



**Fundação Universidade Federal do Rio Grande  
Departamento de Química  
Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos**

**Secagem de quitosana obtida a partir de resíduos de  
camarão: análise da cinética de secagem considerando  
encolhimento**

**Eng<sup>a</sup>. de Alimentos Lucia de Moraes Batista**

**Orientador: Prof. Dr. Luiz Antonio de Almeida Pinto**

Rio Grande, RS.

2004

**Fundação Universidade Federal do Rio Grande  
Departamento de Química  
Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos**

**Secagem de quitosana obtida a partir de resíduos de  
camarão: análise da cinética de secagem considerando  
encolhimento**

**Eng<sup>a</sup>. de Alimentos Lucia de Moraes Batista**

Dissertação apresentada para a  
obtenção do título de mestre em  
engenharia e ciência de alimentos.

**Orientador: Prof. Dr. Luiz Antonio de Almeida Pinto**

Rio Grande, RS.

2004

## **AGRADECIMENTOS**

Várias pessoas foram importantes para que este trabalho pudesse ser começado, desenvolvido e concluído:

Gostaria de agradecer aos meus pais, minha irmã e minha avó pela paciência, atenção e palavras de carinho.

Ao Professor Luiz Antonio de Almeida Pinto, pela orientação e amizade durante estes dois anos.

Ao meu namorado e amigo Cezar pela compreensão, amor e ajuda no desenvolvimento do trabalho.

Aos meus colegas de laboratórios, pelos dias e noites de risos e choros durante estes dois anos. Deveria citar muitos alunos, mas vou apenas lembrá-los em nome de minha colega da iniciação científica Niede.

Ao amigo, colega de laboratório Jaques, por toda a disposição para que tudo desse certo na hora exata.

Aos Professores e Colegas do mestrado pelo aprendizado e conhecimento.

A Fundação Universidade Federal do Rio Grande e aos professores e funcionários do Departamento de Química pela disponibilidade para que pudesse ser realizado o trabalho.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	v
LISTA DE TABELAS .....	vii
NOMENCLATURA .....	ix
RESUMO .....	xi
ABSTRACT .....	xii
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO</b>	
1       INTRODUÇÃO .....	1
1.1   Justificativas .....	3
1.2   Objetivo .....	4
1.2.1   Objetivo geral .....	4
1.2.2   Objetivos específicos .....	4
<b>CAPÍTULO 2: REVISÃO DE LITERATURA</b>	
2       REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	6
2.1   Quitina .....	6
2.2   Quitosana .....	8
2.2.1   Purificação da quitosana .....	10
2.3   Secagem de materiais sólidos .....	10
2.3.1   Conceitos e mecanismos .....	10
2.3.2   Período de taxa constante de secagem .....	12
2.3.3   Período de taxa decrescente de secagem .....	13
2.3.4   Cinética de secagem: modelos .....	14
2.3.4.1   Modelo empírico .....	14
2.3.4.2   Modelos de transferências de calor e de massa sem encolhimento .....	14
Modelo difusivo .....	15
Modelo térmico simplificado .....	17
2.3.4.3   Modelos difusivos considerando encolhimento .....	17
2.3.5   Umidade de equilíbrio ( $X_E$ ) .....	19
2.3.6   Propriedades físicas e de transporte .....	21
<b>CAPÍTULO 3: DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO</b>	
ARTIGO 1 - Modelo difusivo com difusividade efetiva variável na secagem em camada delgada de quitosana .....	25
RESUMO .....	25
1       INTRODUÇÃO .....	25
2       MODELAGEM DA SECAGEM .....	26
3       MATERIAL E MÉTODOS .....	28
3.1   Matéria prima .....	28
3.2   Equipamentos utilizados .....	28
3.3   Procedimento experimental .....	28
3.3.1   Metodologia analítica .....	28
3.3.2   Secagem em camada delgada .....	28
3.4   Procedimento de cálculo .....	29
3.4.1   Caracterização da secagem em camada delgada .....	29
3.4.2   Modelagem da secagem .....	30
4       RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	32
4.1.1   Caracterização da secagem em camada delgada .....	32
4.1.2   Modelagem da secagem .....	35
5       CONCLUSÃO .....	37

6	NOMENCLATURA.....	38
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	38
ARTIGO 2: Secagem em camada delgada de quitosana purificada: estudo da operação através do uso da metodologia da superfície de resposta ..... 41		
RESUMO ..... 41		
1	INTRODUÇÃO.....	41
2	MATERIAIS E MÉTODOS .....	43
2.1	Matéria prima.....	43
2.1.1	Produção de quitina e quitosana .....	44
2.1.2	Purificação da quitosana .....	45
2.2	Procedimento experimental da secagem .....	46
2.3	Equipamentos utilizados .....	47
2.4	Metodologia analítica .....	48
2.5	Procedimento de cálculo.....	48
2.6	Metodologia estatística .....	49
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
3.1	Caracterização dos materiais.....	50
3.2	Caracterização de secagem em camada delgada.....	51
3.3	Energia de ativação .....	58
4	CONCLUSÕES.....	59
5	NOMENCLATURA.....	59
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	60
ARTIGO 03 - Secagem de quitosana em camada delgada: modelo difusivo com difusividade efetiva variável considerando encolhimento ..... 62		
RESUMO ..... 62		
1	INTRODUÇÃO.....	62
1.1	Modelos difusivos considerando o encolhimento .....	63
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	65
2.1	Matéria-prima.....	65
2.1.1	Experimentos de secagem .....	66
2.2	Caracterização da secagem.....	67
2.3	Modelagem da secagem considerando o encolhimento.....	67
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	70
3.1	Matéria-prima.....	70
3.2	Caracterização da secagem.....	70
4	CONCLUSÃO .....	74
5	NOMENCLATURA.....	74
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	75
<b>CAPÍTULO 4: CONCLUSÃO GERAL</b>		
4	CONCLUSÃO .....	80
4.1	Perspectivas futuras .....	81
<b>CAPÍTULO 5: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>		
5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	83
<b>CAPÍTULO 6: ANEXOS..... 90</b>		

## LISTA DE FIGURAS

<b>CAPÍTULO 2: REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>1</b>
Figura 01: Estrutura da Quitina (CRAVEIRO <i>et al.</i> , 1999). .....	7
Figura 02: Estrutura da Celulose (CRAVEIRO <i>et al.</i> , 1999).....	7
Figura 03: Monômero da Quitosana (CRAVEIRO <i>et al.</i> , 1999).....	8
Figura 04: Monômero da Quitina (CRAVEIRO <i>et al.</i> , 1999).....	8
Figura 05: Esquema do processo de secagem de material sólido (PINTO, 1996). ..	11
<b>CAPÍTULO 3: DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO .....</b>	<b>25</b>
<b>ARTIGO 1 - Modelo difusivo com difusividade efetiva variável na secagem em</b>	
camada delgada de quitosana .....	25
Figura 1: Esquema do secador descontínuo de bandejas com escoamento	
paralelo de ar utilizado. ....	28
Figura 2: Curva de secagem de quitosana a 80°C e 5m m. ....	32
Figura 3: Taxa de secagem em função da umidade de quitosana, 80°C e 5mm. ....	33
Figura 4: Curva de secagem de quitosana a 80°C e 5m m, em escala semilog. ....	33
Figura 5: Temperaturas da amostra e do ar em função do tempo de secagem. ....	34
Figura 6: Difusividade efetiva em função do adimensional de umidade, para o	
período de taxa decrescente. ....	35
Figura 7: Perfil local de umidade adimensional em função da espessura	
adimensional do material. ....	36
Figura 8: Perfil médio de umidade adimensional em função do tempo: valores	
experimentais e modelo com difusividade efetiva constante e variável. ...	37
<b>ARTIGO 2: Secagem em camada delgada de quitosana purificada: estudo da</b>	
operação através do uso da metodologia da superfície de resposta .....	41
Figura 1: Diagrama de blocos do processo de produção de quitina e quitosana,	
SOARES (2003).....	45
Figura 2: Diagrama de blocos para o processo de purificação da quitosana. ....	46
Figura 3: Esquema do secador descontínuo de bandejas com escoamento	
paralelo de ar. ....	47
Figura 4: Adimensional de umidade em função do tempo de secagem de	
quitosana purificada, 60°C e 3mm.....	51
Figura 5: Adimensional de umidade em função do tempo para quitosana	
purificada à 60°C e 3mm, em escala semi-log. ....	52
Figura 6: Adimensional de água livre em função do tempo, para quitosana	
purificada, 60°C e 3mm.....	53
Figura 7: Gráfico pareto para constante de secagem. ....	55
Figura 8: Gráfico dos efeitos principais para constante de secagem. ....	56
Figura 9: Superfície de resposta para constante de secagem (K). ....	57
Figura 10: Distribuição dos resíduos. ....	57
Figura 11: Gráfico do $\ln(D_{EF})$ em função de $1/T$ .....	58
<b>ARTIGO 03 - Secagem de quitosana em camada delgada: modelo difusivo com</b>	
difusividade efetiva variável considerando encolhimento .....	62
Figura 1: Esquema do secador descontínuo de bandejas com escoamento	
paralelo de ar. ....	66
Figura 2: Curva da secagem do adimensional de Umidade em função do tempo. ..	70
Figura 3: Curva da taxa de secagem em função da umidade média. ....	71
Figura 4: Curva de secagem do adimensional de Umidade em função do tempo,	
em escala semi-log. ....	71
Figura 5: Espessura das amostras em função da umidade. ....	72
Figura 6: Difusividade efetiva em função do adimensional de umidade.....	72

Figura 7: Perfil de umidade local do material, para o período de taxa decrescente de secagem.....	73
Figura 8: Perfil de umidade médio do material, para o período de taxa decrescente de secagem, dados experimentais e modelos ajustados. ...	73

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO 3: DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

ARTIGO 1 - Modelo difusivo com difusividade efetiva variável na secagem em camada delgada de quitosana	
Tabela 1: Caracterização da quitosana úmida em base úmida. ....	32
Tabela 2: Valores dos parâmetros utilizados para o ajuste dos dados experimentais da temperatura em função do tempo.....	35
Tabela 3: Parâmetros de ajuste dos dados experimentais da difusividade efetiva em função da temperatura e da umidade adimensional. ....	36
ARTIGO 2: Secagem em camada delgada de quitosana purificada: estudo da operação através do uso da metodologia da superfície de resposta	
Tabela 1: Valores das variáveis estudadas. ....	49
Tabela 2: Matriz do planejamento experimental da secagem de quitosana para a resposta constante de secagem.....	50
Tabela 3: Composição proximal da quitina, quitosana e quitosana purificada. ....	50
Tabela 4: Valores da caracterização da secagem dos experimentos realizados. ....	52
Tabela 5: Matriz do planejamento experimental da secagem de quitosana para a resposta constante de secagem.....	54
Tabela 6: Análise de variância dos dados de quitosana para a resposta constante de secagem. ....	54
Tabela 7: Análise de variância dos dados de quitosana para a resposta constante de secagem, desconsiderando o efeito quadrático da temperatura.....	55
Tabela 8: Coeficientes da Equação para a resposta constante de secagem.....	56
Tabela 9: Valores médios de difusividade efetiva para as diferentes temperaturas.....	58
ARTIGO 03 - Secagem de quitosana em camada delgada: modelo difusivo com difusividade efetiva variável considerando encolhimento	
Tabela 1: Caracterização da matéria-prima.....	70

### CAPÍTULO 6: ANEXOS

Tabela A1: Dados experimentais da secagem de quitosana em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 80°C e espessura da bandeja de 5mm.....	91
Tabela A2: Dados experimentais e teóricos da secagem de quitosana em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 80°C e espessura da bandeja de 5mm.....	92
Tabela A3: Dados experimentais da secagem de quitosana purificada em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 60°C e espessura da bandeja de 10mm (experimento 1).. ....	93
Tabela A4: Dados experimentais da secagem de quitosana purificada em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 50°C e espessura da bandeja de 5mm (experimento 2).. ....	95
Tabela A5: Dados experimentais da secagem de quitosana purificada em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 70°C e espessura da bandeja de 5mm (experimento 3).. ....	97
Tabela A6: Dados experimentais da secagem de quitosana purificada em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 50°C e espessura da bandeja de 15mm (experimento 4).. ....	98



Tabela A7: Dados experimentais da secagem de quitosana purificada em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 70°C e espessura da bandeja de 15mm (experimento 5)..	102
Tabela A8: Dados experimentais da secagem de quitosana purificada em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 60°C e espessura da bandeja de 10mm (experimento 6)..	105
Tabela A9: Dados experimentais da secagem de quitosana purificada em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 46°C e espessura da bandeja de 10mm (experimento 7)..	107
Tabela A10: Dados experimentais da secagem de quitosana purificada em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 74°C e espessura da bandeja de 10mm (experimento 8)..	110
Tabela A11: Dados experimentais da secagem de quitosana purificada em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 60°C e espessura da bandeja de 3mm (experimento 9)..	112
Tabela A12: Dados experimentais da secagem de quitosana purificada em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 60°C e espessura da bandeja de 17mm (experimento 10).....	113
Tabela A13: Dados experimentais da secagem de quitosana purificada em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 60°C e espessura da bandeja de 10mm (experimento 11).....	116
Tabela A14: Dados experimentais da secagem de quitosana em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 60°C e espessura da bandeja de 4,365mm..	119
Tabela A15: Dados experimentais e teóricos da secagem de quitosana purificada em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 60°C e espessura da bandeja de 4,365mm.....	120

## NOMENCLATURA

a	Constante (Equação 28)	[adimensional]
A	Constante (Equação 04)	[adimensional]
$Bi_C$	Número de Biot de calor, $Bi_C \equiv \frac{h_C L}{k_S}$	[adimensional]
b	Constante (Equação 30)	[adimensional]
c	Constante (Equação 30)	[adimensional]
$cp_b$	Calor específico do material	$[L^2\theta^{-1}T^{-2}]$
C	Constante (Equação 29)	[adimensional]
d	Constante (Equação 30)	[adimensional]
$D_0$	Difusividade efetiva a temperatura infinita	$[L^2T^{-1}]$
$D_0(T)$	Difusividade efetiva em função da temperatura	$[L^2T^{-1}]$
$D_{EF}$	Difusividade efetiva volumétrica de umidade	$[L^2T^{-1}]$
$D_{EF}^S$	Difusividade efetiva volumétrica	$[L^2T^{-1}]$
e	Constante (Equação 30)	[adimensional]
$E_A$	Energia de ativação	$[ML^2T^{-2}n^{-1}]$
f	Constante (Equação 35)	[adimensional]
$Fo$	Número de Fourier, $Fo \equiv \frac{D_{EF} t}{L_0^2}$	[adimensional]
$h_C$	Coefficiente de transferência de calor por convecção	$[MT^{-3}\theta^{-1}]$
k	Constante (Equação 29)	[adimensional]
$k_{EF}^T$	Condutividade térmica	$[MLT^{-3}\theta^{-1}]$
$k_{EX}$	Coefficiente de transferência de massa	$[MLT^{-3}\theta^{-1}]$
K	Constante de secagem	$[T^{-1}]$
L	Espessura da amostra	[L]
$L_0$	Espessura inicial	[L]
$L_S$	Espessura da amostra seca	[L]
$L_t$	Espessura da amostra variável com o tempo	[L]
n	Número de termos da série (Equação 10 e 11)	[adimensional]
$N^*_C$	Taxa constante de secagem	$[MT^{-1}]$
$N_C$	Taxa constante de secagem por unidade de área	$[ML^{-2}T^{-1}]$
R	Constante universal dos gases	$[ML^2T^{-2}\theta^{-1}n^{-1}]$
t	Tempo	[T]
$t_C$	Tempo de taxa constante	[T]

T	Temperatura	[ $\theta$ ]
T <sub>0</sub>	Temperatura inicial	[ $\theta$ ]
T <sub>BS</sub>	Temperatura de bulbo seco	[ $\theta$ ]
T <sub>BU</sub>	Temperatura de bulbo úmido	[ $\theta$ ]
T <sub>S</sub>	Temperatura do sólido	[ $\theta$ ]
UR	Umidade Relativa	[adimensional]
V <sub>Ar</sub>	Velocidade do ar	[LT <sup>-1</sup> ]
X	Umidade local (base seca)	[MM <sup>-1</sup> ]
X <sub>i</sub>	Fração de cada componente da amostra	[adimensional]
X*	Umidade local adimensionalizada (base seca)	[MM <sup>-1</sup> ]
X <sub>0</sub>	Umidade inicial (base seca)	[MM <sup>-1</sup> ]
$\bar{X}$	Umidade média (base seca)	[MM <sup>-1</sup> ]
X <sub>C</sub>	Umidade crítica (base seca)	[MM <sup>-1</sup> ]
X <sub>E</sub>	Umidade de equilíbrio (base seca)	[MM <sup>-1</sup> ]
X <sub>M</sub>	Umidade da monocamada	[MM <sup>-1</sup> ]
Y	Adimensional de água livre	[adimensional]
Y <sub>E</sub>	Umidade absoluta de equilíbrio do ar (base seca)	[MM <sup>-1</sup> ]
Y <sub>AR</sub>	Umidade absoluta do ar	[MM <sup>-1</sup> ]
z	Coordenada espacial	[L]

## LETRAS GREGAS

$\Delta H_{VAP}$	Calor latente	[L <sup>2</sup> T <sup>-2</sup> ]
$\alpha$	Coefficiente de encolhimento linear	[adimensional]
$\alpha^*$	Coefficiente de encolhimento linear adimensional	[adimensional]
$\varepsilon$	Porosidade, $\varepsilon = 1 - \left( \frac{\rho_{AP}}{\rho_S} \right)$	[adimensional]
$\rho$	Massa específica	[ML <sup>-3</sup> ]
$\rho_b$	Massa específica aparente do material	[ML <sup>-3</sup> ]
$\rho_i$	Massa específica do componente	[ML <sup>-3</sup> ]
$\rho_s$	Massa específica do sólido	[ML <sup>-3</sup> ]
$\rho_{SS}$	Massa específica do sólido seco	[ML <sup>-3</sup> ]
$\rho_w$	Massa específica da água	[ML <sup>-3</sup> ]
$\xi$	Coordenada espacial generalizada	[L]
$\xi^*$	Coordenada espacial generalizada adimensionalizada	[adimensional]

## RESUMO

A quitosana é obtida através da desacetilação da quitina, que é encontrada nos exoesqueletos de crustáceos, fungos e materiais biológicos. Os resíduos do processamento do camarão, que na maioria das vezes não tem utilidade, possuem de 5 a 8% de quitina. O processo para obtenção de quitina e quitosana apresenta as seguintes etapas: desmineralização, desproteínização e desodorização, obtendo-se assim a quitina úmida. Após ser seca, passa por uma desacetilação para a conversão em quitosana úmida, que é então seca. A purificação da quitosana segue as etapas de dissolução, filtração, precipitação, neutralização, centrifugação e secagem para o armazenamento do produto final. Na secagem de alimentos, os resultados experimentais são usualmente tratados considerando que o processo é controlado pela difusão interna, em um sólido pseudo-homogêneo de dimensões constantes. Entretanto, muitos alimentos que apresentam altos teores de umidade iniciais sofrem variação de volume durante a secagem. Como o encolhimento ocorre simultaneamente com a difusão de umidade no sólido, este deve influenciar a taxa de remoção de umidade. Para analisar a secagem destes materiais, o encolhimento deve ser considerado na modelagem do processo. As propriedades físicas e de transporte também são importantes para a formulação e resolução de modelos físico-matemáticos da operação de secagem. O objetivo geral do presente trabalho foi analisar a cinética de secagem em camada delgada de quitosana e quitosana purificada obtida de rejeitos e resíduos gerados de processamento de camarão, através das curvas experimentais de secagem e sua modelagem, considerando o encolhimento durante a operação. Este estudo foi realizado através da seguinte metodologia: caracterização da secagem em camada delgada, utilizando as curvas características experimentais; determinação dos parâmetros físicos e de transporte durante a operação; modelagem físico-matemática da operação de secagem, considerando o encolhimento. Para estabelecer as melhores condições da secagem da quitosana purificada foi utilizada a metodologia da superfície de resposta, analisando como respostas a constante de secagem. O mecanismo de migração de umidade, para quitosana pôde ser explicado por difusão de água líquida devido à boa concordância da solução do modelo difusivo com os dados experimentais. A melhor condição de secagem em camada delgada de quitosana purificada foi na temperatura do ar de 60°C, utilizando velocidade do ar de 1,5m/s e com espessura das amostras de 3mm. Os dados experimentais da quitosana purificada foram melhor explicados pela solução do modelo difusivo considerando o encolhimento, por ocorrer acentuada variação da espessura durante a operação de secagem deste material.

Palavras chave: quitosana, secagem, camada delgada, encolhimento.

## ABSTRACT

Chitosan is obtained through the deacetylation of chitin, which is found in the exoskeletons of crustaceans, fungi and biological materials. The residuals of the shrimp processing, which most of the times are useless, have 5 to 8 % of chitin. The process to obtain chitin and chitosan presents the following steps: demineralization, deproteination and deodorization, thus being obtained the wet chitin. After being dried, it goes through a deacetylation to be converted into chitosan, which is then dried. The chitosan purification follows the steps of dissolution, filtering, precipitation, neutralization, centrifuging and drying for the storage of the final product. In the food drying, the experimental results are usually treated considering that the process is controlled by the internal diffusion in a pseudo-homogeneous solid with constant dimensions. However, in many foodstuffs that present high levels of initial moisture occur volume variation during the drying. As the shrinkage occurs simultaneously with the moisture diffusion in the solid, it must affect the moisture removal rate. In order to analyze the drying of these materials, the shrinkage must be considered in the modeling process. The physical and transport properties are also important for the formulation and resolution of physical-mathematical models of the drying operation. The general aim of this work was to analyze the drying kinetics in thin layer of chitosan and purified chitosan obtained from the wastes and residuals generated in the shrimp processing, through experimental drying curves and their modeling, considering the shrinkage during the operation. This study was carried out through the following methodology: characterization of drying in thin layer using the experimental characteristic curves; determination of physical and transport parameters during the operation; physical-mathematical modeling of the drying operation considering the shrinkage. In order to establish the best drying conditions of the purified chitosan, it was used the response surface methodology, analyzing as responses the drying constant. The moisture migration mechanism for the chitosan could be explained through liquid water diffusion due to the good agreement of the diffusive model solution with the experimental data. The best drying condition in thin layer of purified chitosan was at 60°C of air temperature, the air speed was 1.5m/s and with sample thickness of 3mm. The experimental data of purified chitosan were best explained through the diffusive model solution considering the shrinkage, because a big thickness variation occurred during the drying operation of this material.

Key words: chitosan, drying, thin layer, shrinkage

## **CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO**

# 1 INTRODUÇÃO

A cidade de Rio Grande/RS, devido a sua localização e a presença de indústrias processadoras de pescado, apresenta uma considerável produção de resíduos, como cascas e cabeças de camarão.

Uma grande preocupação das indústrias atualmente, diz respeito à substituição de matérias-primas de alto valor e de difícil processamento por outra mais acessível e de menor custo. Estudos têm sido realizados no sentido de encontrar destino adequado para resíduos e rejeitos gerados pelas indústrias, de modo que as agressões ao meio ambiente sejam cada vez mais reduzidas.

A fibra natural quitina é a mais abundante depois da celulose presente na natureza, possuindo uma estrutura semelhante a essa fibra vegetal. A quitina foi descoberta pelo professor francês Henri Braconnot, em 1811, recebendo então denominação inicial de fungina. O termo quitina é derivado do grego, da palavra chiton, significando revestimento protetor para invertebrados.

A quitosana foi descoberta em 1859, pelo professor C. Rouget, quando este pesquisador colocou em ebulição uma solução de hidróxido de potássio com quitina. A produção de quitosana surgiu no Japão, onde o grande consumo de frutos do mar deste país origina uma grande quantidade de resíduos e rejeitos. A quitosana é obtida a partir da desacetilação alcalina rigorosa da quitina.

O processo de obtenção de quitina passa pelas etapas de desmineralização, desproteínização, desodorização/despigmentação e secagem da quitina até umidade comercial. O processo de obtenção da quitosana consiste na desacetilação da quitina seca obtida, resultando em quitosana úmida que passa pela etapa de secagem até umidade comercial. A quitosana purificada é obtida por dissolução da quitosana em ácido acético, filtração, precipitação e centrifugação, após é seca até atingir a umidade comercial.

O estudo da secagem de materiais sólidos em camada delgada é utilizado para a determinação experimental dos parâmetros que caracterizam a operação,

obtendo-se assim um melhor domínio do processo, como também um maior conhecimento dos fundamentos e mecanismos envolvidos.

O conhecimento da umidade de equilíbrio, uma característica termodinâmica do sistema, é de grande importância para os processos de transformação, preservação e acondicionamento de produtos alimentícios, sendo necessário determinar o seu valor para a avaliação da cinética de secagem.

A variação das propriedades físicas e de transporte também são parâmetros muito importantes para a formulação e resolução de modelos físico-matemáticos que representam o comportamento de transferências de massa e de calor ao longo da operação de secagem.

A segunda lei de Fick, em termos de gradiente de umidade, constitui um bom modelo para descrever as características de secagem de muitos alimentos, que não apresentam encolhimento durante o processo de secagem. Na modelagem de materiais que apresentam fenômeno de encolhimento, não é possível o uso das soluções desta lei, devido o domínio de integração não ser constante, é então sugerido a utilização de um coeficiente de encolhimento ao termo difusivo.



## 1.1 Justificativas

As indústrias de alimentos atualmente têm uma grande preocupação com seus resíduos. Existe a necessidade de dar destino adequado aos resíduos para que as agressões ao meio ambiente se minimizem e ocorra a agregação de valor ao produto obtidos de resíduos e rejeitos da industrialização.

A zona sul do RS, mais especificamente o município de Rio Grande, apresenta um volume considerável de resíduos. Os resíduos provenientes da industrialização do camarão apresentam aproximadamente 6% de quitina seca. Estes teores sugerem que estes resíduos sejam usados como matéria-prima para a obtenção de produtos com alto valor agregado, como é o caso da quitosana. O desembarque do camarão na safra de 2001 desta cidade foi de 1.700 toneladas (IBAMA/CEPERGS/RS, 2002).

Estudos vêm sendo desenvolvidos, no Laboratório de Operações Unitárias/DQ/FURG, para o aproveitamento desses resíduos, como é o caso da quitina/quitosana obtida a partir de resíduos de camarão. Torna-se assim, importante o avanço destes estudos para a melhoria das condições tecnológicas do produto obtido. Ressalta-se a importância da operação de secagem na produção de quitina/quitosana, já que esta etapa garante que seja alcançada a umidade necessária para o armazenamento dos produtos de forma a manter as características dos mesmos.

Existe a necessidade de investigações experimentais da secagem de alimentos devido à complexidade desta operação. É importante o desenvolvimento de modelos físico-matemáticos, para o estudo dos fenômenos de transferências de calor e massa, durante a etapa de secagem, a fim de alcançar um melhor domínio destes processos.

## **1.2 Objetivo**

Visando contribuir com os estudos sobre os fenômenos de transferências que ocorrem na secagem tem-se os objetivos apresentados a seguir.

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Analisar a cinética de secagem em camada delgada de quitosana obtida de resíduo do processamento de pescados da Região Sul do RS, sendo considerado o encolhimento do material durante a operação.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

Caracterizar a secagem em camada delgada da quitosana e quitosana purificada, através das curvas características experimentais.

Otimizar a operação de secagem para quitosana purificada utilizando a metodologia da superfície de resposta.

Determinar as propriedades físicas e de transporte dos materiais que serão analisados durante a operação de secagem.

Realizar a modelagem físico-matemática da operação de secagem, considerando encolhimento.

## **CAPÍTULO 2: REVISÃO DE LITERATURA**

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

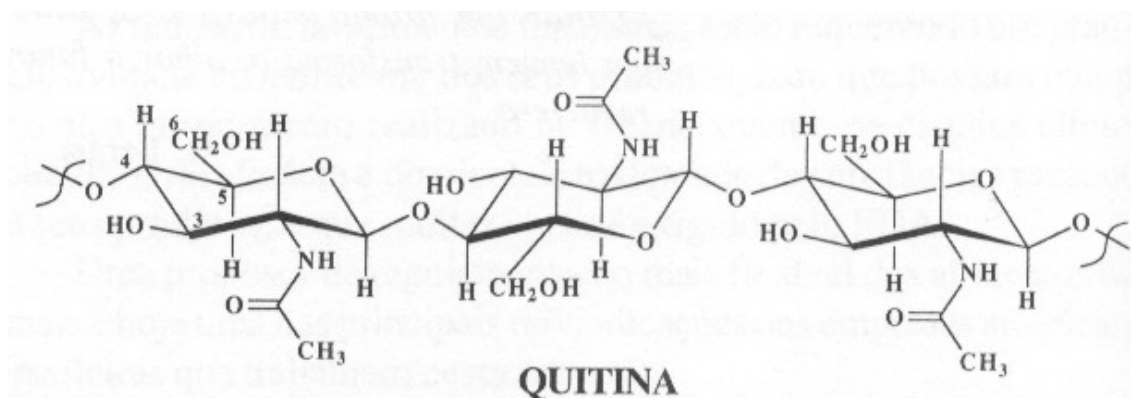
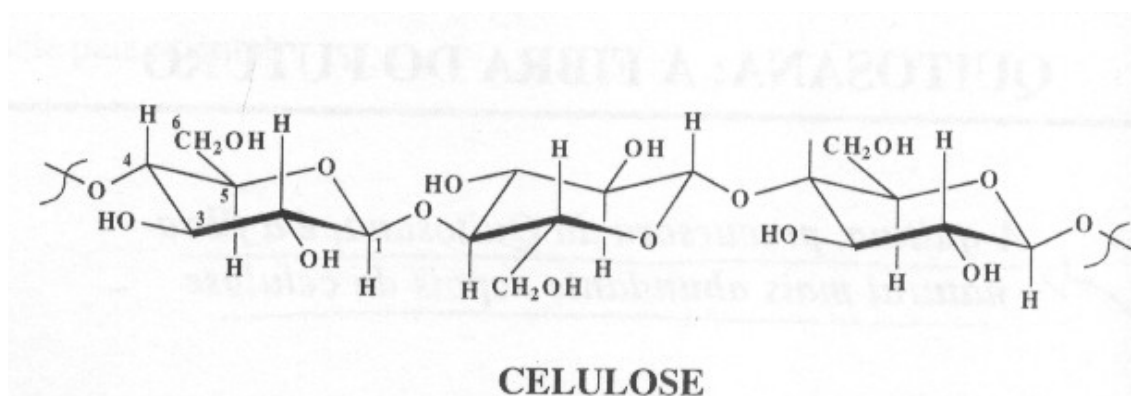
Nesta revisão são apresentadas as características das matérias-primas utilizadas no presente estudo. Assim como, os fundamentos da secagem de materiais sólidos, descrevendo-se os mecanismos de migração de umidade no interior dos sólidos durante o processo de secagem. São definidos os períodos de taxa constante e decrescente, além das propriedades físicas e os modelos largamente utilizados na secagem de alimentos sólidos.

### 2.1 Quitina

A quitina, denominação usual para o polímero  $\beta$ -(1-4)2-acetamido-2-deoxi-D-glicose (N-acetilglucosamina), foi descoberta pelo professor francês Henri Braconnot, em 1811, recebendo então a denominação inicial de fungina. Seu nome foi dado por Odier, 1823, quando ela foi isolada de insetos (CRAVEIRO *et al.*, 1999). O termo quitina é derivado do grego, da palavra Chiton, significando um revestimento protetor para invertebrados (SAHIDI *et al.*, 1999).

A quitina é um dos principais compostos que constituem os resíduos do camarão, da qual pode-se obter a quitosana por desacetilação. Muito embora, as fontes de extração de quitina, tenham um período de vida muito curto, possuem uma enorme capacidade de regeneração. Está presente na pele e carapaça de artrópodes, juntamente com proteínas, lipídios e carbonato de cálcio (FURLAN, 1993).

A fibra natural quitina, precursora da quitosana, é a mais abundante depois da celulose, possuindo uma estrutura semelhante a essa fibra vegetal. Seu peso molecular, na natureza, é normalmente acima de 1.000.000 Dáltons, sendo que a diferença estrutural entre as duas fibras se deve ao grupo hidroxila localizado na posição 2, que na quitina estão substituídos por grupos acetamino (CRAVEIRO *et al.*, 1999). Isto pode ser visto através das Figuras 01 e 02. A quitina possui ainda a característica notável de ser uma substância bioquímica que conduz cargas elétricas positivas (BAGGIO *et al.*, 1989).

Figura 01: Estrutura da Quitina (CRAVEIRO *et al.*, 1999).Figura 02: Estrutura da Celulose (CRAVEIRO *et al.*, 1999).

Uma das propriedades da quitina é de ser um sólido cristalino ou amorfo, insolúvel em água, solventes orgânicos, ácidos diluídos e álcalis. Ela se dissolve em ácidos minerais concentrados com simultânea degradação do polímero. O único solvente prático para quitina é N,N – dimetilacetamida contendo 5% de cloreto de lítio. Contudo, a quitina também pode ser dispersa em uma solução concentrada e quente de tiocianato de lítio e assim proceder a sua reprecipitação em álcool, acetona ou água (FURLAN, 1993).

A quitina constitui 1,4% do peso de insetos, e 15 a 20% do peso de carapaças de crustáceos. Apresenta grande variedade de usos, principalmente na indústria têxtil, alimentícia e de cosméticos; porém, sua maior aplicação encontra-se na produção de quitosana (CRAVEIRO *et al.*, 1999).

