



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
Departamento de Engenharia Agrícola  
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola

**DISSERTAÇÃO**  
**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM ARMAZENAMENTO E**  
**PROCESSAMENTO DE PRODUTOS AGRÍCOLAS**

**ESTUDO DA SECAGEM DE TOMATE (*Lycopersicon esculentum* L. )**  
**COM PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO: EFEITOS DO EPICARPO**  
**E DO ENCOLHIMENTO**

**ROBERT KAREL KROSS**

**Campina Grande – Paraíba**  
**Fevereiro de 2002**

---

**ROBERT KAREL KROSS**

**ESTUDO DA SECAGEM DE TOMATE (*Lycopersicon esculentum* L.)  
COM PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO: EFEITOS DO EPICARPO  
E DO ENCOLHIMENTO**

**Dissertação apresentada ao Curso  
de Pós-Graduação em Engenharia  
Agrícola da Universidade Federal  
da Paraíba, em cumprimento às  
exigências para obtenção do grau de  
Mestre.**

---

**Orientadores:**

**Prof. Dr. Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata**

**Profa. Dra. Maria Elita Duarte Braga**

**CAMPINA GRANDE- Pb  
Fevereiro/2002**

---

**KROSS, Robert Karel**  
**K93e**      **Estudo da secagem de tomate (*Lycopersicon esculentum*  
L.) com pré-tratamento osmótico: efeitos do epicarpo e do  
encolhimento / Robert Karel Kross. – Campina Grande:  
UFPB, 2002.**  
115p. : il.

**Dissertação (Mestrado). UFPB/CCT.**  
**Inclui bibliografia**

**1. Tomate 2. Secagem 3. Encolhimento 4. Tratamento  
Osmótico I. Título**

**CDU: 635.64**

**DIGITALIZAÇÃO:**

**SISTEMOTECA - UFCG**



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
COPEAG - PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DO MESTRANDO

ROBERT KAREL KROSS

Título: Estudo da secagem de tomate (*Lycopersicon esculentum* L. ) com pré-tratamento osmótico: Efeitos do epicarpo e do encolhimento

BANCA EXAMINADORA

PARECER

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Marip Eduardo R.M. Cavalcanti Mata  
Orientador

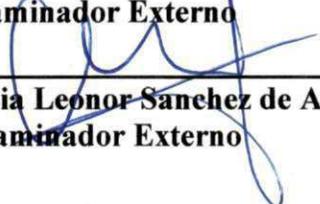
APROVADO

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Maria Elita Duarte Braga  
Orientador

APROVADO

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima  
Examinador Externo

Aprovado

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Odelsia Leonor Sanchez de Alsina  
Examinador Externo

APROVADO

FEVEREIRO/2002

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Eugene Andre Humphried e Christina Augustina, *“Thanks for everything and I miss you guys, but still keeping me strong all the time, by knowing that where ever you are, you are watching me and having faith in everything I do”*.

Minhas irmãs Angela, Silvia e Christina, *“ Yes, you guys really mean a lot to me. Eventhough we are in diferent parts of the world, I do care a lot about you; Anne thanks for everything you did for me here in Brasil.....I will never forget it, so just watch me..... ”*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me iluminado durante meus momentos difíceis

Aos Professores, Dr. Mário Eduardo R. M. Cavalcanti Mata e a Dra. Maria Elita Braga, pela orientação, atenção e apoio durante a realização do meu experimento.

A Professora Dra. Rossana pela paciência e compreensão durante o experimento no Laboratório de Análise Química de Alimentos.

A meu “Baby” Nayara Lia de Lima Aragão pela compreensão, companheirismo e principalmente muita paciência.....Thanks Sweety, many kisses and love.....

A CAPES, pela bolsa do programa de estudante convênio, PEC-PG.

Ao Professor Dr. Antonio Gilson Barbosa Lima, pelo empréstimo de material didático.

Aos meus amigos longe de mim, mas sempre presente e torcendo, Micheal, Clark, Brian, Marvin, Marjoleintje, Mamadou, Chango, Johnny e Laura.

A uma família maravilhosa, que conheci cá no Brasil, Dona Waldir, Irmã Vastir e família, sempre me fortalecendo quando necessário.....obrigado...!!!

A todos meus colegas do curso de pós-graduação em especial, Edimir, Patricia, Eliane, Jussi, Sheylla, Claudécia, Milene, Danielle, Helen, Acacio e Maria.

Aos meus amigos estrangeiros, Iacer Duarte e Eduardo Costa pelas trocas de idéias.

A Rivanilda pela disponibilidade, sempre que precisava.

Aos Funcionários do Departamento de Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas, especialmente a Dona Socorro.

## ÍNDICE

RESUMO.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABELAS.....	XV
LISTA DE QUADROS.....	XV
LISTA DE FOTOGRAFIAS.....	XV
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>3</b>
2.1. O TOMATE.....	3
2.2. SECAGEM.....	5
2.3. TEORIA DE SECAGEM.....	5
2.4. CURVAS DE SECAGEM.....	7
2.4.1. PERÍODO DE SECAGEM A TAXA CONSTANTE.....	7
2.4.2. PÉRIODO DE SECAGEM A TAXA DECRESCENTE.....	8
2.5. MODELOS MATEMÁTICOS.....	9
2.5.1. COEFICIENTE DE DIFUSÃO.....	12
2.6. MODELOS SEMI-TEÓRICOS.....	13
2.7. MODELOS EMPÍRICOS.....	13
2.8. ENCOLHIMENTO.....	15
2.8.1. COEFICIENTE DE ENCOLHIMENTO.....	17
2.9. PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO.....	19
2.9.1. MODELAGEM MATEMÁTICA.....	21
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>24</b>
3.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.....	26
3.2. TRATAMENTO OSMÓTICO.....	27
3.3. SECAGEM EM CAMADA DELGADA.....	28
3.4. ENCOLHIMENTO.....	29
3.5. TRATAMENTO TEÓRICO DOS RESULTADOS.....	29
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>30</b>
4.1. CARACTERIZAÇÃO.....	30
4.1.1. TRATAMENTO OSMÓTICO.....	30
4.2. SECAGEM CONVENCIONAL EM CAMADA DELGADA.....	40
4.2.1. Modelo de Page – Sem Encolhimento.....	40
4.2.2. Modelo De Fick – Sem Encolhimento.....	51
4.2.3. Modelo De Page – Com Encolhimento.....	60
4.2.4. Modelo de Fick– Com Encolhimento.....	68
4.3. ENCOLHIMENTO.....	79

<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>81</b>
<b>6. SUGESTÕES .....</b>	<b>84</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>85</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>97</b>

## RESUMO

O presente trabalho teve como objetivos: 1) Estudar a cinética da pré-secagem do tomate submetido a uma imersão em solução osmótica, nas concentrações de cloreto de sódio e sacarose de 5:0,4; 10:0,4 e 15:0,4%. 2) Obter as curvas de secagem em camada delgada com pré-tratamento osmótico e sem pré-tratamento osmótico, levando-se em consideração a variação de volume, às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C. 3) Determinar a influência do epicarpo do tomate na taxa de transferência de massa durante o processo de pré-tratamento osmótico e secagem. 4) Determinar os coeficientes da equação proposta por Page e da solução analítica de Fick. 5) Determinar os coeficientes de encolhimento por meio dos modelos de secagem uniforme e central. Para o estudo das curvas de secagem foram realizadas análises de regressão não-linear, utilizando-se o programa computacional de **STATISTICA 5.0**. Diante dos resultados obtidos pode-se concluir que: a) Com relação à cinética de secagem do tomate durante o pré-tratamento osmótico nas concentrações de cloreto de sódio e sacarose nas proporções de 5:0,4; 10:0,4 e 15:0,4%, a equação proposta por Page se ajusta melhor aos dados experimentais do que a equação de Fick, utilizando-se até o sexto termo da série na equação. Com relação à cinética de secagem do tomate sem encolhimento às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C com epicarpo e sem epicarpo e sem pré-tratamento osmótico e com pré-tratamento osmótico, concluiu-se que: a) Das duas equações propostas, a de Page se ajustou melhor aos dados experimentais do que a equação de Fick com até seis termos da série. Com relação à cinética de secagem do tomate com encolhimento às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C com epicarpo e sem epicarpo e sem pré-tratamento osmótico e com pré-tratamento osmótico, tem-se que: a equação proposta por PARK (1987), onde o fenômeno do encolhimento é incluído na razão de umidade não se adequou para o caso da secagem de tomate com epicarpo ou/e sem epicarpo. No caso do encolhimento, dos dois modelos (Uniforme e Central) estudados, a equação que melhor expressa o coeficiente de encolhimento do tomate, nas condições estudadas, é o modelo Uniforme. Para secagem de tomate às temperaturas de 80 e 90°C, ocorre a migração de sal para a superfície em todas as concentrações osmóticas estudadas e para o tomate sem epicarpo, não se recomendando a secagem a essas temperaturas e nessas condições. Como conclusão final nas condições estudadas o tomate deve ser seco nas temperaturas de 60 ou 70°C e com um pré-tratamento osmótico de cloreto de sódio-sacarose de 10:0,4% ou 5:0,4%

## ABSTRACT

The objectives of this present work were: 1) to study the kinetics at the pretreatment of tomatoes, submitted to an osmotic solution, with different concentrations of sodium chloride and sucrose of 5:0,4; 10:0,4 and 15:0,4%. 2) to obtain the thin layer drying curves of tomatoes with an osmotic pretreatment and without an osmotic pretreatment, considering the shrinkage effects, at the drying temperatures of 60, 70, 80 and 90°C. 3) to determine the influences of the tomatoes epicarp on the mass transfer rate during the osmotic pretreatment and drying process. 4) to determine the coefficients of the equation proposed by Page and the analytical solution of Fick. 5) to determine the shrinkage coefficients using the Uniform and Central drying models. The drying curves were studied by analyses of non-linear regression, using the software **STATISTICA 5.0**. According to the obtained results one can conclude that: 1) Considering the drying kinetics of the tomato during the osmotic pretreatment in the concentrations of sodium chloride and sucrose in the proportions of 5:0,4; 10:0,4 and 15:0,4%, the equation proposed by Page adjusted better to the experimental data than the Fick's equation, using until the sixth term of the series. Considering the drying kinetics of tomatoes without the shrinkage phenomenon at the temperatures of 60, 70, 80 and 90°C with epicarp and without epicarp and also without osmotic pretreatment and with osmotic pretreatment, it was concluded that: the) of the two proposed equations, once again Page presented better results, when adjusted to the experimental data, than the Fick's equation, using six terms of the series. Considering the drying kinetics of the tomatoes, including the shrinkage effects at the temperatures of 60, 70, 80 and 90°C with epicarp and without epicarp and also without osmotic pretreatment and with osmotic pretreatment, it was concluded that: the equation proposed by PARK (1987), where the phenomenon of the shrinkage is included in the moisture rate did not present concrete results in this specific case of the tomatoes dried with epicarp and/or without epicarp. In the case of the shrinkage, of the two models (Uniform and Central) studied, the equation that best expresses the coefficient of shrinkage of the tomato, in the studied conditions, it is the Uniform model. For tomatoes dried at temperatures of 80 and 90°C, there was a migration of salt to the surface in all the studied osmotic concentrations as well as for the tomatoes without epicarp, not recommending the drying at those conditions. As a final conclusion in the studied conditions the tomato should be dried at the temperatures of 60 or 70°C and with an osmotic pretreatment of sodium chloride-sucrose of 10:0,4% or 5:0,4%.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Fluxograma: condução do experimento	25
Figura 2	Representação esquemática dos eixos para determinação do volume de um esferoide	26
Figura 3	Superfície de resposta do ganho de cloreto de sódio (%GS) do tomate com epicarpo em função de tempo de imersão do fruto Na solução osmótica e da concentração da solução	31
Figura 4	Superfície de resposta da perda de água (%PA) do tomate com epicarpo em função de tempo de imersão do fruto na solução osmótica e da concentração da solução.	32
Figura 5	Superfície de resposta do ganho de cloreto de sódio (%GS) do tomate sem epicarpo em função de tempo de imersão do fruto na solução osmótica e da concentração da solução.	32
Figura 6	Superfície de resposta da perda de água (%PA) do tomate sem epicarpo em função de tempo de imersão do fruto na solução osmótica e da concentração da solução.	33
Figura 7	Taxa de transferência de água do tomate com epicarpo e sem epicarpo a diferentes concentrações de solução osmótica.	34
Figura 8	Taxa de transferência de cloreto de sódio no tomate com epicarpo e sem epicarpo a diferentes concentrações de solução osmótica.	35
Figura 9	Coefficientes de transferência de cloreto de sódio (Ks) e da água (Ka) do tomate sem epicarpo e com epicarpo em função da concentração osmótica.	36
Figura 10	Taxa de transferência da água do tomate com epicarpo e sem epicarpo a diferentes concentrações de solução osmótica.	38
Figura 11	Taxa de transferência de cloreto de sódio no tomate com epicarpo e sem epicarpo a diferentes concentrações de solução osmótica.	39
Figura 12	Coefficientes de difusão de cloreto de sódio (Ds) e da água (Da) do tomate sem epicarpo e com epicarpo em função da concentração osmótica.	39
Figura 13	Superfície de resposta da constante "k" da equação de Page em função de diferentes temperaturas e diferentes concentrações de prétratamento osmótico para os tomates sem epicarpo.	41
Figura 14	Superfície de resposta da constante "k" da equação de Page em função de diferentes temperaturas e diferentes concentrações de prétratamento osmótico para tomates com epicarpo.	41
Figura 15	Superfície de resposta do tempo de secagem em função de diferentes temperaturas e diferentes concentrações de prétratamento osmótico para tomates sem epicarpo.	43
Figura 16	Superfície de resposta do tempo de secagem em função de diferentes temperaturas e diferentes concentrações de prétratamento osmótico para tomates com epicarpo.	43

Figura 17	Tempo de secagem em função de diferentes temperaturas e diferentes concentrações de prétratamento osmótico para tomates com epicarpo e sem epicarpo.	44
Figura 18	Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo prétratados em diferentes soluções osmótica (5, 10 e 15%) e de tomates com epicarpo e sem epicarpo sem prétratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear, na secagem convencional à temperatura de 60°C	45
Figura 19	Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo prétratados em diferentes soluções osmótica (5, 10 e 15%) e de tomates com epicarpo e sem epicarpo sem prétratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear, na secagem convencional à temperatura de 70°C	46
Figura 20	Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo prétratados em diferentes soluções osmótica (5, 10 e 15%) e de tomates com epicarpo e sem epicarpo sem prétratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear, na secagem convencional à temperatura de 80°C	46
Figura 21	Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo prétratados em diferentes soluções osmótica (5, 10 e 15%) e de tomates com epicarpo e sem epicarpo sem prétratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear, na secagem convencional à temperatura de 90°C	47
Figura 22	Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo nas secagens convencionais às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C, sem prétratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear.	49
Figura 23	Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo nas secagens convencionais às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C, com prétratamento osmótico a uma concentração de 5% NaCl, obtidas por regressão não-linear.	49
Figura 24	Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo nas secagens convencionais às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C, com prétratamento osmótico a uma concentração de 10% NaCl, obtidas por regressão não-linear.	50
Figura 25	Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo nas secagens convencionais às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C, com prétratamento osmótico a uma concentração de 15% NaCl, obtidas por regressão não linear.	50
Figura 26	Superfície de resposta da constante "Dap" da solução analítica da equação de Fick em função de diferentes temperaturas e diferentes concentrações de prétratamento osmótico para tomates com epicarpo.	52

Figura 27	Superfície de resposta da constante “Dap” da solução analítica da equação de Fick em função de diferentes temperaturas e diferentes concentrações de prétratamento osmótico para tomates sem epicarpo.	52
Figura 28	Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo prétratados em diferentes soluções osmótica (5, 10 e 15%) e de tomates com epicarpo e sem epicarpo sem prétratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear, na secagem convencional à temperatura de 60°C	54
Figura 29	Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo prétratados em diferentes soluções osmótica (5, 10 e 15%) e de tomates com epicarpo e sem epicarpo sem prétratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear, na secagem convencional à temperatura de 70°C	54
Figura 30	Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo prétratados em diferentes soluções osmótica (5, 10 e 15%) e de tomates com epicarpo e sem epicarpo sem prétratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear, na secagem convencional à temperatura de 80°C	55
Figura 31	Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo prétratados em diferentes soluções osmótica (5, 10 e 15%) e de tomates com epicarpo e sem epicarpo sem prétratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear, na secagem convencional à temperatura de 90°C	55
Figura 32	Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo nas secagens convencionais às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C, sem prétratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear.	57
Figura 33	Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo nas secagens convencionais às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C, com prétratamento osmótico a uma concentração de 5% NaCl, obtidas por regressão não-linear.	58
Figura 34	Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo nas secagens convencionais às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C, com prétratamento osmótico a uma concentração de 10% NaCl, obtidas por regressão não-linear.	58
Figura 35	Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo nas secagens convencionais às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C com prétratamento osmótico a uma concentração de 15% NaCl, obtidas por regressão não-linear.	59
Figura 36	Superfície de resposta da constante “k” da equação de Page em função de diferentes temperaturas e diferentes concentrações de prétratamento osmótico para tomates sem epicarpo.	61

Figura 37	Superfície de resposta da constante “k” da equação de Page em função de diferentes temperaturas e diferentes concentrações de prétratamento osmótico para tomates com epicarpo.	61
Figura 38	Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo prétratados em diferentes soluções osmótica (5, 10 e 15%) e de tomates com epicarpo e sem epicarpo sem prétratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear, na secagem convencional à temperatura de 60°C	62
Figura 39	Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo prétratados em diferentes soluções osmótica (5, 10 e 15%) e de tomates com epicarpo e sem epicarpo sem prétratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear, na secagem convencional à temperatura de 70°C	62
Figura 40	Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo prétratados em diferentes soluções osmótica (5, 10 e 15%) e de tomates com epicarpo e sem epicarpo sem prétratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear, na secagem convencional à temperatura de 80°C	63
Figura 41	Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo prétratados em diferentes soluções osmótica (5, 10 e 15%) e de tomates com epicarpo e sem epicarpo sem prétratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear, na secagem convencional à temperatura de 90°C	63
Figura 42	O encolhimento ( $V/V_0$ ) do tomate em função do teor de umidade, ajustado por meio de uma equação linear	64
Figura 43	O encolhimento ( $V/V_0$ ) do tomate em função do teor de umidade, ajustado por meio de uma equação exponencial	64
Figura 44	Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo nas secagens convencionais às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C, sem prétratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear.	65
Figura 45	Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo nas secagens convencionais às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C, com prétratamento osmótico a uma concentração de 5% NaCl, obtidas por regressão não-linear.	66
Figura 46	Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo nas secagens convencionais às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C, com prétratamento osmótico a uma concentração de 10% NaCl, obtidas por regressão não-linear.	66
Figura 47	Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo nas secagens convencionais às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C, com prétratamento osmótico a uma concentração de 15% NaCl, obtidas por regressão não-linear.	67

Figura 48	Superfície de resposta da constante “Dap” da equação de Page em função de diferentes temperaturas e diferentes concentrações de prétratamento osmótico para tomates sem epicarpo.	69
Figura 49	Superfície de resposta da constante “Dap” da equação de Page em função de diferentes temperaturas e diferentes concentrações de prétratamento osmótico para tomates com epicarpo.	70
Figura 50	Coefficientes de difusão de tomates com epicarpo e sem epicarpo	71
Figura 51	Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo prétratados em diferentes soluções osmótica (5, 10 e 15%) e de tomates com epicarpo e sem epicarpo sem prétratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear, na secagem convencional à temperatura de 60°C	71
Figura 52	Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo prétratados em diferentes soluções osmótica (5, 10 e 15%) e de tomates com epicarpo e sem epicarpo sem prétratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear, na secagem convencional à temperatura de 70°C	72
Figura 53	Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo prétratados em diferentes soluções osmótica (5, 10 e 15%) e de tomates com epicarpo e sem epicarpo sem prétratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear, na secagem convencional à temperatura de 80°C	72
Figura 54	Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo prétratados em diferentes soluções osmótica (5, 10 e 15%) e de tomates com epicarpo e sem epicarpo sem prétratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear, na secagem convencional à temperatura de 90°C	73
Figura 55	Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo nas secagens convencionais às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C, sem prétratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear.	75
Figura 56	Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo nas secagens convencionais às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C, com prétratamento osmótico a uma concentração de 5% NaCl, obtidas por regressão não-linear.	76
Figura 57	Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo nas secagens convencionais às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C, com prétratamento osmótico a uma concentração de 10% NaCl, obtidas por regressão não-linear.	76
Figura 58	Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo nas secagens convencionais às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C, com prétratamento osmótico a uma concentração de 15% NaCl, obtidas por regressão não-linear.	77

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E CLASSIFICAÇÃO DO TOMATE .....	30
TABELA 2 – COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CLORETO DE SÓDIO (Ks) E DA ÁGUA (KA) DO TOMATE SEM EPICARPO E COM EPICARPO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO OSMÓTICA. ....	35
TABELA 3 – COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CLORETO DE SÓDIO (Ks) E DA ÁGUA (KA) DO TOMATE SEM EPICARPO E COM EPICARPO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO OSMÓTICA.....	37
TABELA 4 – VALORES DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO DO SOLUTO E DA ÁGUA PARA DIVERSOS PRODUTOS COM DIFERENTES TRATAMENTOS OSMÓTICOS.....	37
TABELA 5 – VALORES DOS COEFICIENTES DE “K” DA EQUAÇÃO DE PAGE PARA OS TOMATES SEM EPICARPO E COM EPICARPO. ....	40
TABELA 6 - VALORES DOS COEFICIENTES DE DIFUSÃO“DAP” DA SOLUÇÃO ANALÍTICA DA EQUAÇÃO DE FICK, UTILIZANDO OS SEIS PRIMEIROS TERMOS DA SÉRIE, PARA OS TOMATES SEM EPICARPO E COM EPICARPO.....	41
TABELA 7 - VALORES DOS COEFICIENTES DE DIFUSÃO“DAP”, DA SOLUÇÃO ANALÍTICA DA EQUAÇÃO DE FICK NA SECAGEM DE DIVERSOS PRODUTOS COM DIFERENTES PRÉ-TRATAMENTOS OSMÓTICOS.....	57
TABELA 8 - VALORES DOS COEFICIENTES DE “K” DA EQUAÇÃO DE PAGE PARA OS TOMATES SEM EPICARPO E COM EPICARPO. ....	60
TABELA 9 - VALORES DOS COEFICIENTES DE DIFUSÃO“DAP” DA SOLUÇÃO ANALÍTICA DA EQUAÇÃO DE FICK, UTILIZANDO OS SEIS PRIMEIROS TERMOS DA SÉRIE, PARA OS TOMATES SEM EPICARPO E COM EPICARPO.....	68
TABELA 10 – VALORES DO COEFICIENTE DE ENCOLHIMENTO DO MODELO UNIFORME.....	79
TABELA 11 – VALORES DO COEFICIENTE DE ENCOLHIMENTO DO MODELO DE SECAGEM CENTRAL .....	80

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO TOMATE .....	3
QUADRO 2 – PARÂMETROS ADOTADOS NO PROCESSO OSMÓTICO.....	27

## LISTA DE FOTOGRAFIAS

FOTOGRAFIA 1 – SEÇÃO TRANSVERSAL DO TOMATE .....	4
FOTOGRAFIA 2- TOMATES SECOS ÀS TEMPERATURAS DE 60. 70. 80 E 90 ° C .....	48
FOTOGRAFIA 3 – TRANSFORMAÇÃO DA GEOMETRIA DO TOMATE AO LONGO DO PROCESSO DE SECAGEM .....	74

## LISTA DE SÍMBOLOS

- U -teor de umidade do produto (%bs)
- T -tempo de secagem (s)
- $D_{ap}$  -coeficiente de difusão ( $m^2.s^{-1}$ )
- R -distância radial ou espessura (m)
- RU -razão de teor de umidade, adimensional
- $U_e$  -teor de umidade de equilíbrio, (%bs)
- $U_o$  -teor de umidade inicial, (%bs)
- K -constante de secagem, ( $s^{-1}$ )
- N -parâmetro de secagem, que depende do produto e da temperatura de secagem
- RC -razão de concentração de umidade, adimensional.
- C -concentração de umidade no instante t, ( $g.m^{-3}$ )
- $C_e$  -concentração de umidade de equilíbrio, ( $g.m^{-3}$ )
- $C_o$  -concentração de umidade inicial, ( $g.m^{-3}$ )
- R -raio da esfera de igual volume da fruta, (m)
- A -área superficial em cada intervalo de tempo ( $m^2$ )
- $A_o$  -área superficial inicial ( $m^2$ )
- X -conteúdo de umidade na amostra, (g)
- $X_o$  -conteúdo de umidade inicial da amostra, (g)
- $\rho_e$  -densidade de equilíbrio ( $g.cm^{-3}$ )
- $\rho_o$  -densidade inicial, ( $g.cm^{-3}$ )
- RS -razão de teor de soluto, adimensional
- S -teor de soluto no instante t, (%)
- $S_e$  -teor de soluto de equilíbrio, (%)
- $S_o$  -teor de soluto inicial, (%)

## 1. INTRODUÇÃO

O tomate é uma das hortaliças mais cultivadas no mundo, e sua produção mundial supera 70 milhões de toneladas/ano. Dentre as hortaliças, o tomate é a cultura mais importante, não só em termos de produção, como também em valor econômico, pois é a hortaliça mais industrializada e emprega grandes contingentes de mão-de-obra, estando diariamente na dieta alimentar da maioria da população. O mercado de derivados de tomate concentra-se principalmente na produção de extrato de tomate, molhos prontos e “ketchup”.

Dada a alta perecibilidade do produto, novos processos de industrialização do tomate têm sido pesquisados, objetivando a redução das elevadas perdas pós-colheita. Em função disso, muitos trabalhos com desidratação de alimentos estão sendo realizados, despontando como excelente alternativa para a redução das perdas da agricultura. Tanto a desidratação quanto à secagem refere-se a um sistema de remoção de água por intermédio de um processo que, em geral, segue regras bastante simples.

X A secagem de produtos perecíveis com altos teores de umidade inicial, apresenta diversas vantagens, tais como: manutenção dos constituintes minerais; inibição da ação de microorganismos; redução dos custos de transporte, manuseio e estocagem e alternativa para solução dos problemas de desperdício e descarte (WOODROOF e LUH, 1975).

No caso específico do tomate seco em conserva, verifica-se que suas principais vantagens e aplicações estão na culinária, substituindo o tomate “in natura” na maioria das receitas. Seu processamento é praticado na maioria das vezes, de forma artesanal, onde a qualidade dos produtos produzidos não é determinada por nenhum parâmetro pré-estabelecido. Em consequência não se encontram disponíveis recomendações/orientações sobre os parâmetros adequados do processo.

Com base nestes indicativos, o presente trabalho teve como principal objetivo, estudar a cinética de secagem do tomate com pré-tratamento osmótico.

Os objetivos específicos são:

- ❖ Estudar a cinética de pré-secagem do tomate na solução, submetido a uma imersão em solução osmótica, nas concentrações de cloreto de sódio e sacarose de 5:0,4; 10:0,4 e 15:0,4%;
- ❖ Obter a curvas de secagem em camada delgada com pré-tratamento osmótico e sem pré-tratamento osmótico, levando-se em consideração a variação de volume, às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C;
- ❖ Determinar a influência do epicarpo do tomate na taxa de transferência de massa durante o processo de pré-tratamento osmótico e secagem;
- ❖ Determinar os coeficientes da equação proposta por Page e da solução analítica de Fick;
- ❖ Determinar os coeficientes de encolhimento por meio dos modelos de secagem uniforme e semi-central.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. O TOMATE

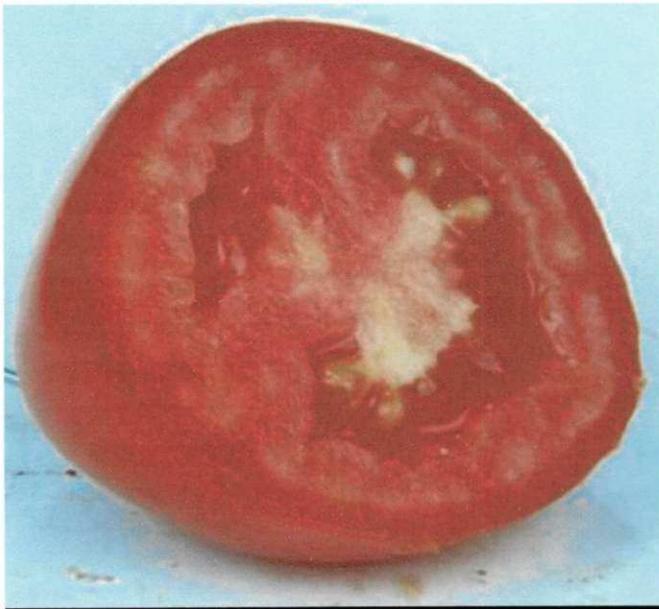
O tomateiro é uma planta nativa da Região Andina, da parte ocidental da América do Sul, assim como da América Central, havendo dúvidas quanto ao seu país de origem: Peru, Bolívia ou Equador. O próprio nome tomate origina-se da palavra "TOMATL", da língua falada pelos astecas. O tomate pertence à família das "SOLANACEAE" e ao gênero "LYCOPERSICON", que por sua vez se subdivide ainda em espécies. A espécie do tomate é chamada *Lycopersicon esculentum* (CAMARGO e QUEIROZ, 1999).

De acordo com STEVENS (1985) e GOULD (1991), os tomates contêm cerca de 93 a 94% de água, sendo que o constituinte orgânico que prevalece é o açúcar. Os teores de frutose e glicose correspondem à cerca de 50% da matéria seca do fruto e acima de 95% dos açúcares presentes em tomates, ocorrendo em quantidades aproximadamente iguais. O Quadro 1 mostra a composição química do tomate, segundo GOULD (1991):

**Quadro 1. Composição química do tomate**

Constituintes	Conteúdo (%)
<i>Sólidos totais</i>	7,00-8,50
<i>Sólidos insolúveis</i>	<1,00
<i>Sólidos solúveis</i>	4,00-6,00
<i>Açúcares</i>	2,00-3,00
<i>Ácidos</i>	0,30-0,50
<i>Proteína solúvel e Aminoácidos</i>	0,80-1,20
<i>Constituintes minerais</i>	0,30-0,60
<i>Sal (cloreto de sódio)</i>	0,05-0,10

Os componentes estruturais da fruta (sólidos insolúveis em álcool) também são constituintes importantes e representam cerca de 20% da matéria seca. O tomate possui uma estrutura interna central parecida com material fibroso, enquanto a região da polpa contém sementes constituídas de material não poroso (HAWLADER et al., 1991). A Fotografia 1 ilustra o corte em seção transversal do tomate, com as estruturas diferenciadas que compõem o fruto.



**Fotografia 1- Seção transversal do tomate**

## **2.2. SECAGEM**

Secagem é um processo que consiste em remover uma substância volátil (comumente, mas não exclusivamente, a água) de um material sólido através de um mecanismo de vaporização térmica. A água presente no sólido é chamada de umidade. Em seu livro, KEEY (1978) afirma que esta definição de secagem exclui métodos térmicos relacionados à destilação, tais como desidratação azeotrópica de alguns líquidos orgânicos.

Durante a secagem de um sólido úmido em atmosfera de ar quente e não saturado, o ar proporciona à umidade do produto, o calor sensível e latente de vaporização. Sob o aspecto físico, secagem de alimentos é um processo simultâneo de transferência de calor e massa e é afetada por várias condições do ar. Tal processo tem sido estudado por diversos autores (FUSCO et al., 1991). O calor é aplicado no material por convecção através do ar, ou por condução através do contato com uma superfície quente. O calor é requerido para vaporizar o líquido durante a secagem e o vapor formado é removido e transferido para o meio de secagem que é normalmente o ar.

