

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS

**SECAGEM DE CAQUI EM CONDIÇÕES CONTROLADAS:  
EFEITO SOBRE A QUALIDADE DO PRODUTO E  
CONSUMO ENERGÉTICO**

Tese de Doutorado apresentada à  
Faculdade de Engenharia de Alimentos da  
Universidade Estadual de Campinas, para  
obtenção do título de Doutor em Engenharia  
de Alimentos

JOEL FERNANDO NICOLETI  
**AUTOR**

Prof. Dr. VIVALDO SILVEIRA JÚNIOR  
**ORIENTADOR**

Profa. Dra. VÂNIA REGINA NICOLETTI TELIS  
**CO-ORIENTADOR**

**Campinas**  
**Março de 2005**



## **BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. Vivaldo Silveira Júnior

Prof. Dr. Kil Jin Park

Profa. Dra. Ana Lúcia Gabas

Prof. Dr. Javier Telis-Romero

Prof. Dr. Celso Costa Lopes

Prof. Dr. Fernando Antonio Cabral



A vocês, meus PAIS, que me deram a vida e ensinaram-me a vivê-la com dignidade; A vocês, tia LAURA, tio MARCÍLIO, tia ALAÍDE, tio ALBERTO e vó TATA, que iluminaram os caminhos obscuros com afeto e dedicação, para que eu os trilhasse sem medo e cheios de esperança; A vocês, tio LOLO, tia ALZIRA, vó ROSA, vó NILDO e vó MARIA, que já partiram, mas também participaram desta conquista, não bastaria um muitíssimo obrigado, mas minha infinita gratidão.



## **AGRADECIMENTO ESPECIAL**

Transmitir conhecimento é fácil para aqueles que têm segurança e gostam do que fazem, amam a profissão e a ela dedicam grande parte de suas vidas. Ensinar é uma arte e, como tal, uma tarefa reservada para poucos, porém privilegiados. Com muita honra, agradeço à Profa. VÂNIA REGINA NICOLETTI TELIS por estes anos de dedicação.



## **AGRADECIMENTOS**

A DEUS, por tudo, e em especial, pela saúde.

Aos meus familiares pelo apoio, compreensão e incentivo.

Ao prof. VIVALDO SILVEIRA JÚNIOR pela orientação e amizade.

Ao prof. JAVIER TELIS-ROMERO pelas contribuições no trabalho e convívio durante estes anos.

Aos profs. KIL JIN PARK, SATOSHI TOBINAGA e FLORÊNCIA CECÍLIA MENEGALLI pelas sugestões e participação nos Exames de Qualificação.

Aos professores membros da Banca Examinadora pelas revisões e correções da Tese.

Aos meus amigos LEONARDO DA SILVA ARRIECHE e ANDRÉ LUIZ MELLEIRO PORTO.

Aos docentes e funcionários da Faculdade de Engenharia de Alimentos da UNICAMP.

Aos docentes e funcionários do Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos da UNESP (Ibilce).

A todos os demais que, de alguma forma, contribuíram com este trabalho.

A CAPES pelo apoio financeiro.



## SUMÁRIO

|                                                                    | Páginas |
|--------------------------------------------------------------------|---------|
| Lista de Figuras.....                                              | xiii    |
| Lista de Tabelas.....                                              | xix     |
| Nomenclatura.....                                                  | xxi     |
| Resumo.....                                                        | xxiii   |
| Abstract.....                                                      | xxv     |
| 1. Introdução.....                                                 | 1       |
| 2. Revisão Bibliográfica.....                                      | 5       |
| 2.1 Caqui.....                                                     | 6       |
| 2.2 Fundamentos da Secagem.....                                    | 7       |
| 2.3 Encolhimento.....                                              | 12      |
| 2.4 Reidratação.....                                               | 15      |
| 2.5 Propriedades Reológicas.....                                   | 16      |
| 2.6 Vitamina C.....                                                | 21      |
| 2.7 Consumo Energético.....                                        | 26      |
| 3. Materiais e Métodos.....                                        | 29      |
| 3.1 Caracterização e Preparo da Matéria-prima.....                 | 29      |
| 3.2 Secador.....                                                   | 30      |
| 3.3 Planejamento Experimental.....                                 | 33      |
| 3.4 Cinética de Secagem e Encolhimento.....                        | 34      |
| 3.5 Reidratação.....                                               | 35      |
| 3.6 Propriedades Reológicas.....                                   | 35      |
| 3.7 Vitamina C.....                                                | 36      |
| 4. Resultados e Discussões.....                                    | 39      |
| 4.1 Encolhimento Volumétrico.....                                  | 39      |
| 4.1.1 Temperatura Fixa no Ar de Secagem.....                       | 39      |
| 4.1.2 Temperatura Fixa no Interior do Produto.....                 | 41      |
| 4.2 Coeficientes de Difusão de Umidade e Cinéticas de Secagem..... | 43      |
| 4.2.1 Temperatura Fixa no Ar de Secagem.....                       | 43      |

|                                                    |     |
|----------------------------------------------------|-----|
| 4.2.2 Temperatura Fixa no Interior do Produto..... | 50  |
| 4.3 Reidratação.....                               | 56  |
| 4.4 Propriedades Reológicas.....                   | 58  |
| 4.4.1 Temperatura Fixa no Ar de Secagem.....       | 59  |
| 4.4.2 Temperatura Fixa no Interior do Produto..... | 69  |
| 4.5 Vitamina C.....                                | 81  |
| 4.5.1 Temperatura Fixa no Ar de Secagem.....       | 83  |
| 4.5.2 Temperatura Fixa no Interior do Produto..... | 88  |
| 4.6 Consumo Energético.....                        | 94  |
| 4.6.1 Temperatura Fixa no Ar de Secagem.....       | 94  |
| 4.6.2 Temperatura Fixa no Interior do Produto..... | 96  |
| 5. Conclusões.....                                 | 99  |
| 6. Sugestões para Trabalhos Futuros.....           | 101 |
| 7. Referências Bibliográficas.....                 | 103 |
| Anexos.....                                        | 113 |
| Anexo I.....                                       | 114 |
| Anexo II.....                                      | 119 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                  | Páginas |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Figura 1: Disposição dos caquis durante a secagem                                                                                                                                                                                | 29      |
| Figura 2: Secador convectivo automatizado                                                                                                                                                                                        | 30      |
| Figura 3: Esquema de controle e tela de comandos do secador                                                                                                                                                                      | 32      |
| Figura 4: Encolhimento volumétrico ( $V/V_0$ ) de caqui versus conteúdo de umidade adimensional (b.s.) em função da temperatura fixa no ar de secagem ( $V_{ar} = 1,4$ m/s)                                                      | 39      |
| Figura 5: Encolhimento volumétrico ( $V/V_0$ ) de caqui versus conteúdo de umidade adimensional (b.s.) em função da velocidade do ar de secagem, para temperatura fixa no ar de $55^{\circ}\text{C}$                             | 40      |
| Figura 6: Encolhimento volumétrico ( $V/V_0$ ) de caqui versus conteúdo de umidade adimensional (b.s.) em função da temperatura fixa no interior do produto ( $V_{ar} = 1,4$ m/s)                                                | 42      |
| Figura 7: Encolhimento volumétrico ( $V/V_0$ ) de caqui versus conteúdo de umidade adimensional (b.s.) em função da velocidade do ar de secagem, para secagem com temperatura fixa no interior produto de $47,5^{\circ}\text{C}$ | 42      |
| Figura 8: Evolução da difusividade efetiva em função do conteúdo de umidade e da temperatura fixa no ar de secagem, considerando o encolhimento ( $V_{ar} = 1,4$ m/s)                                                            | 45      |
| Figura 9: Evolução da difusividade efetiva em função do conteúdo de umidade e da velocidade do ar de secagem considerando o encolhimento. Secagem com temperatura fixa do ar de $55^{\circ}\text{C}$                             | 45      |
| Figura 10: Conteúdo de umidade adimensional (b.s.) versus tempo em função da temperatura fixa do ar de secagem. ( $V_{ar} = 1,4$ m/s)                                                                                            | 46      |
| Figura 11: Conteúdo de umidade adimensional (base seca) versus tempo em função da velocidade do ar, para secagem com temperatura do ar fixa de $55^{\circ}\text{C}$                                                              | 47      |
| Figura 12: Difusividade efetiva constante em função da velocidade e da temperatura fixa do ar                                                                                                                                    | 49      |
| Figura 13: Evolução da difusividade efetiva em função do conteúdo de umidade e da temperatura fixa no interior do produto, considerando o encolhimento ( $V_{ar}=1,4$ m/s)                                                       | 51      |
| Figura 14: Evolução da difusividade efetiva em função do conteúdo de umidade e da velocidade do ar de secagem considerando o encolhimento, para secagem com temperatura fixa no interior do produto de $47,5^{\circ}\text{C}$    | 52      |

|            |                                                                                                                                                                                                                           |    |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 15: | Conteúdo de umidade adimensional (b.s.) versus tempo em função da temperatura fixa no interior do produto. ( $V_{ar}=1,4$ m/s)                                                                                            | 53 |
| Figura 16: | Conteúdo de umidade adimensional (b.s.) versus tempo em função da velocidade do ar de secagem, para secagem com temperatura fixa no interior do produto de $47,5^{\circ}\text{C}$                                         | 54 |
| Figura 17: | Difusividade efetiva constante em função da temperatura fixa do produto e da velocidade do ar                                                                                                                             | 55 |
| Figura 18: | Curvas de relaxação de caquis secos em função da temperatura fixa do ar e reidratados em $a_w = 0,432$ . As barras na vertical correspondem ao desvio padrão de cinco medidas. ( $V_{ar}=1,4$ m/s)                        | 61 |
| Figura 19: | Curvas de relaxação de caquis secos em função da velocidade e da temperatura fixa do ar e reidratados em $a_w = 0,751$ . As barras na vertical correspondem ao desvio padrão de cinco medidas                             | 62 |
| Figura 20: | Curvas de relaxação de caquis secos em função da atividade de água. Velocidade do ar de $1,4$ m/s e temperatura fixa do ar de $40^{\circ}\text{C}$ . As barras na vertical correspondem ao desvio padrão de cinco medidas | 63 |
| Figura 21: | Localização das amostras reidratadas armazenadas em temperatura ambiente em relação às temperaturas de transição vítrea de caquis liofilizados determinadas por Sobral et al. (2001)                                      | 65 |
| Figura 22: | Superfície de resposta obtida para o módulo de elasticidade de equilíbrio ( $E_e$ ) do modelo Maxwell generalizado como função da velocidade e da temperatura fixa no ar. Amostras reidratadas em $a_w = 0,625$           | 68 |
| Figura 23: | Superfície de resposta obtida para o tempo de relaxação ( $\lambda$ ) como função da velocidade e da temperatura fixa do ar. Amostras reidratadas em $a_w = 0,751$                                                        | 69 |
| Figura 24: | Histórico de temperaturas para temperatura fixa no interior do produto de $47,5^{\circ}\text{C}$ e velocidade do ar de $1,4$ m/s                                                                                          | 72 |
| Figura 25: | Curvas de relaxação de caquis secos em função da temperatura fixa no interior do produto e reidratados em $a_w = 0,576$ . As barras na vertical correspondem ao desvio padrão de cinco medições. ( $V_{ar} = 1,4$ m/s)    | 73 |
| Figura 26: | de temperaturas para secagem com a temperatura fixa no interior do produto de $52,8^{\circ}\text{C}$ e velocidade do ar de $1,8$ m/s                                                                                      | 74 |
| Figura 27: | Histórico de temperaturas para secagem com a temperatura fixa no interior do produto de $55^{\circ}\text{C}$ e velocidade do ar de $1,4$ m/s                                                                              | 75 |

|            |                                                                                                                                                                                                                                                                        |    |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 28: | Curvas de relaxação de caquis secos em função da temperatura fixa no interior do produto e da velocidade do ar, reidratados em $a_w = 0,751$ . As barras na vertical correspondem aos desvios padrão de cinco medidas                                                  | 76 |
| Figura 29: | Curvas de relaxação de caquis secos em função da atividade de água. Velocidade do ar de 1,4 m/s e temperatura fixa no interior do produto de 40 °C. As barras na vertical correspondem aos desvios padrão de cinco medidas                                             | 77 |
| Figura 30: | Superfície de resposta obtida para o módulo de elasticidade de equilíbrio ( $E_e$ ) do modelo de Maxwell generalizado como função da velocidade do ar e da temperatura fixa no interior do produto. Amostras reidratadas em $a_w = 0,625$                              | 79 |
| Figura 31: | Superfície de resposta obtida para o tempo de relaxação ( $\lambda$ ) em função da velocidade do ar e da temperatura fixa no interior do produto. Amostras reidratadas em $a_w = 0,432$                                                                                | 80 |
| Figura 32: | Conteúdo de vitamina C experimental de caquis “in natura”                                                                                                                                                                                                              | 81 |
| Figura 33: | Dados experimentais com temperatura fixa do ar de 40 °C e $V_{ar} = 1,4$ m/s. (a) concentração adimensional de vitamina C (b.s.) em função do tempo de secagem, (—) modelo WLF, SSQ=3,54. (b) históricos de temperatura e umidade (b.s.) do produto                    | 84 |
| Figura 34: | Dados experimentais com temperatura fixa do ar de 70 °C e $V_{ar} = 1,4$ m/s. (a) concentração adimensional de vitamina C (b.s.) em função do tempo de secagem, (—) modelo WLF, SSQ=1,63. (b) históricos de temperatura e umidade (b.s.) do produto                    | 85 |
| Figura 35: | Efeito da velocidade e da temperatura fixa no ar sobre a constante $C_1$                                                                                                                                                                                               | 88 |
| Figura 36: | Dados experimentais com temperatura fixa no interior do produto de 40 °C e $V_{ar} = 1,4$ m/s. (a) concentração adimensional de vitamina C (b.s.) em função do tempo de secagem, (—) modelo WLF, SSQ = 6,62. (b) históricos de temperatura e umidade (b.s.) do produto | 90 |
| Figura 37: | Dados experimentais com temperatura fixa no interior do produto de 52,8 °C e $V_{ar} = 1,0$ m/s. (a) concentração adimensional de vitamina C (b.s.) em função do tempo de secagem, (—) modelo WLF, SSQ=1,96. (b) históricos de temperatura e umidade (b.s.) do produto | 91 |
| Figura 38: | Efeito da velocidade do ar e da temperatura fixa no interior do produto sobre a constante $C_1$                                                                                                                                                                        | 93 |

|            |                                                                                                                                         |     |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 39: | Efeito da velocidade e da temperatura fixa no ar sobre a energia elétrica consumida                                                     | 95  |
| Figura 40: | Efeito da temperatura no interior do produto e da velocidade do ar sobre a energia elétrica consumida                                   | 98  |
| Figura 41: | Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no interior do produto de 40 °C e velocidade do ar de 1,4 m/s   | 114 |
| Figura 42: | Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no interior do produto de 42,1 °C e velocidade do ar de 1,0 m/s | 114 |
| Figura 43: | Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no interior do produto de 42,1 °C e velocidade do ar de 1,8m/s  | 115 |
| Figura 44: | Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no interior do produto de 47,5 °C e velocidade do ar de 0,8 m/s | 115 |
| Figura 45: | Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no interior do produto de 47,5 °C e velocidade do ar de 1,4 m/s | 116 |
| Figura 46: | Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no interior do produto de 47,5 °C e velocidade do ar de 2,0 m/s | 116 |
| Figura 47: | Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no interior do produto de 52,8 °C e velocidade do ar de 1,0 m/s | 117 |
| Figura 48: | Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no interior do produto de 52,8 °C e velocidade do ar de 1,8 m/s | 117 |
| Figura 49: | Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no interior do produto de 55 °C e velocidade do ar de 1,4 m/s   | 118 |
| Figura 50: | Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no ar de 40 °C e velocidade do ar de 1,4 m/s                    | 119 |
| Figura 51: | Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no ar de 44,3 °C e velocidade do ar de 1,0 m/s                  | 119 |
| Figura 52: | Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no ar de 44,3 °C e velocidade do ar de 1,8 m/s                  | 120 |

|            |                                                                                                                        |     |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 53: | Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no ar de 55 °C e velocidade do ar de 0,8 m/s   | 120 |
| Figura 54: | Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no ar de 55 °C e velocidade do ar de 1,4 m/s   | 121 |
| Figura 55: | Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no ar de 55 °C e velocidade do ar de 2,0 m/s   | 121 |
| Figura 56: | Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no ar de 40 °C e velocidade do ar de 1,4 m/s   | 122 |
| Figura 57: | Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no ar de 65,7 °C e velocidade do ar de 1,8 m/s | 122 |
| Figura 58: | Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no ar de 70 °C e velocidade do ar de 1,4 m/s   | 123 |



## LISTA DE TABELAS

|            |                                                                                                                                                                                                                      |    |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1:  | Planejamento fatorial $2^2$ com 4 pontos axiais e 2 pontos centrais ( $\alpha=1,41$ )                                                                                                                                | 33 |
| Tabela 2:  | Controle da temperatura fixa no ar de secagem                                                                                                                                                                        | 34 |
| Tabela 3:  | Controle da temperatura fixa no interior do produto                                                                                                                                                                  | 34 |
| Tabela 4:  | Difusividade efetiva constante para distintas condições com temperatura fixa do ar de secagem                                                                                                                        | 49 |
| Tabela 5:  | Difusividade efetiva constante para distintas condições com temperatura fixa no interior do produto                                                                                                                  | 55 |
| Tabela 6:  | Capacidade de reidratação em distintas condições de secagem e atividades de água para o controle da temperatura fixa no ar de secagem                                                                                | 56 |
| Tabela 7:  | Capacidade de reidratação em distintas condições de secagem e atividades de água para o controle da temperatura fixa no interior do produto                                                                          | 57 |
| Tabela 8:  | Parâmetros do modelo de Maxwell generalizado para caquis secos em diferentes condições de secagem para temperatura fixa do ar e reidratados em distintas atividades de água                                          | 60 |
| Tabela 9:  | Tempo de relaxação ( $\lambda$ ), medido como o tempo necessário para a tensão atingir 36,8% do correspondente valor inicial. Caquis secos com temperatura fixa no ar e reidratados em distintas atividades de água  | 66 |
| Tabela 10: | Parâmetros do modelo de Maxwell generalizado para caquis secos em diferentes condições de secagem para temperatura fixa no interior do produto e reidratados em distintas atividades de água                         | 70 |
| Tabela 11: | Tempo de relaxação ( $\lambda$ ), medido como o tempo necessário para dissipar a tensão em 36,8% do correspondente valor inicial, para secagem com temperatura fixa no interior do produto a diferentes reidratações | 78 |
| Tabela 12: | Valores das constantes do modelo WLF para o controle da temperatura fixa no ar de secagem                                                                                                                            | 86 |
| Tabela 13: | Valores da constante $C_1$ em função das condições de secagem com temperatura fixa no ar de secagem                                                                                                                  | 87 |
| Tabela 14: | Valores das constantes do modelo WLF para o controle da temperatura fixa no interior do produto                                                                                                                      | 92 |

|            |                                                                                                                          |    |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 15: | Valores da constante $C_1$ em função das condições operacionais para secagem com temperatura fixa no interior do produto | 93 |
| Tabela 16: | Consumo de energia em função das condições operacionais para secagem conduzida com a temperatura fixa no ar              | 95 |
| Tabela 17: | Consumo de energia em função das condições operacionais para secagem a temperatura fixa no interior do produto           | 97 |

## NOMENCLATURA

|                  |                                                             |                                               |
|------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| $\dot{m}$        | vazão mássica                                               | $\text{kg s}^{-1}$                            |
| $a_w$            | atividade de água                                           | adimensional                                  |
| $C$              | conteúdo de ácido ascórbico                                 | $\text{kg vit C (100 kg polpa)}^{-1}$         |
| $C_1$ e $C_2$    | constantes da Equação 18                                    | adimensional                                  |
| $C_o$            | conteúdo inicial de ácido ascórbico                         | $\text{kg vit C (100 kg polpa)}^{-1}$         |
| $C_{\text{par}}$ | calor específico do ar                                      | $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$              |
| $D_{\text{eff}}$ | difusividade efetiva                                        | $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$                    |
| $D_g$            | valor de $D_T$ na temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) | s                                             |
| $D_r$            | tempo de redução decimal na temperatura de referência       | s                                             |
| $D_T$            | tempo de redução decimal                                    | s                                             |
| $E$              | módulo de elasticidade                                      | Pa                                            |
| $E_1$ e $E_2$    | módulos de elasticidade de dois elementos de Maxwell        | Pa                                            |
| $E_a$            | energia de ativação                                         | $\text{J (kgmol)}^{-1}$                       |
| $E_e$            | módulo de elasticidade de equilíbrio                        | Pa                                            |
| $E_s$            | eficiência de secagem                                       | adimensional                                  |
| $h$              | coeficiente convectivo de transferência de calor            | $\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{K}^{-1}$ |
| $K$              | constante da Equação 11                                     | $\text{s}^{-1}$                               |
| $K_1$            | constante da Equação 5                                      | s                                             |
| $K_2$            | constante da Equação 5                                      | adimensional                                  |
| $K_o$            | constante da Equação 13                                     | $\text{s}^{-1}$                               |
| $M$              | umidade adimensional                                        | adimensional                                  |
| $N_a$            | fluxo mássico                                               | $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$              |
| $Q$              | energia térmica                                             | J                                             |
| $R$              | constante universal dos gases ideais                        | $\text{J kgmol}^{-1} \text{K}^{-1}$           |
| $r$              | raio da partícula                                           | m                                             |

|                      |                                    |                        |
|----------------------|------------------------------------|------------------------|
| $T$                  | temperatura                        | K                      |
| $t$                  | tempo                              | s                      |
| $T_{\text{amb}}$     | temperatura ambiente               | K                      |
| $T_{\text{ar}}$      | temperatura do ar de secagem       | K                      |
| $T_{\text{bs}}$      | temperatura de bulbo seco          | K                      |
| $T_{\text{g}}$       | temperatura de transição vítrea    | K                      |
| $T_{\text{produto}}$ | temperatura no interior do produto | K                      |
| $T_{\text{r}}$       | temperatura de referência          | K                      |
| $V_{\text{ar}}$      | velocidade do ar de secagem        | $\text{m s}^{-1}$      |
| $W$                  | energia elétrica                   | J                      |
| $X$                  | conteúdo de umidade absoluta       | kg água / kg mat. seca |
| $X_0$                | conteúdo de umidade inicial        | kg água / kg mat. seca |
| $X_{\text{eq}}$      | conteúdo de umidade de equilíbrio  | kg água / kg mat. seca |
| $z$                  | temperatura de redução decimal     | $^{\circ}\text{C}$     |

### Letras Gregas

|                           |                                                 |                    |
|---------------------------|-------------------------------------------------|--------------------|
| $\dot{\varepsilon}$       | taxa de deformação                              | $\text{s}^{-1}$    |
| $\eta_e$                  | eficiência eletro-térmica                       | adimensional       |
| $\varepsilon$             | deformação                                      | adimensional       |
| $\lambda$                 | tempo de relaxação                              | s                  |
| $\sigma$                  | tensão                                          | Pa                 |
| $\eta$                    | viscosidade aparente                            | $\text{Pa s}^{-1}$ |
| $\sigma_0$                | tensão inicial                                  | Pa                 |
| $\lambda_1$ e $\lambda_2$ | tempo de relaxação de dois elementos de Maxwell | s                  |
| $\sigma_e$                | tensão de equilíbrio                            | Pa                 |
| $\lambda_L$               | calor latente de vaporização da água            | $\text{J kg}^{-1}$ |

## RESUMO

Visando compreender a influência das condições de secagem sobre a qualidade do caqui seco e sobre o consumo energético, investigou-se a viabilidade de um controle de processo baseado na temperatura fixa no interior do produto, comparando-o com o processo convencional que utiliza a temperatura fixa no ar de secagem. Os resultados foram avaliados para diferentes temperaturas e velocidades do ar seguindo um planejamento fatorial  $2^2$  com 4 pontos axiais e 2 centrais. O encolhimento em função do conteúdo de umidade apresentou uma relação linear e foi essencialmente independente das velocidades do ar e das temperaturas, inclusive do tipo de controle de processo adotado. As curvas de secagem puderam ser adequadamente descritas pela solução analítica da segunda Lei de Fick considerando o encolhimento e a difusividade efetiva como função do conteúdo de umidade. Os índices de reidratação do produto seco foram similares entre os controles com a temperatura fixa no ar e no interior do fruto. As propriedades viscoelásticas do caqui seco e reidratado em diferentes atividades de água foram determinadas pelo ajuste do modelo de Maxwell generalizado às curvas de relaxação e, de um modo geral, os parâmetros tempo de relaxação e tensão de equilíbrio aumentaram com o aumento das temperaturas de secagem e velocidade do ar, bem como para atividades de água mais baixas. Apesar da dispersão dos dados experimentais do conteúdo de vitamina C devido à heterogeneidade das amostras, um modelo baseado na cinética WLF (Williams-Landel-Ferry), que correlaciona a temperatura de transição vítrea como indicador da mobilidade molecular, foi ajustado com sucesso às curvas de degradação do nutriente em função do tempo de secagem. Apenas o efeito linear da velocidade do ar foi significativo sobre o consumo energético da secagem, levando a concluir que a secagem de caqui conduzida com menor velocidade do ar requer menos energia, sem interferir na qualidade da fruta seca, uma vez que nos testes de qualidade, esta variável não apresentou efeito significativo.

Palavras-chave: caqui, secagem convectiva, qualidade, controle automático e consumo energético.



## ABSTRACT

Aiming to understand the effect of drying conditions on the quality of dried persimmon as well as on the energetic consumption, this work investigated the viability of a process control strategy based on fixed temperature inside the product, which was compared with the conventional process that uses fixed air temperature. In order to evaluate the effect of air velocity and drying temperatures, a second order central composite rotatable design combined with response surface methodology was applied. Product shrinkage presented a linear relation with moisture content and was essentially independent of drying conditions, including the control strategy adopted. Drying curves could be adequately described by the analytic solution of the second Fick's Law considering shrinkage and effective diffusivity as function of the moisture content. The rehydration indexes of the dried product were similar for control with fixed air temperature and with fixed temperature inside fruit. The viscoelastic properties of dried persimmon rehydrated at different water activities were satisfactorily determined by adjusting the generalized Maxwell model to the relaxation curves and, as a general rule, the relaxation time and equilibrium stress parameters increased with increasing drying temperatures and air velocity, as well as with decreasing water activities. Only the linear effect of the temperature, in both control strategies, was significant ( $p < 0.05$ ) on the viscoelastic parameters. In spite of the high dispersion of experimental data of vitamin C content due to heterogeneity of samples, a model based on the WLF (Williams-Landel-Ferry) kinetics, which uses the glass transition temperature as an indicator of the molecular mobility, could be successfully fitted to experimental curves of the nutrient degradation in function of drying time. The effect of air velocity was significant only to the energetic consumption, leading to the conclusion that the drying processes of persimmon carried out with low air velocity require less energy, without affecting quality of the dried fruit, since quality parameters were not significantly influenced by this variable.

Key words: persimmon, convective drying, quality, automatic control, and energetic consumption.



## Introdução

### **1. INTRODUÇÃO**

A desidratação é, provavelmente, o método mais antigo de preservação dos alimentos. A secagem de frutas ao sol e a defumação de peixes e carne são processos bem conhecidos cuja origem remonta à antiguidade. No entanto, a secagem de produtos alimentícios não é aplicada de forma tão extensiva quanto poderia, por uma série de razões. Dentre as principais destacam-se os prejuízos causados pelo processo às características sensoriais do produto.

Um alimento desidratado possibilita a redução de custos de embalagem, transporte e armazenamento, porém tais vantagens costumam ser acompanhadas da redução de sua qualidade, uma vez que a maioria das técnicas convencionais de secagem emprega altas temperaturas durante o processo (COHEN e YANG, 1995).

Tendo em vista que os consumidores vêm tornando-se cada vez mais exigentes em relação à qualidade, buscando produtos de conveniência, que tragam facilidades no manuseio e preparo, e com pequena ou nenhuma perda de atributos sensoriais, há uma grande demanda por operações que minimizem os efeitos adversos da desidratação, reduzindo a perda de aromas, as alterações de cor e textura e a perda de nutrientes.

Nesse contexto, um número considerável de métodos alternativos de desidratação vem sendo objeto de pesquisas, principalmente aqueles que utilizam temperaturas mais baixas e/ou menores tempos de secagem. Entre estes podem ser citados a desidratação osmótica, a secagem por bomba de calor, entre outros. Existe também uma grande quantidade de trabalhos que procura investigar as relações existentes entre as condições de secagem e as modificações físicas e químicas do produto.

## Introdução

O processo convencional de secagem por ar quente, em secadores do tipo bandejas, túnel ou esteira, ainda é muito difundido para a secagem de alimentos sólidos, devido a sua simplicidade e flexibilidade. Sabe-se que, nesses tipos de equipamentos, o período final do processo é especialmente importante. Isso porque, nessa fase, as partes externas do material já estão secas e sua temperatura, que no início do processo era aproximadamente igual à temperatura de bulbo úmido do ar de secagem, sofre uma elevação, tendendo a igualar-se à temperatura de bulbo seco do ar. Dessa maneira, os atributos físicos, sensoriais e nutricionais do produto podem ser prejudicados. Uma forma de contornar esse problema seria controlar o processo utilizando como variável de processo a temperatura no interior do produto. Assim, no início da secagem, quando a umidade do sólido é alta, a temperatura do ar pode ser elevada, sendo gradualmente reduzida à medida em que a umidade da fruta decresce. Isto faz com que diminua o risco de danos provocados pela exposição a altas temperaturas e que o produto permaneça o menor tempo possível no secador, o que é desejável tanto sob o aspecto de sua qualidade quanto sob considerações de custo do processo. Entretanto, deve-se ter certo respaldo quanto à temperatura inicial do ar de secagem, sendo que temperaturas muito elevadas poderão conduzir à impermeabilização da superfície do material pela formação de crosta e comprometer a transferência de água nas etapas seguintes de secagem.

As propriedades funcionais dos alimentos têm despertado grande interesse, que além da nutrição básica, trazem benefícios à saúde, à capacidade física e ao estado mental. Os principais pigmentos que dão a coloração vermelho-alaranjada ao caqui são compostos fenólicos com elevada atividade antioxidante. A fruta apresenta alto conteúdo de ácido ascórbico que potencializa a ação antioxidativa no organismo quando consumida e, os

## Introdução

minerais presentes como cálcio, selênio, magnésio, manganês, ferro entre outros também caracterizam o caqui como um alimento funcional (USDA, 2004).

Existem mais de 400 espécies de caqui que variam principalmente em cor e forma. A fruta, em seu estágio de maturação completo, é de uma tonalidade cintilante entre laranja e vermelha e sua polpa é apreciada por ser muito doce e succulenta. No Brasil são consideradas comercialmente as variedades Rama Forte, Taubaté, Giombo e Fuyu. A colheita dos frutos se estende de janeiro a junho. A sazonalidade de produção, por si só, justifica a necessidade de se industrializar parte da colheita, principalmente a produção excedente – uma maneira de evitar desperdícios e obter produto de maior valor agregado.

Com base nas considerações acima, pretendeu-se estudar a secagem de caqui, selecionando e controlando as condições de secagem mais adequadas à obtenção de um produto aceitável para o consumo, tomando como parâmetro a qualidade do produto seco – textura, encolhimento, reidratação e vitamina C – e o consumo energético. Foram investigadas duas estratégias de controle. Primeiramente avaliando o processo convencional que se baseia no controle da temperatura fixa no ar de secagem, e em seguida, empregando o controle da temperatura fixa no interior do produto.



## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

As frutas e hortaliças desempenham um importante papel na dieta humana, uma vez que são fontes indispensáveis de nutrientes essenciais como vitaminas, minerais e fibras, além de serem responsáveis pela introdução de cor, sabor, aroma e variedade ao rol de alimentos disponíveis. Entretanto, devido ao seu alto teor de água (acima de 80%) são altamente perecíveis. Estima-se que em muitos países tropicais e subtropicais ocorram perdas da ordem de 30 - 40%, devido à inadequação da infra-estrutura de transporte, armazenamento e processamento pós-colheita (COELHO et al., 2000).

Um dos principais objetivos da tecnologia de alimentos é a conversão de itens perecíveis em produtos estáveis, reduzindo perdas e tornando-os disponíveis na entressafra e/ou em lugares distantes dos pontos de produção. A desidratação é especialmente adequada aos países em desenvolvimento, em razão de deficiências na capacidade e distribuição das instalações de processamento térmico ou de baixa temperatura. O interesse pela desidratação tem aumentado também em países desenvolvidos, onde as indústrias são motivadas pelo desenvolvimento de novos métodos de secagem de frutas e hortaliças que resultem em produtos com características especiais, de reconstituição instantânea, muito valorizados em alimentos de preparo rápido. Nesses países, e mesmo nas grandes cidades e regiões mais desenvolvidas do terceiro mundo, a mudança no estilo de vida da população aumentou a demanda por uma grande variedade de frutas e hortaliças desidratadas que ofereçam conveniência, alta qualidade sensorial e nutricional, implicando na necessidade de pesquisa básica sobre a influência das condições de secagem (temperatura, velocidade e

## Revisão Bibliográfica

midade do ar) e da configuração do equipamento na qualidade do alimento (JAYRAMAN e DAS GUPTA, 1992).

### **2.1 CAQUI**

O caqui é originário da Ásia, mais provavelmente da China, porém seu cultivo é mais extensivo no Japão, onde o consumo do caqui seco já é uma tradição. Dados agrícolas de 2002 consideram que a produção brasileira foi de 83 toneladas da fruta, e indicadores apontam que o estado de São Paulo foi responsável por mais de 50% da produção nacional (IEA, 2004). A expansão da cultura no estado de São Paulo ocorreu a partir de 1920 com a chegada dos imigrantes japoneses, que trouxeram novas variedades e o domínio da produção.

O caquizeiro é uma planta perene, de porte arbóreo, que começa a produzir com 4 anos e dura dezenas de anos. A fruta verde é rica em tanino - responsável pela adstringência - mas quando madura não apresenta acidez e é muito doce. É rica em vitamina C, cujo teor é o dobro da laranja (70 mg / 100 g de polpa) e vitamina A (65 mg / 100 g de polpa), além de cálcio (9 mg / 100 g da polpa) e ferro (0,2 mg / 100 g da polpa) (CAQUIS SUYNAN, 2001).