As etapas do processo de obtenção da quitina, segundo SOARES *et al.* (2003) são: desmineralização, desproteínização, desodorização/despigmentação e secagem. A desmineralização consiste na agitação dos resíduos com HCl (2,5% p/v) por duas horas, a desproteínização consiste na agitação dos resíduos com NaOH (5%)

por duas horas e a desodorização/despigmentação consiste na agitação com hipoclorito de sódio na proporção de 1:7, por três horas. Entre cada uma das etapas de obtenção são feitas sucessivas lavagens para a retirada dos reagentes.

## 2.2 Quitosana

Quimicamente, a quitosana é um polímero de alto peso molecular, sendo uma poliamina na qual os grupos amino estão disponíveis para reações químicas (preparação de derivados) e formação de sais com ácidos. Os grupos hidroxila C-6 (primário) e C-3 (secundário) também podem ser utilizados na preparação de derivados. A única diferença presente entre a quitosana e a quitina é a substituição do grupo acetamino na posição 2, pelo grupo amino, como pode ser notado nas Figuras 03 e 04. O peso molecular da quitosana comercializada varia entre 100.000 a 1.200.000 Dáltons (CRAVEIRO *et al.*, 1999).

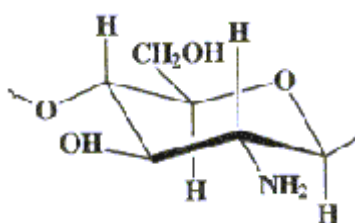


Figura 03: Monômero da Quitosana (CRAVEIRO *et al.*, 1999).

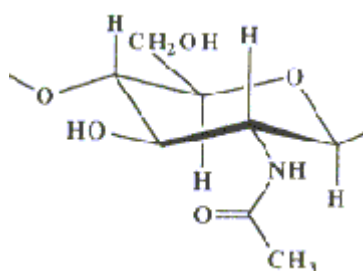


Figura 04: Monômero da Quitina (CRAVEIRO *et al.*, 1999).

Durante o curso da desacetilação alcalina, parte das ligações N-acetil do polímero são rompidas com formação de unidades de D-Glicosamina que contém um grupo amínico livre. Entretanto, a quitosana não é uma entidade química uniforme, mas um grupo de polímeros parcialmente desacetilados, dos quais, os que apresentam grau de desacetilação acima de 30%, já podem ser considerados quitosana, sendo que as aplicações e características do polímero dependem fundamentalmente do grau de desacetilação e do tamanho da cadeia do polímero (CRAVEIRO *et al.*, 1999).

O grupo amino confere a quitosana solubilidade em um pH de aproximadamente 6,0, em solventes, tais como, ácidos orgânicos diluídos (ácido acético e ácido fórmico) e ácidos inorgânicos, para originar soluções viscosas (ROBERTS, 1992).

Em meio ácido, os grupos aminos presentes no polímero captam íons hidrogênio do meio, resultando uma carga global positiva à quitosana, que proporciona atração e ligação iônica à moléculas carregadas negativamente, nas quais estão incluídos os ácidos graxos (lipídios), os ácidos biliares, as proteínas, os corantes e polímeros, íons de metais de transição, entre outros (SAHIDI *et al.*, 1999).

Muitos tipos de membranas de quitosana estão sendo desenvolvidos para clarificação e purificação de água com boas propriedades semipermeáveis. De acordo com a Agência Americana de Proteção Ambiental, a quitosana foi aprovada para ser utilizada seguramente como componente de meio filtrante utilizado para obtenção de água potável. Outra aplicação importante em tratamento de água é no caso de derramamentos de óleo, quando a quitosana é aplicada sobre a massa de óleo, formando um aglomerado de fácil remoção (CRAVEIRO *et al.*, 1999).

Existem pelo menos dois centros de pesquisa, em destaque, no país na investigação de quitosana – a Universidade Federal de Santa Catarina e a Universidade Federal do Ceará. Na linha de produtos alimentícios à base de quitosana, já foi desenvolvido, na Universidade Federal do Ceará, o biscoito com alto teor de quitosana denominado FYBER CRACKER indicado para a redução dos níveis de colesterol e como auxiliar em regimes alimentares para a redução de peso. Outros produtos, entre eles, massa para bolos e macarrão, já estão em fase final de desenvolvimento, com apoio de empresas locais (CRAVEIRO *et al.*, 1999).

O processo de obtenção da quitosana, a partir da quitina (SOARES *et al.*, 2003), consiste na etapa de desacetilação, que corresponde a uma agitação com NaOH (45% p/v) à temperatura de 130 °C, por 1,5 horas. Onde da hidrólise drástica obtem-se então a quitosana úmida. Esta passa pela etapa de secagem para garantir a umidade comercial.

### 2.2.1 Purificação da Quitosana

A purificação de quitosana é feita pela eliminação das partículas sólidas e possíveis impurezas, segundo ROBERTS (1992).

As etapas de purificação da quitosana, segundo SOARES *et al.*(2003), consistem em primeiro se prepara um sal de quitosana, com ácido acético (1%v/v). A solução é filtrada para a retirada de impurezas. A quitosana é precipitada com NaOH (10%p/v) e após é neutralizada até pH 7,5. A separação é feita por centrifugação e se obtém a quitosana purificada úmida.

## 2.3 Secagem de Materiais Sólidos

### 2.3.1 Conceitos e Mecanismos

A secagem convectiva é normalmente considerada um processo de remoção de umidade de um sólido por evaporação (Mc. CORMICK, 1983). Nos processos de secagem convectiva, o material úmido entra em contato com ar insaturado resultando uma diminuição do conteúdo de umidade do material e a umidificação do ar (STRUMILO & KUDRA, 1986). A utilização do processo de secagem no processamento de produtos alimentícios vem sendo difundido cada vez mais, buscando sempre a produção de alimentos desidratados de boas características (TOBINAGA & PINTO, 1992).

Segundo BRUIN & LUBYEN (1980) podem ser observados três grandes problemas na secagem:

- Aspectos físicos e matemáticos do processo de secagem; conhecimento dos fenômenos de transporte e das propriedades termofísicas e de equilíbrio termodinâmico, habilitando a interpretar o comportamento da secagem de materiais como uma função do tempo,

- Alterações dos gêneros alimentícios durante a secagem; o processo de desidratação influencia a qualidade dos alimentos sob vários aspectos. Todas as



mudanças dependem da temperatura, atividade química e do tempo, daí a importância do conhecimento dos perfis de temperatura e umidade como função do tempo,

- Otimização do processo de secagem; os secadores são escolhidos e projetados de modo a combinar da melhor forma possível os fatores de custo e a qualidade do produto final. O fator custo é norteado principalmente, pelos gastos com energia, que basicamente depende das condições de secagem utilizada, sendo função direta da umidade final do produto e do tempo de secagem necessário.

O conteúdo de umidade de um sólido pode ser expresso em termos da massa seca. Quando o calor necessário para evaporar a água é fornecido ao material, ocorrem transferências simultâneas de calor e de massa, conforme está esquematizado na Figura 05. Uma vez que o produto é colocado em contato com ar quente, ocorre uma transferência de calor do ar ao produto sob efeito da temperatura existente entre eles. Simultaneamente, a diferença de pressão parcial de vapor da água existente entre o ar e a superfície do produto determina uma transferência de massa para o ar, na forma de vapor de água (PARK, *et al.*, 1996).

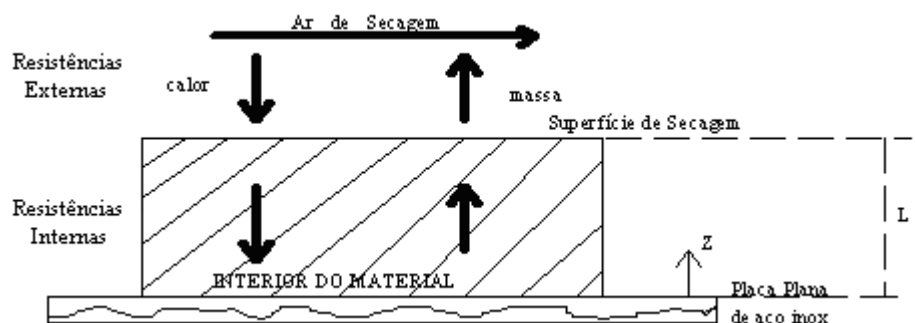


Figura 05: Esquema do processo de secagem de material sólido (PINTO, 1996).

O conhecimento dos mecanismos de transferência de água, do interior do material para a sua superfície, é de fundamental importância para a descrição do fenômeno da secagem (BRUIN & LUYBEN, 1980). Entre os mecanismos pelos quais pode ocorrer a migração de umidade através do sólido, podemos citar a difusão em termos de gradiente de concentração, para o transporte de vapor de água, e a difusão em termos de gradiente de umidade e escoamento capilar, para o transporte de água líquida. Estes três mecanismos são os mais importantes na secagem de alimentos.

As transferências internas de massa são influenciadas por dois fenômenos importantes para materiais biológicos (CHARM, 1971): a migração de soluto (formação de crosta) e a deformação do produto (encolhimento).

Os processos de secagem geralmente são classificados em contínuos e descontínuos, e também em relação à circulação de ar durante a secagem (natural ou forçada).

De acordo com o apresentado na literatura por Mc. CORMICK (1983) a secagem pode ser dividida em período de taxa constante de secagem e período de taxa decrescente de secagem.

### **2.3.2 Período de Taxa Constante de Secagem**

No período de taxa constante, a superfície do material é mantida num nível de umidade tal que, a secagem ocorre como se o sistema fosse água pura evaporando. Se o sólido for poroso, a maioria da água evaporada no período de taxa constante é proveniente do interior do sólido. Este período só continua desde que a água seja provida à superfície tão rápido quanto é evaporada (GEANKOPLIS, 1983).

O movimento da umidade no interior do sólido é suficientemente rápido para manter a condição de saturação na superfície, e a velocidade da secagem é controlada pela rapidez com que ocorre a transferência de calor para a superfície evaporante. As resistências às transferências de calor e massa apresentam-se somente na corrente de ar, assim a taxa de evaporação da água não muda em relação ao tempo (CHIRIFE, 1983).

Na secagem de alimentos, o período de taxa constante só tem relativa importância quando o teor de umidade inicial do sólido é muito alto ou quando o potencial de secagem do ar é muito baixo (CHIRIFE, 1983).

O término do período de taxa constante é alcançado quando a migração interna de água para a superfície não consegue mais suprir a taxa de evaporação da água livre da superfície. O valor da umidade deste estado é denominado de umidade crítica, nesta condição inicia-se o período de taxa decrescente (CHIRIFE, 1983 e BRUIN & LUYBEN, 1983).

As curvas de taxa de secagem servem para evidenciar o término do período de taxa constante, e conseqüentemente o período de umidade crítica ( $X_C$ ), bem como, determinar os valores médios da taxa constante por umidade de massa de sólido seco ( $N_C^*$ ). Estes valores podem também ser correlacionados com os dados de  $X_0$  (umidade inicial),  $X_C$  através da Equação 1:

$$N_C^* = (X_0 - X_C)/t_C \quad (1)$$

A taxa de evaporação de água de superfície, durante o período de taxa constante, é expressa como uma função das condições do ar (velocidade, depressão de bulbo úmido e umidade relativa), da forma, da área da superfície e da direção da corrente de ar (JASON, 1958). Os valores da umidade crítica não são somente característicos de cada material alimentício, mas também dependem de outros fatores que controlam a migração de umidade (interna/externa), tais como espessura da peça e condições do ar ( $v_{AR}$ ,  $T_{BS}$ , %UR) (CHIRIFE, 1983).

### 2.3.3 Período de Taxa Decrescente de Secagem

Este período inicia quando a migração interna de umidade começa a controlar o processo de secagem e pode ser constituído por duas etapas. Para a primeira fase do período de taxa decrescente da secagem de alimentos sólidos, os principais mecanismos de transporte sugeridos são: escoamento capilar, difusão de líquido e difusão de vapor. É observado que um mecanismo não exclui o outro, podendo acontecer transporte por diversos mecanismos simultaneamente. Na segunda fase deste período, a difusão de vapor é, provavelmente, o mecanismo predominante de transporte de umidade (TOBINAGA & PINTO, 1992).

No fim da secagem, a pressão de vapor iguala-se à pressão parcial de vapor no ar seco, não ocorrendo mais secagem. O teor de umidade deste estágio é conhecido como umidade de equilíbrio ( $X_E$ ) (CHIRIFE, 1983).

### 2.3.4 Cinética de Secagem: Modelos

#### 2.3.4.1 Modelo Empírico

Uma importante correlação na secagem de alimentos é a lei exponencial (BALA e WOODS, 1992), esta lei estabelece que a taxa de secagem é proporcional ao teor de água livre do gênero alimentício na forma apresentada na Equação 2.

$$\frac{dX}{dt} = -K(\bar{X} - X_E) \quad (2)$$

Onde o fator de proporcionalidade  $K$  é denominado de constante de secagem. A Equação 2 é análoga a lei de resfriamento de Newton, se for levado em conta que toda a resistência ao transporte de umidade concentra-se no interior do material, desconsiderando os efeitos da camada limite, e por isto chamada de modelo semi-empírico. A Equação 2 é normalmente utilizada na forma integrada, com os limites de integração, no tempo igual a zero a umidade do material é igual a  $X_0$  e no tempo igual a  $t$  a umidade é  $X$ , com dois parâmetros, resultando na Equação 3 (AJIBOLA, 1989; VERSAVEL & MUIR, 1978)

$$\left( \frac{\bar{X} - X_E}{X_0 - X_E} \right) = A \exp(-K t) \quad (3)$$

#### 2.3.4.2 Modelos de Transferências de Calor e de Massa sem Encolhimento

O modelo apresentado nas Equações 4 e 5 é composto por duas equações diferenciais parciais que representam as transferências de calor e de massa ocorridas durante a secagem de materiais que não apresentam encolhimento.

As considerações feitas para estes modelos são: o material é homogêneo e isotrópico, lâmina infinita, as distribuições de umidade e temperatura iniciais são uniformes, a difusividade efetiva é função da umidade e da temperatura, a evaporação ocorre na superfície da amostra, a secagem é por um lado.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{EF}(X, T) \frac{\partial X}{\partial z} \right) \quad (4)$$

$$\rho_b c p_b \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k_{ef}^T(X, T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (5)$$

As condições, inicial e de contorno, são apresentadas nas Equações 6a, 6b e 6c.

$$\text{Condição Inicial: } t = 0 \Rightarrow 0 < z < L_0 \Rightarrow X = X_0 \quad (6a)$$

$$T = T_0$$

$$\text{Condição de Contorno 1: } z = 0 \Rightarrow t \geq 0 \Rightarrow \left( \frac{\partial X}{\partial z} \right) = 0 \quad (6b)$$

$$\left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0$$

$$\text{Condição de Contorno 2: } z = (L_0) \Rightarrow t \geq 0 \Rightarrow$$

$$\left\{ -D_{EF} \rho_s \left( \frac{\partial X}{\partial z} \right) = k_{EX} (Y_E - Y_{AR}) \right\} \quad (6c)$$

$$\left\{ k_{EF}^T \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) = h_c (T_s - T_{BS}) - k_{EX} (Y_E - Y_{AR}) \Delta H_{VAP} \right\}$$

### Modelo Difusivo

A teoria de migração de água por difusão, representada pela 2ª Lei de Fick, expressa em termos do gradiente de umidade, teve preferência no estudo da secagem de diferentes produtos alimentícios por vários pesquisadores (VACCAREZZA *et al.*, 1974; IGBEKA, 1982; AGUERRE *et al.*, 1985; CALADO *et al.*, 1987; OLIVEIRA *et al.*, 1988; YUSHENG & POULSEN, 1988; WALTON *et al.*, 1988; HAGHIGHI *et al.*, 1990; PINTO, 1992 e PINTO *et al.*, 1992, WAANANEN, 1996; SIMAL *et al.*, 1996; TEIXEIRA & TOBINAGA, 1998; SARSAVADIA *et al.*, 1999; MOREIRA, 2000; CIHAN & ECE, 2001; RAMESH *et al.*, 2001; IBANOGLU, 2002), por apresentar uma boa concordância entre as distribuições de umidade experimental e a estimada pelo modelo

Para obter o modelo difusivo, apresentado na Equação 7, considera-se ainda a difusividade efetiva de massa constante, os efeitos de resistência externa desprezíveis (admitindo  $v_{AR} \geq 1,0 \text{ m/s}$ ) e processo quase isotérmico, pelo fato da distribuição interna de temperatura nos alimentos ser considerada uniforme (apresentando números de Biot  $\leq 0,1$ ), eliminado assim do modelo a equação de calor.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{EF} \left( \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \right) \quad 0 < z < L_0, t > 0 \quad (7)$$

A Equação 7 apresenta as condições, inicial e de contorno, apresentadas nas Equações 8a, 8b e 8c.

$$\text{Condição Inicial: } t = 0 \Rightarrow 0 < z < L_0 \Rightarrow X = X_0 \quad (8a)$$

$$\text{Condição de Contorno 1: } z = 0 \Rightarrow t \geq 0 \Rightarrow \left( \frac{\partial X}{\partial z} \right) = 0 \quad (8b)$$

$$\text{Condição de Contorno 2: } z = L_0 \Rightarrow t \geq 0 \Rightarrow X = X_E \quad (8c)$$

A relação de equilíbrio,  $X=X_E$  ( $T, Y_E$ ), é representada pela isoterma de sorção, determinada experimentalmente, como em VIOLLAZ *et al.*(1978).

A solução analítica da Equação 7, para o perfil interno de umidade, que satisfaz as equações anteriores CRANK (1975) é apresentado na Equação 9.

$$\frac{X - X_E}{X_0 - X_E} = \frac{4}{\pi} \sum_0^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \exp \left[ - \left( n + \frac{1}{2} \right)^2 \pi^2 \frac{D_{EF} t}{L_0^2} \right] \cos \left[ \left( n + \frac{1}{2} \right) \pi \frac{z}{L_0} \right] \quad (9)$$

E o cálculo com a média no volume, fornece o perfil médio de umidade dado pela Equação 10.

$$\frac{\bar{X} - X_E}{X_0 - X_E} = \frac{8}{\pi^2} \sum_0^{\infty} \frac{(1)}{(2n+1)^2} \exp \left[ - \left( n + \frac{1}{2} \right)^2 \pi^2 \frac{D_{EF} t}{L_0^2} \right] \quad (10)$$

Para tempos longos de secagem ( $Fo > 0,2$ ), a equação 10 se reduz a Equação 11.

$$\frac{\bar{X} - X_E}{X_0 - X_E} = \frac{8}{\pi^2} \exp \left[ \pi^2 \frac{D_{EF} t}{4L_0^2} \right] \quad (11)$$

### Modelo Térmico Simplificado

A temperatura da amostra é determinada através do balanço de calor para o processo quase-isotérmico ( $Bi_c \leq 0,1$ ). Durante o período de taxa constante  $T_s = T_{BU}$  e para o período de taxa decrescente o perfil é representado pela Equação 12. Onde o calor que aquece o material por condução, é igual ao calor que chega por convecção no sólido menos o calor que evapora a água presente neste.

$$(\rho_b c_p L_0) \frac{dT}{dt} = h_c (T_{BS} - T_s) - N \Delta H_{VAP} \quad (12)$$

#### 2.3.4.3 Modelos Difusivos Considerando Encolhimento

O modelo de KECHAOU & ROQUES (1989) supõe também difusão líquida e usa praticamente as mesmas simplificações do modelo Fickiano, considera o processo quase-isotérmico e leva em conta o encolhimento do material, sendo este tomado apenas na espessura.

Para considerar o encolhimento, os autores fizeram uso de uma mudança de variável na dimensão, apresentado nas Equações 13 e 14.

$$dz = (1 + \alpha X) d\xi \quad (13)$$

$$\xi = \int_0^z \left[ \frac{1}{(1 + \alpha X)} \right] dz \quad (14)$$

Então a equação da continuidade para a água em termos da umidade é escrita na Equação 15.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{D_{EF}(X, T)}{(1 + \alpha X)^2} \frac{\partial X}{\partial \xi} \right) \quad (15)$$

Com as condições inicial e de contorno apresentadas nas Equações 16a, 16b e 16c.

$$\text{Inicial: } t=0; \quad 0 \leq \xi \leq L_s \quad \Rightarrow \quad X=X_0 \quad (16a)$$

$$\text{contorno: } \xi = 0; \quad t \geq 0 \quad \Rightarrow \quad \left( \frac{\partial X}{\partial \xi} \right) = 0 \quad (16b)$$

$$\xi = L_S; \quad t \geq 0 \quad \Rightarrow \quad -D_{EF} \rho_S (\partial X / \partial \xi) = k_{ex} (Y_E - Y_{AR}) \quad (16c)$$

O perfil de umidade médio dado pela Equação 17.

$$X_{(t)} = (1/L_S) \int_0^{L(s)} X d\xi \quad (17)$$

Sendo que a temperatura do material pode ser determinada por um balanço de energia, apresentado anteriormente, pela Equação 12.

Os autores utilizaram este modelo no estudo da secagem de gelatina, na forma de lâmina, com 2,0 mm de espessura, determinando o perfil local de umidade em função da espessura, que era variável com o tempo. PINTO (1996) utilizou o mesmo modelo na forma adimensionalizada, porém com a condição de equilíbrio na superfície, para analisar a secagem de filés de peixe. Estes autores obtiveram bons resultados quando compararam o perfil teórico de umidade média com os resultados experimentais.

VIOLLAZ & SUAREZ (1985) e PINTO & TOBINAGA (1994) consideraram o encolhimento incorporado dentro da análise, porém estes autores tomaram a difusividade efetiva como constante e desprezaram o efeito da resistência externa ao transporte de umidade. Apresentaram um modelo similar ao anterior (Equação 15), na Equação 18, na forma adimensionalizada:

$$\left( \frac{\partial X^*}{\partial Fo} \right) = \frac{\partial}{\partial \xi^*} \left( \frac{1}{(1 + \alpha^* X^*)^2} \frac{\partial X^*}{\partial \xi^*} \right) \quad (18)$$

Com as condições apresentadas nas Equações 19a, 19b e 19c.

$$\text{inicial:} \quad Fo(s) = 0; \quad 0 \leq \xi \leq 1,0 \quad \Rightarrow \quad X^* = 1 \quad (19a)$$

$$\text{contorno: } \xi^* = 0; \quad Fo(s) \geq 0 \quad \Rightarrow \quad \left( \frac{\partial X^*}{\partial \xi^*} \right) = 0 \quad (19b)$$



$$\xi^* = 1,0; \quad Fo(s) \geq 0 \quad \Rightarrow \quad X^* = \left( \frac{X_E}{X_0} \right) \quad (19c)$$

Onde os adimensionais são definidos nas Equações 20, 21, 22 e 23.

$$X^* = \left( \frac{X}{X_0} \right) \quad (20)$$

$$Fo = \left( \frac{D_{EF} t}{L_s^2} \right) \quad (21)$$

$$\xi^* = \left( \frac{\xi}{L_s} \right) \quad (22)$$

$$\alpha^* = (\alpha X_0) \quad (23)$$

Sendo o coeficiente de encolhimento linear ( $\alpha$ ) definido na Equação 24, utilizado por VIOLLAZ & SUAREZ (1985).

$$\alpha = \rho_{ss} / \rho_w \quad (24)$$

O perfil de umidade médio é dado pela Equação 25.

$$\bar{X} = \int_0^1 X^* d\xi^* \quad (25)$$

VIOLLAZ & SUAREZ (1985) utilizaram este procedimento na secagem de batata, enquanto PINTO & TOBINAGA (1994) apresentaram este modelo para o estudo da secagem de filés de peixes.

### 2.3.5 Umidade de Equilíbrio ( $X_E$ )

Os alimentos com alto teor de água se apresentam como um ótimo meio para o desenvolvimento de microorganismos, devido às soluções diluídas que esta forma com os seus demais constituintes. O teor de água livre no alimento é expresso como atividade de água ( $a_w$ ), a qual é definida pela relação entre a pressão de vapor de água em equilíbrio sobre o alimento e a pressão de vapor da água pura, a mesma temperatura, correspondendo a umidade relativa do meio quando expressa em base percentual (FENNEMA, 1985).

A umidade de equilíbrio determina o conteúdo de umidade que um material pode ter em relação à umidade relativa do meio em que se encontra. As isotermas de sorção representam a relação entre a atividade de água ou a umidade relativa do meio e o conteúdo de umidade do alimento em equilíbrio com o meio, a uma certa temperatura. As isotermas podem representar a perda (dessorção) ou o acréscimo (adsorção) de umidade do umidade em função da umidade relativa do meio em que se encontra ou da atividade de água deste (PEZZUTI & CRAPISTE, 1996; FENNEMA, 1985).

A determinação das isotermas de sorção de um material pode ser efetuada quanto à variação de umidade do material ou meio em que este se encontra, através do método gravimétrico (variação de massa do material) e do método higrométrico (variação da umidade do ar ambiente). Tais métodos podem ainda apresentar uma variante em relação à movimentação do ar ambiente, podendo ser: o estático, no qual o ar que circunda o material está sob condições estáticas; ou dinâmico, no qual o fluido gasoso está sendo movimentado mecanicamente.

A literatura apresenta diversas correlações para a previsão da umidade de equilíbrio dos alimentos, baseados nos resultados das curvas experimentais, cujo comportamento apresenta a forma sigmoideal (MIR & NATH, 1995).

No passado, a mais conhecida isoterma de sorção Brunauer, Emmett e Teller (BET) era o modelo que tinha a melhor aplicação em sorção de água em alimentos e produtos alimentícios (LABUZA, 1968), entretanto era sabido que considerava apenas uma faixa limitante de umidade relativa, apenas 0,3 a 0,4. A equação do modelo de BET está representada na Equação 26. Nos anos mais recentes, a equação de isotermas de Guggenheim, Anderson e de Boer (GAB), Equação 27, tem sido largamente usada para descrever a maneira de sorção de alimentos (IGLESIAS & CHIRIFE, 1995). Segundo TIMMERMANN *et al.* (2001) os valores das equações de GAB são mais gerais e tem mais significado físico e que os dois parâmetros de BET podem ser calculados em termos dos três parâmetros de GAB.

$$X_E = \frac{X_m * a * UR}{(1-UR)(1-UR + a * UR)} \quad (26)$$

$$X_E = \frac{X_m * C * k * UR}{(1 - k * UR)(1 - k * UR + C * k * UR)} \quad (27)$$

### 2.3.6 Propriedades Físicas e de Transporte

Algumas propriedades físicas durante a secagem possuem variação por serem função da umidade presente nos materiais, como é o caso da massa específica, porosidade e coeficiente de encolhimento. Estas variações foram descritas por vários autores (TOBINAGA & PINTO, 1992).

Destaca-se a variação da massa específica das amostras ao longo da secagem. Estudando o comportamento da variação de massa específica de frutas e vegetais, LOZANO *et al.* (1983). Uma correlação desta propriedade física em função da umidade do material é apresentada pela Equação 28.

$$\rho = b + c \left( \frac{X}{X_0} \right) + d \left[ \exp \left( -e \frac{X}{X_0} \right) \right] \quad (28)$$

A massa específica pode ser determinada através da composição aproximada das amostras em base úmida (proteína, gordura, umidade e cinzas) utilizando-se a Equação 29.

$$\rho_s = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{X_i}{\rho_i}} \quad (29)$$

A variação de volume do alimento durante a secagem, pode ser analisada através do coeficiente de encolhimento linear, que está relacionado com a espessura do material, analogamente à equação da expansão térmica de acordo com CHARM (1971), conforme apresentado por PINTO (1996) na Equação 30.

$$L = L_s (1 + \alpha X) \quad (30)$$

onde,  $L_s$  é a espessura do sólido seco. Esta equação pode ser escrita como na Equação 31.

$$\frac{\rho_{ss}(1+X)}{\rho_b} = (1+\alpha X) \quad (31)$$

ou ainda na forma utilizada por VIOLLAZ & SUAREZ (1985), apresentado na Equação 24.

PINTO & TOBINAGA (1993) determinaram que o coeficiente de encolhimento linear para músculos de peixes, era praticamente constante durante o período de taxa constante e na primeira fase da taxa decrescente de secagem, este valor foi ao redor de 1,50.

A anisotropia dos músculos de peixe no encolhimento relativo às três dimensões foi evidenciado por BALABAN & PIGOTT (1986) e por PINTO & TOBINAGA 1992.

A difusividade efetiva volumétrica de umidade é uma importante propriedade de transporte na modelagem dos processos de secagem de alimentos, sendo uma função da temperatura do ar e da umidade do material. Porém, devido a composição complexa e estrutura física dos alimentos não são conseguidas estimativas precisas desta propriedade, sendo assim necessárias medidas experimentais, como observado nos trabalhos de SARAVACCOS & ROUZEOUS (1984) e VAGENAS & KARATHANOS (1993).

A experiência tem mostrado que a dependência da difusividade efetiva volumétrica de umidade com a temperatura do ar é do tipo Arrhenius, onde as energias de ativação calculadas para vários materiais alimentícios estão na faixa de 3400 a 9500 cal/mol (CHIRIFE,1983).

A difusividade efetiva de umidade é uma função da umidade e da temperatura, Equação 32, podendo ser representada na forma (KECHAOU & ROQUES, 1989):

$$D_{EF}(\bar{X}, T) = D_0(T) \exp(-f\bar{X}) \quad (32)$$

Onde  $D_0(T)$  é uma equação tipo Arrhenius, apresentado na Equação 33:

$$D_0(T) = D_0 \exp(-E_A / RT_{BS}) \quad (33)$$

Para a determinação da difusividade efetiva, quando esta é variável durante o processo, utiliza-se o método das tangentes, apresentado na Equação 34 (VAGENAS & KARATANOS, 1993; PERRY, 1980).

$$D_{EF} = \left[ \frac{\left( \frac{dY}{dt} \right)_{exp}}{\left( \frac{dY}{dFo} \right)_{Teo}} \right] L^2 \quad (34)$$

onde,  $(dY/dt)_{exp}$  é calculado a partir do gráfico das curvas do adimensional de água livre em função do tempo, obtidas através dos ensaios experimentais de secagem, e  $(dY/dFo)_{Teo}$  a partir da curva teórica da difusão de água, apresentada por KEEY (1978).

São citadas na literatura algumas correlações que expressam a difusividade efetiva volumétrica de umidade de materiais alimentícios em função do teor de umidade dos mesmos, tais como nos trabalhos de: PINTO & TOBINAGA (1993), ALVES FILHO & RUMSEY (1985) e YAMAMOTO (1985).

Com a difusividade efetiva volumétrica está baseada na geometria da amostra, a qual muda durante a secagem devido ao significativo encolhimento e uma difusividade baseada na massa de sólido ( $D_{EF}^S$ ) é preferida a qual pode ser calculada de acordo com CRANK (1975), como na Equação 35.

$$D_{EF}^S = D_{EF} \left[ \frac{\rho_B}{\rho_{ss}(1+X)} \right]^{2/3} \quad (35)$$

## **CAPÍTULO 3: DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO**

# ARTIGO 1 - MODELO DIFUSIVO COM DIFUSIVIDADE EFETIVA VARIÁVEL NA SECAGEM EM CAMADA DELGADA DE QUITOSANA

## RESUMO

A quitosana  $\beta$ -(1-4)-D-glucosamina é obtida pela desacetilação rigorosa da quitina em solução alcalina, que é encontrada em exoesqueletos de crustáceos, fungos e insetos. Uma das etapas importantes do processo de obtenção deste produto é a operação de secagem, devido às características do produto final e condições de armazenamento. Desta forma, estudou-se a secagem de quitosana em camada delgada utilizando o modelo difusivo com difusividade efetiva variável. A matéria-prima utilizada foi quitosana, obtida no Laboratório de Operações Unitárias. Os ensaios de secagem foram realizados em bandejas de 5mm de espessura à 80°C, em secador de funcionamento descontínuo. A equação diferencial parcial não-linear de 2ª ordem, obtida para o modelo difusivo, foi discretizada na posição utilizando a técnica de diferenças finitas. Observou-se uma boa concordância do perfil médio do adimensional de umidade, obtido do modelo difusivo, considerando a difusividade efetiva variável, com os valores experimentais para o período de taxa decrescente de secagem.

Palavras chaves: Quitosana, Secagem em Camada Delgada, Modelo Difusivo.

## 1 INTRODUÇÃO

A quitina,  $\beta$ -(1-4)-N-acetil-D-glucosamina é o segundo mais abundante biopolímero natural depois da celulose. Encontra-se nos exoesqueletos de crustáceos, fungos e outros materiais biológicos, e é a principal provedora da quitosana,  $\beta$ -(1-4)-D-glucosamina (SHAHIDI *et al.*, 1999). Esta tem alto valor no mercado e pode ser utilizada em várias áreas, devido sua estrutura possuir um grupamento amino disponível (CRAVEIRO *et al.*, 1999).

A produção de quitosana surgiu no Japão, onde o grande consumo de frutos do mar origina uma grande quantidade de resíduos e rejeitos (CRAVEIRO *et al.*, 1999).

Segundo SOARES *et al.*(2003), as etapas de obtenção da quitina, a partir de resíduos de camarão, são as seguintes: desmineralização, desproteínização,

desodorização e secagem. Para a produção de quitosana faz-se uma desacetilação alcalina rigorosa, que retira a molécula acetil da quitina transformando esta em quitosana, seguida de sua secagem.