A secagem de produtos alimentares tem sido objeto de especial interesse na indústria de alimentos. De acordo com VAZQUEZ et al. (1997), os principais benefícios da secagem de matéria alimentar são sua prolongada preservação, que permite em seguida ser comercializado para ser consumido em épocas de entressafra, além de reduzir a massa e o volume permitindo um transporte mais econômico.

## **2.3. TEORIA DE SECAGEM**

Durante a secagem é necessário um fornecimento de calor para evaporar a umidade do material e, também, deve haver um sorvedor de umidade para remover o vapor de água, formado a partir da superfície do material. Do ponto de vista de fornecimento de calor, os mecanismos básicos de transferência de calor empregados indicam os possíveis equipamentos necessários. A retirada do vapor de água formado na superfície do material é analisada

baseando-se nos conceitos de mecânica dos fluidos. Assim, observa-se que dois fenômenos ocorrem simultaneamente quando um sólido úmido é submetido à secagem:

- Transferência de calor do ambiente para evaporar a umidade superficial. Esta transferência depende de condições externas de temperatura, umidade do ar, fluxo e direção do ar, área de exposição do sólido e pressão;
- Transferência de massa (umidade) do interior para a superfície do material e sua subsequente evaporação devido ao primeiro processo. O movimento interno da umidade no material sólido é função da natureza física do sólido, da sua temperatura e conteúdo de umidade.

Para explicar os mecanismos de movimento de água através de um sólido foram propostas várias teorias (NEVES, 1982), as quais são:

- a) Teoria de difusão líquida;
- b) Teoria capilar;
- c) Teoria de vaporização-condensação;
- d) Teoria de Luikov;
- e) Teoria de Philip e de Vries;
- f) Teoria de Berger e Pei;
- g) Teoria de Fortes e Okos.

Durante a secagem, para que haja a evaporação de água da superfície do material ao ambiente, a água deve ser transportada do interior do sólido até a superfície.

Os mecanismos mais importantes são:

- difusão líquida: ocorre devido à existência do gradiente de concentração;
- difusão de vapor: ocorre devido ao gradiente de pressão de vapor, causado pelo gradiente de temperatura;
- escoamento de líquido e de vapor: ocorrem devido à diferença de pressão externa, de concentração, capilaridade e alta temperatura.

## 2.4. CURVAS DE SECAGEM

Os produtos biológicos são muito diferentes entre si, devido a sua forma, estrutura, composição e suas dimensões, além disso, condições de secagem são muito diversas de acordo com as propriedades do ar de secagem e a forma como se faz o contato ar-produto. Uma vez que o produto é colocado em contato com o ar quente, ocorre uma transferência de calor do ar ao produto. Simultaneamente, a diferença de pressão parcial de vapor de água existente entre o ar e a superfície do produto, determina uma transferência de vapor para o ar. Uma parte do calor que chega ao produto é utilizada para vaporizar a água e a outra para elevar a temperatura do material. A evolução destas transferências simultâneas de calor e de massa, durante a operação de secagem, faz com que esta seja dividida esquematicamente em três períodos. O primeiro deles conhecido como período inicial de aquecimento (a duração deste período é insignificante em relação ao período total de secagem), o segundo período de secagem à taxa constante e o terceiro é o período de taxa decrescente (DAUDIN, 1983).

### 2.4.1 PERÍODO DE SECAGEM À TAXA CONSTANTE

Durante este período, a água evapora-se como água livre. A pressão de vapor de água na superfície do corpo é constante e igual à pressão de vapor de água pura à temperatura da superfície do produto. Este período continua, enquanto a migração de água do interior até a superfície do produto for suficiente para acompanhar a perda por evaporação de água na superfície. Na maioria dos processos de secagem de alimentos, o período de secagem à taxa constante não é observado. Neste caso, a taxa de secagem é afetada pela estrutura, incluindo fatores como "case hardening", encolhimento e migração da umidade para a superfície (HAWLADER et al., 1991).

SARAVACOS e CHARM (1962); FORNELL et al. (1980) e CHIRIFE et al. (1983), observaram curtos períodos de secagem à taxa constante para os produtos alimentares, com a temperatura do produto evoluindo de sua temperatura inicial até a temperatura do ar, sem estabilizar na temperatura de bulbo úmido. Confirmam ainda, que o fim do período da secagem à taxa constante, corresponde ao tempo em que a migração interna da água para a

superfície não consegue mais compensar a taxa de evaporação da água livre da mesma. Neste ponto, "breakpoint", de transição entre os períodos, o teor de umidade é denominado de teor de umidade crítica.

PARK (1987) relata que esse ponto de inflexão, "breakpoint", do período de taxa constante para o decrescente não representa uma propriedade, dependendo inclusive dos parâmetros operacionais. Portanto, este ponto não deve receber a denominação de ponto crítico. A denominação mais correta seria o ponto de transição do período de taxa constante ao período de taxa decrescente ou o ponto de inflexão das taxas. O ponto crítico na taxa de secagem estaria situado no período de taxa decrescente, representando a transição do estado pendular e funicular.

#### **2.4.2 PERÍODO DE SECAGEM À TAXA DECRESCENTE**

Este período é caracterizado por não mais apresentar a superfície do material coberta por uma fina camada de água, porque a resistência interna ao transporte de água se torna maior do que a resistência externa.

A previsão da taxa de secagem de um produto biológico durante o período de secagem à taxa decrescente é mais complexa do que durante a taxa constante. Neste caso, não somente devem ser considerados os mecanismos de transferências externas (transferência de calor e massa por convecção), como também o mecanismo de transferência do interior do produto (difusão de calor e massa) (MARTINS e CAVALCANTI MATA, 1984; CAVALCANTI MATA, 1997).

De acordo com STRUMILLO e KUDRA (1986) e SANKAT et al. (1996), este período pode ser ainda dividido em duas fases:

- **Primeira Fase:** a água livre (fase líquida) presente no interior do produto é contínua, sem a presença de ar, e ocupa todos os poros do produto. O movimento de água do interior para a superfície ocorre por capilaridade e este mecanismo controla a velocidade de secagem;
- **Segunda Fase:** a remoção de água da superfície de evaporação provoca a entrada de ar no interior do produto o que dá origem a bolsões de ar que ficam dispersas na fase líquida dentro dos poros. Nesta fase o escoamento capilar ocorre apenas em alguns pontos localizados.

No decorrer do período de secagem à taxa decrescente, é a migração interna da água que fixa a cinética de secagem. Os diferentes mecanismos que governam o movimento da água são: escoamento capilar, difusão do líquido e difusão de vapor. Estas transferências internas de massa são influenciadas por dois fenômenos particularmente importantes para os produtos biológicos: a migração dos solutos e a deformação do produto (PARK, 1998).

## 2.5. MODELOS MATEMÁTICOS

Uma análise global dos trabalhos publicados referentes à modelagem do processo de secagem permite a distinção de duas formas de abordagem do tema: uma que se baseia principalmente nas condições externas; como a temperatura, umidade e velocidade do ar, correlacionando-as com a velocidade de secagem do sólido, e outra que considera não apenas as condições externas, mas também os mecanismos de migração interna de umidade e suas possíveis conseqüências sobre as alterações físicas, químicas e biológicas do produto. Neste aspecto cabe ressaltar que, de forma geral, os modelos de difusão líquida têm apresentado bons resultados em aplicações de secagem de grãos, frutas e cereais, provavelmente, devido ao fato destes produtos não apresentarem um período de taxa constante nas curvas características

de secagem, o que permite concluir que o processo é totalmente controlado pelas condições internas do material (QUEIROZ, 1994).

Segundo CRANK (1975), a principal teoria utilizada para interpretar a secagem de alimentos e de produtos agrícolas, é a teoria de difusão de umidade como líquido ou vapor representada pela Segunda Lei de Fick, que expressa a relação entre o fluxo de massa por unidade de área e o gradiente de concentração de umidade:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{ap} \nabla U) \quad (\text{Eq.1})$$

em que,

U = teor de umidade do produto (%bs)

t = tempo de secagem (s)

$D_{ap}$  = coeficiente de difusão ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )

Esta Lei de Fick é simplificada, já que ela despreza a interdifusão, mas esta hipótese é justificada, uma vez que a água migra dentro de uma matriz fixa.

Quando se trata de secagem de produtos biológicos, em especial os alimentos, pode-se observar que os autores têm preferência pelos modelos de difusão líquida (CHIRIFE, 1971; STEFFE e SINGH, 1980; KUMAR et al., 1982; RAMASWAMY e LO, 1983; CHIRIFE, 1983; TOLEBA e SUAREZ, 1991; LAZARIDES et al., 1997; SABAREZ e PRICE, 1999).

Todavia, a hipótese da difusão líquida como o único mecanismo de movimento de umidade tem sido submetido a severas críticas, principalmente porque ao utilizar esta teoria admite-se implicitamente a consideração de difusão térmica, ou seja, desprezam-se os gradientes de temperatura no interior do sólido. Esta ponderação foi feita por FORTES e OKOS (1980) num estudo revisional das diversas teorias de secagem, onde apresentam, inclusive, as formas mais modernas de se tratar a transferência simultânea de calor e umidade nos chamados corpos capilares-porosos.

CRANK (1975) apresentou diversas soluções analíticas para a equação da difusão, considerando diferentes condições iniciais e de contorno. Entretanto, estas soluções se aplicam aos sólidos de formas geométricas simples e regulares (corpos semi-infinitos: placas, cilindros e esferas). Consideraram-se os casos onde a difusividade varia linearmente ou exponencialmente com a concentração de água.

A secagem de materiais homogêneos segundo a teoria da difusão líquida pode ser explicada pela seguinte equação:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = D_{ap} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{c}{r} \cdot \frac{\partial U}{\partial r} \right), \quad (\text{Eq.2})$$

em que,

$c = 0$ , para corpos planos; 1, para corpos cilíndricos; 2, para corpos esféricos

$r$  = distância radial ou espessura (m)

Considerando um sólido, cuja forma seja uma esfera homogênea, de difusividade constante, que a sua superfície entre em equilíbrio imediatamente com o ar de secagem e que o efeito do gradiente de temperatura dentro da partícula seja desprezível, tem-se a seguinte solução analítica:

$$RU = \frac{U - U_e}{U_o - U_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[ \frac{n^2 \cdot \pi^2}{R^2} \cdot D_{ap} \cdot t \right] \quad (\text{Eq.3})$$

em que,

$RU$  = razão de teor de umidade, adimensional

$U$  = teor de umidade no instante  $t$ , (%bs)

$U_e$  = teor de umidade de equilíbrio, (%bs)

$U_o$  = teor de umidade inicial, (%bs)

$R$  = raio da esfera de igual volume da fruta, (m)

Ainda com as seguintes condições de contorno:

$$U(r,0) = U_i$$

$$\frac{dU}{dt}(0,t) = 0$$

$$U(R,t) = U_e$$

### 2.5.1. COEFICIENTE DE DIFUSÃO

O coeficiente de difusão,  $D_{ap}$ , é uma difusão efetiva, que engloba os efeitos de todos os fenômenos, podendo intervir sobre a migração de água. Seu valor é sempre obtido pelo ajuste das curvas experimentais, baseado em um determinado método de minimização de erros. As abordagens mais comuns para a análise da variabilidade do coeficiente de difusão em função dos parâmetros de secagem, ou teor de umidade do produto, geralmente aparecem através de duas formas de tratamento. Alguns autores propõem inicialmente uma expressão para o coeficiente de difusão e determinam as constantes da respectiva equação, minimizando os resíduos entre os valores teóricos e experimentais do teor de umidade em função do tempo (MISRA e YOUNG, 1980; SILVA e NEBRA, 1988; VAGENAS e MARINOS-KOURIS, 1991). Esta forma de abordagem é mais freqüente quando se considera uma dependência do coeficiente de difusão com alguma propriedade do produto durante a secagem, como o teor de umidade local, ou o teor de umidade inicial, ou ainda, a temperatura do produto.

Dentre os autores anteriormente citados, PARTI e DUGMANICS (1990) afirmaram que a utilização de um coeficiente de difusão constante, em lugar de um variável, pode resultar em modelos mais simples e com nível adequado de precisão. Quando as correlações são feitas com os parâmetros do ar de secagem, comumente, os modelos são desenvolvidos para coeficientes de difusão constante, a uma dada situação de secagem. Os valores assim obtidos, do coeficiente de difusão, são posteriormente correlacionados com os parâmetros referentes a cada situação do ar de secagem, sendo freqüente o uso de funções do tipo Arrhenius, para expressar a dependência com a temperatura (SUAREZ et al., 1980; SIMAL et al., 1997; LAZARIDES et al., 1997; BARONI e HUBINGER, 1998). Esta equação descreve a relação entre a difusividade e temperatura, levando-se em consideração a energia de ativação, que representa a dificuldade de retirada de água do material.

## 2.6. MODELOS SEMI-TEÓRICOS

As equações mais usadas para descrever o processo de secagem de grãos em camada fina são as semi-teóricas e as empíricas. De acordo com CHITTENDEN e HUSTRULID (1966), a teoria usada para descrever o fenômeno de secagem pode ser baseada no princípio de que toda a resistência ao transporte de umidade está na camada superficial do produto, conforme a equação diferencial seguinte, análoga a Lei de Resfriamento de Newton na transferência de calor:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -K(U - U_e) \quad \text{(Eq.4)}$$

em que,

$K$  = constante de secagem, ( $s^{-1}$ )

Integrando-se a equação 4 entre os limites  $U_0$ , no início da secagem e  $U$  num tempo  $t$  qualquer, tem-se:

$$RU = \frac{U - U_e}{U_0 - U_e} = \exp(-K.t) \quad \text{(Eq.5)}$$

Essa expressão é freqüentemente chamada como modelo exponencial ou logarítmico, e tem sido amplamente usada como base para modelar a taxa de secagem de produtos agrícolas, principalmente grãos.

## 2.7. MODELOS EMPÍRICOS

Uma modificação do modelo exponencial na forma integrada a dois e três parâmetros que apresenta bons resultados experimentais, é:

$$RU = \frac{U - U_e}{U_0 - U_e} = a.\exp(-K.t) \quad \text{(Eq.6)}$$

Esta equação é similar ao modelo de Fick para tempos de secagem longos quando apenas o primeiro termo da solução em série for significativo e tem sido objeto de interesse de pesquisa de diversos autores MAZZA e LE MAGUER (1980); SARAVACOS e RAOUZEOS (1986); TOBINAGA e PINTO (1992).

PAGE com base na equação 5 propôs um modelo para descrever o processo de secagem de milho em camada fina, na seguinte forma:

$$RU = \frac{U - U_e}{U_o - U_e} = C \cdot \exp(-K \cdot t^n) \quad (\text{Eq.7})$$

em que  $n$  = parâmetro de secagem, que depende do produto e da temperatura de secagem

Diversos autores ajustaram dados de secagem de grãos através da equação de Page. Observaram que o parâmetro  $n$  da equação foi encontrado como sendo uma função da umidade do ar e do teor de umidade inicial do grão;  $n$  pode ser considerado como um fator de modificação para a variável tempo que reflete a extensão da resistência interna do grão para a secagem no grão, em um determinado conjunto de condições externas. O parâmetro  $K$  representa os efeitos das condições externas, e  $n$  reflete a resistência interna à secagem, devido ao modo no qual estas condições externas foram impostas (PARTI e DUGMANICS citado por SQUSA, S. de 1999; BASUNIA e ABE 2001).

## 2.8. ENCOLHIMENTO

A secagem de produtos agrícolas com alto teor de umidade inicial é acompanhada de um encolhimento bastante significativo, pelo qual o material sofre alterações em suas dimensões e sua forma original. Alguns autores consideram o encolhimento dos materiais submetidos à secagem como sendo proporcional ao volume de água removido durante o processo (MULET et al., 1989; AREGBA et al., 1990); VAGENAS e MARINOS-KOURIS, 1991).

VAGENAS e MARINOS-KOURIS (1991), ao estudarem a secagem de damasco, propuseram encolhimento linear proporcional à variação do teor de umidade. Consideraram variação nas três dimensões, porém, supondo material isotrópico, ou seja, o coeficiente de encolhimento linear era o mesmo nas três dimensões.

Outros autores acreditam que além da redução de volume devida à perda de umidade durante a secagem, existe outra componente de encolhimento atribuída a forças mecânicas intercelulares (MISRA e YOUNG, 1980; KETELAARS et al. 1992). Neste sentido, KETELAARS et al. (1992) afirmaram que, se o interesse for apenas a cinética de secagem, pode-se desprezar o encolhimento mecânico.

SERENO e MEDEIROS (1990) apresentaram um modelo que se simplificava bastante após a análise do comportamento da densidade aparente do sólido em função do teor de umidade. Verificaram que a densidade aparente aumenta, conforme diminui o teor de umidade do sólido. A partir daí, propuseram que o produto da densidade aparente do sólido pela difusividade efetiva fosse considerado constante, ao invés de considerarem apenas a difusividade efetiva constante.

FUSCO et al. (1991) estudaram o encolhimento nos modelos difusionais, considerando diferentes geometrias. Apresentaram uma boa revisão de literatura sobre estudos do encolhimento representado pelas relações de volume com teor de umidade e optaram por uma expressão que correlacionava estas duas propriedades através de uma função de terceiro grau.

Obtiveram solução numérica pelo método de diferenças finitas, adotando uma malha fixa com interface móvel, localizada no contorno do material. Em todas as geometrias estudadas, os modelos com encolhimento apresentaram melhores resultados.

Conforme sugerido por PARK (1987), a determinação do coeficiente de difusão considerando a existência do encolhimento do material, foi feita substituindo o termo do adimensional do conteúdo de umidade pelo adimensional de concentração de umidade. Os melhores resultados foram obtidos quando utilizou a dimensão característica média e o coeficiente de difusão foi determinado, substituindo na equação 3, a razão de teor de umidade pela razão de concentração de umidade, de acordo com a equação 8:

$$RC = \frac{C - C_e}{C_o - C_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left[-\frac{n^2 \cdot \pi^2}{R^2} \cdot D_{ap} \cdot t\right] \quad (\text{Eq.8})$$

em que:

- RC = razão de concentração de umidade, adimensional.
- C = concentração de umidade no instante t, (g.m<sup>-3</sup>)
- C<sub>e</sub> = concentração de umidade de equilíbrio, (g.m<sup>-3</sup>)
- C<sub>o</sub> = concentração de umidade inicial, (g.m<sup>-3</sup>)
- R = raio da esfera de igual volume da fruta, (m)

Os melhores resultados são obtidos quando se utiliza a dimensão característica média, no caso, o raio médio, uma vez que a variação do raio durante a secagem resultava de uma função linear com a umidade.

### 2.8.1. COEFICIENTE DE ENCOLHIMENTO

Um modelo para materiais que sofrem grandes deformações foi desenvolvido por KECHAOU e ROQUES (1989), secando gel em fatias. A partir de uma curva experimental correlacionando a densidade mássica do material com seu teor de umidade, concluíram que o volume poderia ser representado por uma função linear do teor de umidade médio durante o encolhimento. Considerando o material anisotrópico, optaram por uma equação que relacionava a espessura da fatia em função do conteúdo de umidade médio. Através de uma mudança de coordenadas para um sistema ancorado no sólido, inseriram o coeficiente de encolhimento linear no equacionamento, resolvendo-o por diferenças finitas.

KILPATRICK et al.(1955) mostraram que o volume de encolhimento de vegetais é muito próximo ao volume de água evaporada para os estágios iniciais de secagem e surgiram um modelo que requer apenas o conhecimento da umidade inicial e da massa específica do material seco. A equação é válida para umidade acima de 15 a 20% e para a massa específica da substância seca de 1,25 g.cm<sup>-3</sup>.

SUZUKI et al. (1976) estudaram o encolhimento de cenoura, batata, batata doce e rabanete, utilizando a equação de KILPATRICK e mostraram que, durante os primeiros estágios de secagem, o volume de encolhimento de vegetais e batata é igual ao volume de água eliminada por evaporação, mas para os estágios finais o volume de encolhimento é menor que o volume de água removida. Eles então apresentaram três modelos de secagem, cujas formulas relacionam as mudanças na área de superfície e o teor de umidade:

- Modelo de secagem uniforme (Equação 9), o qual é função do teor de umidade inicial da amostra em cada ponto de secagem;

$$\frac{A}{A_0} = \left( \frac{X+a}{X_0+a} \right)^n \quad (\text{Eq.9})$$

em que:

$A$  = área superficial em cada intervalo de tempo ( $m^2$ )

$A_0$  = área superficial inicial ( $m^2$ )

$X$  = conteúdo de umidade na amostra, (g)

$X_0$  = conteúdo de umidade inicial da amostra, (g)

$a = X_e(1/\rho_e - 1) + 1/\rho_e$

$\rho_e$  = densidade de equilíbrio ( $g.cm^{-3}$ )

$n$  = coeficiente de encolhimento

- Modelo de secagem central: assume-se que a concentração varia do centro (mais úmido) à superfície (mais seca), relacionando com a isoterma de equilíbrio. Portanto supõe-se que a camada seca é separada do centro úmido. Considerando ainda que a densidade do centro seja igual à densidade do material no ponto de equilíbrio.

$$\frac{A}{A_0} = (bX + c)^n \quad (\text{Eq.10})$$

onde:  $b = \rho_0/(X_0+1)$

$c = 1+b-\rho_0$

$\rho_0$  = densidade inicial, ( $g.cm^{-3}$ )

- Modelo de secagem semi-central: assume-se que a densidade da camada seca não é sempre igual a densidade do material seco, uma vez que a umidade na fase gasosa contribui menos que a umidade na fase líquida. Neste caso a densidade da camada seca é um valor intermediário entre a densidade inicial e a densidade do material seco.

$$\frac{A}{A_0} = (kX + p)^n \quad (\text{Eq.11})$$

onde:

$k = (p - \phi)/(X_0 - X_e)$

$p = (\phi \cdot X_0 - X_e)/(X_0 - X_e)$

$\phi = (X_e + 1) \cdot \rho_0 / (X_0 + 1) \cdot \rho_e$

## 2.9. PRÉ-TRATAMENTO OSMÓTICO

O pré-tratamento é uma extensão do preparo e tem como objetivos: prevenir a reação enzimática que causa o escurecimento, a perda de sabor e de propriedades alimentícias nos frutos quando têm as partes internas expostas ao contato com oxigênio; proteger os frutos contra a deterioração durante o período de armazenagem, bem como reduzir a resistência à difusão durante a secagem de produtos agrícolas. Dentre os métodos pode-se citar: o antioxidante, a sulfuração ou enxofração, o branqueamento, a vaporização e a desidratação osmótica.

A desidratação osmótica, também denominada atualmente “Dewatering Impregnation Soaking process (DIS process)” tem sido associada a diferentes tipos de processamento na forma de um pré-tratamento, sendo que seus efeitos refletem-se positivamente nas propriedades organolépticas, nutricionais e funcionais do produto seco.

O processo envolve difusão simultânea de água e soluto, o que causa alteração na umidade, composição química e características estruturais do produto final. Essas mudanças ainda influenciam a posterior taxa de secagem por convecção (BORGES e MENEGALLI, 1994; RAOULT-WACK, 1994; FINZER e LIMAVERDE, 1996).

A cinética de remoção de água de frutas e vegetais através de soluções hipertônicas é grandemente afetada por parâmetros, que podem ser classificados como parâmetros do produto e parâmetros do processo (TORREGIANI, D, 1993; LAZARIDES, H. N., 2001).

Parâmetros do produto envolvem:

- características do produto in “natura”: porosidade, elementos estruturais, que dependem de: variedade, solo, clima, maturidade etc.;
- tamanho/geometria (área superficial);
- pré-tratamento: branqueamento, “coating”, descascar etc.

Parâmetros do processo envolvem:

- ❑ composição da solução (binária, ternária, tamanho das moléculas, etc.)
- ❑ concentração da solução;
- ❑ temperatura do processo;
- ❑ pressão do processo (atmosférica, vácuo);
- ❑ tempo do processo;
- ❑ contato produto/solução (agitação, razão produto/solução);
- ❑ uso de ultra-som (“sonification”).

Em geral, quanto maior a concentração do soluto e a temperatura do processo, maior a perda de água; no entanto, temperaturas acima de 50°C favorecem as reações de escurecimento não enzimático (POINTING et al. citado por BARONI e HUBINGER, 1997). No tratamento osmótico podem ser usados diversos solutos, sendo mais comumente usada sacarose para frutas e cloreto de sódio para vegetais BISWAL e BOZORGMEHR (1992). O cloreto de sódio é um excelente agente osmótico, pois a sua mobilidade na transferência de massa é favorecida pelo baixo peso molecular, que facilita a entrada pela membrana celular, abaixando muito rapidamente a atividade de água do produto. Outra vantagem do sal é que não reage com os constituintes químicos formando produtos indesejáveis (LERICI, et al. 1985; BARONI e HUBINGER, 1998; PAKOWSKI et al., 2000; SIMAL et al., 2001; SERENO et al., 2001).

De acordo com alguns autores, o soluto se incorpora nos espaços extracelulares (HAWKES e FLINK, 1978; BOLIN et al., 1983; LAZARIDES, 2001). ISSE e SCHUBERT (1991) e SAUREL (1995) comprovaram através de estudos microscópicos, que a sacarose se acumula entre a parede celular e a membrana celular, formando uma solução hipertônica que favorece a saída de água através da membrana celular.

POINTING et al. (1966) relatam que a perda de água é sempre maior que o ganho de soluto, devido às diferenças entre os coeficientes de difusão de água e do soluto. Este fato foi também constatado por, KOWALSKA e LENART (1998); RASTOGI e RAGHAVARAO

processo de difusão pelo espaço extracelular é modelado com princípios da Segunda Lei de Fick. Entretanto, a limitação dos modelos é a obtenção dos parâmetros característicos relacionados à célula e ao tecido. Por isso, o modelo macroscópico baseado na Segunda Lei de Fick, com algumas modificações com relação ao encolhimento, é comumente aplicado para descrever processos osmóticos (TOUPIN et al., 1989; MARCOTTE et al., 1991, citado por NSONZI e RAMASWAMY, 1998; CHIRIFE et al., 1993).

O coeficiente de difusão para cada componente, água e o soluto, é determinado através da Equação 12, onde em vez da unidade adimensional (conforme a Equação 3), considera-se a razão de soluto, RS.

$$RS = \frac{S - S_e}{S_o - S_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left[-\frac{n^2 \cdot \pi^2}{R^2} \cdot D_s \cdot t\right] \quad (\text{Eq.12})$$

em que;

RS = razão de teor de soluto, adimensional

S = teor de soluto no instante t, (%)

S<sub>e</sub> = teor de soluto de equilíbrio, (%)

S<sub>o</sub> = teor de soluto inicial, (%)

R = raio da esfera de igual volume da fruta, (m)

NSONZI e RAMASWAMY (1998); LAZARIDES et al. (1997); RASTOGI e RAGHAVARAO (1997), conseguiram ajustar os resultados experimentais ao modelo, considerando apenas o primeiro termo da série, obtendo coeficientes de determinação maior que 90%. Confirmaram ainda, que a difusão da água é sempre maior que a do soluto.

BARONI e HUBINGER (1997), estudando a cinética da desidratação osmótica de cebola, consideraram os seis primeiros termos da série da solução analítica de Lei de Fick, obtendo um bom ajuste dos dados experimentais; os valores do coeficiente de difusão do soluto e da água foram semelhantes aos de alimentos osmoticamente concentrados relatados pela literatura.

HAWKES e FLINK (1978) estudaram a desidratação osmótica de maçãs em soluções de açúcares e sais tratando os dados experimentais, através de uma equação empírica em que a concentração de sólidos é proporcional à raiz quadrada do tempo de processo. O coeficiente de proporcionalidade seria equivalente a um coeficiente de transporte de massa. Esta equação é uma simplificação da solução analítica da Lei de difusão de Fick, para curtos períodos de tempo e concentração de meio constante. Este tipo de solução foi utilizado por muitos autores (BISWAL e BOZORGMEHK, 1991; AZUARA et al., 1992; RASTOGI e RAGHAVARAO, 1994; LAZARIDES et al., 1995; TALENS et al., 2000; SERENO et al., 2001).

O modelo proposto por Page tem sido utilizado para descrever o processo osmótico de cenoura, apresentando um bom ajuste aos dados experimentais, com coeficientes de determinação acima de 91,9% SINGH et al. (1999).

KROSS, et al. (2001) estudando o efeito do epicarpo na transferência de massa durante o pré-tratamento osmótico de tomate em várias concentrações de cloreto de sódio, obteve coeficientes de determinação entre 97 e 99% ao ajustar aos resultados experimentais.

De acordo com os objetivos do processo osmótico, o ganho de soluto (%GS) e perda de água (%PA) podem ser monitorados, levando-se em consideração a eficiência do processo, expressa como um índice de eficiência de desidratação ( $i$ ), LAZARIDES et al. (1997); LAZARIDES, H.N. (2001). Esta equação é dada por:

$$i = \frac{\%PA}{\%GS} \quad \text{ou} \quad i = \frac{D_{\text{água}}}{D_{\text{solute}}} \quad (\text{Eq.13})$$

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal da Paraíba.

A matéria prima utilizada foi o tomate, adquirido no CEASA - Campina Grande. Os tomates eram firmes e maduros, tendo-se o cuidado de selecionar espécimes de mesma forma e tamanho, com um peso médio unitário entre 55 e 60g.

Em geral o procedimento da parte experimental consistiu de duas operações unitárias, a seguir:

- I. *Pré-tratamento Osmótico;*
- II. *Secagem em camada delgada.*

O Fluxograma 1 ilustra como foi a montagem do planejamento do procedimento experimental, a partir da matéria-prima até a obtenção dos coeficientes e as constantes da solução analítica da Lei de Fick e a equação proposta por Page, respectivamente.