As temperaturas de operação empregadas durante o processo de secagem de caqui conduzem à degradação de tanino, enquanto os açúcares presentes na fruta esxudam para a superfície, onde cristalizam. O resultado é um produto doce e sem adstringência (MARDER e SCHOEMAKER, 1995). GORINSTEIN et al. (2000) estudaram o efeito antioxidante do caqui associado ao seu alto conteúdo de polifenóis, confirmando que

## Revisão Bibliográfica

atividade antioxidante do caqui está associada aos seus compostos fenólicos e não às fibras solúveis. É interessante ressaltar que este estudo foi baseado na ingestão da fruta seca.

Algumas investigações sobre a qualidade de caquis secos em secador solar são encontradas no trabalho de CHAUDRY et al. (1998) que, durante a estocagem de seis meses do produto seco, obtiveram dados da redução de vitamina C de 121 para 105,5 mg /100g e da degradação dos compostos fenólicos presente na fruta. TAIRA et al. (1988), no estudo da remoção da adstringência do caqui, avaliaram o fruto em 3 níveis diferentes de maturação (totalmente verde, 50% vermelho e 100% vermelho). Concluíram que a taxa de degradação de tanino, responsável pela adstringência do produto, é maior quanto mais verde é o fruto. Ainda pode-se citar outros autores que empregaram a secagem solar como KOMIYAMA e TSUJI (1987), TSUJI e KOMIYAMA (1988) e ISHII e YAMANISHI (1982).

Outras publicações a respeito de caqui são disponíveis, entre elas, TELIS et al. (2000) determinaram as isotermas e o calor isostérico de sorção da polpa e da casca de caqui, enquanto SOBRAL et al. (2001) apresentaram o diagrama de fases e transição vítrea de caqui liofilizado.

## **2.2 FUNDAMENTOS DA SECAGEM**

A técnica mais utilizada na produção de frutas e hortaliças desidratadas é a secagem por ar quente, onde uma batelada do material a ser seco, usualmente na forma de pequenos pedaços ou fatias, é submetida a uma corrente de ar quente paralela ou perpendicular ao leito de sólidos (NIJHUIS et al., 1996).

## Revisão Bibliográfica

A desidratação é uma operação unitária que envolve as transferências simultâneas de calor e massa. A transferência de calor, necessária para evaporação da umidade, é geralmente baseada no mecanismo de convecção. Quanto à transferência de massa, existem dois aspectos importantes a ser considerados: o transporte da água no interior do sólido a ser seco até a superfície e a remoção do vapor a partir da mesma. O processo pode ser representado por três fases distintas:

1ª Fase - Aquecimento do material até a temperatura de secagem: a elevação da temperatura causa um rápido aumento na taxa de secagem.

2ª Fase - Período de taxa constante: a velocidade de transferência de massa no interior do sólido poroso é igual à velocidade de evaporação da água na superfície do mesmo.

3ª Fase - Período de taxa decrescente: a velocidade de transferência de massa no interior do sólido é menor que a taxa de evaporação na superfície; ocorre a elevação da temperatura do produto.

No período de secagem a taxa constante, a água evapora de acordo com o fornecimento de calor para o sólido úmido e, portanto, a transferência de calor gás-sólido controla o processo. Como todo calor transferido é convertido em calor latente, pode-se representar a taxa de secagem da seguinte forma:

$$Na = \frac{h(T_{ar} - T_{bu})}{\lambda_L} \quad (1)$$

onde Na é o fluxo mássico, h é o coeficiente de transferência de calor,  $T_{ar}$  é a temperatura do ar,  $T_{bu}$  é a temperatura de bulbo úmido do ar e  $\lambda_L$  é o calor latente de vaporização da água a  $T_{bu}$ .

## Revisão Bibliográfica

Segundo CHIRIFE (1983), o fim do período de taxa constante corresponde ao instante em que a migração interna de água para a superfície não consegue mais compensar a taxa de evaporação da água livre da mesma.

Na secagem de frutas e hortaliças, o período de taxa decrescente é especialmente importante. Nessa fase as partes externas do material já estão secas, enquanto o interior ainda pode conter quantidades significativas de água. A partir desse ponto, o processo consome grandes quantidades de energia e os atributos físicos, sensoriais e nutricionais do produto podem ser prejudicados, devido à elevação da temperatura (NIJHUIS et al., 1996).

É nessa fase que reside a principal vantagem de uma estratégia de controle diferenciada para o processo, possibilitando o controle da temperatura do produto, ao invés da temperatura do ar, e prevenindo a degradação da qualidade de produtos termosensíveis, como é o caso de frutas, hortaliças e ervas aromáticas.

No estudo da secagem, depois da obtenção das curvas e da caracterização dos períodos de secagem, é interessante descrever o processo matematicamente, de forma que as equações obtidas possam ser utilizadas no próprio estudo da cinética de secagem ou em projetos de secadores. Para descrever o processo de secagem no período de taxa decrescente, utilizam-se o modelo teórico baseado na segunda lei de Fick, modelo semi-teórico que estabelece que a taxa de secagem é proporcional ao teor de água livre (PARRY, 1985) e modelo empírico também conhecido como equação de Page. Esses modelos são geralmente baseados no fenômeno de transferência de massa, negligenciando-se o efeito de transferência de calor.

## Revisão Bibliográfica

O modelo teórico utilizado para interpretar a secagem de alimentos e de produtos agrícolas é a teoria da difusão da água como líquido ou vapor, representada pela segunda lei de Fick (Crank, 1975):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla(D_{\text{eff}} \nabla X) \quad (2)$$

onde  $X$  é a umidade em base seca,  $t$  é o tempo e  $D_{\text{eff}}$  é a difusividade efetiva. Como o fenômeno de migração é complexo, trabalha-se com a difusividade efetiva, que engloba todos os efeitos que podem intervir nesse fenômeno. As soluções analíticas da Eq. (2) aplicam-se aos sólidos de geometria simples e constante ao longo do processo.

Considerando-se que o sólido seja uma esfera, de difusividade constante, variação do volume desprezível e que o efeito do gradiente de temperatura no interior da amostra também seja desprezível, tem-se a seguinte solução analítica:

$$M = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left[-n^2 \frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{r^2}\right] \quad (3)$$

onde  $M$  é a umidade adimensional  $(X - X_{\text{eq}})/(X_0 - X_{\text{eq}})$ ,  $X$  é a umidade da partícula em base seca,  $X_{\text{eq}}$  é a umidade de equilíbrio em base seca,  $X_0$  é a umidade inicial em base seca,  $D_{\text{eff}}$  é a difusividade efetiva,  $t$  é o tempo e  $r$  é raio da amostra.

A maioria dos cereais (arroz, trigo, feijão, soja, etc.) apresenta uma pequena mudança de volume durante a secagem. Desta maneira, a solução analítica pode ser aplicada satisfatoriamente no estudo destes materiais. Para alimentos de alto conteúdo de umidade como a maioria das frutas (uva, caqui, abacaxi, maçã, etc.) a variação de volume é

## Revisão Bibliográfica

grande e, por esta razão, as soluções analíticas não podem ser aplicadas de forma exata e devem ser consideradas como aproximações da solução real.

Para HOLDSWORTH (1971), os principais fatores que afetam a taxa de secagem são as propriedades físicas do produto, o arranjo geométrico do produto em relação à superfície de transferência de calor, as propriedades físicas do ambiente de secagem e a característica do equipamento. Segundo VAN ARSDEL et al. (1973), dos fatores citados, o que mais influencia é a natureza da matéria prima, devido à constituição química e física das paredes celulares. VACCAREZZA et al. (1974), ao estudarem a secagem de beterraba, concluíram que a taxa de secagem é afetada principalmente pela temperatura e tamanho da partícula e, em menor grau, pela velocidade do ar.

NICOLETI et al. (2001a) encontraram que a temperatura tem maior influência sobre a cinética de secagem de fatias de abacaxi, embora a mudança da velocidade do ar de 1,8 para 2,5 m/s também tenha aumentado a taxa de secagem. No mesmo trabalho, verificaram que a fixação da temperatura no interior das fatias de abacaxi (35, 40 e 45°C) também possibilitou a redução do tempo de secagem em comparação com o processo convencional que emprega a temperatura fixa do ar de secagem, que no caso foram fixadas entre 40 °C e 70 °C.

SUAREZ e VIOLLAZ (1991), analisando a secagem de batatas, compararam o uso da solução analítica da segunda lei de Fick, primeiro considerando a difusividade efetiva constante e o encolhimento desprezível, e segundo, assumindo o encolhimento e a difusividade efetiva em função do conteúdo de umidade. Os resultados encontrados foram bem distintos, sendo que considerando o encolhimento e o coeficiente de difusão como

## Revisão Bibliográfica

função da umidade, obteve-se ajustes mais próximos do real, ou seja, os dados experimentais foram adequadamente representados. RAGHAVAN et Al. (1995) propuseram um método baseado na solução analítica da segunda lei de Fick para avaliar a difusividade efetiva em função do conteúdo de umidade em materiais agrícolas, considerando-se ainda, o encolhimento durante o processo de secagem. No processamento de uvas passas, AZZOUS et al. (2002) ao considerarem o coeficiente de difusão dependente do conteúdo de umidade, concluíram que as primeiras etapas do processo de secagem conduz em uma elevação da difusividade efetiva até um valor máximo, e então, decresce com o avanço da secagem até o final do processo. Os mesmos resultados são descritos por RAGHAVAN (1994), SARAVACOS e RAOUZEOS (1996).

Visando a maior retenção da qualidade e redução do consumo de energia, a secagem “stepwise”, que consiste na variação da temperatura do ar de secagem de maneira progressiva ou regressiva, tem sido proposta por alguns autores. Na secagem de cenouras, PAN et al. (1999) verificaram que a umidade das partes centrais do produto é redistribuída para a superfície, evitando assim, um aumento excessivo da temperatura superficial do produto. A redução significativa do tempo de secagem e o grau de coloração menos danificado foram umas das vantagens descritas por CHUA et al. (2002) na secagem “stepwise” de bananas e goiabas.

## **2.3 ENCOLHIMENTO**

A simulação e modelagem matemática são freqüentemente utilizadas para otimizar os parâmetros de secagem. Estes modelos matemáticos requerem valores de propriedades físicas, tais como densidade, porosidade e encolhimento volumétrico. Entretanto, estes

## Revisão Bibliográfica

dados são escassos na literatura e os pesquisadores são obrigados a usar suposições que levam a falhas ou imprecisão em seus estudos de simulação.

VAGENAS et al. (1990), ao estudarem a secagem de alimentos, verificaram que dentre as dificuldades ou problemas encontrados durante a secagem, tem-se a complexidade da composição e estrutura do alimento e mais especificamente:

- os coeficientes de transferência de calor e massa e as propriedades termodinâmicas do alimento variam com a temperatura e umidade, de forma que a equação diferencial resultante torna-se não linear e somente pode ser resolvida por métodos numéricos;
- o alimento encolhe consideravelmente, o que afeta a taxa de secagem.

Dessa forma, o estudo do encolhimento é de grande importância para um melhor entendimento do processo de secagem, além de ser considerado como um indicativo da qualidade do produto desidratado, uma vez que está diretamente relacionado à capacidade de reidratação do mesmo (NIJHUIS et al., 1996).

Na maioria dos modelos matemáticos para secagem de grãos, o efeito das mudanças na densidade, porosidade e encolhimento não são considerados. Esta suposição é feita por conveniência matemática, mas não é necessariamente válida para toda faixa de umidade. Por outro lado, na secagem de frutas e vegetais o encolhimento deve ser considerado, pois há uma mudança perceptível no volume durante o processo. Alguns pesquisadores têm admitido que o decréscimo do volume durante a secagem seja equivalente ao volume removido de água (LOZANO et al., 1983).

## Revisão Bibliográfica

Durante a secagem de cenouras, HATAMIPOUR e MOWLA (2002) observaram que o encolhimento do produto foi independente das temperaturas do ar de secagem e apresentou comportamento linear sobre toda extensão de umidade alcançada durante a secagem. O mesmo perfil linear do encolhimento com o conteúdo de umidade foi observado na produção de uvas passas (GABAS et al.,1999; RAGHAVAN et al.,1995; AZZOUS et al.,2002b), na secagem de peras e cenouras (LOZZANO et al.,1983) e de ameixas (GABAS et al., 2003a). A secagem de alho foi investigada por MADAMBA et al. (1994), que obtiveram uma relação linear do encolhimento volumétrico com o conteúdo de umidade até o produto atingir 20 % de umidade em base seca, enquanto LOZANO et al. (1983) acrescentaram um fator de correção para baixos níveis de umidade. No final do processo de secagem, para conteúdos de umidade inferiores a 20 %, muitos produtos alimentícios tendem a ter seu volume estabilizado, o que se atribuiu a um acentuado aumento na rigidez do material, dificultando assim, uma posterior deformação do produto. RATTI (1994) estudou o encolhimento de batatas, maçãs e cenouras com diferentes geometrias, descrevendo um modelo representado por uma ou duas retas.

NICOLETI et al. (2001b) observaram uma interação entre os efeitos da velocidade e da temperatura do ar de secagem sobre o encolhimento. Para um mesmo conteúdo de umidade, em velocidades altas o encolhimento foi independente da temperatura, enquanto que para velocidades baixas o encolhimento foi maior à medida que decresceu a temperatura de secagem.

## **2.4 REIDRATAÇÃO**

A reidratação de um produto seco caracteriza a qualidade do produto final, e os índices de reidratação indicam os danos provocados ao alimento pela exposição ao calor excessivo (GABAS et al., 1999). Pode ser expressa de várias maneiras e, freqüentemente, um mesmo índice recebe nomes diferentes, de acordo com os autores (LEWICKI, 1998). O índice mais comum para expressar a reidratação dos tecidos vegetais é a razão:

$$\frac{\text{Peso da amostra após a reidratação}}{\text{Peso antes da reidratação}} \quad (4)$$

Este índice é chamado de relação de reidratação (KALRA et al., 1986), capacidade de reidratação (LEVI et al., 1988) ou coeficiente de hidratação (OGWAI e DAVIS, 1994).

Devido ao encolhimento e ao endurecimento (formação de crosta), a reidratação de produtos secos por ar quente é dificultada (NIJHUIS et al., 1996). Pesquisadores tentam controlar este efeito adverso alterando as condições de processamento ou associando pré-tratamentos como branqueamento ou imersão do produto em soluções osmóticas antes da secagem.

ALVES-FILHO e STROMMEN (1996), ao estudarem a aplicação de bomba de calor associada à liofilização de materiais biológicos, reidrataram maçãs, morangos e peixes comparando o tempo de imersão do produto seco, temperatura da água de reidratação (10 e 99 °C), temperatura do ar de secagem (-5 a 40 °C para peixes e -25 a 35 °C para as frutas), forma e tamanho das amostras. Obtiveram maior porcentagem de reidratação para maiores tempos de imersão e temperaturas de secagem mais baixas. Observaram ainda, que a taxa de reidratação dos peixes secos a -5 °C aumentou quando a

## Revisão Bibliográfica

amostra foi reidratada em água a 10 °C e, para os peixes secos a temperatura maior (30 °C), a taxa se inverteu, e os maiores valores foram alcançados para a reidratação conduzida a 99 °C.

GABAS et al. (1999) obtiveram resultados para a reidratação de uvas secas analisando a relação de reidratação em função da temperatura do ar entre 40 e 80 °C e das condições de pré-tratamento químico. Os maiores índices de reidratação foram alcançados para amostras secas em temperaturas do ar mais altas, com exceção dos testes realizados com pré-tratamento de maior concentração, no qual as uvas secas a 60 °C tiveram a melhor capacidade de reidratação.

TABEIDIE et al. (1992) verificaram que, no processo de expansão (“puffing”), a 25 °C, de pedaços de batata com CO<sub>2</sub>, o conteúdo de umidade das amostras secas tem efeito significativo na taxa de reidratação do produto, sendo que a taxa de reidratação é proporcional à umidade final. Também constataram que o branqueamento e pré-tratamento químico do produto aumentam a taxa de reidratação. Considerando o mesmo processo, nas temperaturas de 19 a 35 °C para pimentões verdes, SAPUTRA et al. (1991) estabeleceram como variáveis do índice de reidratação, o tamanho da partícula, o conteúdo de umidade final do produto e o tempo de residência das amostras no secador. Concluíram que os índices de reidratação maiores são verificados para materiais de menor tamanho, conteúdo de umidade alto e tempos de secagem mais longos.

## **2.5 PROPRIEDADES REOLÓGICAS**

Os hábitos alimentares dos consumidores vêm tornando-se cada vez mais sofisticados e a importância da textura como um atributo da qualidade é essencial. Os testes

## Revisão Bibliográfica

reológicos são importantes na obtenção de parâmetros de projeto de equipamentos, na compreensão da estrutura de produtos alimentícios e como indicativo de sua qualidade (BAGLEY e CHRISTIANSON, 1987).

A reologia é a ciência que estuda o escoamento e a deformação dos corpos quando submetidos à ação de uma força externa. Não se conhece nenhum alimento que se comporta como um sólido ideal. Todos mostram um comportamento viscoelástico na sua resposta mecânica, isto é, além da característica de um sólido ideal, cujo comportamento se define como puramente elástico, há a presença de uma parcela viscosa caracterizada pela dissipação da energia armazenada (VLIET, 1999).

A aplicação de forças externas, na maioria dos materiais, provoca diferentes tipos de tensões internas e em várias direções, e descrever o comportamento reológico real do corpo através de modelos matemáticos torna-se tão complexo que somente por meio de certas considerações ou restrições pode-se obter respostas sobre a característica viscoelástica. Para pequenas deformações, os alimentos se comportam segundo a teoria da viscoelasticidade linear, e para este caso, a deformação é função apenas do tempo (SHOEMAKER e FIGONI, 1984). Porém, o comportamento geral dos materiais, além de variar com o tempo, varia com a magnitude da força aplicada, caracterizando assim, comportamento viscoelástico não linear. Segundo KARATHANOS et al. (1994), não existe uma teoria geral que defina este comportamento não linear e, para caracterizar a resposta reológica dos alimentos sólidos, estudam-se estes em condições experimentais que permitam a aplicação das bases teóricas que definem o fenômeno de viscoelasticidade linear.

## Revisão Bibliográfica

Testes de compressão-relaxação têm sido empregados com sucesso para descrever o comportamento reológico de alimentos secos, sendo que a qualidade da textura do produto final depende, em grande parte, de sua resposta frente à aplicação das forças externas. Neste tipo de teste, o material é submetido repentinamente a uma dada deformação ( $\epsilon$ ) e, em seguida, determina-se a tensão necessária para mantê-la constante ao longo do tempo.

Os modelos reológicos para descrever o comportamento viscoelástico do material submetidos aos testes de compressão-relaxação, geralmente são baseados no modelo de Peleg e Normand (GABAS et al., 2002; ERRINGTON et al., 1997; LEWICKI e WOLF, 1995; GAMERO et al., 1993), e no modelo generalizado de Maxwell (GABAS et al., 2002; KROKIDA et al., 1998; GAMERO et al., 1993; PAPPAS e RAO, 1989)

No modelo normalizado de Peleg & Normand, as curvas de relaxação são ajustadas com a equação linearizada descrita pela equação 5 (STEFFE, 1996):

$$\frac{\sigma_0 t}{\sigma_0 - \sigma(t)} = k_1 + k_2 t \quad (5)$$

onde  $\sigma(t)$  é a tensão em função do tempo,  $\sigma_0$  a tensão inicial,  $t$  o tempo e  $k_1$  e  $k_2$  parâmetros de ajuste.

O modelo de Maxwell (eq. 6) é representado por uma parcela Hookeana ( $\sigma = E\epsilon$ ), caracterizada pelo módulo de elasticidade  $E$ , em série com uma parcela viscosa, representada pela viscosidade  $\eta$  de um fluido Newtoniano ( $\sigma = \eta \dot{\epsilon}$ ), onde  $\dot{\epsilon}$  é a taxa de deformação.

$$\sigma(t) = \sigma_0 \exp\left(\frac{-t}{\lambda}\right) \quad (6)$$

## Revisão Bibliográfica

Na equação (6),  $\sigma(t)$  é a tensão em função do tempo,  $\sigma_0$  tensão inicial e  $\lambda$  tempo de relaxação, definido como o quociente entre a viscosidade  $\eta$  e o módulo de elasticidade  $E$ , de acordo com a equação (7) (MOHSENIN,1986).

$$\lambda = \frac{\eta}{E} \quad (7)$$

Segundo VLIET (1999), o tempo de relaxação representa o tempo necessário para que a tensão seja reduzida a 36,8% da tensão inicial correspondente.

O modelo de Maxwell não representa as curvas de relaxação de muitos materiais viscoelásticos por não considerar a tensão de equilíbrio,  $\sigma_e$ . Este problema pode ser contornado construindo um modelo que tem um elemento de Maxwell conectado em paralelo com um elemento elástico. A equação que descreve este modelo é representada pela equação (8):

$$\sigma(t) = \sigma_e + (\sigma_0 - \sigma_e) \exp\left(\frac{-t}{\lambda}\right) \quad (8)$$

onde  $\sigma_e = \epsilon E_e$  e o parâmetro  $E_e$  representa o módulo de elasticidade de equilíbrio.

Uma forma alternativa para a equação (8) é obtida considerando que para  $t = 0$ ,  $\sigma_0 = \epsilon E_0$ , podendo ser representada pela equação (9).

$$\sigma(t) = \epsilon \left[ E_e + (E_0 - E_e) \exp\left(\frac{-t}{\lambda}\right) \right] \quad (9)$$

Para descrever o comportamento viscoelástico de muitos alimentos, há necessidade de equações mais complexas que podem ser obtidas por um modelo generalizado de Maxwell que consiste em vários elementos de Maxwell em paralelo. Em

## Revisão Bibliográfica

um sistema com três elementos - dois elementos de Maxwell e um elemento elástico - a tensão pode ser determinada pela equação (10):

$$\sigma(t) = \varepsilon \left[ E_e + (E_1 - E_e) \exp\left(\frac{-t}{\lambda_1}\right) + (E_2 - E_e) \exp\left(\frac{-t}{\lambda_2}\right) \right] \quad (10)$$

onde  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  são os tempos de relaxação e  $E_1$  e  $E_2$  os módulos de elasticidade do componente elástico de dois elementos de Maxwell (MOHSENIN, 1986; STEFFE, 1996).

No estudo do comportamento viscoelástico de batatas e cenouras secas a 70 °C, conduzido por KROKIDA et al. (1998), os testes de compressão-relaxação foram realizados em amostras cilíndricas com diferentes umidades e taxas de deformação que variaram entre 5 e 20 cm/min. O modelo para descrever o comportamento reológico foi o de Maxwell considerado-se os três elementos – dois de Maxwell e um elástico. Os resultados indicaram que os tempos de relaxação são independentes da taxa de deformação, mas dependentes da umidade. Os mesmos autores concluíram que dois distintos comportamentos viscoelásticos coexistem, um a conteúdos de umidade altos (1,66 a 9,13 kg água /kg matéria seca), no qual o material perde sua elasticidade, conforme a água é removida, e outro a baixos conteúdos de umidade (0,20 a 1,66 kg água / kg matéria seca), em que o material recupera sua elasticidade.

De acordo com LEWICKI e WOLF (1995), as propriedades reológicas de uvas passas são fortemente dependentes da atividade de água. Em atividades de água abaixo de 0,25, o material se comporta como um corpo frágil, enquanto em atividades de água acima de 0,3 é manifestado o efeito plasticizante da água. O modelo normalizado de PELEG e NORMAND (1983) foi usado para ajustar os dados experimentais dos testes de compressão-relaxação.

## Revisão Bibliográfica

As mudanças nas propriedades mecânicas e reológicas de maçãs durante a secagem convectiva foram avaliadas por VOEGEL-TURENNE et al. (2001), que definiram dois estágios distintos de acordo com o comportamento apresentado durante os testes mecânicos. Durante a primeira fase (6,5 a 1,0 kg água/kg matéria seca), as maçãs comportaram-se como materiais menos rígidos caracterizados pela elasticidade e viscosidade reduzidas, enquanto que na segunda fase, menos de 1 kg água/kg matéria seca, as maçãs apresentaram-se mais enrijecidas e os valores de sua elasticidade e viscosidade aumentaram. LEWICKI e LUKASZUK (2000) também observaram que o tempo de relaxação aumentou com o decréscimo do conteúdo de umidade em maçãs secas, e que o pré-tratamento osmótico do produto causou substancial mudança nas propriedades mecânicas dos tecidos.

GABAS et al. (2002) investigaram as propriedades reológicas de ameixas secas e reidratadas aplicando testes de compressão-relaxação. Concluíram que o modelo generalizado de Maxwell representou melhor o comportamento viscoelástico das amostras e os parâmetros reológicos indicaram que as ameixas secas exibiram um comportamento elástico mais pronunciado a baixos conteúdos de umidade e temperaturas do ar de secagem mais brandas. Em conteúdos de umidade altos e temperaturas de secagem mais altas, as amostras tornaram-se mais viscosas e menos rígidas.

## **2.6 VITAMINA C**

A atividade de vitamina C em alimentos está associada ao seu conteúdo de ácido L-ascórbico que pode ser facilmente oxidado, sendo a intensidade do processo dependente de fatores como pH, conteúdo de umidade, oxigênio, temperatura e luz.

## Revisão Bibliográfica

A tecnologia de alimentos tem como um dos principais objetivos, além da preservação do alimento em longo prazo, maximizar a retenção de nutrientes durante o processamento e armazenamento do produto. Geralmente, é observado que se o ácido ascórbico contido nos alimentos apresentar pouca degradação, os outros nutrientes também sofreram perdas brandas. Dessa forma, o ácido ascórbico geralmente é considerado como um índice da qualidade nutricional durante o processamento e armazenamento de gêneros alimentícios (FENNEMA, 1977).

Vários trabalhos que levam em consideração a degradação de vitamina C em alimentos sugerem que a cinética seja de primeira ordem, na qual a taxa de degradação do nutriente é proporcional à sua concentração, e a forma diferencial é representada pela equação (11) (UDDIN et al., 2002; VIEIRA et al., 2001).

$$\frac{dC}{dt} = -kC \quad (11)$$

onde  $\frac{dC}{dt}$  é a taxa de degradação de vitamina C,  $k$  é a constante de proporcionalidade e  $C$  é a concentração do nutriente. O sinal negativo no segundo membro da equação indica que há consumo do constituinte.

A forma integrada da equação (11) é representada pela equação (12):

$$\log \frac{C_0}{C} = \frac{k}{2,303} t = \frac{t}{D_T} \quad (12)$$

onde  $C$  é a concentração de vitamina C,  $C_0$  a concentração inicial de vitamina C,  $D_T$  o tempo de redução decimal, isto é, o tempo necessário para reduzir a concentração do nutriente a um décimo do valor inicial a uma determinada temperatura  $T$ .

## Revisão Bibliográfica

É comum caracterizar as reações de primeira ordem através do modelo de Arrhenius dado pela equação (13):

$$\ln \frac{C_0}{C} = \int_0^t K_0(X) \exp \left[ - \frac{E_a(X)}{R(T + 273,15)} \right] dt \quad (13)$$

sendo  $K_0(X)$  a constante em função do conteúdo de umidade ( $s^{-1}$ ),  $E_a(X)$  a energia de ativação (J/mol) em função da umidade,  $R$  é a constante universal dos gases (8,314 J/mol K),  $T$  é a temperatura do produto (K) e  $t$  o tempo (s).

Alguns trabalhos que empregam este modelo são citados por BROECK et al. (1998), no estudo da degradação térmica (120 a 150 °C) do ácido L-ascórbico em sucos de laranja e tomate, UDDIN et al. (2002) que investigaram a perda do nutriente durante a estocagem de goiabas em diferentes condições de armazenagem, VIEIRA et al. (2001), que estimaram a degradação de vitamina C em condições não isotérmicas durante a pasteurização de néctar de cupuaçu.

Outro modelo muito utilizado para representar o decaimento da concentração de vitamina C é o de Bigelow (eq. 14) expresso em termos de  $D_T$  e  $z$  (temperatura de redução decimal). A equação de Bigelow foi empregada por GABAS et al. (2003b) no estudo da degradação da vitamina C em ameixas liofilizadas durante o armazenamento por 5 dias em dessecadores contendo soluções saturadas de diferentes sais a temperaturas de 40, 50 e 60°C. ALVARADO e VITERI (1989) aplicaram esse modelo na investigação da perda do ácido ascórbico durante a pasteurização de frutas cítricas. FRIAS e OLIVEIRA (2001) aplicaram o modelo cinético a um processo não-isotérmico, durante a secagem a ar quente de soluções de maltodextrina empregadas como alimento modelo.

## Revisão Bibliográfica

$$\log \frac{C_0}{C} = \int_0^t \frac{10^{\left(\frac{T-T_r}{z(X)}\right)}}{D_r(X)} dt \quad (14)$$

Na equação (14),  $D_r(X)$  é o tempo de redução decimal em função do conteúdo de umidade numa determinada temperatura de referência  $T_r$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $z(X)$  o intervalo de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) em função da umidade que ocasiona uma variação de 10 vezes no valor de  $D_T$  e  $T$  é a temperatura no interior do produto.

A cinética de degradação dos constituintes de um alimento também pode ser relacionada à mobilidade molecular na matriz sólida, a qual é dependente do volume livre do sistema e do tempo de relaxação molecular da estrutura alimentícia. A temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) tem sido usada como o principal indicador desta mobilidade. A transição vítrea é uma transição de fases que governa a passagem do estado vítreo para o estado gomoso. Esta mudança ocorre dentro de um intervalo de temperatura característico para cada material e a temperatura média deste intervalo é assumida como sendo a temperatura de transição vítrea. Em temperaturas superiores a  $T_g$ , há um substancial aumento da mobilidade molecular que pode afetar a cinética de reações em que a difusão de reagentes e produtos é o fator controlador.

A aplicação da transição vítrea para descrever cinéticas de degradação de ácido ascórbico durante secagem de modelos alimentícios foi apresentada por FRÍAS e OLIVEIRA, (2001). A abordagem é baseada no modelo Williams-Landel-Ferry (WLF), onde o valor de  $D_T$  é função de  $T_g$  e, conseqüentemente, dependente do conteúdo de umidade, uma vez que  $T_g$  é função da umidade. Durante a secagem, a remoção de água aumenta a temperatura de transição vítrea da matriz, sendo que matrizes totalmente secas

## Revisão Bibliográfica

possuem as temperaturas de transição vítrea típicas entre 150 e 220 °C. Assim, com o avanço da secagem a matriz se aproxima de  $T_g$  e pode até mesmo passar para o estado vítreo (FRIAS e OLIVEIRA, 2001). Outros estudos foram avaliados considerando as cinéticas de reações em materiais alimentícios correlacionados ao modelo WLF (NELSON e LABUZA, 1994; KERR et al., 1993; BUITINK et al., 1999).

O modelo Williams-Landel-Ferry considera que o processo é controlado pela mobilidade molecular, e relaciona  $D_T$  à temperatura de transição vítrea de acordo com a equação (15):

$$\frac{D_T}{D_g} = 10^{\frac{-C_1(T-T_g)}{C_2+(T-T_g)}} \quad (15)$$

onde  $D_g$  é o valor de  $D_T$  na temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ),  $C_1$  e  $C_2$  são constantes que podem variar um pouco de um sistema para outro e  $T$  é a temperatura no interior do produto.

Uma vez que  $D_g$  assume valores muito maiores que  $D_T$ , a equação (15) pode ser reescrita para uma temperatura de referência  $T_r$ , de acordo com a equação (16):

$$\frac{D_r}{D_g} = 10^{\frac{-C_1(T_r-T_g)}{C_2+(T_r-T_g)}} \quad (16)$$

A equação (17) representa o quociente entre as equações (15) e (16).

$$\frac{D_T}{D_r} = 10^{\frac{-C_1C_2(T-T_r)}{[C_2-(T_g-T_r)][C_2+(T-T_g)]}} \quad (17)$$

Aplicando a equação (17) à cinética de reação de primeira ordem (eq. 12) (FRÍAS e OLIVEIRA, 2001) obtém-se a equação (18):

## Revisão Bibliográfica

$$\log \frac{C_0}{C} = \int_0^t \frac{10^{\frac{C_1 C_2 (T - T_r)}{[C_2 - (T_g - T_r)][C_2 + (T - T_g)]}}}{D_r} dt \quad (18)$$

A equação acima representa o consumo ou ganho de certo constituinte, levando em consideração a velocidade de reação de 1ª ordem e a temperatura de transição vítrea, que por sua vez, está relacionada à mobilidade molecular.

Outros trabalhos referentes à degradação de vitamina C foram publicados por SINGH e LUND (1984), AKINYELE et al. (1990), YAMASHITA et al. (1999), PRADO et al. (1995) e VIEIRA et al. (2000).

## **2.7 CONSUMO ENERGÉTICO**

No processamento de matérias-primas pela indústria, onde o grande interesse é suprir as necessidades dos consumidores fornecendo-lhes itens de consumo que tragam praticidade e conveniência, o custo energético do processo deve ser levado em consideração juntamente com os avanços tecnológicos que visam o aprimoramento das tecnologias existentes. Mais especificamente, a indústria de alimentos vem ganhando espaço cada vez maior no mercado nacional, com lançamento de produtos inovadores e de alta qualidade, em que a confiabilidade e a segurança alimentar também são consideradas. A diversidade de alimentos secos no comércio varejista é crescente, refletida pelo aumento da demanda por estes produtos.

De acordo com NODEN (1972), os gastos com energia podem ser variados de acordo com o tipo de secador, entretanto, o custo de energia geralmente corresponde em

## Revisão Bibliográfica

mais de 50 % do custo total. Como exemplo, o gasto anual de operação de um secador pneumático industrial é tomado, basicamente, dos seguintes fatores:

|                           |      |
|---------------------------|------|
| energia                   | 62 % |
| * capital de investimento | 13 % |
| manutenção                | 5 %  |
| mão de obra               | 10 % |
| outras despesas           | 10 % |

\* fração gasta por ano considerando a vida útil do secador

A demanda de energia de um secador convectivo pode ser dividida em seis componentes distintos que são:

- ( $Q_1$ ) energia requerida para evaporação da umidade;
- ( $Q_2$ ) energia perdida na saída da corrente de ar;
- ( $Q_3$ ) energia dissipada pelas paredes do secador;
- ( $Q_4$ ) energia associada ao sólido aquecido quando removido do secador;
- ( $Q_5$ ) energia requerida para a circulação do ar;
- ( $Q_6$ ) energia para aquecer a estrutura do secador e o volume de ar incluso.