Ressalta-se a importância da operação de secagem na produção de quitosana, já que esta etapa deve garantir que seja alcançada a umidade necessária para o armazenamento do produto (6 a 8% b.u.), sem causar alterações no material.

O objetivo deste trabalho foi analisar a cinética de secagem de quitosana em camada delgada com escoamento paralelo de ar, utilizando as soluções do modelo difusivo com difusividades efetivas constante e variável.

## 2 MODELAGEM DA SECAGEM

O modelo difusivo é utilizado para o estudo da secagem em camada delgada, sendo obtido a partir da equação do balanço diferencial de massa, que representa a migração de umidade do material para a corrente do ar de secagem (KEEY, 1972; CHIRIFE, 1983). Este tem tido preferência na secagem de produtos alimentícios por vários pesquisadores da área (IGBEKA, 1982; AGUERRE *et al.*, 1985; YUSHENG & POULSEN, 1988; WAANANEN, 1996; SIMAL *et al.*, 1996; TEIXEIRA & TOBINAGA, 1998; SARSAVADIA *et al.*, 1999; CIHAN & ECE, 2001; RAMESH *et al.*, 2001; IBANOGLU, 2002).

As considerações para obter o modelo difusivo, apresentado na Equação 1, para o período de taxa decrescente, sendo que a evaporação ocorre na superfície da amostra, são: material homogêneo e isotrópico, na forma de lâmina infinita, não apresentando encolhimento, a difusividade efetiva é função da umidade e da temperatura do material, a secagem é por um lado e os efeitos de resistência externa são desprezíveis ( $v_{AR} > 1,0 \text{ m/s}$ ).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{EF}(X, T_S) \frac{\partial X}{\partial z} \right) \quad (1)$$

As condições, inicial e de contorno, são apresentadas nas Equações 1a, 1b e 1c.



$$\text{Condição Inicial: } t = 0 \Rightarrow 0 < z < L_0 \Rightarrow X = X_C \quad (1a)$$

$$\text{Condição de Contorno 1: } z = 0 \Rightarrow t > 0 \Rightarrow \frac{\partial X}{\partial z} = 0 \quad (1b)$$

$$\text{Condição de Contorno 2: } z = (L_0) \Rightarrow t > 0 \Rightarrow X = X_E \quad (1c)$$

Sendo um processo considerado como quase isotérmico. A distribuição interna de temperatura, durante a secagem de alimentos pode ser considerada praticamente uniforme ( $Biot \leq 0,1$ ).

O modelo difusivo tem sido largamente usado na literatura para estimativa do coeficiente de difusão médio de umidade de vários materiais alimentícios (ROVEDO, 1995). A difusividade efetiva variável de umidade pode ser determinada utilizando-se o método das tangentes, segundo VAGENAS & KARATHANOS (1993), para o cálculo deste parâmetro, a partir das curvas de secagem.

Quando se considera a difusividade efetiva de umidade constante, na Equação 1, a solução para o perfil local de umidade do material é dada segundo CRANK (1975) pela Equação 2.

$$Y = \frac{4}{\pi^2} \sum_0^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \exp\left[-\left(n + \frac{1}{2}\right)^2 \pi^2 \frac{\bar{D}_{EF} t}{4L_0^2}\right] \cos\left[\left(n + \frac{1}{2}\right)\pi \frac{z}{L_0}\right] \quad (2)$$

Onde:

$$Y = \frac{X - X_E}{X_C - X_E}$$

A solução, considerando a média no volume, para o perfil médio de umidade e difusividade efetiva de umidade constante, segundo CRANK (1975) é dado pela Equação 3.

$$\left(\frac{\bar{X} - X_E}{X_C - X_E}\right) = \left(\frac{8}{\pi^2}\right) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-(2n+1)^2 \pi^2 \frac{\bar{D}_{EF} t}{4L_0^2}\right] \quad (3)$$

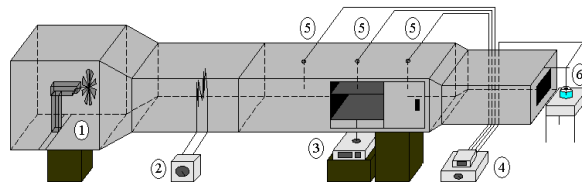
### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Matéria Prima

A matéria-prima utilizada foi quitosana úmida, obtida no Laboratório de Operações Unitárias/DQ/FURG, segundo SOARES *et al.* (2003).

#### 3.2 Equipamentos Utilizados

Para o estudo da secagem de quitosana foi utilizado secador de bandejas, conforme o esquema mostrado na Figura 1. O secador possui 1,8m de comprimento, 0,25m de altura e 0,20m de largura.



1- Ventilador 2- Controlador de temperatura; 3- Balança eletrônica; 4- Milivoltímetro com termopares acoplados; 5- Termopares de bulbo seco e 6- Termopar de bulbo úmido.

Figura 1: Esquema do secador descontínuo de bandejas com escoamento paralelo de ar utilizado.

#### 3.3 Procedimento Experimental

##### 3.3.1 Metodologia analítica

Determinou-se a composição química centesimal da quitosana úmida, através dos métodos analíticos de N-total, cinzas e umidade segundo as normas oficiais da A.O.A.C (1995).

##### 3.3.2 Secagem em camada delgada

As amostras foram preparadas a partir da quitosana úmida. Em seguida este material foi colocado em duas bandejas de aço inoxidável, com dimensões de 12cm de largura e 14cm de comprimento (secagem por apenas um lado), sendo estas

pesadas antes e depois de cheias e acondicionadas dentro do secador. As camadas das amostras tinham espessuras de  $5,0 \pm 0,1$  mm, para garantir a condição de camada delgada. A temperatura do ar de secagem foi de  $80 \pm 1$  °C, e a umidade absoluta  $0,016 \pm 0,001$  kg<sub>água</sub>/ kg<sub>ar seco</sub>. As amostras foram secas até peso constante, para a determinação da umidade de equilíbrio dinâmico. Foram realizadas réplicas das corridas para maior confiabilidade dos resultados.

As medidas de massa e temperaturas foram realizadas a cada 5 minutos para verificar sua dependência em função do tempo. As determinações de massa foram feitas na bandeja que estava adaptada a uma balança eletrônica (Figura 1). Foi utilizada uma outra bandeja para a medida de temperatura do interior da amostra à qual possuía um termopar inserido no interior da mesma.

As temperaturas foram obtidas com o uso de termopares (cobre – constantan), acoplados a um milivoltímetro com precisão de 1,0°C. Foram medidas as temperaturas de bulbo seco, antes e depois das bandejas, e de bulbo úmido, na saída do secador, para se verificar as condições de ar constante durante a secagem. Além de ser medida a temperatura no interior da amostra.

A umidade relativa do ar ambiente foi determinada com um termohigrômetro COLE PARMER, modelo 3310-00, com precisão de 0,1%. A velocidade do ar foi de que 1,5m/s, medida com um anemômetro, com precisão de 0,1m/s.

A determinação das massas das amostras foi por meio de balança eletrônica com precisão de 0,01g, adaptada ao secador. As dimensões das amostras foram medidas com uso de um paquímetro digital MITUTOYO, modelo CD-6 CS.

### **3.4 Procedimento de Cálculo**

#### **3.4.1 Caracterização da secagem em camada delgada**

Os períodos da operação de secagem foram analisados através das curvas do adimensional de umidade do material ( $\bar{X}/X_0$ ) em função do tempo de

secagem ( $t$ ), da taxa de secagem ( $N$ ) em função da umidade do material ( $\bar{X}$ ) e da temperatura do material ( $T_s$ ) em função do tempo de secagem ( $t$ ).

### 3.4.2 Modelagem da Secagem

A Equação 4 apresenta o modelo difusivo, apresentado na Equação 1, na forma adimensionalizada,.

$$\frac{\partial X^*}{\partial t} = \frac{1}{L_0^2} \frac{\partial}{\partial z^*} \left[ D_{EF}(X^*, T_s) \frac{\partial X^*}{\partial z^*} \right] \quad (4)$$

onde:

$$z^* = \left( \frac{z}{L_0} \right) \quad X^* = \left( \frac{X}{X_C} \right)$$

$z^*$  é a espessura adimensional e  $X^*$  é o adimensional de umidade, para o período de taxa decrescente, sendo  $X_C$  umidade crítica, em base seca.

A Equação 4, foi discretizada na posição utilizando o método de diferenças finitas. A Equação 5 apresenta o modelo adimensionalizado na forma discretizada.

$$\frac{dX^*}{dt} = \frac{1}{L_0^2} \left[ \begin{aligned} &(a_2 + a_4 T_s) \left( \frac{X_{i+1}^* - X_{i-1}^*}{2\Delta z^*} \right)^2 + (a_1 + a_2 X_i^* + \\ &+ a_3 T_s + a_4 X_i^* T_s) \left( \frac{X_{i+1}^* - 2X_i^* + X_{i-1}^*}{(\Delta z^*)^2} \right) \end{aligned} \right] \quad (5)$$

$$\text{Condição Inicial: } t=0; 0 \leq z^* \leq 1 \quad X_i^* = 1 \quad (5a)$$

Condição de Contorno 1:  $p/i = 1; t > 0$

$$\Rightarrow \left. \frac{\partial X^*}{\partial z^*} \right|_{z^*=0} = 0 \Rightarrow X_{i+1}^* = X_{i-1}^* \quad (5b)$$

$$\frac{dX^*}{dt} = \frac{2}{L_0^2} \left[ (a_1 + a_2 X_i^* + a_3 T_s + a_4 X_i^* T_s) \left( \frac{X_{i+1}^* - X_i^*}{(\Delta z^*)^2} \right) \right]$$

Condição de Contorno 2:  $p/i = n; z^* = 1$

$$X_n^* = \frac{X_E}{X_C} \quad (5c)$$

onde,  $n$  é o número de pontos considerados na dimensão  $z^*$ .

Foi utilizado o método das tangentes (VAGENAS & KARATANOS, 1993) para encontrar os valores de difusividade efetiva de umidade, para o período de taxa decrescente, como apresentado na Equação 6.

$$D_{EF} = \left[ \frac{\left( \frac{dY}{dt} \right)_{exp}}{\left( \frac{dY}{dFo} \right)_{Teo}} \right] L_0^2 \quad (6)$$

onde  $(dY/dt)_{exp}$  é calculado a partir da derivação numérica das curvas experimentais do adimensional de água livre  $[(\bar{X} - X_E)/(X_C - X_E)]$  em função do tempo de secagem, e  $(dY/dFo)_{Teo}$  a partir dos valores apresentados por KEEY (1972), que considera a resistência externa a transferência de massa desprezível e o parâmetro de transporte constante.

Os valores da difusividade efetiva calculados pela Equação 6, para o período de taxa decrescente, foram correlacionados de forma empírica com o adimensional de umidade e a temperatura do material, considerando os efeitos principais e a interação de primeira ordem destes fatores, como apresentado na Equação 7.

$$D_{EF}(X^*, T_S) = a_1 + a_2 X^* + a_3 T_S + a_4 X^* T_S \quad (7)$$

Para a solução da Equação 5 foi aplicado o método Runge-Kutta de quarta ordem de passo variável, para obtenção do perfil local. Utilizou-se o método de integração de Simpson para obtenção do perfil médio de umidade, segundo apresentado na Equação 8. Os algoritmos utilizados foram desenvolvidos em linguagem Fortran Visual Workbench v1.00.

$$\bar{X}^*(t) = \int_0^{1,0} X^* dz^* \quad (8)$$

Os valores da solução do modelo obtidos para o perfil médio de umidade na forma adimensionalizada, durante o período de taxa decrescente, em função do tempo, foram comparados com os valores experimentais da secagem e com os valores obtidos pela solução do modelo com difusividade efetiva constante, apresentado na Equação 3.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizadas as análises de composição centesimal para caracterização da quitosana antes da secagem. Esta está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Caracterização da quitosana úmida em base úmida.

Umidade (%)	Cinzas (%)	N-quitosana (%)
86,0 ± 1,0	0,07 ± 0,01	13,0 ± 1,0

### 4.1.1 Caracterização da secagem em camada delgada

As amostras apresentaram um teor de umidade inicial ( $X_0$ ) de 7,51 (b.s.). Analisando os dados das curvas de secagem, do adimensional de umidade ( $\bar{X}/X_0$ ) em função do tempo (Figura 2), obtida para a quitosana, a 80°C e 5mm, pode-se observar a existência de dois períodos de secagem, o período de taxa constante e o de taxa decrescente.

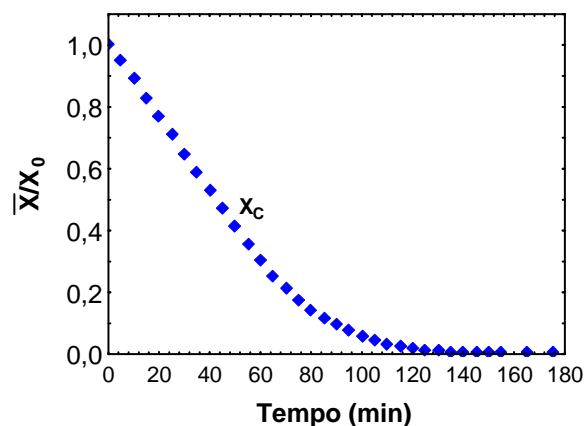


Figura 2: Curva de secagem de quitosana a 80°C e 5m m.

A umidade crítica ( $X_c=3,09\pm 0,40$  b.s.) apresentado na Figura 2, é o teor de umidade ao final do período de taxa constante, em um tempo de 50 min. Neste estado, o movimento do líquido para a superfície do sólido torna-se insuficiente para substituir o líquido que está sendo evaporado.

A Figura 3 apresenta a taxa de secagem ( $N$ ) em função do teor de umidade em base seca ( $\bar{X}$ ), onde confirma-se a existência de dois períodos de secagem distintos: a taxa constante e a taxa decrescente.

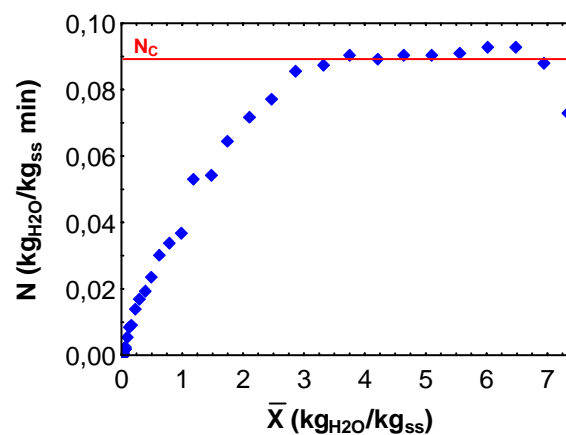


Figura 3: Taxa de secagem em função da umidade de quitosana, 80°C e 5mm.

Na Figura 4, do adimensional de umidade ( $\bar{X}/X_0$ ) em função do tempo em escala semilog, observa-se que o período de taxa decrescente dividiu-se em duas fases diferentes. A segunda fase começa a partir da umidade de transição do sólido ( $X_{\text{TRANS}}$ ), o valor desta ficou em torno de 0,066 (b.s.) no tempo de 135 min. O valor da umidade de equilíbrio ( $X_E$ ) ficou em torno de 0,01(b.s).

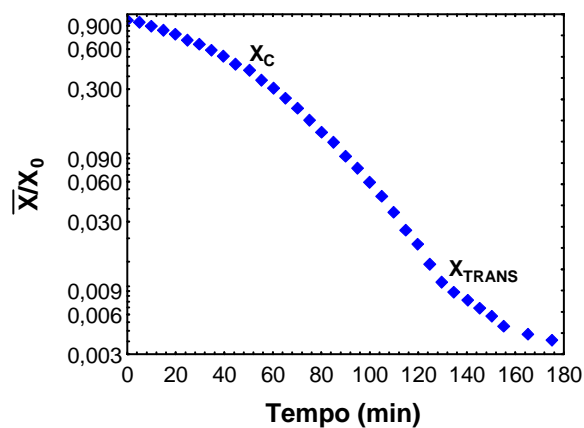


Figura 4: Curva de secagem de quitosana a 80°C e 5m m, em escala semilog.

O valor da umidade de transição foi na faixa da umidade comercial da quitosana (6,0 a 8,0% b.u.). Assim, verifica-se que a secagem deste material, para alcançar a umidade comercial, ocorreu apenas no período de taxa constante e na primeira fase do período de taxa decrescente.

Os valores de temperatura do sólido durante o experimento estão apresentados na Figura 5.

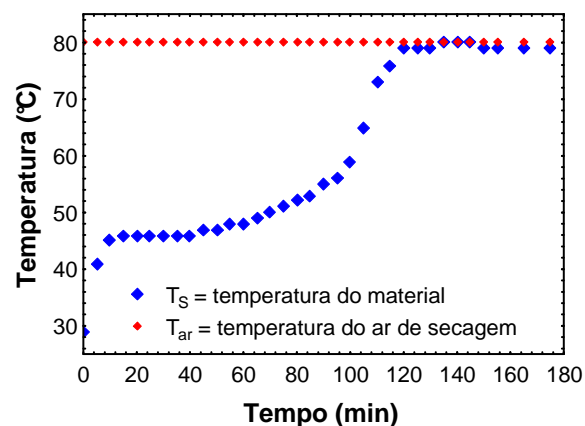


Figura 5: Temperaturas da amostra e do ar em função do tempo de secagem.

A Figura 5 mostra que até o tempo em torno de 50min tem-se o período de taxa constante, pelo fato da temperatura do sólido permanecer constante. A transição entre o primeiro e o segundo períodos da taxa decrescente ocorreu ao redor de 130min, onde os valores para a temperatura do material foram praticamente os da temperatura do ar de secagem.

Foi feito um ajuste empírico dos dados experimentais de temperatura da amostra em função do tempo, para o período de taxa decrescente, segundo a Equação 9.

$$T_s = \frac{(b_1 - b_2)}{b_3(t + b_4) + e^{\frac{(t - b_5)}{b_6}}} + b_2 \quad (9)$$

Os valores dos coeficientes desta equação estão na Tabela 2 e apresentaram um coeficiente de correlação de 0,999.



Tabela 2: Valores dos parâmetros utilizados para o ajuste dos dados experimentais da temperatura em função do tempo.

$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$
297,94	352,35	0,01	148,02	52,98	4,16

#### 4.1.2 Modelagem da Secagem

A Figura 6 apresenta os valores de difusividade efetiva, calculados pelo método das tangentes (Equação 6), em função da umidade adimensional, para o período de taxa decrescente.

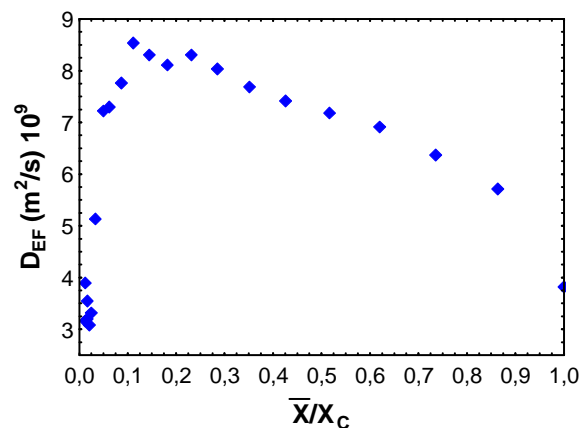


Figura 6: Difusividade efetiva em função do adimensional de umidade, para o período de taxa decrescente.

A difusividade efetiva de umidade inicialmente aumenta com o decréscimo do adimensional de umidade até um valor de 0,11(b.s.), tendo uma pequena queda até o valor de 0,03(b.s.), onde após começa o segundo período de taxa decrescente caracterizado por uma queda brusca no valor da difusividade efetiva. Este comportamento é similar ao apresentado por SARAVACOS *et al.* (1989) VAGENAS & KARATHANOS (1993), para Hylon 7.

Os valores de difusividade efetiva, para o período de taxa decrescente foram correlacionados com os valores de adimensional de umidade ( $X^*$ ) e da temperatura do material ( $T_s$ ), através da Equação 7, com uma correlação de 0,96. Onde os coeficientes desta estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros de ajuste dos dados experimentais da difusividade efetiva em função da temperatura e da umidade adimensional.

	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
Valor	$8,56 \cdot 10^{-7}$	$-5,86 \cdot 10^{-5}$	$-2,10 \cdot 10^{-9}$	$1,83 \cdot 10^{-7}$
Desvio Padrão	$5,98 \cdot 10^{-7}$	$5,74 \cdot 10^{-6}$	$1,67 \cdot 10^{-9}$	$1,81 \cdot 10^{-8}$
Teste-t	1,43	-10,22	-1,26	10,13
Nível de Significância	0,17	$2,20 \cdot 10^{-9}$	0,22	$2,55 \cdot 10^{-9}$

O perfil local de umidade na forma adimensionalizada, obtido através da solução da equação 5 para o modelo com difusividade efetiva variável está apresentado na Figura 7, em função da posição na interior do material. Observa-se que com o passar do tempo de secagem a dependência da umidade com a espessura do material diminui de forma não linear, até alcançar um valor constante em toda a espessura no fim da secagem, representado pela umidade de equilíbrio ( $X_E$ ).

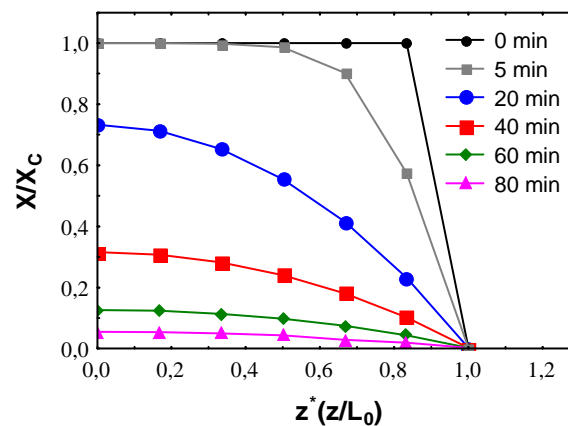


Figura 7: Perfil local de umidade adimensional em função da espessura adimensional do material.

Os valores do perfil médio do adimensional de umidade, para o período de taxa decrescente, obtidos pelos modelos com difusividade efetiva de umidade constante e variável em função do tempo, juntamente com os valores experimentais estão apresentados na Figura 8.

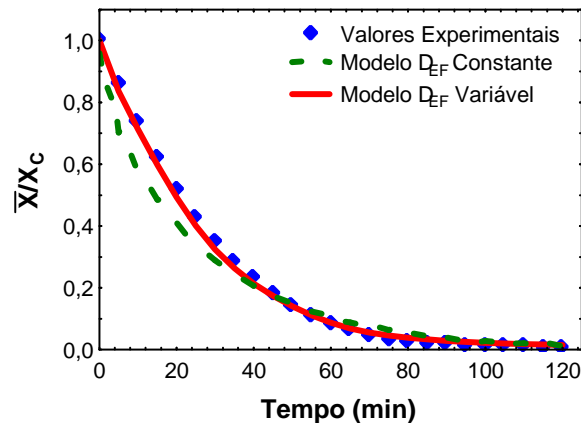


Figura 8: Perfil médio de umidade adimensional em função do tempo: valores experimentais e modelo com difusividade efetiva constante e variável.

Os valores, do perfil médio do adimensional de umidade, para o período de taxa decrescente, utilizando o modelo com difusividade efetiva constante foram obtidos pela Equação 3, utilizando quatro termos da série, pois segundo Pinto *et al.* (1992) a partir deste não apresenta mais diferença significativa no resultado. Onde o valor da difusividade efetiva constante ( $\bar{D}_{EF}$ ), foi obtido através da média dos valores da difusividade variável, apresentados na Figura 6.

Observa-se a partir da Figura 8 que o modelo difusivo com difusividade efetiva variável apresentou melhor concordância com os valores experimentais do adimensional de umidade em função do tempo, para o período de taxa decrescente, em relação ao modelo com difusividade efetiva constante, por considerar a variação deste parâmetro de transporte durante a secagem.

## 5 CONCLUSÃO

Observando os resultados obtidos nas condições utilizadas neste trabalho sobre a secagem de quitosana em camada delgada, pode-se constatar a existência do período de taxa constante e do primeiro período de taxa decrescente, para alcançar a umidade comercial do produto final (6,0 a 8,0% b.u.).

O mecanismo controlador de migração de umidade durante a secagem, para o período de taxa decrescente, pode ser representado pela boa concordância do modelo difusivo utilizando difusividade efetiva variável, com os dados experimentais.

## 6 NOMENCLATURA

$a_1, a_2, a_3$ e $a_4$	Parâmetros de ajuste para equação (5)	(adimensional)
$b_1, b_2, b_3$ e $b_4$	Parâmetros de ajuste para equação (8)	(adimensional)
$\bar{D}_{EF}$	Difusividade efetiva média de umidade	(m <sup>2</sup> /s)
$D_{EF}$	Difusividade efetiva variável de umidade	(m <sup>2</sup> /s)
$Fo$	Número de Fourier $Fo = \left( \frac{D_{EF} t}{L^2} \right)$	(adimensional)
$L_0$	Espessura da amostra	(m)
$N$	Taxa de secagem	(kg <sub>água</sub> /kg <sub>ss</sub> min)
$t$	Tempo	(s)
$T_{ar}$	Temperatura do ar	(°C)
$T_s$	Temperatura do material	(°C)
$v_{ar}$	Velocidade do ar	(m/s)
$X$	Teor de umidade	(kg <sub>água</sub> / kg <sub>ss</sub> )
$X^*$	Teor de umidade adimensional	(Adimensional)
$\bar{X}$	Teor médio de umidade da amostra	(kg <sub>água</sub> / kg <sub>ss</sub> )
$X_C$	Teor de umidade crítica	(kg <sub>água</sub> / kg <sub>ss</sub> )
$X_0$	Teor de umidade inicial	(kg <sub>água</sub> / kg <sub>ss</sub> )
$X_E$	Teor de umidade de equilíbrio	(kg <sub>água</sub> / kg <sub>ss</sub> )
$X_{TRANS}$	Teor de umidade na transição	(kg <sub>água</sub> / kg <sub>ss</sub> )
$z$	Dimensão característica	(m)
$z^*$	Dimensão característica adimensionalizada	(adimensional)
$Y$	Adimensional de água livre, $Y = \left( \frac{\bar{X} - X_E}{X_0 - X_E} \right)$	[adimensional]

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUERRE, R. J.; GABITTO, J. F. & CHIRIFE, J. **Utilization of Fick's second law for the evaluation of diffusion coefficients in food process controlled by internal diffusion.** Journal of Food Technology, v. 20, p. 623-629, 1985.

- Association of Official Analytical Chemists (A.O.A.C), **Official methods of analysis**, ed.14, v. 1, 1995.
- CHIRIFE, J. **Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods**. In: MUJUMDAR, Arum S (ed). *Advances in Drying*. Washington Hemisphere Publishing Corporation, v.1, p. 73-102, 1983.
- CIHAN, A.; ECE, M.C., **Liquid diffusion model for intermittent drying of rough rice**, *Journal of Food Engineering*, v. 49, 327-331, 2001.
- CRANK, J. **The mathematics of diffusion**, Great Britain, 2ed., p.414. Clarendon Press – Oxford, 1975.
- CRAVEIRO, A. A.; CRAVEIRO A. C. & QUEIROZ, D. C. **Quitosana a fibra do futuro**, Parque de Desenvolvimento Tecnológico – PADETEC, Fortaleza – CE, 1999.
- IBANOGLU, S.; MASKAN, M. **Effect of cooking on the drying behaviour of tarhana dough, a wheat flour-yoghurt mixture**, *Journal of Food Engineering*, v. 54, 119-123, 2002.
- IGBEKA, J.C. **Simulation of moisture movement during drying a starch food products – cassava**. *Journal of Food Technology*. v. 17, 27-36, 1982.
- KEEY, R. B. **Drying: principles and practice**. International Series of Monographs in Chemical Engineering. Pergamon Press, v.13, 1972.
- RAMESH, M.N.; WOLF, W.; TEVINI, D. & JUNG, G. **Influence of processing on the drying of spice paprika**. *Journal of Food Engineering*, v. 49, p. 63-72, 2001.
- ROVEDO, C. O.; SUAREZ, C. & VIOLLAZ, P. E. **Drying of foods: Evaluation of a drying model**, *Journal of Food Engineering*, v. 26, p. 1-12, 1995.
- SARAVACOS, G.; DROUZAS, A.; MAROUSIS, S. & KOSTAROPOULOS, A. **Effective thermal and moisture diffusivities of granular starches**”, In: MUJUMDAR, A. and ROQUES, M.A. *Drying'89*. New York, ed. Hemisphere Publishing Company, 1989.
- SARSAVADIA, P. N.; SAWHNEY, R. L.; PANGAVHANE, D. R. & SINGH, S. P. **Drying behaviour of brined onion slices**. *Journal of Food Engineering*, v. 40, p. 219-226, 1999.
- SHAHIDI, F., *et al*, **Food applications of chitin and chitosans**, *Trends in Food Science & Tecnlogy*, v. 10, p. 37, 1999.

- SIMAL, S.; DEYÁ, E., FRAU, M. & ROSSELÓ, C. **Simple modelling of air drying curves of fresh and osmotically pre-dehydrated apple cubes.** Journal of Food Engineering, v. 33, p. 139-150, 1999.
- SOARES, N. M., *et al*, **Obtenção e purificação de quitosana a partir de resíduos de camarão em escala piloto,** Revista UniVap, v.10, nº18, p. 88-92, 2003.
- TEIXEIRA M. & TOBINAGA, S. **A diffusion model for describing water transport in round squid mantle during drying with a moisture-dependent effective diffusivity,** Journal of Food Engineering, v. 36, p. 169-181, 1998.
- VAGENAS, G. K. & KARATHANOS, V. T. **Prediction of the effective moisture diffusivity in gelatinized food systems.** Journal of Food Engineering. v. 18, p.159-179, 1993.
- WAANANEM, K. M. **Effect of porosity on moisture diffusion during drying of pasta.** Journal of Food Engineering, v. 28, p. 121-137, 1996.
- YUSHENG, Z. & POULSEN, K. P. **Diffusion in potato drying.** Journal of Food Engineering, v. 7, p. 249-262, 1988.

## **ARTIGO 2: SECAGEM EM CAMADA DELGADA DE QUITOSANA PURIFICADA: ESTUDO DA OPERAÇÃO ATRAVÉS DO USO DA METODOLOGIA DA SUPERFÍCIE DE RESPOSTA**

### **RESUMO**

A quitosana é obtida através da quitina que é um polímero natural, constituinte de uma variedade de animais marinhos, insetos e fungos. Tornam-se necessários processos de purificação da quitosana devido às características deste produto, e sua ampla aplicação. Uma das etapas importantes do processo de obtenção destes produtos é a operação de secagem. O objetivo deste trabalho foi o estudo da operação de secagem em camada delgada da quitosana purificada obtida a partir de resíduos de camarão. A matéria-prima utilizada foram cascas de camarão para a produção de quitina/quitosana, em escala piloto. A purificação da quitosana foi feita pelas etapas de dissolução, filtração, precipitação, neutralização e centrifugação. Os ensaios de secagem foram realizados em um secador de funcionamento descontínuo. Utilizou-se um Planejamento Central Composto, considerando como fatores de estudo a temperatura do ar e a espessura da amostra, obtendo-se como resposta a constante de secagem. Os valores da constante de secagem  $K$ , para todos experimentos, apresentaram correlações superiores a 98%. Utilizando a metodologia da superfície de resposta, foi observada a grande influência da espessura na constante de secagem, sendo a temperatura menos significativa. Sendo que, a melhor condição de secagem da quitosana purificada foi na temperatura de 60°C e na espessura de 3mm, por esta apresentar um maior valor da constante de secagem, não ocorrendo escurecimento do material. As difusividades efetivas obtidas, para as diferentes temperaturas, variaram de  $4,18 \times 10^{-9}$  e  $9,09 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s. Com estes valores experimentais da difusividade efetiva nas diferentes temperaturas encontrou-se uma energia de ativação de 22,5kJ/mol.

### **1 INTRODUÇÃO**

A quitosana, copolímero  $\beta$ -(1-4)-D-glucosamina, é um polissacarídeo derivado da quitina,  $\beta$ -(1-4)-N-acetil-D-glucosamina, que é encontrada em abundância na natureza, sendo o segundo mais importante biopolímero, após a celulose. A quitina pode ser encontrada em exoesqueletos de crustáceos, fungos e outros materiais biológicos (SHAHIDI, 1999).

O beneficiamento de camarão resulta em 35% de resíduos, constituídos basicamente de cascas e cabeças, sendo que a quitina representa cerca de 5 a 7% destes, o que justifica o aproveitamento dos resíduos de camarão, para produção de quitosana (CRAVEIRO,1999). A purificação da quitosana é feita utilizando sua capacidade policatiônica de dissolver-se em ácidos orgânicos diluídos (até pH aproximadamente 6,0) (ADUSUMILLI & BOLTON,1991).

As etapas de obtenção da quitina são as seguintes: desmineralização, desproteínização, desodorização e secagem. Para a produção de quitosana faz-se uma desacetilação alcalina rigorosa, que retira a molécula acetil da quitina transformando esta em quitosana, seguida de sua secagem (SOARES, 2003).

As etapas de secagem da quitina e da quitosana foram realizadas em um secador de bandejas por cerca de quatro horas a 80°C, onde a umidade alcançada fica na faixa de 5-6% (b.u.). Ressalta-se a importância desta operação na produção destes materiais, já que esta etapa garante que seja alcançada a umidade necessária para o armazenamento, sem que ocorra alteração do mesmo.