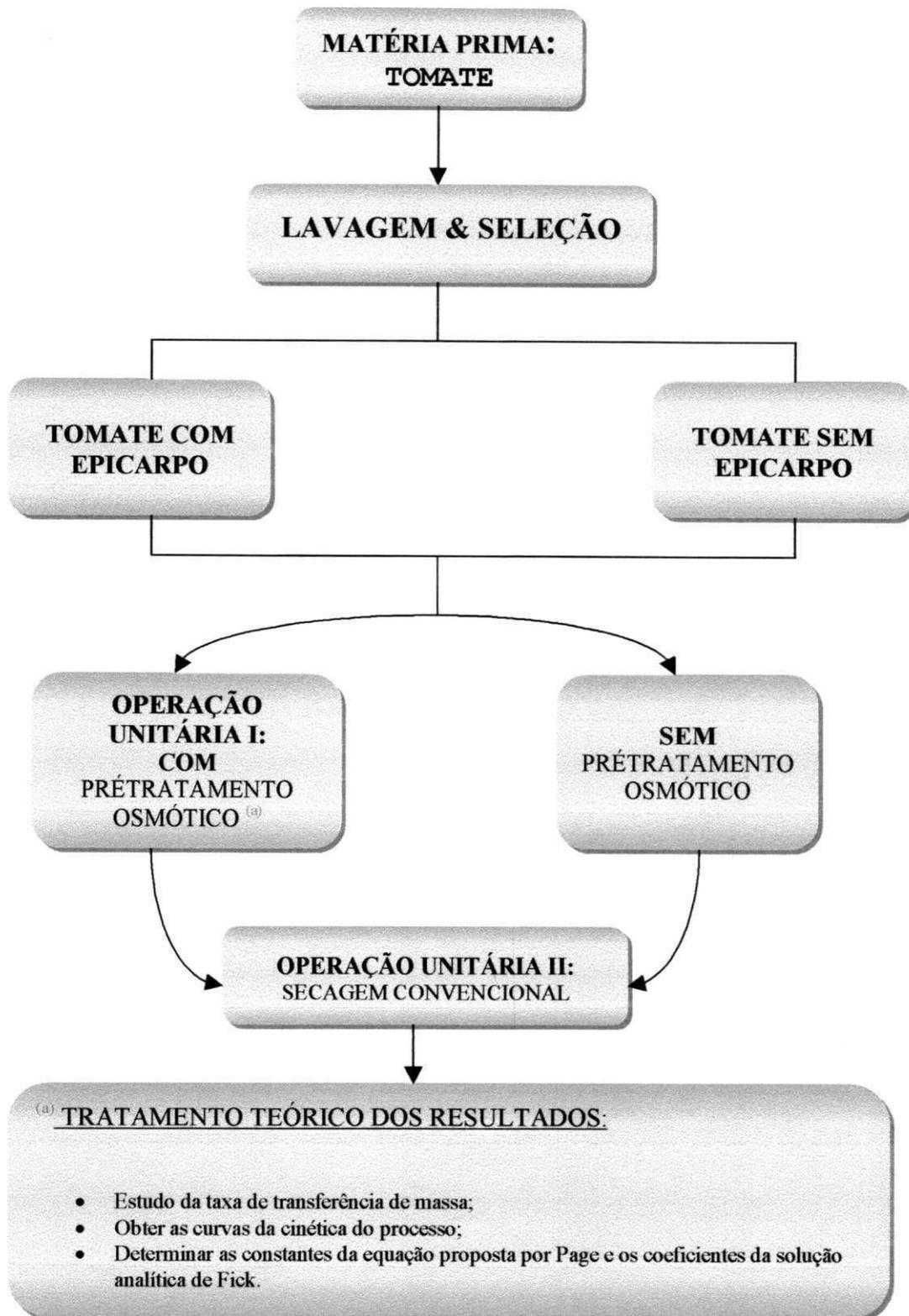


Figura 1 – Fluxograma: Condução do experimento

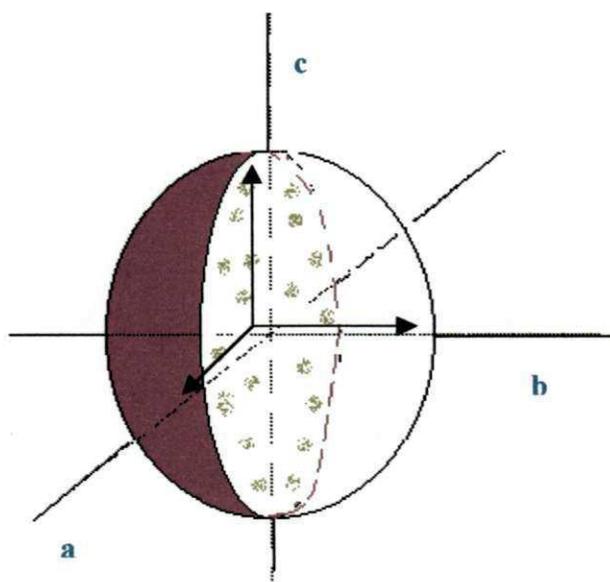
### 3.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

A massa,  $M$ , do tomate foi determinada pela pesagem direta em uma balança semi-analítica, modelo METTLER PC 440.

Para determinar o volume ( $V$ ) e a área superficial ( $A$ ), mediu-se os semi-eixos perpendiculares ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) do tomate utilizando-se um paquímetro. O cálculo baseia-se nas equações abaixo:

$$V = \frac{4}{3} \pi \cdot a \cdot b \cdot c \quad (a) \quad (\text{Eq.14a})$$

$$A = \pi \cdot a \cdot b \quad (b) \quad (\text{Eq 14b})$$



**Figura 2 – Representação esquemática dos eixos para a determinação do volume de um esferóide**

Para determinar a densidade,  $\rho$ , o tomate foi pesado numa balança analítica digital, o volume determinado pela equação 14a e a equação utilizada foi:

$$\rho = M/V \quad (\text{Eq.15})$$

Para estudar a influencia do epicarpo, foi feita a pelagem dos tomates. A pelagem efetuou-se de uma forma manual, após um rápido contato com as chamas de um bico de Bunsen.

Nas operações unitárias I e II optou-se pelo **Método Contínuo** para estudar a cinética de transferência de massa e calor, conforme AZUARA et al. (1998). Este método se caracteriza em acompanhar/analisar sempre a mesma amostragem durante o processo.

### 3.2. TRATAMENTO OSMÓTICO

Durante o pré-tratamento osmótico levou-se em consideração os parâmetros do processo, apresentados no Quadro 3, considerados fatores determinantes na cinética da transferência de massa.

**Quadro 3 – Parâmetros adotados no processo osmótico**

<i>Parâmetro do Processo</i>	<i>Descrição</i>
Composição e Concentração da solução	Foram preparadas três soluções de cloreto de sódio em água destilada, com as respectivas concentrações 5, 10 e 15%, assumindo um sistema binário;
Contato produto/solução	A proporção massa de produto: massa de solução foi de 1:10, garantindo-se, dessa forma não haver alteração significativa na concentração da solução durante o processo. Havia agitação manual em intervalos de tempo pré-estabelecidos;
Tempo, Temperatura e Pressão	O tempo de processamento em solução osmótica foi de 5 e 9 horas para tomates sem epicarpo e com epicarpo, respectivamente. O processo ocorreu à temperatura e pressão atmosféricas.

### **Perda de água, PA**

Em tempos pré-determinados, as amostras eram retiradas e colocadas sobre papel absorvente, para a remoção de solução em excesso. As amostras assim tratadas foram então submetidas a uma análise de variação de peso numa balança analítica, modelo METTLER PC440 (precisão de 3 casas decimais).

### **Ganho de soluto, GS**

O ganho de soluto pelo produto foi determinado, acompanhando-se a variação da concentração de cloreto de sódio na solução osmótica, em tempos preestabelecidos. O teor de cloreto determinou-se pelo Método de titulação direta, recomendada por Mohr (RANGANNA, 1986). Esta variação de %NaCl da solução osmótica é submetida a um balanço de massa, envolvendo a variação da massa do tomate. Desta forma quantificou-se a massa por tomate.

## **3.3. SECAGEM EM CAMADA DELGADA**

Antes do início da secagem, foi determinado o teor de água inicial do tomate, de acordo com ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTRY - A.O.A.C. (1997), que consistiu em submeter amostras em estufa a uma temperatura de  $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$  por um período de 72 horas para permitir a retirada total da água, por se tratar de um produto com alto teor de água.

Em seguida, os tomates foram dispostos em camada delgada, em bandejas de tela aço inox e levados para o secador FANEM 330, composto de seis compartimentos, com circulação forçada de ar (velocidade,  $v=76 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ), em cada compartimento. Para cada temperatura estudada ( $60, 70, 80$  e  $90^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ ), a secagem foi realizada até a obtenção dos teores de umidade de equilíbrio.

Conhecendo-se o teor de umidade inicial dos tomates, foi acompanhada a perda de peso do tomate ao longo do processo de secagem, utilizando-se uma balança analítica. Para determinar o teor de umidade baseou-se na seguinte equação:

$$\%Ubu = \frac{M_i - M_t}{M_T} \times 100\% \quad (\text{Eq.16})$$

em que      %Ubu = teor de umidade na base úmida, (%)

$M_i$  = massa de água inicial, (g)

$M_t$  = massa de água evaporada no tempo t, (g)

$M_T$  = massa total do tomate no instante t, (g)

### **3.4. ENCOLHIMENTO**

O método para verificar a variação em volume e área superficial do tomate no decorrer da secagem, baseou-se na técnica de medição direta das três dimensões características (a, b, c), como já foi descrito no item 3.1. As determinações foram realizadas durante todo o processo de secagem em intervalos regulares de tempo.

### **3.5. TRATAMENTO TEÓRICO DOS RESULTADOS**

As constantes da equação proposta por Page e os coeficientes de difusão da equação de Fick, utilizando até o sexto termo da série, foram obtidas por análises de regressão não linear, por meio do programa computacional de *STATISTICA 5.0*.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da caracterização e classificação do tomate encontram-se no item 4.1 e os resultados da cinética de tratamento osmótico e da cinética de secagem, utilizando-s os dois modelos (modelo de Page e a solução analítica de Fick), nos itens 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO

A caracterização do tomate quanto à massa, volume, massa específica e diâmetro equivalente, é apresentada na Tabela 1. Os valores foram obtidos das médias de cada característica física e a classificação do tomate baseou-se na tabela de FIGUEIRA (1982).

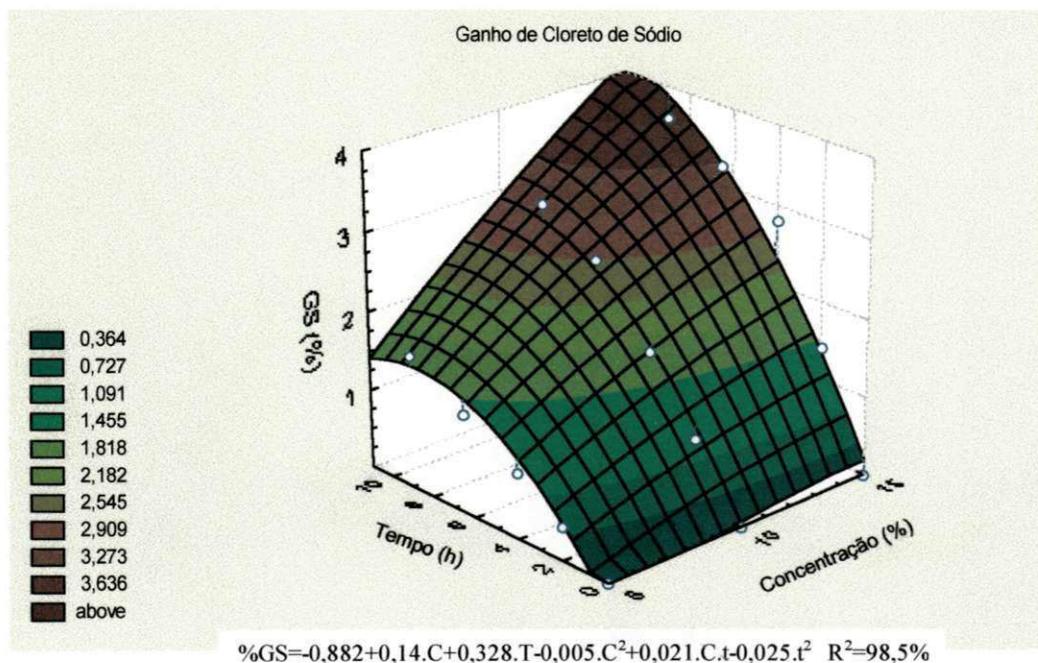
**Tabela 1 – Características físicas e classificação do tomate**

<b>Características físicas</b>	<b>Valor</b>
<i>Massa (g)</i>	58,13±2,96
<i>Volume (ml)</i>	44,512±2,350
<i>Massa específica (g/ml)</i>	1,306±0,004
<i>Raio (mm)</i>	21,907±1,377
Classificação	
<i>Grupo</i>	Roma ou Piriforme
<i>Variedade</i>	Industrial

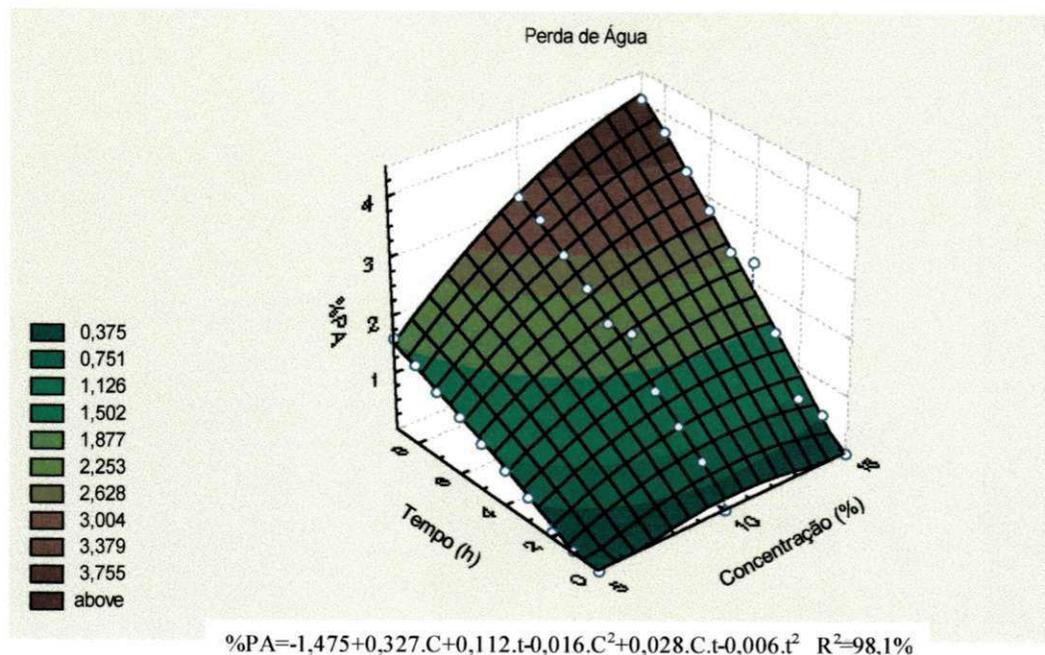
#### 4.1. TRATAMENTO OSMÓTICO

Em análises preliminares foi feita uma avaliação do melhor tempo de processamento osmótico, e observou-se em todos os tratamentos, perdas significativas de constituintes químicos não qualificados após 5 horas, para tomates sem epicarpo, e 10 horas, para tomates com epicarpo (KROSS et al., 2001). Desta forma fixou-se o período de processamento em 5 e 9 horas, respectivamente, para tomates sem e com epicarpo.

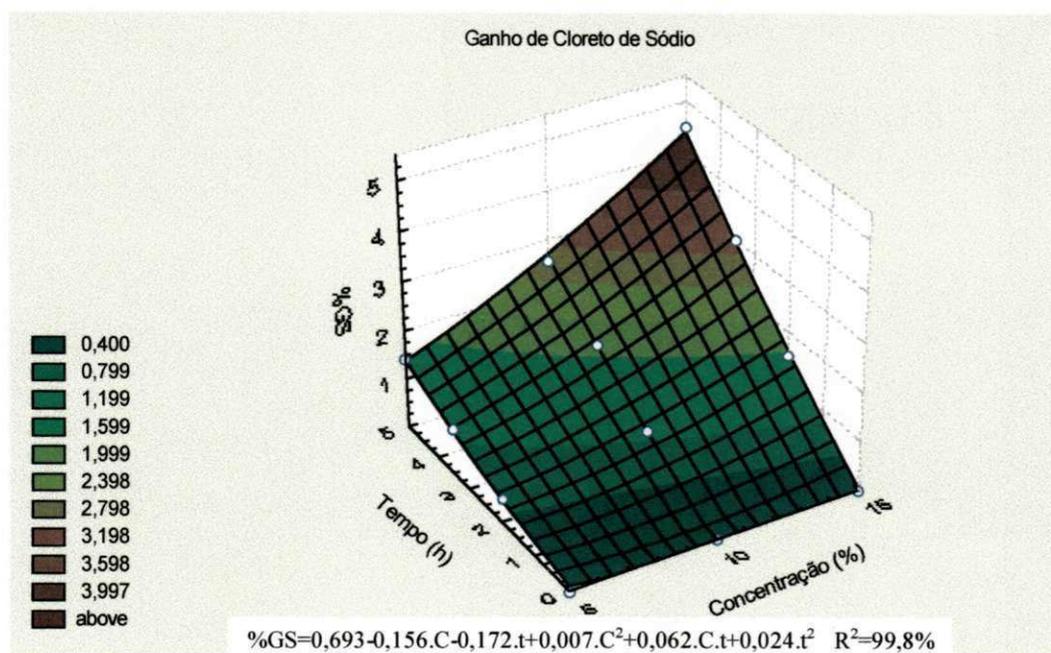
As Figuras 3 a 6 mostram as superfícies de respostas de ensaios típicos do tratamento osmótico, representando a perda de água (PA) e o ganho de soluto (GS) em função do tempo de processamento (h) e a concentração de cloreto de sódio (%) na solução.



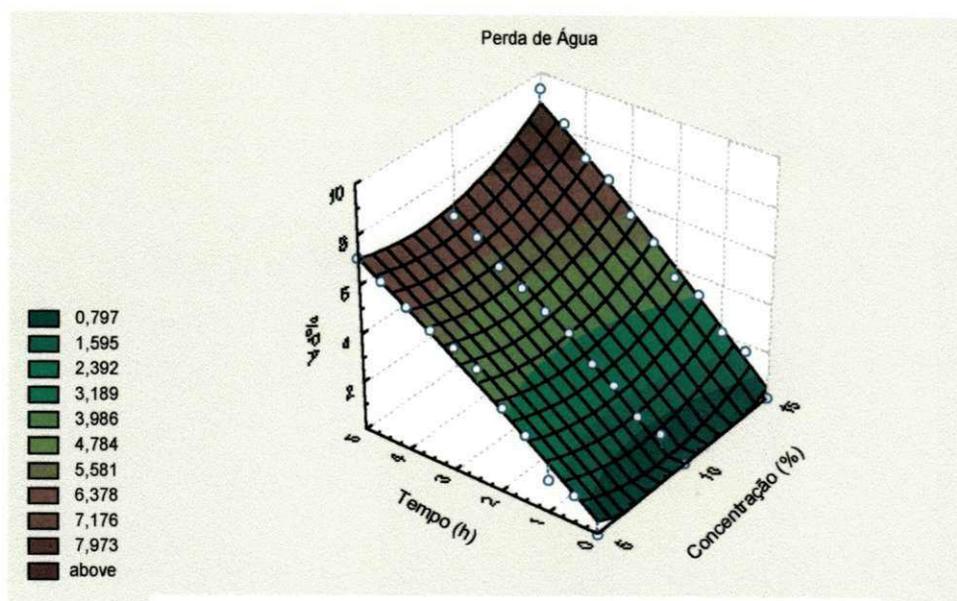
**Figura 3 – Superfície de resposta do ganho de cloreto de sódio (%GS) do tomate com epicarpo em função de tempo de imersão do fruto na solução osmótica e da concentração da solução.**



**Figura 4 – Superfície de resposta da perda de água (%PA) do tomate com epicarpo em função de tempo de imersão do fruto na solução osmótica e da concentração da solução.**



**Figura 5 – Superfície de resposta do ganho de cloreto de sódio (%GS) do tomate sem epicarpo em função de tempo de imersão do fruto na solução osmótica e da concentração da solução.**



**Figura 6 – Superfície de resposta da perda de água (%PA) do tomate sem epicarpo em função de tempo de imersão do fruto na solução osmótica e da concentração da solução.**

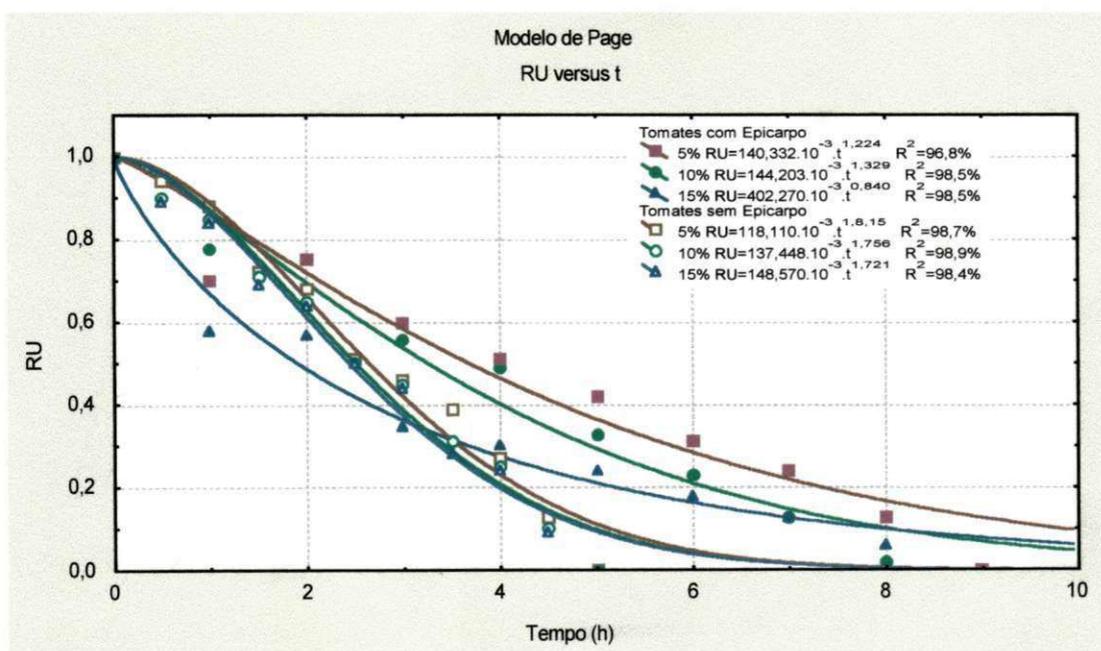
Observa-se, nessas figuras, que a quantidade de remoção de água (Figuras 4 e 6) e de entrada de sal (Figuras 3 e 5) cresce gradualmente com o tempo e a concentração. No geral, em soluções mais concentradas, o tomate perde água mais rapidamente, devido ao maior gradiente de atividade de água. De acordo com a Figura 4, os tomates com epicarpo em solução de 5% apresentaram uma perda de água muito pequena durante as duas primeiras horas, fato este que pode ser atribuído ao potencial da solução hipertônica, que não foi suficiente para abaixar a atividade de água no produto. Outro fator que pode ser levado em consideração a este processo de transferência de massa é a resistência do epicarpo.

Comparando-se as Figuras 3 e 4, verifica-se que o teor da água removida e sal ganho, apresentam valores próximos até o final do processo, respectivamente 1,68; 3,04 e 3,59% GS e 1,62; 3,18 e 4,04% PA para 5, 10 e 15% de NaCl.

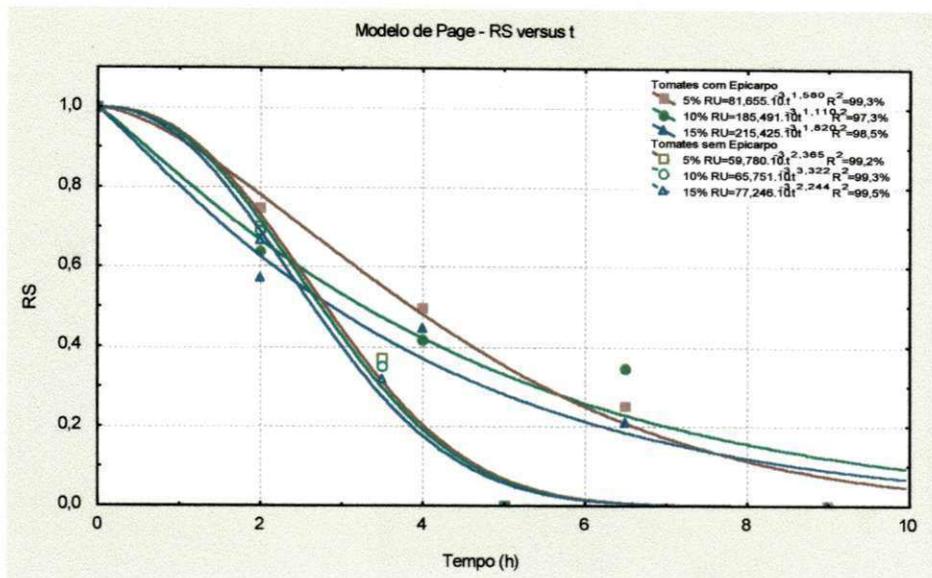
O efeito do epicarpo pode ser visualizado com bastante clareza nas Figuras 5 e 6, onde se observa que com uma redução do período de 45% (5 horas de processamento), foram atingidos teores de perda de água e ganho de soluto de 1,40; 2,55 e 4,49% PA e 7,08; 6,43 e 9,40% GS para soluções de 5, 10 e 15% NaCl, respectivamente.

Também se constata que a remoção de água sempre foi maior que o ganho do soluto. Esse resultado é semelhante ao descrito por BISWAL e BOZORGMEHK. (1991), para pedaços de vagem submetidos à desidratação osmótica em soluções alcalinas, e BARONI e HUBINGER (1997) no estudo da cinética de desidratação osmótica de cebola.

Os dados experimentais e as curvas da cinética de transferência de massa, água e cloreto de sódio, obtidas por meio do modelo de Page, são apresentados nas Figuras 7 e 8.



**Figura 7 – Razão de umidade do tomate com epicarpo e sem epicarpo a diferentes concentrações de solução osmótica.**



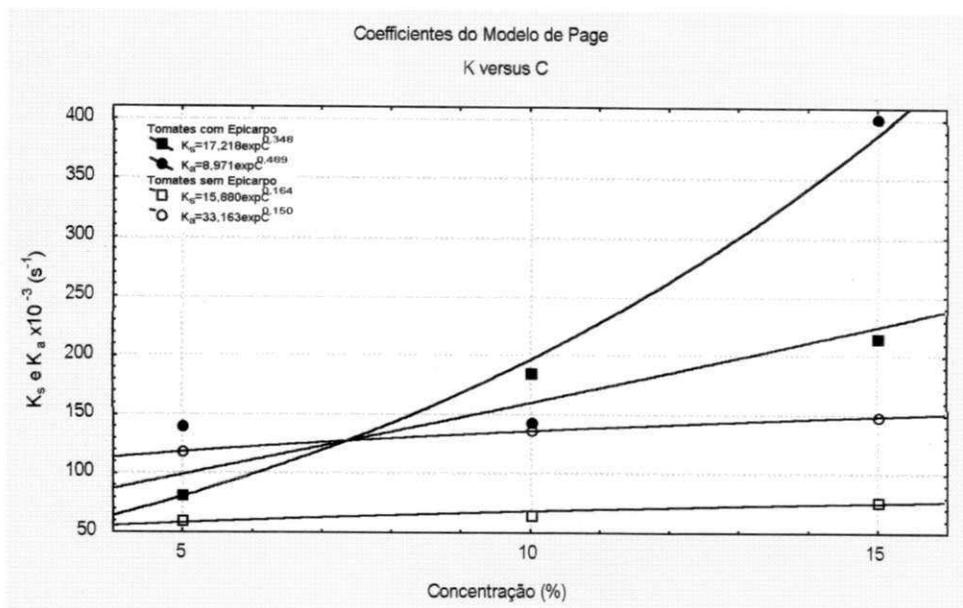
**Figura 8 – Taxa de transferência de cloreto de sódio no tomate com epicarpo e sem epicarpo a diferentes concentrações de solução osmótica.**

Na Tabela 2, observa-se que as constantes associadas aos coeficientes de transferência de massa para a água,  $K_a$ , são maiores que as do sal,  $K_s$ , confirmando assim que ocorre uma maior saída de água do tomate do que uma entrada de sal no mesmo.

**Tabela 2 – Coeficientes de transferência de cloreto de sódio ( $K_s$ ) e da água ( $K_a$ ) do tomate sem epicarpo e com epicarpo em função da concentração osmótica.**

Concentração NaCl (%)	Com Epicarpo					
	Cloreto de sódio			Água		
	$K_s \times 10^3 (s^{-1})$	n	$R^2 (%)$	$K_a \times 10^3 (s^{-1})$	n	$R^2 (%)$
5	81,655	1,580	99,3	140,332	1,224	96,8
10	185,491	1,110	97,3	144,203	1,329	98,5
15	215,425	1,820	98,5	402,270	0,8404	98,5
	Sem Epicarpo					
5	59,780	2,365	99,2	118,110	1,815	98,7
10	65,751	3,322	99,3	137,448	1,756	98,9
15	77,246	2,244	99,5	148,570	1,721	98,8

A influência da concentração nos coeficientes para o sal e a água é bem clara; quanto maior a concentração, maior é a constante. Em soluções mais concentradas o tomate perde mais água devido ao maior gradiente de atividade de água, que é a principal força motriz na transferência de massa. Estas constantes foram ajustadas a uma função exponencial com relação à concentração conforme a Figura 9.



**Figura 9 – Coeficientes de transferência de cloreto de sódio ( $K_s$ ) e da água ( $K_a$ ) do tomate sem epicarpo e com epicarpo em função da concentração osmótica.**

Tanto para a água quanto para o sal observa-se que a influencia da concentração é bem clara, pois em geral, os coeficientes têm valores superiores para tomates com epicarpo.

A difusividade aparente para cada componente foi determinada por meio da equação de difusão de Fick, considerando-se os seis primeiros termos da série. A Tabela 3 mostra os coeficientes de difusão aparente para a água, " $D_a$ ", e o sal, " $D_s$ ", bem como o coeficiente de determinação,  $R^2$ .

Tabela 3 – Coeficientes de transferência de cloreto de sódio ( $K_s$ ) e da água ( $K_a$ ) do tomate sem epicarpo e com epicarpo em função da concentração osmótica.

Com Epicarpo				
Concentração NaCl (%)	Cloreto de sódio		Água	
	$D_s \times 10^{11}$ ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )	$R^2$ (%)	$D_a \times 10^{11}$ ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )	$R^2$ (%)
5	16,033	91,3	15,162	91,4
10	17,306	94,0	19,168	92,1
15	20,676	95,7	27,256	97,5
Sem Epicarpo				
5	24,761	87,7	19,476	85,0
10	25,744	88,3	21,733	86,3
15	27,450	89,4	22,765	86,8

Esses coeficientes encontram-se próximos aos relatados na literatura por diversos autores, conforme a Tabela 4, no entanto, como o soluto estudado possui baixo peso molecular e alto poder de ionização, os valores de “D” obtidos foram relativamente superiores.

Tabela 4 – Valores do coeficiente de difusão do soluto e da água para diversos produtos com diferentes tratamentos osmóticos.

Amostra (Geometria)	Condições	$D_s \times 10^{11}$ ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )	$D_a \times 10^{11}$ ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )	Autor
Uva “in natura” (Esfera)	Sacarose 47-63°Brix 37-60°C	0,2540-2,219	1,980-5,104	NSONZI e RAMASWAMAY (1997)
Batata (Placa plana)	Sacarose 45-65°Brix 20-50°C	0,44-2,44	1,42-4,69	LAZARIDES et al. (1997)
Cenoura (Cilindro)	Sacarose 40-70°Brix 30-50°C	2,88-7,00	3,11-7,34	RASTOGI e RAGHAVARAO (1998)
Cebola (Placa plana)	NaCl 5%-15% agitação: 70 rpm	1,43-5,04	3,26-12,73	BARONI e HUBINGER (1997)
Tomate “in natura” (Esfera)	NaCl 10% e 25% S e C/ Epicarpo	-	11,69 e 14,42	AZOUBEL e MURR (2000)

Ainda pode ser acrescentado que diferenças estruturais entre o material biológico provocam comportamentos quantitativamente diferentes. LAZARIDES et al. (1997) relatam que o efeito da estrutura celular e a porosidade intercelular são fatores importantes na transferência substancial de solutos para os espaços extracelulares.

Nas Figuras 10 e 11 verifica-se como o efeito da semipermeabilidade do epicarpo se reflete nas curvas da cinética de transferência do cloreto de sódio, cujos coeficientes de difusão têm valores superiores para o tomate sem epicarpo.