Segundo MUJUMDAR e KEEY (1978), a energia requerida para evaporação da umidade e aquela perdida na exaustão do ar são as mais significativas, e consequentemente, a eficiência ( $E_s$ ) de secagem em secadores pode ser definida de acordo com a equação (19).

$$E_s = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2} \quad (19)$$

Nos secadores convectivos, a circulação do ar aquecido em direção ao produto promove a evaporação da água do material. O ar quente contribui para o aumento da pressão de vapor da água presente no sólido, aumentando a capacidade de evaporação. Em

## Revisão Bibliográfica

temperaturas do ar mais elevadas há ainda o abaixamento de sua umidade relativa, favorecendo o aumento da força motriz de secagem que consiste na diferença entre a atividade de água do sólido e a umidade relativa do ar. Assim, a energia térmica necessária para evaporar a água até que se atinja um conteúdo de umidade que confira estabilidade ao produto, pode ser compreendida como a energia gasta para aquecer o ar de secagem, e sua quantificação é dada pela equação (20).

$$Q = \int_0^t \int_{T_{amb}}^{T_{ar}} \dot{m} \cdot c_{p_{ar}} dT dt \quad (20)$$

onde  $Q$  é a energia calorífica para aquecer o ar desde a temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) até a temperatura de secagem ( $T_{ar}$ ),  $\dot{m}$  a vazão mássica do ar,  $c_{p_{ar}}$  o calor específico do ar e  $t$  o tempo total de secagem.

Nos casos em que  $\dot{m}$ ,  $c_{p_{ar}}$ ,  $T_{amb}$  e  $T_{ar}$  sejam constantes ou que tenham oscilações desprezíveis, a equação (20) pode ser rescrita na forma da equação (21).

$$Q = \dot{m} c_{p_{ar}} (T_{ar} - T_{amb}) t \quad (21)$$

A eficiência de conversão de energia elétrica ( $W$ ) em energia térmica é da ordem de 80%, e dessa forma, a energia consumida pelo conjunto de resistências elétricas é dada pela equação (22)

$$W = \frac{Q}{\eta_e} \quad (22)$$

onde  $W$  é a energia elétrica consumida,  $Q$  a energia térmica e  $\eta_e$  a eficiência eletro-térmica ( $\eta_e=0,80$ ) (ROSSI, 1993).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO E PREPARO DA MATÉRIA-PRIMA

O caqui (*Diospyros kaki*) da variedade Rama Forte foi obtido no mercado local, poucas horas antes do processamento. As frutas, selecionadas visualmente pela cor, tamanho e grau de firmeza, foram descascadas manualmente antes da secagem. Devido à alta concentração de açúcares da fruta, que promove a aderência da polpa nas bandejas e, consequentemente, a perda de massa do material, as amostras permaneceram suspensas durante os ensaios de secagem, como ilustra a Figura 1. O grau de maturação dos caquis foi determinado por leitura de °Brix em refratômetro e a determinação da umidade inicial foi realizada pelo método gravimétrico em estufa a vácuo, a 60°C por 48h. As frutas utilizadas apresentaram teor de sólidos solúveis entre 14 e 18°Brix e conteúdo de umidade inicial entre 79 e 84% (base úmida).



Figura 1: Disposição dos caquis durante a secagem.

### **3.2 SECADOR**

O equipamento empregado nos ensaios de secagem (Figura 2) encontra-se no Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas/UNESP de São José do Rio Preto - SP. O secador é do tipo bandejas e consiste de três seções básicas: seção de controle da velocidade do ar, seção de aquecimento e compartimento de secagem. Além disso, é equipado com sistema de controle e aquisição de dados que faz o monitoramento das variáveis de processo, como vazão, temperatura e umidade relativa do ar de secagem. Esse equipamento emprega tecnologia FIELDBUS, um sistema de comunicação digital bidirecional para interligar equipamentos “inteligentes” de campo com o sistema de controle. O software de operação, supervisão e gerenciamento do processo é o AIMAX®-WIN.



Figura 2: Secador convectivo automatizado

## Material e Métodos

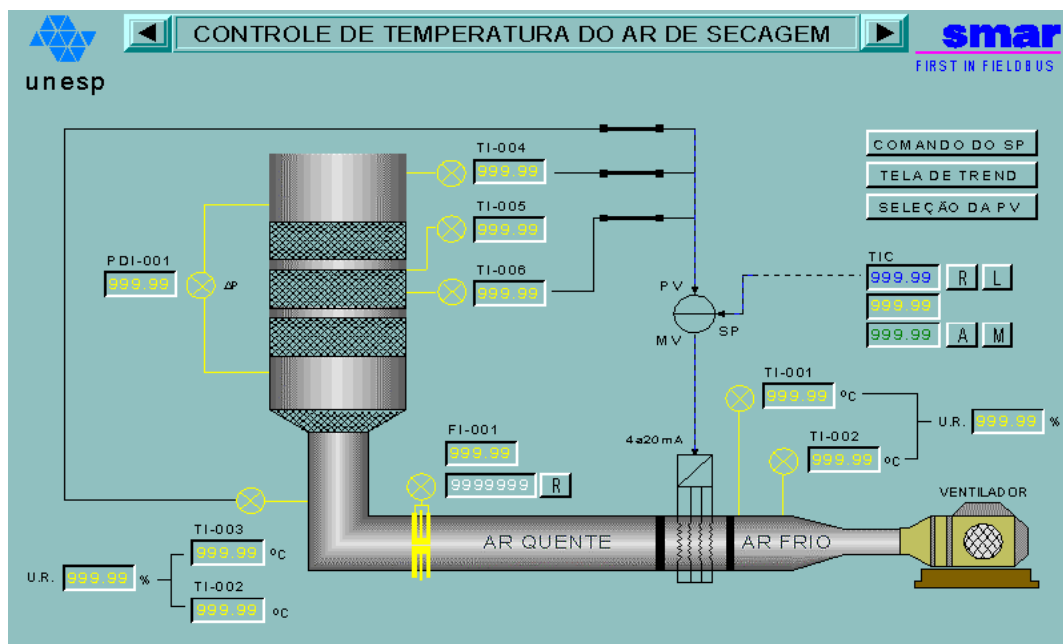
O ar é forçado através do secador por meio de um ventilador centrífugo e o controle da vazão é feito por um conversor de frequência que controla a rotação do ventilador. Um conjunto de resistências elétricas é utilizado para o aquecimento do ar de secagem, sendo controladas por um variador de tensão que permite um ajuste fino da temperatura. Existe uma placa de orifício para medidas de vazão do ar e, antes do compartimento de secagem há uma “colmeia” para melhor distribuição do ar através das bandejas. As temperaturas são medidas por meio de termopares instalados ao longo do secador.

A Figura 3 apresenta a tela correspondente ao esquema de controle e comando do secador. A secagem pode ser controlada selecionando-se a variável de processo. As formas possíveis de controle são as seguintes:

- mantendo-se a temperatura do ar de secagem (TI-003) constante durante o processo, mesmo sob condições ambientais variáveis. Este é o método mais usual de secagem.
- mantendo-se a temperatura do ar de saída do secador (TI-004) constante. Desta forma no início da secagem, quando o produto tem uma grande quantidade de umidade, a temperatura de saída do ar é bem menor que a do ar de secagem (TI-003) e mais próxima da temperatura de bulbo úmido do ar. Conforme a secagem avança, o ar de saída tende a uma temperatura mais alta, que pode danificar o produto. Controlando-se TI-004, a temperatura do ar de secagem deverá ser gradualmente reduzida. Haverá um consumo de energia menor e um produto de melhor qualidade, com uma velocidade de secagem maior.

## Material e Métodos

- mantendo-se a temperatura do interior do fruto (TI-006) em um valor fixo. Neste caso, a temperatura do ar será variável, seguindo a mesma tendência descrita no parágrafo acima.



**TI-001** - temperatura de bulbo seco do ar ambiente  
**TI-002** - temperatura de bulbo úmido do ar ambiente  
**TI-003** - temperatura de bulbo seco do ar de secagem  
**TI-004** - temperatura de bulbo seco do ar de saída do secador  
**TI-005** - temperatura de bulbo seco do ar próximo ao produto  
**TI-006** - temperatura no interior do produto  
**FI-001** - pressão diferencial para leitura da vazão de ar  
**PDI-001** - perda de carga no leito  
**MV** - saída de 4 a 20 mA para controle do conversor elétrico estático  
**UR** - umidade relativa do ar  
**TIC** - variável do processo escolhida para controle do processo  
**COMANDO DO SP** - abre tela para definição do set point  
**TELA DE TREND** - abre a tela do histórico do processo  
**SELEÇÃO DA PV** - abre tela para selecionar a variável de processo

Figura 3: Esquema de controle e tela de comandos do secador

### 3.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Foram investigadas duas estratégias de controle distintas – temperatura fixa no ar de secagem e temperatura fixa no interior do produto. Cada estratégia foi avaliada por um planejamento fatorial  $2^2$  com 4 pontos axiais e 2 pontos centrais de acordo com a Tabela 1 (BOX et al., 1978), sendo as variáveis independentes a velocidade do ar de secagem e as temperaturas fixas durante o processo. Indicadores de qualidade do produto seco, como degradação de vitamina C, propriedades reológicas, reidratação e encolhimento, além do consumo energético, foram correlacionados em função das variáveis independentes através de análises estatísticas e pela construção de superfícies de respostas, empregando o software *Statistica 5.0* (STAT SOFT, Inc., 1995)

Tabela 1: Planejamento fatorial  $2^2$  com 4 pontos axiais e 2 pontos centrais ( $\alpha=1,41$ )

| Ensaíos | Variáveis independentes |                      | Variáveis dependentes (respostas)   |
|---------|-------------------------|----------------------|-------------------------------------|
|         | $V_{ar}$                | $T_{ar} / T_{fruto}$ |                                     |
| 01      | -1                      | -1                   | Vitamina C, reidratação, consumo    |
| 02      | +1                      | -1                   |                                     |
| 03      | -1                      | +1                   |                                     |
| 04      | +1                      | +1                   |                                     |
| 05      | $-\alpha$               | 0                    | energético, propriedades reológicas |
| 06      | $+\alpha$               | 0                    |                                     |
| 07      | 0                       | $-\alpha$            |                                     |
| 08      | 0                       | $+\alpha$            |                                     |
| 09      | 0                       | 0                    |                                     |
| 10      | 0                       | 0                    |                                     |

## Material e Métodos

Para o controle da temperatura fixa no ar de secagem, esta variou entre 40 e 70 °C e, para a estratégia de controle com a temperatura fixa no interior do produto, o alcance mínimo e máximo foi de 40 e 55 °C. As velocidades do ar de secagem foram fixadas entre 0,8 e 2,0 m/s para ambos sistemas de controle. De acordo com o planejamento experimental ( $\alpha=1,41$ ), as Tabela 2 e 3 ilustram os valores das velocidades do ar e das temperaturas fixas no ar e no interior do fruto, respectivamente, empregadas nos ensaios de secagem.

Tabela 2: Controle da temperatura fixa no ar de secagem

|                       | $-\alpha$ | +1   | 0   | -1   | $+\alpha$ |
|-----------------------|-----------|------|-----|------|-----------|
| $T_{\text{ar}}$ (°C)  | 40        | 44,3 | 55  | 65,7 | 70        |
| $V_{\text{ar}}$ (m/s) | 0,8       | 1,0  | 1,4 | 1,8  | 2,0       |

Tabela 3: Controle da temperatura fixa no interior do produto

|                         | $-\alpha$ | +1   | 0    | -1   | $+\alpha$ |
|-------------------------|-----------|------|------|------|-----------|
| $T_{\text{fruto}}$ (°C) | 40        | 42,1 | 47,5 | 52,8 | 55        |
| $V_{\text{ar}}$ (m/s)   | 0,8       | 1,0  | 1,4  | 1,8  | 2,0       |

### **3.4 CINÉTICA DE SECAGEM E ENCOLHIMENTO**

Assim que o ar de secagem entrou em equilíbrio térmico, os ensaios foram conduzidos com um número de amostras suficientes para serem avaliadas em todos testes envolvidos. Em tempos regulares, as amostras selecionadas para a avaliação da cinética de secagem e do encolhimento, eram pesadas em uma balança semi-analítica e, considerando que a geometria da fruta se aproxima de uma esfera, as dimensões do diâmetro do caqui foram tomadas com o auxílio de um paquímetro para posterior cálculo do volume. A

## Material e Métodos

secagem prosseguiu até a umidade das amostras entrar em equilíbrio com a umidade do ar de secagem.

### **3.5 REIDRATAÇÃO**

Após as amostras atingirem peso constante no final da secagem, caquis inteiros e secos foram acondicionados a 25 °C em dessecadores contendo soluções saturadas de distintos sais –  $K_2CO_3$ , NaBr,  $NaNO_2$  e NaCl – correspondentes as atividades de água de 0,432, 0,576, 0,625 e 0,751, respectivamente. Os caquis, ao entrarem em equilíbrio com a atmosfera controlada em cada dessecador, foram pesados e em seguida transferidos para um béquer, introduzindo-se água destilada até atingir um volume de 100ml. O tempo de reidratação das amostras secas foi estabelecido em 5 minutos sob condições ambiente, sendo em seguida, levemente enxugadas em papel absorvente e colocadas em descanso por 10 minutos em atmosfera ambiente. O peso da amostra reidratada foi registrado e o índice de reidratação calculado segundo a equação (4).

### **3.6 PROPRIEDADES REOLÓGICAS**

Da mesma forma como descrito acima, os caquis secos e inteiros foram acondicionados em dessecadores juntamente com as amostras que seriam submetidas ao teste de reidratação.

Os caquis, após entrarem em equilíbrio com a umidade relativa do ar no interior dos dessecadores, foram cortados em paralelepípedos (7,3 mm x 6,8 mm e 10 mm de altura), aproveitando-se a região central, eliminando as partes superficiais. Para cada condição operacional e atividade de água, utilizou-se 5 amostras para posterior cálculo da

## Material e Métodos

média e respectivos desvios padrão. Este procedimento foi adotado para ambas as estratégias de controle investigadas.

As amostras cortadas foram submetidas individualmente a testes de compressão-relaxação em um texturômetro (TA-XT2i *Texture Analyzer*, Stable Micro Systems, Surrey, UK). A deformação total foi fixada em 10% para assegurar que as mudanças na área da seção transversal fossem mínimas durante os testes, e a velocidade de compressão foi de 1 mm/s.

### **3.7 VITAMINA C**

Durante os ensaios de secagem, em intervalos de tempos regulares um caqui inteiro foi removido do interior do secador, pesado e conduzido ao teste para quantificação do conteúdo de vitamina C.

Pesou-se 25 g de amostra, a qual foi homogeneizada com 50 ml de solução de ácido oxálico 2 % (p/v), utilizado como solvente. Do extrato (amostra + solução), 20 g foram então diluídos para 50 ml com o solvente e depois filtrado a vácuo. Alíquota de 10 ml do filtrado foi titulada com solução de DCFI (2,6-diclorofenolindofenol 0,01 %). O ponto final da titulação foi detectado visualmente de incolor para o rosa (BENASSI e ANTUNES, 1988). As análises foram realizadas em duplicatas.

A solução de DCFI 0,01 % foi preparada com 100 mg de 2,6-diclorofenolindofenol diluído em 50 ml de água destilada fervente e transferidos para um balão volumétrico de 1 L, o qual foi completado com água destilada juntamente com 210 mg de bicarbonato de sódio.

## Material e Métodos

O conteúdo de vitamina C pôde ser calculado pela equação (23):

$$\frac{\text{mg VitC}}{100\text{g polpa}} = \frac{\text{DCFI}}{\text{DCFI padrão (ml)}} \cdot \frac{\text{amotra (ml)}}{m \text{ amostra (g)}} \cdot \frac{100\text{g}}{m \text{ amostra (g)}} \cdot \frac{m \text{ amostra (g)}}{m \text{ alíquota (g)}} \cdot \frac{m \text{ solvente} + 50\text{ml}}{V \text{ alíquota (ml)}} \quad (23)$$

O valor do DCFI padrão (eq. 23) foi quantificado pela titulação da solução de DCFI 0,01 % com uma solução padrão de ácido ascórbico (diluição de 125 mg de ácido ascórbico P.A. com ácido oxálico 2 % até o volume de 50 ml). A padronização do DCFI se deu tomando 1 ml da solução padrão de ácido ascórbico e completando em um balão volumétrico de 25 ml com ácido oxálico 2 %, onde uma alíquota de 10 ml desta solução final foi titulada com DCFI 0,01 %.



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 ENCOLHIMENTO VOLUMÉTRICO

#### 4.1.1 Temperatura Fixa no Ar de Secagem

As Figuras 4 e 5 mostram o encolhimento adimensional ( $V/V_0$ ) em função do conteúdo de umidade adimensional  $[(X-X_{eq})/(X_0-X_{eq})]$  (base seca), em diferentes temperaturas e velocidades do ar de secagem, respectivamente, durante a secagem com o controle da temperatura fixada no ar de secagem. O encolhimento seguiu uma relação linear em toda a faixa de umidade adimensional e foi essencialmente independente das temperaturas e velocidades do ar de secagem. Este comportamento foi observado para todas as condições ditadas pelo planejamento experimental (Tabelas 1 e 2).

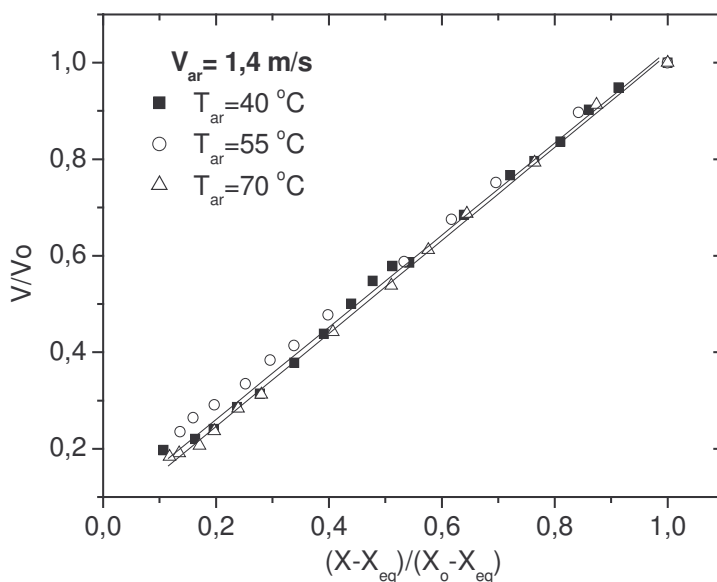


Figura 4: Encolhimento volumétrico ( $V/V_0$ ) de caqui versus conteúdo de umidade adimensional (b.s.) em função da temperatura fixa no ar de secagem ( $V_{ar} = 1,4 \text{ m/s}$ ).

## Resultados e Discussões

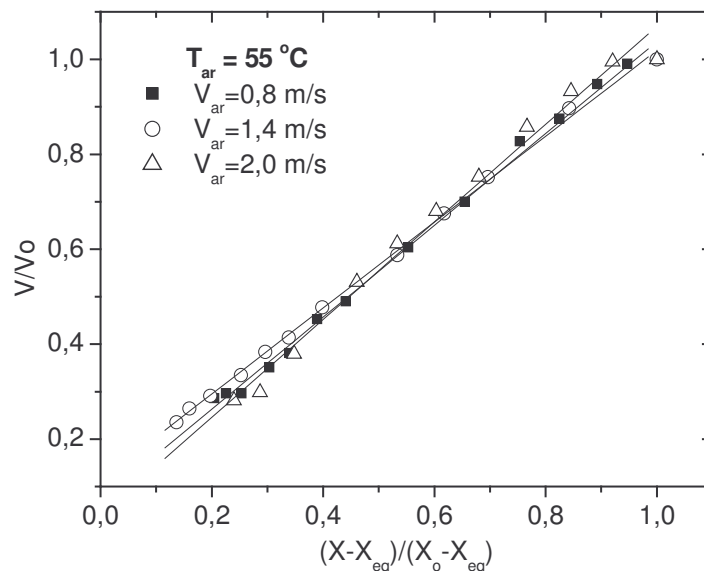


Figura 5: Encolhimento volumétrico ( $V/V_0$ ) de caqui versus conteúdo de umidade adimensional (b.s.) em função da velocidade do ar de secagem, para temperatura fixa no ar de  $55\text{ °C}$ .

HATAMIPOUR e MOWLA (2002), ao investigarem o encolhimento volumétrico de cenouras durante a secagem, observaram um comportamento linear em toda faixa de umidade e não verificaram nenhuma dependência com a temperatura do ar. Algumas outras frutas como uvas (GABAS et al., 1999, RAGHAVAN et al., 1995, AZZOUZ et al., 2002) e peras (LOZANO et al., 1983) também mostraram um perfil linear do encolhimento sobre toda extensão de umidade em que o produto foi submetido durante a secagem.

De acordo com RATTI (1994), o aumento da velocidade do ar de 1,0 para 5,0 m/s, causou um decréscimo no encolhimento, porém este efeito foi mais pronunciado na secagem de batatas, menos acentuado em maçãs e, em cenouras, este efeito praticamente

## Resultados e Discussões

não foi observado. Avaliando o encolhimento em função da temperatura do ar entre 40 e 60 °C, nenhuma dependência pôde ser notada. Por outro lado, os resultados de NICOLETI et al. (2001b), durante a secagem convectiva de fatias de 1 cm de espessura de abacaxi, revelaram uma interação entre a temperatura e velocidade do ar. Em velocidades altas (2,5 m/s), o encolhimento foi praticamente independente da temperatura e, quando a velocidade do ar foi reduzida para 1,5 m/s, o encolhimento foi menos acentuado com o aumento da temperatura do ar. A explicação oferecida para esse comportamento foi que em temperaturas e velocidades maiores, devido ao aumento das taxas de secagem, a superfície do produto era rapidamente desidratada conduzindo-a ao estado vítreo, reduzindo assim o encolhimento.

No caso específico da secagem de caquis inteiros não foi possível observar a interação entre a velocidade e temperatura do ar. A geometria distinta e a sua dimensão, em média de 5,8 cm de diâmetro, podem ter contribuído para isto, além de sua constituição química rica em pectina.

### ***4.1.2 Temperatura Fixa no Interior do Produto***

Com o sistema de controle da temperatura fixa no interior do material, no início da secagem quando o produto apresentava alto conteúdo de umidade, a temperatura do ar de secagem era elevada, sendo gradualmente reduzida conforme a secagem avançava. No final do processo, quando o teor de umidade da fruta estava em níveis bem baixos, a temperatura do ar era diminuída em direção à temperatura do produto.

## Resultados e Discussões

As Figuras 6 e 7 apresentam o encolhimento volumétrico versus conteúdo de umidade adimensional em função da temperatura fixa no interior do produto e da velocidade do ar, respectivamente.

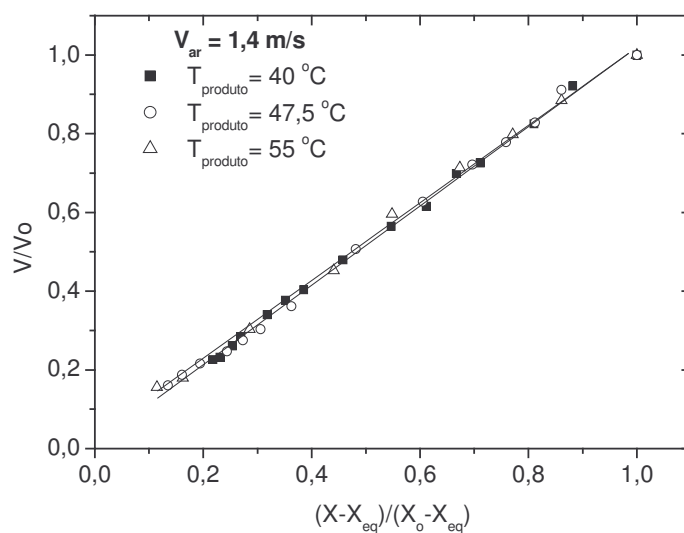


Figura 6: Encolhimento volumétrico ( $V/V_0$ ) de caqui versus conteúdo de umidade adimensional (b.s.) em função da temperatura fixa no interior do produto ( $V_{ar} = 1,4 \text{ m/s}$ ).

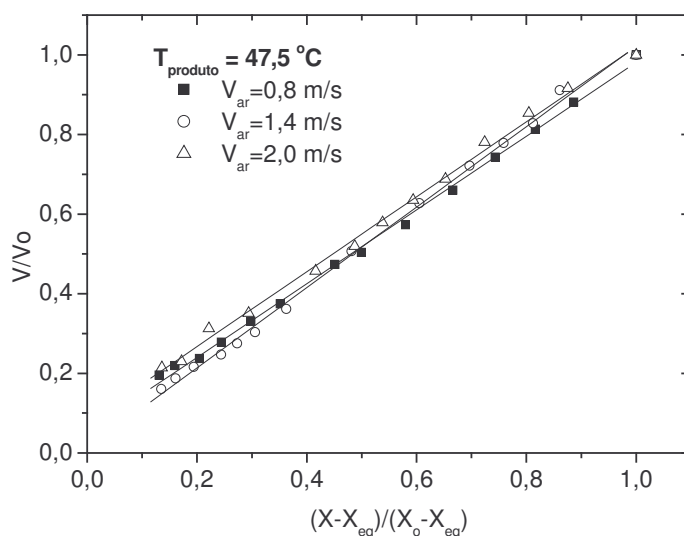


Figura 7: Encolhimento volumétrico ( $V/V_0$ ) de caqui versus conteúdo de umidade adimensional (b.s.) em função da velocidade do ar de secagem, para secagem com temperatura fixa no interior produto de  $47,5^\circ\text{C}$ .

## Resultados e Discussões

O comportamento linear em toda faixa de umidade para esta estratégia de controle foi bem similar quando comparado com os resultados encontrados com a temperatura fixa no ar de secagem, além do encolhimento ser também independente das condições operacionais testadas. Uma avaliação mais detalhada revela que até mesmo os coeficientes lineares e angulares das regressões são muito próximos para ambos os sistemas de controle. Estes resultados mostram que o encolhimento de caquis, durante a secagem convectiva, praticamente se comporta da mesma forma dentro dos limites das condições avaliadas de acordo com o planejamento experimental, para ambos os sistemas de controle. Desse modo, a equação (24) representa o ajuste linear e seu respectivo coeficiente de correlação, considerando os dados experimentais de todas as condições de secagem, sem distinção dos controles.

$$\frac{V}{V_0} = 0,041 + 0,977 \left( \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \right) \quad R=0,9988 \quad (24)$$

## **4.2 COEFICIENTES DE DIFUSÃO DE UMIDADE E CINÉTICAS DE SECAGEM**

### ***4.2.1 Temperatura Fixa no Ar de Secagem***

De acordo com RAGHAVAN et al. (1995), o uso da solução analítica (equação 3) resulta em desvios da realidade por considerar a difusividade efetiva e o raio constantes durante todo o período de secagem. Nos trabalhos de DEMIREL e TURHAN, (2003), EL-AOUAR, et al. (2003), PARK et al. (2003), TOGRUL e PEHLIVAN, (2003) e NICOLETI et al. (2001a) essa solução analítica foi usada para representar a secagem de alimentos.

## Resultados e Discussões

No decorrer da secagem e entre sucessivos intervalos de tempo, pode-se estimar um valor de  $D_{\text{eff}}$  instantâneo, baseado nos respectivos valores dos raios e correspondentes conteúdos de umidade. Assim, uma aproximação da solução analítica da segunda lei de Fick considerando geometria esférica pode ser rescrita conforme a equação (25):

$$M = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[ -n^2 \frac{\pi^2 D_{\text{eff}}(x)t}{[r(x)]^2} \right] \quad (25)$$

onde a difusividade efetiva e o raio da fruta são expressos em função do conteúdo de umidade. Os vários valores da difusividade efetiva em função do conteúdo umidade puderam ser obtidos pelo método proposto por RAGHAVAN et al. (1995), que consiste em técnicas iterativas, considerando seis termos da série (equação 25).

As Figuras 8 e 9 apresentam a dependência da difusividade efetiva sobre o conteúdo de umidade em função da temperatura e velocidade do ar de secagem, respectivamente. Foi observado que os coeficientes de difusão de umidade seguem um comportamento não linear, e estão representados por um ajuste polinomial de 3ª ordem pelas linhas tracejadas. As difusividades efetivas alcançaram um valor máximo e então sofreram uma queda com o prosseguimento da secagem. Segundo TELIS-ROMERO et al. (2001), os baixos valores de  $D_{\text{eff}}$  nos estágios iniciais da secagem ocorrem pelo fato da transferência de umidade se dar durante o aquecimento inicial do sólido. Para níveis de umidade baixos, quando a amostra apresenta um encolhimento muito acentuado e a porosidade foi reduzida, há uma elevação da resistência à remoção de umidade, o que justifica o abaixamento dos valores de  $D_{\text{eff}}$ .

## Resultados e Discussões

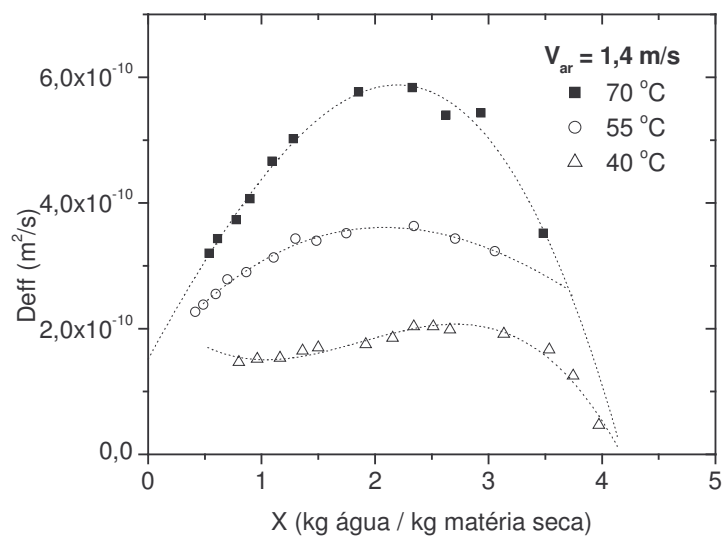


Figura 8: Evolução da difusividade efetiva em função do conteúdo de umidade e da temperatura fixa no ar de secagem, considerando o encolhimento ( $V_{ar} = 1,4 \text{ m/s}$ ).

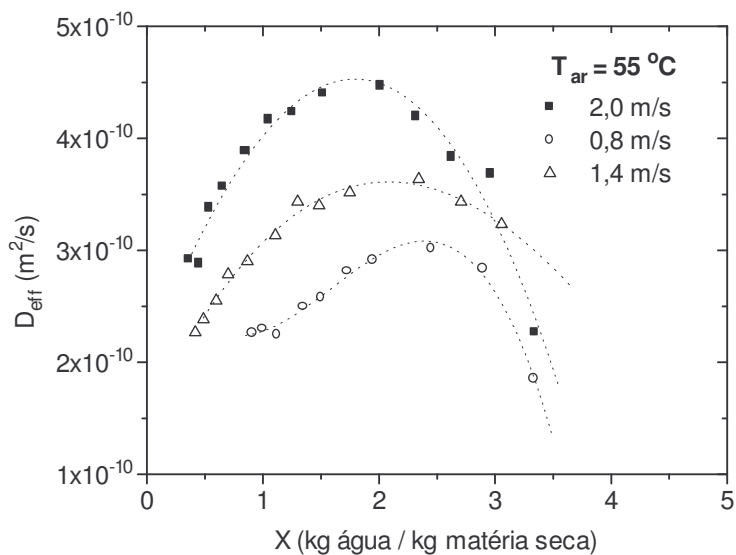


Figura 9: Evolução da difusividade efetiva em função do conteúdo de umidade e da velocidade do ar de secagem considerando o encolhimento. Secagem com temperatura fixa do ar de  $55^\circ\text{C}$ .

## Resultados e Discussões

Os mesmos perfis de  $D_{\text{eff}}$  em função da umidade, considerando-se o encolhimento, foram observados por AZZOUZ et al. (2002), RAGHAVAN et al. (1995) e KARTHANOS et al. (1990).

As Figuras 10 e 11 mostram as curvas de secagem em função da temperatura e velocidade do ar de secagem, respectivamente. As linhas sólidas indicam o ajuste da solução analítica da segunda lei de Fick considerando  $D_{\text{eff}}$  e o raio constantes (equação 3), enquanto as linhas tracejadas representam o ajuste da equação (25), pela qual considerou-se a difusividade e o encolhimento em função do conteúdo de umidade.

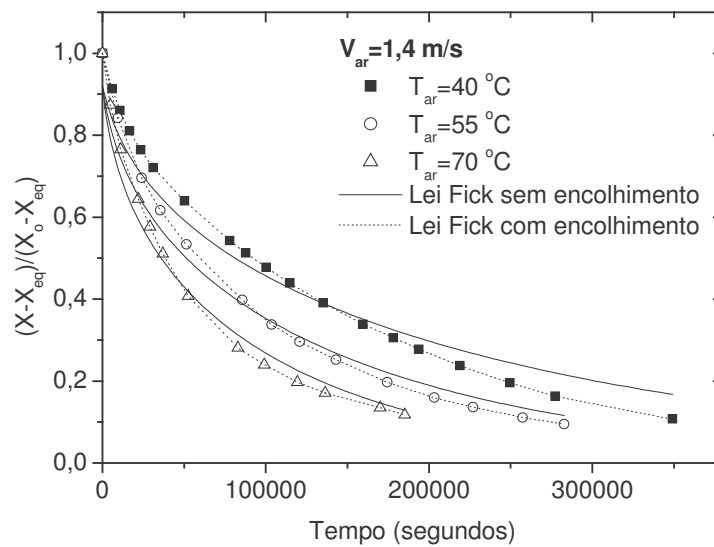


Figura 10: Conteúdo de umidade adimensional (b.s.) versus tempo em função da temperatura fixa do ar de secagem. ( $V_{\text{ar}} = 1,4 \text{ m/s}$ ).