Conforme citado por CHIRIFE (1983), uma relação direta do teor de umidade do material e o tempo de secagem pode ser obtido através do uso de correlações empíricas. Na secagem de alimentos uma importante correlação é a lei exponencial (AJIBOLA, 1989; BALA & WOODS, 1992; VERSAVEL & MUIR, 1978). Essa lei assume que a taxa de secagem de alimentos é proporcional ao teor de água livre do alimento. Esta expressão é análoga a lei de resfriamento de Newton, se for levado em conta que toda a resistência ao transporte de umidade concentra-se no interior do material, desconsiderando os efeitos da camada limite; é por isso que é chamado de modelo semi-empírico. Geralmente é utilizada na forma integrada, como apresentado na Equação 1.

$$Y = \left( \frac{\bar{X} - X_E}{X_0 - X_E} \right) = \exp(-K t) \quad (1)$$

onde, Y é o adimensional de água livre e K é a constante de secagem.

O cálculo da difusividade efetiva de umidade é realizado pela analogia da Equação 1 com a solução da segunda lei de Fick, para o perfil médio de umidade, para lâmina infinita, considerando a difusividade efetiva e a espessura constantes, conforme apresentado na Equação 2.

$$D_{EF} = \frac{4K(L_0)^2}{\pi^2} \quad (2)$$



A relação entre os valores de  $D_{EF}$  e as temperaturas de secagem pode ser explicada usando uma equação do tipo Arrhenius (Equação 3):

$$D_{EF} = D_0 \exp\left(\frac{-E_A}{RT}\right) \quad (3)$$

onde,  $D_0$  é o coeficiente de difusão dado uma temperatura infinita ( $m^2/s$ ),  $E_a$  é a energia de ativação (kJ/mol),  $R$  é a constante universal dos gases (8.314J/kmol K), e  $T$  é a temperatura absoluta do sólido (K).

Energias de ativação são calculadas pelas tangentes das curvas plotadas com  $\ln(D_{EF})$  em função de  $1/T$ . Vários autores tem estudado a relação do tipo Arrhenius para a estimativa dos valores de difusividade efetiva, a diferentes temperaturas, ou ainda para a própria estimativa a energia de ativação quando se tem dados experimentais a diferentes temperaturas (ROVEDO, 1988; IBANOGLU, 2002; GASTÓN *et al.*, 2002;). A energia de ativação calculada para vários produtos alimentícios estão na faixa de 14,21-39,72 kJ/mol (CHIRIFE, 1983; PINTO & TOBINAGA, 1992).

O objetivo deste trabalho foi a definição das melhores condições para a secagem em camada delgada da quitosana purificada obtida, sendo o parâmetro de resposta a constante de secagem. Através dos valores de difusividade efetiva a diferentes temperaturas, calculou-se a energia de ativação necessária para a secagem deste produto.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Matéria Prima

A matéria prima utilizada para os experimentos de secagem foi quitosana purificada, obtida a partir de resíduos de camarão no Laboratório de Operações Unitárias/ DQ/ FURG, segundo SOARES (2003), conforme apresentado nas Figuras 1 e 2.

### 2.1.1 Produção de quitina e quitosana

Uma massa inicial de resíduos de camarão, após a limpeza, é colocada em um tanque com agitação, onde é adicionada uma solução ácida, tendo esta etapa por objetivo a redução do teor de cinzas da matéria prima. A etapa de desproteínização é feita com solução alcalina, sendo a principal função desta etapa a redução do teor protéico nos resíduos de camarão, obtendo-se assim a quitina úmida. A etapa de desodorização consiste na purificação desta, onde há uma redução do odor característico dos resíduos de camarão e sua despigmentação (clarificação). Após a etapa de desodorização a quitina é seca, até sua umidade comercial.

A quitina seca é colocada em um reator com aquecimento e agitação, projetado propriamente para a reação de conversão desta em quitosana, onde é colocada uma solução alcalina concentrada a elevada temperatura. A quitosana é seca nas mesmas condições da quitina, até sua umidade comercial de 6-8%.

A Figura 1 apresenta o diagrama de blocos do processo de produção da quitina e da quitosana.

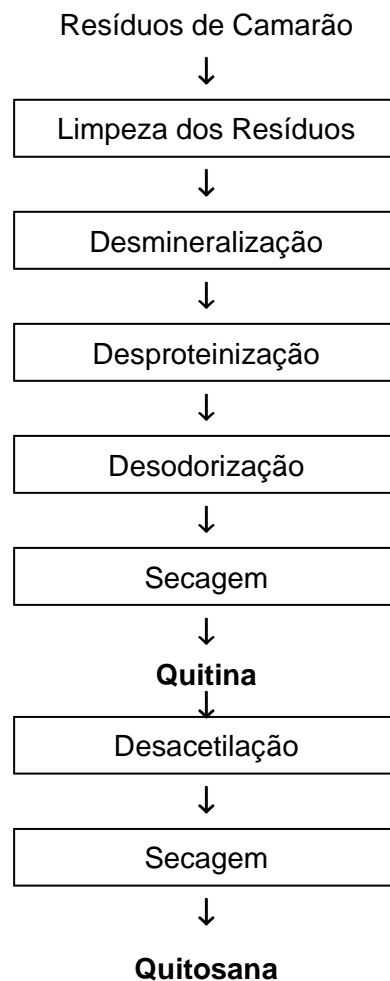


Figura 1: Diagrama de blocos do processo de produção de quitina e quitosana, SOARES (2003).

### 2.1.2 Purificação da Quitosana

Partindo-se da quitosana seca (6-8% umidade), prepara-se um sal com concentração de quitosana 1%, em uma solução de 1% de ácido acético, onde se obterá a quitosana dissolvida, já que esta possui solubilidade em ácidos orgânicos diluídos (até pH de aproximadamente 6,0). A solução é filtrada para que seja possível retirar o material que não foi dissolvido e se obter uma solução com menor quantidade de impurezas. A quitosana é precipitada em soluções alcalinas até pH de aproximadamente 12,5. Após é feita a neutralização com ácido até pH 7,0. A separação do sobrenadante é feita por centrifugação, onde assim se obtém a quitosana purificada úmida.

O processo de purificação é ilustrado pelo diagrama de blocos apresentado na Figura 2.

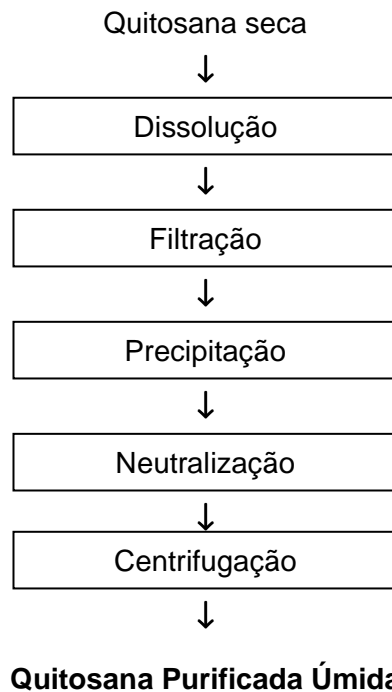


Figura 2: Diagrama de blocos para o processo de purificação da quitosana.

## 2.2 Procedimento experimental da Secagem

As amostras foram preparadas a partir da quitosana purificada. Em seguida o material foi colocado em bandejas de aço inoxidável com dimensões de 12cm de largura e 14cm de comprimento (secagem por apenas um lado), sendo estas pesadas antes e depois de cheias e acondicionadas dentro do secador. As camadas de amostras tinham espessuras determinadas pela matriz do planejamento experimental, variando de 3 a 17mm e a temperatura do ar de secagem variando de 46-74°C, segundo a Tabela 02.

As amostras foram secas até peso constante, para a determinação da umidade de equilíbrio dinâmico. Foram realizadas réplicas das corridas para maior confiabilidade dos resultados.

As medidas de massa e temperaturas foram realizadas a cada 5 minutos para verificar suas variações com o tempo. As determinações de massa foram feitas na bandeja à qual era adaptada a uma balança eletrônica, esta tinha uma precisão de 0,01g. As dimensões das amostras foram medidas com uso de um paquímetro.

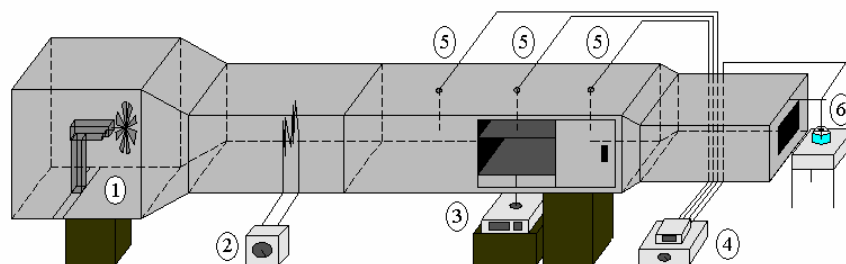
As temperaturas do ar de secagem foram obtidas com o uso de termopares (cobre – constantan), acoplados a um milivoltímetro com precisão de 1,0°C. Foram medidas as temperaturas de bulbo seco, antes e depois das bandejas, e de bulbo úmido, na saída do secador, para se verificar as condições de ar constante durante a secagem. A umidade relativa do ar ambiente foi determinada com um termohigrômetro COLE PARMER, modelo 3310-00, com precisão de 0,1%. A velocidade do ar foi de 1,5m/s, medida com um anemômetro, com precisão de 0,1m/s.

### 2.3 Equipamentos Utilizados

Para obtenção da quitina e da quitosana foram utilizados um tanque com agitação e um reator com aquecimento e agitação.

Para a purificação da quitosana foram necessários um tacho de aço inox com agitação e aquecimento com capacidade para 15 litros, um filtro de aço inox com fundo perfurado utilizando ar comprimido com  $4,01 \times 10^5 \text{ Pa}$  (Abs) e uma centrífuga de laboratório (5000rpm).

Para o estudo da secagem de quitosana foi utilizado secador de bandejas, conforme o esquema mostrado na Figura 3. O secador possui 1,8m de comprimento, 0,25m de altura e 0,20m de largura.



1- Ventilador 2- Controlador de temperatura; 3- Balança eletrônica; 4- Milivoltímetro com termopares acoplados; 5- Termopares de bulbo seco e 6- Termopar de bulbo úmido.

Figura 3: Esquema do secador descontínuo de bandejas com escoamento paralelo de ar.

## 2.4 Metodologia analítica

Determinou-se a composição química centesimal da quitina, quitosana e quitosana purificada, através dos métodos analíticos de N-total, cinzas e umidade, segundo as normas oficiais da A.O.A.C (1995).

Com os valores de N-Total faz-se algumas considerações, para que se possa obter os valores percentuais de proteína, quitina e quitosana presentes nas amostras. O fator de conversão utilizado para quantificar o nitrogênio nas diferentes estruturas foi de 6.25, 14 e 11 respectivamente.

## 2.5 Procedimento de Cálculo

Os períodos da operação de secagem foram analisados através das curvas de secagem do adimensional de umidade da amostras ( $\bar{X}/X_0$ ) em função do tempo de secagem.

O período de taxa constante foi determinado pela seção das curvas de secagem da umidade, onde a declividade se mantinha constante, enquanto que o período de taxa decrescente foi analisado observando as mesmas curvas, porém, em escala semi-log.

Com os valores do adimensional de água livre em função do tempo de secagem, para o primeiro período de taxa decrescente, com  $\bar{X}$  a partir de  $X_C$ , utilizou-se a Equação 4, que é análoga a Equação 1 ajustada a dois parâmetros. Fez-se a regressão usando o método Quasi-Newton do software STATISTICA FOR WINDOWS e obteve-se o valor de K.

$$Y = \left( \frac{\bar{X} - X_E}{X_C - X_E} \right) = A \exp(-K t) \quad (4)$$

A partir dos valores de K calculados, através da Equação 2, obteve-se a difusividade efetiva de umidade para os diferentes experimentos. Com os valores das difusividades foi calculada a energia de ativação, nas diferentes temperaturas, necessária para a secagem da quitosana, segundo a Equação 3.

## 2.6 Metodologia Estatística

Para analisar os efeitos da temperatura do ar de secagem (T) e da espessura das amostras (L), durante o período de taxa decrescente na secagem, foi utilizado um planejamento experimental fatorial composto central, obtendo como resposta um modelo estatístico de segunda ordem para a constante de secagem (K) (BOX *et al.*, 1978).

Os valores dos pontos centrais da temperatura do ar e da espessura do material utilizados para o planejamento experimental foram considerados com base na literatura. A temperatura do ar de secagem da quitosana de 60°C (SOARES *et al.*, 2003) e a espessura das amostras de 10mm para garantir o comportamento de camada delgada (PINTO & TOBINAGA, 1992). As variáveis e os níveis estudados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Valores das variáveis estudadas.

Variáveis codificadas	Níveis				
	-1,4142	-1	0	+1	+1,4142
T(°C)	46	50	60	70	74
L (mm)	3	5	10	15	17

As variáveis codificadas estudadas  $T_{cod}$  e  $L_{cod}$ , foram calculadas pelas Equações 5 e 6.

$$T_{cod} = (T - 60) / 10 \quad (5)$$

$$L_{cod} = (L - 10) / 5 \quad (6)$$

Os valores das variáveis codificadas estudadas aparecem na Tabela 1, onde os valores  $\pm 1,414$ , correspondem ao valor de  $\pm \sqrt{2}$ , para garantir a rotacionalidade do modelo (MYER, 1976 e NETO, 2002).

A equação da função resposta, (constante de secagem K), foi da forma polinomial, onde os termos da mesma estão constituídos pelas variáveis estudadas, por combinações entre elas, pelos coeficientes de cada termo, mais uma constante que corresponde à média dos valores, e está apresentado na Equação 7.

$$K = B + C. T_{\text{cod}} + D. L_{\text{cod}} + E. (T_{\text{cod}})^2 + F. (L_{\text{cod}})^2 + G. (T_{\text{cod}}.L_{\text{cod}}) \quad (7)$$

O procedimento experimental da otimização da secagem da quitosana purificada seguiu a matriz do planejamento experimental apresentada na Tabela 2.

Tabela 2: Matriz do planejamento experimental da secagem de quitosana para a resposta constante de secagem.

Experimento	$T_{\text{cod}}$	$L_{\text{cod}}$
1	0	0
2	-1	-1
3	1	-1
4	-1	1
5	1	1
6	0	0
7	-1,4142	0
8	1,4142	0
9	0	-1,4142
10	0	1,4142
11	0	0

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização dos materiais

Foram realizadas as análises de composição centesimal para caracterização da quitina, quitosana e quitosana purificada. Estes resultados são apresentados respectivamente nas Tabela 3.

Tabela 3: Composição proximal da quitina, quitosana e quitosana purificada.

Amostra (b.ú.)	Umidade (%)	Cinzas (%)	N-proteína (%)	N-quitina (%)	N-quitosana (%)
Quitina	88,0±1,0	1,2±0,2	4,5±1,0	6,3±0,8	-
Quitosana	86,0 ± 1,0	1,0 ± 0,1	-	-	13,0 ± 1,0
Quitosana Purificada	95,0 ± 1,0	traços	-	-	4,0 ± 1,0



### 3.2 Caracterização de Secagem em Camada Delgada

Na Figura 4, a qual representa o adimensional de umidade em função do tempo para o experimento 9, com temperatura de 60°C e 3mm, pode ser observado que o período de taxa constante representa a parte linear da curva, e ao final deste período se observa a umidade crítica ( $X_C$ ), estes valores obtidos nos experimentos estão apresentados na Tabela 5. Foi observada nas curvas de secagem, de todos os experimentos, a existência de dois períodos de distintos: a taxa constante e a taxa decrescente. A umidade crítica ( $X_C$ ) é o teor de umidade ao final do período de taxa constante.

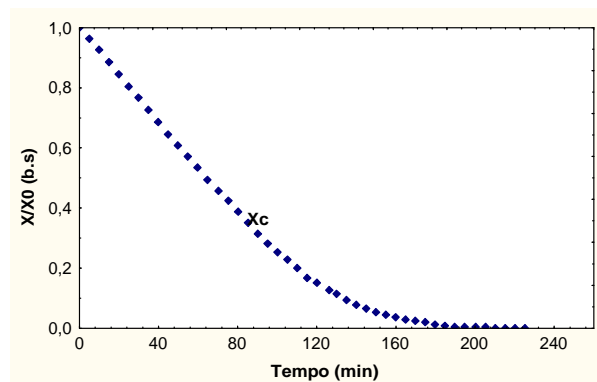


Figura 4: Adimensão de umidade em função do tempo de secagem de quitosana purificada, 60°C e 3mm.

No ponto de umidade crítica, o movimento do líquido para a superfície do sólido torna-se insuficiente para substituir o líquido que está sendo evaporado, os valores das umidades críticas obtidas nos experimentos estão apresentados na Tabela 4. Observa-se que apesar das diferentes temperaturas utilizadas os valores de  $X_C$  variaram na faixa de 4,45 a 6,93.

Tabela 4: Valores da caracterização da secagem dos experimentos realizados.

Experimento	$X_C$
1	5,3±0,2
2	4,9±0,2
3	6,7±0,5
4	5,1±0,1
5	6,7±0,1
6	6,0±0,2
7	4,4±0,5
8	6,9±0,3
9	6,5±0,7
10	6,0±0,1
11	5,9±0,3

A transição, no período de taxa decrescente, não foi observada em todos os experimentos, foi identificada apenas nos experimentos com espessuras menores e temperaturas do ar de secagem maiores.

Na Figura 5 observa-se, para o experimento 9, que o período de taxa decrescente dividiu-se em duas fases distintas. A segunda fase começou a partir da umidade de transição do sólido ( $X_{trans}$ ) de aproximadamente 0,10 (b.s.).

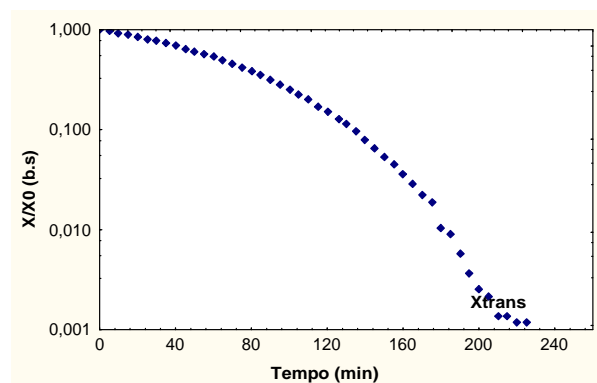


Figura 5: Adimensional de umidade em função do tempo para quitosana purificada à 60°C e 3mm, em escala semi-log.

Os valores da umidade de transição foram um pouco superiores ao valor da umidade comercial (6,0 a 8,0% b.u.). Assim, verifica-se que a secagem deste

material, para alcançar a umidade comercial, ocorreu praticamente no período de taxa constante e no primeiro período de taxa decrescente.

Os valores estabelecidos para a umidade de equilíbrio dinâmico ( $X_E$ ) variaram na faixa de 0,030 a 0,095 a medida em que a temperatura do ar de secagem diminuía.

Para estimativa da constante de secagem, do experimento 9, foram utilizados os dados da Figura 6, que representa o adimensional de água livre em função do tempo. Através da regressão dos dados, pelo método de estimação Quasi-Newton, utilizando a Equação 4.

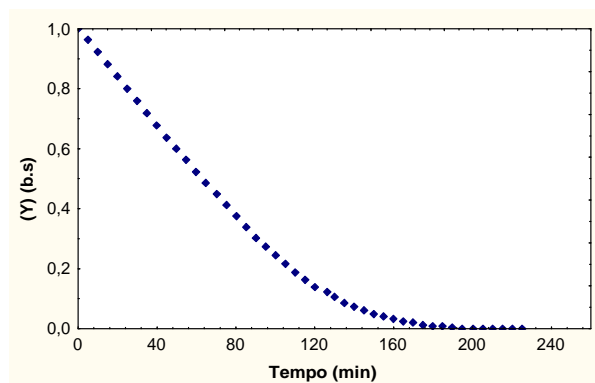


Figura 6: Adimensional de água livre em função do tempo, para quitosana purificada, 60°C e 3mm.

Os valores da constante de secagem, para os demais experimentos, foram calculados de maneira similar e estão apresentados na Tabela 5. O bom ajuste da Equação 4 aos dados experimentais foi verificado através do alto valor de correlação obtido, para os experimentos ( $R^2 > 0,98$ ).

Tabela 5: Matriz do planejamento experimental da secagem de quitosana para a resposta constante de secagem.

Experimento	T <sub>cod</sub>	L <sub>cod</sub>	K( min <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup> (%)
1	0	0	0,01089	99,2
2	-1	-1	0,01408	99,1
3	1	-1	0,02335	99,4
4	-1	1	0,00573	98,3
5	1	1	0,00774	99,3
6	0	0	0,00992	98,0
7	-1,4142	0	0,00620	99,4
8	1,4142	0	0,01346	99,2
9	0	-1,4142	0,02958	99,4
10	0	1,4142	0,00536	99,1
11	0	0	0,01036	99,2

Na Tabela 6 são apresentados os resultados da análise de variância, para resposta constante de secagem (K), da quitosana seca em camada delgada.

Tabela 6: Análise de variância dos dados de quitosana para a resposta constante de secagem.

Parâmetros	Quadrado médio	Teste F	Nível de significância
T	5,80x10 <sup>-5</sup>	18,66	0,0076
L	4,23x10 <sup>-4</sup>	136,18	0,0001
T <sup>2</sup>	1,47x10 <sup>-6</sup>	0,47	0,5216
T*L	1,31x10 <sup>-5</sup>	4,24	0,0947
L <sup>2</sup>	6,18x10 <sup>-5</sup>	19,88	0,0067
Erro	3,11x10 <sup>-5</sup>	-	-

R<sup>2</sup> = 97,34%

Observa-se na Tabela 6, que a influência quadrática da temperatura não foi significativa na análise, por isso foi desconsiderada. Realizou-se uma nova análise estatística, sendo o quadro de Anova apresentado Tabela 7.

Tabela 7: Análise de variância dos dados de quitosana para a resposta constante de secagem, desconsiderando o efeito quadrático da temperatura.

Parâmetros	Quadrado médio	Teste F	Nível de significância
T	$5,80 \times 10^{-5}$	20,45	0,0040
L	$4,23 \times 10^{-4}$	149,25	0,0001
T*L	$1,31 \times 10^{-5}$	4,64	0,0746
L <sup>2</sup>	$7,39 \times 10^{-5}$	26,06	0,0022
Erro	$1,70 \times 10^{-5}$	-	-

$R^2 = 97,1\%$

A Figura 7 apresenta o gráfico de pareto, onde no eixo vertical estão os efeitos e suas interações e no eixo horizontal os valores dos efeitos padronizados. A linha vertical do gráfico de pareto representa a significância ao nível de 95%. Pode-se observar que o efeito principal espessura foi o fator que mais influenciou na constante de secagem, seguido pelo efeito do quadrado da espessura e pelo efeito principal da temperatura.

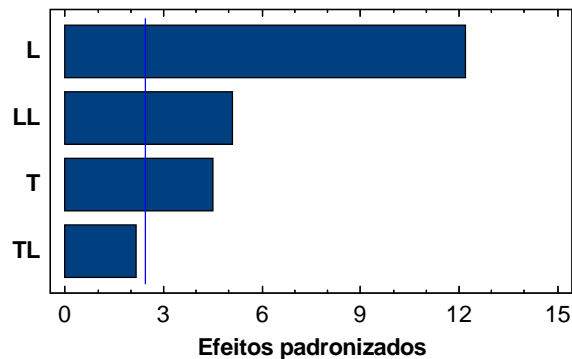


Figura 7: Gráfico pareto para constante de secagem.

Na Figura 8, estão representados os efeitos principais dos fatores de estudo, mostrando que a espessura influencia a constante de secagem de forma inversa, ou seja, quando se aumenta a espessura diminui-se a constante de secagem. Já a temperatura tem o efeito contrário, porém com menor influência. Pode-se dizer que a influência da temperatura foi praticamente linear, e da espessura foi em sua maior parte linear.

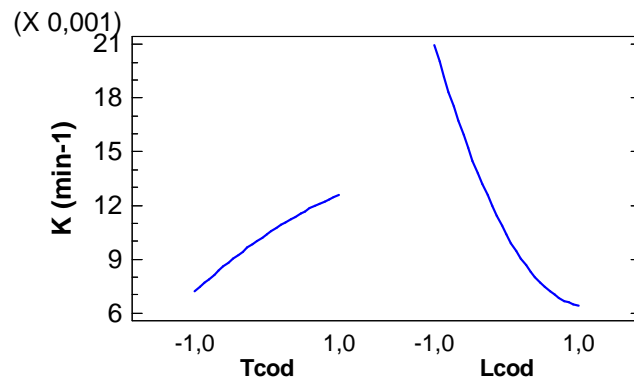


Figura 8: Gráfico dos efeitos principais para constante de secagem.

A Tabela 8 apresenta os coeficientes da equação 4, para a resposta constante de secagem, da quitosana purificada seca em camada delgada.

Tabela 8: Coeficientes da Equação para a resposta constante de secagem.

Coeficiente	Coeficiente
Média	0,00991
T	0,00269
L	-0,00727
T*L	-0,00181
L <sup>2</sup>	0,00346

O bom ajuste deste modelo foi observado pelo valor do coeficiente de correlação ( $R^2=97,1\%$ ), O modelo é dado pela Equação 8, com os valores dos coeficientes apresentados na Tabela 8.

$$K=0,00991+0,00269*T_{cod}-0,00727*L_{cod}+0,00346 (L_{cod})^2-0,00181 (T_{cod}\cdot L_{cod}) \quad (8)$$

Na Figura 9, está representada a curva da superfície de resposta para resposta constante de secagem.

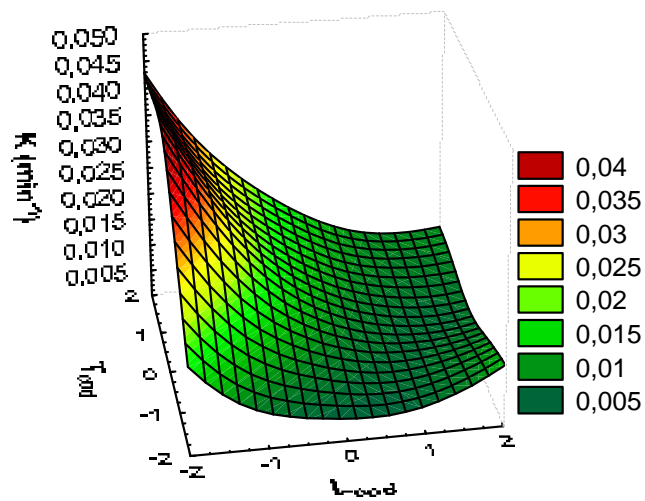


Figura 9: Superfície de resposta para constante de secagem (K).

Observando os resultados da Figura 9, tem-se que o fator que mais influencia a constante de secagem é espessura. O maior valor da constante de secagem é na faixa de menor espessura codificada (3mm) e no valor na temperatura do ponto central (60°C), sem ocorrer a caramelização do produto obtido.

Na Figura 10 é apresentado o gráfico da distribuição de resíduos, onde no eixo vertical estão apresentados os valores residuais e no eixo horizontal a ordem dos experimentos realizados. Foi observada a distribuição aleatória dos resíduos, verificando a validade da análise realizada.

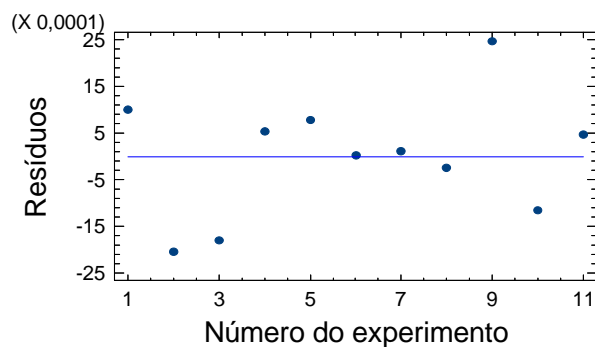


Figura 10: Distribuição dos resíduos.

### 3.3 Energia de Ativação

Utilizando a equação 3, com os valores da constante de secagem apresentados na Tabela 9, obteve-se os valores das difusividades efetivas de umidade. Destes foram feitas as médias para as difusividades nas diferentes temperaturas estudadas, estas estão apresentados na Tabela 9:

Tabela 9: Valores médios de difusividade efetiva para as diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	Difusividade efetiva (m <sup>2</sup> /s)
46	4,18X10 <sup>-9</sup>
50	5,50 X10 <sup>-9</sup>
60	6,68 X10 <sup>-9</sup>
70	7,87 X10 <sup>-9</sup>
74	9,09 X10 <sup>-9</sup>

Aplicando logaritmo neperiano na equação 3, obtêm-se a equação 9. Com os valores de  $\ln(D_{EF})$  e o inverso da T (K), fez-se uma regressão para a estimativa dos valores de  $\ln(D_0)$  e  $E_a$ , esta está apresentada na Figura 11.

$$\ln(D_{EF}) = \ln(D_0) + \frac{E_a}{RT} \quad (9)$$

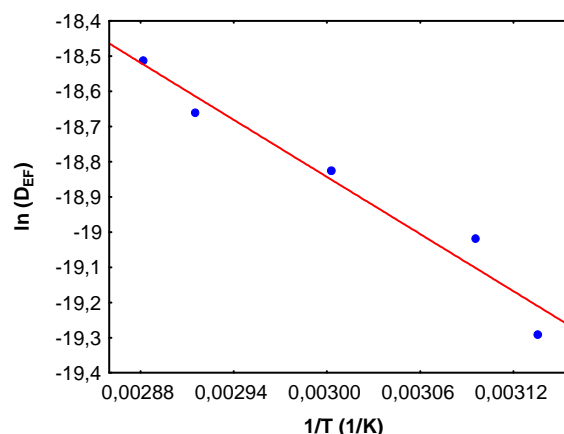


Figura 11: Gráfico do  $\ln(D_{EF})$  em função de  $1/T$ .

onde  $D_0$ , que é o coeficiente de difusão para temperatura infinito, foi de  $3,45 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  e a Energia de ativação para a secagem da quitosana purificada foi de  $22,5 \text{ kJ/mol}$ , ficando dentro da faixa apresentada por CHIRIFE (1983).



## 4 CONCLUSÕES

Foi observada a existência do período de taxa constante em todos os experimentos, sendo que a secagem ocorreu principalmente na primeira fase de taxa decrescente de secagem para alcançar a umidade comercial da quitosana.

Os valores da constante de secagem  $K$  ajustados pela lei exponencial para todos os experimentos, apresentaram correlações superiores a 98%.

Utilizando a metodologia da superfície de resposta, foi observada uma grande influência da espessura na constante de secagem, sendo a temperatura menos significativa. Através de análise de regressão não linear dos resultados obtidos dos experimentos para a constante de secagem, foi estabelecido um modelo estatístico de segunda ordem com interação, apresentando coeficiente de correlação ( $R^2$ ) de 97,34%. A melhor condição de secagem foi na temperatura do ar de 60°C e espessura da bandeja de 3mm, por apresentar um maior valor de constante de secagem.

Com os valores calculados da difusividade efetiva média em diferentes temperaturas, obteve-se um valor de energia de ativação de 22,5kJ/mol, estando dentro da faixa de energia de ativação para produtos alimentícios.

## 5 NOMENCLATURA

A	Constante da Equação 4	(adimensional)
B, C, D, E, F, G	Constantes da Equação 7	(adimensional)
$D_0$	Difusividade efetiva média de umidade para temperatura infinita	(m <sup>2</sup> /s)
$D_{EF}$	Difusividade efetiva média de umidade	(m <sup>2</sup> /s)
$E_A$	Energia de ativação	(kJ/mol)
$K$	Constante de secagem	(m)
$L$	Espessura da bandeja	(mm)
$L_0$	Espessura inicial da amostra	(mm)

$L_{\text{COD}}$	Espessura codificada	(adimensional)
$R$	Constante ideal dos gases	(J/kmol*K)
$t$	Tempo	(min)
$T$	Temperatura do ar de secagem	(°C ou K)
$T_{\text{COD}}$	Temperatura codificada	(adimensional)
$\bar{X}$	Teor médio de umidade da amostra	(kg <sub>água</sub> / kg <sub>SS</sub> )
$X_{\text{C}}$	Teor de umidade crítica	(kg <sub>água</sub> / kg <sub>SS</sub> )
$X_0$	Teor de umidade inicial da amostra	(kg <sub>água</sub> / kg <sub>SS</sub> )
$X_{\text{E}}$	Teor de umidade de equilíbrio	(kg <sub>água</sub> / kg <sub>SS</sub> )
$X_{\text{TRANS}}$	Teor de umidade na transição	(kg <sub>água</sub> / kg <sub>SS</sub> )
$Y$	Adimensional de água livre	[adimensional]

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADUSUMILLI, P. S. & BOLTON, S. M. **Evaluation of chitosan citrate complexes as matrices for controlled release formulations using a 3<sup>2</sup> full factorial design.** Drug Dev. Ind. Pharm. 17, p. 1931-1945, 1991.
- AJIBOLA, O. O. **Thin layer drying of melon seed.** Journal of Food Engineering. v. 9, p. 305-320, 1989.
- Association of Official Analytical Chemists (A.O.A.C), **Official methods of analysis**, ed.14, v. 1, 1995.
- BALA, B. K. & WOODS, J. L., **Thin layer drying models for malt.** Journal of Food Engineering. v. 16, p. 239-249, 1992.
- BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. **Statistics for experiments: An introduction to design, data analysis and model building.** New York, John Wiley & Sons, 1978, 653p.
- CHIRIFE, J. **Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods.** In: MUJUMDAR, Arum S (ed). Advances in Drying. Washington Hemisphere Publishing Corporation, v.1, p. 73-102, 1983.
- CRAVEIRO, A. A. & QUEIROZ, D. C. **Quitosana a fibra do futuro**, Parque de Desenvolvimento Tecnológico – PADETEC, Fortaleza – CE, 1999.