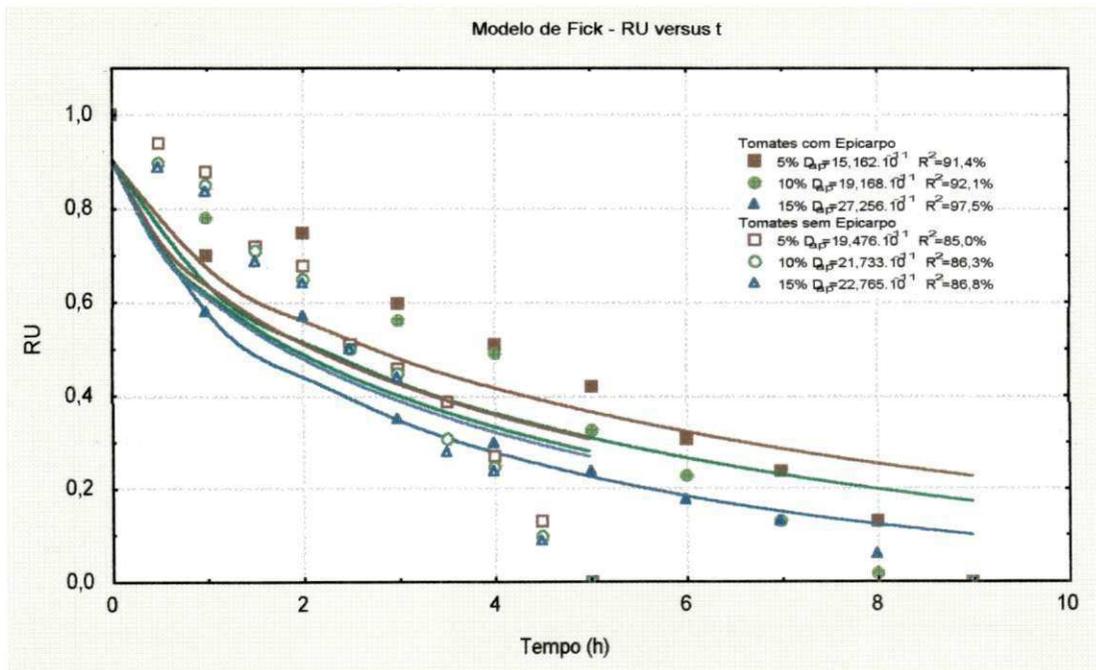


Figura 10 – Taxa de transferência da água do tomate com epicarpo e sem epicarpo a diferentes concentrações de solução osmótica.

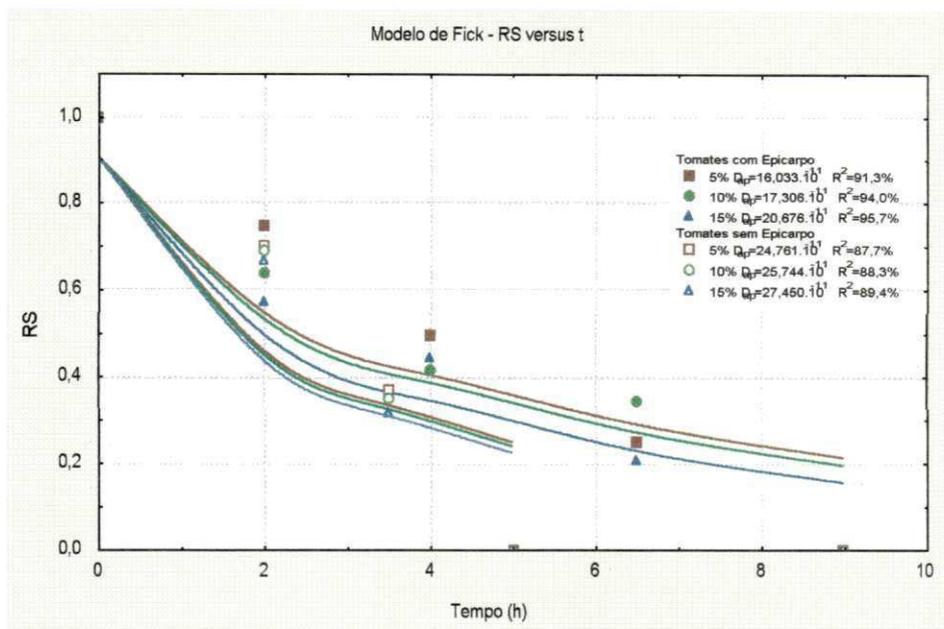


Figura 11 – Taxa de transferência de cloreto de sódio no tomate com epicarpo e sem epicarpo a diferentes concentrações de solução osmótica.

Por outro lado, os coeficientes de difusão da água encontram-se muito próximos para os tomates com epicarpo e sem epicarpo, confirmando desta forma, que a difusividade da água depende mais de outros parâmetros do processo osmótico (LAZARIDES et al., 1997).

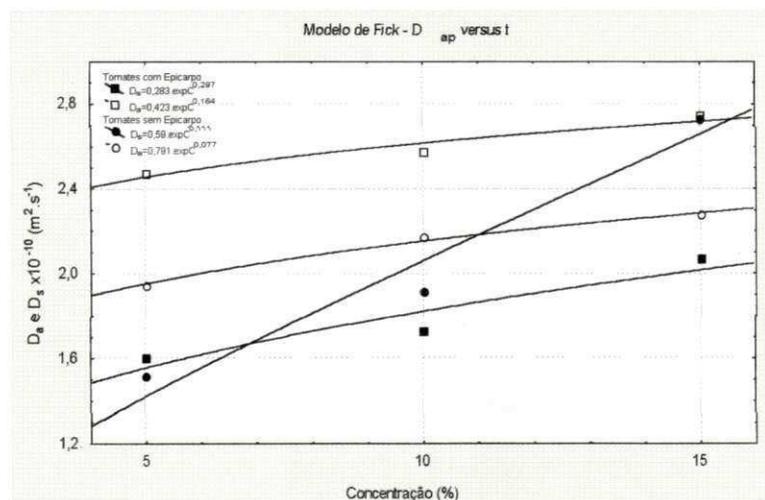


Figura 12 – Coeficientes de difusão de cloreto de sódio (D<sub>s</sub>) e da água (D<sub>a</sub>) do tomate sem epicarpo e com epicarpo em função da concentração osmótica.

## 4.2. SECAGEM CONVENCIONAL EM CAMADA DELGADA

### 4.2.1. MODELO DE PAGE – SEM ENCOLHIMENTO

Observa-se na Tabela 5 os valores do coeficiente “K” da equação de Page para tomates sem epicarpo e com epicarpo variando de 2,138 a 33,266  $\times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  e de 0,179 a 0,428  $\times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , respectivamente. Nesta tabela os Tratamentos I, II e III referem-se a tratamentos osmóticos em soluções de 5, 10, 15% de NaCl, respectivamente, e o Tratamento IV a os tomates sem tratamento osmótico.

Tabela 5 – Valores dos coeficientes de “K” da equação de Page para os tomates sem epicarpo e com epicarpo.

Temperatura (°C)	Tratamento	Com Epicarpo			Sem Epicarpo		
		K $\times 10^3$ (s <sup>-1</sup> )	n	R <sup>2</sup> (%)	K $\times 10^3$ (s <sup>-1</sup> )	n	R <sup>2</sup> (%)
60	I	0,428	2,558	99,5	3,841	2,455	99,1
	II	0,319	2,343	97,7	8,627	2,124	98,6
	III	6,080	1,605	96,1	13,789	1,857	99,4
	IV	0,269	2,346	95,6	3,015	2,518	97,9
70	I	0,208	2,678	94,8	3,326	2,535	99,1
	II	0,179	2,933	97,9	13,761	2,055	99,7
	III	0,247	2,739	97,3	9,328	2,088	98,2
	IV	0,183	2,787	96,8	2,452	2,773	98,9
80	I	0,332	2,877	96,1	4,533	2,450	99,9
	II	0,249	3,072	97,4	14,465	1,998	99,7
	III	0,245	2,892	95,8	21,787	1,821	99,7
	IV	0,228	2,849	94,6	2,138	2,558	99,8
90	I	0,215	3,359	94,1	12,859	2,461	99,7
	II	0,320	3,286	96,8	22,462	2,190	99,7
	III	0,280	3,548	98,5	33,262	1,870	99,8
	IV	0,179	3,419	93,2	7,702	2,099	97,2

Os valores do coeficiente “K”, representados por uma superfície de resposta, encontram-se nas Figuras 13 e 14, onde a variação do coeficiente se dá em função da temperatura e da concentração da solução osmótica.

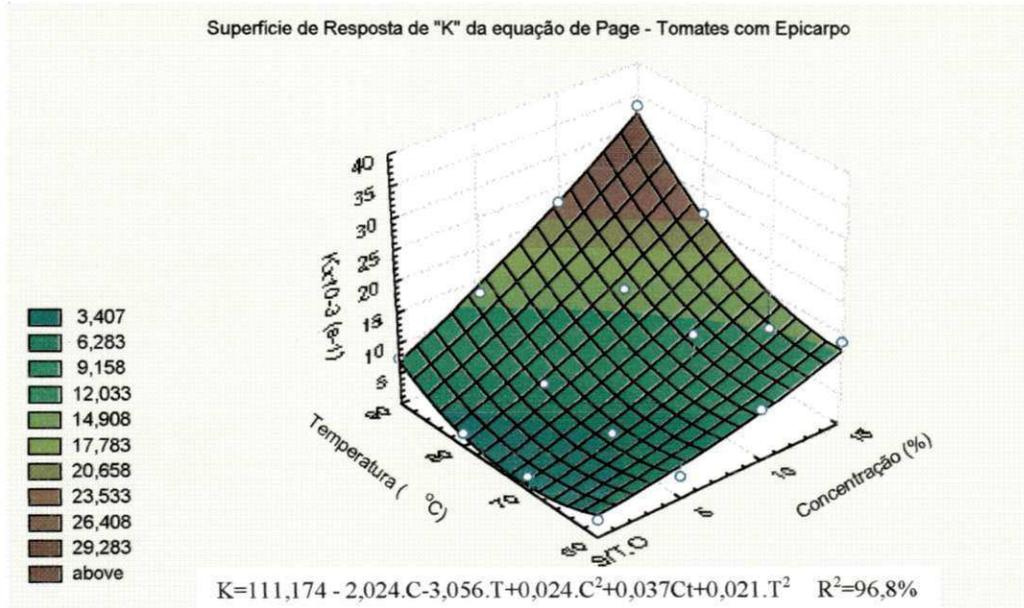


Figura 13 – Superfície de Resposta da constante “K” da equação de Page em função de diferentes temperaturas e diferentes concentrações de pré-tratamento osmótico para os tomates sem epicarpo.

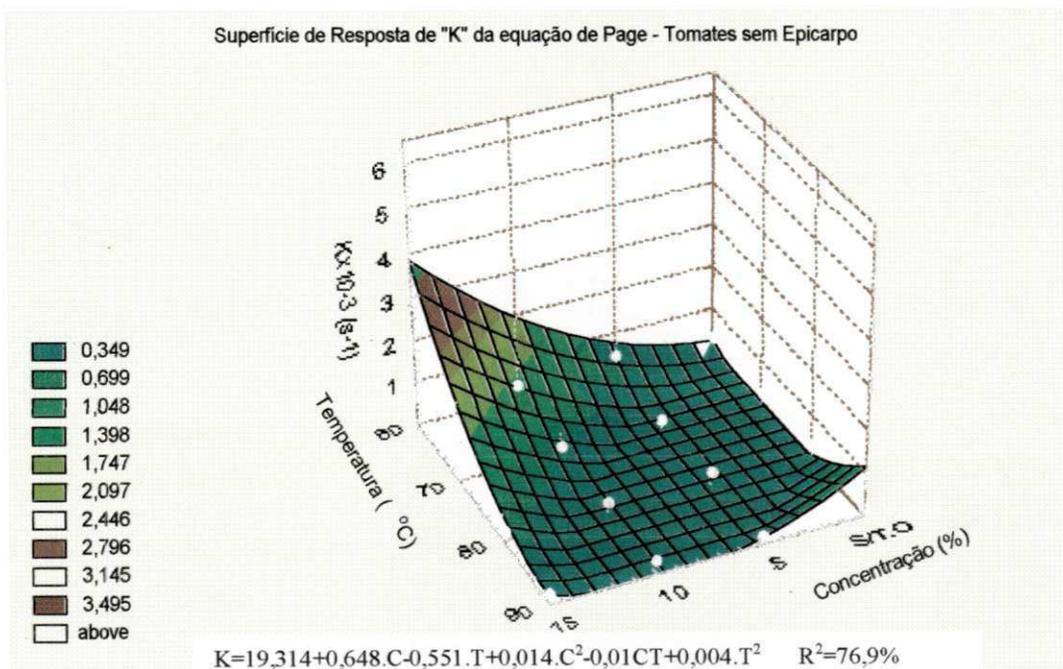


Figura 14 - Superfície de Resposta da constante “K” da equação de Page em função de diferentes temperaturas e diferentes concentrações de pré-tratamento osmótico para tomates com epicarpo.

Observa-se, que em geral a taxa de secagem aumenta com a temperatura e a concentração da solução no caso dos tomates sem epicarpo, entretanto, os valores do coeficiente “K” para os tomates com epicarpo, não se caracterizam com uma função unicamente crescente com o aumento da temperatura e da concentração de solução.

ROMERO et al (1997), estudando a resistência do epicarpo de tomates, determinaram que a permeabilidade da pele do tomate calculada nas condições dos experimentos foi de  $1,3 \times 10^{-5}$  g/s.cm<sup>2</sup>.atm. Esse valor é duas vezes maior em ordens de grandeza do que a permeabilidade do pericarpo de um grão de milho, também determinado através da curva de secagem. Os ensaios ainda mostraram que a quantidade de massa evaporada sob a superfície exterior na secagem do tomate sem epicarpo foi na ordem de 10 vezes maior do que os tomates com epicarpo.

Nas Figuras 15 e 16 observa-se, no geral, que quanto maior a temperatura, menor o tempo para os tomates atingirem a umidade do equilíbrio, ressaltando que a temperatura pareceu exercer uma influência muito maior que a concentração da solução nas superfícies de resposta do processo. Pode-se constatar também que o efeito do pré-tratamento osmótico em salmoura influencia positivamente a cinética de secagem. Isto é mais evidente nas amostras sem epicarpo, onde os mecanismos de transferência de massa e calor são favorecidos em função da alteração do tecido celular decorrente de uma maior quantidade de massa do soluto (NaCl).

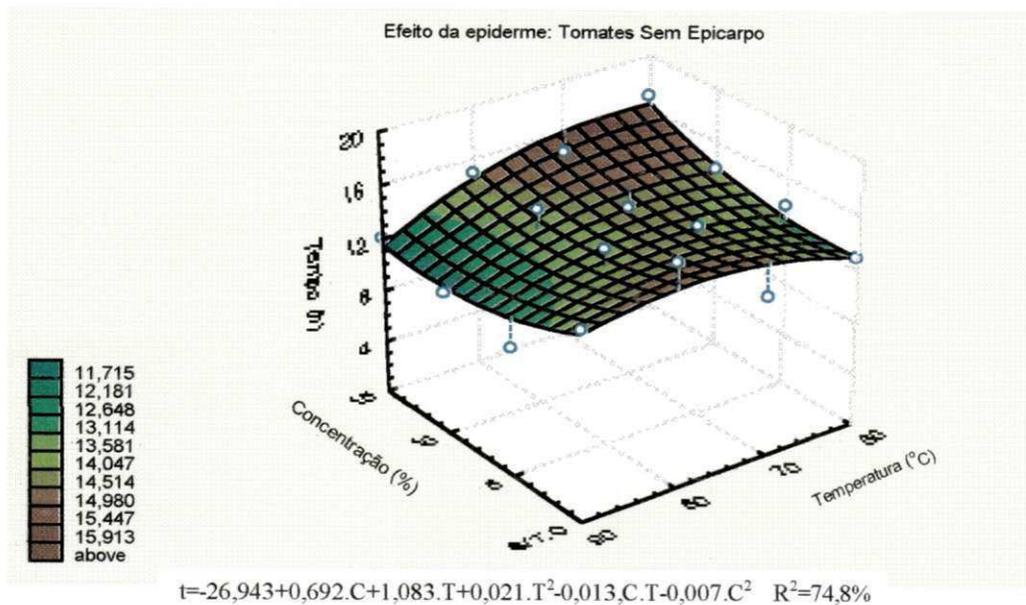


Figura 15 - Superfície de Resposta do tempo de secagem em função de diferentes temperaturas e diferentes concentrações de pré-tratamento osmótico para tomates sem epicarpo.

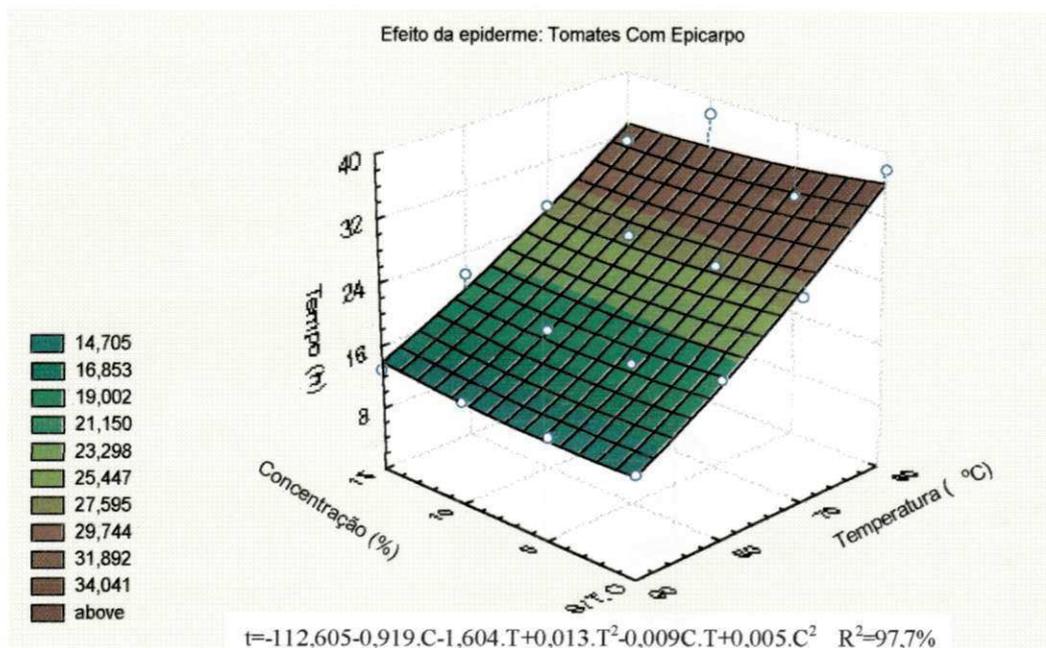
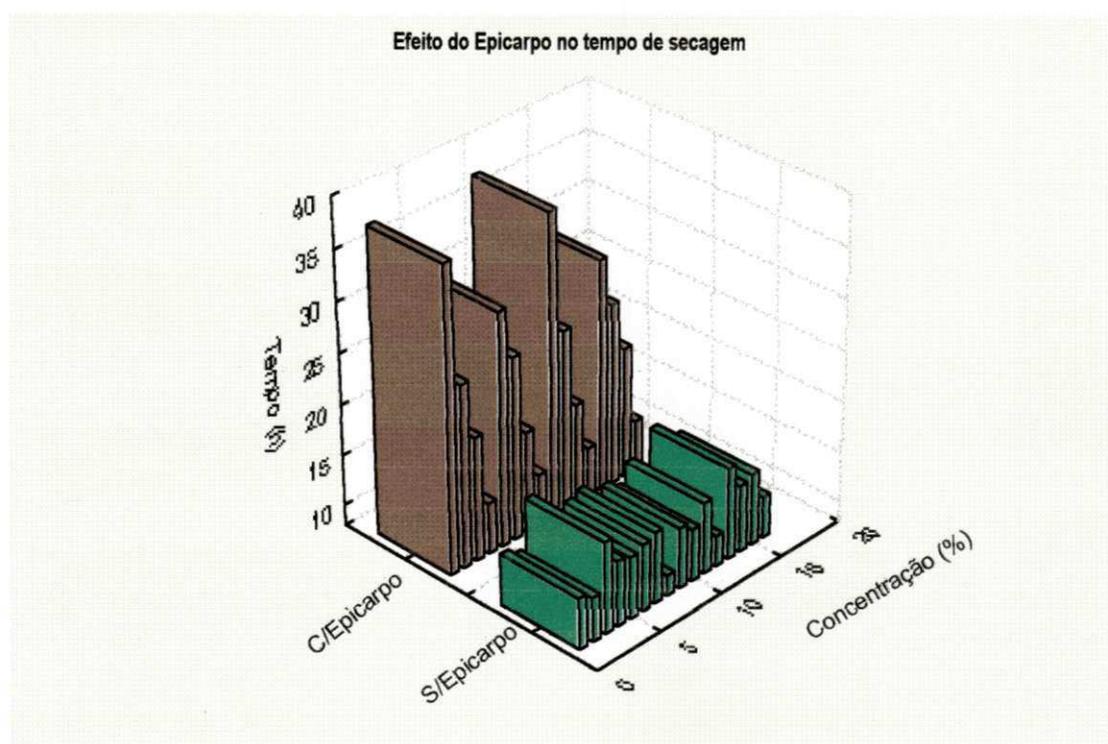


Figura 16 - Superfície de Resposta do tempo de secagem em função de diferentes temperaturas e diferentes concentrações de pré-tratamento osmótico para tomates com epicarpo.

O tempo, para os tomates sem epicarpo e com epicarpo atingirem o equilíbrio varia entre 11,715 a 15,913 h e 14,705 a 34,041 h, respectivamente.

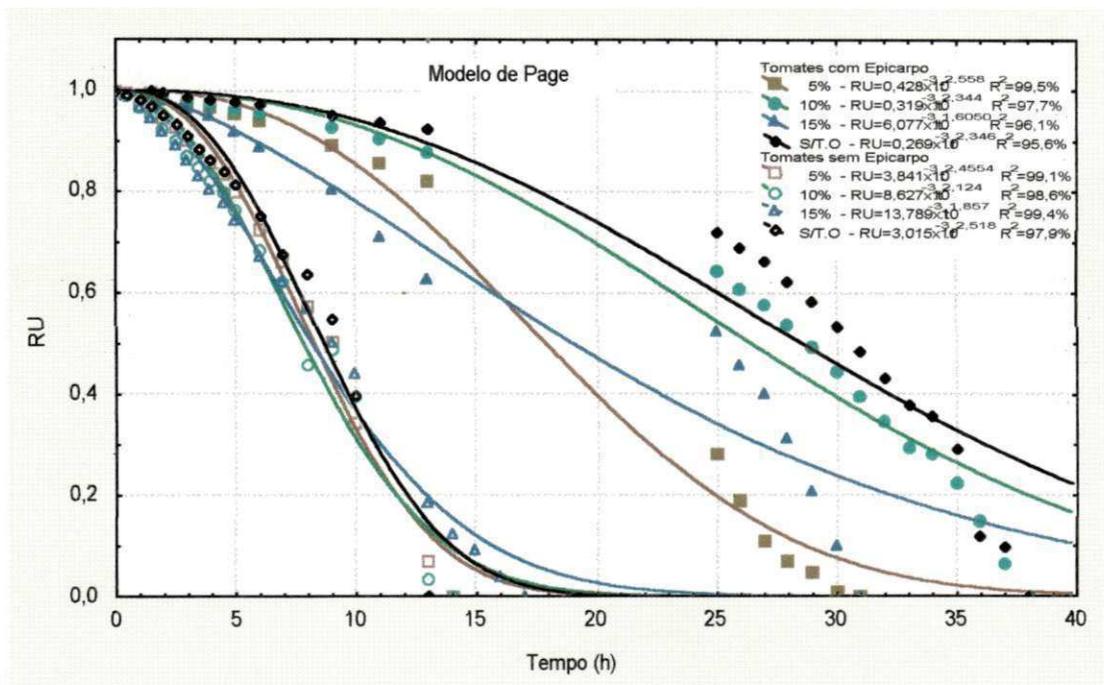
Esse fato é melhor visualizado na Figura 17, onde se constata também a redução de tempo que levou o tomate sem epicarpo para atingir o seu equilíbrio.



**Figura 17 – Tempo de secagem em função de diferentes temperaturas e diferentes concentrações de pré-tratamento osmótico para tomates com epicarpo e sem epicarpo.**

Os valores de “n” da equação de Page variam, na sua maioria, de 1,8 a 3,5. Diversos pesquisadores estudando a equação de Page, para diferentes temperaturas, encontraram valores de “n” muito próximos e adotaram valores fixos, no entanto, neste trabalho este procedimento não foi realizado. O valor médio de “n”, nesta pesquisa é igual a  $2,24 \pm 0,29$  para tomates sem epicarpo e  $2,21 \pm 1,05$  para tomates com epicarpo.

Nas Figuras 18 a 21 estão graficados os dados experimentais e os ajustados ao modelo de Page. Observa-se que na maioria das vezes as curvas dos tomates sem epicarpo apresentam coeficientes de determinação, acima de 99,0%, enquanto os com epicarpo coeficientes acima de 95,0%. Esses resultados indicam um bom ajuste da equação proposta por Page, e reforçam a afirmação feita por diversos autores (MISRA e YOUNG, 1980; CAVALCANTI MATA, 1996; 1997; BASUNIA e ABE, 2001; RAMESH e RAO, 1996; SINICO et al, 1995; CRONIN e KEARNEY, 1998) de que esta equação é a que tem melhor se adequado para representar a curva de secagem em camada delgada.



**Figura 18 –** Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo pré-tratados em diferentes soluções osmótica (5, 10 e 15%) e de tomates com epicarpo e sem epicarpo sem pré-tratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear, na secagem convencional à temperatura de 60°C

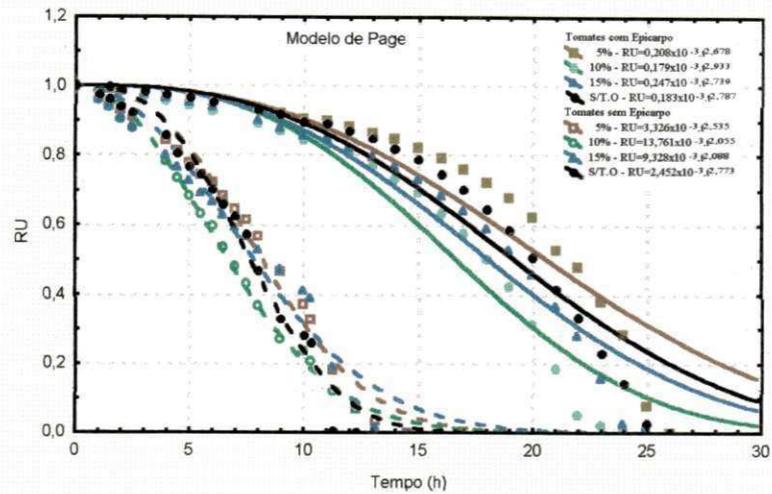


Figura 19 - Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo pré-tratados em diferentes soluções osmótica (5, 10 e 15%) e de tomates com epicarpo e sem epicarpo sem pré-tratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear, na secagem convencional à temperatura de 70°C

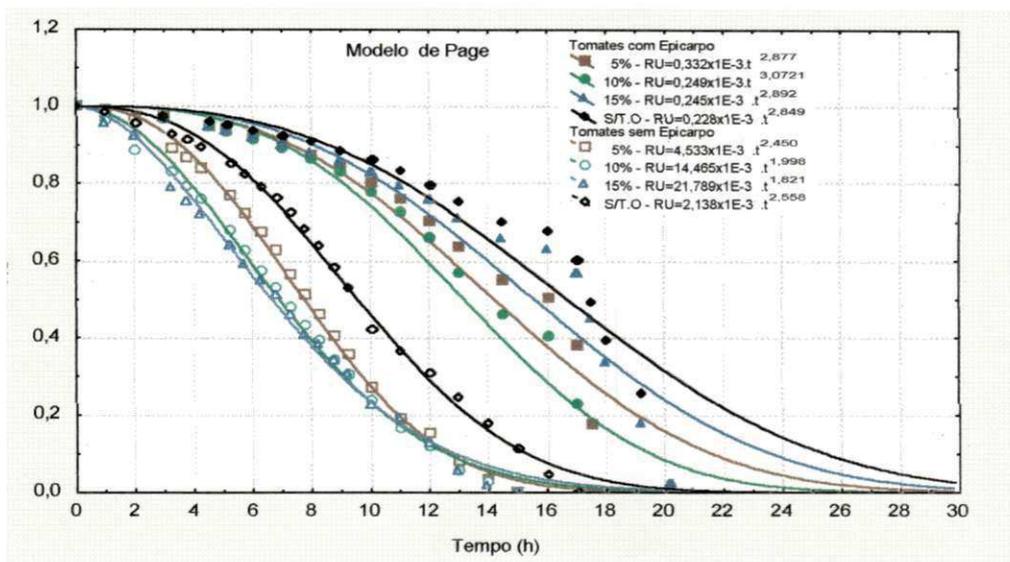
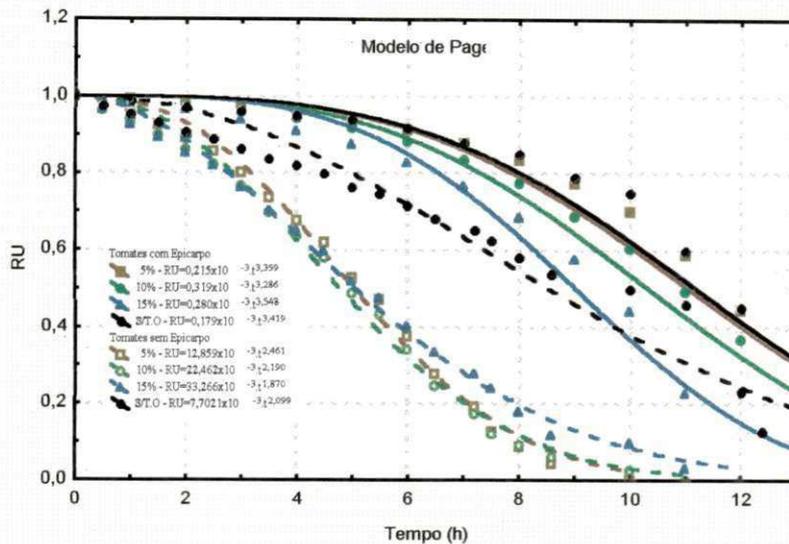


Figura 20 - Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo pré-tratados em diferentes soluções osmótica (5, 10 e 15%) e de tomates com epicarpo e sem epicarpo sem pré-tratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear, na secagem convencional à temperatura de 80°C



**Figura 21 - Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo pré-tratados em diferentes soluções osmóticas (5, 10 e 15%) e de tomates com epicarpo e sem epicarpo sem pré-tratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear, na secagem convencional à temperatura de 90°C**

CRONIN e KEARNEY (1998) confirmam que a curva de cinética de secagem de material biológico com alto teor de umidade se caracteriza por duas fases distintas; a taxa de secagem convectiva constante seguida por a taxa de secagem difusiva que é decrescente. Acrescentando ainda que o período da taxa de secagem decrescente considera-se o mais importante, haja vista, que consiste de duas regiões. Na primeira região, da taxa de secagem decrescente, a migração de água é menos intensa, pois neste período predomina a água de absorção e adsorção ligada moderadamente. Na segunda região o mecanismo de transporte de água é caracterizado por uma mudança de curvatura de curva de secagem, onde a água no interior do produto é extremamente ligada caracterizada pela água fortemente adsorvida.