## Resultados e Discussões

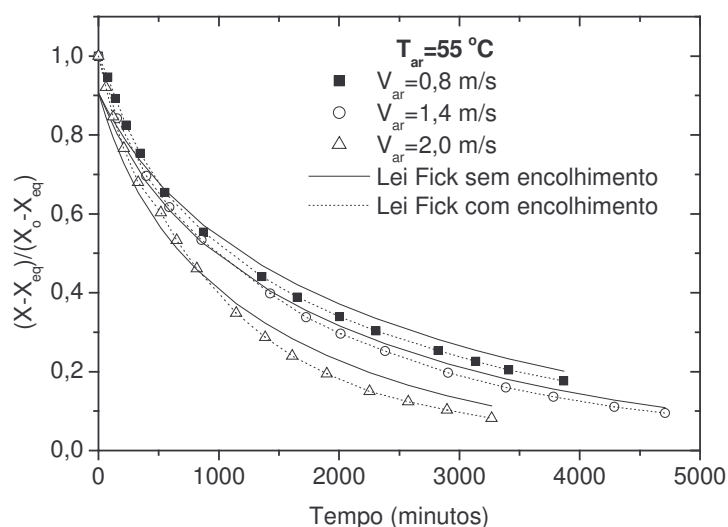


Figura 11: Conteúdo de umidade adimensional (base seca) versus tempo em função da velocidade do ar, para secagem com temperatura do ar fixa de  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Observa-se que o aumento das temperaturas de secagem conduz a tempos de secagem menores para a mesma razão de redução de umidade do sólido. O tempo requerido para reduzir em 80% do conteúdo de umidade inicial foi de 33,2, 48,4, e 69,3 horas para temperaturas do ar em operação de 70, 55 e  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectivamente, em uma velocidade do ar fixa em 1,4 m/s. Para a temperatura do ar fixada em  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o tempo necessário para obter a mesma redução do conteúdo de umidade foi de 31,6, 48,4 e 56,8 horas para as respectivas velocidades do ar de 2,0, 1,4 e 0,8 m/s. Estas diferenças dos tempos de secagem são um indicativo do grau de significância dos efeitos da temperatura e velocidade do ar para este sistema de controle.

O ajuste da solução analítica da segunda lei de Fick (linhas sólidas), a qual desconsidera o encolhimento e assume a difusividade efetiva constante, resultou em um desvio dos dados experimentais, conforme pode-se observar nas Figuras 10 e 11 pela

## Resultados e Discussões

diferença entre os valores preditos e os observados. Por considerar o encolhimento e  $D_{\text{eff}}$  como função do conteúdo de umidade, os resultados do ajuste da equação (25) (linha tracejada) foram bem próximos do real, levando a concluir que essas considerações são fundamentais para se obter bons resultados na simulação de processos de secagem de caquis. Os resultados de TELIS-ROMERO et al. (2001) e RAGHAVAN et al. (1995) também revelaram desvios muito baixos entre os valores observados e preditos quando consideraram o encolhimento do produto e  $D_{\text{eff}}$  função da umidade durante o processo da secagem.

Assumindo os seis primeiros termos da série (eq. 3) e procedendo a regressões não lineares foi possível obter os coeficientes de difusividade durante toda faixa de umidade para cada condição operacional (Tabela 4). Todos os coeficientes de correlação (R) foram superiores a 0,96.

A influência das condições de secagem sobre a difusividade efetiva foi avaliada, construindo uma superfície de resposta como função da temperatura e velocidade do ar de secagem (Figura 12), utilizando o software Statistica 5.0 (STAT SOFT Inc., 1995). O modelo que melhor representa  $D_{\text{eff}}$  é dado pela equação (26), onde apenas os efeitos lineares da temperatura e da velocidade do ar foram significativos ao nível de 5 %. Este grau de significância é reforçado pelas Figuras 10 e 11 em que as diferenças dos tempos de secagem são bem claro, como já discutido acima. De acordo com a Figura 12, o coeficiente de difusão efetiva apresentou valores mais altos com o aumento da velocidade e temperatura do ar.

$$D_{\text{eff}} = -10,1130 \times 10^{-10} + 0,2599 \times 10^{-10} T_{\text{ar}} + 1,7868 \times 10^{-10} V_{\text{ar}} \quad (26)$$

## Resultados e Discussões

Tabela 4: Difusividade efetiva constante para distintas condições com temperatura fixa do ar de secagem.

| $T_{ar}$<br>(°C) | $V_{ar}$<br>(m/s) | $D_{eff} \cdot 10^{10}$<br>(m <sup>2</sup> /s) |
|------------------|-------------------|------------------------------------------------|
| 40,0             | 1,4               | 3,70                                           |
| 44,3             | 1,0               | 3,47                                           |
| 44,3             | 1,8               | 4,00                                           |
| 55,0             | 0,8               | 4,93                                           |
| 55,0             | 1,4               | 6,58                                           |
| 55,0             | 1,4               | 5,50                                           |
| 55,0             | 2,0               | 7,82                                           |
| 65,7             | 1,0               | 9,33                                           |
| 65,7             | 1,8               | 10,55                                          |
| 70,0             | 1,4               | 10,45                                          |

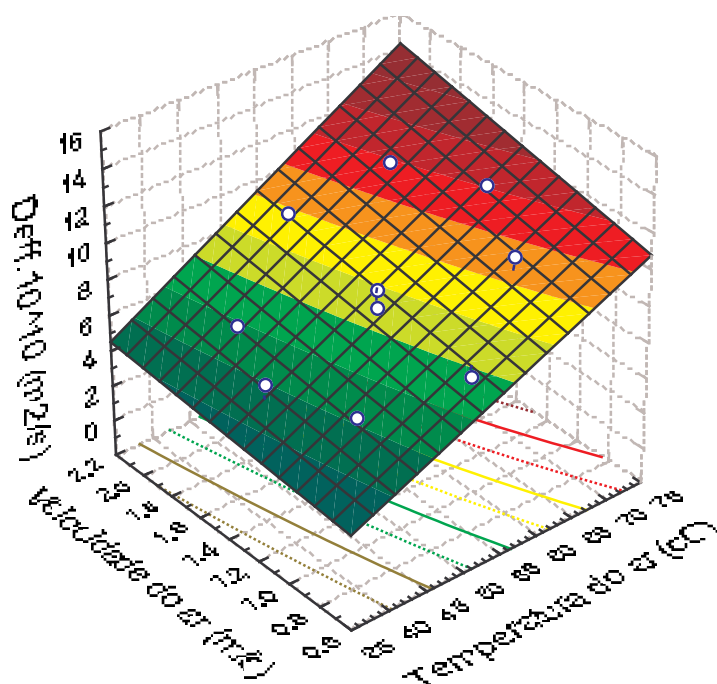


Figura 12: Difusividade efetiva constante em função da velocidade e da temperatura fixa do ar.

## Resultados e Discussões

O aumento das temperaturas conduziu a um  $D_{\text{eff}}$  maior, exceto na condição em que a temperatura do ar operou a  $70^{\circ}\text{C}$  (Tabela 4). Para esta temperatura, a taxa de secagem foi menor do que a secagem conduzida a  $65,7^{\circ}\text{C}$ . Este fato deve ainda ser investigado com maiores detalhes, mas pode ser que esteja relacionado com a formação de crostas superficiais devido à caramelização dos açúcares presentes na fruta, o que dificulta a remoção de água das partes internas do produto. Assim, as camadas superficiais podem estar secas, enquanto o interior da fruta pode apresentar elevado teor de umidade.

### ***4.2.2 Temperatura Fixa no Interior do Produto***

Como discutido anteriormente, para o controle da temperatura fixa no interior do produto foi possível obter os coeficientes de difusão em função do conteúdo de umidade considerando o encolhimento do produto (equação 25). As Figuras 13 e 14 apresentam, respectivamente, o efeito da temperatura no interior da fruta e da velocidade do ar sobre  $D_{\text{eff}}$ . Novamente, a difusividade efetiva atingiu um valor máximo seguida de uma diminuição, conforme o conteúdo de umidade era reduzido. As linhas tracejadas indicam um ajuste polinomial de terceira ordem sobre os dados experimentais.

Fixando a velocidade do ar em  $1,4\text{ m/s}$  para obter como resposta o efeito da temperatura fixa no interior do material (Figura 13), observa-se certo espaçamento entre as curvas, um indicativo de certo grau de significância da temperatura. Por outro lado, em condições constantes de temperatura fixada no interior do fruto ( $47,5^{\circ}\text{C}$ ), as curvas representadas na Figura 14 deixam claro que a velocidade do ar pouco contribui na resposta de  $D_{\text{eff}}$ . Uma explicação para a influência apenas da temperatura neste sistema de controle é que no início da secagem, a temperatura do ar é bem elevada quando comparada com o

## Resultados e Discussões

final do processo, sendo gradualmente reduzida. Em temperatura do ar tão alta há um aumento da força motriz de transferência de calor que, dessa forma, anula ou mascara o efeito da resistência externa. Para o controle da temperatura fixa no ar, a resistência externa predomina, apesar de considerá-la desprezível para aplicar a solução analítica da segunda lei de Fick. Desse modo, a velocidade do ar pouco contribui frente ao efeito temperatura, mesmo assim, pela Figura 14 pode-se observar um pequeno aumento nos valores de  $D_{\text{eff}}$  para velocidades do ar mais altas.

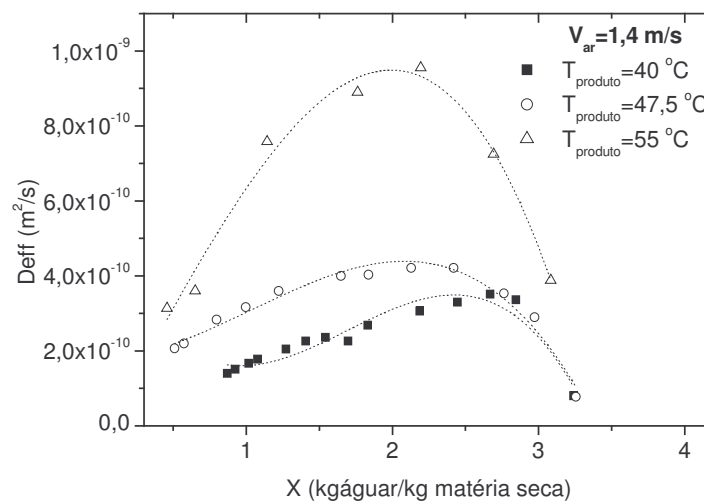


Figura 13: Evolução da difusividade efetiva em função do conteúdo de umidade e da temperatura fixa no interior do produto, considerando o encolhimento ( $V_{\text{ar}} = 1,4 \text{ m/s}$ ).

## Resultados e Discussões

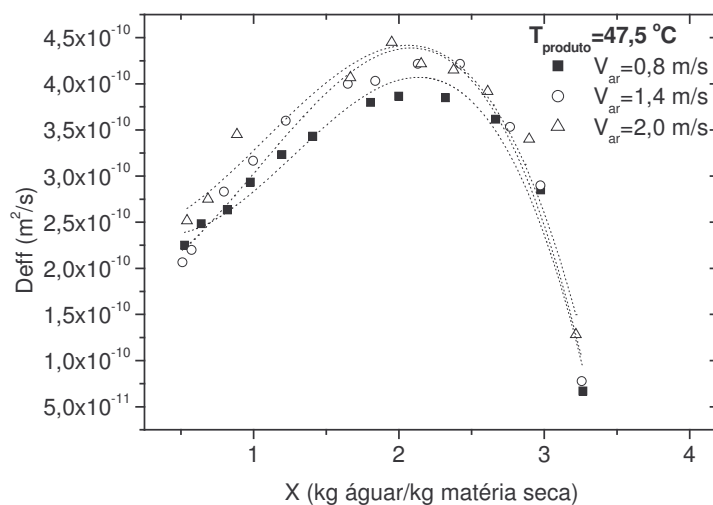


Figura 14: Evolução da difusividade efetiva em função do conteúdo de umidade e da velocidade do ar de secagem considerando o encolhimento, para secagem com temperatura fixa no interior do produto de  $47,5\text{ °C}$ .

A pouca influência da velocidade do ar comparada com a temperatura fixa no interior do sólido é confirmada pelas Figuras 15 e 16, que mostram o conteúdo de umidade adimensional (b.s.) versus o tempo de secagem em função da temperatura no interior do fruto e da velocidade do ar, respectivamente. As linhas sólidas representam o ajuste da solução analítica da segunda lei de Fick aos dados experimentais considerando o raio e  $Deff$  constantes (eq. 3), e as linhas tracejadas são os ajustes da equação (25), a qual representa uma aproximação da solução analítica, considerando a difusividade efetiva como função do conteúdo de umidade e do encolhimento do produto.

Os tempos necessários para atingir 20 % de umidade (adimensional em base seca) para a velocidade do ar em 1,4 m/s foram de 18, 36 e 57 horas para as temperaturas fixas no interior do fruto em 55, 47,5 e  $40\text{ °C}$ , respectivamente. Com a temperatura fixa no sólido

## Resultados e Discussões

em 47,5 °C, os tempos necessários para alcançar a mesma umidade foram de 33, 36 e 38 horas para as velocidades do ar de 2,0, 1,4 e 0,8 m/s, respectivamente. Estes resultados confirmam que o aumento da velocidade do ar conduz a um aumento do potencial de secagem muito inferior em relação ao aumento da temperatura no interior do fruto, e ainda, pode-se observar uma grande redução do tempo de secagem para este sistema de controle.

Mais uma vez, por considerar o encolhimento e os coeficientes de difusividade em função do conteúdo de umidade, os ajustes da equação (25) apresentaram ótimos resultados comparados com os ajustes da equação (3), que por hipótese, omite estes fenômenos inerentes ao processo de secagem de frutas e hortaliças.

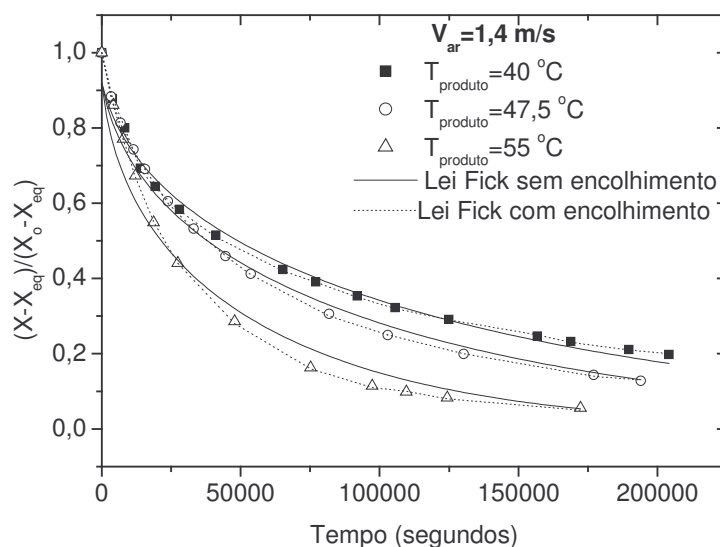


Figura 15: Conteúdo de umidade adimensional (b.s.) versus tempo em função da temperatura fixa no interior do produto ( $V_{ar}=1,4 \text{ m/s}$ ).

## Resultados e Discussões

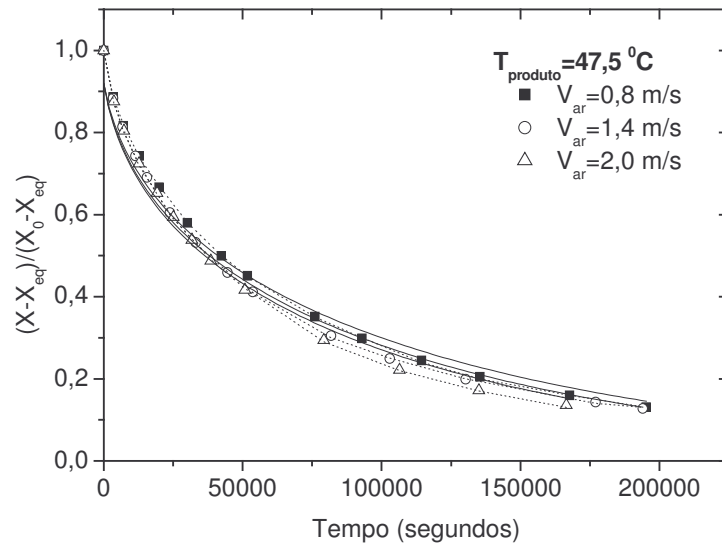


Figura 16: Conteúdo de umidade adimensional (b.s.) versus tempo em função da velocidade do ar de secagem, para secagem com temperatura fixa no interior do produto de 47,5 °C.

Pela solução da série de Fourier, baseada na segunda lei de Fick (eq. 3), foi possível obter os coeficientes de difusão efetivos (Tabela 5) por regressão não linear em função das condições operacionais – velocidade do ar e temperatura fixa no interior do fruto – considerando-se os seis primeiros termos da série. Os valores dos coeficientes de correlação (R) foram todos superiores a 0,97,

A superfície de resposta representada na Figura 17 confirma que apenas o efeito da temperatura no interior do sólido foi significativo ( $p < 0,05$ ) sobre  $D_{eff}$ , sendo que a velocidade do ar não apresentou nenhuma contribuição significativa, nem linear e nem quadrática. O modelo que melhor representou  $D_{eff}$  ( $m^2/s$ ) é dado pela equação (27).

$$D_{eff} = -19,6 \times 10^{-10} + 0,572 \times 10^{-10} T_{produto} + 0,368 \times 10^{-10} V_{ar} \quad (27)$$

## Resultados e Discussões

Tabela 5: Difusividade efetiva constante para distintas condições com temperatura fixa no interior do produto.

| $T_{\text{produto}}$<br>(°C) | $V_{\text{ar}}$<br>(m/s) | $D_{\text{eff}} \cdot 10^{10}$<br>(m <sup>2</sup> /s) |
|------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------|
| 40,0                         | 1,4                      | 4,58                                                  |
| 42,1                         | 1,0                      | 5,50                                                  |
| 42,1                         | 1,8                      | 5,90                                                  |
| 47,5                         | 0,8                      | 6,80                                                  |
| 45,5                         | 1,4                      | 6,83                                                  |
| 47,5                         | 1,4                      | 6,85                                                  |
| 47,5                         | 2,0                      | 7,05                                                  |
| 52,8                         | 1,0                      | 9,50                                                  |
| 52,8                         | 1,8                      | 9,90                                                  |
| 55,0                         | 1,4                      | 16,17                                                 |

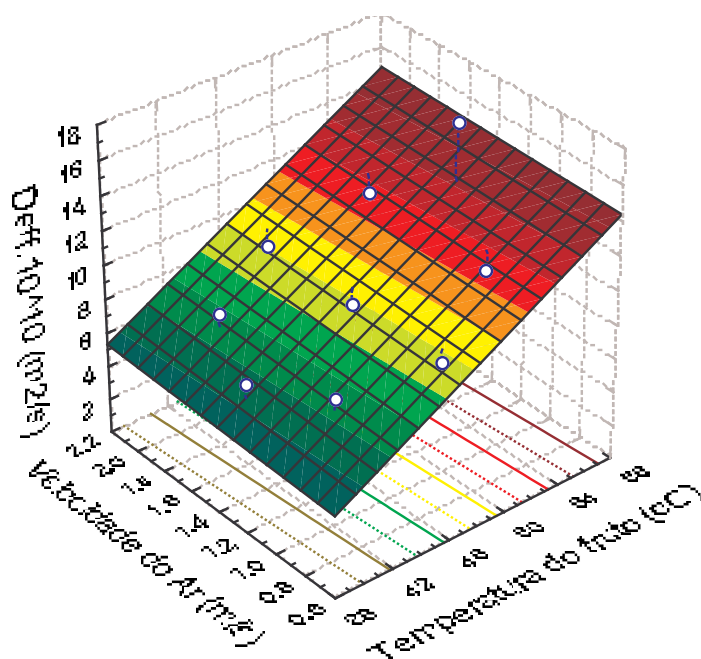


Figura 17: Difusividade efetiva constante em função da temperatura fixa do produto e da velocidade do ar

### 4.3 REIDRATAÇÃO

Os resultados obtidos nos cálculos da capacidade de reidratação das amostras secas e acondicionadas em diferentes atividades de água, tanto para o controle da temperatura fixa no ar de secagem como para a temperatura fixa no interior do fruto, são apresentados nas Tabelas 6 e 7, respectivamente.

Nenhuma diferença significativa entre os índices de reidratação foi observada em ambos os sistemas de controle empregados, bem como entre as distintas condições de secagem e atividades de água.

Tabela 6: Capacidade de reidratação em distintas condições de secagem e atividades de água para o controle da temperatura fixa no ar de secagem.

| Temperatura do ar (°C) | Velocidade do ar (m/s) | Capacidade de Reidratação |               |               |               |
|------------------------|------------------------|---------------------------|---------------|---------------|---------------|
|                        |                        | $a_w = 0,432$             | $a_w = 0,576$ | $a_w = 0,625$ | $a_w = 0,751$ |
| 40,0                   | 1,4                    | 1,109                     | 1,145         | 1,126         | 1,115         |
| 44,3                   | 1,0                    | 1,118                     | 1,112         | 1,162         | 1,115         |
| 44,3                   | 1,8                    | 1,116                     | 1,123         | 1,124         | 1,132         |
| 55,0                   | 0,8                    | 1,162                     | 1,117         | 1,153         | 1,142         |
| 55,0                   | 1,4                    | 1,136                     | 1,124         | 1,108         | 1,112         |
| 55,0                   | 1,4                    | 1,141                     | 1,118         | 1,139         | 1,096         |
| 55,0                   | 2,0                    | 1,111                     | 1,108         | 1,169         | 1,167         |
| 65,7                   | 1,0                    | 1,109                     | 1,143         | 1,137         | 1,138         |
| 65,7                   | 1,8                    | 1,115                     | 1,115         | 1,123         | 1,127         |
| 70,0                   | 1,4                    | 1,078                     | 1,136         | 1,098         | 1,103         |

## Resultados e Discussões

Tabela 7: Capacidade de reidratação em distintas condições de secagem e atividades de água para o controle da temperatura fixa no interior do produto.

| Temperatura do fruto (°C) | Velocidade do ar (m/s) | Capacidade de Reidratação |               |               |               |
|---------------------------|------------------------|---------------------------|---------------|---------------|---------------|
|                           |                        | $a_w = 0,432$             | $a_w = 0,576$ | $a_w = 0,625$ | $a_w = 0,751$ |
| 40,0                      | 1,4                    | 1,179                     | 1,266         | 1,123         | 1,179         |
| 42,0                      | 1,0                    | 1,156                     | 1,188         | 1,147         | 1,156         |
| 42,0                      | 1,8                    | 1,201                     | 1,214         | 1,162         | 1,201         |
| 47,5                      | 0,8                    | 1,123                     | 1,091         | 1,176         | 1,123         |
| 47,5                      | 1,4                    | 1,090                     | 1,076         | 1,101         | 1,090         |
| 47,5                      | 1,4                    | 1,123                     | 1,120         | 1,130         | 1,123         |
| 47,5                      | 2,0                    | 1,140                     | 1,245         | 1,089         | 1,140         |
| 53,0                      | 1,0                    | 1,224                     | 1,186         | 1,296         | 1,224         |
| 53,0                      | 1,8                    | 1,113                     | 1,156         | 1,093         | 1,113         |
| 55,0                      | 1,4                    | 1,114                     | 1,075         | 1,180         | 1,114         |

Os valores obtidos para a capacidade de reidratação de caquis secos submetidos à secagem com temperatura fixa no ar de secagem ficaram entre 1,078 e 1,169 e o valor médio foi de  $1,125 \pm 0,020$ . Já para os frutos secos sujeitos a secagem com temperatura fixa no interior do produto, a capacidade de reidratação se situou entre 1,075 e 1,296 com uma média de  $1,146 \pm 0,055$ .

De acordo com NIJHUIS et al. (1996), a capacidade de reidratação do produto seco está diretamente ligada ao grau de encolhimento. Materiais que apresentam encolhimento menos acentuado, geralmente, constituem uma matriz mais porosa, o que facilita a reidratação, devido ao aumento da área superficial do material em contato com a água. Como discutido anteriormente, o encolhimento do caqui durante as secagens, independente das estratégias de controles e das condições operacionais, não mostrou

## Resultados e Discussões

nenhuma diferença significativa, o que talvez possa ter contribuído para a uniformidade das respostas. Neste caso, a capacidade de reidratação de caquis secos não deve ser considerada como um indicativo seguro da qualidade do produto.

### **4.4 PROPRIEDADES REOLÓGICAS**

Os testes de compressão-relaxação foram conduzidos em uma amostragem com 40 condições distintas de secagem para cada estratégia de controle adotada. Foram selecionadas 10 condições de secagem de acordo com o planejamento experimental, incluindo a repetição do ponto central, e 4 atividades de água em que cada amostra foi reidratada no interior de dessecadores contendo soluções de sais com diferentes umidades relativas: 0,432, 0,576, 0,625 e 0,751. De acordo com TELIS et al. (2000), o conteúdo de umidade de equilíbrio de caquis acondicionados nestas umidades relativas são, respectivamente, de 0,11, 0,20, 0,25 e 0,42 kg água / kg matéria seca.

Os modelos reológicos de Peleg & Normand, Maxwell e Maxwell generalizado, representados respectivamente pelas equações (5), (9) e (10), foram selecionados para descrever o comportamento viscoelástico do produto seco. A adequação de cada modelo foi avaliada pelos valores dos RMS (Root Mean Square) dado pela equação (28):

$$RMS = 100 \cdot \sqrt{\frac{\sum ((\sigma_e - \sigma_p) / \sigma_e)^2}{N}} \quad (28)$$

onde  $\sigma_e$  é o valor experimental,  $\sigma_p$  o valor predito e N o número de pontos experimentais.

Para ambos os controles, com temperatura fixa no ar e no interior do fruto, o modelo de Maxwell generalizado, constituído de dois elementos de Maxwell em paralelo com um componente elástico independente, exibiu menores valores de RMS, e a equação

## Resultados e Discussões

(10) foi então selecionada para representar o comportamento reológico dos dados experimentais dos caquis secos e reidratados.

### ***4.4.1 Temperatura Fixa no Ar de Secagem***

O ajuste, por meio de regressão não linear, do modelo de Maxwell generalizado aos dados de tensão versus tempo obtido durante os testes de compressão-relaxação, resultou nos parâmetros reológicos da equação (10), bem como os valores de RMS e dos coeficientes de correlação apresentados na Tabela 8.

Os valores das viscosidades  $\eta_1$  e  $\eta_2$ , que representam a parcela viscosa de cada elemento de Maxwell puderam ser calculados pela equação (7) de acordo com MOHSENIN (1986). A Tabela 8 também apresenta os diversos valores de  $\eta_1$  e  $\eta_2$ .

O efeito da temperatura do ar de secagem sobre o comportamento reológico de caquis secos está claramente demonstrado na Figura 18, que ilustra as curvas de relaxação das amostras secas em velocidade do ar fixa em 1,4 m/s e reidratadas em  $a_w = 0,432$ . Cada ponto experimental representa a média de cinco medidas, e as barras verticais indicam os respectivos desvios padrão. O alto desvio pode estar associado à heterogeneidade dos produtos naturais, como é o caso dos alimentos (GABAS et al., 2002). Por outro lado, mesmo considerando os desvios de cada condição experimental, as curvas de relaxação obtidas para as amostras secas em diferentes temperaturas estão completamente separadas uma das outras, mostrando efeito significativo da temperatura do ar.

## Resultados e Discussões

Tabela 8: Parâmetros do modelo de Maxwell generalizado para caquis secos em diferentes condições de secagem para temperatura fixa do ar e reidratados em distintas atividades de água.

| $a_w$ | $T_{ar}$<br>(°C) | $V_{ar}$<br>(m/s) | $E_1$<br>(kPa) | $\lambda_1$<br>(s) | $\eta_1$<br>(kPa.s) | $E_2$<br>(kPa) | $\lambda_2$<br>(s) | $\eta_2$<br>(kPa.s) | $E_e$<br>(kPa) | RMS<br>(%) | R     |
|-------|------------------|-------------------|----------------|--------------------|---------------------|----------------|--------------------|---------------------|----------------|------------|-------|
| 0,751 | 40,0             | 1,4               | 10,43          | 124,40             | 1297,49             | 17,17          | 4,34               | 74,52               | 4,73           | 3,29       | 0,993 |
|       | 44,3             | 1,0               | 15,34          | 116,30             | 1784,04             | 22,77          | 5,16               | 117,49              | 8,91           | 1,76       | 0,995 |
|       | 44,3             | 1,8               | 13,19          | 151,50             | 1998,29             | 20,07          | 4,88               | 97,94               | 8,26           | 2,16       | 0,991 |
|       | 55,0             | 0,8               | 64,92          | 156,10             | 10134,01            | 82,24          | 6,38               | 524,69              | 42,73          | 1,29       | 0,996 |
|       | 55,0             | 1,4               | 29,16          | 161,60             | 4712,26             | 37,33          | 6,50               | 242,65              | 19,71          | 0,25       | 0,996 |
|       | 55,0             | 1,4               | 87,17          | 145,00             | 12639,65            | 104,95         | 6,00               | 629,70              | 58,72          | 3,29       | 0,995 |
|       | 55,0             | 2,0               | 41,08          | 151,50             | 6223,62             | 50,26          | 6,38               | 320,66              | 26,07          | 1,10       | 0,997 |
|       | 65,7             | 1,0               | 86,95          | 162,40             | 14120,68            | 101,36         | 7,89               | 799,73              | 53,23          | 1,12       | 0,997 |
|       | 65,7             | 1,8               | 81,18          | 180,90             | 14685,46            | 92,20          | 8,86               | 816,89              | 50,10          | 1,14       | 0,997 |
|       | 70,0             | 1,4               | 63,53          | 170,60             | 10838,22            | 79,45          | 7,50               | 595,88              | 39,13          | 1,36       | 0,996 |
| 0,625 | 40,0             | 1,4               | 11,89          | 130,60             | 1552,83             | 21,12          | 5,10               | 107,71              | 5,69           | 19,80      | 0,991 |
|       | 44,3             | 1,0               | 21,24          | 157,40             | 3343,18             | 33,63          | 5,54               | 186,31              | 11,51          | 2,32       | 0,994 |
|       | 44,3             | 1,8               | 15,31          | 146,90             | 2249,04             | 21,36          | 5,34               | 114,06              | 8,87           | 2,23       | 0,992 |
|       | 55,0             | 0,8               | 87,49          | 153,00             | 13385,97            | 109,26         | 7,35               | 803,06              | 54,68          | 1,32       | 0,996 |
|       | 55,0             | 1,4               | 79,20          | 151,90             | 12030,48            | 104,90         | 5,60               | 587,44              | 48,23          | 1,78       | 0,996 |
|       | 55,0             | 1,4               | 82,24          | 125,80             | 10345,79            | 120,92         | 4,20               | 507,86              | 53,30          | 1,43       | 0,990 |
|       | 55,0             | 2,0               | 61,42          | 156,40             | 9606,09             | 82,38          | 6,05               | 498,40              | 36,45          | 1,47       | 0,996 |
|       | 65,7             | 1,0               | 98,94          | 191,20             | 18917,33            | 111,06         | 8,72               | 968,44              | 61,55          | 1,09       | 0,997 |
|       | 65,7             | 1,8               | 154,35         | 177,70             | 27428,00            | 172,25         | 8,45               | 1455,51             | 102,67         | 0,88       | 0,997 |
|       | 70,0             | 1,4               | 68,22          | 170,60             | 11638,33            | 83,76          | 8,14               | 681,81              | 39,37          | 1,39       | 0,996 |
| 0,576 | 40,0             | 1,4               | 19,81          | 146,23             | 2896,82             | 31,92          | 5,70               | 181,94              | 12,28          | 2,23       | 0,994 |
|       | 44,3             | 1,0               | 37,67          | 110,44             | 4160,27             | 59,72          | 3,77               | 225,14              | 22,48          | 2,01       | 0,993 |
|       | 44,3             | 1,8               | 27,45          | 100,48             | 2758,18             | 42,01          | 4,06               | 170,56              | 17,16          | 1,89       | 0,993 |
|       | 55,0             | 0,8               | 64,99          | 155,20             | 10086,45            | 82,31          | 6,31               | 519,38              | 42,75          | 1,29       | 0,995 |
|       | 55,0             | 1,4               | 120,74         | 157,10             | 18968,25            | 146,13         | 8,25               | 1205,57             | 84,68          | 0,81       | 0,996 |
|       | 55,0             | 1,4               | 72,17          | 152,70             | 11020,36            | 107,34         | 6,03               | 647,26              | 46,28          | 1,44       | 0,996 |
|       | 55,0             | 2,0               | 97,31          | 144,10             | 14022,37            | 66,012         | 5,96               | 393,43              | 38,17          | 1,70       | 0,993 |
|       | 65,7             | 1,0               | 131,2          | 151,60             | 19889,92            | 168,30         | 6,04               | 1016,53             | 80,15          | 1,34       | 0,996 |
|       | 65,7             | 1,8               | 149,52         | 188,36             | 28163,59            | 178,08         | 7,87               | 1401,49             | 89,27          | 1,12       | 0,997 |
|       | 70,0             | 1,4               | 62,49          | 152,37             | 9521,60             | 87,33          | 5,65               | 493,41              | 36,62          | 1,74       | 0,994 |
| 0,432 | 40,0             | 1,4               | 28,03          | 128,60             | 3604,66             | 44,71          | 4,00               | 178,84              | 16,04          | 2,23       | 0,993 |
|       | 44,3             | 1,0               | 38,80          | 151,96             | 5896,05             | 57,31          | 5,40               | 309,47              | 25,30          | 1,40       | 0,995 |
|       | 44,3             | 1,8               | 17,24          | 138,80             | 2392,91             | 26,71          | 6,02               | 160,79              | 10,96          | 2,10       | 0,992 |
|       | 55,0             | 0,8               | 106,17         | 154,00             | 16350,18            | 141,60         | 6,62               | 937,39              | 67,47          | 1,20       | 0,996 |
|       | 55,0             | 1,4               | 200,24         | 152,20             | 30476,53            | 258,50         | 4,85               | 1253,73             | 138,00         | 1,17       | 0,994 |
|       | 55,0             | 1,4               | 55,85          | 146,20             | 8165,27             | 77,20          | 6,12               | 472,46              | 37,83          | 1,14       | 0,996 |
|       | 55,0             | 2,0               | 73,99          | 160,30             | 11860,60            | 100,91         | 5,88               | 593,35              | 43,23          | 1,56       | 0,995 |
|       | 65,7             | 1,0               | 76,14          | 160,32             | 12206,76            | 101,24         | 6,35               | 642,87              | 45,36          | 1,62       | 0,995 |
|       | 65,7             | 1,8               | 212,71         | 223,00             | 47434,33            | 227,34         | 9,72               | 2209,74             | 141,30         | 0,76       | 0,998 |
|       | 70,0             | 1,4               | 123,43         | 166,84             | 20593,06            | 142,10         | 7,30               | 1037,33             | 71,33          | 1,30       | 0,997 |

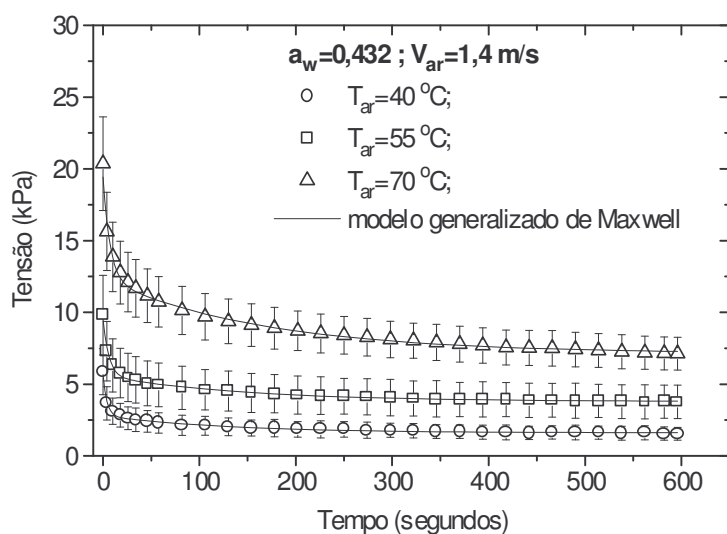


Figura 18: Curvas de relaxação de caquis secos em função da temperatura fixa do ar e reidratados em  $a_w=0,432$ . As barras na vertical correspondem ao desvio padrão de cinco medidas ( $V_{ar}=1,4\text{ m/s}$ ).