- GASTÓN, A. L., ABALONE, R. M. & GINER, S. A. **Wheat drying kinetics. diffusivities for sphere and ellipsoid by finite elements**, Journal of Food Engineering, v. 52, p. 313-322. 2002.
- IBANOGLU, S.; MASKAN, M. **Effect of cooking on the drying behaviour of tarhana dough, a wheat flour-yoghurt mixture**, Journal of Food Engineering, v. 54, p. 119-123, 2002.
- MYER, R. H. **Response surface methodology**. Library of Congress, U.S.A. (1976).
- NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S. ; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos?**. 2ª ed. Ed. Unicamp, Campinas, SP, 2002.
- PINTO, L. A. A. & TOBINAGA, S. **Tópicos especiais em secagem: secagem de materiais fibrosos: músculos de peixes**, v. 1, Capítulo 6, Gráfica da UFSCar, São Carlos – SP, 1992.
- ROVEDO, C. O.; SUAREZ, C. & VIOLLAZ, P. E. **Analysis of moisture profiles, mass biot number and driving forces during drying of potato slabs**. Journal of Food Engineering, v.36, p. 211-231, 1998.
- SHAHIDI, F., *et al*, **Food applications of chitin and chitosans**, Trends in Food Science & Tecnlogy, v.10, p.37, 1999.
- SOARES, N. M., *et al* **Obtenção e purificação de quitosana a partir de resíduos de camarão em escala piloto**, Revista UniVap, v.10, nº18, p. 88-92, 2003.
- VERSAVEL, P. A. & MUIR, W. E. **Drying behavior of high-3b moisture-content wheat-spikes**. Transactions of the ASAE. v. 31, p. 606-618, 1978.

# **ARTIGO 03 - SECAGEM DE QUITOSANA EM CAMADA DELGADA: MODELO DIFUSIVO COM DIFUSIVIDADE EFETIVA VARIÁVEL CONSIDERANDO ENCOLHIMENTO**

## **RESUMO**

Foi utilizado no estudo da secagem de quitosana, em camada delgada, um modelo difusivo que considera a variação de volume do material, devido ao grande encolhimento ocorrido durante a operação. As amostras foram acondicionadas em bandejas retangulares de 4mm de espessura, e inseridas num secador descontínuo, com escoamento paralelo de ar à temperatura do ar 60°C e velocidade de 1,5m/s. O encolhimento das amostras ocorreu principalmente na espessura, e o coeficiente de encolhimento linear foi constante. Foi considerado no modelo, a difusividade efetiva de umidade variável e condição de equilíbrio na superfície do material. A equação diferencial parcial não linear de segunda ordem, resultante do modelo, foi resolvida numericamente utilizando técnica de diferenças finitas. Os perfis locais de umidade das amostras foram calculados pelo emprego do método de Runge-Kutta de Quarta ordem, com passo variável, e para o cálculo da umidade média foi utilizado o método de Simpson. Foi observada uma boa concordância entre os resultados numéricos do perfil médio de umidade, obtidos pelo modelo, e os dados experimentais.

## **1 INTRODUÇÃO**

A quitosana é um material disponível comercialmente, cuja estabilidade, propriedades químicas e biocompatibilidade tem levado a muitas aplicações industriais. Estas incluem produtos farmacêuticos, biomédicos, alimentícios e para tratamento de efluentes (AYERS, 2001; CHEN, 1996). A propriedade catiônica da quitosana oferece uma oportunidade de ter avançadas interações eletrostáticas. Filmes de quitosana são utilizados para a separação de etanol, purificação de água e controle de liberação de fármacos (SRINIVASA, 2004). Ressalta-se a importância do processo de secagem na produção de quitosana, já que esta etapa garante que seja alcançada a umidade necessária para o armazenamento do produto de forma a manter as características do mesmo.

A secagem é normalmente considerada um processo de remoção de umidade de um sólido por evaporação. Nos processos de secagem, o material úmido entra em contato com ar insaturado resultando uma diminuição do conteúdo de umidade do material e a umidificação do ar (Mc. CORMICK, 1983; STRUMILO & KUDRA, 1986).

O estudo da etapa de secagem no processamento de produtos alimentícios vem sendo difundido cada vez mais, buscando sempre a produção de alimentos desidratados de boas características (TOBINAGA & PINTO, 1992). As propriedades físicas e de transporte e o encolhimento do material, também são parâmetros muito importantes para a formulação e resolução de modelos físico-matemáticos que explicam o comportamento de transferências de massa e de calor ao longo da operação de secagem (FORTES & OKOS, 1980).

O objetivo deste trabalho foi realizar a modelagem físico-matemática da secagem em camada delgada de quitosana purificada, em forma de pasta, considerando encolhimento durante a operação e determinar as propriedades físicas e de transporte deste material.

### **1.1 Modelos Difusivos considerando o encolhimento**

A teoria de migração de água por difusão representada pela 2ª lei de Fick expressa em termos do gradiente de umidade, teve preferência no estudo da secagem de diferentes produtos alimentícios por vários pesquisadores, por apresentar uma boa concordância entre as distribuições de umidade experimental e a estimada pelo modelo (IGBEKA, 1982; CHIRIFE, 1983, AGUERRE *et al.*, 1985; YUSHENG & POULSEN, 1988; WAANANEN, 1996; SIMAL *et al.*, 1996; TEIXEIRA & TOBINAGA, 1998; SARSAVADIA *et al.*, 1999; CIHAN & ECE, 2001; RAMESH *et al.*, 2001; IBANOGLU, 2002).

A difusividade efetiva volumétrica de umidade é uma importante propriedade de transporte na modelagem dos processos de secagem de alimentos, sendo uma função da temperatura do ar e da umidade do material. Porém devido a complexa composição e estrutura física dos alimentos não são conseguidas estimativas precisas desta propriedade, sendo assim necessárias medidas

experimentais, como observado nos trabalhos de SARAVACCOS & ROUZEOUS (1984), VAGENAS & KARATHANOS (1993) e ZOGZAS *et al.*(1994).

Na modelagem da secagem de materiais que apresentam o fenômeno de encolhimento, o uso das soluções da 2ª lei de Fick não é possível devido o domínio de integração não ser constante.

Uma equação de modelo considerando encolhimento do material, para o perfil de umidade local, conforme a Equação 1, foi utilizada por KECHAOU & ROQUES (1989) e BONAZZI, RIPOCHE & MICHON (1997).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{D_{EF}(X)}{(1 + \alpha X)^2} \frac{\partial X}{\partial \xi} \right) \quad (1)$$

Os autores utilizaram este modelo no estudo da secagem de gelatina, em forma de lâminas, com 2,0 mm e 2,5cm de espessura respectivamente, determinando o perfil local de umidade em função da espessura, que era variável com o tempo. Obtiveram bons resultados quando compararam o perfil teórico de umidade média com os resultados experimentais.

VIOLLAZ & SUAREZ (1985 & 1991) e PINTO & TOBINAGA (1994) apresentaram um modelo similar ao anterior na forma adimensionalizada, porém considerando a difusividade efetiva constante, como na Equação 2, e condição de equilíbrio na superfície do material.

$$\left( \frac{\partial X^*}{\partial Fo} \right) = \frac{\partial}{\partial \xi^*} \left( \frac{1}{(1 + \alpha^* X^*)^2} \frac{\partial X^*}{\partial \xi^*} \right) \quad (2)$$

O coeficiente de encolhimento linear ( $\alpha$ ) foi definido como na Equação 3, segundo VIOLLAZ & SUAREZ (1985 & 1991).

$$\alpha = \left( \frac{\rho_{ss}}{\rho_w} \right) \quad (3)$$

VIOLLAZ & SUAREZ (1985 & 1991) utilizaram este procedimento na secagem de batata, enquanto PINTO & TOBINAGA (1994) apresentaram este modelo para o estudo da secagem de filés de peixes.

A variação de volume do alimento durante a secagem, é analisada através do coeficiente de encolhimento linear ( $\alpha$ ), que está relacionado com a espessura do material, analogamente à equação da expansão térmica, de acordo com a Equação 4 (CHARM, 1971):

$$L = L_s(1 + \alpha X) \quad (4)$$

PINTO & TOBINAGA (1993) determinaram que o coeficiente de encolhimento linear para músculos de peixes, era praticamente constante durante o período de taxa constante e na primeira fase da taxa decrescente de secagem, este valor foi ao redor de 1,50.

A difusividade efetiva volumétrica de umidade, quando considerada variável, é calculada através da aplicação do método das tangentes, segundo VAGENAS E KARATHANOS (1993) e ZOGZAS *et al.* (1994), como apresentado na Equação 5

$$D_{EF} = \left[ \frac{\left( \frac{dY}{dt} \right)_{exp}}{\left( \frac{dY}{dFo} \right)_{Teo}} \right] L^2 \quad (5)$$

onde  $(dY/dt)_{exp}$  é calculado a partir do gráfico das curvas do adimensional de água livre em função do tempo, obtidas através dos ensaios experimentais de secagem, e  $(dY/dFo)_{Teo}$  a partir da curva teórica da difusão de água, apresentada por KEEY (1978).

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Matéria-Prima

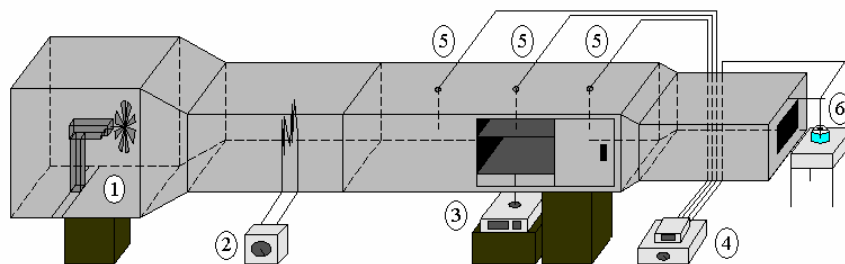
A matéria-prima utilizada foi quitosana purificada obtida no Laboratório de Operações Unitárias/DQ/FURG, segundo SOARES (2003). Esta foi submetida a uma etapa de compressão com ar comprimido a fim de se reduzir o teor de umidade inicial. Foi utilizado um filtro de fundo perfurado operando a uma pressão de  $5,01 \times 10^5$  Pa abs.

Para a caracterização da matéria-prima foram utilizados os métodos da AOAC (1995) de Umidade e N-total. Onde para o fator de correção da análise de N-total foi utilizado um fator de valor 11 (SOARES, 2003).

### 2.1.1 Experimentos de Secagem

Foram realizados os ensaios de secagem da quitosana em camada delgada, utilizando o equipamento apresentado na Figura 1, sendo a bandeja de forma retangular (12cm de largura e 14cm de comprimento) com espessura de 4mm, onde as condições do ar de secagem temperatura foi de 60°C e a velocidade do ar de 1,5m/s. Foram feitas réplicas das corridas para verificar a confiabilidade dos resultados.

A massa das amostras foi medida em uma balança eletrônica, acoplada ao secador, com precisão de 0,01g. As temperaturas de bulbo seco antes e depois da bandeja e a temperatura de bulbo úmido na saída do secador foram medidas através de termopares (cobre – constantan), utilizando um milivoltímetro com precisão de 1,0°C. A velocidade do ar foi medida com um anemômetro com precisão de 0,1m/s.



1- Ventilador 2- Controlador de temperatura; 3- Balança eletrônica; 4- Milivoltímetro com termopares acoplados; 5- Termopares de bulbo seco e 6- Termopar de bulbo úmido.

Figura 1: Esquema do secador descontínuo de bandejas com escoamento paralelo de ar.

Foram anotados os valores de massa e temperatura a cada 5min, durante o período dos ensaios de secagem. As amostras foram secas até peso constante, para obtenção da umidade de equilíbrio dinâmico. Foi verificada a espessura da



amostra a cada 30min, com um auxílio de um paquímetro digital (MITUTOYO, modelo CD-6 CS).

## 2.2 Caracterização da Secagem

Para a determinação dos períodos de taxa constante e de taxa decrescente de secagem foram analisadas as curvas do adimensional de umidade em função do tempo e a da taxa de secagem em função da umidade do material.

Com os valores da massa específica do sólido seco ( $\rho_{SS}$ ) e da água ( $\rho_W$ ) encontrou-se o valor de  $\alpha$  segundo VIOLLAZ & SUAREZ (1991), Equação 3.

Foi realizada a análise da variação da espessura em função da umidade, segundo CHARM (1971), Equação 4. Para a determinação do valor do coeficiente de encolhimento linear.

Os valores de difusividade efetiva de umidade, calculados através do método das tangentes (Equação 5), foram ajustados em função da umidade, para que pudesse ser utilizado no modelo.

## 2.3 Modelagem da secagem considerando o encolhimento

Um procedimento sugerido por CRANK (1975) foi utilizado para analisar o fenômeno do encolhimento na de secagem de quitosana purificada. A equação da continuidade utilizada para geometria plana, lâmina infinita, processo quase-isotérmico, transporte unidirecional, densidade da amostra durante a secagem não depende da posição, é apresentada na forma da Equação 6.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left( D_{EF}^S \frac{\partial X}{\partial \xi} \right) \quad (6)$$

onde,  $\xi$  é considerado ao longo do caminho de difusão, medido da posição inicial da amostra, tal que um incremento de  $\xi$  inclui um igual incremento na quantidade de sólido seco, e como esta permanece constante durante a difusão de umidade, o domínio de integração é constante.

Como o encolhimento foi considerado somente na direção normal, a difusividade efetiva baseada na massa de sólido seco,  $D_{EF}^S$ , pode ser escrita em função da difusividade efetiva volumétrica, na forma da Equação 7, segundo CRANK (1975):

$$D_{EF}^S = D_{EF} \left[ \frac{\rho_b}{\rho_{SS}(1+X)} \right]^2 \quad (7)$$

Considerando o encolhimento apenas na espessura, temos a definição de  $L$  e  $L_S$  nas Equações 8 e 9:

$$L = \frac{m_{SS}(1+X)}{A \rho_b} \quad (8)$$

$$L_S = \frac{m_{SS}}{A \rho_{SS}} \quad (9)$$

Substituindo as Equações 8 e 9 na Equação 4, tem-se a Equação 10.

$$\frac{\rho_{SS}(1+X)}{\rho_b} = (1+\alpha X) \quad (10)$$

Então a Equação 7 também pode ser escrita como mostrado na Equação 11.

$$D_{EF}^S = D_{EF} \left[ \frac{1}{(1+\alpha X)} \right]^2 \quad (11)$$

Substituindo a Equação 11 na Equação 6, adimensionalizando, segundo PINTO (1996), obtem-se a Equação 12, utilizada para o período de taxa decrescente de secagem.

$$\frac{\partial X^*}{\partial t / L_S^2} = \frac{\partial}{\partial \xi^*} \left[ \frac{D_{EF}(X^*)}{(1+\alpha^* X^*)^2} \frac{\partial X^*}{\partial \xi^*} \right] \quad (12)$$

$$0 < \xi^* < 1,0 ; t > 0$$

Com as condições iniciais e de contorno 13a, 13b e 13c, considerando equilíbrio na superfície.

$$\text{inicial: } t=0; 0 < \xi < 1,0 \Rightarrow X^* = 1,0 \quad (13a)$$

$$\text{contorno: } \xi^* = 0; t > 0 \Rightarrow \left( \frac{\partial X^*}{\partial \xi^*} \right) = 0 \quad (13b)$$

$$\xi^* = 1,0; t > 0 \Rightarrow X^* = \frac{X_E}{X_C} \quad (13c)$$

e o perfil de umidade média adimensional é dado pela Equação 14.

$$\bar{X}^*_{(t)} = \int_0^{1,0} X^* d\xi^* \quad (14)$$

Sendo os adimensionais definidos como nas Equações 15, 16 e 17:

$$X^* = (X/X_C) \quad (15)$$

$$\xi^* = (\xi/L_{(s)}) \quad (16)$$

$$\alpha^* = \alpha X_0 \quad (17)$$

Na modelagem com encolhimento foi utilizado o modelo apresentado na Equações 12, com as condições iniciais e de contorno das Equações 13a, 13b e 13c. Para a solução da equação diferencial parcial de segunda ordem não-linear, obtida por este modelo foi utilizada a técnica de diferenças finitas e o método Runge-Kutta de quarta ordem com passo variável, para a determinação do perfil de umidade local, e se utilizou o método de integração de Simpson para a obtenção do perfil de umidade média. Estes resultados foram comparados com o perfil médio de umidade obtido com o valor da difusividade efetiva constante, conforme apresentado na Equação 2.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Matéria-Prima

A caracterização da matéria-prima, quitosana purificada, foi realizada antes e depois da compressão com ar comprimido, e esta está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Caracterização da matéria-prima.

	% Umidade	%N-quitosana
Quitosana	95,0±1,0	4,0±1,0
Quitosana Prensada	90,0±1,0	9,0±1,0

Observa-se, na Tabela 1, que a quitosana apresentou uma redução no seu teor de umidade inicial, após a compressão para a realização dos ensaios de secagem.

#### 3.2 Caracterização da secagem

A umidade inicial da quitosana, para os experimentos da secagem, foi de  $8,5\pm 0,5$  (b.s.). Com os gráficos das Figuras 2 e 3, do adimensional de umidade em função do tempo e da taxa de secagem em função da umidade respectivamente, pode-se observar a existência de dois períodos de secagem distintos, o período de taxa constante e de taxa decrescente.

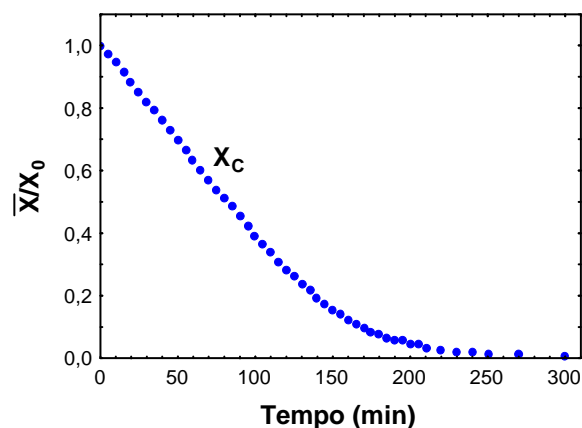


Figura 2: Curva da secagem do adimensional de Umidade em função do tempo.

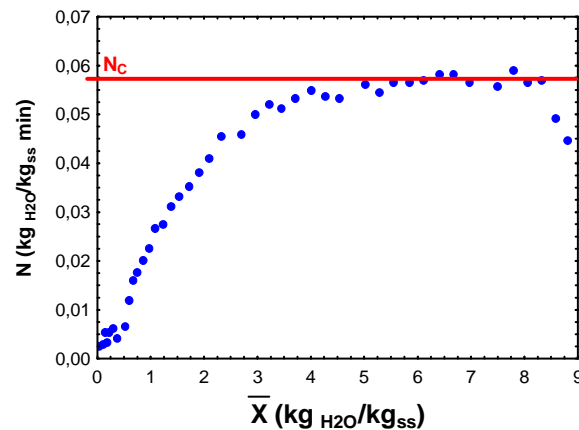


Figura 3: Curva da taxa de secagem em função da umidade média.

Na Figura 2 percebe-se que o período de taxa constante tem duração de aproximadamente 70min. Este período é confirmado ao final da parte reta da curva da taxa de secagem (Figura 3), onde encontra-se uma umidade crítica ( $X_c$ ) de aproximadamente  $5,0 \pm 0,5$  (b.s.).

O período de taxa decrescente dividiu-se em duas fases, 1° e 2° períodos de taxa decrescente, como observado na Figura 4. A umidade de transição é o valor no qual ocorre a mudança dos períodos, este foi de  $X_{\text{TRANS}} = 0,10$  (b.s.).

O valor da umidade de equilíbrio dinâmico alcançado ao se atingir a massa constante foi de 0,04 (b.s.).

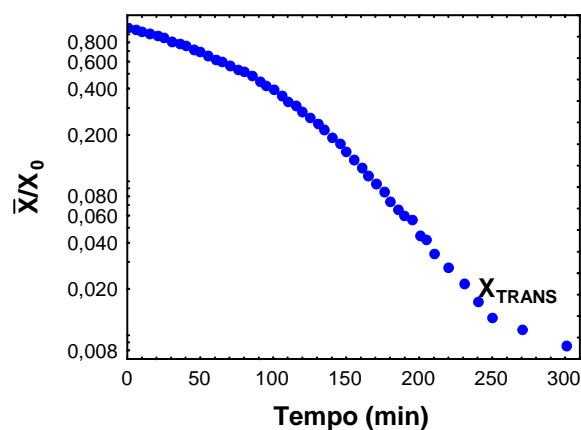


Figura 4: Curva de secagem do adimensional de Umidade em função do tempo, em escala semi-log.

Os dados experimentais da espessura em função da umidade (b.s.) foram ajustados utilizando a Equação 4, onde  $L_s$  foi de 0,00173m. Os dados podem ser

observados na Figura 5. A equação utilizada apresentou uma correlação de 99,76%, e o valor de  $\alpha$  obtido foi de 1,57.

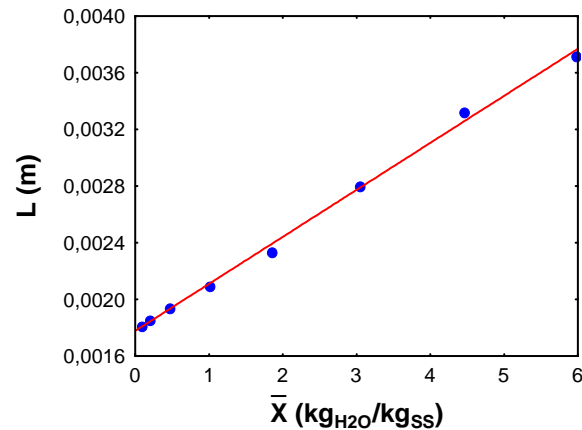


Figura 5: Espessura das amostras em função da umidade.

Comparando o valor do coeficiente de encolhimento ( $\alpha$ ) obtido pela Equação 4 com o valor encontrado pela definição de VIOLLAZ & SUAREZ (1991), apresentado na Equação 3, que foi de 1,55, constata-se que estes valores apresentaram-se muito próximos.

A difusividade efetiva de umidade variável foi correlacionada com o adimensional de umidade do material, para o período de taxa decrescente, através de uma equação linear-exponencial (Equação 19). Observa-se o bom ajuste desta equação, através do valor do coeficiente de correlação de 0,996, obtido com a utilização do método de regressão não linear, conforme apresentado na Figura 6.

$$D_{EF} = 7,58 \times 10^{-10} + 9,17 \times 10^{-7} \frac{\bar{X}}{X_C} \exp\left(-4,93 \frac{\bar{X}}{X_C}\right) \quad (19)$$

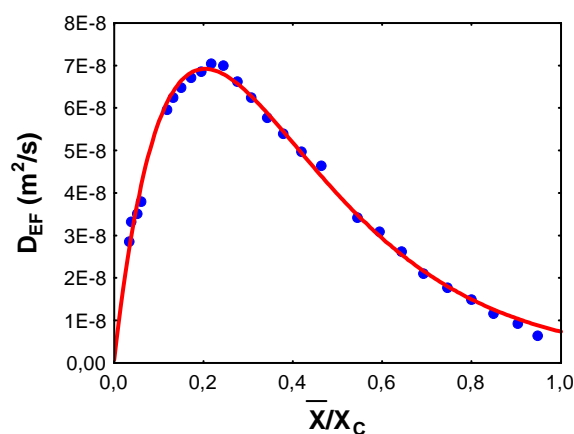


Figura 6: Difusividade efetiva em função do adimensional de umidade.

A Figura 7 apresenta os resultados da solução do modelo difusivo considerando o encolhimento, com difusividade efetiva variável (Equação 12) para o perfil local do adimensional de umidade do material, durante o período de taxa decrescente, em diferentes tempos de secagem.

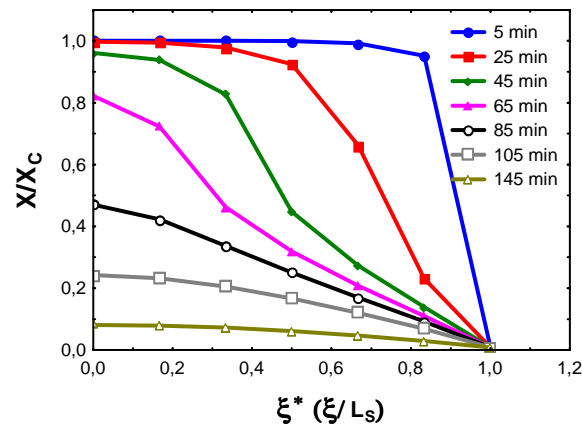


Figura 7: Perfil de umidade local do material, para o período de taxa decrescente de secagem.

O modelo difusivo considerando o encolhimento serviu para descrever o mecanismo de migração de água da quitosana purificada (Equação 12), conforme apresentado na Figura 8. Observa-se que a solução do modelo difusivo considerando encolhimento, com difusividade efetiva em função da umidade, representou melhor os dados experimentais do que o modelo difusivo que considera este parâmetro de transporte constante (Equação 2).

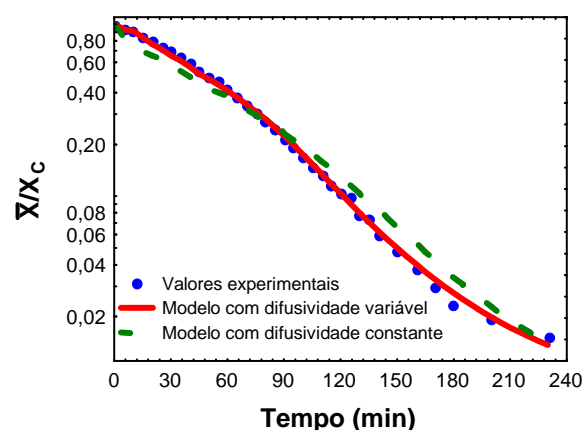


Figura 8: Perfil de umidade médio do material, para o período de taxa decrescente de secagem, dados experimentais e modelos ajustados.

## 4 CONCLUSÃO

A secagem ocorreu durante o período de taxa constante e principalmente na primeira fase do período de taxa decrescente. Foi observada que a umidade de transição foi próxima a umidade comercial da quitosana, sendo assim, a segunda fase de taxa decrescente desconsiderada quando comparada ao tempo total de secagem. Ocorreu um encolhimento significativo na espessura do material durante a operação de secagem, apresentando uma dependência linear com relação a umidade do material.

O modelo difusivo considerando encolhimento representou bem os dados experimentais. Sendo que, o modelo considerando difusividade efetiva de umidade variável apresentou uma melhor concordância com o perfil médio dos dados experimentais, quando comparado ao modelo com este parâmetro constante.

## 5 NOMENCLATURA

A	Área de secagem	[m <sup>2</sup> ]
a	Constante (Equação 21)	[adimensional]
b	Constante (Equação 21)	[adimensional]
c	Constante (Equação 21)	[adimensional]
d	Constante (Equação 21)	[adimensional]
$D_{EF}^S$	Difusividade efetiva de umidade do sólido	[m <sup>2</sup> /s]
$D_{EF}$	Difusividade efetiva volumétrica	[m <sup>2</sup> /s]
$Fo$	Número de Fourier $Fo = \frac{D_{EF}t}{L^2}$	[adimensional]
L	Espessura da amostra	[m]
$L_S$	Espessura do sólido seco	[m]
$m_{ss}$	Massa de sólido seco	[kg <sub>SS</sub> ]
t	Tempo	[s]
X	Umidade da amostra(base seca)	[kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>SS</sub> ]
X*	Umidade adimensional da amostra (base seca)	[adimensional]
$X_0$	Umidade inicial da amostra (base seca)	[kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>SS</sub> ]
$\bar{X}$	Umidade média da amostra (base seca)	[kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>SS</sub> ]
$X_C$	Umidade crítica da amostra (base seca)	[kg <sub>H2O</sub> /kg <sub>SS</sub> ]



$X_E$	Umidade de equilíbrio da amostra (base seca)	$[kg_{H_2O}/kg_{SS}]$
$X_{TRANS}$	Umidade de transição da amostra (base seca)	$[kg_{H_2O}/kg_{SS}]$
$Y$	Adimensional de água livre	[adimensional]
LETRAS GREGAS		
$\alpha$	Coeficiente de encolhimento linear	$[kg_{SS}/kg_{H_2O}]$
$\alpha^*$	Coeficiente de encolhimento linear adimensionalizado	[adimensional]
$\rho_{SS}$	Massa específica do sólido seco	$[g/cm^3]$
$\rho_W$	Massa específica da água	$[g/cm^3]$
$\xi$	Coordenada espacial generalizada	[m]
$\xi^*$	Coordenada espacial generalizada, adimensionalizada	[adimensional]

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUERRE, R. J.; GABITTO, J. F. & CHIRIFE, J., **Utilization of Fick's second law for the evaluation of diffusion coefficients in food process controlled by internal diffusion**. Journal of Food Technology, v. 20, 623-629, 1985.

Association of official Analytical Chemists (AOAC) – **Official methods of analysis**, 1995.

AYERS, M. R. & HUNT, A. J. **Synthesis and properties of chitosan-silica hybrid aerogels** Journal of Non-Crystalline Solids, v. 285, p. 123-127, 2001.

BONAZZI C., ROPOCHE, A. & MICHON, C. **Moisture diffusion in gelatin slabs by modeling drying kinetics** Drying Technology, v. 15(6-8), p. 2045-2059, 1997.

CHARM, S. E. **Dehydration of foods**. The Fundamentals of Food Engineering. The AVI Publishing Company, 2ed.1971.

CHEN R. H. & HWAB H.-D. **Effect of molecular weight of chitosan with the same degree of deacetylation on the thermal, mechanical, and permeability properties of the prepared membrane**. Carbohydrate Polymers, v. 29 , p. 353-358, 1996.

- CHIRIFE, J. **Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods**. In: MUJUMDAR, A. *Advances in drying*. Washington/ New York/ London. Ed. Hemisphere Publishing Corporation, v.3, p. 73-102, 1983.
- CIHAN, A.; ECE, M.C., **Liquid diffusion model for intermittent drying of rough rice**, *Journal of Food Engineering*, v. 49, p. 327-331, 2001.
- CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. Great Britain, 2ed., Clarendon Press, Oxford, 1975. 414p, (1975).
- FORTES, M. & OKOS, M. R. **Drying theories: Their bases and limitations as applied to food and grain**, In: MUJUMDAR, A. *Advances in drying*, Washington, ed. Hemisphere Publishing Corporation. v. 1, p. 119-154, 1980.
- IGBEKA, J.C., **Simulation of moisture movement during drying a starch food products – cassava**. *Journal of Food Technology*. v. 17, 27-36(1982).
- IBANOGLU, S.; MASKAN, M. **Effect of cooking on the drying behaviour of tarhana dough, a wheat flour-yoghurt mixture**, *Journal of Food Engineering*, v. 54, p. 119-123, 2002.
- KECHAOU, N. & ROQUES, M. **A variable diffusivity model for drying deformable materials**. In: *Drying 89*, ed. ROQUES & MUJUMDAR, Hemisphere Publishing Company, New York, p. 332-338, 1989.
- KEEY, R. B. **Drying: principles and practice**. International Series of Monographs in Chemical Engineering. Pergamon Press, v.13, 1972.
- Mc.CORMICK, P. Y. **Solids drying fundamentals**. PERRY, R. H. and CHILTON, C. H., *Chemical Engineer's Handbook*, Mc Graw-Hill. Co. 5 ed., 1983.
- PINTO, L. A. A. **Cinética de secagem de filés de peixe: uso de um modelo difusivo com variação de volume**. Tese de Doutorado. UFSCar, São Carlos, SP, p. 154 1996.

- PINTO, L. A. A. & TOBINAGA, S. **A diffusional model with shrinkage during drying of fish muscles.** In: 9th International Drying Symposium, Gold Coast, Austrália, 1994.
- PINTO, L. A. A. & TOBINAGA, S. **Difusividade efetiva de umidade na secagem de músculos de peixes.** In: Anais do XXII ENEMP, Ouro Preto, MG, v.2, p. 466-476, p.1069 – 1076, 1993.
- RAMESH, M.N.; WOLF, W.; TEVINI, D. & JUNG, G. **Influence of processing on the drying of spice paprika.** Journal of Food Engineering. v. 49, p. 63-72, 2001.
- SARAVACCOS, G. D. & ROUZEOUS, G. S. **Diffusivity of moisture in air-drying of starch gels.** In: McKENNA, B. M. Engineering and Food. London, New York, ed. Elsevier Applied Science Publishes, v.1, p. 493-507, 1984.
- SARSAVADIA, P. N.; SAWHNEY, R. L.; PANGAVHANE, D. R. & SINGH, S. P., **Drying behaviour of brined onion slices.** Journal of Food Engineering, v. 40, p.219-226, 1999.
- SIMAL, S.; DEYÁ, E., FRAU, M. & ROSSELÓ, C. **Simple modelling of air drying curves of fresh and osmotically pre-dehydrated apple cubes.** Journal of Food Engineering. Vol 33, 139-150, 1999.
- SOARES, N. M., *et al*, **Obtenção e purificação de quitosana a partir de resíduos de camarão em escala piloto,** Revista UniVap, v.10, nº18, p. 88-92, 2003.
- SRINIVASA P. C., RAMESH M. N., KUMAR K. R. & THARANATHAN R. N. **Properties of chitosan films prepared under different drying conditions,** Journal of Food Engineering, v. 63-1, p. 79-85, 2004.
- STRUMILO, C. & KUDRA, T. **Drying: principles, applications and design.** In: Hughes, R. Topics in Chemical Engineering. v. 3, Universidade de Salford, UK. 1986.

