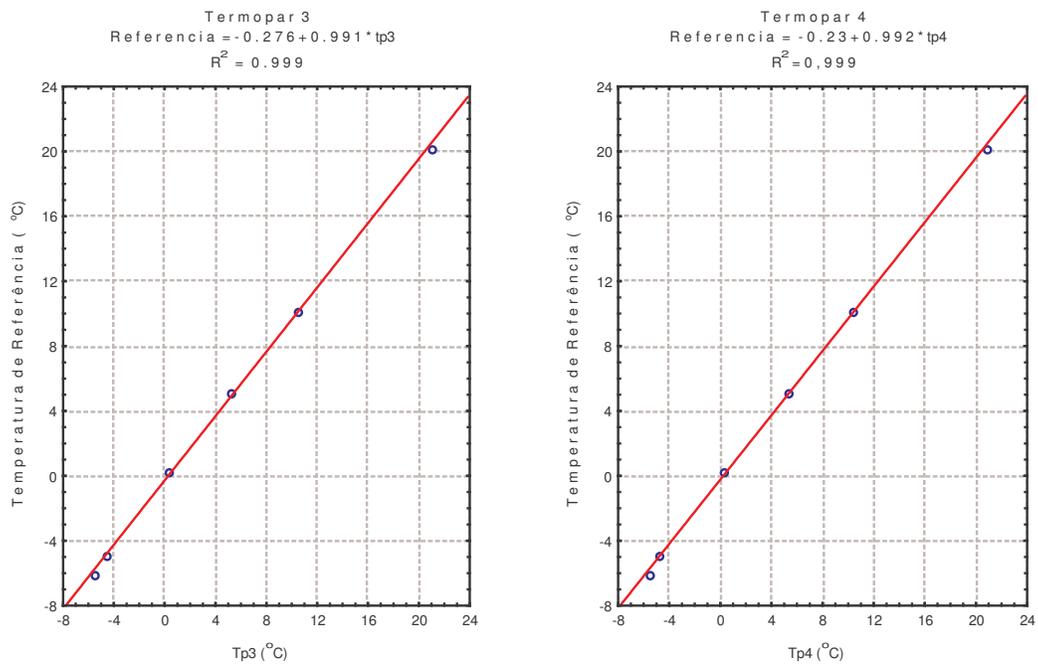


Figura 3 – Curva de calibração dos sensores termopares 3 e 4.

## Anexo III

Históricos das temperaturas dos ensaios de resfriamento a vácuo de alfaces discutidos no Capítulo 2.

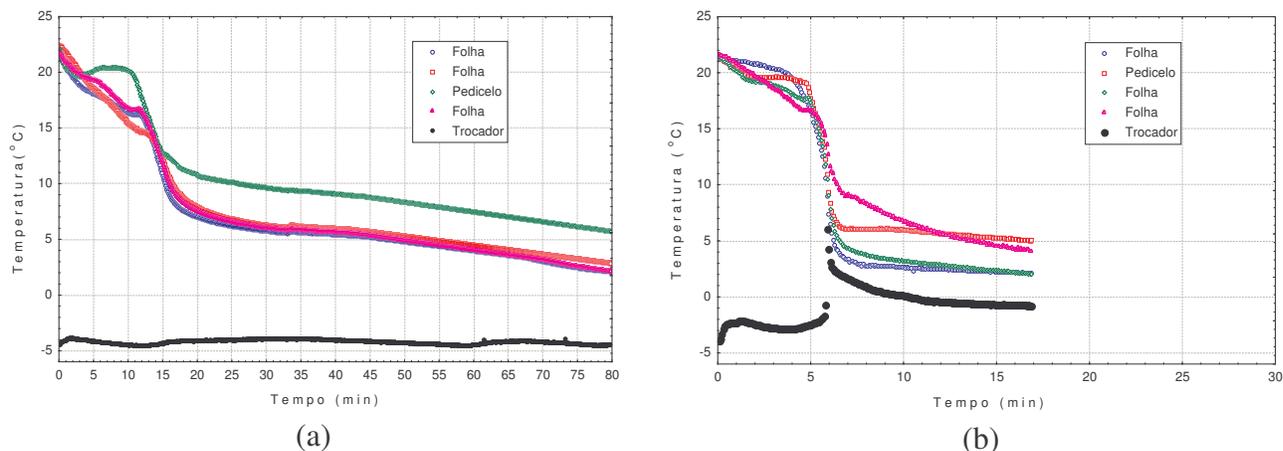


Figura 1 - Curvas de resfriamento: (a) ensaio 16, massa de alface 3,0 kg , tempo de espera 3 h e vazão de 7 m<sup>3</sup> . h<sup>-1</sup>; (b) ensaio 17, massa de alface 3,0 kg , tempo de espera 3 h e vazão de 36 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>.

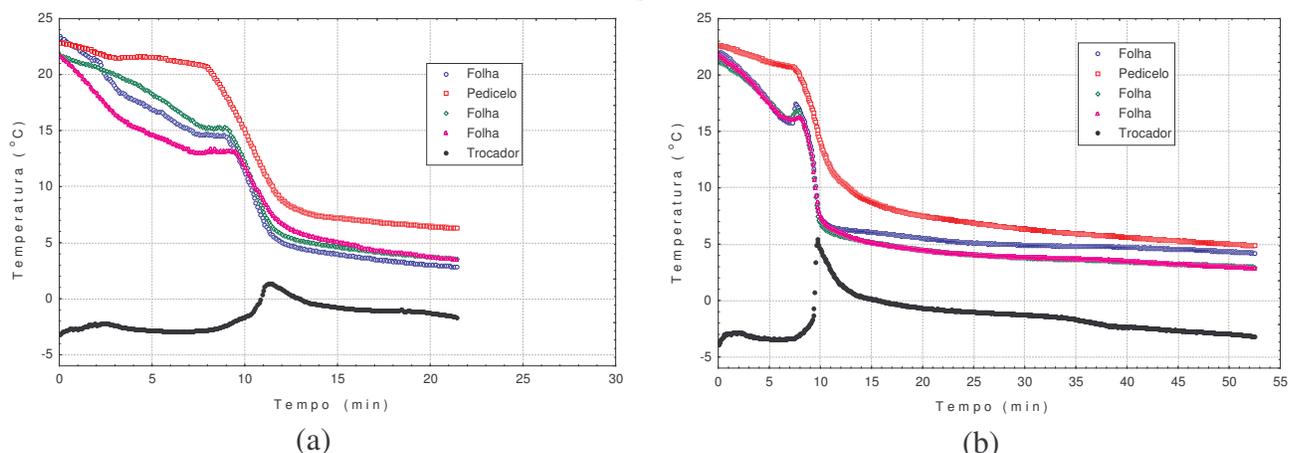


Figura 2 - Curvas de resfriamento: (a) ensaio 12, massa de alface 2,16 kg , tempo de espera 3 h e vazão de 22 m<sup>3</sup> . h<sup>-1</sup>; (b) ensaio 13, massa de alface 3,84 kg, tempo de espera 3 h e vazão de 22 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>.

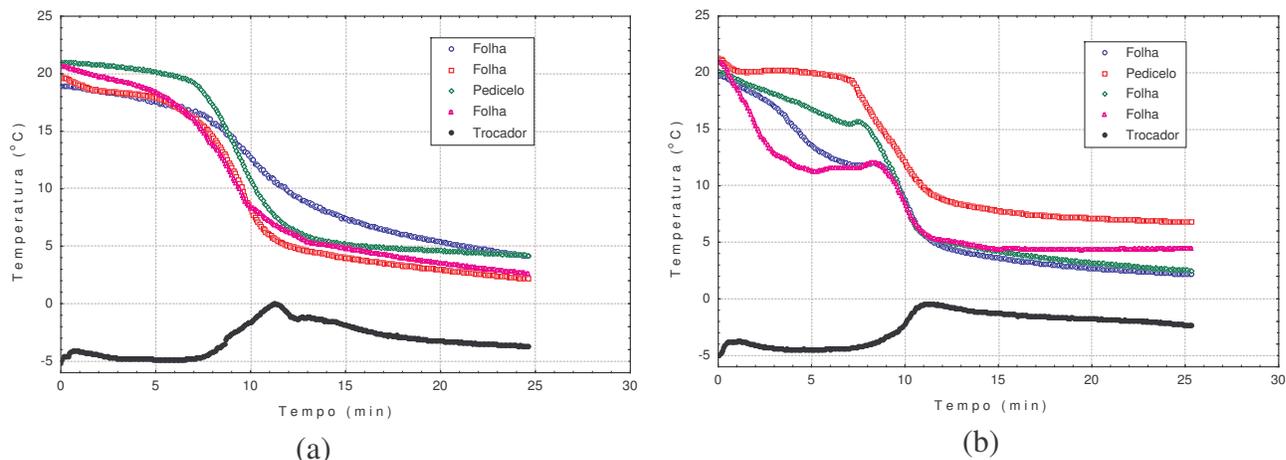


Figura 3 – Curvas de resfriamento: (a) ensaio 14, massa de alface 3,0 kg , tempo de espera 1,32 h e vazão de 22 m<sup>3</sup> . h<sup>-1</sup>; (b) ensaio 15, massa de alface 3,0 kg, tempo de espera 4,68 h e vazão de 22 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>.