Em temperaturas mais baixas (Figura 18), o decaimento da tensão nos primeiros minutos do teste foi mais acentuado e as amostras atingiram a tensão de equilíbrio em um tempo menor, indicando que o tempo de relaxação diminuiu com o decréscimo da temperatura do ar de secagem. Pode-se também observar que as temperaturas mais altas resultaram em valores maiores da tensão de equilíbrio, caracterizando amostras mais rígidas. A secagem conduzida em temperaturas mais elevadas provoca mudanças nas estruturas químicas e mecânicas do alimento, e de certa forma, a irreversibilidade destas mudanças pode ser proporcional à temperatura de secagem. Deste modo, apesar das amostras apresentarem o mesmo conteúdo de umidade durante os testes, os processos de reidratação são distintos de acordo com o grau de danos causados aos tecidos celulares.

## Resultados e Discussões

A Figura 19 representa as curvas de relaxação das amostras secas em velocidades do ar de 1,0 e 1,8 m/s e temperaturas de 44,3 °C e 65,7 °C, reidratadas em  $a_w = 0,751$ . O mesmo efeito da Figura 18 é observado, isto é, relaxação mais pronunciada e valores de tensão de equilíbrio menores para os ensaios de secagem conduzidos a temperaturas mais baixas. Por outro lado, as curvas correspondentes às mesmas temperaturas e velocidades do ar distintas foram essencialmente sobrepostas, mostrando que a velocidade tem pouca influência sobre as propriedades reológicas de caquis secos.

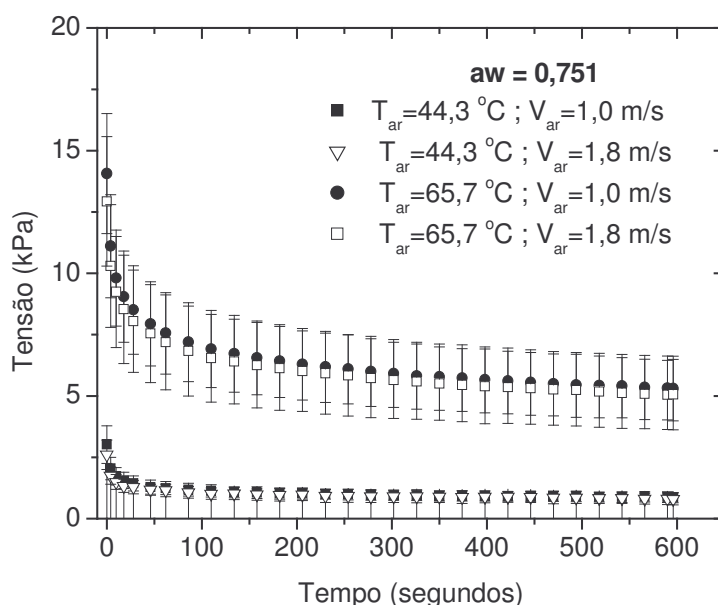


Figura 19: Curvas de relaxação de caquis secos em função da velocidade e da temperatura fixa do ar e reidratados em  $a_w = 0,751$ . As barras na vertical correspondem ao desvio padrão de cinco medidas.

A influência da atividade de água sobre os parâmetros reológicos pode ser observada na Figura 20. As amostras secas nas mesmas temperatura e velocidade do ar,

## Resultados e Discussões

mas reidratadas em atividades de água de 0,576 e 0,625, respectivamente, mostraram diferentes curvas de relaxação. As amostras acondicionadas em atividades de água mais baixas alcançaram uma tensão de equilíbrio mais alta. Neste caso, o efeito plasticizante da água é menos pronunciado pelo fato das amostras apresentarem menor conteúdo de umidade.

KROKIDA et al. (1998) observaram que batatas e cenouras submetidas a secagem convencional a 70 °C, com conteúdo de umidade entre 1,9 e 0,10 kg água / kg matéria seca, isto é, com um conteúdo de umidade final baixo, tiveram sua tensão de equilíbrio e tempo de relaxação aumentados com o decréscimo do conteúdo de umidade. LEWICKI & LUKASZUK (2000) e GABAS et al. (2002) também obtiveram resultados similares na secagem convencional de maçãs e ameixas, respectivamente.

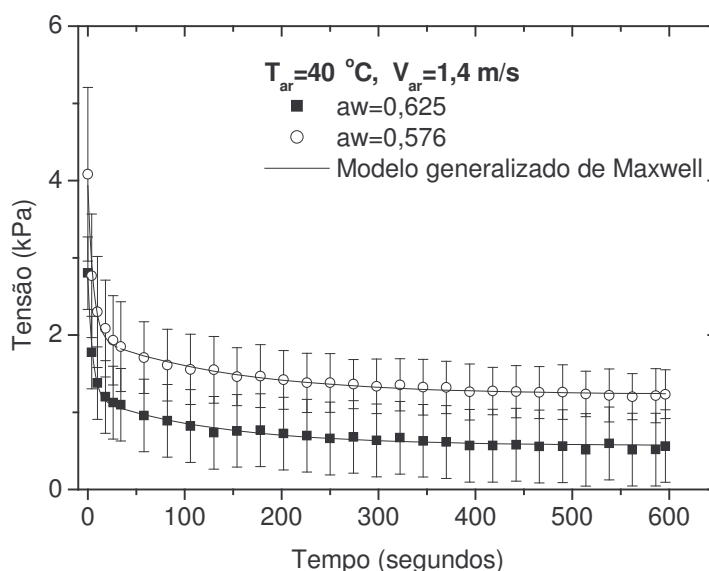


Figura 20: Curvas de relaxação de caquis secos em função da atividade de água. Velocidade do ar de 1,4 m/s e temperatura fixa do ar de 40 °C. As barras na vertical correspondem ao desvio padrão de cinco medidas.

## Resultados e Discussões

O efeito da atividade de água sobre as propriedades viscoelásticas do caqui seco também pode ser interpretado, avaliando-se as condições em que as amostras reidratadas foram armazenadas em relação ao diagrama de estado na temperatura de 25 °C. A Figura 21 indica a localização das amostras reidratadas nas quatro atividades de água a 25 °C sobre as curvas de transição vítrea de caquis liofilizados determinadas por SOBRAL et al. (2001). A partir desta análise, é possível concluir que as amostras em  $a_w = 0,432$  deveriam estar completamente no estado vítreo. Considerando as amostras em atividades de água superiores, estas teriam uma porção de seus constituintes na região vítrea (macromoléculas) e uma porção no estado gomoso (matriz de água e açúcares). As diferentes localizações das amostras no diagrama de fases podem ter sido responsáveis pela tendência de diminuição do módulo de elasticidade de equilíbrio ( $E_e$ ) com o aumento da atividade de água, o qual é observado na Tabela 8 quando compara-se as mesmas condições de secagem.

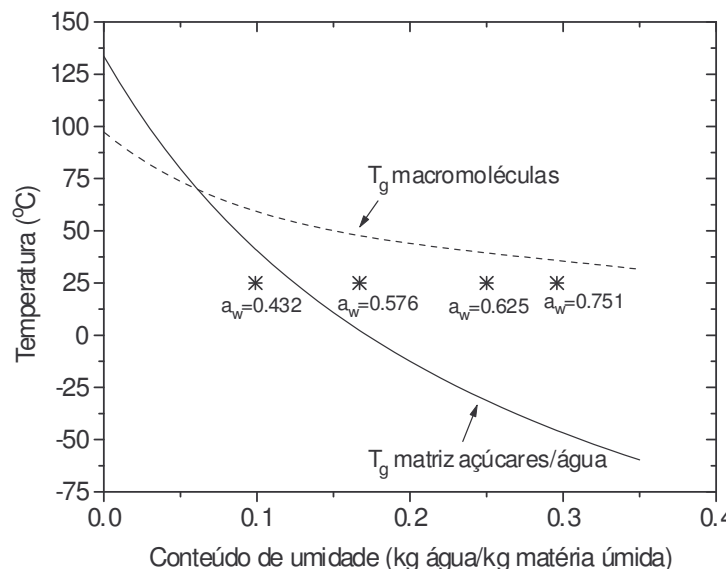


Figura 21: Localização das amostras reidratadas armazenadas em temperatura ambiente em relação às temperaturas de transição vítrea de caquis liofilizados determinadas por Sobral et al. (2001).

A mais representativa propriedade do comportamento reológico do material seco é o tempo de relaxação. O modelo generalizado de Maxwell, entretanto, fornece vários tempos de relaxação, ao invés de um único valor. Assim, de forma a contornar esta condição, uma forma de determinar um único tempo de relaxação foi adotada. O parâmetro foi avaliado diretamente sobre as curvas de relaxação, reproduzidas pelo modelo ajustado, como sendo o tempo necessário para que a tensão fosse dissipada até atingir um valor equivalente a 36,8% do seu valor inicial, de acordo com a equação (29) (RAO, 1992).

$$\sigma(\lambda) = 0,368(\sigma_0 - \sigma_e) + \sigma_e \quad (29)$$

onde  $\sigma_0$  é a tensão inicial,  $\sigma_e$  a tensão de equilíbrio determinada como  $\sigma_e = E_e \epsilon$ , e  $\sigma(\lambda)$  é a tensão correspondente ao tempo de relaxação. Os valores obtidos para o tempo de relaxação são apresentados na Tabela 9.

## Resultados e Discussões

Tabela 9. Tempo de relaxação ( $\lambda$ ), medido como o tempo necessário para a tensão atingir 36,8% do correspondente valor inicial. Caquis secos com temperatura fixa no ar e reidratados em distintas atividades de água.

| Condições de Secagem |                | Tempo de Relaxação (s) |               |               |               |
|----------------------|----------------|------------------------|---------------|---------------|---------------|
| $T_{ar}$ (°C)        | $V_{ar}$ (m/s) | $a_w = 0,432$          | $a_w = 0,576$ | $a_w = 0,625$ | $a_w = 0,751$ |
| 40,0                 | 1,4            | 8,14                   | 10,02         | 10,05         | 9,51          |
| 44,3                 | 1,0            | 10,70                  | 8,90          | 11,50         | 11,00         |
| 44,3                 | 1,8            | 10,82                  | 10,01         | 12,61         | 9,80          |
| 55,0                 | 0,8            | 15,63                  | 15,50         | 20,40         | 16,90         |
| 55,0                 | 1,4            | 13,22                  | 12,50         | 14,04         | 16,40         |
| 55,0                 | 1,4            | 12,02                  | 22,00         | 8,92          | 17,83         |
| 55,0                 | 2,0            | 14,10                  | 13,40         | 15,61         | 18,8          |
| 65,7                 | 1,0            | 16,20                  | 16,82         | 35,08         | 26,94         |
| 65,7                 | 1,8            | 47,93                  | 27,53         | 32,30         | 33,00         |
| 70,0                 | 1,4            | 28,85                  | 13,78         | 25,22         | 21,35         |

O módulo de elasticidade ( $E_e$ ) da equação (10) também tem um significado físico importante na compreensão dos dados de relaxação. Quando multiplicado pela deformação ( $\epsilon$ ), o resultado é a tensão de equilíbrio ou tensão residual, à qual está associada à habilidade do material armazenar alguma fração da energia aplicada.

Uma alternativa para examinar o efeito das condições de secagem sobre as propriedades reológicas de caquis secos é pela superfície de resposta das variáveis dependentes como função da temperatura e velocidade do ar. Os tempos de relaxação (Tabela 9) e o módulo de elasticidade (Tabela 8) foram correlacionados em função da temperatura e velocidade do ar, usando o software Statistica V.5.0 (STAT SOFT, Inc., 1995). O ajuste do modelo seguiu a forma geral da equação (30):

## Resultados e Discussões

$$Y = Y_0 + \alpha T + \beta V + \gamma TV \quad (30)$$

onde  $Y$  é o parâmetro reológico ( $\lambda$  ou  $E_c$ ),  $T$  a temperatura do ar de secagem ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $V$  a velocidade do ar (m/s) e  $Y_0$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são os coeficientes de regressão.

A temperatura de secagem foi o principal fator que afetou as propriedades reológicas e somente o efeito linear apresentou grau significativo ( $p < 0,05$ ).

As Figuras 22 e 23 correspondem às superfícies de respostas obtidas pelo ajuste da equação (30) para o módulo de elasticidade e o tempo de relaxação, respectivamente. Ambas as propriedades apresentaram valores mais altos com o aumento da temperatura de secagem e, embora o efeito da velocidade do ar não tenha contribuído significativamente, é possível observar que há uma tendência de acréscimo de  $\lambda$  ou  $E_c$  com o aumento da velocidade do ar. Este comportamento indica uma associação entre as taxas de secagem e a rigidez do material seco. O aumento das taxas de secagem, que ocorre em temperaturas e velocidades do ar mais altas, resultou em amostras mais rígidas.

Como mencionado acima, o aumento da temperatura, de certa forma, conduziu a valores mais altos de  $\lambda$  ou  $E_c$ , exceto para a temperatura do ar de secagem a  $70^{\circ}\text{C}$ . A Tabela 8 mostra claramente este comportamento para o tempo de relaxação nas quatro atividades de água em que o produto fora armazenado. Este resultado leva a concluir que a secagem nesta temperatura conduz a um produto com uma rigidez menos pronunciada se comparada com as amostras secas na temperatura de  $65,7^{\circ}\text{C}$ . A taxa de secagem na temperatura do ar de  $70^{\circ}\text{C}$  foi menor do que aquela obtida a  $65,7^{\circ}\text{C}$  e pode ter ocorrido a impermeabilização da superfície pela formação de crosta, aumentando a resistência à

## Resultados e Discussões

remoção de água das partes internas do fruto. A irreversibilidade das mudanças químicas e mecânicas, como discutido acima, pode ter sido outro fator. Desse modo, o efeito plasticizante da água apresentou grande influência na resposta aos testes reológicos, uma vez que as amostras submetidas aos testes eram tomadas da parte central do produto seco.

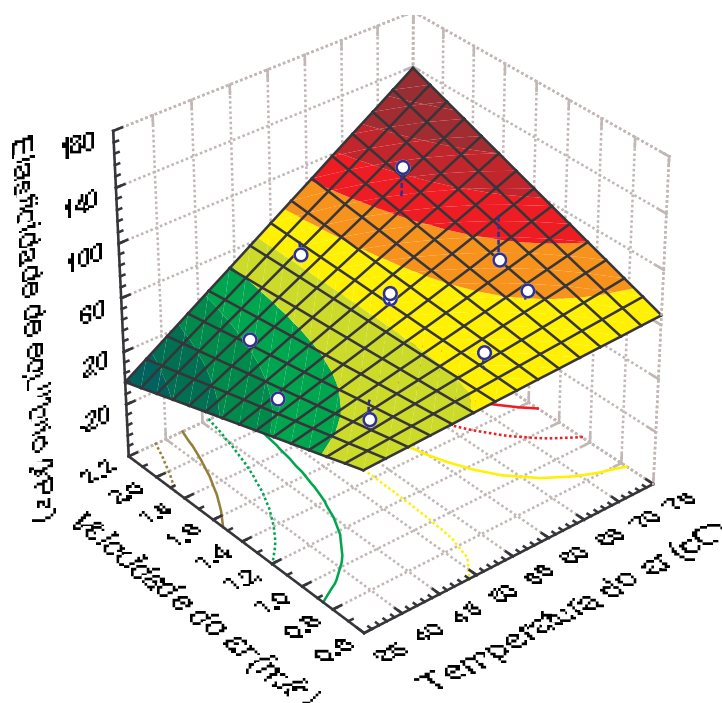


Figura 22: Superfície de resposta obtida para o módulo de elasticidade de equilíbrio ( $E_e$ ) do modelo Maxwell generalizado como função da velocidade e da temperatura fixa no ar. Amostras reidratadas em  $a_w = 0,625$ .

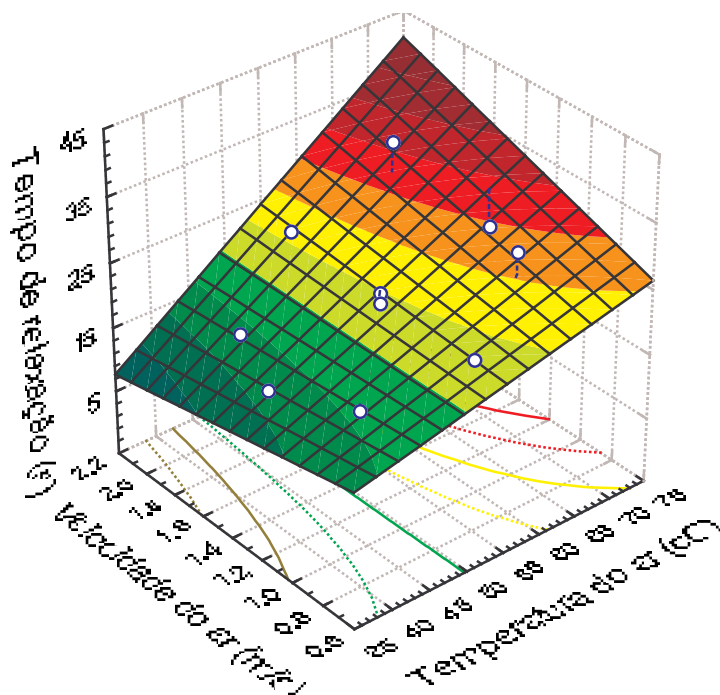


Figura 23: Superfície de resposta obtida para o tempo de relaxação ( $\lambda$ ) como função da velocidade e da temperatura fixa do ar. Amostras reidratadas em  $a_w = 0,751$ .

#### 4.4.2 Temperatura Fixa no Interior do Produto

Os parâmetros reológicos obtidos pela regressão não linear do modelo de Maxwell generalizado (equação 10) são mostrados na Tabela 10 para o controle da temperatura fixa no interior do material. Os correspondentes valores dos RMS e dos coeficientes de correlação (R) também são apresentados, bem como os valores das viscosidades  $\eta_1$  e  $\eta_2$  que representam a parcela viscosa de cada elemento de Maxwell.

## Resultados e Discussões

Tabela 10: Parâmetros do modelo de Maxwell generalizado para caquis secos em diferentes condições de secagem para temperatura fixa no interior do produto e reidratados em distintas atividades de água.

| $a_w$ | $T_{\text{produto}}$<br>(°C) | $V_{\text{ar}}$<br>(m/s) | $E_1$<br>(kPa) | $\lambda_1$<br>(s) | $\eta_1$<br>(kPa.s) | $E_2$<br>(kPa) | $\lambda_2$<br>(s) | $\eta_2$<br>(kPa.s) | $E_c$<br>(kPa) | RMS<br>(%) | R<br>(—) |
|-------|------------------------------|--------------------------|----------------|--------------------|---------------------|----------------|--------------------|---------------------|----------------|------------|----------|
| 0,751 | 40,0                         | 1,4                      | 44,09          | 154,12             | 6795,16             | 57,29          | 4,74               | 271,55              | 31,32          | 1,28       | 0,995    |
|       | 42,1                         | 1,0                      | 53,00          | 151,63             | 8036,39             | 66,03          | 5,37               | 354,58              | 38,44          | 1,04       | 0,998    |
|       | 42,1                         | 1,8                      | 70,07          | 194,41             | 13622,31            | 84,39          | 6,23               | 525,74              | 50,00          | 1,01       | 0,995    |
|       | 47,5                         | 0,8                      | 187,05         | 165,42             | 30941,81            | 228,15         | 5,46               | 1245,69             | 130,72         | 1,09       | 0,997    |
|       | 45,5                         | 1,4                      | 129,54         | 145,01             | 18784,59            | 162,74         | 5,05               | 821,837             | 89,86          | 1,10       | 0,993    |
|       | 47,5                         | 1,4                      | 106,97         | 153,20             | 16387,80            | 132,02         | 4,81               | 635,01              | 77,22          | 0,96       | 0,993    |
|       | 47,5                         | 2,0                      | 225,32         | 171,51             | 38644,63            | 259,63         | 5,70               | 1479,89             | 154,48         | 1,01       | 0,996    |
|       | 52,8                         | 1,0                      | 179,22         | 203,57             | 36483,81            | 199,80         | 7,22               | 1442,55             | 117,59         | 1,00       | 0,992    |
|       | 52,8                         | 1,8                      | 169,54         | 175,69             | 29786,48            | 196,97         | 6,22               | 1225,15             | 119,77         | 1,11       | 0,998    |
|       | 55,0                         | 1,4                      | 133,78         | 217,62             | 29113,20            | 145,73         | 8,98               | 1308,65             | 93,71          | 0,81       | 0,994    |
| 0,625 | 40,0                         | 1,4                      | 53,04          | 138,41             | 7341,26             | 71,02          | 4,92               | 349,41              | 37,50          | 1,16       | 0,993    |
|       | 42,1                         | 1,0                      | 54,8           | 154,91             | 8489,06             | 76,28          | 5,24               | 399,70              | 36,86          | 1,33       | 0,997    |
|       | 42,1                         | 1,8                      | 88,46          | 162,41             | 14366,78            | 113,44         | 5,68               | 644,33              | 63,20          | 1,10       | 0,995    |
|       | 47,5                         | 0,8                      | 204,88         | 143,51             | 29402,32            | 263,17         | 5,37               | 1413,22             | 138,01         | 1,23       | 0,993    |
|       | 45,5                         | 1,4                      | 148,23         | 148,73             | 22046,24            | 204,54         | 4,60               | 940,88              | 96,96          | 1,52       | 0,996    |
|       | 47,5                         | 1,4                      | 137,89         | 170,89             | 23564,02            | 164,78         | 6,07               | 1000,21             | 93,97          | 1,01       | 0,994    |
|       | 47,5                         | 2,0                      | 192,28         | 149,50             | 28745,86            | 245,15         | 5,27               | 1291,94             | 132,12         | 1,18       | 0,997    |
|       | 52,8                         | 1,0                      | 288,52         | 177,41             | 51186,33            | 321,43         | 7,64               | 2455,72             | 192,61         | 0,94       | 0,996    |
|       | 52,8                         | 1,8                      | 184,03         | 169,89             | 31264,85            | 220,77         | 5,97               | 1317,99             | 126,48         | 0,94       | 0,998    |
|       | 55,0                         | 1,4                      | 148,95         | 179,04             | 26668,00            | 174,53         | 6,87               | 1199,02             | 99,69          | 1,11       | 0,995    |
| 0,576 | 40,0                         | 1,4                      | 79,44          | 153,87             | 12223,43            | 101,13         | 5,52               | 558,23              | 56,27          | 1,15       | 0,996    |
|       | 42,1                         | 1,0                      | 100,55         | 156,64             | 15750,15            | 126,51         | 5,94               | 751,46              | 67,72          | 1,24       | 0,994    |
|       | 42,1                         | 1,8                      | 111,52         | 187,16             | 20872,08            | 135,4          | 6,18               | 836,77              | 76,55          | 1,16       | 0,992    |
|       | 47,5                         | 0,8                      | 198,79         | 183,62             | 36501,81            | 233,57         | 7,25               | 1693,38             | 135,66         | 1,04       | 0,994    |
|       | 45,5                         | 1,4                      | 126,22         | 145,00             | 18301,90            | 162,03         | 5,44               | 881,44              | 88,45          | 1,04       | 0,995    |
|       | 47,5                         | 1,4                      | 138,33         | 165,00             | 22824,45            | 174,32         | 5,70               | 993,624             | 95,72          | 1,20       | 0,995    |
|       | 47,5                         | 2,0                      | 228,2          | 164,74             | 37593,66            | 268,95         | 6,19               | 1664,80             | 157,01         | 1,05       | 0,997    |
|       | 52,8                         | 1,0                      | 327,73         | 192,57             | 63110,96            | 359,27         | 8,84               | 3175,94             | 218,71         | 0,92       | 0,998    |
|       | 52,8                         | 1,8                      | 177,86         | 193,97             | 34499,50            | 211,16         | 6,95               | 1467,56             | 128,16         | 1,01       | 0,994    |
|       | 55,0                         | 1,4                      | 154,08         | 170,01             | 26195,14            | 179,81         | 6,97               | 1253,27             | 109,43         | 0,97       | 0,997    |
| 0,432 | 40,0                         | 1,4                      | 73,44          | 143,96             | 10572,42            | 96,59          | 5,38               | 519,65              | 54,21          | 1,21       | 0,993    |
|       | 42,1                         | 1,0                      | 101,53         | 165,83             | 16836,71            | 130,97         | 5,10               | 667,94              | 71,81          | 1,08       | 0,994    |
|       | 42,1                         | 1,8                      | 118,44         | 160,39             | 18996,59            | 146,27         | 5,40               | 789,85              | 85,50          | 0,98       | 0,997    |
|       | 47,5                         | 0,8                      | 172,81         | 144,26             | 24929,57            | 216,18         | 5,68               | 1227,90             | 120,80         | 1,13       | 0,994    |
|       | 45,5                         | 1,4                      | 175,26         | 170,03             | 29799,45            | 214,16         | 6,29               | 1347,06             | 121,50         | 1,05       | 0,995    |
|       | 47,5                         | 1,4                      | 110,74         | 179,44             | 19871,18            | 132,22         | 7,14               | 944,05              | 75,37          | 1,10       | 0,995    |
|       | 47,5                         | 2,0                      | 260,21         | 202,58             | 52713,34            | 288,45         | 7,72               | 2226,83             | 176,08         | 0,93       | 0,998    |
|       | 52,8                         | 1,0                      | 265,91         | 193,98             | 51581,22            | 283,6          | 8,86               | 2512,69             | 180,04         | 0,81       | 0,997    |
|       | 52,8                         | 1,8                      | 195,06         | 182,81             | 35658,91            | 217,16         | 7,70               | 1672,13             | 134,89         | 0,83       | 0,998    |
|       | 55,0                         | 1,4                      | 149,60         | 216,08             | 32325,56            | 171,64         | 7,59               | 1302,74             | 102,04         | 1,12       | 0,994    |

## Resultados e Discussões

Comparando os valores dos módulos de elasticidade de equilíbrio entre os dois sistemas de controle adotados, pode-se observar um grande aumento no valor deste parâmetro das amostras secas com a temperatura fixa em seu interior. O elevado acréscimo nos valores de  $E_e$  para o controle da temperatura fixa no fruto se deve ao aumento das taxas de secagem, que reduziu o tempo de processo comparado com o controle da temperatura fixa no ar. As altas temperaturas do ar nas primeiras etapas da secagem promovem uma redução muito rápida do conteúdo de umidade das amostras, tornando-as mais rígidas por provocar mudanças irreparáveis em suas propriedades mecânicas.

Como definido acima, a tensão de equilíbrio é diretamente proporcional ao módulo de elasticidade de equilíbrio,  $E_e$ . Assim, uma forma mais concreta de avaliar a influência de ambas as estratégias de controle sobre a tensão de equilíbrio, seria comparar os valores dos módulos de elasticidade de equilíbrio das amostras secas em condições em que as temperaturas do ar fossem próximas. A Figura 24 mostra o histórico de temperaturas durante a secagem com a temperatura do fruto fixa em  $47,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  e velocidade do ar de  $1,4\text{ m/s}$ .

## Resultados e Discussões

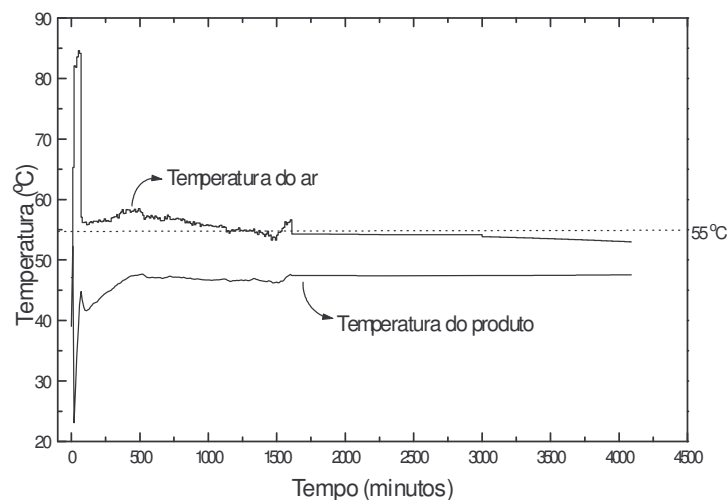


Figura 24: Histórico de temperaturas para temperatura fixa no interior do produto de 47,5 °C e velocidade do ar de 1,4 m/s.

Para a condição ilustrada na Figura 24, a temperatura do ar permaneceu, em média, a 55 °C. Comparando os valores de  $E_e$  para os controles da temperatura fixa no ar ( $T_{ar} = 55$  °C e  $V_{ar} = 1,4$  m/s) e no interior do fruto ( $T_{produto} = 47,5$  °C e  $V_{ar} = 1,4$  m/s), fornecidos pelas Tabelas 8 e 10, respectivamente, observa-se que os valores deste parâmetro reológico para a condição da temperatura fixa no produto é sempre maior nas quatro reidratações com as respectivas atividades de água, e consequentemente, fornece valores de tensão de equilíbrio maiores.

O efeito da temperatura fixa no fruto sobre o comportamento viscoelástico de caquis secos é apresentado na Figura 25, que mostra as curvas de relaxação para as amostras secas em velocidade do ar de 1,4 m/s e reidratadas em  $a_w = 0,576$ . Cada ponto experimental representa a média de cinco medições e as barras na vertical são os respectivos desvios padrão. Como já discutido para o controle da temperatura fixa no ar,

## Resultados e Discussões

pode-se observar um desvio alto, e de certa forma, pode ser considerado natural devido a heterogeneidade da constituição da matéria-prima alimentícia. O aumento da temperatura no interior do material ocasiona um acréscimo na tensão de equilíbrio, isto é, a estabilização das curvas de relaxação durante os testes de compressão-relaxação é alcançada em tensões mais elevadas quanto maior é a temperatura fixada no interior do fruto.

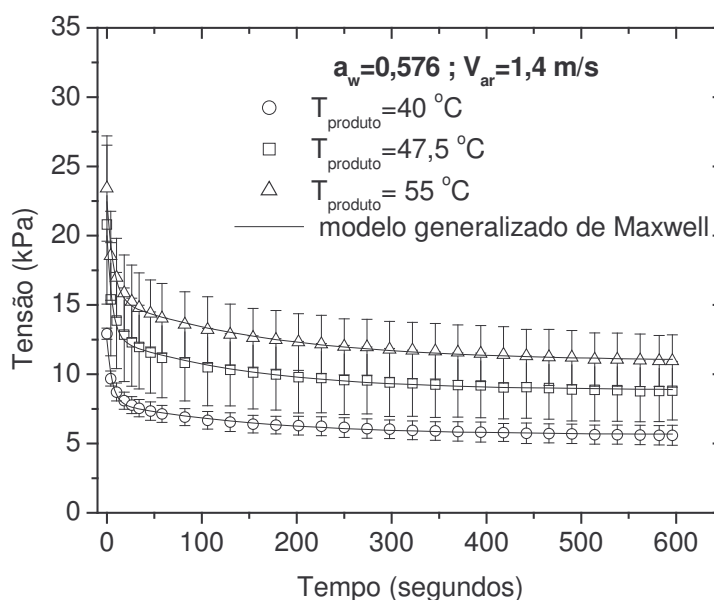


Figura 25: Curvas de relaxação de caquis secos em função da temperatura fixa no interior do produto e reidratados em  $a_w = 0,576$ . As barras na vertical correspondem ao desvio padrão de cinco medições ( $V_{ar} = 1,4$  m/s).