- TEIXEIRA M. & TOBINAGA, S. **A diffusion model for describing water transport in round squid mantle during drying with a moisture-dependent effective diffusivity**, Journal of Food Engineering, v. 36, p. 169-181, 1998.
- TOBINAGA, S. & PINTO, L. A. A. **Secagem de materiais fibrosos: músculos de peixe**. FREIRE, J. T & SARTORI, D. M. J. Tópicos especiais em secagem, v.1, ed. UFSCar, São Carlos. 1992.
- VAGENAS, G. K. & KARATHANOS. **Prediction of the effective moisture diffusivity in gelatinized food systems**. Journal of Food Engineering. n.18, p. 159-179, 1993.
- VIOLLAZ, P. & SUAREZ, C. **Drying of shrinkage bodies**. A. I. Ch. E. Journal, V. 33, n.9, p. 1566-1569, 1985.
- VIOLLAZ, P. & SUAREZ, C. **Shrinkage effect on drying behavior of potato slabs**. Journal of Food Engineering, v. 13, p. 103-114, 1991.
- ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B. & MARINOS-KOURIS D. **Moisture diffusivity methods of experimental determination a review**, Drying Technology, v. 12, p. 483-515, 1994.
- WAANANEM, K. M. **Effect of porosity on moisture diffusion during drying of pasta**. Journal of Food Engineering. v. 28, p.121-137, 1996.
- YUSHENG, Z. & POULSEN, K. P. **Diffusion in potato drying** Journal of Food Engineering. Vol 7, 249-262, 1988.

## **CAPÍTULO 4: CONCLUSÃO GERAL**

## **4 CONCLUSÃO**

Com base nas condições utilizadas neste trabalho tem-se as seguintes conclusões gerais:

A metodologia utilizada na realização deste trabalho mostrou-se adequada com base na reprodutibilidade dos dados experimentais que foram utilizados nos resultados dos artigos desenvolvidos.

A duração da operação de secagem da quitosana ocorreu principalmente nos períodos de taxa constante e na primeira fase do período de taxa decrescente, para alcançar sua umidade comercial.

A secagem de quitosana foi representada pelo mecanismo de migração por difusão de água líquida, considerando o parâmetro difusividade efetiva de umidade variável. Ocorreu uma acentuada variação da espessura da quitosana purificada, na forma de pasta, durante a secagem sendo o encolhimento considerado na modelagem do fenômeno.

#### **4.1 Perspectivas futuras**

Após o desenvolvimento do presente trabalho, são feitas as seguintes sugestões:

- modelagem da secagem de quitosana purificada através da utilização do modelo difusivo-convectivo, considerando a velocidade de encolhimento do material,

- analisar a operação de secagem de quitosana considerando o modelo de transferência de calor, para a determinação do perfil interno e médio da temperatura do material, e

- estudo da secagem da quitosana purificada, utilizando diferentes técnicas para a obtenção de membranas e filmes.

## **CAPÍTULO 5: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**



## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADUSUMILLI, P. S. & BOLTON, S. M. **Evaluation of chitosan citrate complexes as matrices for controlled release formulations using a 3<sup>2</sup> full factorial design.** Drug Dev. Ind. Pharm. 17, p. 1931-1945, 1991.
- AGUERRE, R. J.; GABITTO, J. F. & CHIRIFE, J. **Utilization of Fick's second law for the evaluation of diffusion coefficients in food process controlled by internal diffusion.** Journal of Food Technology, v. 20, p. 623-629, 1985.
- AJIBOLA, O. O. **Thin layer drying of melon seed.** Journal of Food Engineering, v. 9, p. 305-320, 1989.
- ALVES-FILHO, O. & RUMSEY, T. **Thin-layer drying and rewetting models to predict moisture diffusion in spherical agricultural products.** In: TOEL, R. and MUJUMDAR, A. Drying'85. New York, ed. Hemisphere Publishing Company, p. 434-437, 1985.
- Association of Official Analytical Chemists (A.O.A.C), **Official methods of analysis**, ed.14, Vol. 1, 1995.
- AYERS, M. R. & HUNT, A. J. **Synthesis and properties of chitosan-silica hybrid aerogels** Journal of Non-Crystalline Solids, v. 285, p. 123-127, 2001.
- BALA, B. K. & WOODS, J. L. **Thin layer drying models for malt.** Journal of Food Engineering, v.16, p. 239-249, 1992.
- BALABAN, M. & PIGOTT, G. M. **Shrinkage in fish muscle during drying.** Journal of Food Science. v.51, n.2, p.510-511, 1986.
- BAGGIO, O. C.; STADLER, E. & LARANJEIRAS, M. C. M. **Extração e preparação de quitina e quitosana.** Revista de Química Industrial. Departamento de Química – UFSC. Florianópolis, SC. 1989.
- BONAZZI C., ROPOCHE, A. & MICHON, C. **Moisture diffusion in gelatin slabs by modeling drying kinetics** Drying Technology, v. 15(6-8), p. 2045-2059, 1997.
- BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. **Statistics for experiments: An introduction to design, data analysis and model building.** New York, John Wiley & Sons, 1978.

- BRUIN, S. & LUBYEN, K. C. A. M. **Drying of food materials: a review of recent developments.** In: MUJUMDAR, A. Advances in Drying. Washington/ New York/ London, Ed. Hemisphere Publishing Corporation, v.3, 1980.
- CALADO, V. M. A.; BISCAIA JR. E. C. & MASSARANI, C. **Secagem de grãos em leite de jorro: aplicação de um modelo de difusão.** In: Encontro sobre escoamento em meios porosos. Anais do XV ENEMP, v.2, p. 374-381, 1987.
- CHARM, S. E. Dehydration of Foods. **The fundamentals of food engineering.** The AVI Publishing Company, 2ed.1971.
- CHIRIFE, J. **Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods.** In: MUJUMDAR, A. Advances in drying. Washington/ New York/ London. Ed. Hemisphere Publishing Corporation, v. 3, p. 73-102, 1983.
- CHEN R. H. & HWAB H.-D. **Effect of molecular weight of chitosan with the same degree of deacetylation on the thermal, mechanical, and permeability properties of the prepared membrane.** Carbohydrate Polymers, v. 29 , p. 353-358, 1996.
- CIHAN, A.; ECE, M.C. **Liquid diffusion model for intermittent drying of rough rice.** Journal of Food Engineering, v. 49, p. 327-331,2001.
- CRANK, J. **The mathematics of diffusion.** Great Britain, 2ed., Clarendon Press, Oxford, 1975. 414p.
- CRAVEIRO, A. A.; CRAVEIRO, A. C. & QUEIROZ, D. C.. **Quitosana: a fibra do futuro.** Parque de Desenvolvimento Tecnológico - PADETEC, Fortaleza, Ceará, 1999.
- FENNEMA, O. R. **Introducción a la ciencia de los alimentos.** Ed. Reverté, S.A., España. 1985.
- FORTES, M. & OKOS, M. R. **Drying theories: Their bases and limitations as applied to food and grain,** In: MUJUMDAR, A. Advances in drying, Washington, ed. Hemisphere Publishing Corporation. v. 1, p. 119-154, 1980.
- FURLAN, L. **Copolímeros grafitizados de quitina e quitosana com monômeros acrílicos, estudos de adsorção de Ca(II) e aplicações na tecnologia do papel.** Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, SC, 1993.

- GASTÓN, A. L., ABALONE, R. M. & GINER, S. A. **Wheat drying kinetics. Diffusivities for sphere and ellipsoid by finite elements**, Journal of Food Engineering, v. 52, p. 313-322. 2002.
- GEANKOPLIS, C. **Transport and unit operations**. 2<sup>nd</sup> Ed. Prentice-Hall International Inc. New Jersey, USA, 1983.
- HAGHIGHI, K. *et alli* **Grain kernel drying simulation using the finite element method**. Transactions of the ASAE, V. 33, n.6, p. 1957-1965, 1990.
- IBAMA/CEPERG/RS – **Instituto brasileiro do meio ambiente e dos recursos naturais renováveis** - Centro de Pesquisa do Rio Grande, RS, 2002.
- IBANOGLU, S.; MASKAN, M. **Effect of cooking on the drying behaviour of tarhana dough, a wheat flour-yoghurt mixture**, Journal of Food Engineering, v. 54, p. 119-123, 2002.
- IGBEKA, J.C., **Simulation of moisture movement during drying a starch food products – cassaca**. Journal of Food Technology. v. 17, p. 27-36, 1982.
- IGLESIAS, H. A. & CHIRIFE, J. **An alternative to the GAB model for the mathematical description of moisture sorption isotherms of foods**. Food Research International, v. 28, p. 317-321, 1995.
- JASON, A. C. **Drying and dehydration. fish as food**. New York, Academic Press, p.1-54, 1965.
- JASON, A. C. **A study of evaporation and diffusion process in the drying of fish muscle. Fundamentals aspects of the dehydration of foodstuffs**. The Society of Chemical Industry. New York. p. 103-135, 1958.
- KECHAOU, N. & ROQUES, M. **A variable diffusivity model for drying deformable materials**. In: Drying 89, ed. Roques and MUJUMDAR, Hemisphere Publishing Company, New York, p. 332-338, 1989.
- KEEY, R. B. **Drying: principles and practice**. International Series of Monographs in Chemical Engineering. Pergamon Press, v.13, 1972.
- LABUZA, T. P. **Sorption phenomena in foods**. Food Technology, v. 23, p. 15-19, 1968.
- LOZANO, J. E.; ROTSTEIN, E. & URBICAIN, M. J. **Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents**. Journal of Food Science, v. 48, n. 5, p. 1497-1553, 1983.

- Mc.CORMICK, P. Y. **Solids drying fundamentals**. PERRY, R. H. and CHILTON, C. H., Chemical Engineer's Handbook, Mc Graw-Hill. Co. 5 ed., 1983.
- MIR, M. A & NATH, N. **Sorption isotherms of fortified mango bars**. Journal of Food Engineering, v. 25. p. 141-50, 1995.
- MOREIRA, M. F. P. **Secagem de gel ágar**. Dissertação de Mestrado, UFSCar, São Carlos, SP, 2000.
- MYER, R. H. **Response surface methodology**. Library of Congress, U.S.A. (1976).
- NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S. ; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos?**. 2ª ed. Ed. Unicamp, Campinas, SP, 2002.
- OLIVEIRA, D. T.; TAVARES, F. W. & ZAPOLA, P. A. S. **Estudo da secagem de sólidos em leito diferencial**. In: Encontro sobre escoamento em meios porosos. Anais do XVI ENEMP, v. 2, p. 521-529, 1988.
- PARK, K. J.; BROD, F. P. R. & SILVA, J. E. A. R. **Estudo comparativo de secagem de cebolinha (allium sp. cv. galega) utilizando secadores vertical e horizontal**. Ciência e Tecnologia de Alimentos, v. 2, n. 16, 1996.
- PERRY, R. H. & CHILTON, C. H. **Manual de engenharia química**. ed.5, Ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1980.
- PEZZUTTI, A. & CRAPISTE, G. H. **Sorptional equilibrium and drying characteristics of garlic**. Journal of Food Engineering. v. 29, p. 75-97. 1996.
- PINTO, L. A. A. **Cinética de secagem de filés de peixe: uso de um modelo difusivo com variação de volume**. Tese de Doutorado. UFSCar, São Carlos, SP, p. 154, 1996.
- PINTO, L. A. A. & TOBINAGA, S. **Difusividade efetiva de umidade na secagem de músculos de peixes**. In: Anais do XXII ENEMP, Ouro Preto, MG, v.2, p. 466-476, 1993.
- PINTO, L. A. A. & TOBINAGA, S. **A diffusional model with shrinkage during drying of fish muscles**. In: 9th International Drying Symposium, Gold Coast, Austrália, p. 1069 – 1076, 1994.
- PINTO, L. A. A. **Secagem de materiais fibrosos: músculos de peixe**. Dissertação de Mestrado. UFSCar, São Carlos, SP, 1992.

- PINTO, L. A. A.; PENEIREIRO, J. B. & TOBINAGA, S. **Difusão líquida na secagem de músculos de peixe**. In: Encontro sobre escoamento em meios porosos. Anais do XX ENEMP. São Carlos, SP, 1992.
- PINTO, L. A. A. & TOBINAGA, S. **Encolhimento na secagem de músculos de peixes**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Anais do 9º COBEQ. Salvador, BA, v.1, p. 191-198, 1992.
- PINTO, L. A. A. & TOBINAGA, S. **Tópicos especiais em secagem: secagem de materiais fibrosos: músculos de peixes**, v. 1, Capítulo 6, Gráfica da UFSCar, São Carlos – SP, 1992.
- RAMESH, M.N.; WOLF, W.; TEVINI, D. & JUNG, G. **Influence of processing on the drying of spice paprika**. Journal of Food Engineering. Vol 49, 63-72,2001.
- ROBERTS, G. A. F. **Chitin chemistry**, 1992.
- ROVEDO, C. O.; SUAREZ, C. & VIOLLAZ, P. E. **Analysis of moisture profiles, mass biot number and driving forces during drying of potato slabs**. Journal of Food Engineering, v.36, p. 211-231, 1998.
- SAHIDI, F.; ARACHCHI, J. K. V. & JEON, Y.-J. **Food applications of chitin and chitosans**. Trends in Food Science & Technology, v.10, p. 37-51,1999.
- SARAVACOS, G.; DROUZAS, A.; MAROUSIS, S. & KOSTAROPOULOS, A. **Effective thermal and moisture diffusivities of granular starches** In: MUJUMDAR, A. and ROQUES, M.A. Drying'89. New York, ed. Hemisphere Publishing Company, 1989.
- SARAVACCOS, G. D. & ROUZEOS, G. S. **Diffusivity of moisture in air-drying of starch gels**. In: McKENNA, B. M. Engineering and Food. London, New York, ed. Elsevier Applied Science Publishes, v.1, p. 493-507, 1984.
- SARSAVADIA, P. N.; SAWHNEY, R. L.; PANGAVHANE, D. R. & SINGH, S. P. **Drying behaviour of brined onion slices**. Journal of Food Engineering, v. 40, p.219-226, 1999.
- SIMAL, S.; DEYÁ, E., FRAU, M. & ROSSELÓ, C. **Simple modelling of air drying curves of fresh and osmotically pre-dehydrated apple cubes**. Journal of Food Engineering, v. 33, p. 139-150, 1999.
- SOARES, N. M., *et al*, **Obtenção e purificação de quitosana a partir de resíduos de camarão em escala piloto**, Revista UniVap, v.10, nº18, p. 88-92, 2003.

- SRINIVASA P. C., RAMESH M. N., KUMAR K. R. & THARANATHAN R. N. **Properties of chitosan films prepared under different drying conditions**, Journal of Food Engineering, v. 63-1, p. 79-85, 2004.
- STRUMILO, C. & KUDRA, T. **Drying: principles, applications and design**. In: Hughes, R. Topics in Chemical Engineering. v. 3, Universidade de Salford, UK. 1986.
- TEIXEIRA M. & TOBINAGA, S. **A diffusion model for describing water transport in round squid mantle during drying with a moisture-dependent effective diffusivity**, Journal of Food Engineering, v. 36, p. 169-181, 1998.
- TIMMERMANN, E.O.; CHIRIFE, J. & IGLESIAS, H.A. **Water sorption isotherms of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters?** Journal of Food Engineering, v. 48, p. 19-31, 2001.
- TOBINAGA, S. & PINTO, L. A. A. **Secagem de materiais fibrosos: músculos de peixe**. FREIRE, J. T & SARTORI, D. M. J. Tópicos especiais em secagem, v.1, ed. UFSCar, São Carlos. 1992.
- VACCAREZZA, L. M.; LOMBARDI, J. L. & CHIRIFE, J. **Kinetics of moisture movement during of the sugar beet root**. Journal of Food technology, v. 9, p.679-689,1974.
- VAGENAS, G. K. & KARATHANOS. **Prediction of the effective moisture diffusivity in gelatinized food systems**. Journal of Food Engineering. v. 18, p. 159-179, 1993.
- VERSAVEL, P. A. & MUIR, W. E., **Drying behavior of high-3b moisture-content wheat-spikes**. Transactions of the ASAE. Vol. 31, p. 606-608, 1978.
- VIOLLAZ, P. & SUAREZ, C. **Shrinkage effect on drying behavior of potato slabs**. Journal of Food Engineering, v. 13, p. 103-114, 1991.
- VIOLLAZ, P. & SUAREZ, C. **Drying of shrinkage bodies**. A. I. Ch. E. Journal, V. 33, n.9, p. 1566-1569, 1985.
- VIOLLAZ, P.; CHIRIFE, J. & IGLESIAS, H. **Slopes of moisture sorption isotherm of food as function of moisture content**. Journal of Food Science, v. 43, p. 606-608, 1978.

ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B. & MARINOS-KOURIS D. **Moisture diffusivity methods of experimental determination a review**, Drying Technology, v. 12, p. 483-515, 1994.

WAANANEM, K. M. **Effect of porosity on moisture diffusion during drying of pasta**. Journal of Food Engineering. v. 28, p. 121-137, 1996.

WALTON, L. R.; WHITE, G. M. & ROSS, I. J. **A cellular diffusion-based drying model for corn**. Transactions of the ASAE, v. 31, n. 1, p. 279-283, 1988.

YUSHENG, Z. & POULSEN, K. P. **Diffusion in potato drying**. Journal of Food Engineering. v. 7, p. 249-262, 1988.

## **CAPITULO 6: ANEXOS**



Na Tabela A1 estão os dados experimentais da umidade em base seca ( $\bar{X}$ ), do adimensional de umidade ( $\bar{X}/X_0$ ), da taxa de secagem (N) e do adimensional de água livre ( $(\bar{X}-X_E)/(X_0-X_E)$ ) em função do tempo para a obtenção dos gráficos apresentados no 1º artigo

Tabela A1: Dados experimentais da secagem de quitosana em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 80°C e espessura da bandeja de 5mm. A umidade inicial da amostra é de 88,2%(b.u) e 7,517 (b.s.) e a umidade de equilíbrio de 0,01 (b.s.). A massa inicial da bandeja foi de 65,88g.

Tempo (min)	$\bar{X}$ (g <sub>H2O</sub> /g <sub>SS</sub> )	$\bar{X}/X_0$	N(g <sub>H2O</sub> /(g <sub>SS</sub> min))	$(\bar{X}-X_E)/(X_0-X_E)$	Temperatura (°C)
0	7,518	1,0000	0,0729	1,0000	29
5	7,153	0,9515	0,0882	0,9514	41
10	6,712	0,8929	0,0926	0,8927	45
15	6,250	0,8313	0,0926	0,8311	46
20	5,787	0,7697	0,0913	0,7694	46
25	5,330	0,7090	0,0902	0,7086	46
30	4,879	0,6490	0,0905	0,6485	46
35	4,426	0,5888	0,0890	0,5882	46
40	3,982	0,5296	0,0902	0,5290	46
45	3,530	0,4696	0,0871	0,4689	47
50	3,095	0,4117	0,0856	0,4109	47
55	2,667	0,3547	0,0771	0,3539	48
60	2,281	0,3035	0,0716	0,3025	48
65	1,923	0,2558	0,0644	0,2548	49
70	1,601	0,2130	0,0540	0,2120	50
75	1,331	0,1771	0,0528	0,1760	51
80	1,067	0,1420	0,0370	0,1408	52
85	0,883	0,1174	0,0336	0,1162	53
90	0,714	0,0950	0,0300	0,0938	55
95	0,564	0,0751	0,0238	0,0738	56
100	0,446	0,0593	0,0194	0,0580	59
105	0,349	0,0464	0,0168	0,0451	65
110	0,264	0,0352	0,0137	0,0339	73
115	0,196	0,0261	0,0091	0,0248	76
120	0,151	0,0200	0,0085	0,0187	79
125	0,108	0,0144	0,0057	0,0131	79
130	0,080	0,0106	0,0026	0,0093	79
135	0,067	0,0089	0,0018	0,0075	80
140	0,058	0,0077	0,0016	0,0063	80
145	0,050	0,0066	0,0013	0,0053	80
150	0,043	0,0058	0,0013	0,0044	79
155	0,037	0,0049	0,0005	0,0036	79
165	0,032	0,0042	0,0003	0,0029	79
175	0,029	0,0039	0,0001	0,0026	79

Na Tabela A2 estão os dados do adimensional de água livre experimental ( $Y_{exp}$ ) e teórico ( $Y_{teo}$ ), do número de Fourier teórico ( $Fo_{teo}$ ), da variação do adimensional de água livre experimental com o tempo  $(dY/dt)_{exp}$ , da variação do adimensional de água livre teórico com o Fourier  $(dY/dFo)_{teo}$  e da difusividade efetiva de umidade variável ( $D_{EF}$ ), para o período de taxa decrescente (dados utilizados no 1º artigo).

Tabela A2: Dados experimentais e teóricos da secagem de quitosana em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 80°C e espessura da bandeja de 5mm. A umidade inicial da amostra é de 88,2%(b.u) e 7,517 (b.s.) e a umidade de equilíbrio de 0,01 (b.s.). A massa inicial da bandeja foi de 226,55g.

Tempo (h)	$Y_{exp}$	$(dY/dt)_{exp}$ ( $h^{-1}$ )	$Fo_{teo}$	$Y_{teo}$	$(dY/dFo)_{teo}$	$D_{EF}$ ( $m^2/s$ )
0	1	1,6997	0	1	3,0931	$3,82 \times 10^{-09}$
0,0833	0,8583	1,5538	0,07	0,7335	1,8856	$5,72 \times 10^{-09}$
0,1667	0,7288	1,4214	0,14	0,6015	1,5463	$6,38 \times 10^{-09}$
0,2500	0,6104	1,2647	0,21	0,4933	1,2680	$6,93 \times 10^{-09}$
0,3333	0,5050	1,0782	0,28	0,4045	1,0398	$7,20 \times 10^{-09}$
0,4167	0,4151	0,9107	0,35	0,3317	0,8527	$7,42 \times 10^{-09}$
0,5000	0,3392	0,7756	0,42	0,2720	0,6993	$7,70 \times 10^{-09}$
0,5833	0,2746	0,6648	0,49	0,2231	0,5734	$8,05 \times 10^{-09}$
0,6667	0,2192	0,5621	0,56	0,1829	0,4703	$8,30 \times 10^{-09}$
0,7500	0,1724	0,4513	0,63	0,1500	0,3856	$8,13 \times 10^{-09}$
0,8333	0,1348	0,3783	0,7	0,1230	0,3162	$8,31 \times 10^{-09}$
0,9167	0,1032	0,3189	0,77	0,1009	0,2593	$8,54 \times 10^{-09}$
1,0000	0,0767	0,2378	0,84	0,0827	0,2127	$7,77 \times 10^{-09}$
1,0833	0,0568	0,1838	0,91	0,0678	0,1744	$7,32 \times 10^{-09}$
1,1667	0,0415	0,1486	0,98	0,0556	0,1430	$7,22 \times 10^{-09}$
1,2500	0,0292	0,0865	1,05	0,0456	0,1173	$5,12 \times 10^{-09}$
1,3333	0,0219	0,0459	1,12	0,0374	0,0962	$3,32 \times 10^{-09}$
1,4167	0,0181	0,0351	1,19	0,0307	0,0789	$3,09 \times 10^{-09}$
1,5000	0,0152	0,0297	1,26	0,0252	0,0647	$3,19 \times 10^{-09}$
1,5833	0,0127	0,0270	1,33	0,0206	0,0530	$3,54 \times 10^{-09}$
1,6667	0,0105	0,0243	1,4	0,0169	0,0435	$3,88 \times 10^{-09}$
1,7500	0,0084	0,0162	1,47	0,0139	0,0357	$3,16 \times 10^{-09}$
1,8333	0,0071	0,0405	1,54	0,0114	0,0292	$9,62 \times 10^{-09}$
1,9167	0,0037	0,0610	1,61	0,0093	0,0240	$1,77 \times 10^{-08}$

Nas Tabelas A3 a A13 estão os dados experimentais da umidade em base seca ( $X$ ), do adimensional de umidade ( $X/X_0$ ), da taxa de secagem ( $N$ ) e do adimensional de água livre ( $(X-X_E)/(X_0-X_E)$ ) em função do tempo para a obtenção dos gráficos apresentados no 2º artigo, referente aos onze experimentos do planejamento experimental utilizado.

Tabela A3: Dados experimentais da secagem de quitosana purificada em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 60°C e espessura da bandeja de 10mm (experimento 1). A umidade inicial da amostra é de 94,5%(b.u) e 17,18 (b.s.) e a umidade de equilíbrio de 0,04 (b.s.). A massa inicial da bandeja foi de 180,04g.

Tempo (min)	$\bar{X}$ (g <sub>H2O</sub> /g <sub>SS</sub> )	$\bar{X}/X_0$	$N$ (g <sub>H2O</sub> /(g <sub>SS</sub> min))	$((\bar{X}-X_E)/(X_0-X_E))$
0	17,182	1,0000	0,0222	1,0000
5	17,100	0,9952	0,0322	0,9952
10	16,960	0,9871	0,0379	0,9871
15	16,779	0,9765	0,0403	0,9765
20	16,581	0,9650	0,0449	0,9649
25	16,375	0,9531	0,0478	0,9530
30	16,132	0,9389	0,0443	0,9388
35	15,897	0,9252	0,0464	0,9251
40	15,690	0,9132	0,0478	0,9130
45	15,434	0,8983	0,0451	0,8980
50	15,212	0,8853	0,0453	0,8851
55	14,983	0,8720	0,0446	0,8717
60	14,759	0,8590	0,0443	0,8587
65	14,537	0,8461	0,0459	0,8457
70	14,317	0,8332	0,0484	0,8329
75	14,079	0,8194	0,0457	0,8190
80	13,833	0,8051	0,0442	0,8046
85	13,622	0,7928	0,0466	0,7923
90	13,391	0,7794	0,0465	0,7789
95	13,156	0,7657	0,0457	0,7652
100	12,926	0,7523	0,0453	0,7518
105	12,700	0,7391	0,0440	0,7385
110	12,474	0,7260	0,0430	0,7253
115	12,260	0,7135	0,0434	0,7129
120	12,043	0,7009	0,0419	0,7002
125	11,827	0,6883	0,0419	0,6876
130	11,624	0,6765	0,0388	0,6758
135	11,407	0,6639	0,0346	0,6631
140	11,236	0,6539	0,0461	0,6531
145	11,061	0,6438	0,0400	0,6430
151	10,775	0,6271	0,0510	0,6263
155	10,582	0,6159	0,0349	0,6150
160	10,367	0,6034	0,0413	0,6024
165	10,233	0,5956	0,0521	0,5946
170	9,953	0,5793	0,0483	0,5783
175	9,711	0,5652	0,0413	0,5642
180	9,471	0,5512	0,0384	0,5501
185	9,298	0,5412	0,0447	0,5401
190	9,086	0,5288	0,0460	0,5277
195	8,852	0,5152	0,0431	0,5140
200	8,627	0,5021	0,0408	0,5009

## Continuação da Tabela A3

---

205	8,420	0,4901	0,0410	0,4889
210	8,218	0,4783	0,0402	0,4771
215	8,010	0,4662	0,0365	0,4649
220	7,816	0,4549	0,0422	0,4536
225	7,645	0,4449	0,0430	0,4436
230	7,394	0,4303	0,0361	0,4290
235	7,214	0,4199	0,0458	0,4185
240	7,033	0,4093	0,0508	0,4079
245	6,757	0,3932	0,0427	0,3918
250	6,525	0,3797	0,0390	0,3783
255	6,329	0,3684	0,0423	0,3669
260	6,135	0,3570	0,0394	0,3555
265	5,906	0,3437	0,0357	0,3422
270	5,740	0,3341	0,0424	0,3325
275	5,549	0,3230	0,0366	0,3214
280	5,316	0,3094	0,0326	0,3078
285	5,183	0,3017	0,0375	0,3000
290	4,990	0,2904	0,0383	0,2888
295	4,808	0,2798	0,0387	0,2781
300	4,607	0,2681	0,0357	0,2664
305	4,421	0,2573	0,0337	0,2556
310	4,250	0,2474	0,0332	0,2456
315	4,084	0,2377	0,0344	0,2359
320	3,919	0,2281	0,0342	0,2263
325	3,740	0,2177	0,0323	0,2159
330	3,577	0,2082	0,0333	0,2063
335	3,418	0,1989	0,0327	0,1970
340	3,244	0,1888	0,0298	0,1869
345	3,091	0,1799	0,0313	0,1780
350	2,946	0,1715	0,0294	0,1695
355	2,779	0,1617	0,0279	0,1598
360	2,651	0,1543	0,0290	0,1523
365	2,499	0,1455	0,0249	0,1435
370	2,361	0,1374	0,0244	0,1354
375	2,250	0,1310	0,0250	0,1289
380	2,117	0,1232	0,0249	0,1212
385	2,000	0,1164	0,0233	0,1144
390	1,868	0,1087	0,0212	0,1066
395	1,767	0,1029	0,0224	0,1008
400	1,656	0,0964	0,0209	0,0943
405	1,544	0,0898	0,0200	0,0877
410	1,448	0,0843	0,0188	0,0821
415	1,344	0,0782	0,0176	0,0761
420	1,260	0,0733	0,0176	0,0712
425	1,168	0,0679	0,0169	0,0658
430	1,084	0,0631	0,0184	0,0609
435	0,998	0,0581	0,0169	0,0559
440	0,899	0,0523	0,0154	0,0501
445	0,829	0,0482	0,0136	0,0460
450	0,745	0,0434	0,0105	0,0411
455	0,693	0,0403	0,0102	0,0381
460	0,640	0,0373	0,0102	0,0350
466	0,591	0,0344	0,0112	0,0321
470	0,517	0,0301	0,0038	0,0278
475	0,501	0,0292	0,0061	0,0269
480	0,479	0,0279	0,0084	0,0256
485	0,440	0,0256	0,0069	0,0233

---

Continuação da Tabela A3				
490	0,395	0,0230	0,0065	0,0207
495	0,371	0,0216	0,0077	0,0193
500	0,331	0,0192	0,0069	0,0170
505	0,294	0,0171	0,0063	0,0148
510	0,262	0,0153	0,0070	0,0130
515	0,232	0,0135	0,0040	0,0112
520	0,193	0,0112	0,0001	0,0089
525	0,192	0,0112	0,0192	0,0088

Tabela A4: Dados experimentais da secagem de quitosana purificada em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 50°C e espessura da bandeja de 5mm (experimento 2). A umidade inicial da amostra é de 94,5% (b.u.) e 17,18 (b.s.) e a umidade de equilíbrio de 0,09 (b.s.). A massa inicial da bandeja foi de 102,03g.