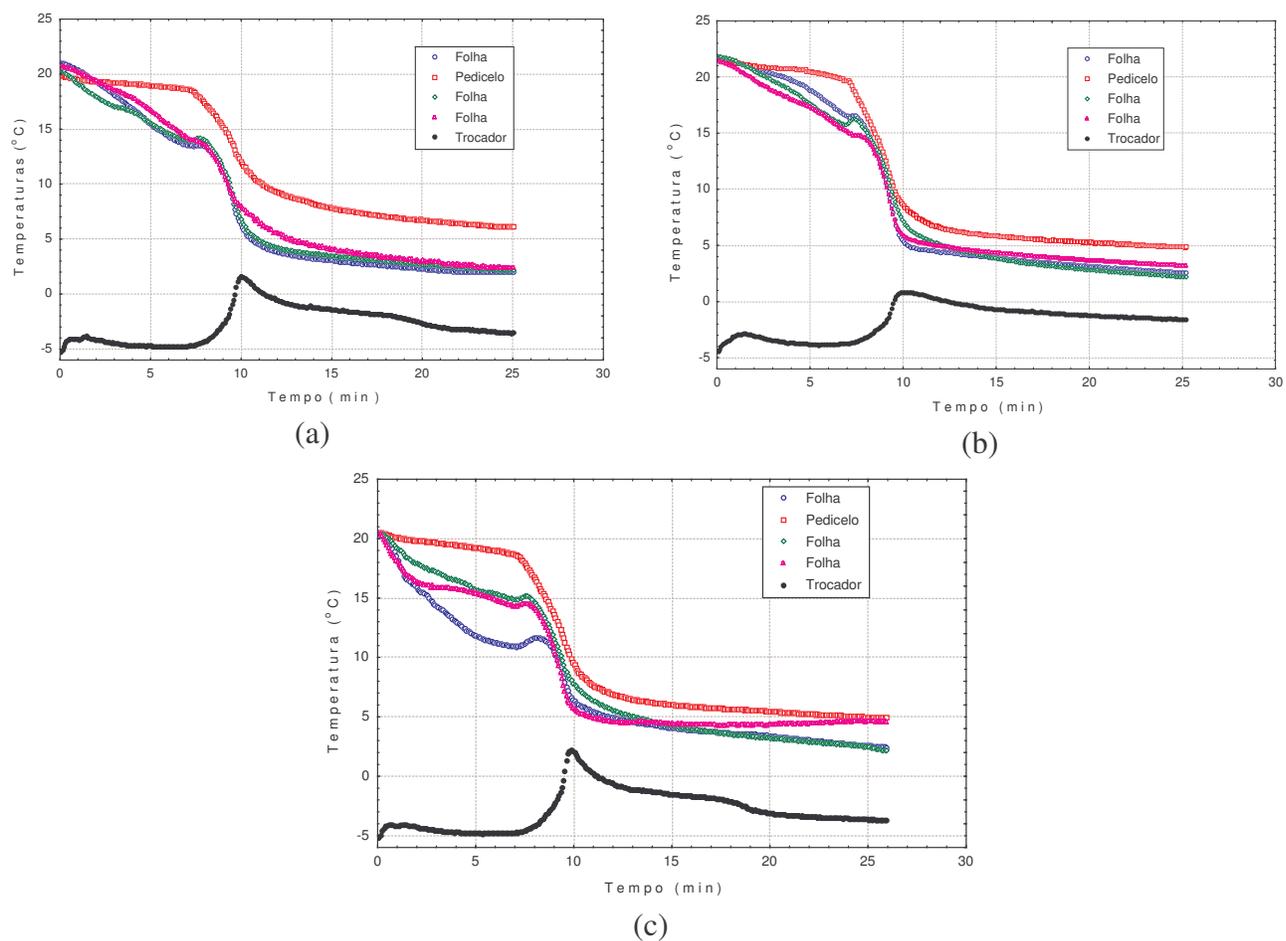


Figura 4 - Curvas de resfriamento: (a) ensaio 9, (b) ensaio 10 e (c) ensaio 11, massa de alface 3,0 kg , tempo de espera 3 h e vazão de  $22 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

Históricos das pressões da câmara dos ensaios de resfriamento a vácuo de alfaces discutidos no Capítulo 2.

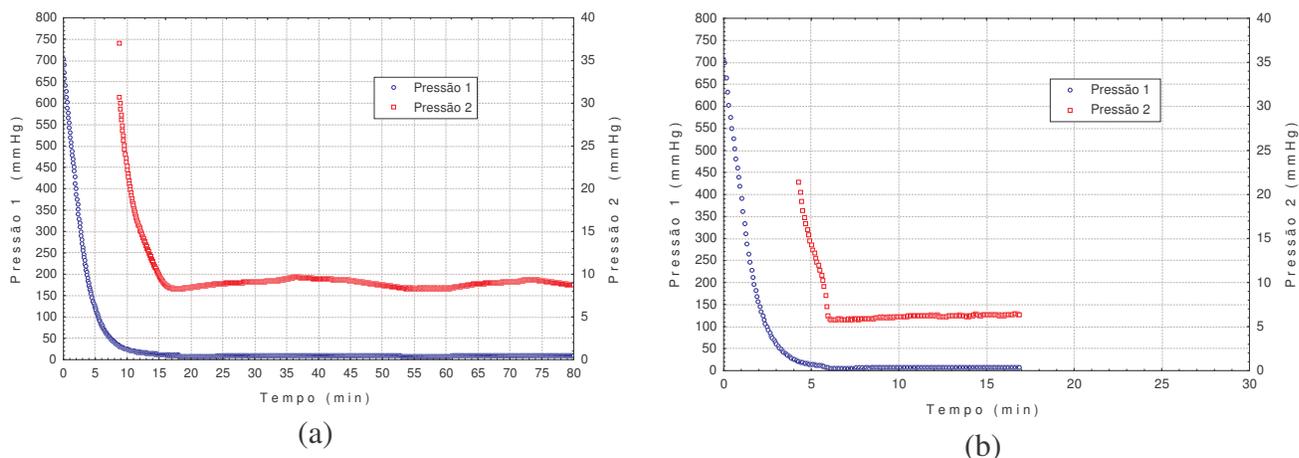


Figura 5 – Curvas de pressão: (a) ensaio 16, massa de alface 3,0 kg , tempo de espera 3 h e vazão de  $7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; (b) ensaio 17, massa de alface 3,0 kg , tempo de espera 3 h e vazão de  $36 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

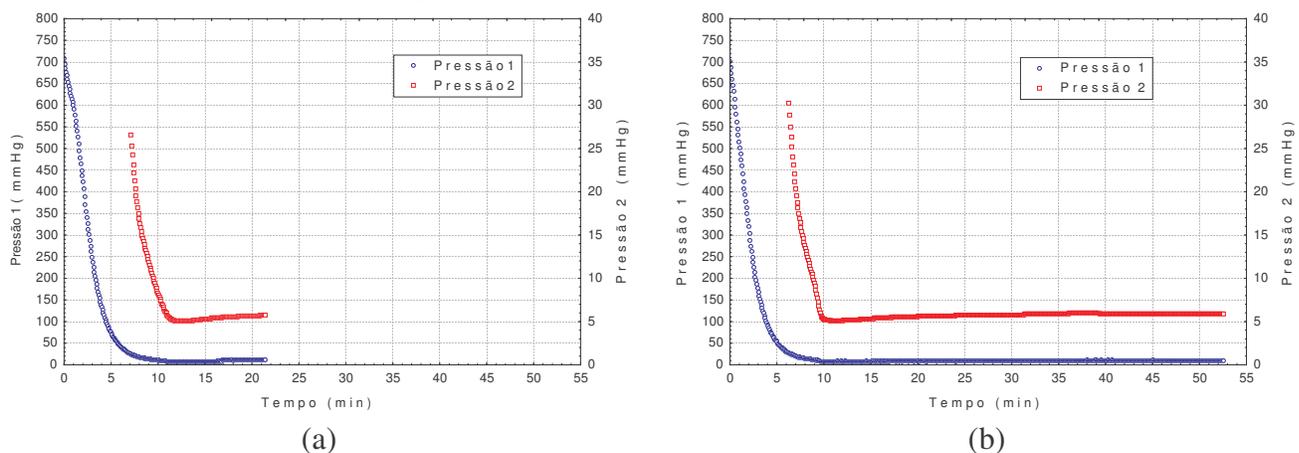


Figura 6 – Curvas de pressão: (a) ensaio 12, massa de alface 2,16 kg , tempo de espera 3 h e vazão de  $22 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; (b) ensaio 13, massa de alface 3,84 kg, tempo de espera 3 h e vazão de  $22 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .

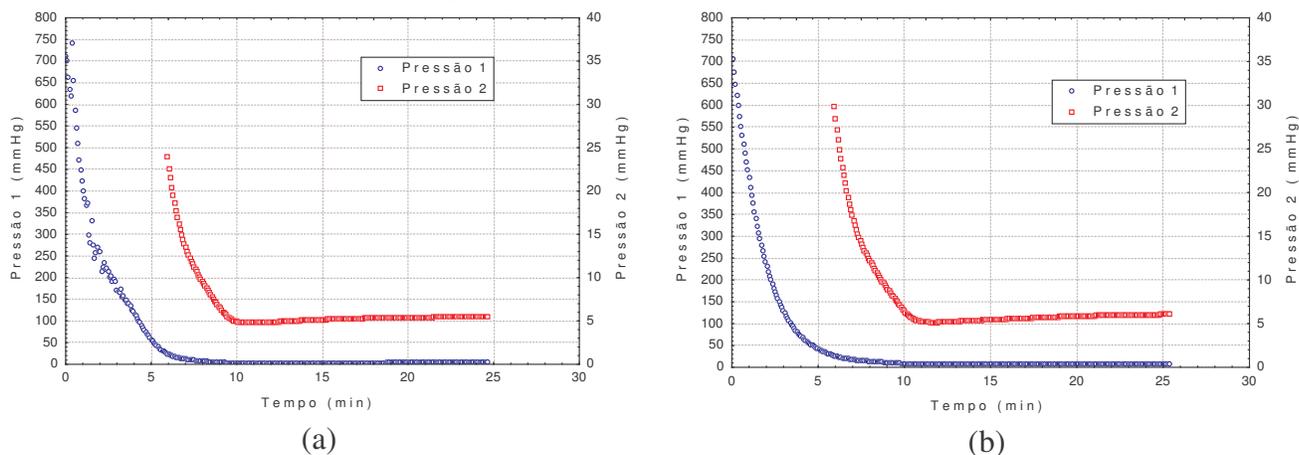


Figura 7 – Curvas de Pressão: (a) ensaio 14, massa de alface 3,0 kg , tempo de espera 1,32 h e vazão de  $22 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; (b) ensaio 15, massa de alface 3,0 kg, tempo de espera 4,68 h e vazão de  $22 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