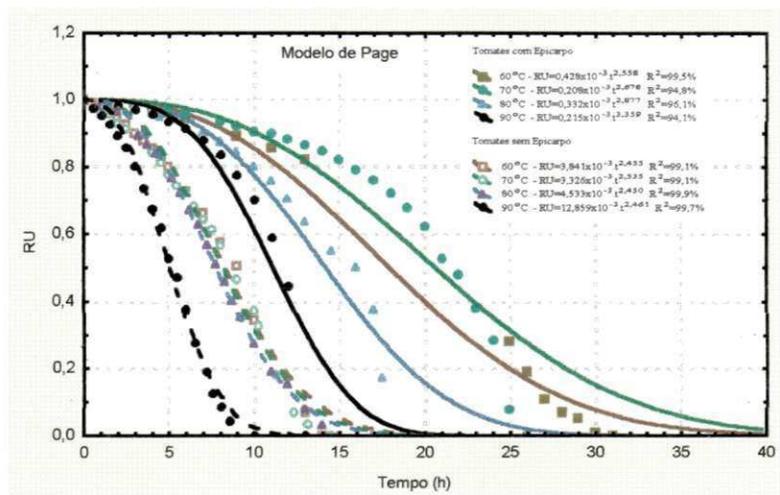
Nota-se ainda que as curvas de secagem do tomate sem epicarpo apresentam a fase de taxa decrescente mais acentuada do que os tomates com epicarpo. Nas temperaturas 80 e 90°C os tomates sem epicarpo pré-tratados tiveram uma cinética mais rápida que os tomates não tratados.

Observa-se que durante o processo de secagem o fenômeno difusional ocorre mais devido ao deslocamento da fase líquida, pois conforme pode ser observado na Fotografia 2, constata-se que os tomates secos a uma temperatura de 80 e 90°C ficaram com uma superfície coberta de sal, reforçando desta forma que a migração só poderia ter ocorrido pela predominância da difusão do líquido.

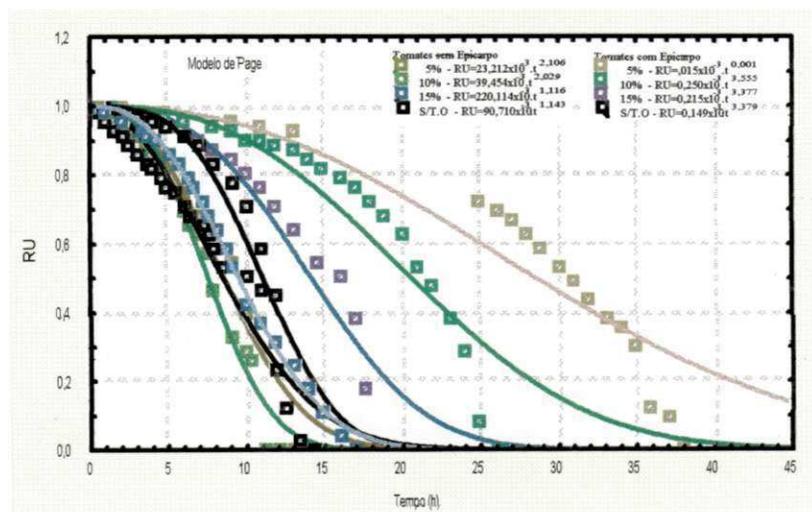


**Fotografia 2- Tomates secos às temperaturas de 60, 70, 80 e 90 ° C**

Na Figura 22 encontram-se as secagens do tomate à temperatura de 60, sem tratamento osmótico e nas Figuras 23, 24 e 25 estão as secagens, às temperaturas de 70, 80 e 90°C, do tomate submetido a um pré-tratamento osmótico nas concentrações de cloreto de sódio e sacarose de 5:0,4; 10:0,4 e 15:0,4 %, respectivamente.



**Figura 22** - Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo nas secagens convencionais às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C, sem pré-tratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear.



**Figura 23** - Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo nas secagens convencionais às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C, com pré-tratamento osmótico a uma concentração de 5% NaCl, obtidas por regressão não-linear.

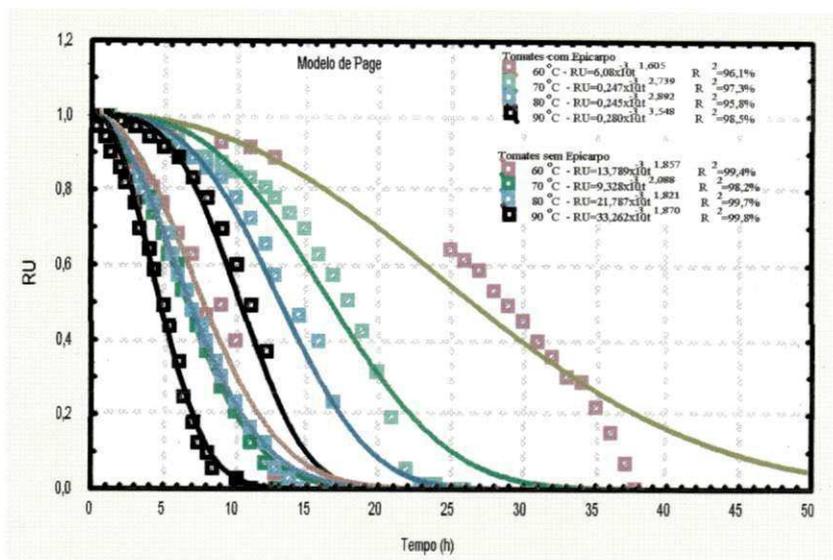


Figura 24 - Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo nas secagens convencionais às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C, com pré-tratamento osmótico a uma concentração de 10% NaCl, obtidas por regressão não-linear.

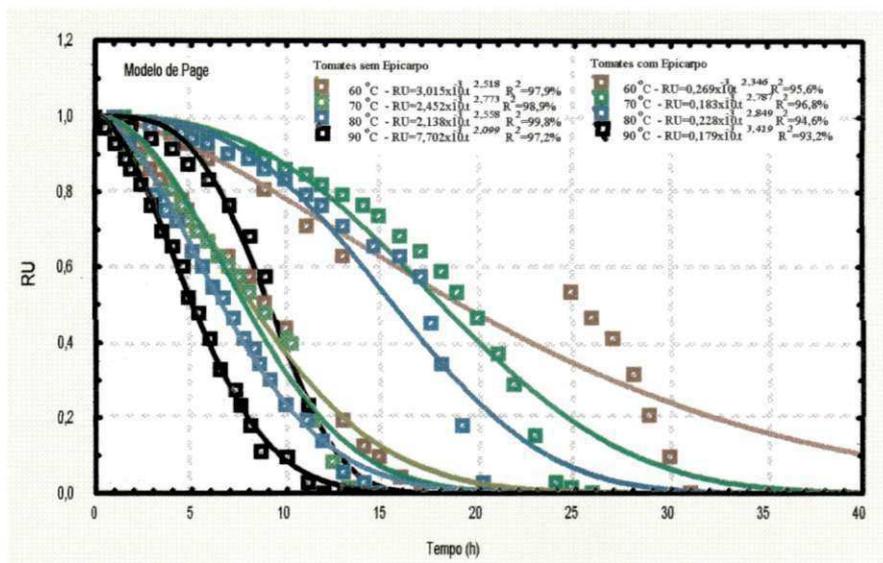


Figura 25 - Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo nas secagens convencionais às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C, com pré-tratamento osmótico a uma concentração de 15% NaCl, obtidas por regressão não-linear.

#### 4.2.2. MODELO DE FICK – SEM ENCOLHIMENTO

De acordo com a Tabela 6, os valores do coeficiente de difusão para tomates sem epicarpo e com epicarpo variam de 1,242 a 5,052  $\times 10^{-10}$   $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$  e de 0,580 a 2,002  $\times 10^{-10}$   $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ , respectivamente.

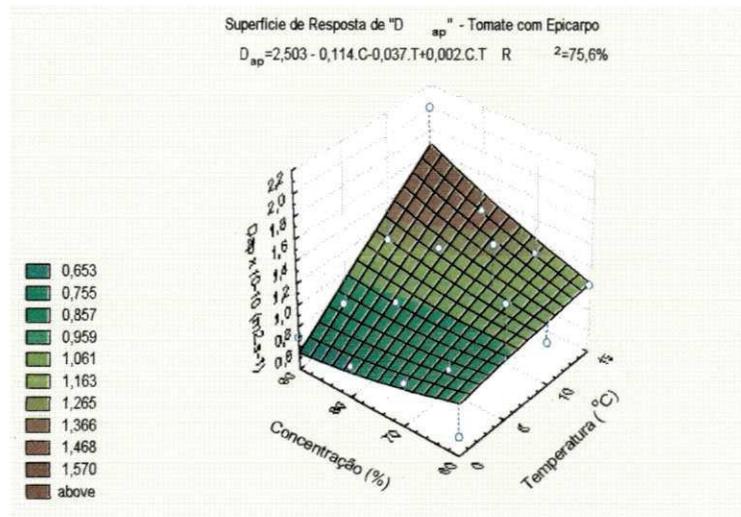
Tabela 6 - Valores dos coeficientes de difusão " $D_{ap}$ " da solução analítica da equação de Fick, utilizando os seis primeiros termos da série, para os tomates sem epicarpo e com epicarpo.

Temperatura (°C)	Tratamento	<i>Com Epicarpo</i>		<i>Sem Epicarpo</i>	
		$D_{ap} \times 10^{10}$ ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ )	$R^2$ (%)	$D_{ap} \times 10^{10}$ ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ )	$R^2$ (%)
60	I	1,461	79,1	2,317	75,0
	II	0,807	80,2	<b>1,242</b>	77,7
	III	1,038	83,3	1,676	83,0
	IV	<b>0,580</b>	76,8	1,815	71,7
70	I	0,606	64,2	2,639	76,9
	II	1,451	71,0	3,104	82,5
	III	1,097	69,8	2,468	80,1
	IV	0,800	66,7	2,551	74,9
80	I	0,977	66,6	2,989	78,2
	II	1,189	67,5	3,766	83,2
	III	1,255	67,2	3,672	85,1
	IV	0,700	64,1	1,957	75,0
90	I	0,719	59,6	4,548	80,0
	II	1,046	65,6	<b>5,052</b>	83,1
	III	<b>2,002</b>	69,7	4,062	85,2
	IV	0,704	58,4	2,435	77,4

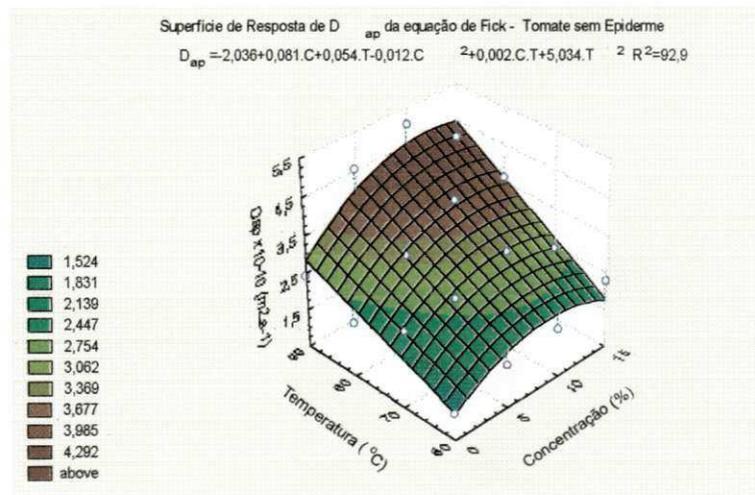
Os valores obtidos para os coeficientes de difusão (Tabela 6) são coerentes com as justificativas já citadas anteriormente, com relação ao efeito do epicarpo. Todavia, estes resultados foram obtidos utilizando-se os seis primeiros termos da solução analítica, apresentando coeficientes de determinação que variam de 74,9 a 95,2% para tomates sem epicarpo e de 58,4 a 83,3% para tomates com epicarpo.

Numa análise da superfície de resposta do coeficiente de difusão " $D_{ap}$ " em função da temperatura e da concentração da solução osmótica, observa-se um mesmo comportamento ao obtido para o coeficiente "K" da equação de Page; os coeficientes de difusão são maiores para

os tomates secos sem epicarpo do que os tomates secos com epicarpo, seguindo a mesma tendência dos intervalos de “K” encontrados para a equação de Page.



**Figura 26 - Superfície de Resposta da constante “D<sub>ap</sub>” da solução analítica da equação de Fick em função de diferentes temperaturas e diferentes concentrações de pré-tratamento osmótico para tomates com epicarpo.**



**Figura 27 - Superfície de Resposta da constante “D<sub>ap</sub>” da solução analítica da equação de Fick em função de diferentes temperaturas e diferentes concentrações de pré-tratamento osmótico para tomates sem epicarpo.**

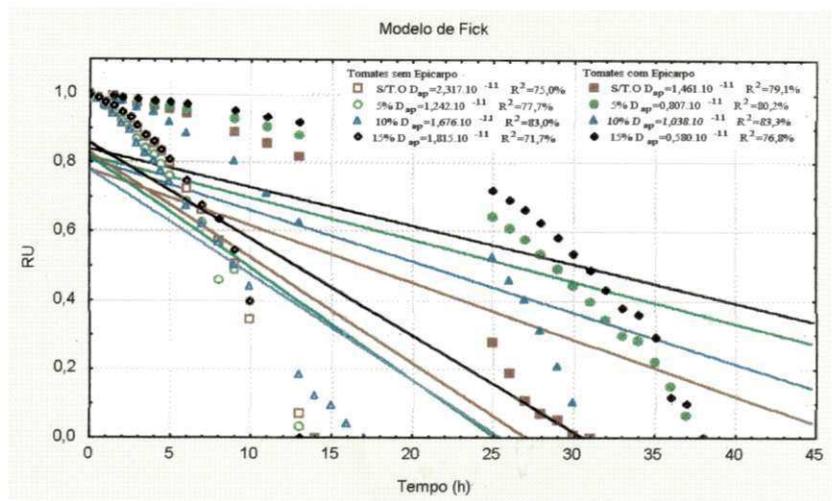
Em geral verifica-se que quanto maior a temperatura de secagem e concentração da solução osmótica para amostras sem epicarpo, maior a transferência de massa por área superficial por unidade de tempo.

Apesar de apresentarem coeficientes de determinação relativamente baixos, os resultados obtidos para “ $D_{ap}$ ” da solução analítica estão coerentes com os relatados por diversos autores, como pode ser constatado na Tabela 7.

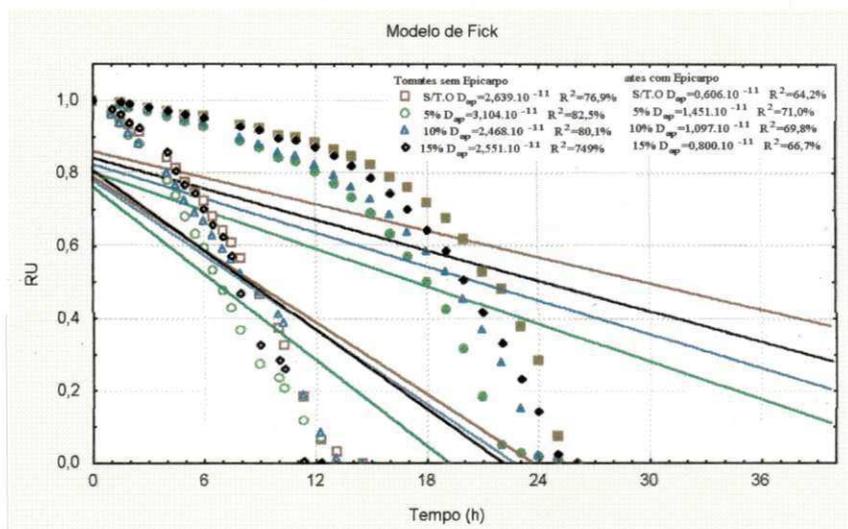
**Tabela 7 - Valores dos coeficientes de difusão “ $D_{ap}$ ” da solução analítica da equação de Fick na secagem de diversos produtos com diferentes pré-tratamentos osmóticos.**

<b>Amostra</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Pré-tratamento</b>	<b><math>D_{ap} \times 10^{10}</math> (m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Autor</b>
<b>Morango</b>	55	Sem Branqueamento	5,14 ± 0,17	ALVAREZ et al. (1995)
		Branqueamento + 35% glicose	12,47 ± 1,82	
		Branqueamento + 51% glicose	11,13 ± 1,82	
		Branqueamento + 51% glicose	11,69 ± 0,81	
<b>Maça</b>	30-60	Sem	3,21-12,67	SIMAL et al. (1997)
	30-90	70°Brix sacarose	1,98 - 9,79	
<b>Uva</b>	37-53	47-63°Brix	1,2 - 2,1	RAMASWAMAY e NSONZI (1998)
<b>Cebola</b>	40-60	Sem	1,38 - 4,46	BARONI e HUBINGER (1998)
		10% NaCl	2,95 - 6,46	
		15% NaCl	2,26 - 4,91	
<b>Umbu</b>	70-90	Sem	1,32 - 1,51	SOUZA, S. de (1999)
		Branqueamento + 76°Brix sacarose	1,05 - 1,31	

As Figuras 28 a 31 mostram as curvas ajustadas aos dados experimentais, apresentando um comportamento completamente linear, podendo ser atribuído ao fato de ter utilizado apenas seis termos da série da solução analítica da equação de Fick.



**Figura 28** - Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo pré-tratados em diferentes soluções osmótica (5, 10 e 15%) e de tomates com epicarpo e sem epicarpo sem pré-tratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear, na secagem convencional à temperatura de 60°C



**Figura 29** - Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo pré-tratados em diferentes soluções osmótica (5, 10 e 15%) e de tomates com epicarpo e sem epicarpo sem pré-tratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear, na secagem convencional à temperatura de 70°C

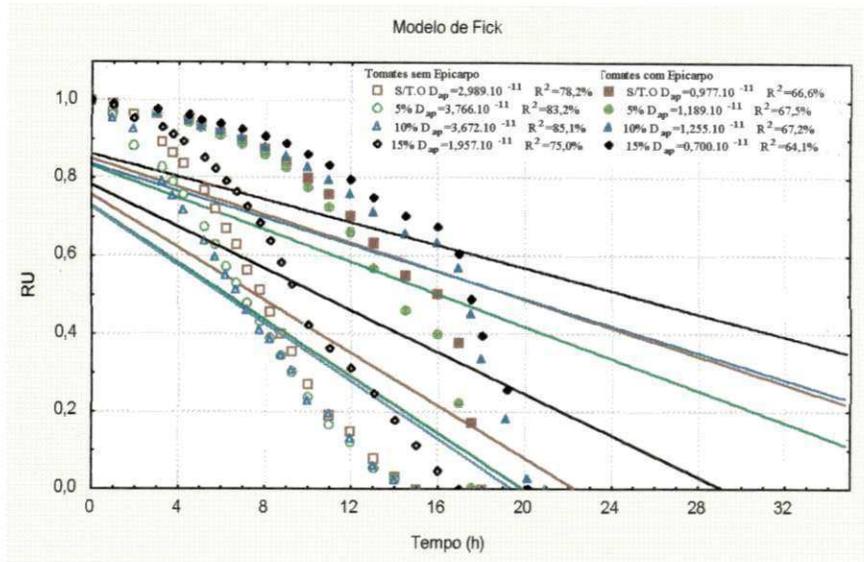


Figura 30 - Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo pré-tratados em diferentes soluções osmótica (5, 10 e 15%) e de tomates com epicarpo e sem epicarpo sem pré-tratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear, na secagem convencional à temperatura de 80°C

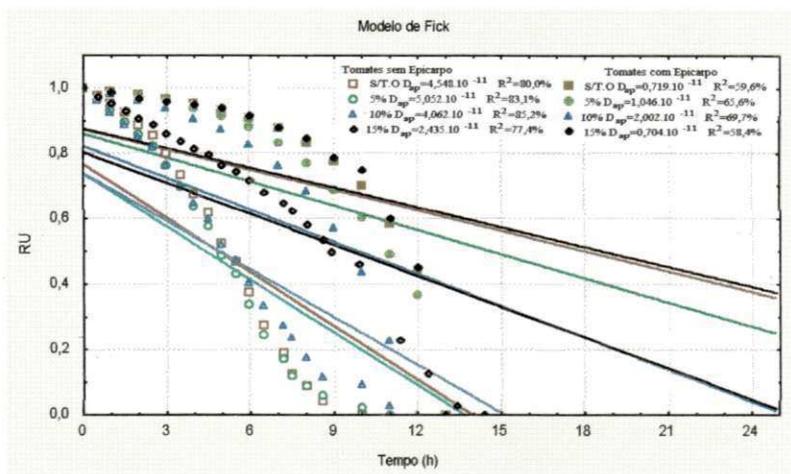


Figura 31 - Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo pré-tratados em diferentes soluções osmótica (5, 10 e 15%) e de tomates com epicarpo e sem epicarpo sem pré-tratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear, na secagem convencional à temperatura de 90°C

Mesmo que o coeficiente de difusão esteja englobando todos os efeitos de diferentes fenômenos durante a migração de umidade, seria interessante reformular as condições iniciais e de contorno, visando uma simulação mais real aos fenômenos envolvidos no ensaio. Um dos pontos mais crítico nos modelos de difusão líquida aplicada à secagem, principalmente de amostras com um teor de umidade muito elevado, é a consideração de que a superfície do material permanece em equilíbrio com o ar de secagem durante todo o processo. Por isso, diversos autores freqüentemente adotam um modelo que combina a difusão líquida internamente ao sólido com a evaporação superficial, o que equivale a considerar uma condição de contorno convectiva para a superfície do material no conjunto de equações diferenciais (SERENO e MEDEIROS, 1990; VAGENAS e MARINOS-KOURIS, 1991; ALVAREZ et al., 1995; QUEIROZ e NEBRA, 2001; LIMA et al., 2000). Neste caso, considerando o efeito convectivo do ar de secagem na superfície do tomate, a condição de contorno em  $r=R$  deve ser substituído por:

$$-D \frac{\partial U}{\partial r} = h_m (U - U_e) \quad r = R; t > 0$$

e ainda incluindo o número de Biot, ( $Bi = h_m R/D$ ), para processos de transferências de massa.

Um outro ponto crítico, não considerado nas suposições feitas, é que a secagem é acompanhada de um encolhimento bastante significativo, pelo qual o tomate sofre alterações em suas dimensões e sua forma original. Este fenômeno, pelas características marcantes, deve estar previsto na modelagem, com vistas a se obter melhor representação física do processo e maior confiabilidade nos coeficientes determinados, como o caso do coeficiente de difusão. Porém, a inclusão do encolhimento nos modelos de secagem é difícil devido a não se ter informações sobre o coeficiente de encolhimento, nem da relação funcional entre encolhimento e difusividade mássica, além de ser uma função de uma retração livre, relacionada com a perda de água e também elástica, a qual é provocada pelas células.

QUEIROZ e NEBRA (2001) incluíram o efeito do encolhimento, através de uma equação empírica na solução numérica, obtendo diferenças significativas para os valores do coeficiente de difusão. Quando consideraram o encolhimento, o coeficiente “ $D_{ap}$ ” reduziu na ordem de 40%, além de melhorar os coeficientes de determinação de 56-62% para 79-91%.

As Figuras 32 a 35 mostram o efeito da temperatura na cinética de secagem. Como era de se esperar, em geral, quanto maior a temperatura, mais rápido o produto atinge seu teor de umidade de equilíbrio.

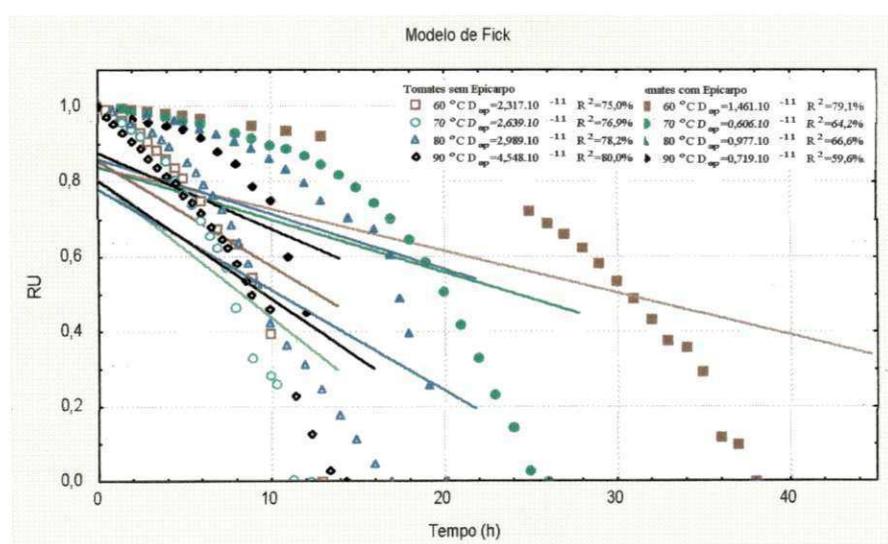
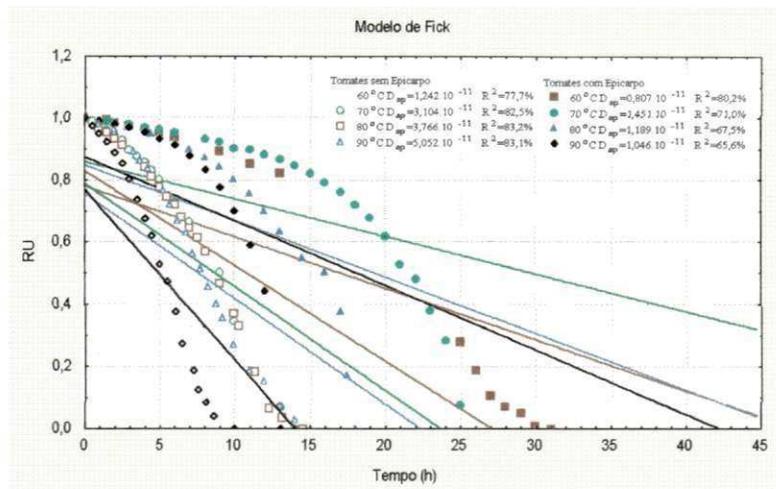
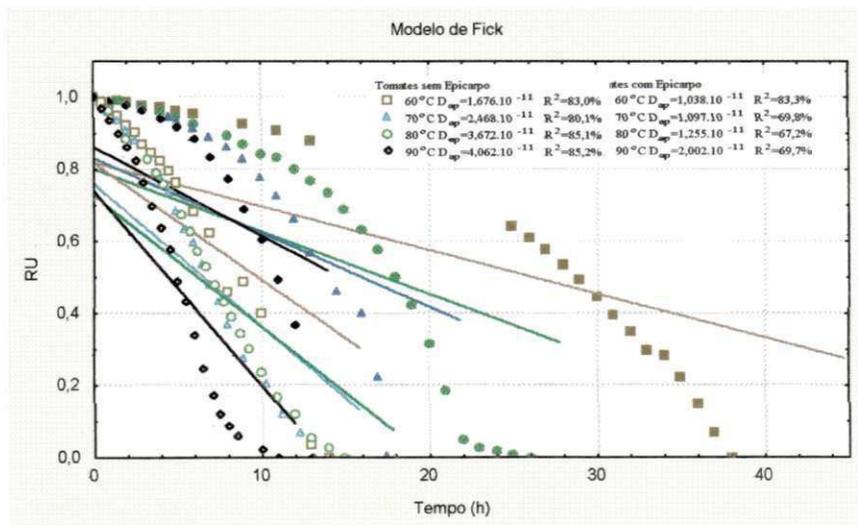


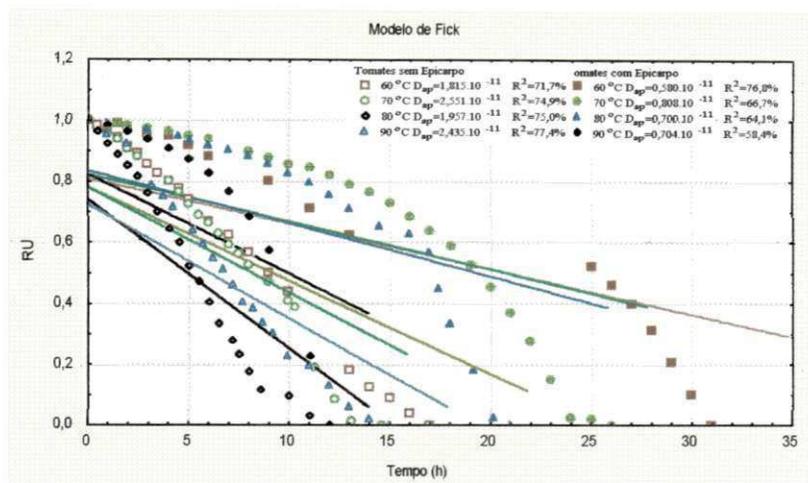
Figura 32 - Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo nas secagens convencionais às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C, sem pré-tratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear.



**Figura 33** - Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo nas secagens convencionais às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C, com pré-tratamento osmótico a uma concentração de 5% NaCl, obtidas por regressão não-linear.



**Figura 34** - Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo nas secagens convencionais às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C, com pré-tratamento osmótico a uma concentração de 10% NaCl, obtidas por regressão não-linear.



**Figura 35 -** Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo nas secagens convencionais às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C, com pré-tratamento osmótico a uma concentração de 15% NaCl, obtidas por regressão não-linear.

#### 4.2.3. MODELO DE PAGE – COM ENCOLHIMENTO

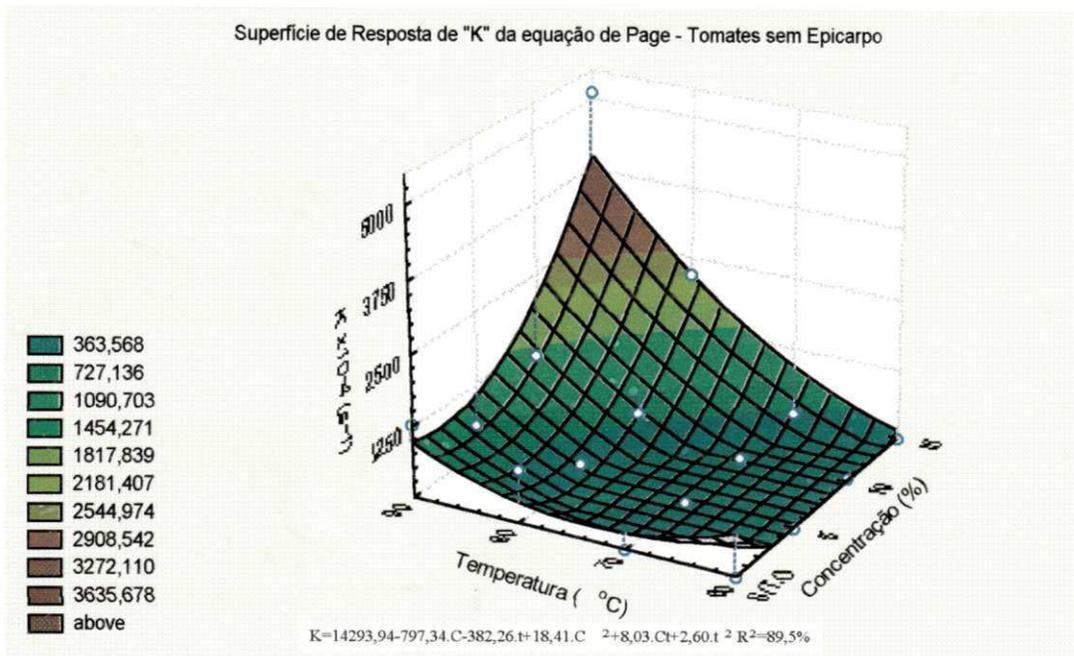
Na Tabela 8 encontram-se os valores do coeficiente “K” da equação de Page para tomates sem epicarpo e com epicarpo, variando de 1,364 a  $5133,982 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  e de 0,975 a  $1729,710 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ , respectivamente.