O comportamento em que o aumento da temperatura fixa no interior do produto conduz a valores maiores da tensão de equilíbrio não é notado nas condições extremas em que as temperaturas foram fixadas no produto em  $52,8$  °C ( $V_{ar} = 1,8$  m/s) e  $55$  °C ( $V_{ar} = 1,4$  m/s). O módulo de elasticidade de equilíbrio nestas condições operacionais decresce em

## Resultados e Discussões

todas as atividades de água em que o caqui seco foi reidratado, podendo ser comprovado na Tabela 10. As Figuras 26 e 27 mostram os históricos de temperaturas em que os frutos estiveram submetidos em tais condições, indicando que as temperaturas do ar permaneceram acima de  $65^{\circ}\text{C}$  por mais de 40 h de processamento. Nos estágios iniciais de secagem, 10,5 h e 16 h, as temperaturas do ar foram superiores a  $70^{\circ}\text{C}$  para a temperatura fixa no produto em  $52,8^{\circ}\text{C}$  ( $V_{\text{ar}} = 1,8 \text{ m/s}$ ) e  $55^{\circ}\text{C}$  ( $V_{\text{ar}} = 1,4 \text{ m/s}$ ), respectivamente. Este mesmo resultado, diminuição do módulo de elasticidade de equilíbrio, foi observado na secagem conduzida com temperatura do ar fixa em  $70^{\circ}\text{C}$  ( $V_{\text{ar}} = 1,4 \text{ m/s}$ ), a qual apresentou a taxa de secagem reduzida se comparada com o ensaio realizado com a temperatura do ar a  $65,8^{\circ}\text{C}$  ( $V_{\text{ar}} = 1,8 \text{ m/s}$ ). De modo similar, pode ter ocorrido a impermeabilização da superfície, devido à formação de crosta, e dificultando a remoção de água das partes internas da fruta, já que as amostras submetidas aos testes de compressão-relaxação foram tomadas da parte central do fruto, como descrito anteriormente.

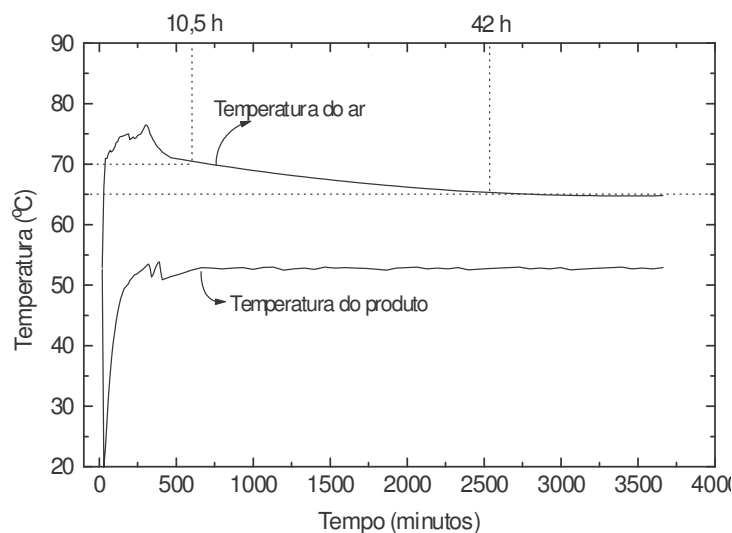


Figura 26: Histórico de temperaturas para secagem com a temperatura fixa no interior do produto de  $52,8^{\circ}\text{C}$  e velocidade do ar de  $1,8 \text{ m/s}$ .

## Resultados e Discussões

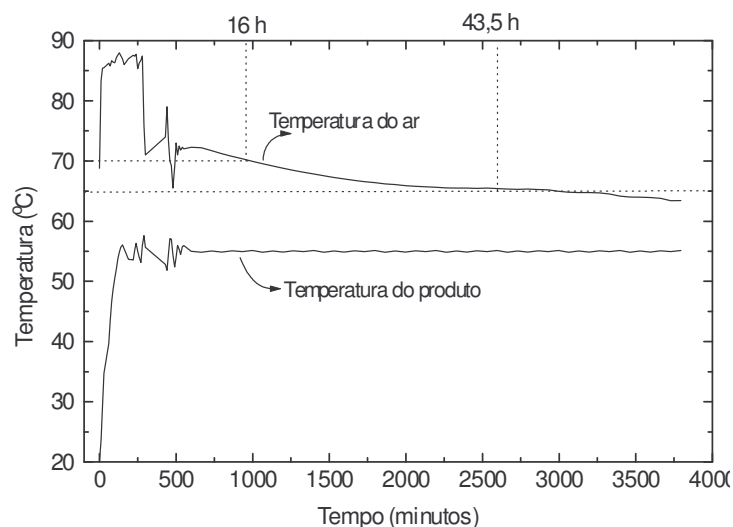


Figura 27: Histórico de temperaturas para secagem com a temperatura fixa no interior do produto de 55 °C e velocidade do ar de 1,4 m/s.

Os demais históricos de temperaturas, referentes às diversas condições operacionais envolvendo ambas as estratégias de controle, podem ser conferidos nos Anexos I e II.

A Figura 28 apresenta as curvas de relaxação de caquis secos com as temperaturas fixas no interior da amostra em 42,1 °C e 52,8 °C e velocidades do ar de 1,0 e 1,8 m/s, reidratadas em  $a_w = 0,751$ . A influência da temperatura é a mesma observada na Figura 25, ou seja, tensões de equilíbrio menores foram alcançadas para temperaturas mais baixas, nas mesmas velocidades do ar. As curvas correspondentes às temperaturas iguais, variando a velocidade do ar, foram moderadamente sobrepostas, indicando pouca influência da velocidade sobre o comportamento viscoelástico do caqui seco. Resultados semelhantes foram obtidos com a estratégia de controle da temperatura fixa no ar de secagem.

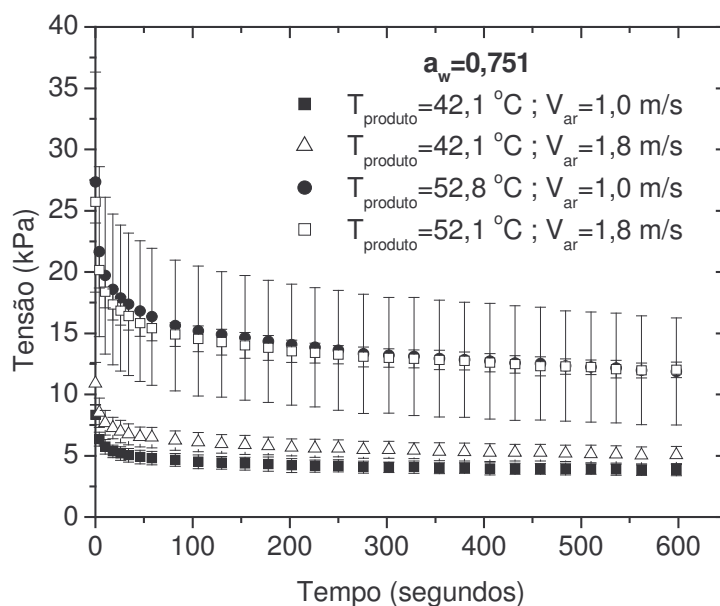


Figura 28: Curvas de relaxação de caquis secos em função da temperatura fixa no interior do produto e da velocidade do ar, reidratados em  $a_w = 0,751$ . As barras na vertical correspondem aos desvios padrão de cinco medidas.

De acordo com a Figura 29, as amostras secas nas mesmas velocidades do ar e temperaturas interna ao produto mostraram diferentes curvas de relaxação para o produto reidratado a  $a_w = 0,576$  e  $a_w = 0,625$ . Pode-se observar que as tensões de equilíbrio maiores foram alcançadas pelas amostras com atividades de água mais baixas. Segundo TELIS et al. (2000), caquis acondicionados em umidades relativas de 0,576 e 0,625 apresentam um conteúdo de umidade de equilíbrio de 0,20 e 0,25 (kg água / kg matéria seca), e em atividades de água maiores, cujas amostras estão mais úmidas, o efeito plasticizante da água é pronunciado, conduzindo o material para um estado de menor rigidez.

## Resultados e Discussões

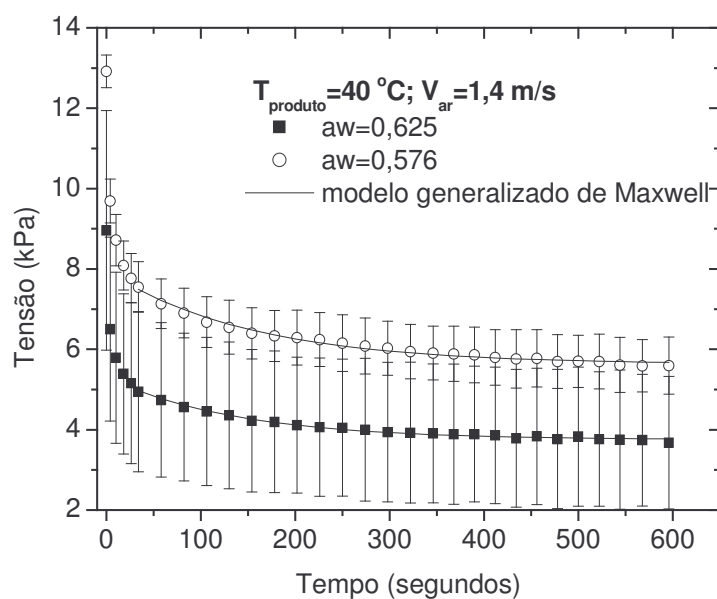


Figura 29: Curvas de relaxação de caquis secos em função da atividade de água. Velocidade do ar de 1,4 m/s e temperatura fixa no interior do produto de 40 °C. As barras na vertical correspondem aos desvios padrão de cinco medidas.

O tempo de relaxação ( $\lambda$ ), definido como o tempo necessário para que a tensão atinja 36,8 % do valor inicial correspondente, de acordo com a equação (29), foi avaliado diretamente sobre as curvas reproduzidas pelo modelo de ajuste e seus valores são apresentados na Tabela 11.

## Resultados e Discussões

Tabela 11. Tempo de relaxação ( $\lambda$ ), medido como o tempo necessário para dissipar a tensão em 36,8% do correspondente valor inicial, para secagem com temperatura fixa no interior do produto a diferentes reidratações.

| Condições de Secagem                    |                              | Tempo de Relaxação (s) |               |               |               |
|-----------------------------------------|------------------------------|------------------------|---------------|---------------|---------------|
| $T_{\text{produto}} (^{\circ}\text{C})$ | $V_{\text{ar}} (\text{m/s})$ | $a_w = 0,432$          | $a_w = 0,576$ | $a_w = 0,625$ | $a_w = 0,751$ |
| 40,0                                    | 1,4                          | 11,37                  | 13,12         | 10,77         | 11,33         |
| 42,1                                    | 1,0                          | 11,97                  | 15,56         | 11,37         | 13,52         |
| 42,1                                    | 1,8                          | 13,77                  | 17,34         | 13,17         | 16,50         |
| 47,5                                    | 0,8                          | 14,36                  | 23,00         | 13,12         | 15,03         |
| 45,5                                    | 1,4                          | 16,76                  | 13,17         | 10,17         | 13,02         |
| 47,5                                    | 1,4                          | 20,50                  | 14,36         | 17,96         | 12,57         |
| 47,5                                    | 2,0                          | 29,33                  | 19,15         | 13,17         | 20,12         |
| 52,8                                    | 1,0                          | 37,71                  | 33,52         | 28,63         | 30,20         |
| 52,8                                    | 1,8                          | 27,53                  | 19,02         | 17,36         | 19,73         |
| 55,0                                    | 1,4                          | 25,14                  | 20,52         | 22,01         | 33,52         |

O mesmo comportamento do módulo de elasticidade de equilíbrio pôde ser verificado para o tempo de relaxação, sendo que em condições extremas de secagem ( $T_{\text{produto}} = 52,8^{\circ}\text{C} / V_{\text{ar}} = 1,8 \text{ m/s}$  e  $T_{\text{produto}} = 55^{\circ}\text{C} / V_{\text{ar}} = 1,4 \text{ m/s}$ ), nota-se uma queda nos valores do tempo de relaxação, um indicativo da perda do caráter elástico em contrapartida ao aumento de seu componente plástico.

BOURDHUIOUA et al. (2002) observaram um aumento na força de penetração em fatias de bananas secas quando houve um acréscimo nas temperaturas de secagem entre 40 e 80  $^{\circ}\text{C}$ . Após poucas horas de secagem conduzida a 80  $^{\circ}\text{C}$ , as fatias tornavam-se rígidas e frágeis e este comportamento foi associado à transição vítrea. Por outro lado, GABAS et al. (2002) verificaram um efeito oposto da temperatura sobre os tempos de

## Resultados e Discussões

relaxação de ameixas secas. Seus resultados indicaram que os tempos de relaxação decresciam com o aumento da temperatura de secagem para as mesmas atividades de água em que as amostras foram reidratadas.

As Figuras 30 e 31 apresentam as superfícies de respostas para o módulo de elasticidade de equilíbrio e tempo de relaxação, respectivamente.

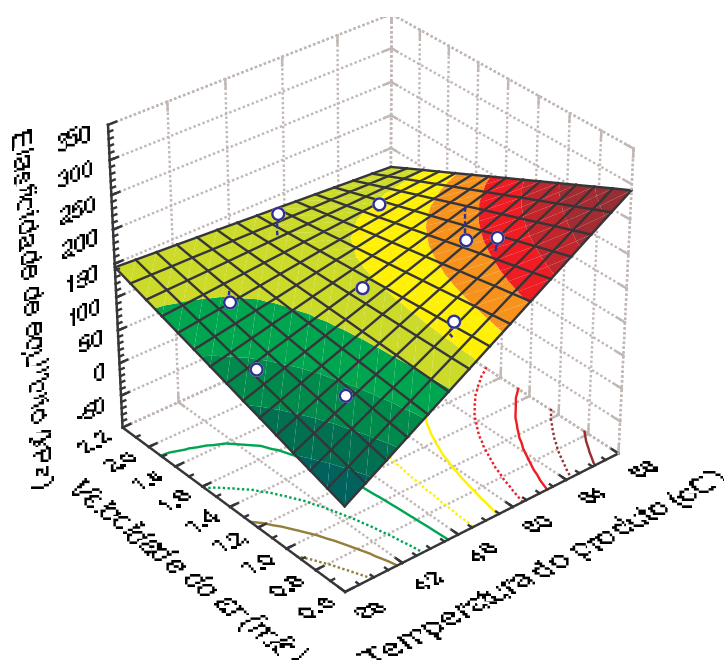


Figura 30: Superfície de resposta obtida para o módulo de elasticidade de equilíbrio ( $E_e$ ) do modelo de Maxwell generalizado como função da velocidade do ar e da temperatura fixa no interior do produto. Amostras reidratadas em  $a_w = 0,625$ .

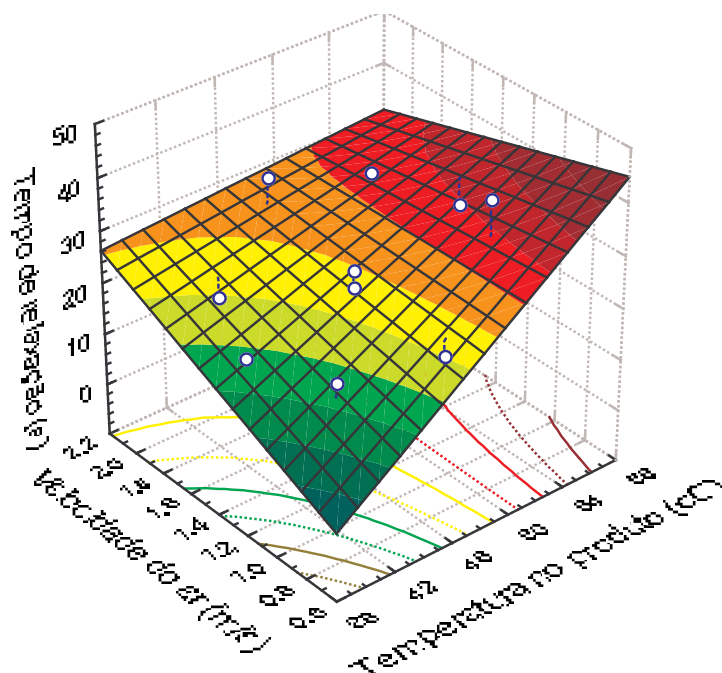


Figura 31: Superfície de resposta obtida para o tempo de relaxação ( $\lambda$ ) em função da velocidade do ar e da temperatura fixa no interior do produto. Amostras reidratadas em  $a_w = 0,432$ .

Ambos os parâmetros reológicos,  $\lambda$  e  $E_e$ , apresentaram um acréscimo em seus valores com o aumento da velocidade do ar de secagem e da temperatura interna do produto, sendo esta, a única variável que apresentou efeito linear significativo ( $p < 0,05$ ). Entretanto, em temperaturas e velocidades mais altas, o módulo de elasticidade de equilíbrio e o tempo de relaxação tendem a certa estabilização, e até mesmo, pode-se observar uma moderada queda nos valores destes parâmetros. Este resultado já era esperado, uma vez que em condições operacionais de secagem extremas, dentro dos limites testados, foi verificado este decréscimo, como mencionado anteriormente.

#### 4.5 VITAMINA C

O conteúdo médio de vitamina C determinado em caquis “in natura” foi de  $3,4 \pm 1,63$  mg Vit C/ g matéria seca, sendo este valor adotado como a concentração inicial ( $\bar{C}_0$ ) em todos os ensaios experimentais. A Figura 32 mostra a distribuição dos valores experimentais de  $C_0$  em dezesseis frutas analisadas, com as concentrações máxima e mínima sendo, respectivamente de 6,66 e 1,13 mg Vit C / g matéria seca. O alto desvio padrão de  $C_0$ , em torno de 48 %, pode ser atribuído à heterogeneidade da matéria-prima de origem biológica.

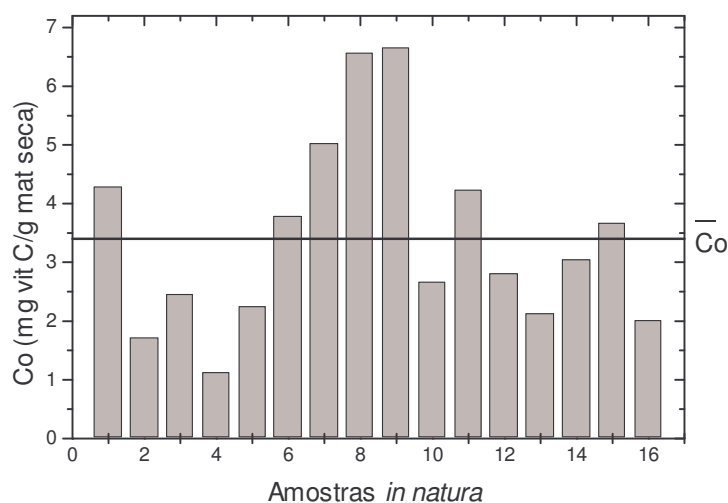


Figura 32: Conteúdo de vitamina C experimental de caquis “in natura”.

## Resultados e Discussões

A representação da cinética de degradação do ácido ascórbico durante a secagem, empregando os controles com a temperatura fixa no ar e no interior do produto, foi baseada no modelo de Williams-Landel-Ferry (WLF), que considera que o processo seja controlado pela mobilidade molecular e relaciona  $D_T$  (tempo de redução decimal) à temperatura de transição vítrea (equação 18).

A temperatura de transição vítrea de caquis liofilizados foi determinada por SOBRAL et al. (2001) e, para altos conteúdos de umidade – acima de 55% (b.u.) –  $T_g$  apresentou-se independente do conteúdo de umidade e seu valor encontrado foi de 216,5 K.

Para os dois sistemas de controle empregados nos experimentos de secagem, a equação (18) foi solucionada por duas aproximações diferentes:

a) *temperatura fixa no ar de secagem*: neste caso, a temperatura interna do produto aumentou ao longo do avanço da secagem, resultando em condições não isotérmicas. Uma função polinomial de  $T$  versus tempo foi obtida pelos históricos de temperatura e inserida na equação (18). A equação resultante foi expandida em série de Taylor e ajustada aos dados experimentais da concentração de ácido ascórbico versus tempo por regressão não linear.

b) *temperatura fixa no interior do produto*: nestes ensaios, os experimentos foram conduzidos em condições isotérmicas no interior do material. Desse modo, a temperatura  $T$  permaneceu constante e a solução da equação (18) foi simplificada, uma vez que  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $D_r$  e  $T_r$  são constantes, e até mesmo  $T_g$  foi constante na faixa dos conteúdos de umidade em que os frutos foram submetidos à análise de vitamina C.

A qualidade do modelo ajustado aos dados experimentais foi avaliada pela soma dos quadrados dos resíduos (SSQ), dado pela equação (31):

## Resultados e Discussões

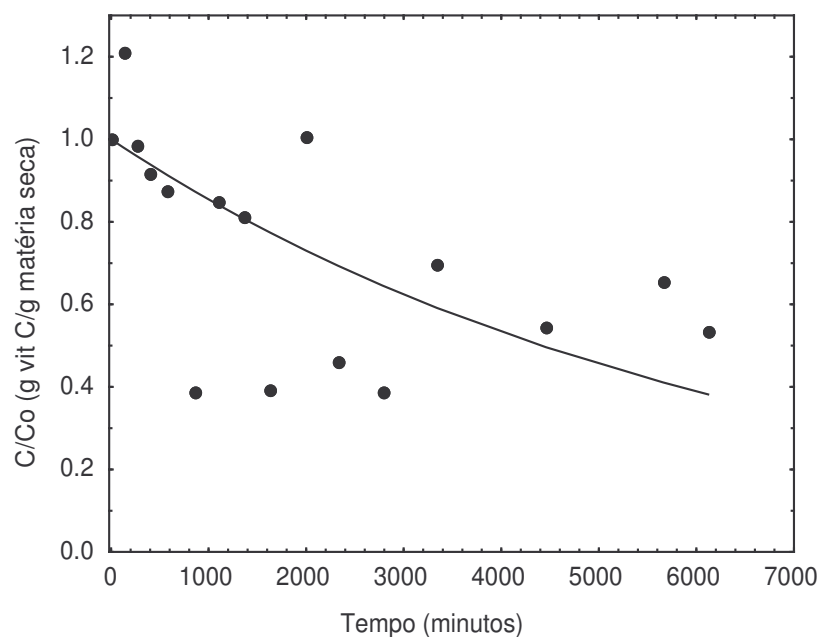
$$SSQ = \sum \left( (C_{\text{exp}} - C_{\text{pred}}) / C_{\text{exp}} \right)^2 \quad (31)$$

onde  $C_{\text{exp}}$  é o valor experimental e  $C_{\text{pred}}$  o valor predito da concentração de vitamina C.

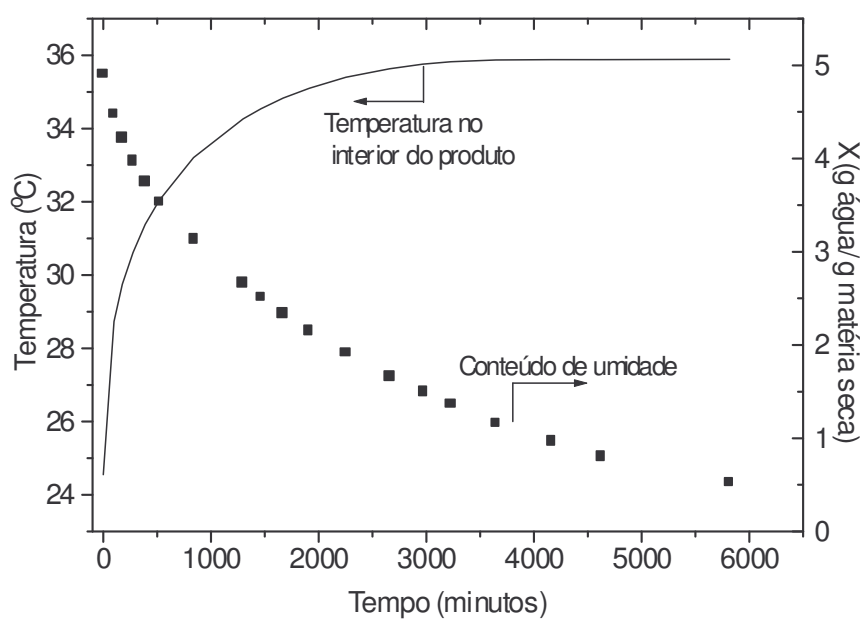
### ***4.5.1 Temperatura Fixa no Ar de Secagem***

As Figuras 33 e 34 apresentam o ajuste do modelo WLF e os dados experimentais para os ensaios conduzidos com a velocidade do ar a 1,4 m/s e temperatura do ar a 40 °C e 70 °C, respectivamente. Pela estimativa do modelo, a diminuição do conteúdo de umidade inicial para um nível de 1,5 (kg água / kg matéria seca) ocasionou uma redução de 38 % do teor inicial de vitamina C durante a secagem a 40 °C. Para atingir o mesmo conteúdo de umidade, a secagem realizada com temperatura do ar a 70 °C reduziu em 93 % o conteúdo inicial do nutriente.

## Resultados e Discussões



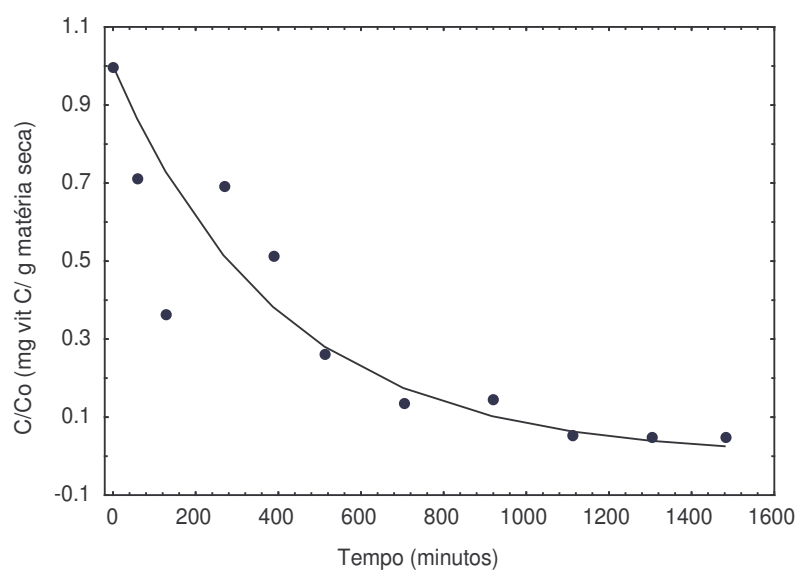
(a)



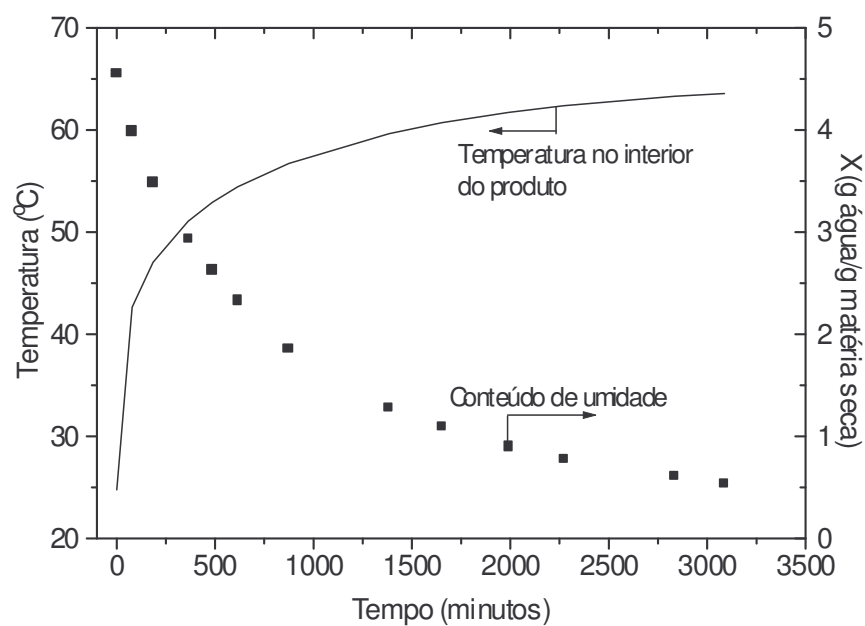
(b)

Figura 33: Dados experimentais com temperatura fixa do ar de  $40^{\circ}C$  e  $V_{ar} = 1,4m/s$ . (a) concentração adimensional de vitamina C (b.s.) em função do tempo de secagem, (—) modelo WLF,  $SSQ=3,54$ . (b) históricos de temperatura e umidade (b.s) do produto.

## Resultados e Discussões



(a)



(b)

Figura 34: Dados experimentais com temperatura fixa do ar de  $70^{\circ}\text{C}$  e  $V_{\text{ar}} = 1,4\text{m/s}$ . (a) concentração adimensional de vitamina C (b.s.) em função do tempo de secagem, (—) modelo WLF,  $\text{SSQ}=1,63$ . (b) históricos de temperatura e umidade (b.s.) do produto.

## Resultados e Discussões

Em relação ao binômio tempo versus temperatura, a degradação do ácido ascórbico mostrou ser muito mais sensível à temperatura do ar. Para as amostras atingirem o mesmo nível de umidade, o aumento da temperatura reduz drasticamente a concentração de vitamina C, mesmo que o produto permaneça menor tempo exposto à fonte de calor.

A soma dos quadrados dos resíduos (SSQ) foi elevada devido à alta dispersão dos dados experimentais ao longo da curva que representa o modelo WLF.

De acordo com a teoria do modelo WLF, os parâmetros da equação (18) deveriam depender somente das propriedades físico-químicas do material, ou seja, um único valor para cada constante deveria ser esperado, independente das condições de secagem. Entretanto, a constante  $C_1$  apresentou variação significativa com um desvio de 47 %, sendo que as demais constantes tiveram uma certa estabilidade em seus valores como mostra a Tabela 12.

Tabela 12: Valores das constantes do modelo WLF para o controle da temperatura fixa no ar de secagem.

| $D_r$ (min)       | $C_1$            | $C_2$            | $T_r$ (K)         |
|-------------------|------------------|------------------|-------------------|
| $200,00 \pm 0,00$ | $0,277 \pm 0,13$ | $30,03 \pm 0,19$ | $180,02 \pm 0,15$ |

A Tabela 13 apresenta os valores de  $C_1$  obtidos para a secagem conduzida com a temperatura fixa no ar, onde foi possível construir uma superfície de resposta em função da temperatura e velocidade do ar ilustrada pela Figura 35. A variável que teve maior influência sobre o parâmetro foi a temperatura do ar e apenas seu efeito linear apresentou nível de significância a 5 %. A degradação de ácido ascórbico durante a secagem de

## Resultados e Discussões

maltodextrina avaliado por FRIAS & OLIVEIRA (2001) e NELSON (1993) mostrou que os desvios padrão dos valores dos parâmetros do modelo WLF foram bem altos, não somente para a constante  $C_1$  como também para os demais parâmetros físicos que representam o modelo –  $C_2$ ,  $D_r$  e  $T_r$ .

Tabela 13: Valores da constante  $C_1$  em função das condições de secagem com temperatura fixa no ar de secagem.

| $T_{ar}$<br>(°C) | $V_{ar}$<br>(m/s) | $C_1$ |
|------------------|-------------------|-------|
| 40,0             | 1,4               | 0,466 |
| 44,3             | 1,0               | 0,387 |
| 44,3             | 1,8               | 0,404 |
| 55,0             | 0,8               | 0,089 |
| 55,0             | 1,4               | 0,344 |
| 55,0             | 2,0               | 0,273 |
| 65,7             | 1,0               | 0,205 |
| 65,7             | 1,8               | 0,156 |
| 70,0             | 1,4               | 0,174 |

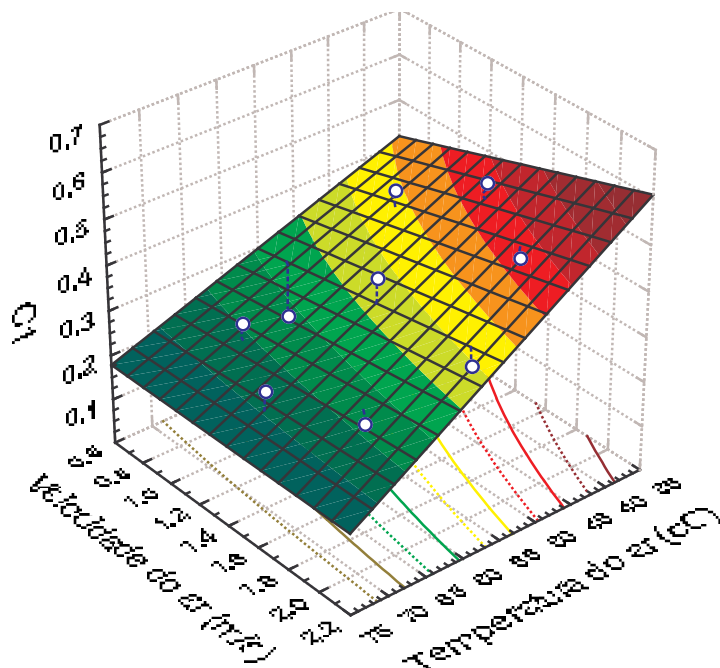


Figura 35: Efeito da velocidade e da temperatura fixa no ar sobre a constante  $C_1$ .

#### 4.5.2 Temperatura Fixa no Interior do Produto

As Figuras 36 e 37 mostram o perfil de degradação de ácido ascórbico e os respectivos dados experimentais para o controle da temperatura fixa no interior do material. Pela Figura 36, que representa os dados de secagem conduzida com temperatura fixa no fruto a 40 °C e velocidade do ar de 1,4 m/s, observa-se que houve uma perda de 55 % do conteúdo inicial de vitamina C para conteúdo de umidade de 1,5 (kg água / kg matéria seca). Após 7 horas de processamento, a temperatura do ar permaneceu abaixo dos 50 °C, sendo que a partir de 23 h do início do ensaio, a temperatura do ar permaneceu praticamente constante e seu valor foi de 45 °C. Estas temperaturas maiores do ar quando

## Resultados e Discussões

comparadas com temperatura fixa no ar em 40 °C (Figura 33) levaram a uma maior degradação do ácido ascórbico.

A temperatura fixa no fruto a 52,8 °C e velocidade do ar de 1,0 m/s intensificou a degradação de vitamina C, chegando a um conteúdo de umidade final de 1,5 (kg água / kg matéria seca) com apenas 10 % do teor de vitamina C inicial. Este valor foi muito próximo à concentração do nutriente retida nos frutos secos em temperatura do ar fixa em 70 °C e velocidade de 1,4 m/s (Figura 34). Apesar da temperatura inicial do ar de secagem ter sido muito alta (110 °C), após 9 horas de secagem a temperatura do ar já estava abaixo de 70 °C, sendo gradualmente reduzida e se estabilizando por volta de 61 °C a partir de 31 horas do início do ensaio.