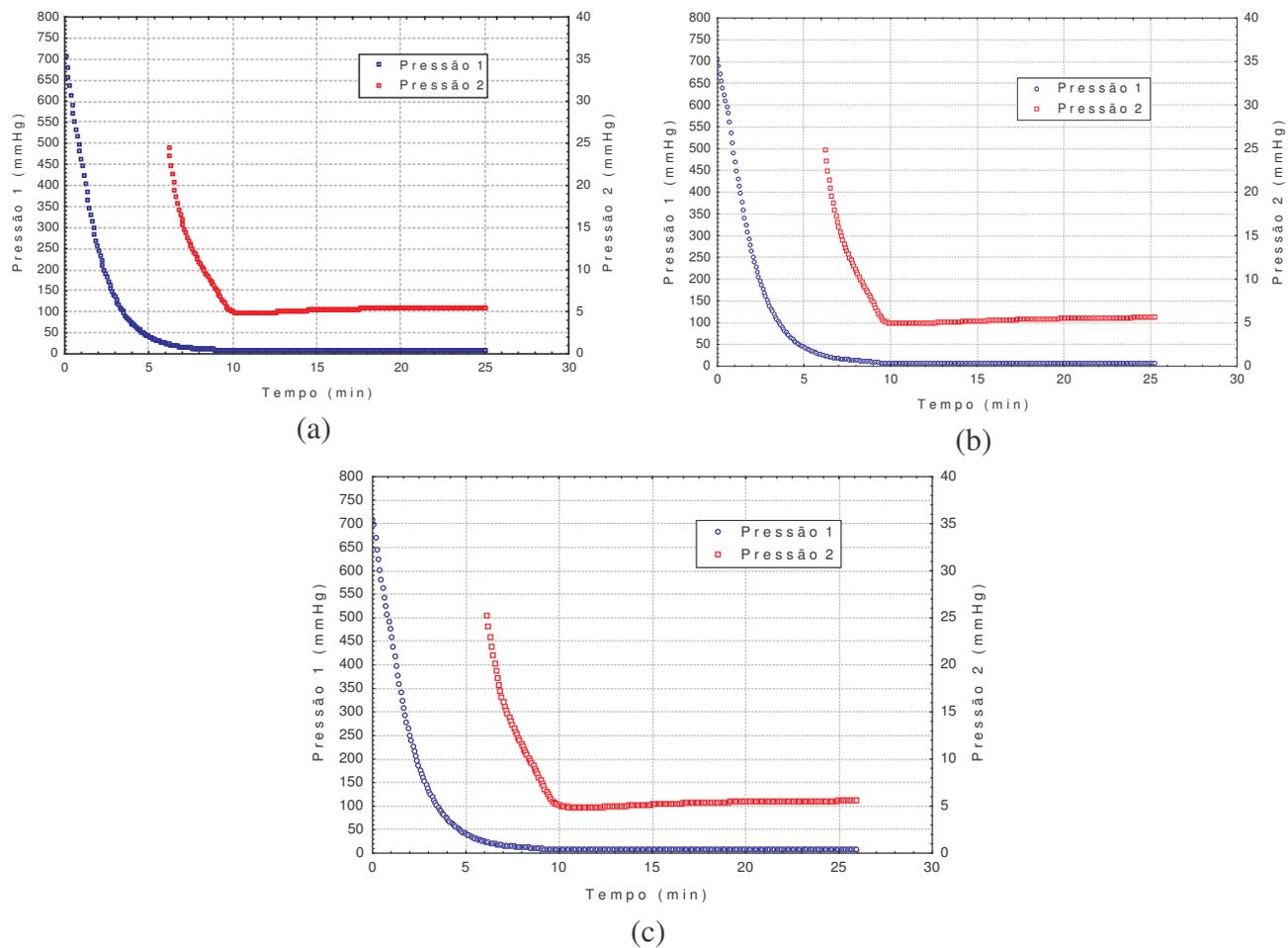


Figura 8 – Curvas de pressão: (a) ensaio 9, (b) ensaio 10 e (c) ensaio 11, massa de alface 3,0 kg , tempo de espera 3 h e vazão de  $22 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

Históricos das potências dos ensaios de resfriamento a vácuo de alfaces discutidos no Capítulo 2.

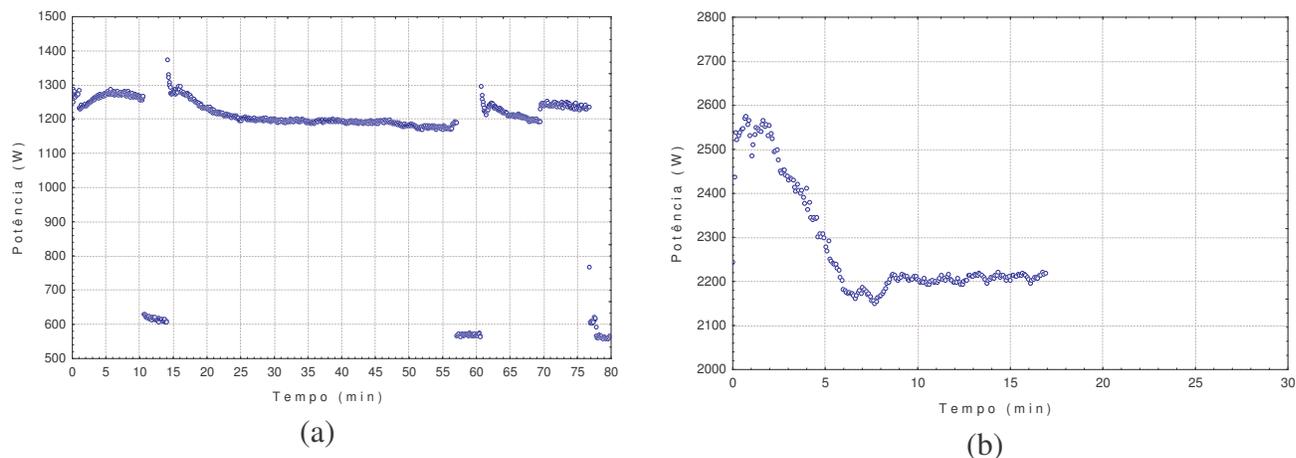


Figura 9 – Curvas de potência: (a) ensaio 16, massa de alface 3,0 kg , tempo de espera 3 h e vazão de  $7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; (b) ensaio 17, massa de alface 3,0 kg , tempo de espera 3 h e vazão de  $36 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .

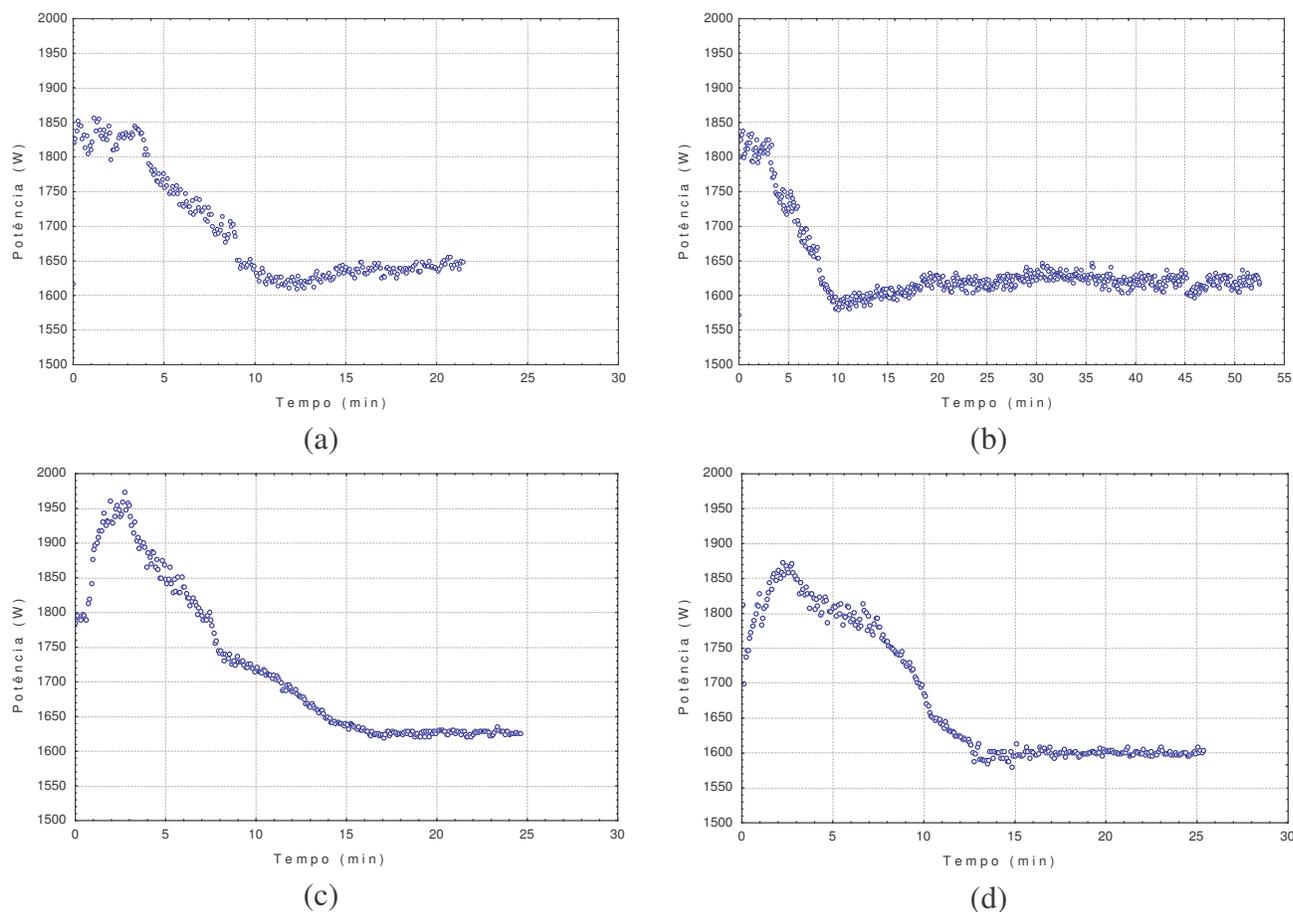
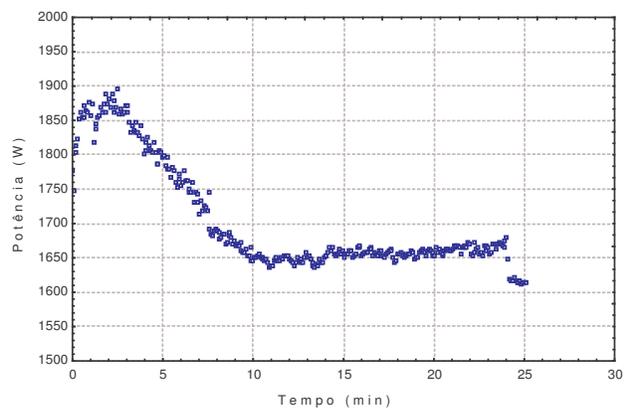
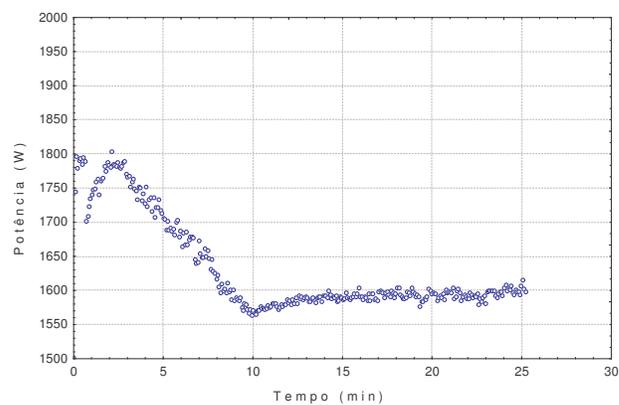


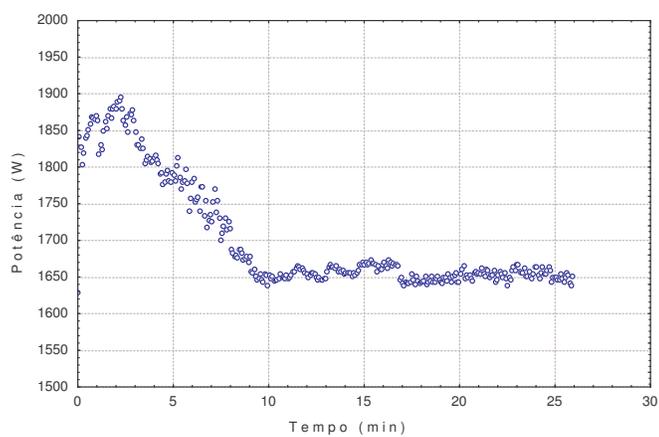
Figura 10 – Curvas de potência: (a) ensaio 12, massa de alface 2,16 kg , tempo de espera 3 h e vazão de  $22 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; (b) ensaio 13, massa de alface 3,84 kg , tempo de espera 3 h e vazão de  $22 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; (c) ensaio 14, massa de alface 3,0 kg , tempo de espera 1,32 h e vazão de  $22 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; (d) ensaio 15, massa de alface 3,0 kg , tempo de espera 4,68 h e vazão de  $22 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .



(a)



(b)



(c)

Figura 11 - Curvas de pressão: (a) ensaio 9, (b) ensaio 10 e (c) ensaio 11, massa de alface 3,0 kg , tempo de espera 3 h e vazão de  $22 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

Históricos das perdas de massa dos ensaios de resfriamento a vácuo de alfaces discutidos no Capítulo 2.

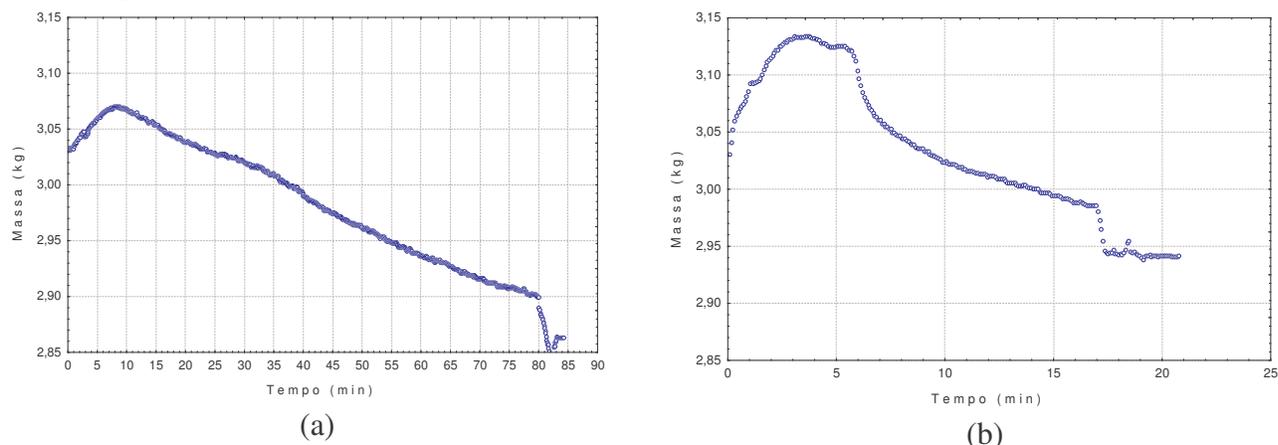


Figura 12 – Curvas de perda de massa: (a) ensaio 16, massa de alface 3,0 kg , tempo de espera 3 h e vazão de  $7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; (b) ensaio 17, massa de alface 3,0 kg , tempo de espera 3 h e vazão de  $36 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .

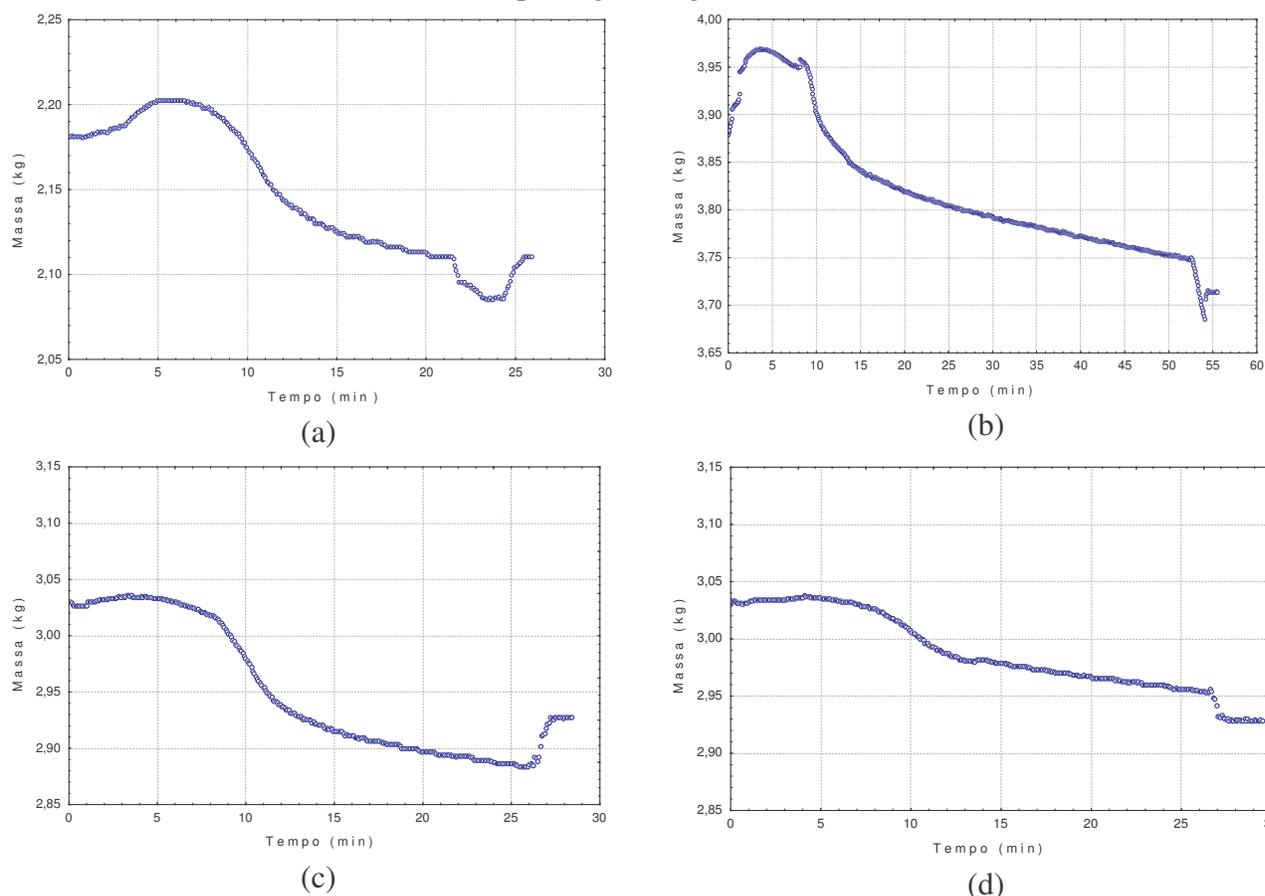


Figura 13 – Curvas de perda de massa: (a) ensaio 12, massa de alface 2,16 kg , tempo de espera 3 h e vazão de  $22 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; (b) ensaio 13, massa de alface 3,84 kg , tempo de espera 3 h e vazão de  $22 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; (c) ensaio 14, massa de alface 3,0 kg , tempo de espera 1,32 h e vazão de  $22 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; (d) ensaio 15, massa de alface 3,0 kg , tempo de espera 4,68 h e vazão de  $22 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .

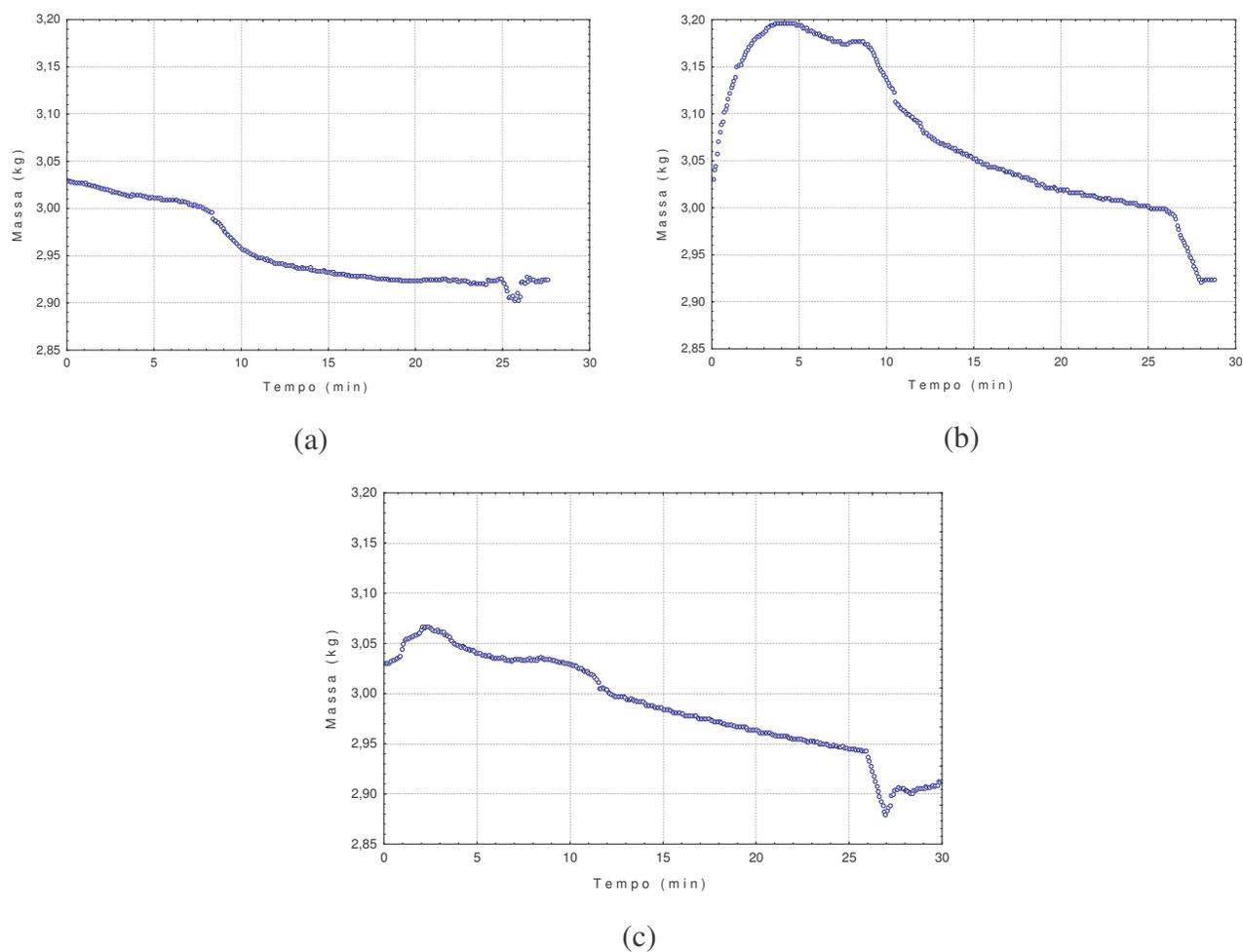


Figura 14 - Curvas de perda de massa: (a) ensaio 9, (b) ensaio 10 e (c) ensaio 11, massa de alfaca 3,0 kg , tempo de espera 3 h e vazão de  $22 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

Regressões lineares para a determinação do produto  $kS$  apresentado no Capítulo 2.