Tabela 8 - Valores dos coeficientes de “K” da equação de Page para os tomates sem epicarpo e com epicarpo.

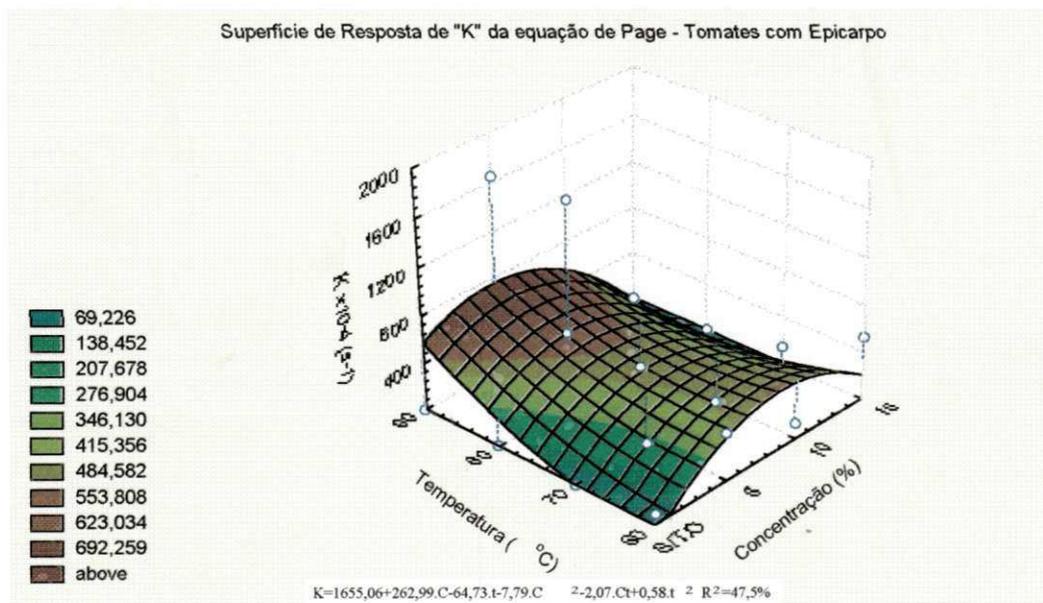
Temperatura (°C)	Tratamento	Com Epicarpo			Sem Epicarpo		
		$K \times 10^4 \text{ (s}^{-1}\text{)}$	n	R <sup>2</sup> (%)	$K \times 10^4 \text{ (s}^{-1}\text{)}$	n	R <sup>2</sup> (%)
60	I	398,871	1,294	99,7	1,956	3,601	97,3
	II	127,278	1,489	99,7	40,288	2,312	90,2
	III	546,072	1,275	99,9	1,757	3,293	97,7
	IV	93,914	1,590	99,9	1,364	3,687	95,7
70	I	1,776	2,622	64,9	4,721	3,234	98,7
	II	1,263	2,763	78,7	5,874	3,375	99,4
	III	146,597	1,318	70,9	56,284	2,143	92,1
	IV	2,393	2,677	85,8	14,205	3,121	99,9
80	I	1729,710	0,001	58,3	506,826	1,411	96,3
	II	1,172	3,202	91,9	1028,602	1,189	98,9
	III	0,983	2,935	72,8	5133,892	0,606	97,9
	IV	0,975	2,991	66,5	1264,182	1,050	98,7
90	I	1650,154	0,001	11,5	232,118	2,106	99,6
	II	2,499	3,555	93,6	394,537	2,029	99,9
	III	2,148	3,377	82,1	2201,135	1,116	99,9
	IV	1,488	3,379	73,1	907,104	1,143	94,5

Apesar de se ter obtido coeficientes de determinação acima de 97,0% para a maioria dos tomates secos sem epicarpo submetidos aos pré-tratamentos osmótico e também aos dos tomates secos com epicarpo a temperatura de 60°C, verifica-se que o valor de “n” da equação não apresenta mais o mesmo comportamento praticamente constante.

A relação do coeficiente “K” em função da temperatura e concentração, pode ser visualizada nas superfícies de resposta, graficadas nas Figuras 36 e 37.

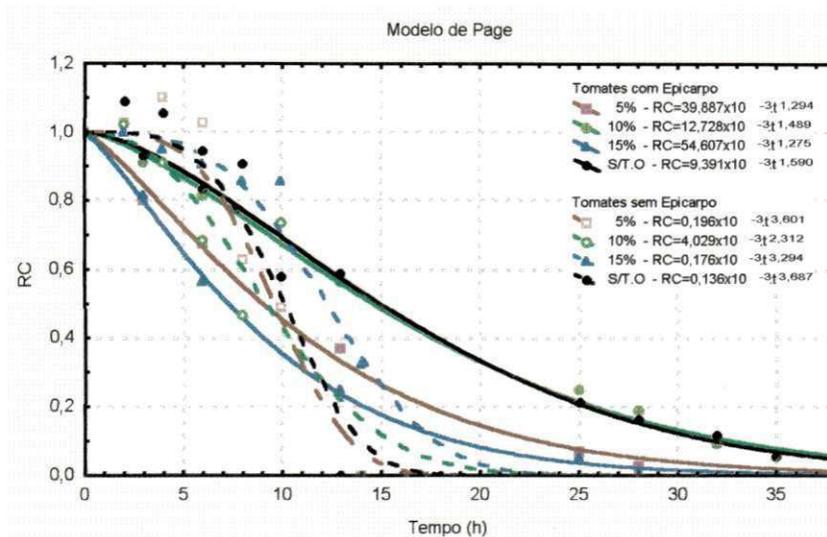


**Figura 36 - Superfície de Resposta da constante "K" da equação de Page em função de diferentes temperaturas e diferentes concentrações de pré-tratamento osmótico para tomates sem epicarpo.**

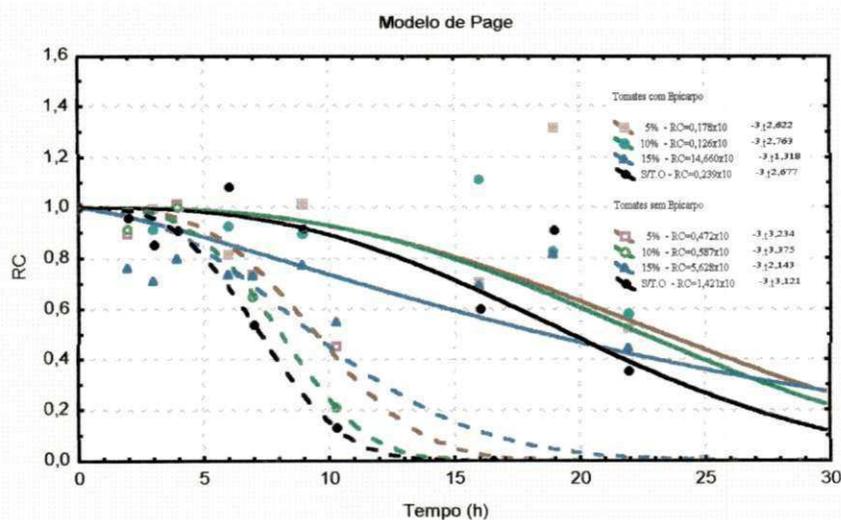


**Figura 37 - Superfície de Resposta da constante "K" da equação de Page em função de diferentes temperaturas e diferentes concentrações de pré-tratamento osmótico para tomates com epicarpo.**

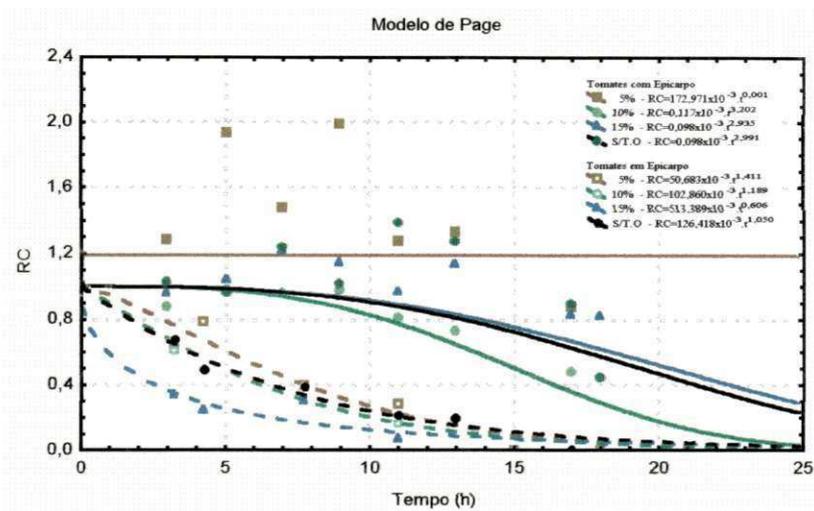
De acordo com estas figuras, supõe-se que seja até difícil obter alguma função entre as variáveis dependentes e independentes. O comportamento das curvas de secagem, ajustadas a equação proposta por Page, incluindo o efeito de encolhimento, são mostradas nas Figuras 38 a 41.



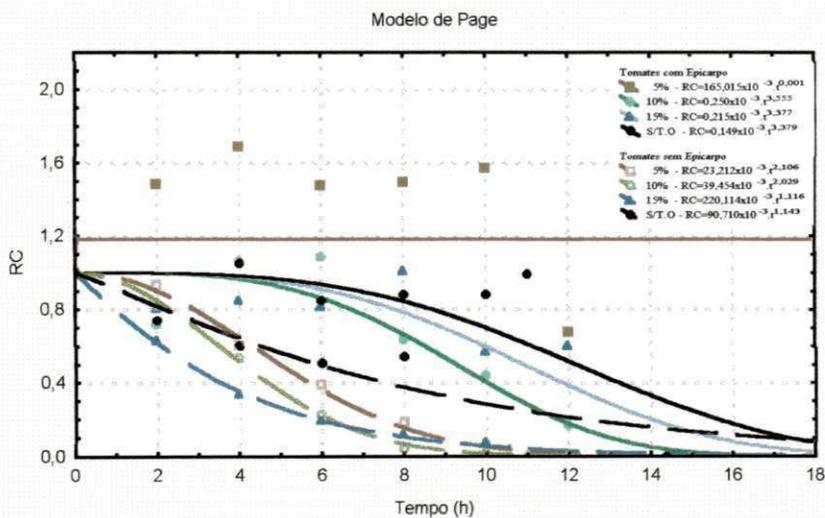
**Figura 38 - Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo pré-tratados em diferentes soluções osmótica (5, 10 e 15%) e de tomates com epicarpo e sem epicarpo sem pré-tratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear, na secagem convencional à temperatura de 60°C**



**Figura 39 - Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo pré-tratados em diferentes soluções osmótica (5, 10 e 15%) e de tomates com epicarpo e sem epicarpo sem pré-tratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear, na secagem convencional à temperatura de 70°C**



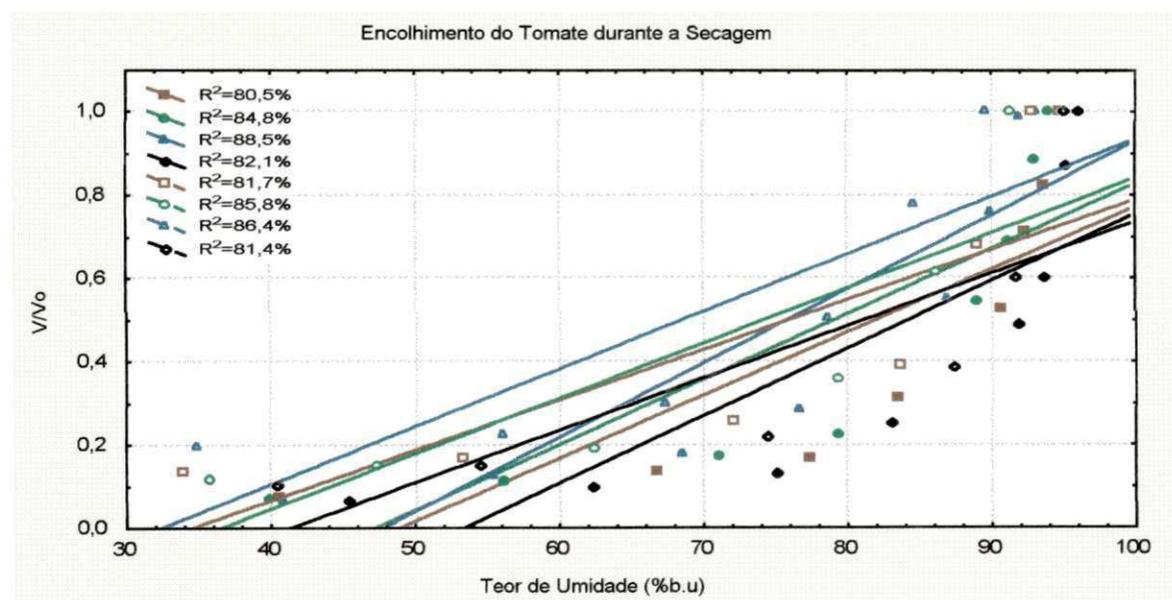
**Figura 40** - Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo pré-tratados em diferentes soluções osmótica (5, 10 e 15%) e de tomates com epicarpo e sem epicarpo sem pré-tratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear, na secagem convencional à temperatura de 80°C



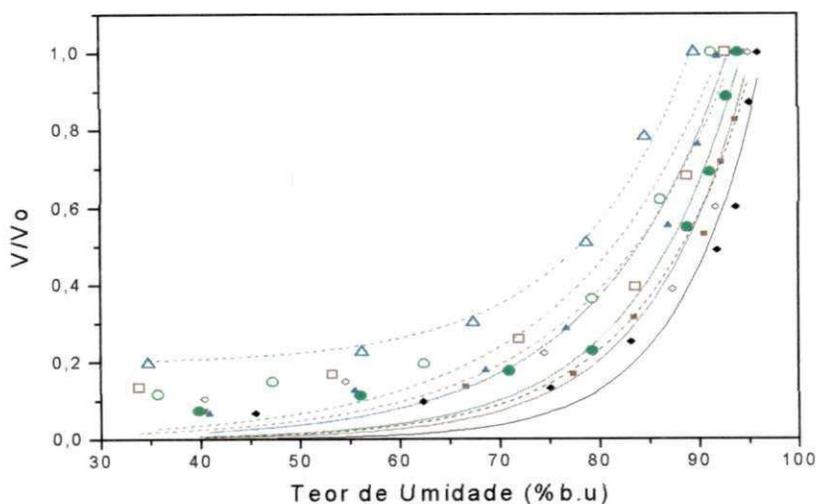
**Figura 41** - Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo pré-tratados em diferentes soluções osmótica (5, 10 e 15%) e de tomates com epicarpo e sem epicarpo sem pré-tratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear, na secagem convencional à temperatura de 90°C

Nota-se, nessas figuras, que a razão de concentração da umidade apresentou em todos os casos vários valores superiores à unidade, esta constatação não era esperada. No entanto este fato pode ser atribuído ao fenômeno de encolhimento, que foi incluído na razão de umidade,

baseando-se na suposição que existe uma linearidade relacionando o encolhimento com o teor de umidade. Para verificar a validade desta hipótese neste experimento com tomates, apresenta-se nas Figuras 42 e 43 o encolhimento adimensional como função do teor de umidade ao longo do processo de secagem.



**Figura 42 – O encolhimento ( $V/V_0$ ) do tomate em função do teor de umidade, ajustado por meio de uma equação linear**

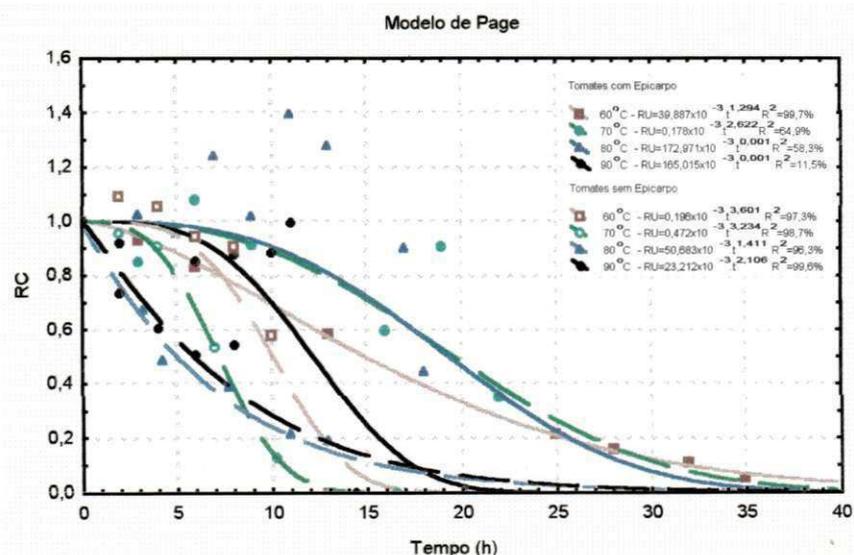


**Figura 43 - O encolhimento ( $V/V_0$ ) do tomate em função do teor de umidade, ajustado por meio de uma equação exponencial**

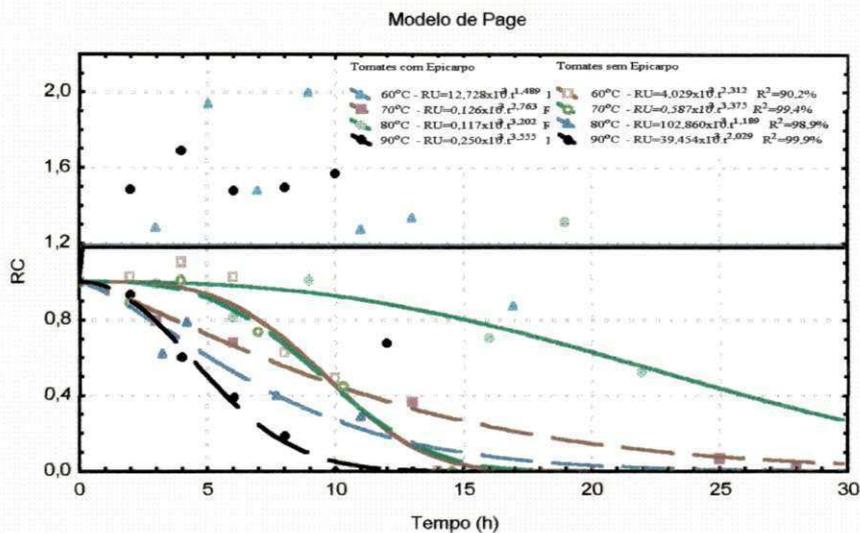
Na Figura 42 observa-se que não é possível definir alguma relação linear entre as duas variáveis, portanto o modelo sugerido por PARK (1987) incluindo-se o efeito de encolhimento na razão de umidade, limita-se para casos específicos. Na Figura 41 constata-se que os resultados se ajustaram melhor a uma função exponencial.

Apesar deste modelo, sugerido por PARK (1987), ter-se mostrado ser eficaz (PARK, 1987; GOUVEIA et al., 1999), o mesmo só foi aplicado em corpos com geometria de placa plana e surgiu quando foi constatado que a variação da espessura durante a secagem resultava de uma função linear com a umidade.

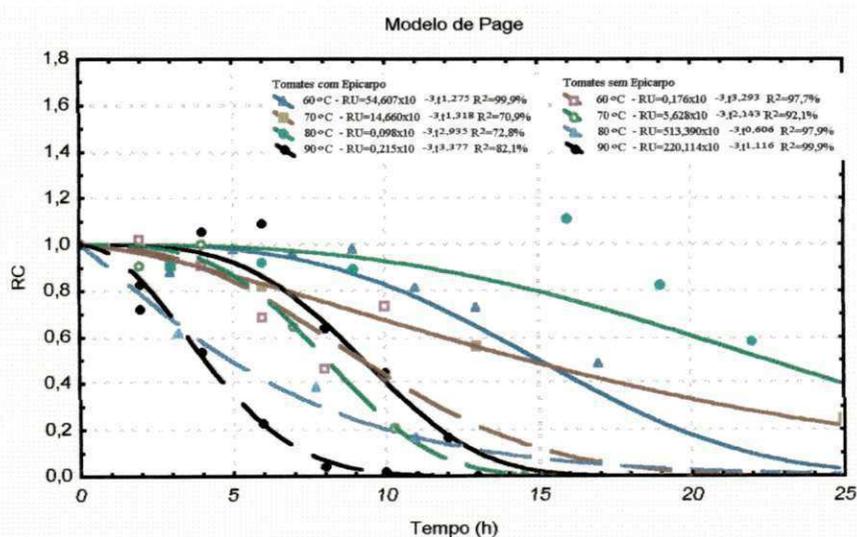
Nas Figuras 44 a 47 apresenta-se o efeito da temperatura de 60 a 90°C, nos tomates secos com pré-tratamento osmótico (5,10 e 15% NaCl) e sem pré-tratamento osmótico.



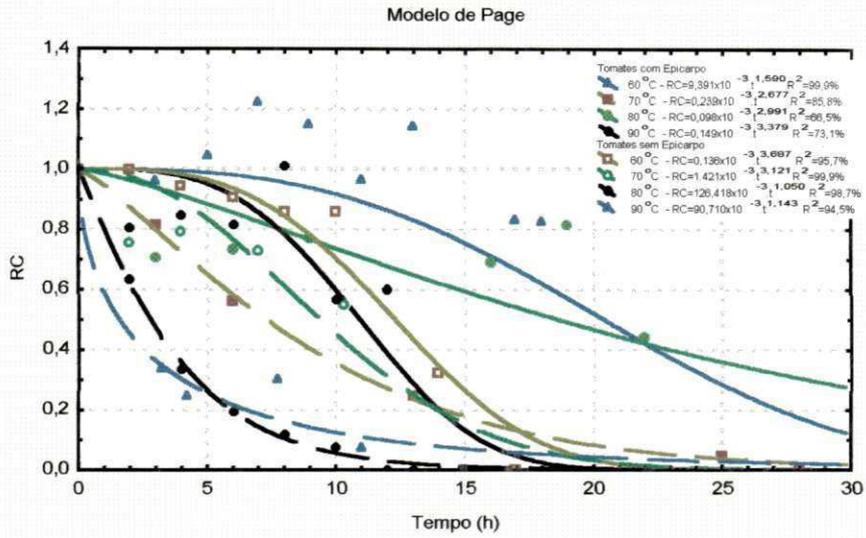
**Figura 44 -** Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo nas secagens convencionais às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C, sem pré-tratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear.



**Figura 45 -** Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo nas secagens convencionais às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C, com pré-tratamento osmótico a uma concentração de 5% NaCl, obtidas por regressão não-linear.



**Figura 46 -** Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo nas secagens convencionais às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C, com pré-tratamento osmótico a uma concentração de 10% NaCl, obtidas por regressão não-linear.



**Figura 47 -** Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo nas secagens convencionais às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C, com pré-tratamento osmótico a uma concentração de 15% NaCl, obtidas por regressão não-linear.

#### 4.2.4. MODELO DE FICK – COM ENCOLHIMENTO

Na Tabela 9 encontram-se os valores do coeficiente “ $D_{ap}$ ”, obtidos utilizando os seis primeiros termos da série da solução analítica da Lei de Fick. Verifica-se que estes valores variam de 0,075 a  $3,769 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  para tomates com epicarpo e de 0,918 a  $8,771 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  para tomates sem epicarpo.

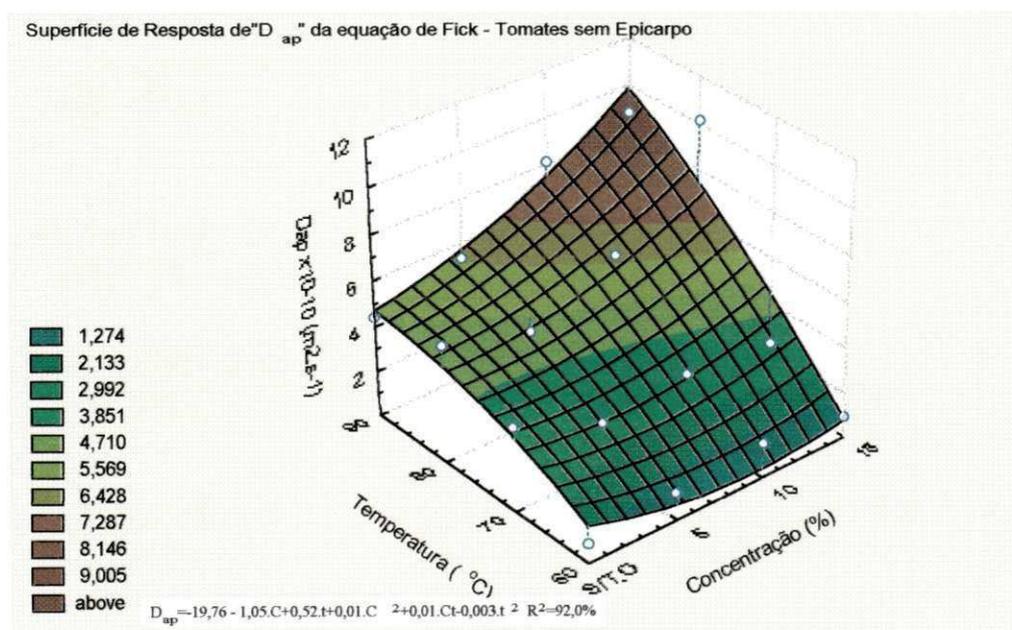
**Tabela 9 - Valores dos coeficientes de difusão “ $D_{ap}$ ” da solução analítica da equação de Fick, utilizando os seis primeiros termos da série, para os tomates sem epicarpo e com epicarpo.**

Temperatura (°C)	Tratamento	<i>Com Epicarpo</i>		<i>Sem Epicarpo</i>	
		$D_{ap} \times 10^{10} (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$R^2 (\%)$	$D_{ap} \times 10^{10} (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$R^2 (\%)$
60	I	3,192	94,0	1,203	61,3
	II	2,155	91,3	1,586	70,5
	III	3,769	95,1	0,985	64,6
	IV	1,942	91,1	0,918	55,4
70	I	0,430	43,3	2,152	73,6
	II	0,501	51,5	2,508	76,6
	III	1,166	68,0	2,178	79,0
	IV	0,824	62,9	3,774	79,0
80	I	0,113	-	4,134	88,5
	II	0,706	57,7	5,865	95,2
	III	0,185	26,3	10,168	97,3
	IV	0,149	21,2	5,156	95,3
90	I	2,028	-	5,429	85,1
	II	1,251	63,9	8,091	90,1
	III	0,467	59,5	8,771	97,3
	IV	0,075	40,4	4,415	89,2

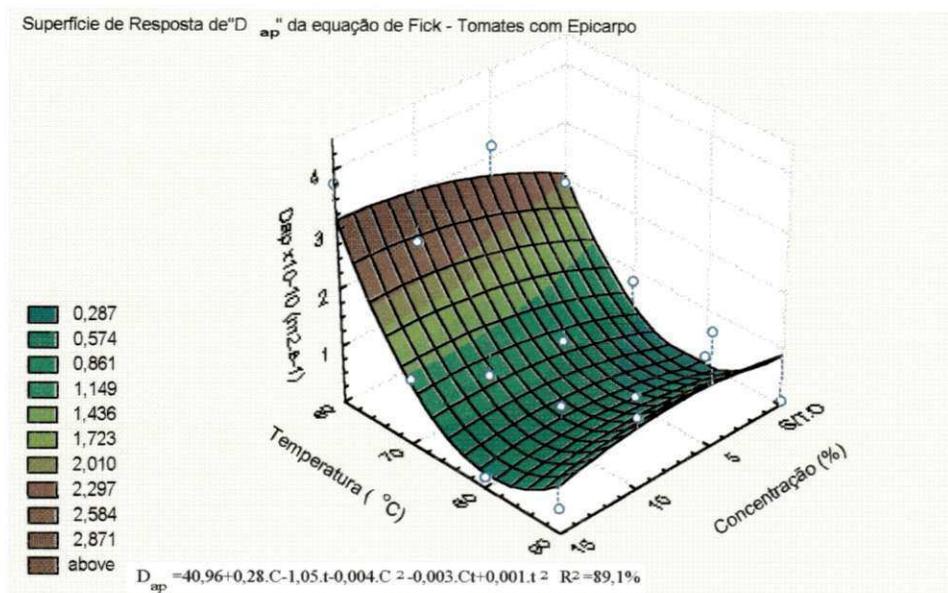
Observa-se ainda que os coeficientes tendem a crescer em função da concentração na secagem dos tomates sem epicarpo a uma temperatura de 80 e 90°C, onde se constata que os coeficientes de determinação variaram de 85,1 a 97,3%. Vale ressaltar que nestas duas temperaturas a difusividade nos tomates sem epicarpo sempre foi maior quando se considerou o efeito do encolhimento (ver Tabela 6). Entretanto, os tomates sem epicarpo secos a 60 e 70°C, têm valores, do coeficiente de difusão, inferiores quando se considera o encolhimento, exceção se faz às temperaturas de 60 e 70°C para os tomates pré-tratados com solução osmótico nas concentrações de 5 e 15%, respectivamente. Estes resultados estão coerentes com o relatado de QUEIROZ e NEBRA (2001), num experimento de secagem de bananas nas

temperaturas entre 30 e 70°C, havendo uma redução no coeficiente de difusão, quando incluíram os efeitos do fenômeno de encolhimento.

Nas Figuras 48 e 49 encontram-se as superfícies de resposta do coeficiente de difusão “ $D_{ap}$ ”, levando-se em consideração o encolhimento, em função do pré-tratamento osmótico e da temperatura de secagem do tomate sem epicarpo e com epicarpo, respectivamente.



**Figura 48 - Superfície de Resposta da constante “ $D_{ap}$ ” da equação de Page em função de diferentes temperaturas e diferentes concentrações de pré-tratamento osmótico para tomates sem epicarpo.**



**Figura 49 - Superfície de Resposta da constante " $D_{ap}$ " da equação de Page em função de diferentes temperaturas e diferentes concentrações de pré-tratamento osmótico para tomates com epicarpo.**

Observa-se na Figura 49, que a difusividade, correspondendo à secagem de tomates com epicarpo foi bastante dispersa em relação à temperatura e à concentração, não permitindo obter um coeficiente de correlação satisfatório ( $R^2=89,1\%$ ).

Para melhor visualização, encontra-se na Figura 50 um histograma do coeficiente de difusão da secagem de tomate envolvendo os fatores epicarpo, pré-tratamento osmótico, encolhimento e temperatura.