## Resultados e Discussões

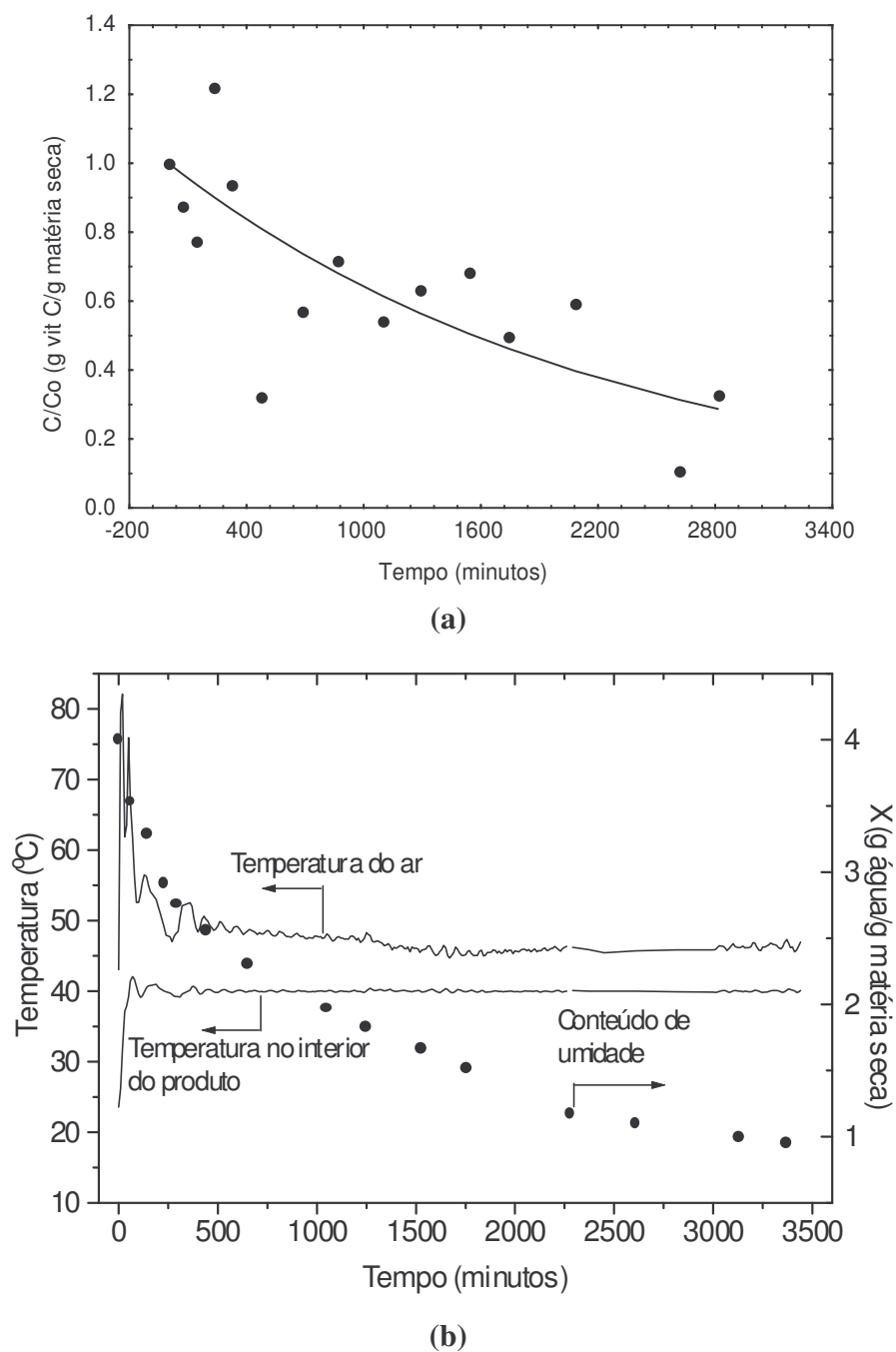


Figura 36: Dados experimentais com temperatura fixa no interior do produto de  $40^{\circ}\text{C}$  e  $V_{\text{ar}} = 1,4\text{m/s}$ . (a) concentração adimensional de vitamina C (b.s.) em função do tempo de secagem, (—) modelo WLF,  $SSQ = 6,62$ . (b) históricos de temperatura e umidade (b.s.) do produto.

## Resultados e Discussões

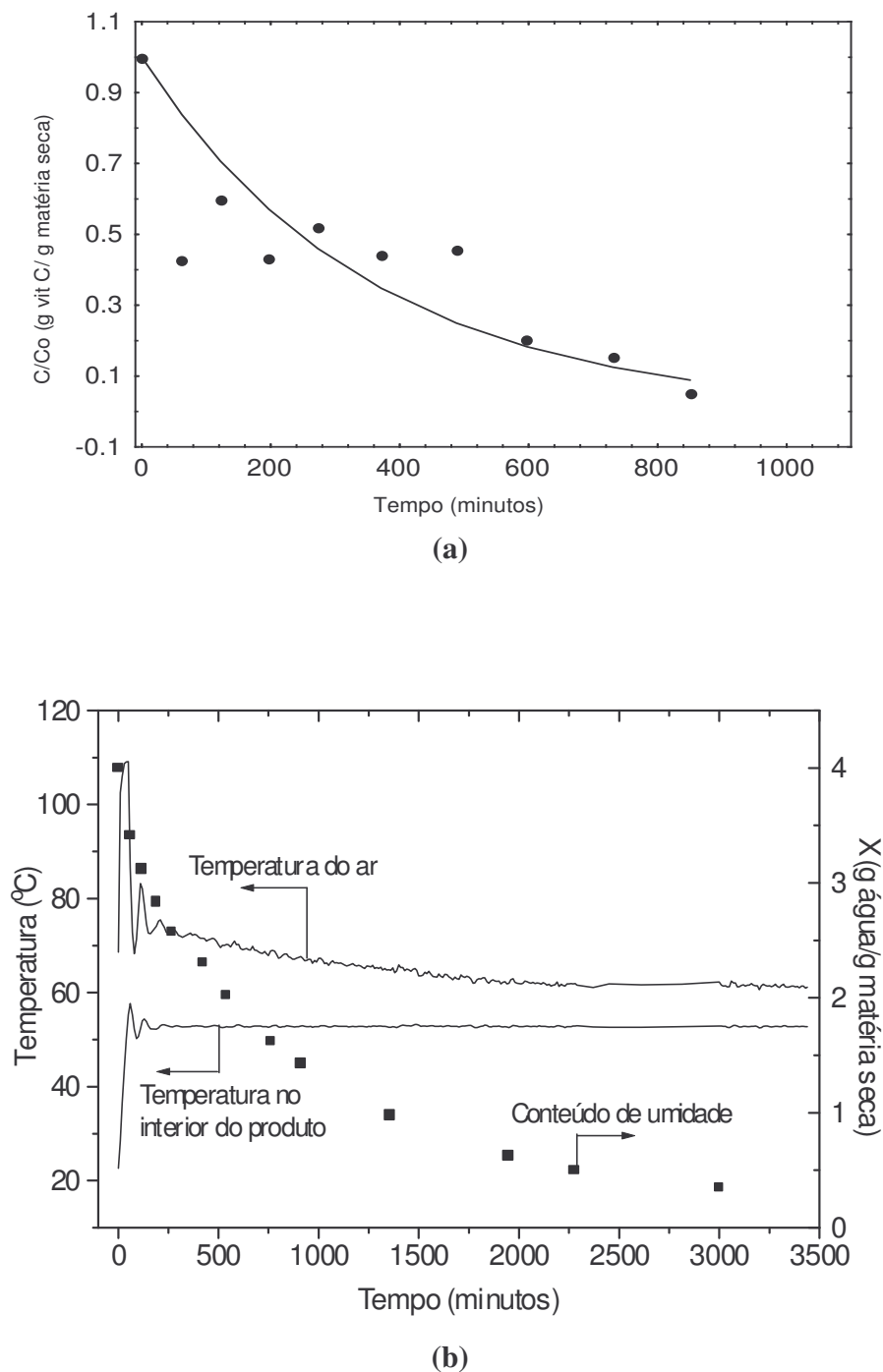


Figura 37: Dados experimentais com temperatura fixa no interior do produto de  $52,8^{\circ}\text{C}$  e  $V_{\text{ar}} = 1,0 \text{ m/s}$ . (a) concentração adimensional de vitamina C (b.s.) em função do tempo de secagem, (—) modelo WLF,  $\text{SSQ}=1,96$ . (b) históricos de temperatura e umidade (b.s.) do produto.

## Resultados e Discussões

Os valores das constantes do modelo WLF, considerando o sistema com controle da temperatura fixa no interior do fruto, são apresentados na Tabela 14. Praticamente foram os mesmos valores encontrados com o controle da temperatura fixa no ar de secagem, estando assim, de acordo com a hipótese do modelo, no qual leva em consideração que os parâmetros  $C_1$  e  $C_2$  deveriam variar somente com o sistema, ou seja, com as características físico-químicas da matéria-prima.

Tabela 14: Valores das constantes do modelo WLF para o controle da temperatura fixa no interior do produto.

| Dr (min)          | $C_1$            | $C_2$            | Tr (K)            |
|-------------------|------------------|------------------|-------------------|
| $200,00 \pm 0,00$ | $0,212 \pm 0,07$ | $29,91 \pm 0,09$ | $179,93 \pm 0,07$ |

Da mesma forma para o controle da temperatura fixa no ar, o desvio padrão da constante  $C_1$  também foi o mais alto, embora menos que o apresentado na Tabela 12, e seus valores nas diversas condições operacionais para a secagem, conduzida com a temperatura fixa no interior do produto, são listados na Tabela 15. De acordo com a avaliação do grau de significância das variáveis em conjunto com a superfície de resposta (Figura 38), apenas a influência linear da temperatura interna do material teve efeito sobre os valores de  $C_1$  ( $p < 0,05$ ). A mesma tendência dos valores do parâmetro  $C_1$  com o controle da temperatura fixa no ar de secagem pode ser observada neste outro sistema de controle, sendo  $C_1$  inversamente proporcional às temperaturas. Apesar da velocidade do ar não apresentar efeito significativo, observa-se que um aumento desta variável leva a uma diminuição dos valores de  $C_1$  para o controle da temperatura fixa no produto.

## Resultados e Discussões

Tabela 15: Valores da constante  $C_1$  em função das condições operacionais para secagem com temperatura fixa no interior do produto.

| $T_{\text{produto}}$<br>(°C) | $V_{\text{ar}}$<br>(m/s) | $C_1$ |
|------------------------------|--------------------------|-------|
| 40,0                         | 1,4                      | 0,350 |
| 42,1                         | 1,0                      | 0,281 |
| 42,1                         | 1,8                      | 0,186 |
| 47,5                         | 0,8                      | 0,271 |
| 47,5                         | 1,4                      | 0,170 |
| 47,5                         | 2,0                      | 0,224 |
| 52,8                         | 1,0                      | 0,156 |
| 52,8                         | 1,8                      | 0,151 |
| 55,0                         | 1,4                      | 0,120 |

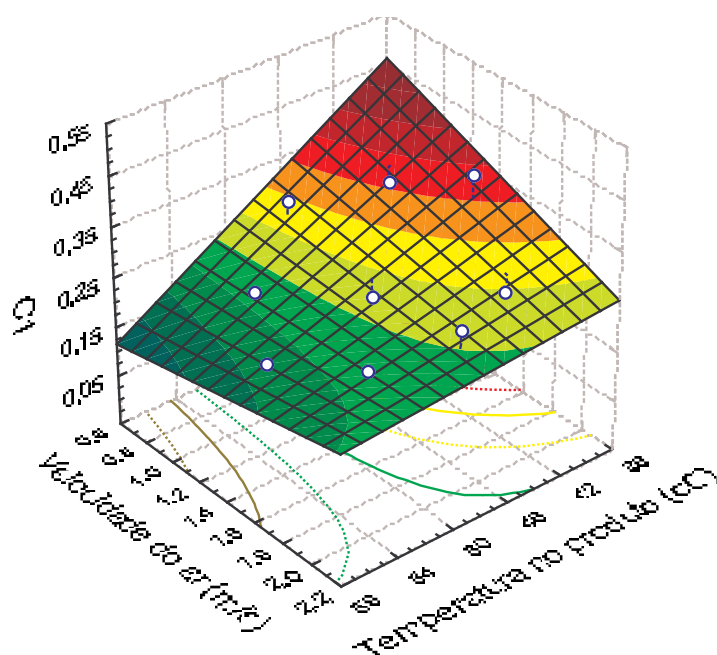


Figura 38: Efeito da velocidade do ar e da temperatura fixa no interior do produto sobre a constante  $C_1$ .

## 4.6 CONSUMO ENERGÉTICO

### 4.6.1 Temperatura Fixada no Ar de Secagem

Para este sistema de controle, a temperatura do ar de secagem permaneceu constante no decorrer dos ensaios de secagem, e, apesar da temperatura ambiente ter alcançado certas flutuações, para efeito de cálculo foi razoável considerá-la também constante e seu valor médio foi de 25 °C. Uma vez que a vazão mássica ( $\dot{m}$ ) e o calor específico ( $c_p$ ) do ar de secagem permaneceram fixos nas condições testadas, a energia elétrica (W) consumida pode ser calculada pela equação (22) reescrita na forma da equação (32):

$$W = \frac{\dot{m} c_{p_{ar}} (T_{ar} - T_{amb}) t}{0,80} \quad (32)$$

De acordo com ABIA (1999), a legislação para frutas secas estabelece que o conteúdo de umidade para sua comercialização seja de 20 % (b.u.). Seguindo este critério, os valores calculados para o consumo de energia elétrica fornecidos pela equação (32) foram baseados no tempo de secagem para que as amostras atingissem este conteúdo de umidade final e são apresentados na Tabela 16. Com base nestes resultados, pôde-se construir uma superfície de resposta do consumo de energia em função das condições operacionais como mostra a Figura 39.

## Resultados e Discussões

Tabela 16: Consumo de energia em função das condições operacionais para secagem conduzida com a temperatura fixa no ar.

| $T_{ar}$<br>(°C) | $V_{ar}$<br>(m/s) | Energia<br>(MJ) |
|------------------|-------------------|-----------------|
| 40,0             | 1,4               | 680,24          |
| 44,3             | 1,0               | 585,04          |
| 44,3             | 1,8               | 1091,92         |
| 55,0             | 0,8               | 586,58          |
| 55,0             | 1,4               | 922,63          |
| 55,0             | 1,4               | 871,46          |
| 55,0             | 2,0               | 794,64          |
| 65,7             | 1,0               | 593,90          |
| 65,7             | 1,8               | 788,24          |
| 70,0             | 1,4               | 908,40          |

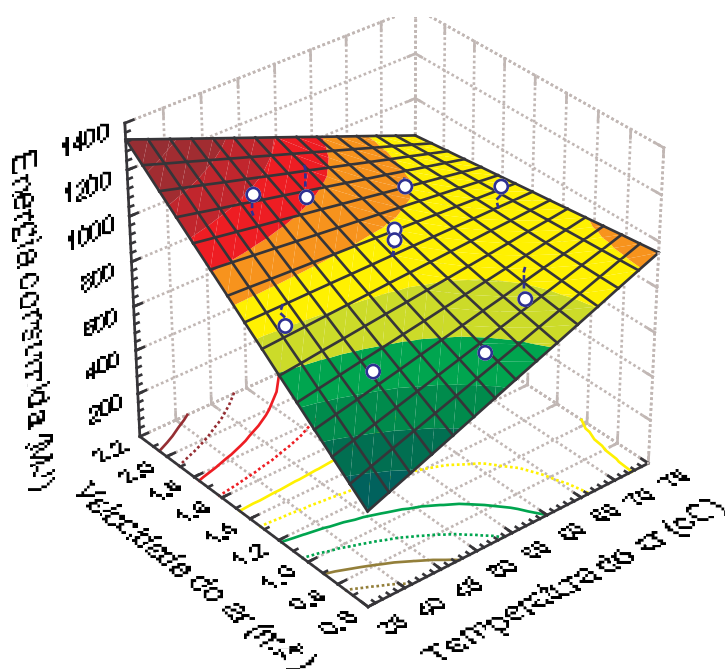


Figura 39: Efeito da velocidade e da temperatura fixa no ar sobre a energia elétrica consumida.

## Resultados e Discussões

A partir da avaliação do grau de significância das variáveis independentes relacionadas na Figura 39, apenas o efeito linear da velocidade do ar foi significativo ao nível de 5 %. Pela mesma figura é possível observar que em temperaturas baixas, o aumento da velocidade do ar conduz a um aumento acentuado do consumo de energia. Para temperaturas do ar mais altas, a velocidade pouco influi na resposta da energia consumida.

### ***4.6.2 Temperatura Fixa no Interior do Produto***

Com o controle da temperatura fixa no interior do material, a equação (21) não pode ser aplicada diretamente para se obter a energia térmica, pois a temperatura do ar de secagem não permanece constante ao longo da secagem. Assim, a energia térmica necessária para evaporar a água do sólido em um determinado tempo de secagem pode ser calculada de acordo com a equação (33):

$$Q = \dot{m} c_{p_{ar}} \int_0^t T_{ar}(t) dt - \dot{m} c_{p_{ar}} T_{amb} \quad (33)$$

onde o valor da integral  $\int_0^t T_{ar}(t) dt$  foi obtido pelos históricos de temperaturas.

A energia elétrica (W) consumida neste sistema de controle foi calculada substituindo a equação (33) na equação (22):

$$W = \frac{\dot{m} c_{p_{ar}} \int_0^t T_{ar}(t) dt - \dot{m} c_{p_{ar}} T_{amb} t}{0,80} \quad (34)$$

Para o controle da temperatura fixa no interior do fruto, o consumo energético das resistências elétricas foi obtido a partir da equação (34) fixando-se o tempo necessário para

## Resultados e Discussões

que as amostras atingissem um conteúdo de umidade de 20 % (b.u.) e, seus valores são apresentados na Tabela 17 para cada condição experimental. Da mesma forma, foi obtida uma superfície de resposta em função das condições operacionais e seu resultado é mostrado na Figura 40.

Tabela 17: Consumo de energia em função das condições operacionais para secagem a temperatura fixa no interior do produto.

| T <sub>produto</sub><br>(°C) | V <sub>ar</sub><br>(m/s) | Energia<br>(MJ) |
|------------------------------|--------------------------|-----------------|
| 40,0                         | 1,4                      | 448,37          |
| 42,1                         | 1,0                      | 461,93          |
| 42,1                         | 1,8                      | 715,10          |
| 47,5                         | 0,8                      | 412,65          |
| 47,5                         | 1,4                      | 630,97          |
| 47,5                         | 2,0                      | 847,45          |
| 52,8                         | 1,0                      | 506,26          |
| 52,8                         | 1,8                      | 765,21          |
| 55,0                         | 1,4                      | 554,90          |

Como avaliado para o controle da temperatura fixa no ar de secagem, apenas o efeito linear da velocidade do ar foi significativo ( $p < 0,05$ ) sobre o consumo energético. Pode-se observar pela Figura 40 que em qualquer faixa de temperatura testada no interior do produto, o aumento da velocidade do ar conduz a um consumo de energia maior.

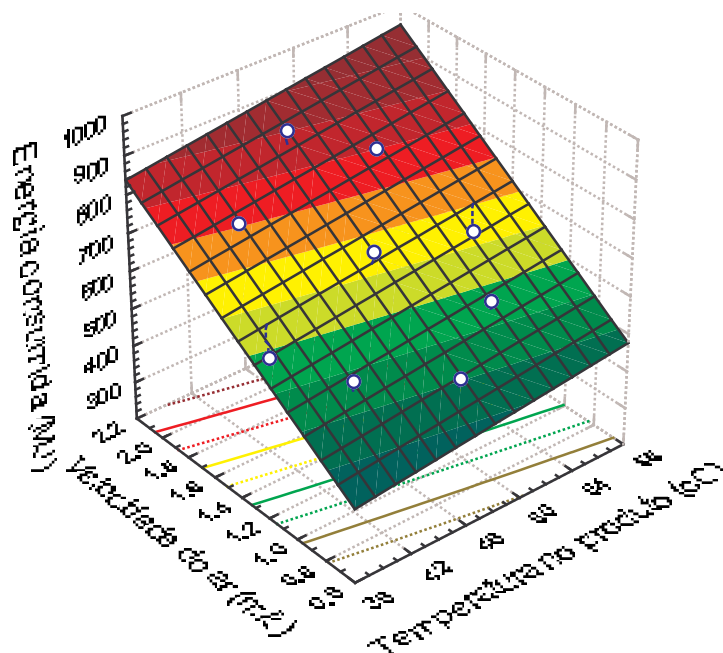


Figura 40: Efeito da temperatura no interior do produto e da velocidade do ar sobre a energia elétrica consumida.

Dentre as condições testadas para o controle da temperatura fixa no interior do produto observa-se que, das nove condições experimentais ditadas pelo planejamento fatorial, cinco tiveram o consumo energético abaixo do consumo mínimo encontrado para o controle da temperatura fixa no ar de secagem (585,04 MJ). Este resultado leva a concluir que a estratégia de controle empregando a temperatura fixa no interior do produto é uma alternativa vantajosa em relação a economia do processo, uma vez que o gasto com energia é o fator econômico mais oneroso. A secagem conduzida com velocidades do ar mais baixas deve reduzir ainda mais o custo do processo sem afetar a qualidade do produto final, já que, em todos os testes de qualidade, a velocidade do ar não teve efeito significativo em sua resposta dentro da faixa estudada, inclusive na cinética de secagem.

## 5. CONCLUSÕES

O encolhimento em função do conteúdo de umidade apresentou uma relação linear e foi essencialmente independente das velocidades do ar e das temperaturas, inclusive dos controles.

O ajuste da solução analítica da segunda lei de Fick para uma esfera, o qual desconsidera o encolhimento e assume a difusividade efetiva constante, resultou em maiores desvios dos dados experimentais, por esta razão foram considerados o encolhimento e o coeficiente de difusão como função do conteúdo de umidade, e as curvas de secagem puderam ser adequadamente descritas, levando a concluir que essas considerações são fundamentais para se obter bons resultados na simulação de processos de secagem de caquis.

A difusividade efetiva foi correlacionada com as variáveis de processo e, pela avaliação de uma superfície de resposta, ambas variáveis – temperatura e velocidade do ar de secagem – tiveram um efeito significativo ( $p < 0,05$ ) para o controle da temperatura fixa no ar de secagem. Para o controle da temperatura fixa no interior do produto, apenas o efeito linear da temperatura foi significativo ao nível de 5% sobre a difusividade efetiva.

Os índices de reidratação do produto seco tiveram uma uniformidade na resposta entre os controles com a temperatura fixa no ar e no interior do fruto, mostrando nenhuma diferença significativa. Neste caso, a capacidade de reidratação de caquis secos não deve ser considerada como um indicativo seguro da qualidade do produto.

O modelo de Maxwell generalizado foi satisfatoriamente aplicado às curvas de relaxação e, de um modo geral, os parâmetros tempo de relaxação e tensão de equilíbrio aumentaram com o aumento das temperaturas e velocidade do ar, bem como para atividade de água mais baixas. Apenas o efeito linear da temperatura, em ambas as estratégias de controle, foi significativo ( $p < 0,05$ ) sobre os parâmetros viscoelásticos.

Apesar da dispersão dos dados experimentais do conteúdo de vitamina C, devido à heterogeneidade das amostras, um modelo baseado na cinética WLF (Williams-Landel-Ferry), que correlaciona a temperatura de transição vítrea como indicador da mobilidade molecular, foi ajustado com sucesso. A degradação do nutriente foi fortemente influenciada pela temperatura, sendo que nos processos conduzidos com temperaturas mais elevadas, o conteúdo de ácido ascórbico foi reduzido a uma concentração praticamente nula.

Apenas a contribuição da velocidade do ar foi significativa no consumo energético. Este resultado deixa claro que o processo de secagem de caqui conduzido com velocidades do ar mais baixa requer menos energia, sem interferir na qualidade da fruta seca, uma vez nos testes de qualidade, esta variável não apresentou efeito significativo. Dentre as condições testadas para o controle da temperatura fixa no interior do produto, observa-se que, das nove condições experimentais ditadas pelo planejamento fatorial, cinco tiveram o consumo energético abaixo do consumo mínimo encontrado para o controle da temperatura fixa no ar de secagem.

## **6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- 1) Modelagem da cinética de secagem de caqui considerando o encolhimento, através de solução numérica para as equações diferenciais de transferência de calor e massa.
- 2) Estudo da coloração do caqui seco submetido em ambas as estratégias de controle – temperatura fixa no ar de secagem e temperatura fixa no interior do produto.
- 3) Avaliação sensorial, procurando correlacionar a textura e a coloração com os resultados obtidos pelas medidas instrumentais.
- 4) Aprofundar os estudos com a temperatura fixa no interior do produto, através do monitoramento e da avaliação da temperatura da superfície. Em conjunto, propor um sistema de controle MISO com o objetivo de ponderar o alcance de temperaturas elevadas na superfície.



## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIA, Associação Brasileira das Indústrias da Alimentação. **Compêndio da legislação de alimentos**: consolidação das normas e padrões de alimentos. 7<sup>a</sup> rev. São Paulo. Vol. 1/A (2 Tomos – Tomo II): 7.5(78), 1999.

AKINYELE, I.O.; KESHINRO, O.O.; AKINNAWO, O.O. Nutrient losses during and after processing of pineapples and oranges. **Food Chemistry**, 37(3): 181-188,1990.

ALVARADO, J. D.; VITERI, N. P. Efecto de la temperatura sobre la degradacion aeróbica de vitamina C em jugos de frutas cítricas. **Archivos Latinoamericanos de Nutricion**, 39(4): 601-612, 1989.

ALVES-FILHO, O.; STRØMMEN, I. The application of heat pump in drying of biomaterials. **Drying Tecnology**, 14(9): 2061-2090, 1996.

AZZOUS, S.; GUIZANI, A.; JOMAA, W.; BELGHITH, A. Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. **Journal of Food Engineering**, 55: 323-330, 2002.

BAGLEY, E.B.; CHRISTIANSON, D.D. Measurement and interpretation of rheological properties of food. *Food Technology-Chicago*, 41(3):96-99, 1987.

BENASSI, M.T.; ANTUNES, A.J. A comparison of meta-phosphoric and oxalic acids as extractant solutions for the determination of vitamin C in selected vegetables. **Arquivos de Biologia e Tecnologia**, 34(4): 507-513, 1988.

BOUDHRIOUA, N.; MICHON, C.; CUVELIER, G.; BONAZZI, C. Influence of ripeness and air temperature on changes in banana texture during drying. **Journal of Food Engineering**, 55: 115-121, 2002.

BOX, G.E.P.; HUNTER, W.G.; HUNTER, J.S. **Statistics for experimenters: an introduction to design, data analysis and model building**. John Wiley, New York, 653p, 1978.

BROECK, V.; LUDI KHUYZE, L.; WEEMAES, C; VAN LOEY, A.; HENDRICKX, M. Kinetics for isobaric-isothermal degradation of L-ascorbic acid. **Journal Agricultural and Food Chemistry**, 46: 2001-2006, 1998.

BUITINK, J.; HEMMINGA, M.A.; HOEKSTRA, F.A. Characterization of molecular mobility in seed tissues: an electron paramagnetic resonance spin probe study. **Biophysical Journal**, 76(6): 3315-3322, 1999.

CAQUIS SUYNAN. Homepage Service: [www.caqui.agr.br/ramaforte.html](http://www.caqui.agr.br/ramaforte.html), 2001.

CHAUDRY, M.A.; BIBI, N.; KHAN, F.; SATTAR, A. Phenolics and quality of solar cabinet dried persimmon during storage. **Italian Journal of Food Science**, 10(3): 269-275, 1998.

CHIRIFE, J. Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods. In: **Advances in drying**, ed. Arum S. Mujundar, Hemisphere Publishing Corporation. Washington, 73-102, 1983.

CHUA, K. J.; HAWLADER, N. A.; CHOU, S. K.; HO, J. C. On the study of time-varying temperature drying – effect on drying kinetics and product quality. **Drying Technology**, 20(8): 1559-1577, 2002.

COELHO, E.M.; FARONI, L.R.D.; BERBERT, P.A.; MARTINS, J.H. Eficácia da mistura dióxido de carbono-fosfina no controle de *Sitophilus zeamais* em função do período de exposição. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 4(2):227-234, 2000.

COHEN, J.S.; YANG, T.C.S. Progress in food dehydration. **Trends in Food Science & Technology**, 6: 20-25. 1995.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. Pergamon Press, Oxford, 1975.

DEMIREL, D.; TURHAN, M. Air-drying behavior of Dwarf Cavendish and Gros Michel banana slices. **Journal of Food Engineering**, 59:1-11, 2003.

- EL-AOUAR, A. A.; AZOUBEL, P. M.; MURR, F. E. X. Drying kinetics of fresh and osmotically pre-treated papaya (*Carica papaya* L.). **Journal of Food Engineering**, 59: 85-91, 2003.
- ERRINGTON, N.; MITCHELL, J. R.; TUCKER, G. A. Changes in the force relaxation and compression responses of tomatoes during ripening: the effect of continual testing and polygalacturonase activity. **Postharvest Biology and Technology**, 11:141-147, 1997.
- FENNEMA, O.R. Loss of vitamins in fresh and frozen foods. **Food Technology**, 31(12): 32, 1977.
- FRÍAS, J.M.; OLIVEIRA, J.C. Kinetic model of ascorbic acid thermal degradation during hot air drying of maltodextrin solutions. **Journal of Food Engineering**, 47: 255-262, 2001.
- GABAS, A. L.; MENEGALLI, F. C.; FERRARI, F.; TELIS-ROMERO, J. Influence of drying conditions on the rheological properties of prunes. **Drying Technology**, 20(7): 1485-1502, 2002.
- GABAS, A. L.; MENEGALLI, F. C.; TELIS-ROMERO, J. Determination of concentration-dependent effective moisture diffusivity os plums based on shrinkage kinetics. *In: Transport Phenomena in Food Processing*, pp.153-168, 2003a.
- GABAS, A. L.; TELIS-ROMERO, J.; MENEGALLI, F. C. Cinética de degradação do ácido ascórbico em ameixas liofilizadas. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, 23: 66-70, 2003b.
- GABAS, A.L.; TELIS-ROMERO, J.; MENEGALLI, F.C. Thermodynamic models for water sorption by grape skin and pulp. **Drying Technology**, 17(4-5):961-974, 1999.
- GAMERO, M.; FISZMAN, S. M.; DURÁN, L. Stress relaxation of fruit gels. Evaluation of models and effects of composition. **Journal of Food Science**, 58(5): 1125-1134, 1993.

GORINSTEIN, S.; KULASEK, G. W.; BARTNIKOWSKA, E.; LEONTOWICZ, M.; ZEMSER, M.; MORAWIEC, M.; TRAKHTENBERG, S. The effects of diets, supplemented with either whole persimmon or phenol-free persimmon, on rats fed cholesterol. **Food Chemistry**, 70: 303-308, 2000.

HATAMIPOUR, M.S.; MOWLA, D. Shrinkage of carrots during drying in an inert medium fluidized bed. **Journal Food Engineering**, 55: 247-252, 2002.

HOLDSWORTH, S.D. Dehydration o food products. A review. **Journal of Food Technology**, 6: 331-370, 1971.

IEA. Home Page Service : [www.iea.sp.gov.br](http://www.iea.sp.gov.br), 2004

ISHII, Y.; YAMANISHI, T. The changes of soluble tanin and free sugars of astringet persimmon in the process of sun drying. **Journal Japan Society Food Science**, 29(12):720-723, 1982.

JAYARAMAN, K.S.; DAS GUPTA, D.K. Dehydration of fruits and vegetables - recent developments in principles and techniques. **Drying Technology** ,10(1): 1-50, 1992.

KALRA, C. L.; BEERH, O.P.; MANAN, J.K.; TEOTIA, M.S.; SHARMA, T.C. Studies of the influence of cultivars on the quality of dehydrated onion (*Allium cepa linn.*). **Indian Food Packer**, 40(4): 20-27. 1986.

KARTHANOS, V. T.; VILLALOBOS, G.; SARAVACOS, G. D. Comparison of two methods of effective moisture diffusivity from drying data. **Journal Food Science**, 55(1): 218-231, 1990.

KERR, W. L.; LIM, M. H.; REID, D. S.; CHEN, H. Chemical reaction kinetics in relation to glass transition temperatures in frozen food polymer solutions. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 61:51, 1993.

KOMIYAMA, Y.; TSUJI, M. Invertase activity in sufur fumigated dried persimmon with special reference to sugar composition during sun-drying. **Journal Japan Society Food Science**, 34(6): 376-379, 1987.

KROKIDA, M. K.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Viscoelastic behaviour of dehydrated carrot and potato. **Drying Technology**, 16(3-5): 687-703, 1998.

LEVI, A.; BEN-SHALOM, N.; PLAT, D; REID, D. S. Effect of blanching and drying on pectin constituents and related characteristics of dehydrated peaches. **Journal of Food Science**, 53: 1187-1190. 1998.

LEWICKI, P. P.; LUKASZUK, A. Changes of rheological properties of apple tissue undergoing convective drying. **Drying Technology**; 18(3): 707-722, 2000.

LEWICKI, P. P.; WOLF, W. Rheological properties of raisins: Part II. Effect of water activity. **Journal of Food Engineering**, 26: 29-43, 1995.

LEWICKI, P.P. Some remarks on rehydration of dried foods. **Journal of Food Engineering**, 36: 81-87, 1998.

LOZANO, J.E.; ROTSTEIN, E.; URBICAIN, M.J. 1983. Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents. **Journal of Food Science**, 48: 1497-1502, 1983.

MADAMBA, P.S.; DRISCOL, R.H.; BYCKLE, K.A. Shrinkage, density and porosity of garlic during drying. **Journal of Food Engineering**; 23(3): 309-319; 1994.

MARDER, R.C.; SCHOEMAKER, A. The solar drying of persimmon fruits in Pakistan. **Tropical Science**, 35: 93-102, 1995.

MOHSENIN, N. **Physical properties of plant and animal materials**. 2<sup>th</sup> ed, London: Gordon and Breach, pp. 650-700, 1986.