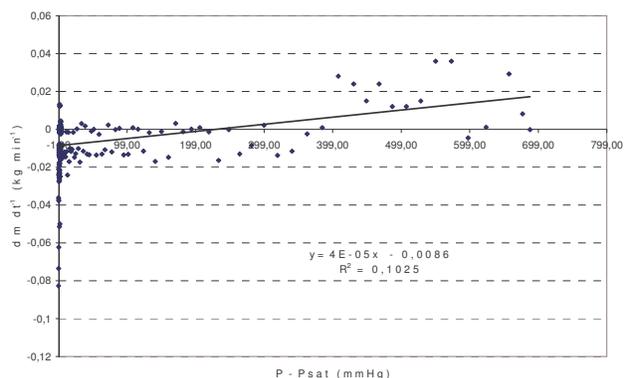


Figura 15 - Cálculo de  $kS$  no ensaio 1 (massa inicial de 3,5 kg) de acordo com equação 2.2

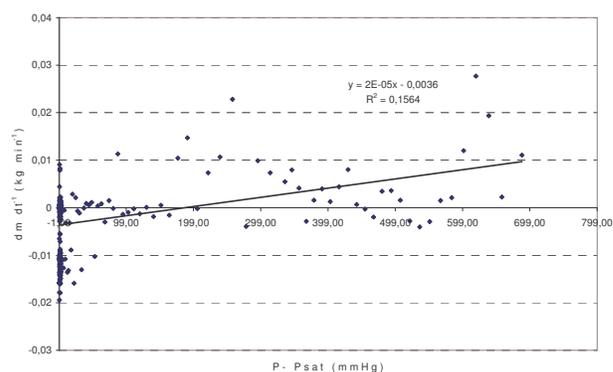


Figura 16 - Cálculo de  $kS$  no ensaio 3 (massa inicial de 3,5 kg) de acordo com equação 2.2

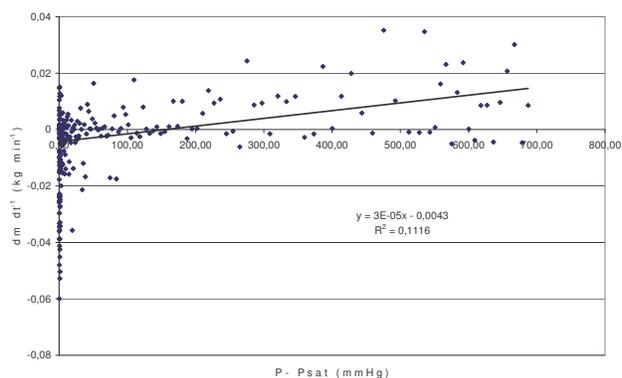


Figura 17 - Cálculo de  $kS$  no ensaio 7 (massa inicial de 3,5 kg) de acordo com equação 2.2

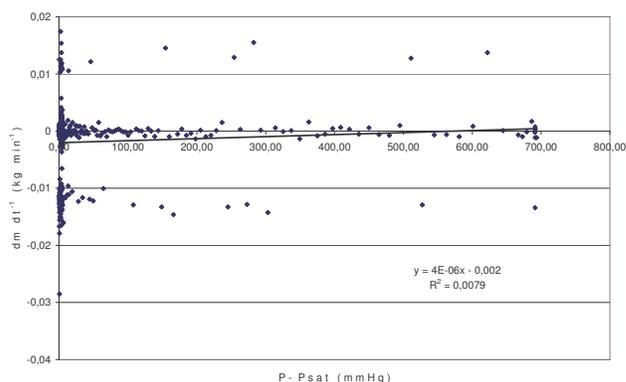


Figura 18 - Cálculo de  $kS$  no ensaio 6 (massa inicial de 2,5 kg) de acordo com equação 2.2

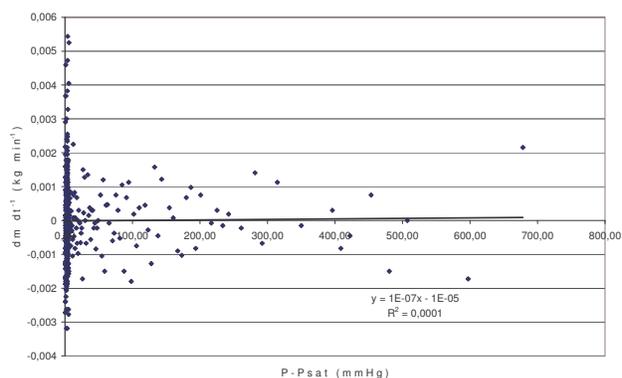


Figura 19 - Cálculo de  $kS$  no ensaio 8 (massa inicial de 2,5 kg) de acordo com equação 2.2

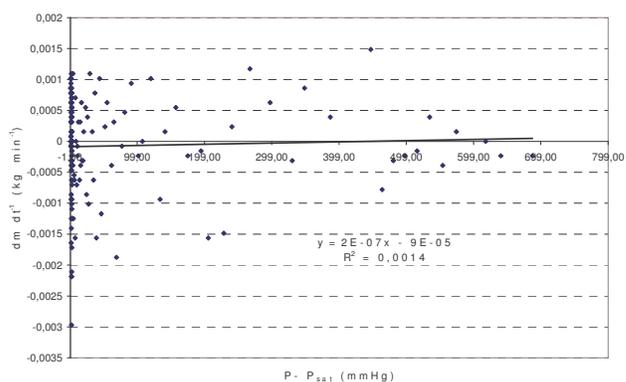


Figura 20 - Cálculo de  $kS$  no ensaio 9 (massa inicial de 3,0 kg) de acordo com equação 2.2

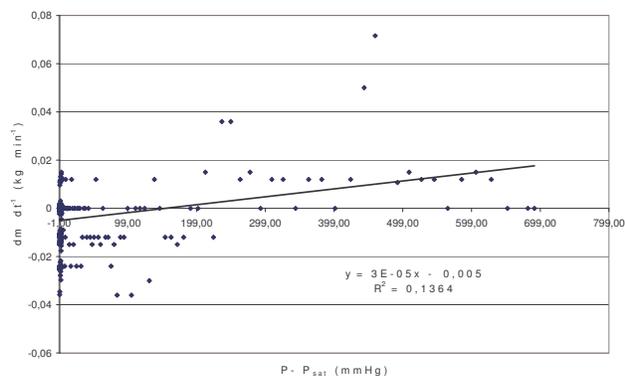


Figura 21 - Cálculo de  $kS$  no ensaio 11 (massa inicial de 3,0 kg) de acordo com equação 2.2

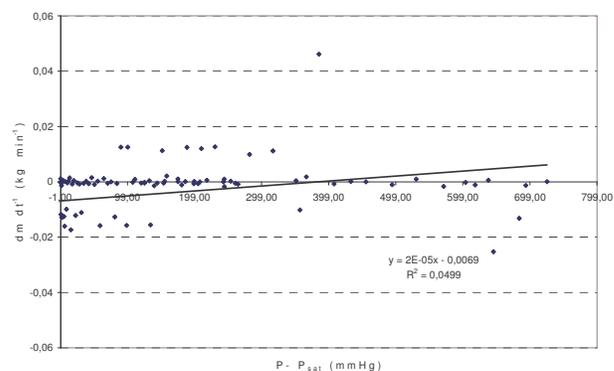


Figura 22 - Cálculo de  $kS$  no ensaio 14 (massa inicial de 3,0 kg) de acordo com equação 2.2

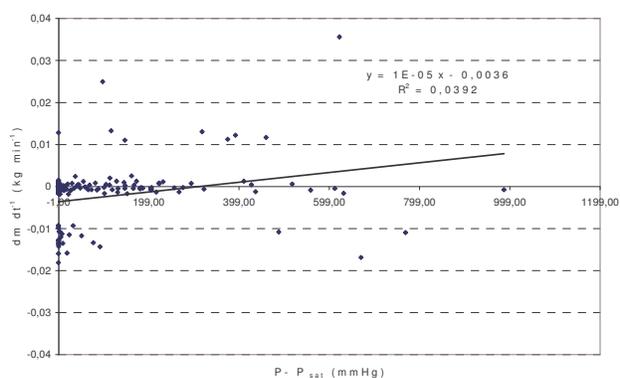


Figura 23 - Cálculo de  $kS$  no ensaio 15 (massa inicial de 3,0 kg) de acordo com equação 2.2

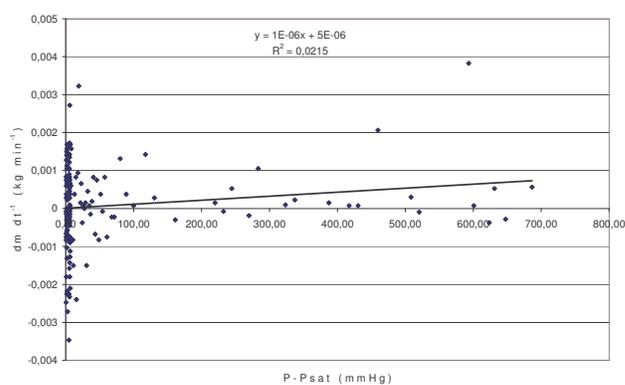


Figura 24 - Cálculo de  $kS$  no ensaio 12 (massa inicial de 2,16 kg) de acordo com equação 2.2

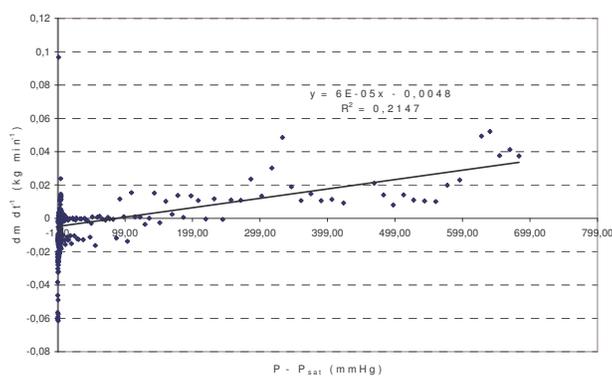


Figura 25 - Cálculo de  $kS$  no ensaio 13 (massa inicial de 3,84 kg) de acordo com equação 2.2