Tempo (min)	$\bar{X}$ (g <sub>H2O</sub> /g <sub>SS</sub> )	$\bar{X}/X_0$	N(g <sub>H2O</sub> /(g <sub>SS</sub> min))	$((\bar{X}-X_E)/(X_0-X_E))$
0	17,182	1,0000	0,0333	1,0000
7	16,876	0,9822	0,0696	0,9821
10	16,716	0,9729	0,0540	0,9728
15	16,458	0,9579	0,0555	0,9577
20	16,176	0,9414	0,0579	0,9411
25	15,904	0,9256	0,0565	0,9252
30	15,596	0,9077	0,0551	0,9072
35	15,339	0,8927	0,0562	0,8922
40	15,045	0,8757	0,0535	0,8750
45	14,777	0,8600	0,0539	0,8593
50	14,510	0,8445	0,0553	0,8437
55	14,238	0,8287	0,0547	0,8278
60	13,957	0,8123	0,0547	0,8114
65	13,691	0,7968	0,0562	0,7958
70	13,410	0,7805	0,0555	0,7793
75	13,129	0,7641	0,0540	0,7629
80	12,855	0,7482	0,0547	0,7469
85	12,589	0,7327	0,0528	0,7313
90	12,308	0,7163	0,0590	0,7148
95	12,061	0,7020	0,0537	0,7004
100	11,718	0,6820	0,0455	0,6803
105	11,524	0,6707	0,0524	0,6690
110	11,263	0,6555	0,0523	0,6537
115	11,000	0,6402	0,0508	0,6383
120	10,740	0,6251	0,0521	0,6231
125	10,491	0,6106	0,0510	0,6086
130	10,219	0,5948	0,0491	0,5926
135	9,981	0,5809	0,0494	0,5787
140	9,729	0,5662	0,0491	0,5639
145	9,487	0,5522	0,0498	0,5498
150	9,238	0,5377	0,0508	0,5352
155	8,989	0,5232	0,0499	0,5207
160	8,730	0,5081	0,0487	0,5055
165	8,490	0,4941	0,0499	0,4915
170	8,243	0,4797	0,0480	0,4770
175	7,990	0,4651	0,0459	0,4622
180	7,763	0,4518	0,0489	0,4489

---

Continuação da Tabela A4

185	7,532	0,4384	0,0489	0,4354
190	7,274	0,4234	0,0469	0,4203
195	7,043	0,4099	0,0480	0,4068
200	6,805	0,3961	0,0496	0,3929
205	6,563	0,3820	0,0496	0,3787
210	6,309	0,3672	0,0473	0,3639
215	6,067	0,3531	0,0455	0,3497
220	5,836	0,3397	0,0478	0,3362
225	5,612	0,3266	0,0483	0,3231
230	5,358	0,3118	0,0455	0,3082
235	5,129	0,2985	0,0459	0,2948
240	4,903	0,2854	0,0411	0,2816
245	4,670	0,2718	0,0427	0,2680
250	4,492	0,2615	0,0467	0,2576
255	4,244	0,2470	0,0446	0,2430
260	4,025	0,2343	0,0434	0,2302
265	3,797	0,2210	0,0396	0,2169
270	3,591	0,2090	0,0389	0,2048
275	3,401	0,1979	0,0407	0,1937
280	3,202	0,1864	0,0371	0,1821
285	2,994	0,1743	0,0332	0,1699
290	2,830	0,1647	0,0363	0,1603
295	2,662	0,1549	0,0304	0,1505
300	2,468	0,1436	0,0268	0,1391
305	2,358	0,1372	0,0302	0,1327
310	2,199	0,1280	0,0284	0,1234
315	2,055	0,1196	0,0261	0,1150
320	1,915	0,1115	0,0231	0,1068
325	1,794	0,1044	0,0258	0,0997
330	1,684	0,0980	0,0270	0,0933
335	1,536	0,0894	0,0226	0,0846
340	1,414	0,0823	0,0220	0,0775
345	1,311	0,0763	0,0203	0,0714
350	1,193	0,0695	0,0180	0,0646
355	1,108	0,0645	0,0185	0,0596
360	1,014	0,0590	0,0188	0,0541
365	0,923	0,0537	0,0123	0,0488
371	0,825	0,0480	0,0167	0,0430
375	0,776	0,0451	0,0146	0,0401
380	0,692	0,0403	0,0123	0,0352
385	0,630	0,0367	0,0126	0,0316
390	0,570	0,0331	0,0119	0,0281
395	0,504	0,0293	0,0121	0,0242
400	0,450	0,0262	0,0083	0,0211
406	0,383	0,0223	0,0098	0,0171
410	0,351	0,0204	0,0089	0,0153
415	0,305	0,0177	0,0076	0,0126
420	0,262	0,0152	0,0082	0,0101
425	0,228	0,0133	0,0043	0,0081
432	0,180	0,0105	0,0059	0,0053
435	0,168	0,0098	0,0044	0,0046
440	0,145	0,0084	0,0037	0,0032
445	0,123	0,0072	0,0027	0,0020
450	0,107	0,0062	0,0016	0,0010
455	0,097	0,0056	0,0097	0,0004

---

Tabela A5: Dados experimentais da secagem de quitosana purificada em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 70°C e espessura da bandeja de 5mm (experimento 3). A umidade inicial da amostra é de 94,65% (b.u.) e 17,69 (b.s.) e a umidade de equilíbrio de 0,03. A massa inicial da bandeja foi de 102,10g.

Tempo (min)	$\bar{X}$ (g <sub>H2O</sub> /g <sub>SS</sub> )	$\bar{X}/X_0$	N(g <sub>H2O</sub> /(g <sub>SS</sub> min))	$((\bar{X}-X_E)/(X_0-X_E))$
0	17,692	1,0000	0,0733	1,0000
5	17,388	0,9828	0,0969	0,9828
10	16,958	0,9586	0,1051	0,9585
15	16,419	0,9281	0,1039	0,9279
20	15,907	0,8991	0,1061	0,8990
25	15,380	0,8694	0,1073	0,8691
30	14,846	0,8392	0,1079	0,8389
35	14,307	0,8087	0,1048	0,8084
40	13,767	0,7782	0,1084	0,7778
45	13,259	0,7495	0,1064	0,7490
50	12,683	0,7169	0,1000	0,7164
55	12,195	0,6893	0,1022	0,6888
60	11,683	0,6604	0,1042	0,6598
65	11,173	0,6315	0,1006	0,6309
70	10,641	0,6015	0,0967	0,6008
75	10,167	0,5747	0,0997	0,5740
80	9,673	0,5468	0,1004	0,5460
85	9,170	0,5184	0,0989	0,5175
90	8,669	0,4900	0,0936	0,4892
95	8,181	0,4624	0,0945	0,4615
100	7,733	0,4371	0,0975	0,4362
105	7,236	0,4090	0,0978	0,4080
110	6,759	0,3820	0,0909	0,3810
115	6,258	0,3537	0,0905	0,3526
120	5,850	0,3307	0,0914	0,3295
125	5,352	0,3025	0,0914	0,3014
130	4,936	0,2790	0,0878	0,2778
135	4,438	0,2509	0,0808	0,2496
140	4,058	0,2294	0,0823	0,2281
145	3,630	0,2052	0,0677	0,2038
151	3,235	0,1829	0,0965	0,1815
155	2,818	0,1593	0,0644	0,1579
160	2,463	0,1392	0,0600	0,1378
165	2,174	0,1229	0,0603	0,1214
170	1,864	0,1053	0,0508	0,1038
175	1,571	0,0888	0,0421	0,0872
180	1,355	0,0766	0,0435	0,0750
185	1,150	0,0650	0,0239	0,0634
192	0,920	0,0520	0,0472	0,0504
195	0,816	0,0461	0,0216	0,0445
201	0,637	0,0360	0,0199	0,0343
205	0,556	0,0314	0,0161	0,0298
210	0,477	0,0270	0,0139	0,0253
215	0,395	0,0223	0,0115	0,0207
220	0,339	0,0191	0,0099	0,0175
225	0,280	0,0158	0,0082	0,0142
230	0,240	0,0136	0,0082	0,0119
235	0,198	0,0112	0,0049	0,0095
240	0,157	0,0089	0,0049	0,0072

Continuação da Tabela A5				
245	0,148	0,0084	0,0044	0,0067
251	0,108	0,0061	0,0034	0,0044
255	0,095	0,0054	0,0027	0,0037
260	0,081	0,0046	0,0018	0,0029
265	0,068	0,0038	0,0018	0,0021
270	0,062	0,0035	0,0020	0,0018
275	0,050	0,0028	0,0011	0,0011
280	0,042	0,0024	0,0007	0,0007
285	0,039	0,0022	0,0005	0,0005
290	0,035	0,0020	0,0035	0,0003

Tabela A6: Dados experimentais da secagem de quitosana purificada em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 50°C e espessura da bandeja de 15mm (experimento 4). A umidade inicial da amostra é de 94,33% (b.u.) e 16,63 (b.s.) e a umidade de equilíbrio de 0,09. A massa inicial da bandeja foi de 249,50g.

Tempo (min)	$\bar{X}$ (g <sub>H2O</sub> /g <sub>SS</sub> )	$\bar{X}/X_0$	N(g <sub>H2O</sub> /(g <sub>SS</sub> min))	$((\bar{X}-X_E)/(X_0-X_E))$
0	16,637	1,0000	0,0119	1,0000
5	16,590	0,9972	0,0156	0,9971
10	16,518	0,9928	0,0181	0,9928
15	16,434	0,9878	0,0200	0,9877
20	16,337	0,9820	0,0206	0,9819
25	16,234	0,9758	0,0221	0,9757
30	16,131	0,9696	0,0265	0,9694
35	16,013	0,9625	0,0194	0,9623
41	15,865	0,9536	0,0253	0,9534
45	15,780	0,9485	0,0234	0,9482
50	15,663	0,9415	0,0237	0,9412
55	15,545	0,9344	0,0359	0,9341
60	15,427	0,9273	0,0176	0,9269
70	15,186	0,9128	0,0216	0,9124
75	15,074	0,9061	0,0251	0,9055
80	14,970	0,8998	0,0265	0,8993
85	14,823	0,8910	0,0231	0,8904
90	14,706	0,8839	0,0229	0,8833
95	14,592	0,8771	0,0289	0,8764
100	14,477	0,8702	0,0246	0,8695
105	14,303	0,8597	0,0178	0,8590
110	14,230	0,8554	0,0226	0,8546
115	14,125	0,8490	0,0236	0,8482
120	14,004	0,8418	0,0230	0,8409
125	13,889	0,8348	0,0227	0,8339
130	13,774	0,8279	0,0239	0,8270
135	13,662	0,8212	0,0241	0,8202
140	13,535	0,8136	0,0225	0,8125
145	13,421	0,8067	0,0239	0,8056
150	13,310	0,8000	0,0245	0,7989
155	13,182	0,7924	0,0223	0,7912
160	13,065	0,7853	0,0227	0,7841
165	12,959	0,7789	0,0225	0,7777
170	12,837	0,7716	0,0213	0,7704
175	12,734	0,7654	0,0234	0,7642



## Continuação da Tabela A6

---

180	12,625	0,7588	0,0270	0,7575
185	12,501	0,7514	0,0244	0,7500
190	12,354	0,7426	0,0187	0,7412
195	12,256	0,7367	0,0196	0,7353
200	12,168	0,7314	0,0218	0,7299
205	12,061	0,7249	0,0247	0,7234
210	11,950	0,7183	0,0199	0,7168
216	11,814	0,7101	0,0255	0,7085
220	11,711	0,7040	0,0218	0,7023
225	11,609	0,6978	0,0232	0,6962
230	11,493	0,6908	0,0228	0,6892
235	11,377	0,6839	0,0440	0,6821
240	11,265	0,6771	0,0219	0,6754
245	10,937	0,6574	0,0030	0,6555
250	11,046	0,6640	0,0230	0,6621
255	10,908	0,6556	0,0215	0,6538
260	10,816	0,6501	0,0227	0,6482
265	10,693	0,6427	0,0212	0,6408
270	10,589	0,6365	0,0228	0,6345
275	10,481	0,6300	0,0221	0,6280
280	10,360	0,6228	0,0200	0,6207
285	10,260	0,6167	0,0225	0,6146
290	10,161	0,6107	0,0242	0,6086
295	10,035	0,6032	0,0222	0,6010
300	9,918	0,5962	0,0217	0,5940
305	9,813	0,5898	0,0222	0,5876
310	9,702	0,5831	0,0220	0,5809
315	9,590	0,5765	0,0222	0,5742
320	9,482	0,5699	0,0229	0,5676
325	9,369	0,5631	0,0232	0,5608
330	9,253	0,5562	0,0270	0,5538
335	9,137	0,5492	0,0151	0,5468
342	8,983	0,5399	0,0295	0,5374
345	8,925	0,5365	0,0226	0,5339
350	8,806	0,5293	0,0225	0,5268
355	8,699	0,5229	0,0230	0,5203
360	8,581	0,5158	0,0224	0,5132
365	8,469	0,5090	0,0223	0,5064
370	8,358	0,5024	0,0220	0,4997
375	8,246	0,4956	0,0223	0,4929
380	8,138	0,4892	0,0222	0,4864
385	8,023	0,4822	0,0220	0,4794
390	7,915	0,4758	0,0234	0,4729
395	7,803	0,4690	0,0227	0,4661
400	7,682	0,4617	0,0213	0,4588
405	7,576	0,4554	0,0218	0,4524
410	7,469	0,4490	0,0217	0,4460
415	7,359	0,4423	0,0220	0,4393
420	7,252	0,4359	0,0220	0,4329
425	7,138	0,4291	0,0216	0,4260
430	7,032	0,4227	0,0230	0,4195
435	6,922	0,4161	0,0228	0,4129
440	6,802	0,4088	0,0219	0,4056
445	6,694	0,4024	0,0216	0,3991
450	6,583	0,3957	0,0215	0,3924
455	6,478	0,3894	0,0217	0,3861
460	6,367	0,3827	0,0203	0,3794

---

---

Continuação da Tabela A6

465	6,261	0,3763	0,0208	0,3730
470	6,164	0,3705	0,0219	0,3671
475	6,053	0,3639	0,0206	0,3604
480	5,945	0,3573	0,0212	0,3538
485	5,847	0,3515	0,0223	0,3479
490	5,733	0,3446	0,0196	0,3410
495	5,624	0,3380	0,0172	0,3344
500	5,537	0,3328	0,0196	0,3292
505	5,452	0,3277	0,0215	0,3241
510	5,341	0,3210	0,0196	0,3173
515	5,237	0,3148	0,0196	0,3110
520	5,145	0,3092	0,0196	0,3055
525	5,040	0,3030	0,0189	0,2992
530	4,949	0,2975	0,0194	0,2936
535	4,851	0,2916	0,0192	0,2877
540	4,755	0,2858	0,0176	0,2819
545	4,659	0,2800	0,0179	0,2761
550	4,579	0,2752	0,0185	0,2713
555	4,480	0,2693	0,0178	0,2653
560	4,393	0,2641	0,0179	0,2601
565	4,302	0,2586	0,0175	0,2545
570	4,215	0,2533	0,0173	0,2493
575	4,127	0,2481	0,0172	0,2440
580	4,041	0,2429	0,0170	0,2388
585	3,955	0,2378	0,0170	0,2336
590	3,872	0,2327	0,0169	0,2285
595	3,785	0,2275	0,0166	0,2233
600	3,703	0,2226	0,0168	0,2183
605	3,619	0,2175	0,0168	0,2133
610	3,534	0,2125	0,0161	0,2082
615	3,451	0,2075	0,0158	0,2031
620	3,373	0,2028	0,0158	0,1984
625	3,294	0,1980	0,0161	0,1936
630	3,216	0,1933	0,0156	0,1889
635	3,132	0,1883	0,0155	0,1839
640	3,060	0,1839	0,0156	0,1795
645	2,978	0,1790	0,0149	0,1745
650	2,904	0,1745	0,0147	0,1700
655	2,828	0,1700	0,0156	0,1655
660	2,757	0,1657	0,0144	0,1612
665	2,672	0,1606	0,0132	0,1560
670	2,613	0,1571	0,0143	0,1525
675	2,540	0,1527	0,0138	0,1481
680	2,470	0,1485	0,0133	0,1438
685	2,402	0,1444	0,0128	0,1398
690	2,337	0,1405	0,0126	0,1358
695	2,274	0,1367	0,0126	0,1320
700	2,211	0,1329	0,0128	0,1282
705	2,148	0,1291	0,0125	0,1244
710	2,083	0,1252	0,0114	0,1204
715	2,023	0,1216	0,0103	0,1168
720	1,969	0,1183	0,0109	0,1135
725	1,920	0,1154	0,0120	0,1106
730	1,860	0,1118	0,0106	0,1069
735	1,800	0,1082	0,0100	0,1033
740	1,754	0,1054	0,0107	0,1006
745	1,700	0,1022	0,0111	0,0973

---

---

Continuação da Tabela A6

750	1,647	0,0990	0,0106	0,0941
755	1,589	0,0955	0,0108	0,0906
760	1,541	0,0926	0,0079	0,0877
766	1,481	0,0890	0,0120	0,0841
770	1,446	0,0869	0,0109	0,0820
775	1,385	0,0833	0,0066	0,0783
782	1,337	0,0804	0,0147	0,0754
785	1,292	0,0777	0,0089	0,0727
790	1,249	0,0751	0,0077	0,0701
795	1,203	0,0723	0,0075	0,0673
800	1,172	0,0704	0,0070	0,0654
805	1,128	0,0678	0,0067	0,0627
810	1,102	0,0662	0,0082	0,0612
815	1,061	0,0638	0,0076	0,0587
820	1,020	0,0613	0,0073	0,0562
825	0,985	0,0592	0,0073	0,0541
830	0,947	0,0569	0,0068	0,0518
835	0,913	0,0549	0,0062	0,0497
840	0,879	0,0528	0,0066	0,0477
845	0,851	0,0511	0,0069	0,0460
850	0,813	0,0489	0,0062	0,0437
855	0,782	0,0470	0,0071	0,0418
860	0,751	0,0451	0,0063	0,0399
865	0,711	0,0427	-0,3254	0,0375
870	0,688	0,0414	0,0063	0,0362
875	3,965	0,2383	0,3360	0,2342
880	0,626	0,0376	0,0048	0,0324
885	0,604	0,0363	0,0051	0,0311
890	0,578	0,0347	0,0049	0,0295
895	0,553	0,0332	0,0048	0,0280
900	0,528	0,0318	0,0046	0,0265
905	0,505	0,0304	0,0044	0,0251
910	0,483	0,0290	0,0039	0,0237
915	0,461	0,0277	0,0035	0,0224
920	0,444	0,0267	0,0040	0,0214
925	0,426	0,0256	0,0043	0,0203
930	0,404	0,0243	0,0036	0,0190
935	0,383	0,0230	0,0032	0,0177
940	0,368	0,0221	0,0034	0,0168
945	0,351	0,0211	0,0030	0,0158
950	0,334	0,0201	0,0028	0,0148
955	0,321	0,0193	0,0030	0,0140
960	0,306	0,0184	0,0026	0,0130
965	0,291	0,0175	0,0023	0,0122
970	0,280	0,0168	0,0023	0,0115
975	0,269	0,0161	0,0023	0,0108
980	0,257	0,0155	0,0024	0,0101
985	0,245	0,0147	0,0023	0,0094
990	0,233	0,0140	0,0012	0,0087
997	0,222	0,0134	0,0027	0,0080
1000	0,217	0,0130	0,0018	0,0076
1005	0,206	0,0124	0,0016	0,0070
1010	0,198	0,0119	0,0015	0,0065
1015	0,190	0,0114	0,0015	0,0060
1020	0,183	0,0110	0,0016	0,0056
1025	0,175	0,0105	0,0014	0,0051
1030	0,167	0,0100	0,0007	0,0046

---

Continuação da Tabela A6				
1035	0,161	0,0097	0,0015	0,0043
1040	0,159	0,0096	0,0017	0,0042
1045	0,145	0,0087	0,0145	0,0033

Tabela A7: Dados experimentais da secagem de quitosana purificada em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 70°C e espessura da bandeja de 15mm (experimento 5). A umidade inicial da amostra é de 94,80% (b.u.) e 18,23 (b.s.) e a umidade de equilíbrio de 0,03. A massa inicial da bandeja foi de 249,40g.

Tempo (min)	$\bar{X}$ (g <sub>H2O</sub> /g <sub>SS</sub> )	$\bar{X}/X_0$	N(g <sub>H2O</sub> /(g <sub>SS</sub> min))	$((\bar{X}-X_E)/(X_0-X_E))$
0	18,231	1,0000	0,0238	1,0000
5	18,132	0,9946	0,0304	0,9946
10	17,993	0,9870	0,0351	0,9869
15	17,829	0,9779	0,0383	0,9779
20	17,642	0,9677	0,0403	0,9676
25	17,445	0,9569	0,0416	0,9569
30	17,239	0,9456	0,0423	0,9455
35	17,029	0,9341	0,0431	0,9340
40	16,816	0,9224	0,0421	0,9222
45	16,598	0,9104	0,0429	0,9103
50	16,394	0,8993	0,0449	0,8991
55	16,169	0,8869	0,0439	0,8867
60	15,945	0,8746	-0,4413	0,8744
65	15,730	0,8628	0,0428	0,8626
70	20,358	1,1167	0,5274	1,1169
75	15,301	0,8393	0,0438	0,8390
80	15,084	0,8274	0,0442	0,8271
85	14,863	0,8153	0,0488	0,8149
90	14,642	0,8031	0,0433	0,8028
95	14,375	0,7885	0,0386	0,7882
100	14,209	0,7794	0,0434	0,7790
105	13,989	0,7673	0,0427	0,7669
110	13,775	0,7556	0,0430	0,7552
115	13,562	0,7439	0,0430	0,7435
120	13,345	0,7320	0,0426	0,7316
125	13,132	0,7203	0,0415	0,7199
130	12,919	0,7086	0,0425	0,7082
135	12,717	0,6975	0,0430	0,6970
140	12,495	0,6854	0,0415	0,6848
145	12,287	0,6740	0,0368	0,6734
151	12,079	0,6626	0,0539	0,6620
155	11,845	0,6497	0,0405	0,6492
160	11,648	0,6389	0,0424	0,6383
165	11,441	0,6276	0,0421	0,6269
170	11,224	0,6157	0,0418	0,6150
175	11,019	0,6044	0,0425	0,6038
180	10,806	0,5927	0,0423	0,5920
185	10,595	0,5811	0,0425	0,5805
190	10,382	0,5695	0,0418	0,5688
195	10,169	0,5578	0,0416	0,5571
200	9,965	0,5466	0,0418	0,5458
205	9,753	0,5350	0,0414	0,5342

---

Continuação da Tabela A7

210	9,546	0,5236	0,0416	0,5229
215	9,340	0,5123	0,0415	0,5115
220	9,130	0,5008	0,0405	0,5000
225	8,924	0,4895	0,0399	0,4887
230	8,725	0,4786	0,0394	0,4777
235	8,525	0,4676	0,0390	0,4667
240	8,331	0,4570	0,0392	0,4561
245	8,135	0,4462	0,0385	0,4453
250	7,939	0,4355	0,0385	0,4345
255	7,750	0,4251	0,0375	0,4242
260	7,554	0,4144	0,0367	0,4134
265	7,375	0,4045	0,0376	0,4036
270	7,187	0,3942	0,0403	0,3933
275	6,999	0,3839	0,0292	0,3829
281	6,784	0,3721	0,0393	0,3711
285	6,648	0,3647	0,0404	0,3636
290	6,470	0,3549	0,0339	0,3538
295	6,245	0,3425	0,0289	0,3414
300	6,131	0,3363	0,0345	0,3352
305	5,955	0,3267	0,0326	0,3256
310	5,786	0,3174	0,0339	0,3163
315	5,629	0,3088	0,0315	0,3076
320	5,447	0,2988	0,0310	0,2976
325	5,315	0,2915	0,0331	0,2904
330	5,137	0,2818	0,0315	0,2806
335	4,984	0,2734	0,0309	0,2722
340	4,822	0,2645	0,0308	0,2633
345	4,675	0,2564	0,0303	0,2552
350	4,513	0,2476	0,0278	0,2463
355	4,372	0,2398	0,0288	0,2385
360	4,235	0,2323	0,0302	0,2310
365	4,084	0,2240	0,0284	0,2227
370	3,933	0,2157	0,0263	0,2145
375	3,800	0,2084	0,0258	0,2071
380	3,670	0,2013	0,0252	0,2000
385	3,543	0,1943	0,0255	0,1930
390	3,418	0,1875	0,0264	0,1861
395	3,288	0,1804	0,0258	0,1790
400	3,154	0,1730	0,0242	0,1716
405	3,030	0,1662	0,0235	0,1648
410	2,912	0,1597	0,0222	0,1583
415	2,794	0,1533	0,0218	0,1519
420	2,690	0,1475	0,0223	0,1461
425	2,576	0,1413	0,0214	0,1399
430	2,467	0,1353	0,0215	0,1339
435	2,362	0,1296	0,0207	0,1281
440	2,251	0,1235	0,0184	0,1220
445	2,155	0,1182	0,0188	0,1168
450	2,067	0,1134	0,0189	0,1119
455	1,967	0,1079	0,0172	0,1064
460	1,878	0,1030	0,0142	0,1015
466	1,795	0,0985	0,0224	0,0970
470	1,707	0,0937	0,0169	0,0922
475	1,616	0,0886	0,0149	0,0871
480	1,538	0,0844	0,0139	0,0829
485	1,467	0,0804	0,0148	0,0789
490	1,399	0,0767	0,0142	0,0752

---

---

Continuação da Tabela A7

495	1,318	0,0723	0,0124	0,0708
500	1,257	0,0689	0,0125	0,0674
505	1,194	0,0655	0,0125	0,0640
510	1,132	0,0621	0,0115	0,0605
515	1,070	0,0587	0,0116	0,0571
520	1,017	0,0558	0,0145	0,0542
525	0,954	0,0523	0,0079	0,0507
532	0,872	0,0478	0,0131	0,0463
535	0,843	0,0462	0,0093	0,0447
540	0,794	0,0435	0,0088	0,0420
545	0,750	0,0411	0,0092	0,0395
550	0,705	0,0387	0,0083	0,0371
555	0,658	0,0361	0,0085	0,0345
560	0,622	0,0341	0,0083	0,0325
565	0,574	0,0315	0,0075	0,0299
570	0,539	0,0296	0,0072	0,0280
575	0,498	0,0273	0,0066	0,0257
580	0,468	0,0256	0,0066	0,0240
585	0,432	0,0237	0,0064	0,0221
590	0,401	0,0220	0,0041	0,0204
596	0,368	0,0202	0,0053	0,0186
600	0,352	0,0193	0,0046	0,0177
605	0,326	0,0179	0,0042	0,0163
610	0,306	0,0168	0,0039	0,0152
615	0,284	0,0156	0,0035	0,0139
620	0,267	0,0146	0,0032	0,0130
625	0,248	0,0136	0,0030	0,0120
630	0,234	0,0129	0,0029	0,0112
635	0,218	0,0120	0,0022	0,0103
640	0,205	0,0113	0,0028	0,0096
645	0,196	0,0108	0,0024	0,0091
650	0,177	0,0097	0,0015	0,0081
655	0,172	0,0094	0,0018	0,0078
660	0,162	0,0089	0,0018	0,0073
665	0,154	0,0084	0,0018	0,0068
670	0,144	0,0079	0,0015	0,0062
675	0,135	0,0074	0,0015	0,0058
680	0,129	0,0071	0,0016	0,0054
685	0,121	0,0066	0,0012	0,0050
690	0,113	0,0062	0,0010	0,0046
695	0,109	0,0060	0,0009	0,0043
700	0,103	0,0056	0,0011	0,0040
705	0,100	0,0055	0,0013	0,0038
710	0,092	0,0051	0,0010	0,0034
715	0,087	0,0048	0,0008	0,0031
720	0,082	0,0045	0,0009	0,0029
725	0,078	0,0043	0,0010	0,0027
730	0,073	0,0040	0,0007	0,0024
735	0,068	0,0037	0,0004	0,0021
740	0,066	0,0036	0,0004	0,0020
745	0,064	0,0035	0,0012	0,0019
750	0,062	0,0034	0,0012	0,0018
755	0,052	0,0029	0,0002	0,0012
760	0,051	0,0028	0,0005	0,0011
765	0,050	0,0027	0,0007	0,0011
770	0,045	0,0025	0,0006	0,0008
775	0,043	0,0024	0,0004	0,0007

---

Continuação da Tabela A7				
780	0,039	0,0021	0,0002	0,0005
785	0,039	0,0021	0,0004	0,0005
790	0,037	0,0020	0,0008	0,0004
795	0,035	0,0019	0,0006	0,0003

Tabela A8: Dados experimentais da secagem de quitosana purificada em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 60°C e espessura da bandeja de 10mm (experimento 6). A umidade inicial da amostra é de 94,91% (b.u.) e 18,64 (b.s.) e a umidade de equilíbrio de 0,04. A massa inicial da bandeja foi de 183,27g.

Tempo (min)	$\bar{X}$ (g <sub>H2O</sub> /g <sub>SS</sub> )	$\bar{X}/X_0$	N(g <sub>H2O</sub> /(g <sub>SS</sub> min))	$((\bar{X}-X_E)/(X_0-X_E))$
0	18,646	1,0000	0,0257	1,0000
5	18,554	0,9951	0,0337	0,9950
10	18,389	0,9862	0,0345	0,9862
15	18,218	0,9770	0,0427	0,9770
20	18,044	0,9677	0,0491	0,9676
25	17,791	0,9541	0,0551	0,9540
30	17,553	0,9414	0,0503	0,9412
35	17,240	0,9246	0,0227	0,9244
40	17,050	0,9144	0,0470	0,9142
45	17,013	0,9124	0,0554	0,9122
51	16,581	0,8892	0,0486	0,8890
55	16,348	0,8767	0,0438	0,8765
60	16,192	0,8683	0,0532	0,8681
65	15,910	0,8532	0,0483	0,8529
70	15,660	0,8398	0,0481	0,8395
75	15,426	0,8273	0,0471	0,8269
80	15,178	0,8140	0,0503	0,8136
85	14,956	0,8021	0,0472	0,8016
90	14,676	0,7871	0,0431	0,7866
95	14,484	0,7768	0,0517	0,7763
100	14,245	0,7639	0,0587	0,7634
105	13,967	0,7491	0,0445	0,7485
110	13,657	0,7324	0,0327	0,7319
115	13,522	0,7252	0,0426	0,7246
120	13,330	0,7149	0,0461	0,7143
125	13,097	0,7024	0,0482	0,7017
130	12,869	0,6902	0,0473	0,6895
135	12,614	0,6765	0,0460	0,6758
140	12,397	0,6648	0,0470	0,6641
145	12,154	0,6518	0,0391	0,6511
151	11,927	0,6396	0,0578	0,6389
155	11,685	0,6267	0,0423	0,6259
160	11,465	0,6149	0,0479	0,6140
165	11,261	0,6039	0,0543	0,6031
170	10,986	0,5892	0,0515	0,5883
175	10,718	0,5748	0,0509	0,5739
180	10,471	0,5616	0,0496	0,5606
185	10,209	0,5475	0,0466	0,5465
190	9,975	0,5350	0,0438	0,5340
195	9,742	0,5225	0,0419	0,5215
200	9,537	0,5114	0,0480	0,5104
205	9,323	0,5000	0,0490	0,4989

---

 Continuação da Tabela A8

210	9,056	0,4857	0,0662	0,4846
215	8,833	0,4737	0,0311	0,4726
225	8,394	0,4502	0,0422	0,4490
230	8,212	0,4404	0,0461	0,4392
235	7,971	0,4275	0,0515	0,4263
240	7,751	0,4157	0,0473	0,4144
245	7,457	0,3999	0,0404	0,3986
250	7,278	0,3903	0,0458	0,3890
255	7,053	0,3782	0,0432	0,3769
260	6,820	0,3658	0,0394	0,3644
265	6,621	0,3551	0,0407	0,3537
270	6,426	0,3446	0,0405	0,3432
275	6,213	0,3332	0,0451	0,3318
280	6,020	0,3229	0,0452	0,3214
285	5,762	0,3090	0,0367	0,3075
290	5,568	0,2986	0,0550	0,2971
295	5,395	0,2894	0,0282	0,2878
305	5,018	0,2691	0,0546	0,2676
310	4,831	0,2591	0,0268	0,2575
320	4,473	0,2399	0,0344	0,2382
325	4,295	0,2303	0,0339	0,2287
330	4,128	0,2214	0,0326	0,2197
335	3,956	0,2121	0,0317	0,2105
340	3,803	0,2039	0,0322	0,2022
345	3,639	0,1951	0,0319	0,1934
350	3,481	0,1867	0,0299	0,1849
355	3,319	0,1780	0,0291	0,1762
360	3,182	0,1706	0,0311	0,1689
365	3,029	0,1624	0,0265	0,1606
370	2,871	0,1540	0,0273	0,1521
375	2,764	0,1482	0,0286	0,1464
380	2,615	0,1421	0,0265	0,1405
385	2,478	0,1329	0,0248	0,1310
390	2,351	0,1261	0,0241	0,1242
395	2,230	0,1196	0,0238	0,1177
400	2,110	0,1132	0,0233	0,1112
405	1,992	0,1068	0,0223	0,1049
410	1,877	0,1007	0,0211	0,0987
415	1,769	0,0949	0,0204	0,0929
420	1,666	0,0893	0,0199	0,0874
425	1,565	0,0839	0,0200	0,0820
430	1,467	0,0787	0,0204	0,0767
435	1,365	0,0732	0,0180	0,0712
440	1,263	0,0677	0,0163	0,0657
445	1,185	0,0635	0,0174	0,0615
450	1,100	0,0590	0,0153	0,0570
455	1,011	0,0542	0,0157	0,0522
460	0,947	0,0508	0,0119	0,0487
466	0,855	0,0458	0,0153	0,0438
470	0,804	0,0431	0,0125	0,0411
475	0,732	0,0393	0,0113	0,0372
480	0,679	0,0364	0,0110	0,0343
485	0,620	0,0332	0,0102	0,0312
490	0,568	0,0305	0,0107	0,0284
495	0,518	0,0278	0,0094	0,0257
500	0,461	0,0247	0,0076	0,0226
505	0,424	0,0227	0,0073	0,0206

---



Continuação da Tabela A8				
510	0,385	0,0206	0,0071	0,0185
515	0,351	0,0188	0,0070	0,0167
520	0,314	0,0169	0,0068	0,0147
525	0,281	0,0151	0,0050	0,0130
531	0,247	0,0132	0,0063	0,0111
535	0,221	0,0119	0,0043	0,0097
540	0,196	0,0105	0,0041	0,0084
545	0,178	0,0096	0,0038	0,0074
550	0,156	0,0083	0,0031	0,0062
555	0,141	0,0075	0,0033	0,0054
560	0,125	0,0067	0,0027	0,0045
565	0,107	0,0058	0,0020	0,0036
570	0,098	0,0052	0,0018	0,0031
575	0,087	0,0047	0,0018	0,0025
580	0,079	0,0043	0,0017	0,0021
585	0,069	0,0037	0,0013	0,0015
590	0,062	0,0033	0,0018	0,0012
595	0,056	0,0030	0,0017	0,0009
600	0,044	0,0024	0,0006	0,0002

Tabela A9: Dados experimentais da secagem de quitosana purificada em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 46°C e espessura da bandeja de 10mm (experimento 7). A umidade inicial da amostra é de 94,60% (b.u.) e 17,55 (b.s.) e a umidade de equilíbrio de 0,095. A massa inicial da bandeja foi de 186,07g.