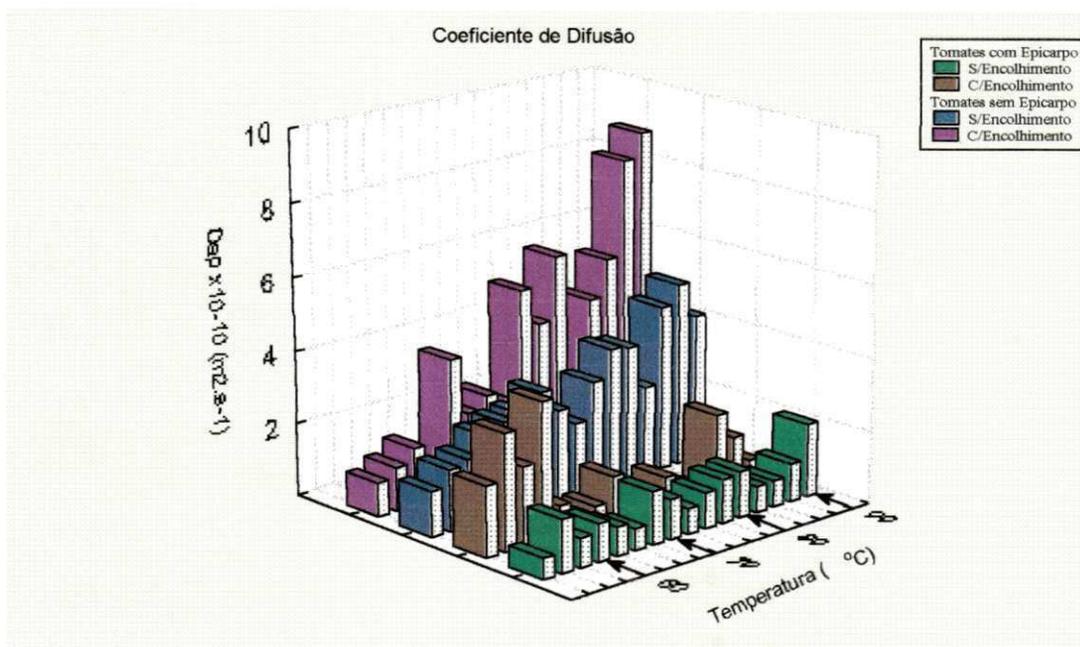


Figura 50 – Coeficientes de Difusão de tomates com epicarpo e sem epicarpo

Encontram-se os dados experimentais e os ajustados ao modelo de Fick, considerando o encolhimento do tomate no decorrer do período de secagem, nas Figuras 51 a 54.

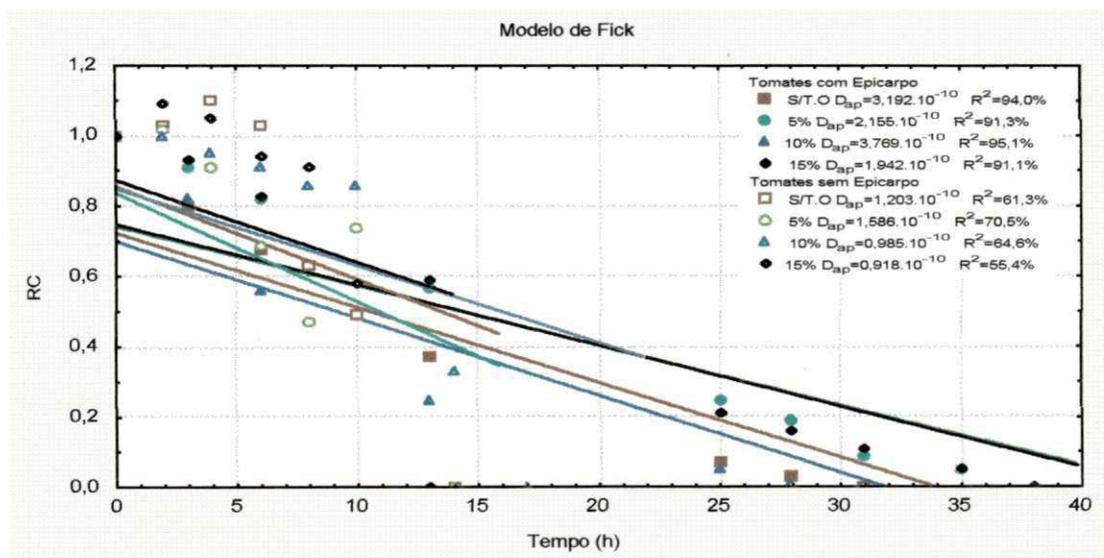
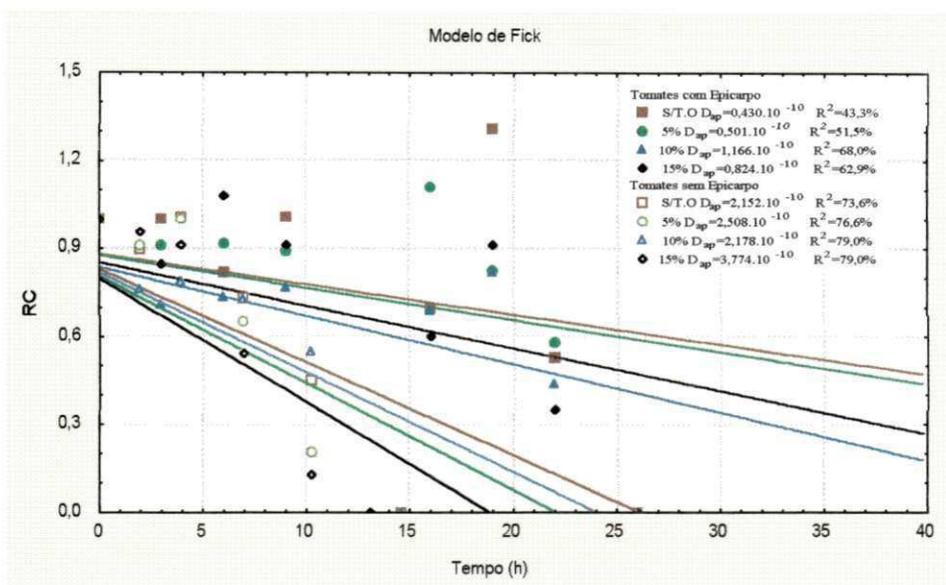
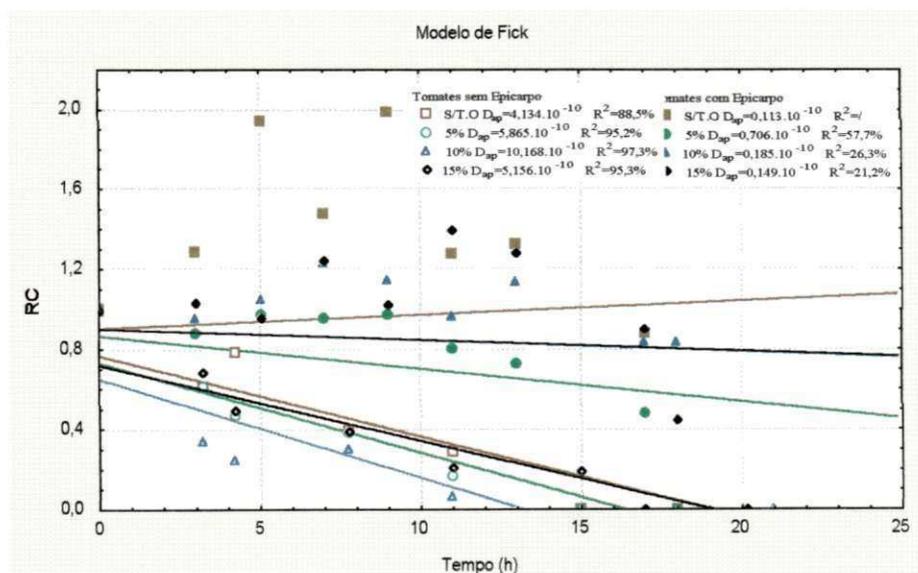


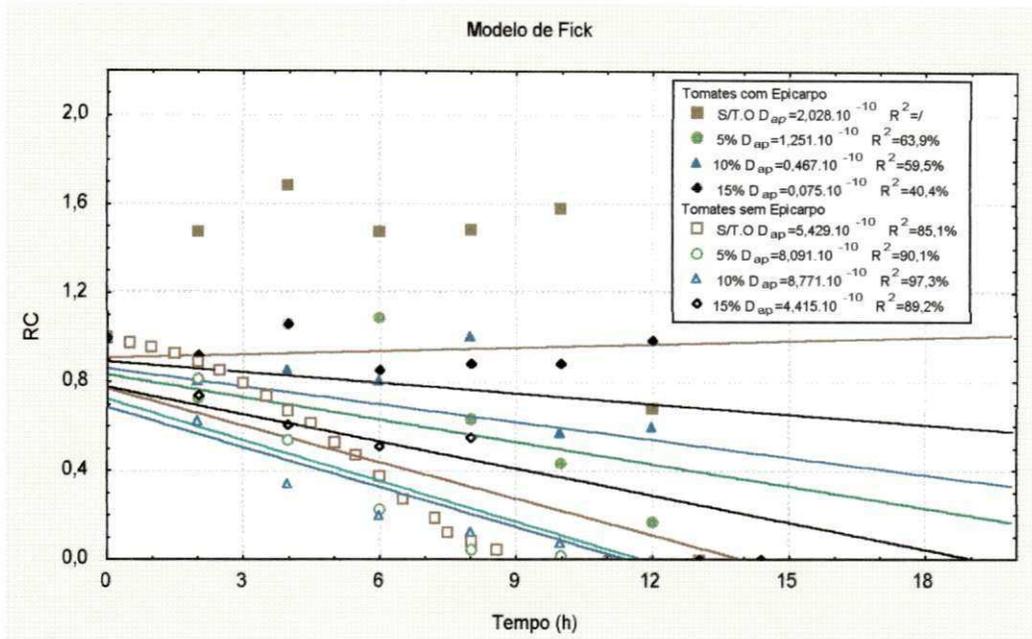
Figura 51 - Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo pré-tratados em diferentes soluções osmótica (5:0,4; 10:0,4 e 15:0,4%) e de tomates com epicarpo e sem epicarpo sem pré-tratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear, na secagem convencional à temperatura de 60°C



**Figura 52** - Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo pré-tratados em diferentes soluções osmótica (5, 10 e 15%) e de tomates com epicarpo e sem epicarpo sem pré-tratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear, na secagem convencional à temperatura de 70°C



**Figura 53** - Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo pré-tratados em diferentes soluções osmótica (5, 10 e 15%) e de tomates com epicarpo e sem epicarpo sem pré-tratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear, na secagem convencional à temperatura de 80°C



**Figura 54 - Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo pré-tratados em diferentes soluções osmótica (5, 10 e 15%) e de tomates com epicarpo e sem epicarpo sem pré-tratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear, na secagem convencional à temperatura de 90°C**

Como já foi discutido anteriormente, observa-se que devido à inclusão do fenômeno do encolhimento na razão de umidade, obtiveram-se valores, para a razão de concentração, superiores a unidade. As curvas também se comportam completamente linear, sendo que na secagem a 60°C, os tomates com epicarpo apresentam uma difusividade maior que as do tomate sem epicarpo. Isto também pode ser deduzido observando-se os valores na Tabela 9. Este fato se torna interessante, principalmente, devido a este fenômeno não ter ocorrido quando se desconsiderou todo o efeito do encolhimento, como pode ser constatado na Tabela 6.

Pode-se, então, confirmar outra vez que, a modelagem matemática, incluindo tais fenômenos como o encolhimento merece mais atenção e cuidado, visando uma boa representação de fatores determinantes envolvidos no processo de secagem. O modelo proposto por PARK (1987) também considera uma média da dimensão, no caso, uma média aritmética dos raios equivalentes ao longo do processo de secagem, supondo ainda que o material fosse isotrópico, ou seja, o coeficiente de encolhimento radial era o mesmo nas três dimensões. Estas suposições simplificaram o modelo matemático num sistema de

encolhimento unidirecional, no entanto, esse fato não ocorreu na secagem com os tomates, além de ter observado uma transformação completa da geometria em função da perda de umidade e redução de volume. Estas transformações podem ser bem visualizadas na Fotografia 3.



**Fotografia 2 – Transformação da geometria do tomate ao longo do processo de secagem**

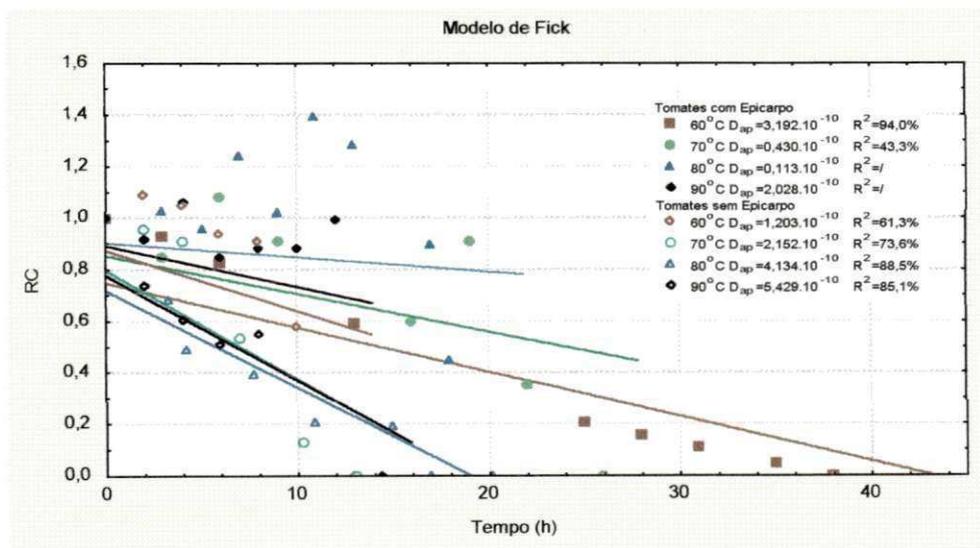
Ainda na secagem de tomate há que se considerar que o produto sofre uma deformação estrutural, causando uma alteração em sua forma, ou seja, durante o processo de secagem o tomate se altera de uma forma aproximadamente esférica para um cilindro irregular de pequena altura. Este fato provavelmente não ocorreu com os materiais biológicos estudados por GOUVEIA (1999), com gengibre, e PARK (1987), com filé de tubarão, o que nos induz a concluir, que o modelo utilizado não se adequa para expressar a secagem do tomate, necessitando-se reformular a ocorrência do fenômeno físico e tentar propor um novo modelo que leve em consideração o encolhimento.

Como as soluções analíticas de CRANK (1975) se referem a corpos de geometria simples, a modelagem matemática deveria se adequar às condições do ensaio dos tomates, aplicando-se ao invés de coordenadas esféricas, outros tipos de coordenadas específicas.

Na linha de formulação de novos modelos, LIMA et al. (2000) conseguiram ajustar seus dados experimentais, quando desenvolveram um modelo numérico, incluindo o fenômeno de encolhimento para banana, considerando o material como anisotrópico e de geometria elipsoidal, portanto, utilizando um sistema de coordenadas esféricas prolatas.

QUEIROZ e NEBRA (2001) propuseram um modelo onde se inclui um coeficiente convectivo de massa, desta forma, as condições de contorno se aproximam mais aos fenômenos reais do processo de secagem e os resultados obtidos foram melhores.

As Figuras 55 a 58 mostram o comportamento do coeficiente de cada tratamento em função da temperatura.



**Figura 55 - Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo nas secagens convencionais às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C, sem pré-tratamento osmótico, obtidas por regressão não-linear.**

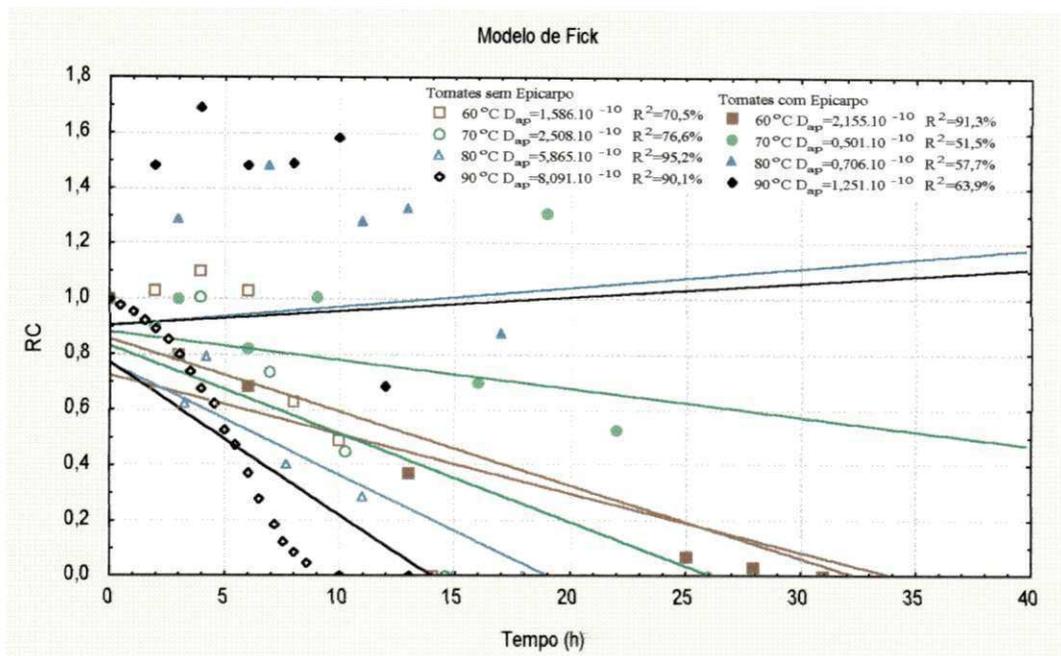


Figura 56 - Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo nas secagens convencionais às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C, com pré-tratamento osmótico a uma concentração de 5% NaCl, obtidas por regressão não-linear.

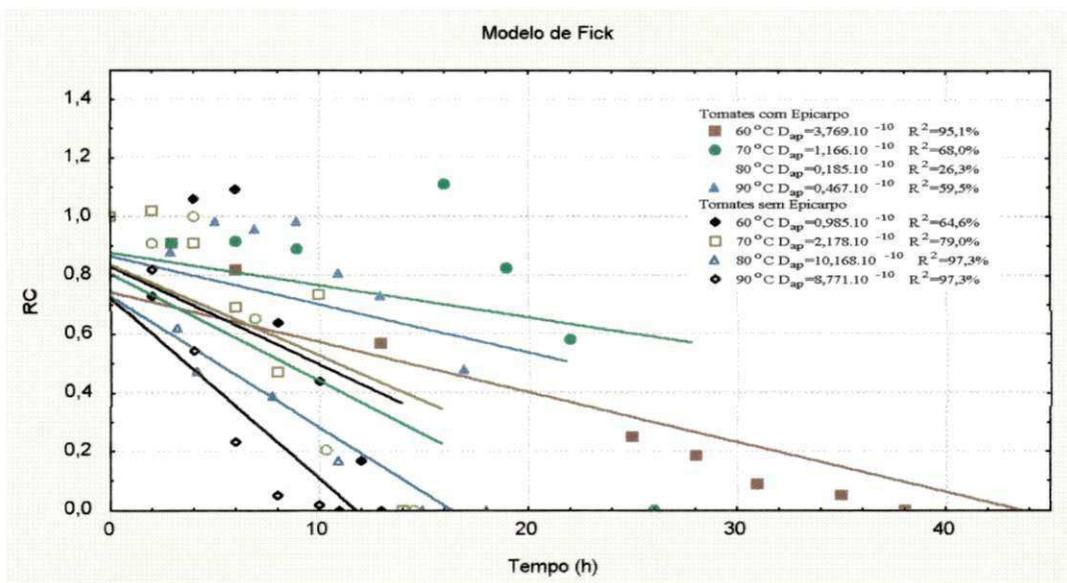
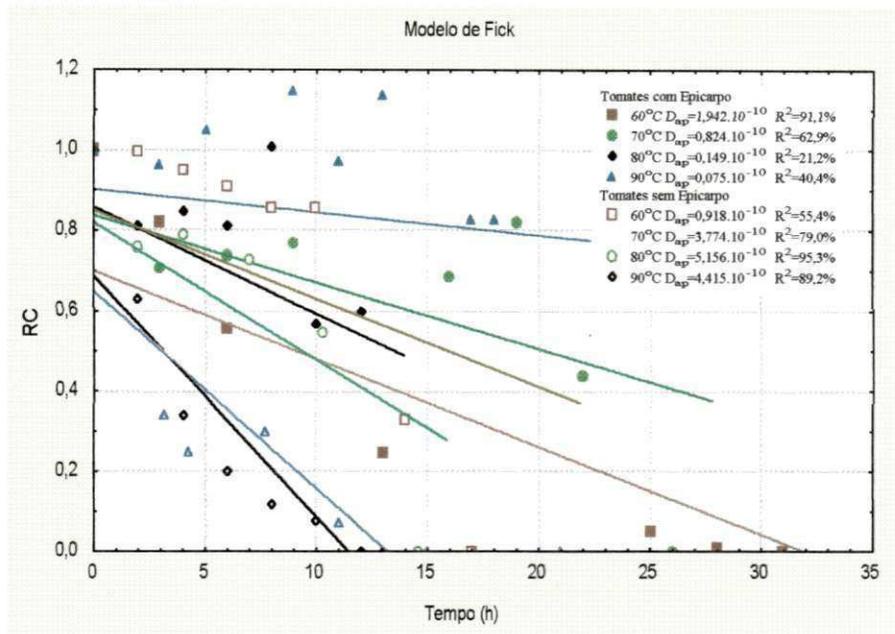


Figura 57 - Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo nas secagens convencionais às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C, com pré-tratamento osmótico a uma concentração de 10% NaCl, obtidas por regressão não-linear.



**Figura 58 -** Curvas dos dados experimentais de tomates com epicarpo e sem epicarpo nas secagens convencionais às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C, com pré-tratamento osmótico a uma concentração de 15% NaCl, obtidas por regressão não-linear.

### 4.3. ENCOLHIMENTO

Os valores obtidos para o coeficiente de encolhimento, ajustando-se os dados experimentais ao Modelo Uniforme, estão apresentados na Tabela 10. De acordo com estes valores obtidos, utilizando-se o Modelo Uniforme, pode-se observar que a tendência do coeficiente de encolhimento é de aumentar com o aumento da temperatura de secagem dos tomates com epicarpo, com exceção dos tomates submetidos a um pré-tratamento osmótico na solução de 10% de NaCl. Estes coeficientes, obtidos por meio de Modelo Uniforme, dos tomates sem epicarpo, apresentam uma tendência decrescente para todos os tratamentos, quando aumentar a temperatura de secagem de 60°C para 80°C.

Dos dois modelos utilizados, o Modelo Uniforme apresentou coeficientes de determinação mais satisfatórios, com também foi confirmado por GOUVEIA et al. (1999).

**Tabela 10 – Valores do coeficiente de encolhimento do modelo uniforme.**

Temperatura (°C)	Tratamento	<i>Com Epicarpo</i>		<i>Sem Epicarpo</i>	
		n	R <sup>2</sup> (%)	n	R <sup>2</sup> (%)
60	I	0,293	96,1	0,988	98,7
	II	0,478	96,2	0,931	98,0
	III	0,946	98,3	0,858	99,2
	IV	0,298	99,5	0,885	97,8
70	I	0,926	99,7	0,843	99,3
	II	0,945	99,8	0,840	98,6
	III	0,918	99,7	0,889	99,6
	IV	0,825	99,0	0,731	98,5
80	I	1,054	99,3	0,590	99,3
	II	1,220	99,2	0,629	98,5
	III	0,911	99,6	0,623	96,4
	IV	1,029	99,6	0,501	95,5
90	I	0,939	99,8	0,680	99,1
	II	1,199	99,4	0,713	98,6
	III	0,909	99,3	0,555	96,8
	IV	0,903	99,7	0,644	99,9

Os valores obtidos para o coeficiente de encolhimento, ajustando-se os dados experimentais ao Modelo de Secagem Central, estão apresentados na Tabela 11.

**Tabela 11 – Valores do coeficiente de encolhimento do modelo de secagem central**

Temperatura (°C)	Tratamento	<i>Com Epicarpo</i>		<i>Sem Epicarpo</i>	
		n	R <sup>2</sup> (%)	n	R <sup>2</sup> (%)
60	I	0,922	89,1	0,191	80,9
	II	0,718	96,0	0,617	90,3
	III	1,7864	97,3	0,716	69,6
	IV	0,312	99,2	0,194	22,0
70	I	0,850	99,4	0,952	95,2
	II	0,809	99,3	0,880	86,1
	III	1,179	83,3	0,621	73,6
	IV	0,811	99,1	0,531	57,4
80	I	0,951	98,7	0,464	94,5
	II	1,230	99,3	0,399	97,9
	III	0,810	98,9	0,491	89,3
	IV	1,127	99,7	0,507	78,7
90	I	0,820	98,7	0,369	91,8
	II	1,080	98,6	0,580	95,1
	III	0,771	97,9	0,767	99,5
	IV	0,832	99,5	0,480	97,3

## 5. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos pode-se concluir que:

Com relação à cinética de secagem do tomate durante o pré-tratamento osmótico nas concentrações de cloreto de sódio e sacarose nas proporções de 5:0,4; 10:0,4 e 15:0,4% têm-se que:

- A. A quantidade de água removida e o ganho de sal do tomate com epicarpo são de 1,62; 3,18 e 4,04% e de 1,68; 3,04 e 3,59%, respectivamente para as concentrações de cloreto de sódio e sacarose de 5:0,4; 10:0,4 e 15:0,4%;
- B. A quantidade de água removida e o ganho de sal do tomate sem epicarpo são de 1,40; 2,55 e 4,99% e de 7,08; 6,43 e 9,40%, respectivamente para as concentrações de cloreto de sódio e sacarose de 5:0,4; 10:0,4 e 15:0,4%;
- C. A equação proposta por Page se ajusta melhor aos dados experimentais do que a equação de Fick, utilizando-se até o sexto termo da série na equação de Fick;
- D. O coeficiente de difusão é maior para os tomates sem epicarpo do que para os tomates com epicarpo e aumenta em função do aumento da concentração de cloreto de sódio (5, 10 e 15%);
- E. O coeficiente da equação de Page é menor para os tomates sem epicarpo do que para os tomates com epicarpo e aumenta em função do aumento da concentração de cloreto de sódio (5, 10 e 15%);
- F. O coeficiente de difusão da água do tomate ( $D_a$ ) é sempre maior do que o coeficiente de difusão do sal ( $D_s$ ) na equação de Fick.

Com relação à cinética de secagem do tomate sem encolhimento às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C com epicarpo e sem epicarpo e sem pré-tratamento osmótico e com pré-tratamento osmótico, tem-se que:

- A. Das duas equações propostas, a de Page se ajustou melhor aos dados experimentais do que a equação de Fick com até seis termos da série;
- B. Comparando-se os valores da constante de secagem, "K", do Modelo de Page dos tomates com epicarpo e epicarpo, esses têm valores superiores de ordem decimal,

variando de 0,179 a 0,428 s<sup>-1</sup> e de 2,138 a 33,262 s<sup>-1</sup>, respectivamente; exceção se faz na secagem a 60°C com pré-tratamento na concentração de 10% e à temperatura de 80°C, na concentração de 15%;

- C. A superfície de resposta dos valores do constante “K”, dos tomates sem epicarpo, em função da temperatura e da concentração se ajustaram melhor a uma função de segundo grau com uma tendência de aumentar em função dessas duas variáveis;
- D. Os valores do coeficiente de difusão, da equação de Fick utilizando até o sexto termo da série, variaram de 0,580 a 2,002 x10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup> e de 1,242 a 5,052 x10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup> para os tomates com epicarpo e sem epicarpo, respectivamente, sendo que os coeficientes de difusão dos tomates sem epicarpo sempre foram maior do que os tomates com epicarpo;
- E. A superfície de resposta dos coeficientes de difusão dos tomates sem epicarpo em função da concentração da solução osmótica e da temperatura é uma função de segundo grau com coeficiente de determinação de 92,9%;

Com relação à cinética de secagem do tomate com encolhimento às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C com epicarpo e sem epicarpo e sem pré-tratamento osmótico e com pré-tratamento osmótico, tem-se que:

- A. A equação proposta por PARK (1987), onde o fenômeno do encolhimento é incluído na razão de umidade não se adequa para o caso da secagem de tomate com epicarpo e/ou sem epicarpo;
- B. O encolhimento em função da umidade para a secagem do tomate com epicarpo e sem epicarpo as temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C, com pré-tratamento osmótico (5, 10 e 15%) e sem pré-tratamento osmótico, apresentou-se melhor para uma função exponencial e não para uma função linear como considerado por PARK (1987).

Com relação ao coeficiente de encolhimento do tomate seco às temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C com epicarpo e sem epicarpo e sem pré-tratamento osmótico e com pré-tratamento osmótico, tem-se que:

A. Dos dois modelos (Uniforme e Central) estudados, a equação que melhor expressa o coeficiente de encolhimento do tomate, nas condições estudadas, é o modelo Uniforme.

Para secagem de tomate a temperaturas de 80 e 90°C, ocorre a migração de sal para a superfície em todas as concentrações osmóticas estudadas e para o tomate sem epicarpo, não se recomendando a secagem a essas temperaturas nas condições estudadas.

Como conclusão final e dentro dos intervalos estudados, tem-se que o tomate deve ser seco nas temperaturas de 60 ou 70°C e com um pré-tratamento osmótico de cloreto de sódio-sacarose de 10:0,4% ou 5:0,4%.

## 6. SUGESTÕES

1. Para melhorar a eficiência do pré-tratamento osmótico, poder-se-ia monitorar alguns outros parâmetros do processo, tais como, temperatura e agitação mecânica, evitando um contato prolongado com a solução, que favorece a migração de outras substâncias essenciais;
2. Ao invés de realizar titulações, o ganho de cloreto de sódio poderia ser acompanhado por meio de um método mais preciso, monitorando a solução osmótica com leituras da condutância. Desta forma seria até possível obter resultados contínuos do processo;
3. Levando-se em consideração o fenômeno de encolhimento, com a sua conseqüente transformação da geometria, deveria ser feita uma nova modelagem matemática, que se aproxima mais ao experimento. Neste caso, por exemplo, a utilização de um outro sistema de coordenadas e um encolhimento bidimensional, ou seja, não considerando o material isotrópico. Em vez de incluir o fenômeno na razão de umidade, inicialmente deve-se tentar equacionar a relação existente entre o encolhimento ( $V/V_0$ ) e o teor de umidade ao longo do processo de secagem, por meio de um modelo empírico. Desta forma este modelo empírico poderia ser incluído no desenvolvimento matemático;
4. Visando o tomate para ser industrializado, acompanhar as alterações dos constituintes químicos em cada etapa do processo.

## **7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

**ALVAREZ, C.A; AGUERRE, R; GÓMEZ, R; VIDALES, S; ALZAMOURA, S.M; GERSCHENSON, L.N.** Air dehydration of strawberries: effects of blanching and osmotic pretreatments on the kinetics of moisture transport. *Journal of Food engineering. Great Britain*, v.25, p.167-178, 1995.

**AREGBA, W; JOMAA, W; PUIGALLI, J.R.** Une approche du séchage de matériaux fortement déformables. *Revue Phys. Appl.* v.25 (11), p.1161-1175, 1990.

**ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTRY- A.O.A.C., 1997**

**AZUARA, E.** Kinetics model for osmotic dehydration and its relationship with Fick's law, 1992

**AZUARA, E.; BERISTAIN, C. I.; GUTIÉRREZ, G. F.** A method for continuous kinetic evaluation of osmotic dehydration. *Lebesm.Wiss.u.Technol.*, v. 31, pp. 317-321, 1998

**BARONI A. F.; HUBINGER, M. D.** Cinética da desidratção osmótica de cebola. *XXV Enemp Anais, VII – Congresso Brasileira de Sistemas particulados*, 20-23/10/1997 São Carlos, SP, 1997

**BARONI, A. F.; HUBINGER, M. D.** Drying of Onion: Effects of pretreatment on Moisture Transport. *Drying Technology. New York*, (9&10), v. 16, pp. 2083-2094, 1998

**BASUNIA, M. A.; ABE, T.** Thin-layer solar drying characteristics of rough rice under natural convection. *Journal of Food Engineering, Great Britain*, v.47, p.295-301, 2001

- BERISTEIN, C.I.** Mass transfer during osmotic concentration of pineapple rings. *Journal of Food Science and Technology*. v.2, p.409-418, 1990
- BISWAL, R.N.; BOZORGMEHK, K.** Mass transfer in mixed solute osmotic dehydration of apple rings. *Trans. of ASAE*, v.35, n.1, p.257-265, 1991
- BOLIN, H.R.** Effect of osmotic agents and concentration of green beans prior to freezing. *Journal of Food Science*. v.2, p.202-205, 1983
- BORGES S.V.; MENEGALLI, F.C.** Influencia da desidratação osmótica sobre a cinética de secagem de manga. *Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília*, v.29, n.4, p.637-642, 1994
- CAMARGO, G.A.; QUEIROZ, M.R.** Curvas experimentais de secagem de tomate, variedade Déborah Plus, em duas temperaturas e pré-tratamento com sal e açúcar. *Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Pelotas, 1999 (CD-ROM)*
- CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.** Efeito da Secagem em altas temperaturas por curtos períodos de tempo em camada estacionária, sobre a armazenagem de sementes de feijão (*Phaseolus vulgares L.*) variedade "carioca". *Campinas. Universidade Estadual de Campinas, 1997 (Tese de Doutorado)*
- CHIRIFE, J.; HOUGH, G.; MARINI, C.** A simple model for osmotic dehydration of apples. *Lebesm.-Wiss.u. – Technology*, 26, pp. 151-156, 1993
- CHIRIFE, J.** Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of fruits. In: *Advances in Drying*. Ed. Arum S. Murundar, Hemisphere publishing corporation. Washington, p. 73-102, 1983
- CHITTENDEN, D.H; HUSTRULID, A.** A determining drying constant for shelled

- corn. Transactions of the ASAE. Michigan, v.9, n.1, p.52-55, 1966
- CONWAY, J; CASTAIGNE, F.; PICAROIFT, G; VOVAN, X.** Mass transfer consideration in the osmotic dehydration of apples. Canadian Institute of Food Science Technology Journal. v.16, p.25-29, 1983
- CRANK, J.** The mathematics of diffusion. Clarendon Press, Oxford, 2<sup>nd</sup> edition, 1975
- CRONIN, K.; KEARNEY, S.** Monte Carlo modeling of a vegetable tray dryer. Journal of Food Engineering. v.35, Great Britain, p.233-250, 1998
- DAUDIN, J.D.** Calcul des cinétiques de séchage par air chaud des produits biologiques solides. Sciences des Aliments, v.3, n.1, p.1-36, 1983
- FIQUEIRA, F. A.** Manual de Olericultura: Cultura e Comercialização de hortaliças. São Paulo, v. 2, 584 p., 1982
- FINZER, J.R.D; LIMAVERDE, J.R.** Influencia da pressão osmótica na desidratação de milho verde. Anais do XXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (ENEMP), Uberlândia, p.243-246, 1996
- FORNELL, A.; Bimbenet, J. J.; ALMIN, Y.** Experimental Study and Modelization for Air Drying of Vegetable Products Lebensm. – Wiss. u. Technology, v.13, n.2, pp. 96-100, 1980
- FUSCO, A. J.; AVANZA, J. R.; AGUERRE, R. J.; GABITTO, J. F.** Diffusion model for drying with volume change. Drying Technol., p.9, n.2, p.397-417, 1991
- GOULD, W. A.** Composition of tomatoes. Tomato Production, Processing and Quality Evaluation. AVI Publishing Co., Westport, Connecticut, pp. 344-358, 1991

- GOUVEIA, J.P.G.** Avaliação da cinética de gengibre (*Zingiber officinale*, Roscoe), Campinas, Universidade Estadual de Campinas, 1999 (Tese de Doutorado)
- GOUVEIA, J.P.G. de; ALMEIDA, F.A.C. de; MURR, F.E.X.** Estudo da difusividade e do encolhimento do gengibre (*Zingiber officinale*, Roscoe) durante a secagem. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais. v.1, n.1, p.51-58, 1999
- HAWKES, J; FLINK, J.M.** Osmotic concentration of fruit prior to freeze dehydration. Journal of Food Processing and Preservation. v.1, p.265-284, 1978
- HAWLADER, M. N. A; UDDIN, M. S.; HO, J. C.; FENG, A. B. W.** Drying Characteristics of Tomatoes, Journal of Food Engineering , v.14, n.4, p.259-268, 1991
- ISSE, M.G; SCHUBERT, H.** Osmotic dehydration of mango: mass transfer between mango and syrup. 4<sup>th</sup> World Congress of Chemical Engineering. Germany, 1991
- KECHAOU, N.; ROQUES, M. A.** A variable diffusivity model for drying of highly deformable materials. In: MUJUNDAR, A. S. (ed). Drying 1989. Elsevier Sci. Publishers B. V., 1989
- KEEY, R.B.** Drying: Principles and Practice. Oxford, 1978. 358p.
- KETELAARS, A.A.J; JOMAA, W; PUIGALLI, J.R.; COUMANS, W.J.** Drying Shrinkage and Stress, In.: MUJUMDAR, A.S. ed. Drying '92. Elsevier SCI. Publishers B.V., 1992
- KILPATRICK, P.W; LOWE, E; ARSDEL, W.B; TUNNEL, W.B.** Tunnel

dehydrators for fruits and vegetables. Advances in food Research, New York, Academic Press, v.6, 1955. 360p.

**KING, G. J. Rates of moisture sorption and adsorption in porous, dried foodstuffs.** Food Technology. v.22, p.165-171, 1968

**KOWALSKA, H; LENART, A. Mass transfer during osmotic dehydration of plant tissue.** In: Proceedings of the IX seminar, properties of water in food. Warsaw, 1998

**KOWALSKA, H; LENART, A. Mass exchange during osmotic pretreatment of vegetables.** Journal of Food Engineering. Great Britain, v.49, p.137-140, 2001

**KROSS, R.K; CAVALCANTI MATA, M.E.R.M; BRAGA, E.M. Influência da Epiderme do tomate (*Lycopersicon Esculentum L.*) na transferência de massa durante o tratamento osmótico.** Anais do IV Simpósio Latino Americano de Ciência de Alimentos (SLACA), Campinas, 2001

**KUMAR, A; BLAISDELL, J.L.; HERUM, F.L. Generalized analytical model for moisture diffusion in a composite cylindrical body.** Trans. ASAE. v.25, n.3, p.752-758, 1982

**LAZARIDES, H. N.; KATSANIDES, E; NICOLAIDES, A. Mass transfer kinetics during osmotic preconcentration aiming at minimal solid uptake.** Journal of Food Engineering. Great Britain, v. 25, n.2, P.151-166, 1995

**LAZARIDES, H. N.; GEKAS, V.; MAVROUDIS, N. Apparent Mass Diffusivities in Fruit and Vegetables Tissues Undergoing Osmotic Processing.** Journal of Food Engineering. Great Britain, v. 31, pp. 315-334, 1997

**LAZARIDES, H. N., Reasons and possibilities to control solids uptake during**

**osmotic treatment of fruits and vegetables. In.: Osmotic Dehydration & Vacuum Impregnation. USA, 2001**

**LENART, A; KOWALSKA, H. Mass exchange during osmotic pretreatment of vegetables, Journal of Food Engineering 49, pp. 137-140, 2001**

**LENART, A.; LEWICKI, P.P. Osmotic dehydration of apples at high temperatures. In.: Drying '89, ed. A.S. MUJUMDAR Hemisphere, New York, p.501-508, 1990.**

**LERICI, C. R.; PINNAVAIA, G; DALLA ROSA, M; BARTOLUCCI, L. Osmotic dehydration of fruits. Influence of osmotic agents on drying behavior and product quality. Journal of Food Science. Great Britain, v.50, p.1217-1226, 1985**

**LIMA, A.G.B de; QUEIROZ, M.R.; NEBRA, S.A., Simultaneous moisture transport and shrinkage during drying of solids with ellipsoidal configuration. International Drying Symposium. Holland, 2000 (CD-ROM).**

**MARTINS, J. H.; CAVALCANTI MATA, M. E. R. M. Introdução à teoria e simulação matemática de secagem de grãos. Núcleo de Tecnologia em Armazenagem. Campina Grande – PB, UFPB, 1984**

**MAVROUDIS, N.E.; GEKAS, V.; SJOHOLM, I. Osmotic dehydration of apples: Shrinkage phenomena and the significance of initial structure on mass transfer rates. Journal of Food Engineering. Great Britain, v.38, p.101-123, 1998**

**MAZZA, G.; Le MAGUER, M. Dehydration of onion: some theoretical and practical considerations. J. Food Technol., 15: 181-194, 1980**

**MISRA, R. N.; YOUNG, J. H. Numerical solution of simultaneous diffusion and shrinkage during soybean drying. Transactions of the ASAE, v.23, n.5, p.1277-**

1282, 1980

**MULET, A.; BERNA, A.; ROSSELO, C. Drying of carrots. I. Drying models.**

Drying Technol., v.7, n.3, p.537-557, 1989

**AVES, M. J. B. Processo de seca-aeração, Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 55 p., 1982 (Tese de Mestrado)**

**RAMASWAMY, H. S; NSONZI, F. Convective air-drying kinetics of osmotically pretreated blueberries. Drying Technology, 1998**

**FORTES, M; OKOS, M. Drying theories: their bases and limitations as applied to foods and grains. In.: Advances in Drying, ed Arum S. MUJUMDAR, Hemisphere Publishing Corporation. Washington, v.1, p.119-154, 1980**

**PAKOWSKI, Z.; GOU, P; COMAPOSADA, J; ARNAU, J. Simultaneous diffusion of water and NaCl in meat during drying, International Drying Symposium, Holland, 2000 (CD-ROM)**

**PARK, K. J. Estudo comparativo do coeficiente de difusão sem e com encolhimento durante a secagem. Campinas: Departamento de Engenharia de Alimentos da Faculdade de Engenharia de Alimentos. 54pp., 1987 (Tese Livre Docência em Fenômenos de Transporte)**

**PARK, K. J. Difusional model with and without shrinkage during salted fish muscle drying. Drying Technology. 16(3-5): 889-905, 1998**

**PARTI, M; DUGMANICS, I. Diffusion coefficient for corn drying. Trans ASAE, v.33, n.5, p.1652-1656, 1990**

**QUEIROZ, M.R; NEBRA, S.A. Theoretical and experimental analyses of the drying kinetics of bananas. Journal of Food Engineering. Great Britain, v.47, p.127-132,**

2001

**QUEIROZ, A.J.M.** Propriedades físicas e pré-resfriamento de umbu (*Spondia tuberosa* Arruda Câmara), Campina Grande – PB. Universidade Federal da Paraíba, 1994. (Tese de Mestrado).

**RANGANNA, S.** Handbook of analyses and quality control for fruit and vegetable products. Tata McGraw Hill, New Delhi, 1986

**RAMASWAMY, H. S.; LO, K. V.** Simplified mass transfer relationship for diffusion controlled air dehydration of regular solids. Canadian Agricultural Eng. v.25, n.1, 143-148, 1983

**RAMESH, M.N; RAO, P.N.S.** Drying studies of cooked rice in a vibrofluidised bed drier. Journal of Food Engineering. Great Britain, v.27, p.389-396, 1996

**RAOULT-WACK, A.L.** Recent Advances in the osmotic dehydration of foods. Trends in Food Science and Technology. v.1, p.255-260, 1994

**RASTOGI, N.K; RAGHAVARAO, K.S.M.S.** Effect of temperature and concentration on osmotic dehydration of coconut. Lebensm. Wiss. U. Technol. v.27, p.564-567, 1994

**RASTOGI, N.K; RAGHAVARAO, K.S.M.S.** Water and solute diffusion coefficients of carrot as a function of temperature and concentration during osmotic dehydration. Journal of Food Engineering. Great Britain, v.34, p.429-440, 1997

**RASTOGI, N.K.; RAGHAVARAO, K.S.M.S.; MIRANJAN, K.** Mass transfer during osmotic dehydration of banana: fickian diffusion in cylindrical configuration. Journal of Food Engineering. Great Britain, v.33, p.139-150, 1997

- ROSA, M. D. e GIROUX, F. Osmotic treatment (OT) and problems related to the solution management, *Journal of Food Engineering* 49, 223-236, 2001
- SABAREZ, H.T.; PRICE, W.E. A diffusion model for prune dehydration. *Journal of Food Engineering*. v.42, Great Britain, p.167-172, 1999
- SANKAT, K. C.; CASTAIGNE, F.; MAHARAJ, R. The air-drying behavior of fresh and osmotically dehydrated banana slices. *International Journal of Food Science and Tecnology*. London, v. 31, pp. 123-135, 1996
- SARAVACOS, G.D.; CHARM, S. E. A Study of the mechanism of fruit and vegetable dehydration, *FoodTecnology*. 16, 78-81, 1962
- SARAVACOS, G.D; RAOUZEOS, G.S. Diffusivity of moisture in air drying or raisins. In.: *Drying 86*. Arum S. Mujundar, Hemisphere publishing corporation, v.2, p.486-491. 1986.
- SAUREL, R. Dehydratation impregnation par immersion en solutions ternaires: Etude des transports d'eau et de solutes sur gel et produits d'origine animale. PhD thesis, Universite de Montpellier II, 1995
- SERENO A. M. et al. Mass transfer coefficients during osmotic dehydration of apple in single and combined aqueous solutions of sugar and salt, 2001
- SERENO, A. M.; MOREIRA, R.; MARTINEZ, E. Mass transfer coefficients during osmotic dehydration of apple in single and combined aqueous solutions of sugar and salt. *Journal of Food Engineering*. Great Britain, v. 47, p.43-49, 2001
- SERENO, A. M.; MEDEIROS, G. L. Simplified model for the prediction of drying rates for foods. *J. Food Eng.*, v.12, n.1, p.1-11, 1990

- SILVA, M. A.; NEBRA, S. A. The calculation of moisture distribution in a drying process. Proceedings 6<sup>th</sup> International Drying Symposium. Versailles, France, OP: 145-150, 1988**
- SIMAL, S; DEYÁ, M; ROSSELLÓ, C. Simple Modeling of Air Drying Curves of Fresh and Osmotically Pre-dehydrated Apple Cubes. Journal of Food Engineering. Great Britain, v. 33, pp. 139-150, 1997**
- SIMAL, S; SÁNCHEZ, E.S.; BON, J.; FEMENIA, A.; ROSSELÓ, C. Water and salt diffusion during cheese ripening: effect of the external and internal resistances to mass transfer. Journal of Food Engineering. Great Britain, v.48, p.269-275, 2001**
- SINGH, S.; SHIVHARE, U. S.; AHMED, J; RAGHAVAN, G.S.V. Osmotic concentration kinetics and quality of carrot preserve. Food Research International. Great Britain, v.32, p.509-514, 1999**
- SINICO, R.; MUIR, W.R., JAYAS. D.S., CENKOWSKI, S. Thin layer drying and wetting of wheat. Post harvest Biology and Tecnology. Great Britain, v.5, p. 261-275, 1995**
- SPIAZZI, E; MASCHERONI, R. Mass transfer model for osmotic dehydration of fruits and vegetables – I. Development of the simulation model. Journal of Food Engineering, Great Britain, v.34, p.387-410, 1997**
- STEFFE, J.F.; SINGH, Liquid diffusivity of rough rice components. Trans. ASAE, v.23, n.3, p.767-774, 1980**
- STEVENS, M. A: Tomato Flavor: Effects of Genotype Cultural Practices and Maturity at Picking. In: Ed. Harold E. Patee. Evaluation of quality of fruits and vegetables. AVI Publishing Co, Inc. Westport, Connecticut, 410 p., 1985**

- STRUMILLO, C.; KUDRA, T.** Drying: principles applications and design. 1 ed.,  
Gordon and Breach Science Publishers, p. 448, 1986
- SUAREZ, G.; VIOLLAZ, P. E.; CHIFRE, J.** Difusional analysis of air drying of  
grain sorghum. *Journal Food Technology*, v.15, n.5, p.523-531, 1980
- SUZUKI, K.; KUBOTA, K.; HASEGAWA, T; HOSAKA, H.** Shrinkage and  
dehydration in root vegetables. *Journal of Food Science*. v.41, p.317-327, 1976
- TALENS, P; HARTONG, S; MARTINEZ-NAVARETTE, N; CHIRALT, A;  
FITO, P.** Kinetics and Equilibrium status in osmotic dehydration of  
strawberry. *International Drying Symposium. Holland, 2000 (CD-ROM).*
- TOBINAGA, S; PINTO, L.A.A.** Secagem de materiais fibrosos: músculos de  
peixes. In: *Tópicos especiais em secagem, editado por J.T. FREIRE e D.J.M.  
SARTORI, UFSCar, v.1, p.211-251, 1992*
- TOLOBA, M.P.; SUAREZ, C.** Shape characterization for difusional analysis of  
corn drying, *Drying Technology*, v.7, n.2, p.205-217, 1991
- TORREGIANI, D.** Osmotic dehydration in fruit and vegetable processing. *Food  
Research International*, v. 26, pp. 59-68, 1993
- TOUPIN, C.J.; MARCOTTE, M; LE MAGUER, M.** Osmotically induced mass  
transfer in plant storage tissues: a mathematical model – Part I. *Journal of  
Food Engineering. Great Britain, v.10, p.13-38, 1989*
- VAGENAS, G.K; MARINOS-KOURIS; D.** Finite element simulation of drying of  
agricultural products with volumetric changes. *Applied Mathematical Modeling.*

v.15 (9), p.475-482, 1991

**VAZQUEZ, G; CHENLO, F.; MOREIRA, R; CRUZ, E. Grape drying on a pilot plant with a heat pump. Drying Tecnology on International Journal, New York,v.15, n.3, p.899-920, 1997**

**WOODROOF, G.J.; LUH, B.S. Commercial Food Proccesing. The AVI. Publishing Co. Inc. Westport. Connecticut. p.375-507, 1975**

## **ANEXOS**

Tabela A1 – Ganho de sal durante o pré-tratamento osmótico dos tomates sem epicarpo

Conc.	5%		10%		15%	
t	% GS	%RS	% GS	%RS	% GS	%RS
0,0	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00
2,0	0,47	0,70	0,89	0,69	1,50	0,67
3,5	0,49	0,37	1,72	0,35	3,00	0,32
5,0	1,40	0,00	2,55	0,00	4,49	0,00

Tabela A2 – Perda de água durante o pré-tratamento osmótico dos tomates sem epicarpo

Conc.	5%		10%		15%	
t	% PA	%RU	% PA	%RU	% PA	%RU
0,0	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00
0,5	1,11	0,94	0,85	0,90	1,68	0,89
1,0	1,31	0,88	1,11	0,85	2,08	0,84
1,5	2,76	0,72	2,01	0,71	3,28	0,69
2,0	3,45	0,68	2,58	0,65	3,66	0,64
2,5	4,63	0,51	3,42	0,50	4,71	0,50
3,0	5,06	0,46	3,94	0,45	5,48	0,44
3,5	5,36	0,39	4,56	0,31	6,64	0,28
4,0	5,91	0,27	5,08	0,25	7,20	0,24
4,5	6,57	0,13	5,85	0,10	8,25	0,09
5,0	7,08	0,00	6,43	0,00	9,40	0,00

Tabela A3 – Ganho de sal durante o pré-tratamento osmótico dos tomates com epicarpo

Conc.	5%		10%		15%	
t	% GS	%RS	% GS	%RS	% GS	%RS
0,0	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00
2,0	0,42	0,75	0,86	0,64	1,41	0,57
4,0	0,84	0,50	1,72	0,42	2,82	0,14
6,5	1,26	0,25	2,58	0,35	3,23	0,00
9,0	1,68	0,00	3,04	0,00	3,59	0,00

Tabela A4 – Perda de água durante o pré-tratamento osmótico dos tomates com epicarpo

Conc.	5%		10%		15%	
t	% PA	%RU	% PA	%RU	% PA	%RU
0,0	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00
1,0	0,05	0,70	0,58	0,78	0,43	0,58
2,0	0,10	0,75	0,93	0,65	0,46	0,57
3,0	0,42	0,60	1,27	0,56	1,36	0,35
4,0	0,61	0,51	2,01	0,49	2,37	0,30
5,0	0,81	0,42	1,97	0,33	2,30	0,24
6,0	1,00	0,31	2,31	0,23	2,77	0,18
7,0	1,19	0,24	2,66	0,13	3,24	0,13
8,0	1,38	0,13	3,01	0,02	3,71	0,06
9,0	1,61	0,00	3,17	0,00	4,04	0,00

Tabela A5 – Dados experimentais da cinética de secagem a uma temperatura de 80°C dos tomates com epiderme

Tempo	RU 5%	Tempo	RU 10%	Tempo	RU 15%	Tempo	RU S/T.O
0,0	1,00	0,0	1,00	0,0	1	0,0	1,00
1,5	0,99	1,5	0,99	1,5	0,99	1,5	1,00
2,0	0,99	2,0	0,99	2,0	0,98	2,0	0,99
3,0	0,97	3,0	0,98	3,0	0,96	3,0	0,99
4,0	0,97	4,0	0,97	4,0	0,95	4,0	0,98
5,0	0,96	5,0	0,97	5,0	0,92	5,0	0,98
6,0	0,94	6,0	0,96	6,0	0,89	6,0	0,97
9,0	0,89	9,0	0,93	9,0	0,81	9,0	0,95
11,0	0,86	11,0	0,91	11,0	0,71	11,0	0,93
13,0	0,82	13,0	0,88	13,0	0,63	13,0	0,92
25,0	0,28	25,0	0,65	25,0	0,53	25,0	0,72
26,0	0,19	26,0	0,61	26,0	0,46	26,0	0,69
27,0	0,11	27,0	0,58	27,0	0,40	27,0	0,66
28,0	0,07	28,0	0,54	28,0	0,31	28,0	0,62
29,0	0,05	29,0	0,49	29,0	0,21	29,0	0,58
30,0	0,01	30,0	0,45	30,0	0,10	30,0	0,54
31,0	0,00	31,0	0,40	31,0	0,00	31,0	0,49
		32,0	0,35			32,0	0,43
		33,0	0,30			33,0	0,38
		34,0	0,28			34,0	0,36
		35,0	0,22			35,0	0,29
		36,0	0,15			36,0	0,12
		37,0	0,07			37,0	0,10
		38,0	0,00			38,0	0,00

Tabela A6 – Dados experimentais da cinética de secagem a uma temperatura de 70°C dos tomates sem epiderme

Tempo	RU 5%	Tempo	RU 10%	Tempo	RU 15%	Tempo	RU S/T.O
0,0	1,00	0,0	1,00	0,0	1,00	0,0	1,00
1,0	0,97	1,0	0,96	1,0	0,96	1,0	0,98
1,5	0,96	1,5	0,94	1,5	0,94	1,5	0,96
2,0	0,93	2,0	0,91	2,0	0,91	2,0	0,94
2,5	0,92	2,5	0,88	2,5	0,88	2,5	0,92
4,0	0,85	4,0	0,78	4,0	0,80	4,0	0,86
4,5	0,81	4,5	0,74	4,5	0,77	4,5	0,81
5,0	0,78	5,0	0,68	5,0	0,73	5,0	0,77
5,5	0,75	5,5	0,63	5,5	0,69	5,5	0,74
6,0	0,72	6,0	0,60	6,0	0,67	6,0	0,70
6,5	0,68	6,5	0,54	6,5	0,63	6,5	0,66
7,0	0,65	7,0	0,48	7,0	0,59	7,0	0,62
7,5	0,61	7,5	0,43	7,5	0,57	7,5	0,57
8,0	0,57	8,0	0,37	8,0	0,53	8,0	0,47
9,0	0,47	9,0	0,27	9,0	0,47	9,0	0,33
10,0	0,37	10,0	0,24	10,0	0,41	10,0	0,28
10,3	0,33	10,3	0,21	10,3	0,39	10,3	0,26
11,3	0,18	11,3	0,12	11,3	0,19	11,3	0,01
12,3	0,07	12,3	0,07	12,3	0,09	12,3	0,00
13,1	0,03	13,1	0,00	13,1	0,02		
14,6	0,00			14,6	0,00		

Tabela A7 – Dados experimentais da cinética de secagem a uma temperatura de 80°C dos tomates sem epiderme

Tempo	RU 5%	Tempo	RU 10%	Tempo	RU 15%	Tempo	RU S/T.O
0,0	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00
1,0	0,98	1,00	0,96	1,00	0,96	1,00	0,99
2,0	0,97	2,00	0,89	2,00	0,93	2,00	0,96
3,3	0,89	3,25	0,83	3,25	0,79	3,25	0,93
3,8	0,87	3,75	0,79	3,75	0,75	3,75	0,91
4,3	0,84	4,25	0,76	4,25	0,72	4,25	0,90
5,3	0,77	5,25	0,68	5,25	0,64	5,25	0,85
5,8	0,72	5,75	0,63	5,75	0,60	5,75	0,83
6,3	0,67	6,25	0,58	6,25	0,55	6,25	0,79
6,8	0,63	6,75	0,53	6,75	0,51	6,75	0,77
7,3	0,57	7,25	0,48	7,25	0,46	7,25	0,73
7,8	0,51	7,75	0,43	7,75	0,41	7,75	0,69
8,3	0,46	8,25	0,39	8,25	0,39	8,25	0,64
8,8	0,40	8,75	0,34	8,75	0,34	8,75	0,58
9,3	0,35	9,25	0,30	9,25	0,31	9,25	0,53
10,0	0,27	10,00	0,24	10,00	0,23	10,00	0,42
11,0	0,19	11,00	0,17	11,00	0,20	11,00	0,37
12,0	0,15	12,00	0,12	12,00	0,13	12,00	0,31
13,0	0,08	13,00	0,06	13,00	0,06	13,00	0,24
14,0	0,03	14,00	0,03	14,00	0,02	14,00	0,18
15,0	0,00	15,00	0,00	15,00	0,00	15,00	0,11
						16,00	0,05
						17,00	0,00

Tabela A9 – Dados experimentais da cinética de secagem a uma temperatura de 60°C dos tomates com epiderme

Tempo	RU 5%	Tempo	RU 10%	Tempo	RU 15%	Tempo	RU S/T.O
0,0	1,00	0,0	1,00	0,0	1	0,0	1,00
1,5	0,99	1,5	0,99	1,5	0,99	1,5	1,00
2,0	0,99	2,0	0,99	2,0	0,98	2,0	0,99
3,0	0,97	3,0	0,98	3,0	0,96	3,0	0,99
4,0	0,97	4,0	0,97	4,0	0,95	4,0	0,98
5,0	0,96	5,0	0,97	5,0	0,92	5,0	0,98
6,0	0,94	6,0	0,96	6,0	0,89	6,0	0,97
9,0	0,89	9,0	0,93	9,0	0,81	9,0	0,95
11,0	0,86	11,0	0,91	11,0	0,71	11,0	0,93
13,0	0,82	13,0	0,88	13,0	0,63	13,0	0,92
25,0	0,28	25,0	0,65	25,0	0,53	25,0	0,72
26,0	0,19	26,0	0,61	26,0	0,46	26,0	0,69
27,0	0,11	27,0	0,58	27,0	0,40	27,0	0,66
28,0	0,07	28,0	0,54	28,0	0,31	28,0	0,62
29,0	0,05	29,0	0,49	29,0	0,21	29,0	0,58
30,0	0,01	30,0	0,45	30,0	0,10	30,0	0,54
31,0	0,00	31,0	0,40	31,0	0,00	31,0	0,49
		32,0	0,35			32,0	0,43
		33,0	0,30			33,0	0,38
		34,0	0,28			34,0	0,36
		35,0	0,22			35,0	0,29
		36,0	0,15			36,0	0,12
		37,0	0,07			37,0	0,10
		38,0	0,00			38,0	0,00

Tabela A10 – Dados experimentais da cinética de secagem a uma temperatura de 70°C dos tomates com epiderme

Tempo	RU 5%	Tempo	RU 10%	Tempo	RU 15%	Tempo	RU S/T.O
0,0	1,00	0,0	1,00	0,0	1,00	0,0	1,00
1,5	0,99	1,5	0,99	1,5	0,99	1,5	1,00
2,0	0,99	2,0	0,98	2,0	0,99	2,0	0,99
3,0	0,98	3,0	0,97	3,0	0,98	3,0	0,98
4,0	0,97	4,0	0,96	4,0	0,97	4,0	0,97
5,0	0,96	5,0	0,95	5,0	0,95	5,0	0,96
6,0	0,96	6,0	0,93	6,0	0,94	6,0	0,95
8,0	0,94	8,0	0,89	8,0	0,90	8,0	0,93
9,0	0,92	9,0	0,87	9,0	0,88	9,0	0,92
10,0	0,91	10,0	0,84	10,0	0,86	10,0	0,90
11,0	0,90	11,0	0,83	11,0	0,85	11,0	0,89
12,0	0,89	12,0	0,80	12,0	0,82	12,0	0,87
13,0	0,87	13,0	0,77	13,0	0,80	13,0	0,85
14,0	0,85	14,0	0,73	14,0	0,77	14,0	0,82
15,0	0,82	15,0	0,69	15,0	0,73	15,0	0,79
16,0	0,79	16,0	0,63	16,0	0,69	16,0	0,75
17,0	0,76	17,0	0,58	17,0	0,64	17,0	0,70
18,0	0,72	18,0	0,50	18,0	0,59	18,0	0,65
19,0	0,68	19,0	0,42	19,0	0,53	19,0	0,59
20,0	0,62	20,0	0,32	20,0	0,46	20,0	0,51
21,0	0,53	21,0	0,19	21,0	0,37	21,0	0,42
22,0	0,48	22,0	0,05	22,0	0,28	22,0	0,33
23,0	0,38	23,0	0,03	23,0	0,15	23,0	0,23
24,0	0,28	24,0	0,00	24,0	0,02	24,0	0,14
25,0	0,08	25,0	0,00	25,0	0,02	25,0	0,03
26,0	0,00	26,0	0,00	26,0	0,00	26,0	0,00

Tabela A8 – Dados experimentais da cinética de secagem a uma temperatura de 90°C dos tomates sem epiderme

Tempo	RU 5%	Tempo	RU 10%	Tempo	RU 15%	Tempo	RU S/T.O
0,0	1,00	0,0	1,00	0,0	1,00	0,0	1,00
0,5	0,98	0,5	0,97	0,5	0,96	0,5	0,98
1,0	0,95	1,0	0,93	1,0	0,93	1,0	0,95
1,5	0,93	1,5	0,90	1,5	0,89	1,5	0,93
2,0	0,89	2,0	0,86	2,0	0,86	2,0	0,91
2,5	0,86	2,5	0,82	2,5	0,82	2,5	0,89
3,0	0,80	3,0	0,77	3,0	0,76	3,0	0,86
3,5	0,74	3,5	0,70	3,5	0,70	3,5	0,84
4,0	0,68	4,0	0,64	4,0	0,65	4,0	0,82
4,5	0,62	4,5	0,58	4,5	0,60	4,5	0,80
5,0	0,53	5,0	0,49	5,0	0,52	5,0	0,76
5,5	0,47	5,5	0,43	5,5	0,47	5,5	0,75
6,0	0,38	6,0	0,34	6,0	0,40	6,0	0,72
6,5	0,28	6,5	0,25	6,5	0,33	6,5	0,68
7,2	0,19	7,2	0,17	7,2	0,28	7,2	0,65
7,5	0,13	7,5	0,12	7,5	0,24	7,5	0,63
8,0	0,09	8,0	0,09	8,0	0,18	8,0	0,58
8,6	0,04	8,6	0,06	8,6	0,12	8,6	0,54
10,0	0,00	10,0	0,02	10,0	0,09	8,9	0,50
		11,0	0,00	11,0	0,03	9,9	0,46
				12,0	0,00	11,4	0,23
						12,4	0,13
						13,4	0,03
						14,4	0,00