**Anexo IV**

Ficha de Avaliação Sensorial – Alface

Provedor: \_\_\_\_\_ Data: \_\_\_\_\_

<p>1. Por favor, avalie cada amostra utilizando a escala abaixo para descrever o quanto gostou ou desgostou da amostra em relação à sua <b>qualidade geral</b>.</p> <p>9 – Gostei muitíssimo        8 – Gostei muito        7 – Gostei moderadamente        6 – Gostei ligeiramente        5 – Nem gostei / Nem desgostei        4 – Desgostei ligeiramente        3 – Desgostei moderadamente        2 – Desgostei muito        1 – Desgostei muitíssimo</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto; border-collapse: collapse; width: 80%;"> <thead> <tr> <th style="padding: 5px;">Nº Amostra</th> <th style="padding: 5px;">Valor</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td style="height: 20px;"> </td><td> </td></tr> </tbody> </table>	Nº Amostra	Valor															<p>2. Se encontrasse essa amostra à venda, você</p> <p>5 – certamente compraria        4 – provavelmente compraria        3 – talvez comprasse/ talvez não comprasse        2 – provavelmente não compraria        1 – certamente não compraria</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto; border-collapse: collapse; width: 80%;"> <thead> <tr> <th style="padding: 5px;">Nº Amostra</th> <th style="padding: 5px;">Valor</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td style="height: 20px;"> </td><td> </td></tr> </tbody> </table>	Nº Amostra	Valor														
Nº Amostra	Valor																																
Nº Amostra	Valor																																

Comentários:

---



---



---



---



---



---



---

## Histórico das notas da avaliação sensorial

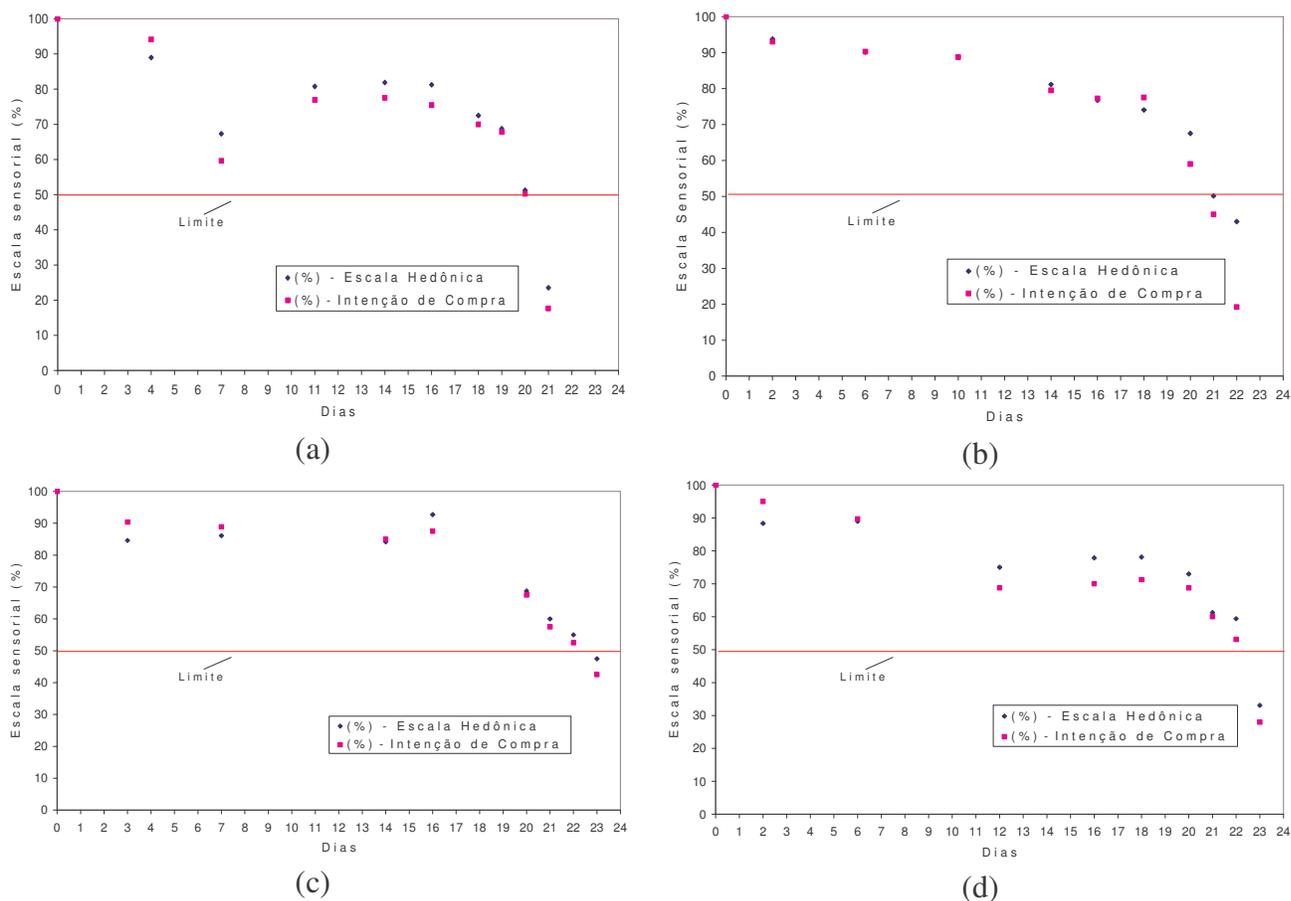


Figura 1 – Histórico de notas da avaliação sensorial das alfaces submetidas ao resfriamento a vácuo: (a) ensaio 5, tempo de espera de 4 h; (b) ensaio 6, tempo de espera 4 h; (c) ensaio 7, tempo de espera 2 h; (d) ensaio 8, tempo de espera 2 h.

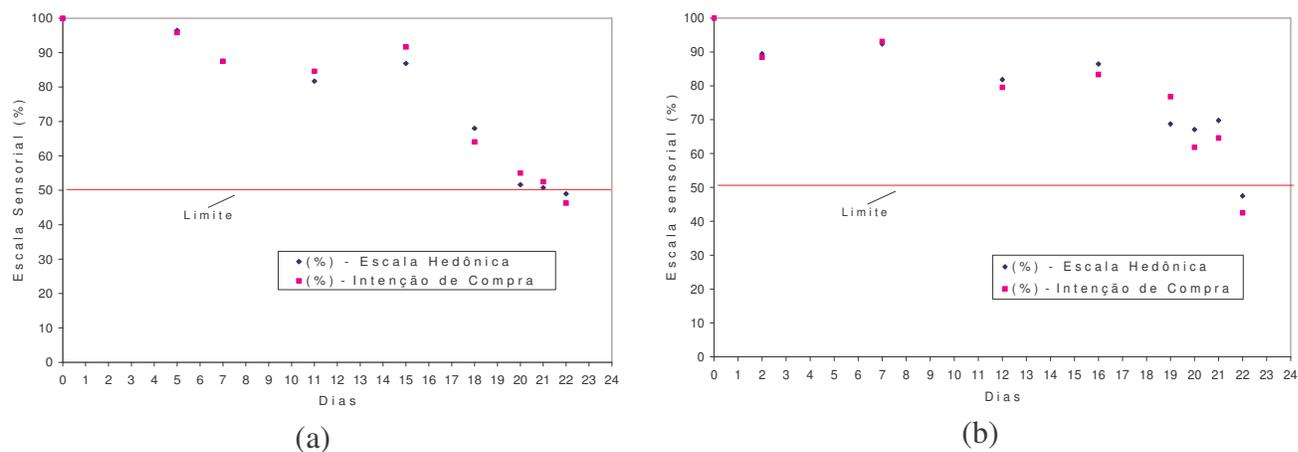


Figura 2 – Histórico de notas da avaliação sensorial das alfaces submetidas ao resfriamento a vácuo: (a) ensaio 9, tempo de espera de 3 h; (b) ensaio 10, tempo de espera 3 h.

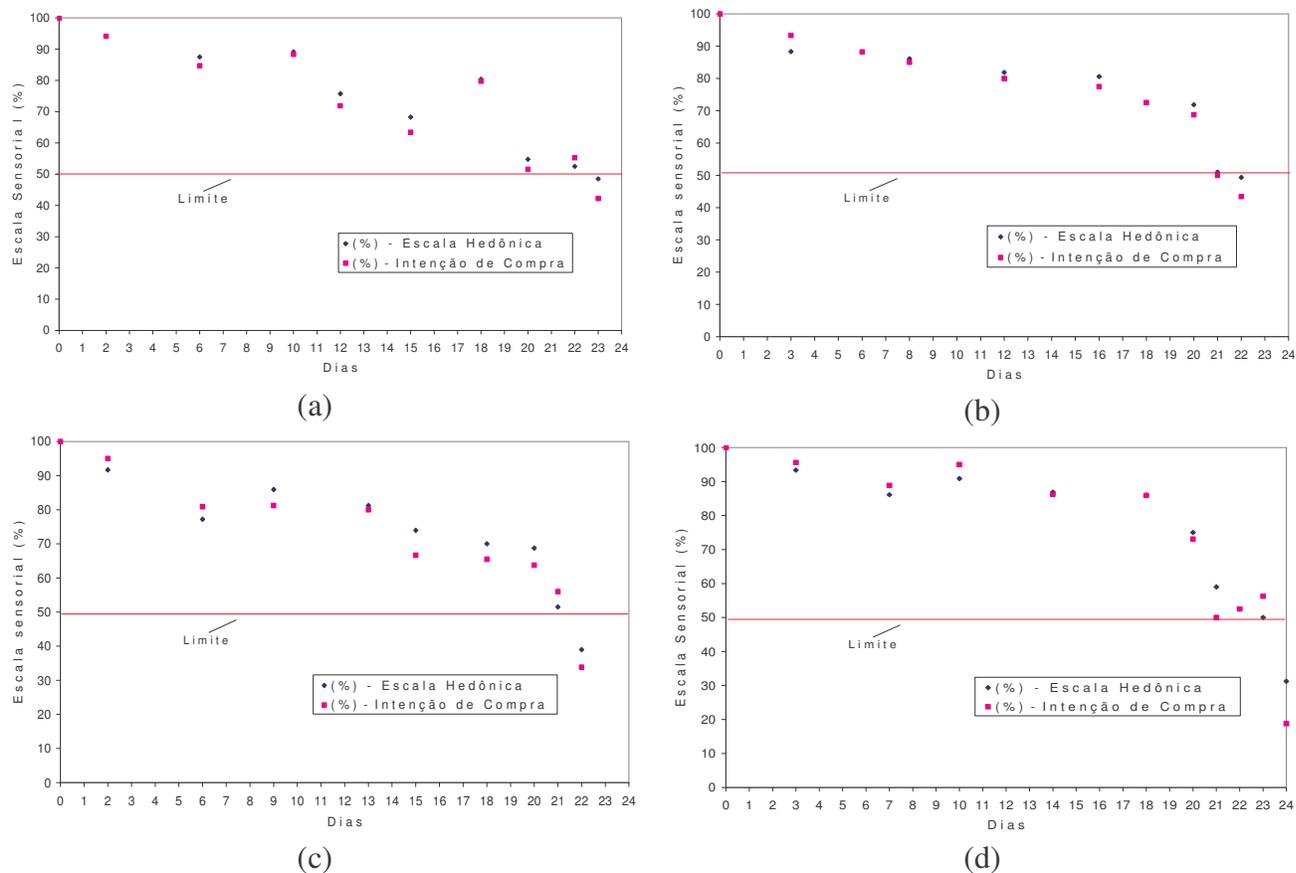


Figura 3 – Histórico de notas da avaliação sensorial das alfaces submetidas ao resfriamento a vácuo: (a) ensaio 11, tempo de espera de 3 h; (b) ensaio 12, tempo de espera 3 h; (c) ensaio 13, tempo de espera 3 h; (d) ensaio 14, tempo de espera 1,32 h.