MUJUMDAR, A. S.; KEEY, R. B. **Short course on industrial drying** – course notes. Department of Chemical Engineering, MCGILL University, Montreal, Quebec, Canada, 1978.

- NELSON, K. A. **Using the glass transition approach for understanding chemical reaction rates in model food system**. PhD. Dissertaion, Minnesota University, USA, 1993.
- NELSON, K. A.; LABUZA, T. P. Water activity and food polymer science: implications of state on Arrhenius and WLF models in predicting shelf life. **Journal of Food Engineering**, 22: 271, 1994.
- NICOLETI, J.F.; TELIS-ROMERO, J.; TELIS, V.R.N. Air-drying of fresh and osmotically pre-treated pineapple slices: fixed air temperature versus fixed slice temperature drying kinetics. **Drying Technology**, 19(9): 2175-2191, 2001a.
- NICOLETI, J.F.; TELIS-ROMERO, J.; TELIS, V.R.N. Rehydration and shrinking behavior of dried pineapple. *In: Proceedings of the Second Inter-American Drying Conference*, Ed. K. Waliszewski, pp. 253-262, Instituto Tecnológico de Veracruz, Veracruz, 2001b.
- NIJHUIS, H.H.; TORRINGA, E.; LUYTEN, H.; RENÉ, F.; JONES, P.; FUNEBO, T.; OHLSSON, T. Research needs and opportunities in the dry conservation of fruits and vegetables. **Drying Technology**, 14(6): 1429-1457, 1996.
- NODEN, D. Trend towards use of dispersion dryers. **Chemical and Process Engineering**, 58: 48-52, 1972.
- OGWAL, M.; DAVIS, D.R. Rapid rehydration method for dried beans. **Journal of Food Science**, 59:611-612, 1994.
- PAN, Y. K.; ZHAO, L. J.; HU, W. B. The effect of tempering-intermittent drying on quality and energy of plant material. **Drying Technology**, 17(9): 1795-1812, 1999.
- PAPPAS, G.; RAO, V. N. M. Effects of temperature and moisture content on the viscoelastic behavior of cowpeas. **Journal of Texture Studies**, 20: 393-407, 1989.
- PARK, K. J.; BIN, A.; BROD, F. P. R. Drying of pear d'Anjou with and without osmotic dehydration. **Journal of Food Engineering**, 56: 97-103, 2003.

PARRY, J.L. Mathematical modelling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying: a review. **Journal of Agricultural Engineering Research**, 32: 1-29, 1985.

PELEG, M.; NORMAND, M. D. Comparasion of two methods for stress relaxation data presentatration of solid foods. **Rheological Acta**, 22: 108-113, 1983.

PRADO, M.E.T.; CHANDRA, P.K.; BICALHO, U.O. Desenvolvimento de um modelo matemático para estimar a degradação de vitamina C durante o armazenamento de alimentos de umidade intermediária. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, 15(2): 138-143, 1995.

RAGHAVAN, G. S. V. Concentration dependent moisture diffusivity in dryng of shrinkable commodities. Proc. **IDS'94**. Vol A: 277-284, 1994.

RAGHAVAN, G.S.V.; TULASIDAS, T.N.; SABLANI, S.S.; RAMASWAMY, H.S. A method of determination of concentration dependent effective moisture diffusivity. **Drying Technology**, 13(5-7): 1477-1488, 1995.

RAO, V. N. M. **Classification, description and measurement of viscoelastic properties of solid foods**. In M.A. Rao, & J.F. Steffe. Viscoelastic properties of foods (pp. 3-47). New York: Elsevier Science Publishers, 1992.

RATTI, C. Shrinkage during drying of foodstuffs. **Journal of Food Engineering**, 23(1): 91-105, 1994.

ROSSI, S. J. **Desenvolvimento e avaliação de uma bomba de calor usada no condicionamento de ar para secagem de alimentos**. Doctor Thesis, Unicamp. p.214, 1993.

SAPUTRA, D.; PAYNE, F.A.; CORNELIUS, P.L. Puffing dehydrated bell peppers with carbon dioxide. **Transactions of the ASAE**, 3492:475-480, 1991.

SARAVACOS, G.D.; RAOUZEOS, G.S. **Diffusivity of moisture in air drying of raisins.** In: Drying 86, ed. Arum S. Mujumdar, Hemisphere Publishing Corporation, 2: 486-491, 1986.

SHOEMAKER, C. F.; FIGONI, P. I. Time dependent rheological behavior of foods. **Food Technology**, 38(3):110, 1984.

SINGH, R.K.; LUND, D.B. **Kinetics of ascorbic acid degradation in stored intermediate moisture apples.** In B.M. Mackenna (Ed.), Proceedings of the 3<sup>th</sup> International Congress on Engineering and Food. Vol.1: Engineering Sciences in the Food Industry. Amsterdam, 1984.

SOBRAL, P.J.A.; TELIS, V.R.N.; HABITANTE, A.M.Q.B. Phase diagram for freeze-dried persimmon. **Thermochimica Acta**, 376: 83-89, 2001.

STATSOFT, Inc. **STATISTICA for Windows** [Computer program manual]. Tulsa, OK, 1995.

STEFFE, J. F. **Viscoelasticity in rheological methods in food process engineering** (pp. 294-348), East Lansing: Freeman Press, 1996.

SUAREZ, C.; VIOLLAZ, P. A. Shrinkage on drying behavior of potato slabs. **Journal of Food Technology**, 13: 103-104, 1991.

TABEIDIE, Z.; PAYNE, F.A.; CORNELIUS, P.L. Puffing potato pieces with CO<sub>2</sub>. **Transactions of the ASAE**, 35(6):1935-1940, 1992.

TAIRA, S.; KIMURA, Y.; WATANABE, S. 1. Studies on removal of astringency during drying of japanese persimmon (*Diospyros kaki*) fruit after peeling. 2. Effect of harvest maturity on removal of astringency during sun drying of japanese persimmon (*Diospyros kaki*) hiratanenashi fruit after peeling. **Journal Japan Society Food Science**, 35(8): 528-533, 1988.

TELIS, V. R. N.; GABAS, A. L.; MENEGALLI, F. C.; TELIS-ROMERO, J. Water sorption thermodynamic properties applied to persimmon skin and pulp. **Thermochimica Acta**, 343(1-2): 49-56, 2000.

TELIS-ROMERO, J.; GABAS, A.L.; MENEGALLI, F.C.; TELIS, V.R.N. Drying of persimmon: mathematical model for diffusivity as a simultaneous function of moisture content and shrinkage. In: **Proceedings of the Second Inter-American Drying Conference**. Ed. K. Waliszewski. pp. 243-251, Instituto Tecnológico de Veracruz, Veracruz, 2001.

TOGRUL, I.T.; PEHLIVAN, D. Modeling of drying kinetics of single apricot. **Journal of Food Engineering**, 58: 23-32, 2003.

TSUJI, M.; KOMIYAMA, Y. Influences of the sulfur amount on quality, chemical-components and alcohol-dehydrogenase and invertase activities in sulfur fumigated astringent persimmon fruit during sun-drying. **Journal Japan Society Food Science**, 35(10): 678-683, 1988.

UDDIN, M.S.; HAWLADER, M.N.A.; DING, L.; MUJUMDAR, A.S. Degradation of ascorbic acid in dried guava during storage. **Journal of Food Engineering**, 51(1): 21-26, 2002.

USDA. Homepage Service: [www.nal.usda.gov/fnic/foodcomp](http://www.nal.usda.gov/fnic/foodcomp). 2004.

VACAREZZA, L.J.; LOMBARDI, J.L.; CHIRIFE, J. Kinetics of moisture movement during air drying of sugar beet root. **Journal of Food Technology**, 9: 317-327, 1974.

VAGENAS, G.K.; MARINOS-KOURIS, D.; SARAVACOS, G.D. An analysis of mass transfer in air-drying of foods. **Drying Technology**, 8: 323-342, 1990.

VAN ARSDEL, W.B.; COPLEY, M.J.; MORGAN, A.I.Jr. **Food Dehydration**, vols. 1 e 2, 2<sup>nd</sup> ed., AVI Publishing Co. Inc., Westport, Connecticut, 1973.

VIEIRA, M.C.; TEIXEIRA, A.A.; SILVA, C.L.M. Mathematical modeling of the thermal degradation kinetics of vitamin C in cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) nectar. **Journal of Food Engineering**, 43: 1-7, 2000.

VIEIRA, M.C.; TEIXEIRA, A.A.; SILVA, C.L.M. Kinetic parameters estimation for ascorbic acid degradation in fruit nectar using the partial equivalent isothermal exposures (PEIE): method under non-isothermal continuous heating conditions. **Biotechnology Progress**, 17:175-181, 2001.

VLIET, T. V. **Rheological classification of foods and instrumental techniques for their study** (pp.65-97). In A. J. Rosenthal. Food Texture - measurement and perception. Aspen Publishers, Inc, 1999.

VOEGEL-TURENNE, C.; BENAMMAR, S.; ALLAF, K. 2001. Evolution of the mechanical, textural and rheological characteristics of the granny smith apple during drying. **Sciences des Aliments**, 21(1): 27-34, 2001.

YAMASHITA, F.; BENASSI, M.T.; KIECKBUSCH, T.G. Effect of modified atmosphere packaging on kinetics of vitamin C degradation in mangos. **Brazilian Journal of Food Technology**, 2:127-130, 1999.

## ANEXOS

**ANEXO I:** Históricos de temperaturas para o controle da temperatura fixa interior do produto.

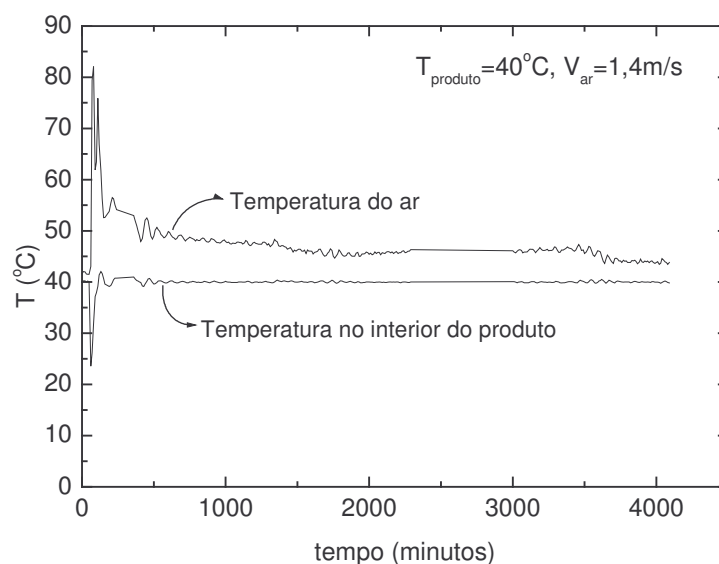


Figura 41: Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no interior do produto de  $40^{\circ}\text{C}$  e velocidade do ar de  $1,4\text{ m/s}$ .

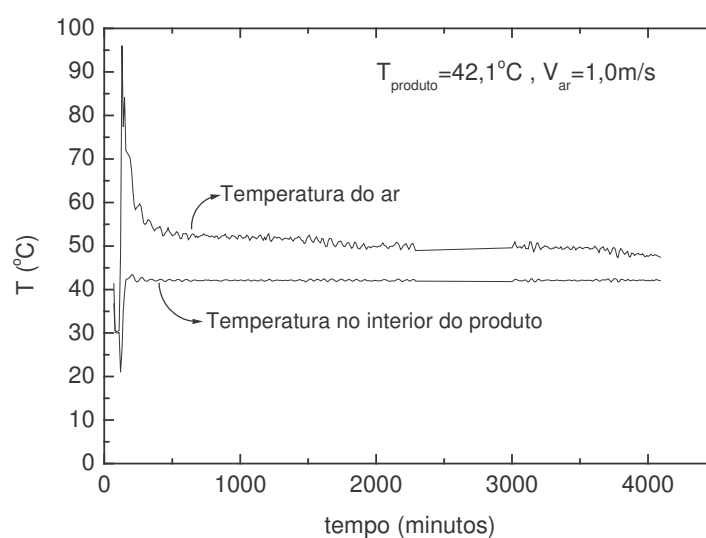


Figura 42: Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no interior do produto de  $42,1^{\circ}\text{C}$  e velocidade do ar de  $1,0\text{ m/s}$ .

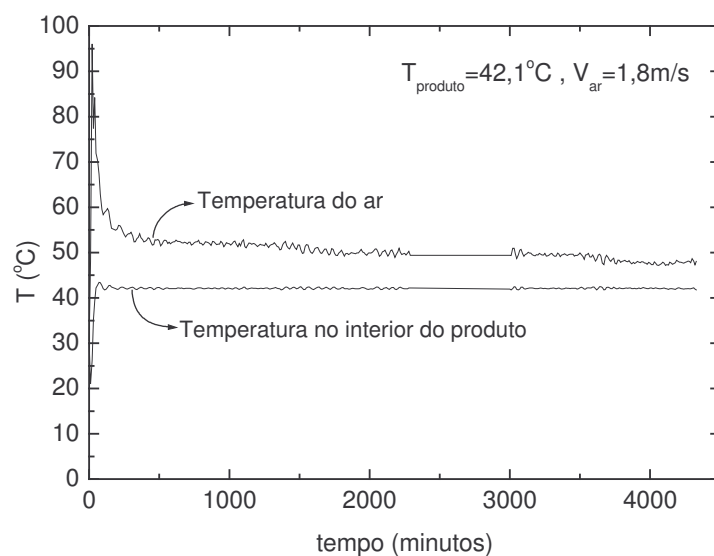


Figura 43: Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no interior do produto de  $42,1^{\circ}\text{C}$  e velocidade do ar de  $1,8\text{m/s}$ .

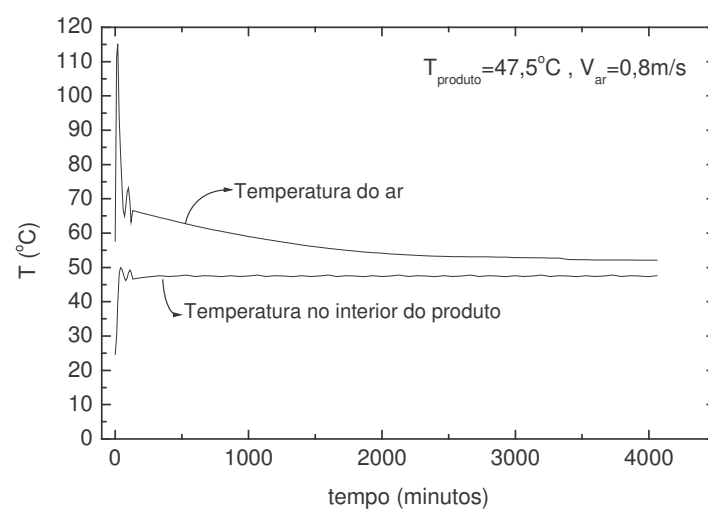


Figura 44: Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no interior do produto de  $47,5^{\circ}\text{C}$  e velocidade do ar de  $0,8\text{m/s}$ .

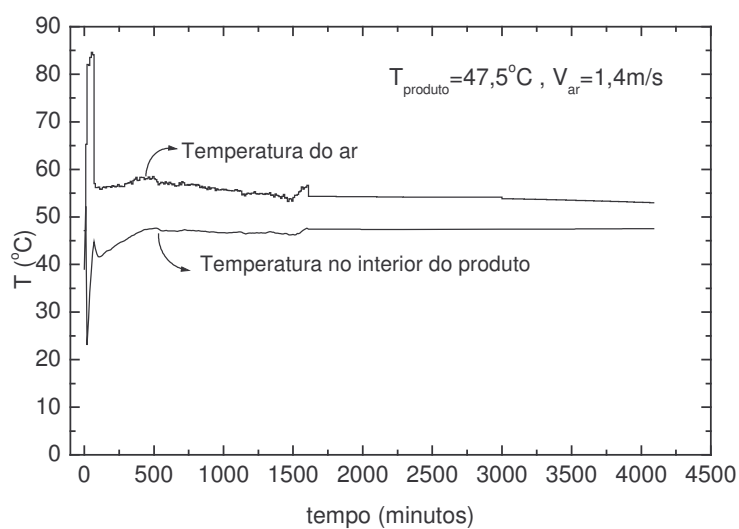


Figura 45: Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no interior do produto de  $47,5^{\circ}\text{C}$  e velocidade do ar de  $1,4\text{ m/s}$ .

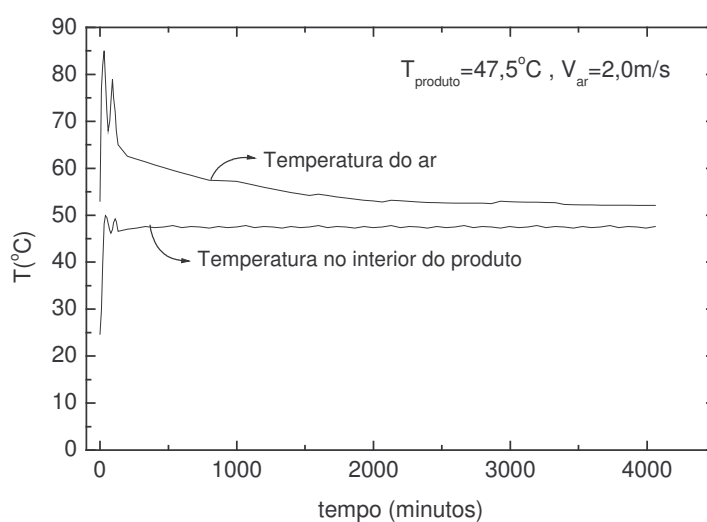


Figura 46: Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no interior do produto de  $47,5^{\circ}\text{C}$  e velocidade do ar de  $2,0\text{ m/s}$ .

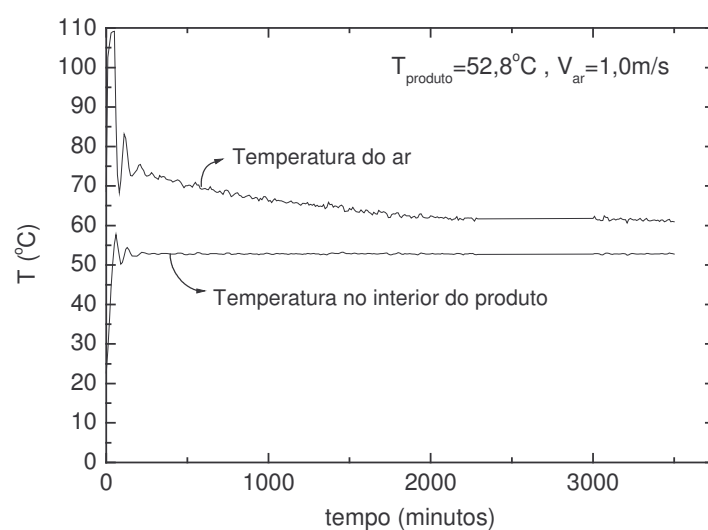


Figura 47: Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no interior do produto de  $52,8^{\circ}\text{C}$  e velocidade do ar de  $1,0\text{ m/s}$ .

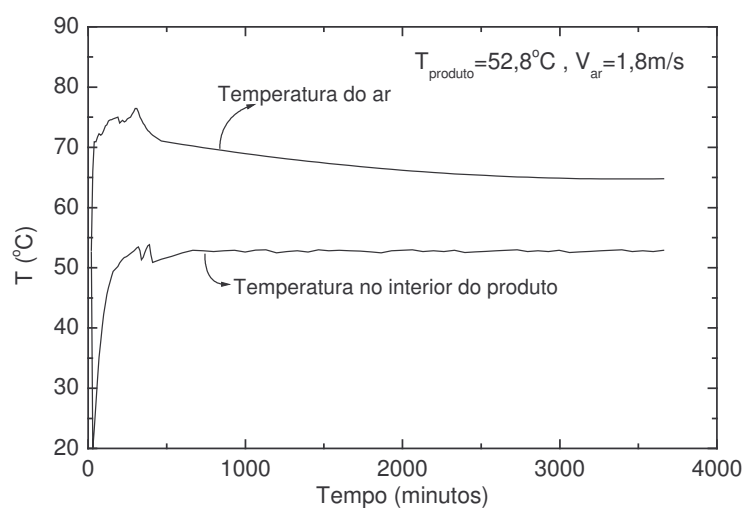


Figura 48: Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no interior do produto de  $52,8^{\circ}\text{C}$  e velocidade do ar de  $1,8\text{ m/s}$ .

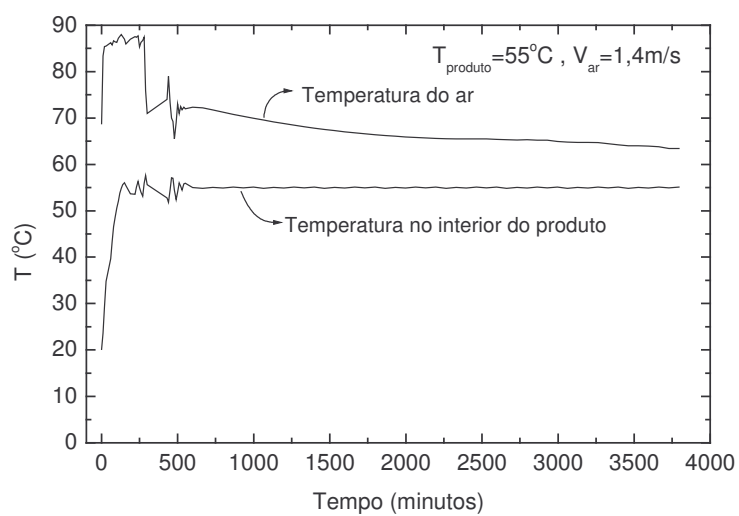


Figura 49: Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no interior do produto de  $55^{\circ}\text{C}$  e velocidade do ar de  $1,4 \text{ m/s}$ .

**ANEXO II:** Históricos de temperaturas para o controle da temperatura fixa no ar de secagem.

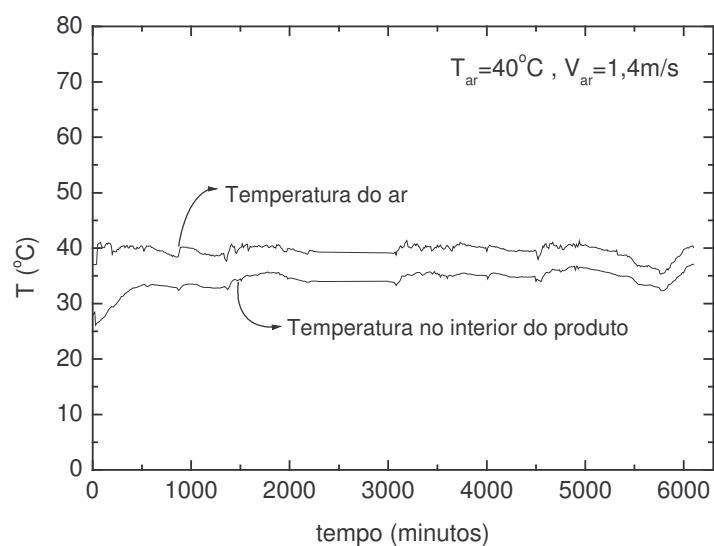


Figura 50: Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no ar de 40 °C e velocidade do ar de 1,4 m/s.

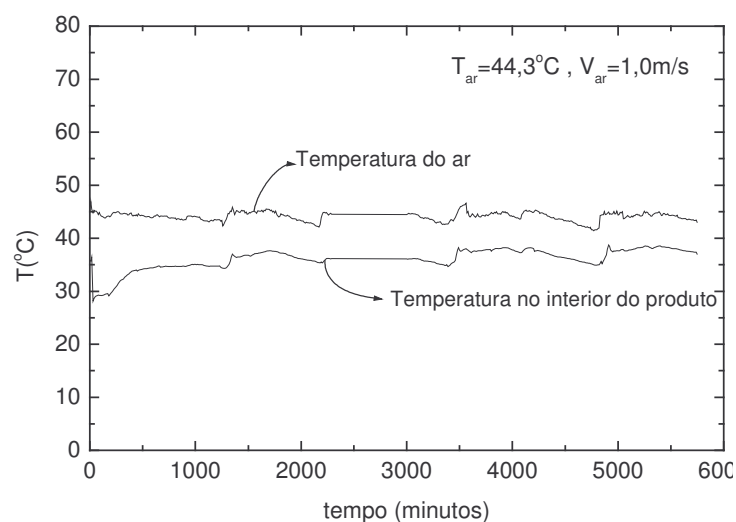


Figura 51: Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no ar de 44,3 °C e velocidade do ar de 1,0 m/s.

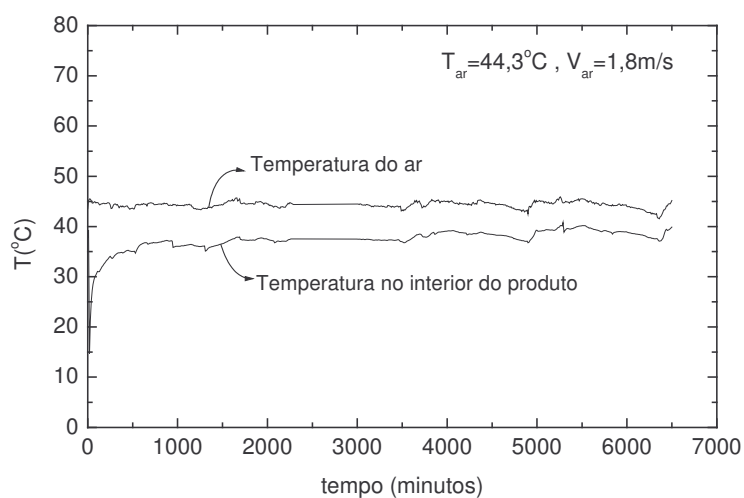


Figura 52: Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no ar de  $44,3^{\circ}\text{C}$  e velocidade do ar de  $1,8\text{ m/s}$ .

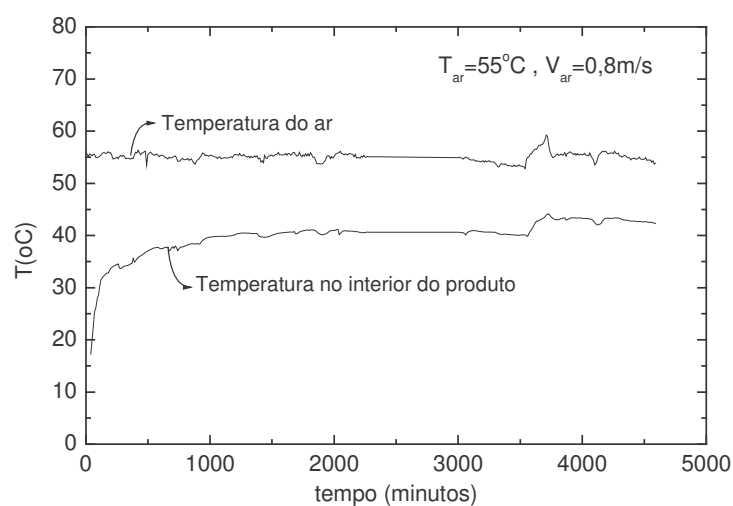


Figura 53: Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no ar de  $55^{\circ}\text{C}$  e velocidade do ar de  $0,8\text{ m/s}$ .

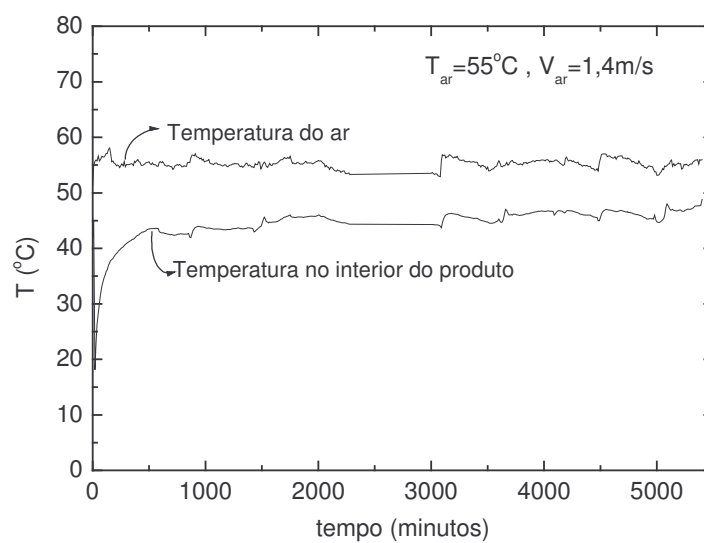


Figura 54: Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no ar de  $55^{\circ}\text{C}$  e velocidade do ar de  $1,4\text{ m/s}$ .

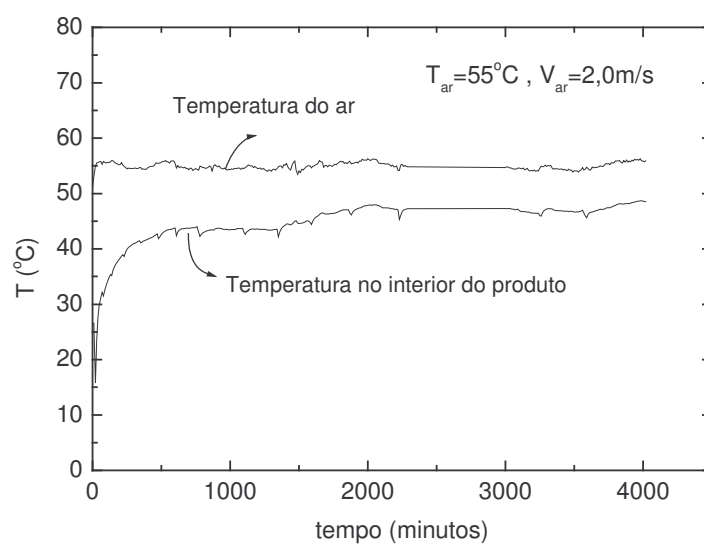


Figura 55: Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no ar de  $55^{\circ}\text{C}$  e velocidade do ar de  $2,0\text{ m/s}$ .

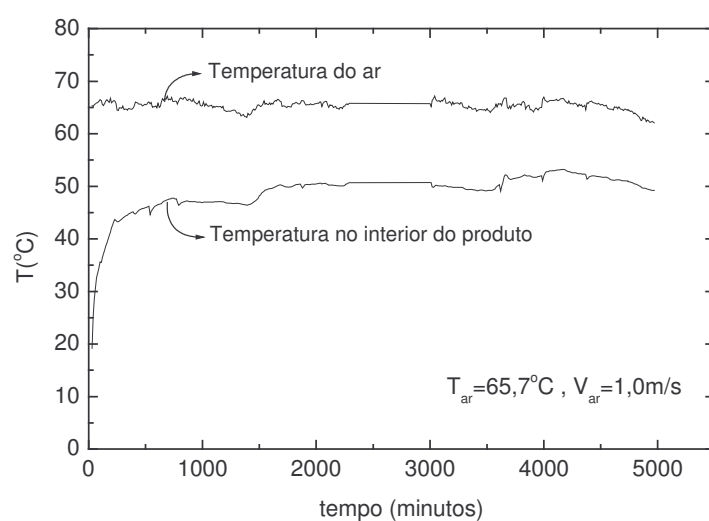


Figura 56: Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no ar de  $40^{\circ}\text{C}$  e velocidade do ar de  $1,4\text{ m/s}$ .

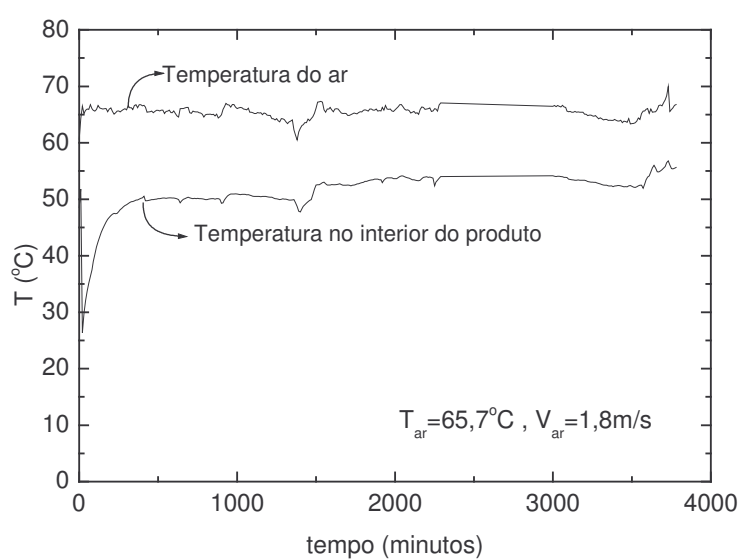


Figura 57: Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no ar de  $65,7^{\circ}\text{C}$  e velocidade do ar de  $1,8\text{ m/s}$ .

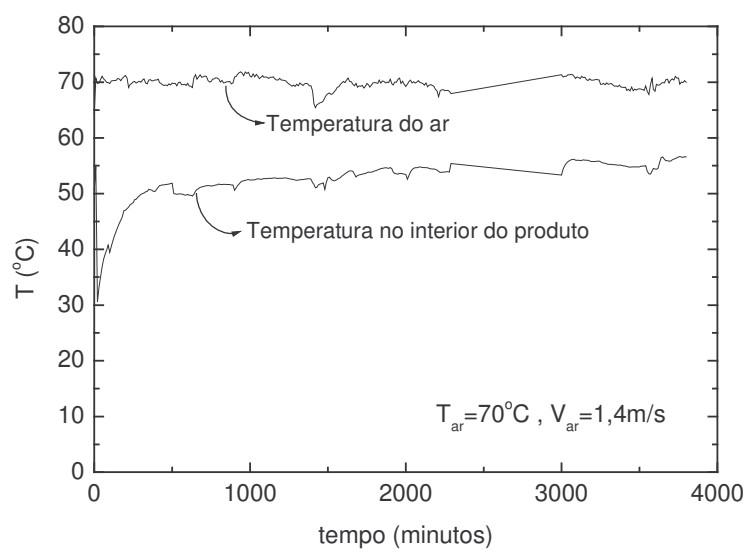


Figura 58: Histórico de temperaturas para a secagem conduzida com temperatura fixa no ar de  $70^{\circ}\text{C}$  e velocidade do ar de  $1,4 \text{ m/s}$ .