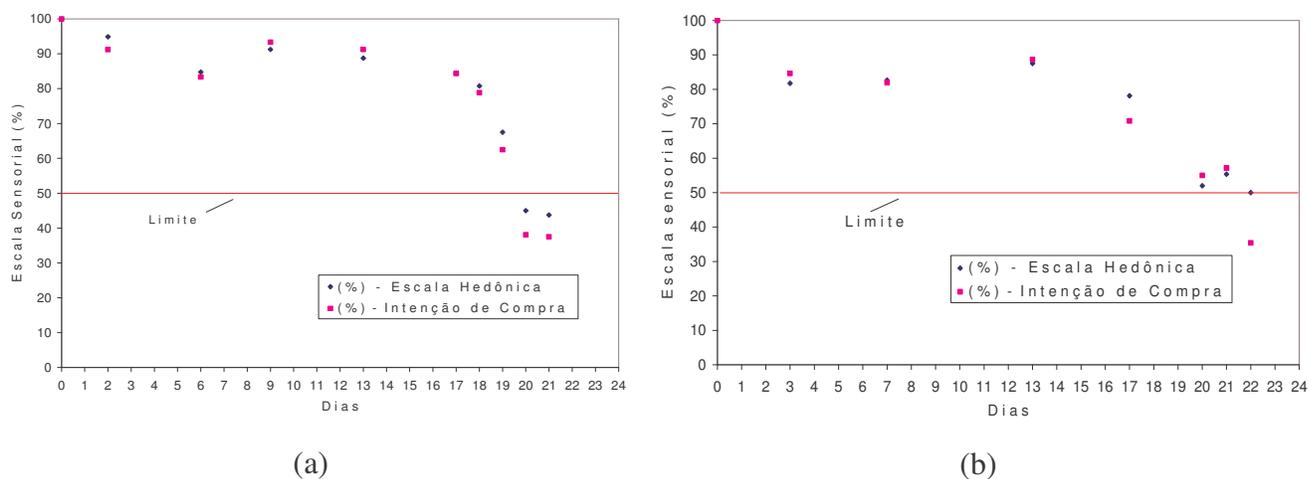


Figura 4 – Histórico de notas da avaliação sensorial das alfaces submetidas ao resfriamento a vácuo: (a) ensaio 15, tempo de espera de 4,68 h; (b) ensaio 17, tempo de espera 3 h.

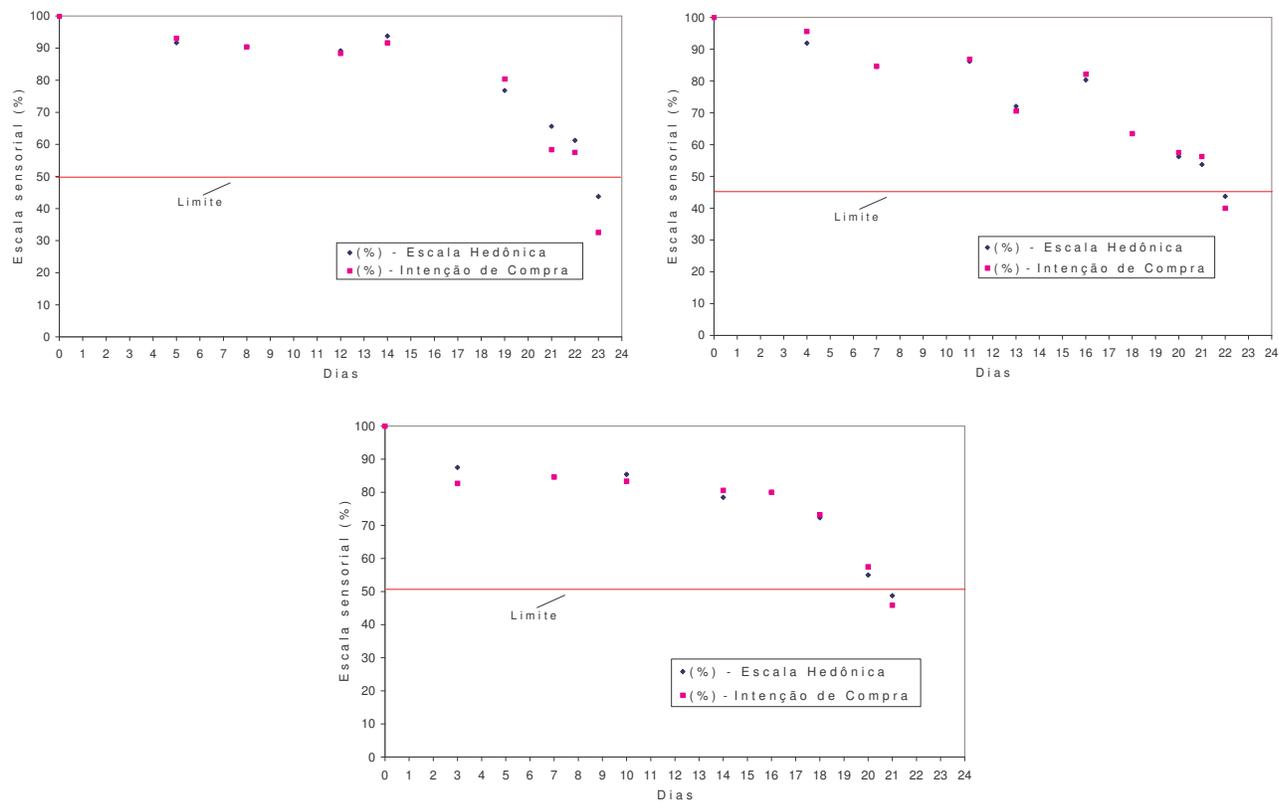


Figura 5 - Histórico de notas da avaliação sensorial das alfaces colocadas diretamente na câmara de estocagem: (a) ensaio A, tempo de espera de 2 h; (b) ensaio B, tempo de espera 3 h ; (c) ensaio C, tempo de espera 4h.

## Histórico de temperaturas das alfaces

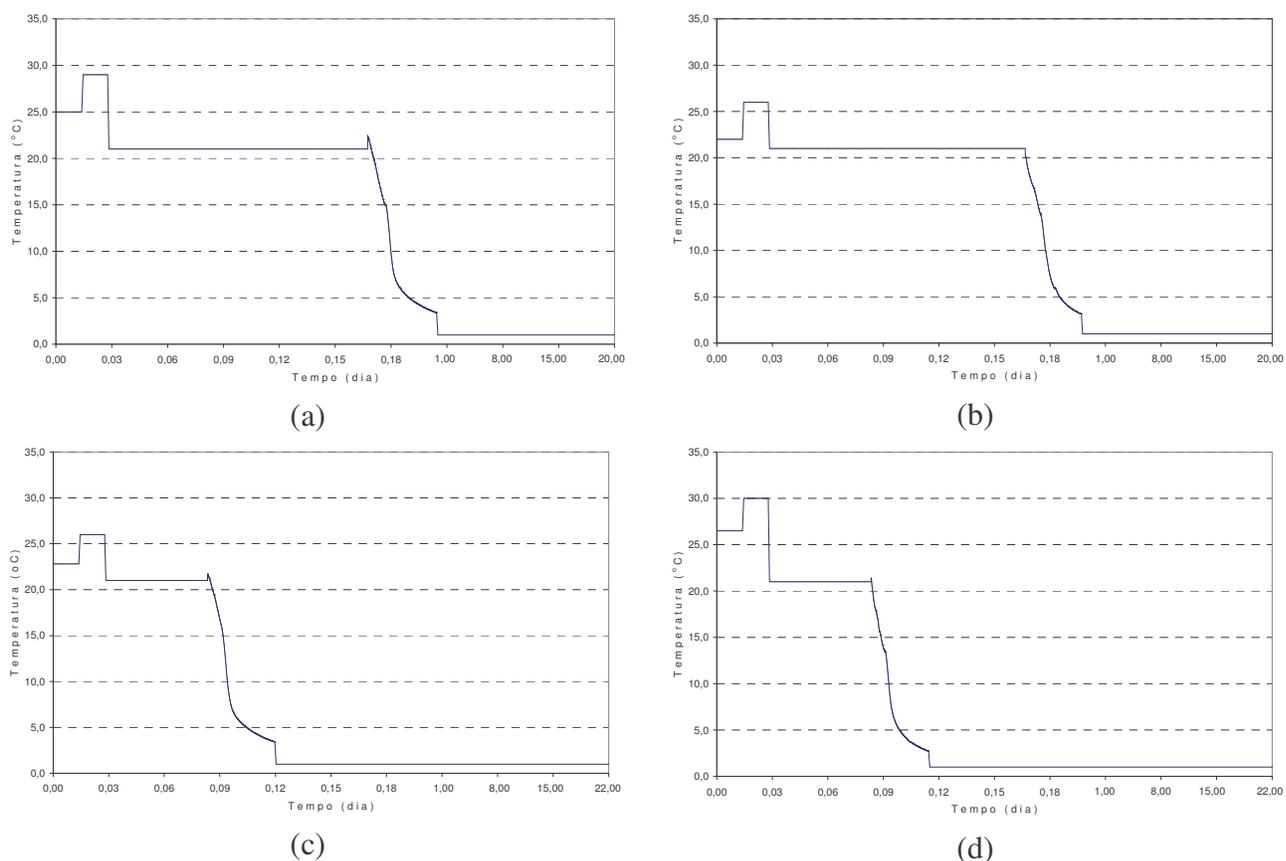


Figura 6 - Histórico das temperaturas das alfaces desde a colheita até o fim da vida pós-colheita: (a) ensaio 5, tempo de espera de 4 h; (b) ensaio 6, tempo de espera 4 h; (c) ensaio 7, tempo de espera 2 h; (d) ensaio 8, tempo de espera 2 h.

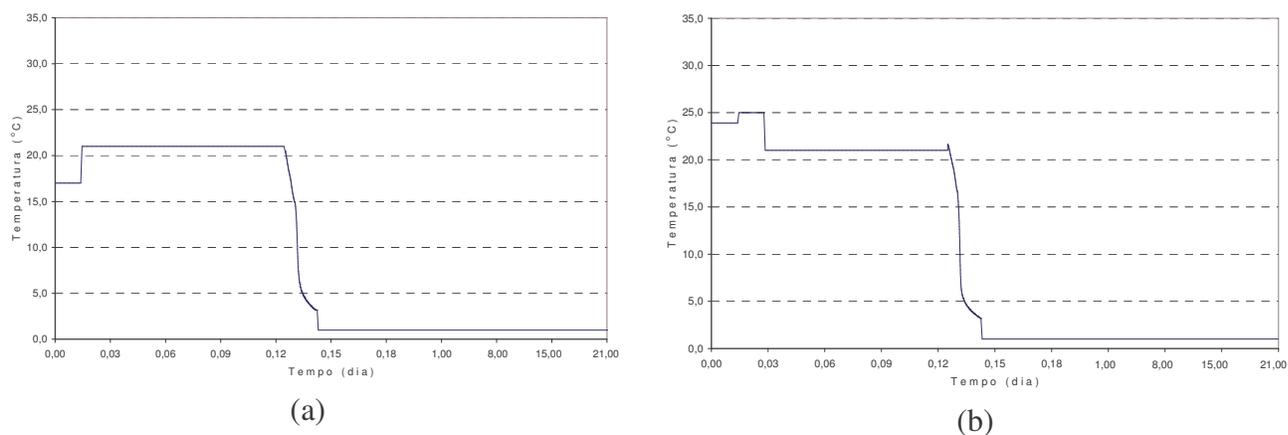
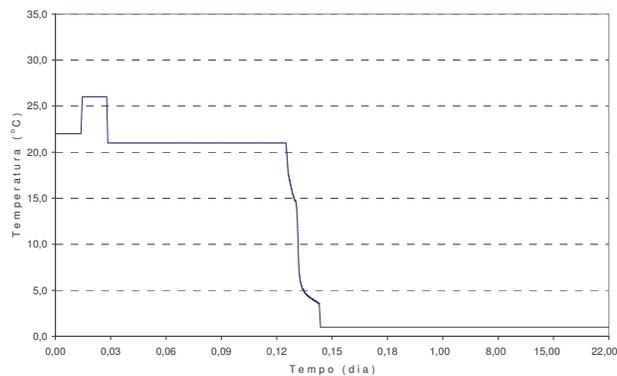
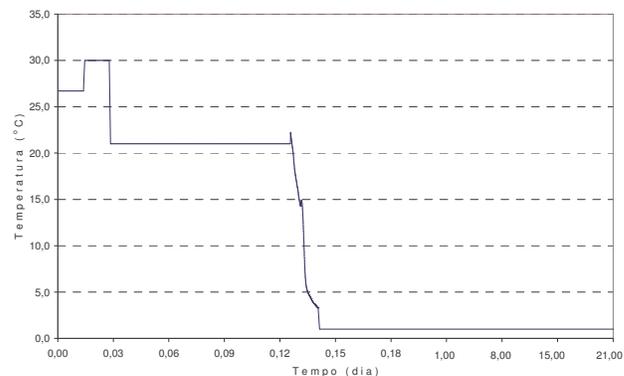


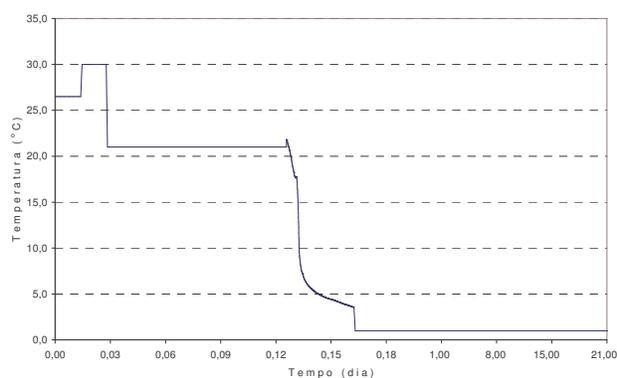
Figura 7 - Histórico das temperaturas das alfaces desde a colheita até o fim da vida pós-colheita: (a) ensaio 9, tempo de espera de 3 h; (b) ensaio 10, tempo de espera 4 h.



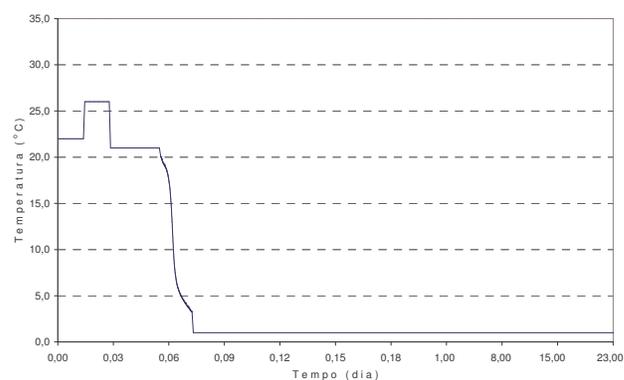
(a)



(b)

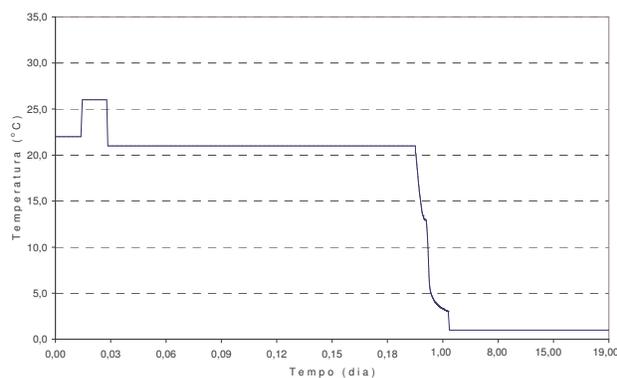


(c)

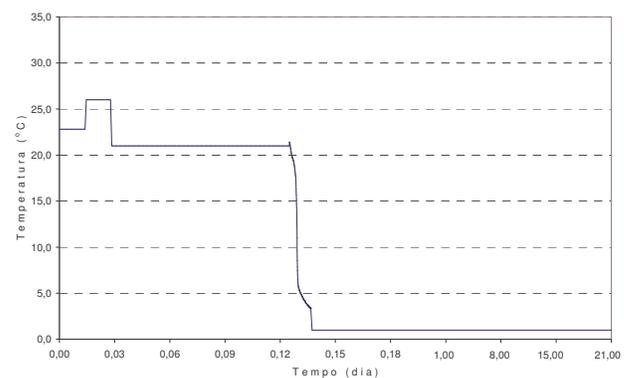


(d)

Figura 8 - Histórico das temperaturas das alfaces desde a colheita até o fim da vida pós-colheita: (a) ensaio 11, tempo de espera de 3 h; (b) ensaio 12, tempo de espera 3 h; (c) ensaio 13, tempo de espera 3 h; (d) ensaio 14, tempo de espera 1,32 h.



(a)



(b)

Figura 9 - Histórico das temperaturas das alfaces desde a colheita até o fim da vida pós-colheita: (a) ensaio 15, tempo de espera de 4,68 h; (b) ensaio 17, tempo de espera 3 h.

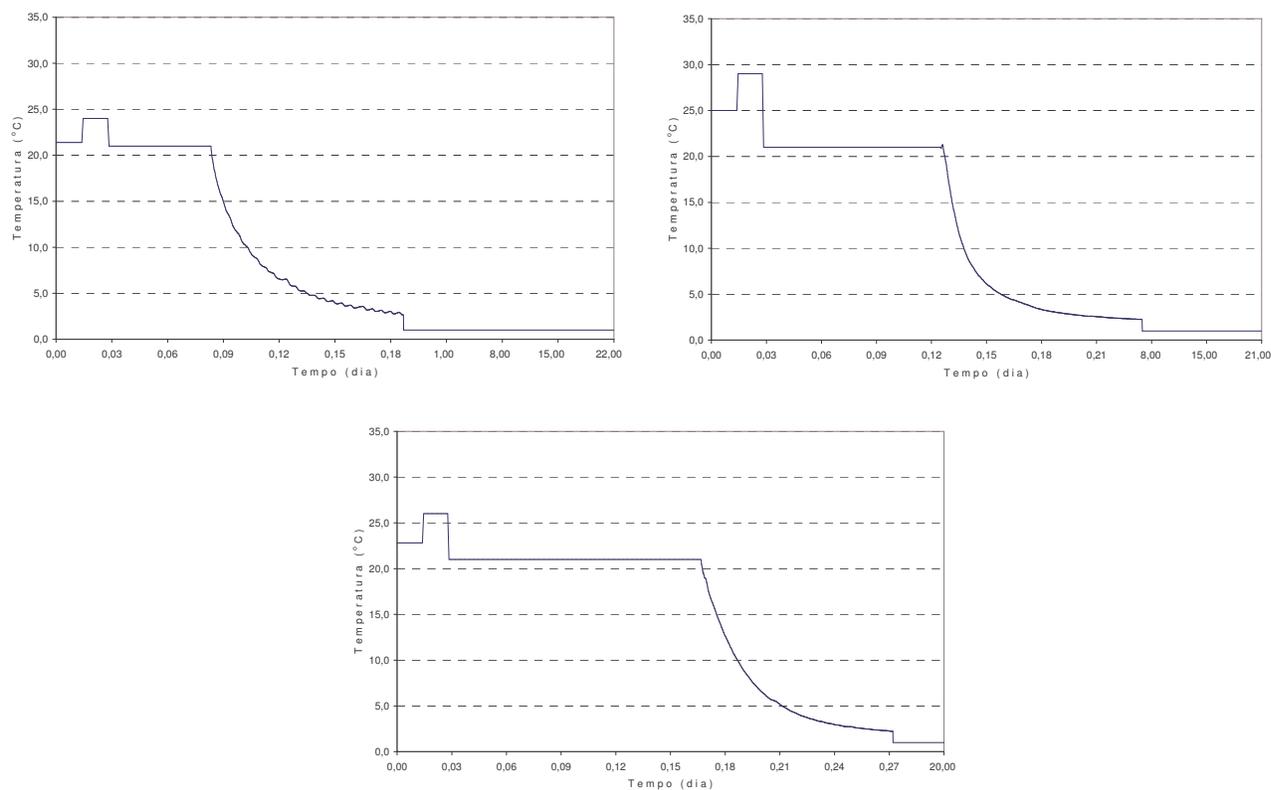


Figura 10 - Histórico das temperaturas das alfaces desde a colheita até o fim da vida pós-colheita: (a) ensaio A, tempo de espera de 2 h; (b) ensaio B, tempo de espera 3 h; (c) ensaio C, tempo de espera 4h.