Tempo (min)	$\bar{X}$ (g <sub>H2O</sub> /g <sub>SS</sub> )	$\bar{X}/X_0$	N(g <sub>H2O</sub> /(g <sub>SS</sub> min))	$((\bar{X}-X_E)/(X_0-X_E))$
0	17,553	1,0000	0,0122	1,0000
5	17,512	0,9977	0,0186	0,9977
10	17,431	0,9931	0,0223	0,9930
15	17,326	0,9870	0,0256	0,9870
20	17,208	0,9803	0,0270	0,9802
25	17,069	0,9724	0,0273	0,9723
30	16,938	0,9650	0,0285	0,9648
35	16,796	0,9569	0,0281	0,9567
40	16,653	0,9487	0,0279	0,9484
45	16,515	0,9409	0,0275	0,9405
50	16,373	0,9328	0,0285	0,9324
55	16,240	0,9252	0,0281	0,9248
60	16,088	0,9166	0,0272	0,9161
65	15,959	0,9092	0,0289	0,9087
70	15,816	0,9010	0,0282	0,9005
75	15,669	0,8927	0,0269	0,8921
80	15,534	0,8850	0,0258	0,8843
85	15,400	0,8774	0,0260	0,8767
90	15,276	0,8703	0,0269	0,8696
95	15,140	0,8625	0,0270	0,8618
100	15,006	0,8549	0,0267	0,8541
105	14,870	0,8471	0,0265	0,8463
110	14,739	0,8397	0,0263	0,8388
115	14,604	0,8320	0,0253	0,8311
120	14,476	0,8247	0,0264	0,8237
125	14,351	0,8176	0,0253	0,8166
130	14,212	0,8096	0,0263	0,8086

## Continuação da Tabela A9

---

135	14,098	0,8032	0,0287	0,8021
140	13,948	0,7946	0,0261	0,7935
145	13,811	0,7868	0,0215	0,7857
151	13,687	0,7798	0,0329	0,7786
155	13,553	0,7721	0,0268	0,7709
160	13,424	0,7648	0,0255	0,7635
165	13,284	0,7568	0,0242	0,7555
170	13,169	0,7502	0,0260	0,7489
175	13,042	0,7430	0,0263	0,7416
180	12,908	0,7354	0,0261	0,7340
185	12,779	0,7280	0,0272	0,7265
190	12,647	0,7205	0,0266	0,7190
195	12,507	0,7125	0,0269	0,7109
200	12,381	0,7054	0,0266	0,7037
205	12,237	0,6972	0,0262	0,6955
210	12,115	0,6902	0,0277	0,6885
215	11,975	0,6822	0,0264	0,6805
220	11,838	0,6744	0,0254	0,6726
225	11,711	0,6672	0,0267	0,6654
230	11,583	0,6599	0,0297	0,6581
235	11,444	0,6520	0,0269	0,6501
240	11,286	0,6430	0,0244	0,6410
245	11,174	0,6366	0,0257	0,6346
250	11,042	0,6291	0,0249	0,6270
255	10,917	0,6220	0,0329	0,6199
260	10,793	0,6149	0,0277	0,6128
265	10,588	0,6032	0,0205	0,6011
270	10,515	0,5991	0,0263	0,5969
275	10,383	0,5915	0,0268	0,5893
280	10,252	0,5841	0,0274	0,5818
285	10,115	0,5762	0,0241	0,5739
290	9,978	0,5685	0,0203	0,5661
295	9,873	0,5625	0,0258	0,5601
300	9,775	0,5569	0,0286	0,5545
305	9,615	0,5478	0,0284	0,5453
310	9,488	0,5406	0,0267	0,5381
315	9,331	0,5316	0,0233	0,5290
320	9,221	0,5253	0,0254	0,5228
325	9,098	0,5183	0,0260	0,5157
330	8,967	0,5109	0,0267	0,5082
335	8,837	0,5035	0,0275	0,5008
340	8,700	0,4956	0,0170	0,4929
346	8,562	0,4878	0,0251	0,4850
350	8,495	0,4840	0,0258	0,4812
355	8,362	0,4764	0,0248	0,4735
360	8,237	0,4693	0,0242	0,4664
365	8,113	0,4622	0,0262	0,4593
370	7,995	0,4555	0,0246	0,4525
375	7,851	0,4473	0,0225	0,4443
380	7,748	0,4414	0,0240	0,4384
385	7,626	0,4344	0,0234	0,4314
390	7,508	0,4277	0,0282	0,4246
395	7,392	0,4211	0,0180	0,4180
402	7,226	0,4117	0,0213	0,4085
405	7,139	0,4067	0,0232	0,4035
410	7,098	0,4044	0,0323	0,4012
415	6,907	0,3935	0,0221	0,3902

---

## Continuação da Tabela A9

---

420	6,775	0,3860	0,0198	0,3827
425	6,686	0,3809	0,0235	0,3775
430	6,577	0,3747	0,0238	0,3713
435	6,450	0,3675	0,0229	0,3640
440	6,339	0,3611	0,0225	0,3576
445	6,221	0,3544	0,0220	0,3509
450	6,113	0,3483	0,0224	0,3447
455	6,001	0,3419	0,0219	0,3383
460	5,889	0,3355	0,0184	0,3319
466	5,781	0,3294	0,0259	0,3257
470	5,669	0,3229	0,0210	0,3193
475	5,574	0,3175	0,0219	0,3138
480	5,458	0,3110	0,0220	0,3072
485	5,354	0,3050	0,0207	0,3013
490	5,238	0,2984	0,0197	0,2946
495	5,147	0,2932	0,0205	0,2894
500	5,040	0,2872	0,0192	0,2833
505	4,942	0,2815	0,0196	0,2776
510	4,848	0,2762	0,0202	0,2723
515	4,745	0,2703	0,0208	0,2664
520	4,646	0,2647	0,0195	0,2607
525	4,537	0,2585	0,0185	0,2544
530	4,450	0,2535	0,0192	0,2495
535	4,351	0,2479	0,0199	0,2438
540	4,258	0,2426	0,0192	0,2384
545	4,152	0,2365	0,0182	0,2324
550	4,065	0,2316	0,0186	0,2274
555	3,970	0,2261	0,0189	0,2219
560	3,879	0,2210	0,0188	0,2167
565	3,780	0,2154	0,0178	0,2111
570	3,690	0,2102	0,0171	0,2059
575	3,602	0,2052	0,0167	0,2009
580	3,520	0,2005	0,0167	0,1962
585	3,435	0,1957	0,0188	0,1913
590	3,353	0,1910	0,0169	0,1866
595	3,247	0,1850	0,0159	0,1805
600	3,185	0,1814	0,0161	0,1770
605	3,088	0,1759	0,0139	0,1714
610	3,024	0,1723	0,0156	0,1678
615	2,949	0,1680	0,0158	0,1635
620	2,869	0,1634	0,0150	0,1589
625	2,792	0,1591	0,0220	0,1545
630	2,719	0,1549	0,0145	0,1503
640	2,572	0,1465	0,0144	0,1419
650	2,430	0,1384	0,0140	0,1338
660	2,284	0,1301	0,0129	0,1254
670	2,150	0,1225	0,0117	0,1177
680	2,026	0,1154	0,0114	0,1106
690	1,915	0,1091	0,0117	0,1043
700	1,799	0,1025	0,0149	0,0976
710	1,682	0,0958	0,0092	0,0909
725	1,502	0,0856	0,0096	0,0806
735	1,407	0,0802	0,0097	0,0752
745	1,309	0,0746	0,0090	0,0696
755	1,214	0,0691	0,0084	0,0641
765	1,130	0,0644	0,0082	0,0593
775	1,045	0,0595	0,0083	0,0544

---

Continuação da Tabela A9				
785	0,965	0,0550	0,0060	0,0498
797	0,879	0,0500	0,0072	0,0449
805	0,821	0,0468	0,0059	0,0416
815	0,763	0,0435	0,0062	0,0383
825	0,702	0,0400	0,0066	0,0348
837	0,638	0,0364	0,0037	0,0311
855	0,543	0,0310	0,0040	0,0257
865	0,507	0,0289	0,0058	0,0236
875	0,463	0,0264	0,0036	0,0211
895	0,390	0,0222	0,0024	0,0169
918	0,320	0,0182	0,0026	0,0129
935	0,279	0,0159	0,0019	0,0106
955	0,233	0,0133	0,0018	0,0079
975	0,203	0,0116	0,0014	0,0062
995	0,163	0,0093	0,0010	0,0039
1015	0,147	0,0084	0,0009	0,0030
1035	0,124	0,0070	0,0007	0,0016
1055	0,111	0,0063	0,0005	0,0009
1075	0,096	0,0055	0,0024	0,0000

Tabela A10: Dados experimentais da secagem de quitosana purificada em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 74°C e espessura da bandeja de 10mm (experimento 8). A umidade inicial da amostra é de 94,60% (b.u.) e 17,51 (b.s.) e a umidade de equilíbrio de 0,03. A massa inicial da bandeja foi de 166,86g.

Tempo (min)	$\bar{X}$ (g <sub>H2O</sub> /g <sub>SS</sub> )	$\bar{X}/X_0$	N(g <sub>H2O</sub> /(g <sub>SS</sub> min))	$((\bar{X}-X_E)/(X_0-X_E))$
0	17,519	1,0000	0,0422	1,0000
5	17,364	0,9912	0,0560	0,9912
10	17,097	0,9759	0,0616	0,9759
15	16,804	0,9592	0,0689	0,9591
20	16,481	0,9408	0,0683	0,9407
25	16,115	0,9199	0,0655	0,9197
30	15,798	0,9018	0,0709	0,9016
35	15,460	0,8825	0,0745	0,8823
40	15,089	0,8613	0,0656	0,8611
45	14,715	0,8400	0,0684	0,8397
50	14,433	0,8239	0,0744	0,8236
55	14,031	0,8009	0,0704	0,8006
60	13,690	0,7814	0,0707	0,7811
65	13,328	0,7608	0,0724	0,7604
70	12,983	0,7411	0,0671	0,7406
75	12,604	0,7195	0,0653	0,7190
80	12,311	0,7028	0,0679	0,7022
85	11,952	0,6822	0,0653	0,6817
90	11,632	0,6640	0,0703	0,6634
95	11,299	0,6450	0,0602	0,6444
100	10,929	0,6239	0,0648	0,6232
105	10,698	0,6106	0,0815	0,6100
110	10,281	0,5869	0,0685	0,5862
115	9,883	0,5641	0,0629	0,5634
120	9,597	0,5478	0,0666	0,5470
125	9,254	0,5282	0,0671	0,5274

---

Continuação da Tabela A10

130	8,931	0,5098	0,0699	0,5089
135	8,582	0,4899	0,0663	0,4890
140	8,232	0,4699	0,0659	0,4690
145	7,920	0,4521	0,0555	0,4511
151	7,572	0,4322	0,0800	0,4313
155	7,254	0,4141	0,0588	0,4131
160	6,932	0,3957	0,0578	0,3947
165	6,666	0,3805	0,0603	0,3794
170	6,354	0,3627	0,0583	0,3616
175	6,063	0,3461	0,0602	0,3450
180	5,771	0,3294	0,0555	0,3283
185	5,461	0,3117	0,0583	0,3106
190	5,216	0,2977	0,0439	0,2965
196	4,879	0,2785	0,0565	0,2773
200	4,689	0,2677	0,0540	0,2664
205	4,427	0,2527	0,0488	0,2514
210	4,148	0,2368	0,0448	0,2355
215	3,939	0,2248	0,0464	0,2235
220	3,700	0,2112	0,0437	0,2099
225	3,475	0,1984	0,0418	0,1970
230	3,263	0,1863	0,0410	0,1849
235	3,056	0,1745	0,0407	0,1731
240	2,853	0,1629	0,0375	0,1614
245	2,649	0,1512	0,0352	0,1498
250	2,478	0,1415	0,0351	0,1400
255	2,297	0,1311	0,0340	0,1296
260	2,127	0,1214	0,0336	0,1199
265	1,958	0,1117	0,0317	0,1102
270	1,791	0,1022	0,0295	0,1007
275	1,640	0,0936	0,0282	0,0921
280	1,496	0,0854	0,0271	0,0838
285	1,358	0,0775	0,0262	0,0760
290	1,225	0,0699	0,0225	0,0683
295	1,096	0,0626	0,0221	0,0610
300	1,000	0,0571	0,0155	0,0555
306	0,876	0,0500	0,0183	0,0484
310	0,813	0,0464	0,0156	0,0448
315	0,729	0,0416	0,0140	0,0400
320	0,657	0,0375	0,0123	0,0359
325	0,589	0,0336	0,0120	0,0320
330	0,534	0,0305	0,0110	0,0288
335	0,469	0,0268	0,0093	0,0251
340	0,424	0,0242	0,0084	0,0225
345	0,376	0,0215	0,0073	0,0198
350	0,340	0,0194	0,0069	0,0177
355	0,303	0,0173	0,0059	0,0156
360	0,271	0,0155	0,0054	0,0138
365	0,244	0,0139	0,0051	0,0122
370	0,216	0,0124	0,0044	0,0107
375	0,193	0,0110	0,0040	0,0093
380	0,172	0,0098	0,0030	0,0081
385	0,153	0,0087	0,0028	0,0070
390	0,142	0,0081	0,0028	0,0064
395	0,125	0,0072	0,0023	0,0055
400	0,114	0,0065	0,0021	0,0048
405	0,102	0,0058	0,0016	0,0041
410	0,093	0,0053	0,0011	0,0036

---

Continuação da Tabela A10				
415	0,087	0,0049	0,0014	0,0032
420	0,082	0,0047	0,0018	0,0030
425	0,072	0,0041	0,0009	0,0024
430	0,064	0,0037	0,0003	0,0020
435	0,063	0,0036	0,0009	0,0019
440	0,061	0,0035	0,0009	0,0018
445	0,054	0,0031	0,0004	0,0014
450	0,052	0,0030	0,0006	0,0013
455	0,050	0,0028	0,0007	0,0011
460	0,047	0,0027	0,0006	0,0009
466	0,043	0,0025	0,0007	0,0008
470	0,039	0,0022	0,0002	0,0005
475	0,038	0,0022	0,0038	0,0004

Tabela A11: Dados experimentais da secagem de quitosana purificada em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 60°C e espessura da bandeja de 3mm (experimento 9). A umidade inicial da amostra é de 95,40% (b.u.) e 20,73 (b.s.) e a umidade de equilíbrio de 0,04. A massa inicial da bandeja foi de 54,86g.

Tempo (min)	$\bar{X}$ (g <sub>H2O</sub> /g <sub>SS</sub> )	$\bar{X}/X_0$	N(g <sub>H2O</sub> /(g <sub>SS</sub> min))	$((\bar{X}-X_E)/(X_0-X_E))$
0	20,739	1,0000	0,1565	1,0000
5	19,998	0,9643	0,1660	0,9642
10	19,174	0,9245	0,1652	0,9244
15	18,338	0,8842	0,1629	0,8840
20	17,521	0,8448	0,1589	0,8446
25	16,709	0,8057	0,1637	0,8053
30	15,932	0,7682	0,1700	0,7678
35	15,073	0,7268	0,1684	0,7262
40	14,232	0,6863	0,1648	0,6857
45	13,388	0,6456	0,1569	0,6449
50	12,584	0,6068	0,1534	0,6060
55	11,819	0,5699	0,1569	0,5691
60	11,050	0,5328	0,1553	0,5319
65	10,250	0,4942	0,1490	0,4933
70	9,497	0,4579	0,1474	0,4569
75	8,760	0,4224	0,1482	0,4213
80	8,023	0,3869	0,1486	0,3857
85	7,278	0,3509	0,1434	0,3497
90	6,537	0,3152	0,1292	0,3139
95	5,844	0,2818	0,1153	0,2804
100	5,245	0,2529	0,1145	0,2515
105	4,690	0,2262	0,1201	0,2247
110	4,100	0,1977	0,0963	0,1961
115	3,490	0,1683	0,0884	0,1667
120	3,137	0,1513	0,0680	0,1496
126	2,606	0,1257	0,0807	0,1240
130	2,321	0,1119	0,0701	0,1102
135	1,960	0,0945	0,0618	0,0928
140	1,619	0,0781	0,0519	0,0763
145	1,342	0,0647	0,0436	0,0629
150	1,100	0,0530	0,0376	0,0512
155	0,906	0,0437	0,0333	0,0418

Continuação da Tabela A11				
160	0,724	0,0349	0,0277	0,0330
165	0,573	0,0276	0,0210	0,0258
170	0,446	0,0215	0,0254	0,0196
175	0,363	0,0175	0,0198	0,0156
180	0,193	0,0093	0,0095	0,0074
185	0,165	0,0080	0,0111	0,0060
190	0,098	0,0047	0,0067	0,0028
195	0,054	0,0026	0,0032	0,0007

Tabela A12: Dados experimentais da secagem de quitosana purificada em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 60°C e espessura da bandeja de 17mm (experimento 10). A umidade inicial da amostra é de 94,33% (b.u.) e 16,63 (b.s.) e a umidade de equilíbrio de 0,04. A massa inicial da bandeja foi de 268,55g.

Tempo (min)	$\bar{X}$ (g <sub>H2O</sub> /g <sub>SS</sub> )	$\bar{X}/X_0$	N(g <sub>H2O</sub> /(g <sub>SS</sub> min))	$((\bar{X}-X_E)/(X_0-X_E))$
0	16,637	1,0000	0,0140	1,0000
5	16,578	0,9964	0,0181	0,9964
10	16,497	0,9916	0,0218	0,9916
15	16,396	0,9856	0,0241	0,9855
20	16,279	0,9785	0,0255	0,9784
25	16,155	0,9711	0,0306	0,9710
30	16,024	0,9632	0,0268	0,9631
35	15,849	0,9527	0,0233	0,9526
40	15,756	0,9471	0,0294	0,9469
45	15,616	0,9387	0,0305	0,9385
50	15,462	0,9294	0,0298	0,9292
55	15,311	0,9203	0,0308	0,9201
60	15,164	0,9115	0,0307	0,9113
65	15,003	0,9018	0,0297	0,9015
70	14,857	0,8930	0,0311	0,8928
75	14,706	0,8839	0,0361	0,8837
80	14,546	0,8743	0,0314	0,8740
85	14,345	0,8623	0,0252	0,8619
90	14,232	0,8554	0,0294	0,8551
95	14,093	0,8471	0,0309	0,8467
100	13,937	0,8378	0,0304	0,8374
105	13,784	0,8285	0,0286	0,8281
110	13,633	0,8195	0,0276	0,8190
115	13,497	0,8113	0,0305	0,8109
120	13,357	0,8029	0,0294	0,8024
125	13,192	0,7930	0,0269	0,7925
130	13,063	0,7852	0,0294	0,7847
135	12,923	0,7768	0,0274	0,7763
140	12,769	0,7675	0,0259	0,7669
145	12,650	0,7603	0,0234	0,7598
151	12,510	0,7519	0,0354	0,7513
155	12,369	0,7435	0,0279	0,7428
160	12,227	0,7349	0,0280	0,7343
165	12,089	0,7267	0,0274	0,7260
170	11,946	0,7181	0,0293	0,7174
175	11,816	0,7102	0,0298	0,7095
180	11,653	0,7005	0,0290	0,6997

---

Continuação da Tabela A12

185	11,517	0,6923	0,0300	0,6915
190	11,364	0,6831	0,0271	0,6823
195	11,217	0,6743	0,0255	0,6735
200	11,093	0,6668	0,0271	0,6660
205	10,962	0,6589	0,0276	0,6581
210	10,823	0,6505	0,0238	0,6497
215	10,686	0,6423	0,0265	0,6415
220	10,585	0,6362	0,0299	0,6354
225	10,421	0,6264	0,0194	0,6255
230	10,286	0,6183	0,0276	0,6174
235	10,226	0,6147	0,0328	0,6138
240	10,010	0,6017	0,0242	0,6007
245	9,899	0,5950	0,0267	0,5940
250	9,769	0,5872	0,0197	0,5862
255	9,632	0,5790	0,0244	0,5779
260	9,572	0,5753	0,0322	0,5743
265	9,388	0,5643	0,0263	0,5633
270	9,249	0,5559	0,0271	0,5549
275	9,125	0,5485	0,0280	0,5474
280	8,978	0,5397	0,0270	0,5386
285	8,844	0,5316	0,0278	0,5305
290	8,709	0,5235	0,0271	0,5223
295	8,566	0,5149	0,0263	0,5137
300	8,438	0,5072	0,0255	0,5060
305	8,303	0,4991	0,0288	0,4979
310	8,183	0,4918	0,0252	0,4906
315	8,016	0,4818	0,0221	0,4806
320	7,930	0,4767	0,0250	0,4754
325	7,794	0,4685	0,0244	0,4672
330	7,680	0,4616	0,0249	0,4603
335	7,551	0,4539	0,0232	0,4525
340	7,431	0,4467	0,0235	0,4453
345	7,318	0,4399	0,0241	0,4385
350	7,196	0,4325	0,0240	0,4312
355	7,077	0,4254	0,0272	0,4240
360	6,956	0,4181	0,0240	0,4167
365	6,805	0,4091	0,0203	0,4076
370	6,716	0,4037	0,0225	0,4022
375	6,602	0,3969	0,0218	0,3954
380	6,491	0,3902	0,0234	0,3887
385	6,384	0,3838	0,0238	0,3823
390	6,258	0,3761	0,0214	0,3746
395	6,147	0,3695	0,0213	0,3679
400	6,044	0,3633	0,0214	0,3617
405	5,934	0,3567	0,0236	0,3551
410	5,829	0,3504	0,0230	0,3488
415	5,698	0,3425	0,0192	0,3409
420	5,600	0,3366	0,0198	0,3350
425	5,506	0,3310	0,0217	0,3294
430	5,401	0,3247	0,0212	0,3230
435	5,289	0,3179	0,0206	0,3163
440	5,189	0,3119	0,0208	0,3102
445	5,083	0,3056	0,0205	0,3039
450	4,981	0,2994	0,0203	0,2977
455	4,878	0,2932	0,0209	0,2915
460	4,778	0,2872	0,0168	0,2855
466	4,669	0,2806	0,0236	0,2789

---



---

Continuação da Tabela A12

470	4,576	0,2751	0,0190	0,2733
475	4,480	0,2693	0,0190	0,2675
480	4,387	0,2637	0,0190	0,2619
485	4,289	0,2578	0,0187	0,2560
490	4,196	0,2522	0,0179	0,2504
495	4,103	0,2466	0,0188	0,2448
500	4,017	0,2415	0,0181	0,2397
505	3,915	0,2353	0,0164	0,2335
510	3,837	0,2306	0,0167	0,2288
515	3,751	0,2255	0,0167	0,2236
520	3,669	0,2206	0,0168	0,2187
525	3,584	0,2154	0,0171	0,2135
530	3,501	0,2105	0,0175	0,2086
535	3,413	0,2052	0,0172	0,2032
540	3,327	0,2000	0,0187	0,1980
545	3,241	0,1948	0,0133	0,1929
551	3,140	0,1887	0,0172	0,1868
555	3,082	0,1852	0,0169	0,1833
560	3,002	0,1805	0,0154	0,1785
565	2,912	0,1750	0,0154	0,1731
570	2,848	0,1712	0,0153	0,1692
575	2,759	0,1658	0,0139	0,1638
580	2,695	0,1620	0,0152	0,1600
585	2,620	0,1575	0,0148	0,1554
590	2,543	0,1529	0,0140	0,1508
595	2,472	0,1486	0,0135	0,1465
600	2,403	0,1445	0,0132	0,1424
605	2,337	0,1405	0,0129	0,1384
610	2,271	0,1365	0,0137	0,1344
615	2,208	0,1327	0,0192	0,1306
620	2,134	0,1283	0,0165	0,1262
625	2,016	0,1212	0,0106	0,1191
630	1,968	0,1183	0,0120	0,1162
635	1,911	0,1148	0,0111	0,1127
640	1,848	0,1111	0,0099	0,1090
645	1,800	0,1082	0,0104	0,1060
650	1,750	0,1052	0,0103	0,1030
655	1,695	0,1019	0,0093	0,0997
660	1,647	0,0990	0,0108	0,0968
665	1,602	0,0963	0,0112	0,0941
670	1,538	0,0925	0,0092	0,0903
675	1,490	0,0896	0,0091	0,0874
680	1,446	0,0869	0,0079	0,0847
685	1,399	0,0841	0,0077	0,0819
690	1,368	0,0822	0,0089	0,0800
695	1,322	0,0795	0,0090	0,0773
700	1,279	0,0769	0,0085	0,0746
705	1,232	0,0741	0,0079	0,0718
710	1,194	0,0717	0,0085	0,0695
715	1,153	0,0693	0,0085	0,0671
720	1,108	0,0666	0,0073	0,0644
725	1,069	0,0642	0,0071	0,0620
730	1,035	0,0622	0,0077	0,0600
735	0,998	0,0600	0,0080	0,0577
740	0,958	0,0576	0,0066	0,0553
745	0,918	0,0552	0,0058	0,0529
750	0,893	0,0537	0,0066	0,0514

---

Continuação da Tabela A12

755	0,859	0,0516	0,0059	0,0494
760	0,827	0,0497	0,0064	0,0474
765	0,800	0,0481	0,0068	0,0458
770	0,763	0,0459	0,0061	0,0436
775	0,732	0,0440	0,0060	0,0417
780	0,702	0,0422	0,0060	0,0399
785	0,671	0,0404	0,0053	0,0380
790	0,643	0,0386	0,0051	0,0363
795	0,618	0,0372	0,0052	0,0348
800	0,592	0,0356	0,0053	0,0333
805	0,566	0,0340	0,0053	0,0317
810	0,539	0,0324	0,0051	0,0301
815	0,513	0,0308	0,0051	0,0285
820	0,488	0,0293	0,0047	0,0270
825	0,462	0,0278	0,0047	0,0254
830	0,441	0,0265	0,0047	0,0242
835	0,415	0,0249	0,0047	0,0226
840	0,394	0,0237	0,0045	0,0213
845	0,367	0,0221	0,0040	0,0197
850	0,349	0,0210	0,0046	0,0186
855	0,327	0,0197	0,0045	0,0173
860	0,303	0,0182	0,0041	0,0158
865	0,283	0,0170	0,0033	0,0146
870	0,262	0,0158	0,0032	0,0134
875	0,250	0,0150	0,0052	0,0126
880	0,230	0,0138	0,0023	0,0115
888	0,198	0,0119	0,0049	0,0095
890	0,193	0,0116	0,0029	0,0092
895	0,178	0,0107	0,0178	0,0083

Tabela A13: Dados experimentais da secagem de quitosana purificada em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 60°C e espessura da bandeja de 10mm (experimento 11). A umidade inicial da amostra é de 94,40% (b.u.) e 16,86 (b.s.) e a umidade de equilíbrio de 0,04. A massa inicial da bandeja foi de 190,00g.

Tempo (min)	$\bar{X}$ (g <sub>H2O</sub> /g <sub>SS</sub> )	$\bar{X}/X_0$	N(g <sub>H2O</sub> /(g <sub>SS</sub> min))	$((\bar{X}-X_E)/(X_0-X_E))$
0	16,637	1,0000	0,0249	1,0000
5	16,550	0,9948	0,0334	0,9948
10	16,388	0,9851	0,0388	0,9850
15	16,216	0,9747	0,0434	0,9747
20	16,000	0,9617	0,0432	0,9617
25	15,782	0,9486	0,0481	0,9485
30	15,568	0,9358	0,0465	0,9356
35	15,301	0,9197	0,0423	0,9195
40	15,103	0,9078	0,0452	0,9076
45	14,878	0,8943	0,0471	0,8940
50	14,651	0,8807	0,0441	0,8804
55	14,406	0,8659	0,0389	0,8656
60	14,211	0,8542	0,0503	0,8538
65	14,018	0,8426	0,0511	0,8422
70	13,708	0,8240	0,0391	0,8235
75	13,507	0,8119	0,0432	0,8114

---

Continuação da Tabela A13

80	13,316	0,8004	0,0436	0,7999
85	13,074	0,7859	0,0426	0,7854
90	12,880	0,7742	0,0487	0,7737
95	12,648	0,7603	0,0465	0,7597
100	12,393	0,7449	0,0417	0,7443
105	12,184	0,7323	0,0359	0,7317
110	11,976	0,7198	0,0377	0,7192
115	11,825	0,7108	0,0431	0,7101
120	11,599	0,6972	0,0449	0,6965
125	11,393	0,6848	0,0465	0,6841
130	11,150	0,6702	0,0453	0,6694
135	10,928	0,6569	0,0441	0,6561
140	10,697	0,6430	0,0441	0,6421
145	10,488	0,6304	0,0338	0,6295
151	10,257	0,6165	0,0510	0,6156
155	10,082	0,6060	0,0456	0,6051
160	9,849	0,5920	0,0456	0,5910
165	9,626	0,5786	0,0443	0,5776
170	9,393	0,5646	0,0397	0,5636
175	9,183	0,5520	0,0415	0,5509
180	8,996	0,5407	0,0402	0,5396
185	8,769	0,5271	0,0418	0,5259
190	8,594	0,5166	0,0430	0,5154
195	8,350	0,5019	0,0419	0,5007
200	8,165	0,4908	0,0443	0,4895
205	7,931	0,4767	0,0418	0,4755
210	7,722	0,4642	0,0397	0,4629
215	7,513	0,4516	0,0354	0,4503
220	7,325	0,4403	0,0356	0,4390
225	7,158	0,4303	0,0401	0,4289
230	6,969	0,4189	0,0434	0,4175
235	6,758	0,4062	0,0411	0,4047
240	6,535	0,3928	0,0383	0,3913
245	6,347	0,3815	0,0489	0,3800
250	6,152	0,3698	0,0241	0,3682
258	5,858	0,3521	0,1109	0,3505
260	5,767	0,3466	0,0260	0,3451
268	5,414	0,3254	0,0629	0,3238
270	5,351	0,3216	0,0396	0,3200
275	5,163	0,3103	0,0369	0,3087
280	4,955	0,2978	0,0314	0,2961
285	4,794	0,2881	0,0354	0,2864
290	4,640	0,2789	0,0370	0,2772
295	4,439	0,2668	0,0350	0,2651
300	4,270	0,2567	0,0347	0,2549
305	4,089	0,2458	0,0327	0,2440
310	3,923	0,2358	0,0328	0,2340
315	3,763	0,2262	0,0321	0,2243
320	3,595	0,2161	0,0314	0,2142
325	3,442	0,2069	0,0308	0,2050
330	3,281	0,1972	0,0385	0,1953
335	3,134	0,1884	0,0206	0,1864
342	2,896	0,1741	0,0297	0,1721
345	2,845	0,1710	0,0277	0,1690
350	2,718	0,1634	0,0272	0,1614
355	2,568	0,1544	0,0237	0,1523
360	2,446	0,1471	0,0234	0,1450

---

---

Continuação da Tabela A13

365	2,331	0,1401	0,0263	0,1381
370	2,213	0,1330	0,0329	0,1309
375	2,068	0,1243	0,0116	0,1222
386	1,883	0,1132	-0,0002	0,1111
0	1,812	0,1089	0,0002	0,1068
390	1,702	0,1023	0,0187	0,1002
395	1,624	0,0976	0,0204	0,0955
400	1,515	0,0911	0,0179	0,0889
405	1,420	0,0854	0,0178	0,0832
410	1,336	0,0803	0,0183	0,0781
415	1,242	0,0747	0,0169	0,0724
420	1,153	0,0693	0,0148	0,0671
425	1,073	0,0645	0,0146	0,0623
430	1,006	0,0605	0,0175	0,0582
435	0,928	0,0558	0,0105	0,0535
442	0,830	0,0499	0,0172	0,0476
445	0,781	0,0470	0,0120	0,0447
450	0,727	0,0437	0,0130	0,0414
455	0,662	0,0398	0,0104	0,0374
460	0,598	0,0359	0,0084	0,0336
466	0,558	0,0335	0,0129	0,0312
470	0,496	0,0298	0,0090	0,0275
475	0,455	0,0273	0,0077	0,0250
480	0,406	0,0244	0,0067	0,0221
485	0,378	0,0227	0,0071	0,0203
490	0,340	0,0204	0,0060	0,0181
495	0,306	0,0184	0,0053	0,0160
500	0,279	0,0168	0,0055	0,0144
505	0,253	0,0152	0,0046	0,0129
510	0,225	0,0135	0,0040	0,0111
515	0,207	0,0124	0,0045	0,0101
520	0,185	0,0111	0,0038	0,0087
525	0,161	0,0097	0,0023	0,0073
531	0,147	0,0088	0,0041	0,0064
535	0,134	0,0080	0,0032	0,0056
540	0,114	0,0069	0,0021	0,0045
545	0,102	0,0061	0,0019	0,0037
550	0,093	0,0056	0,0018	0,0032
555	0,084	0,0050	0,0019	0,0026
560	0,075	0,0045	0,0020	0,0021
565	0,065	0,0039	0,0016	0,0015
570	0,055	0,0033	0,0009	0,0009
575	0,049	0,0030	0,0009	0,0006
580	0,046	0,0027	0,0012	0,0003
585	0,040	0,0024	0,0009	0,0000

---

Na Tabela A14 estão os dados experimentais da umidade em base seca ( $\bar{X}$ ), do adimensional de umidade ( $\bar{X}/X_0$ ), da taxa de secagem (N) e do adimensional de água livre ( $(\bar{X}-X_E)/(X_0-X_E)$ ) em função do tempo para a obtenção dos gráficos apresentados no 3º artigo

Tabela A14: Dados experimentais da secagem de quitosana em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 60°C e espessura da bandeja de 4,365mm. A umidade inicial da amostra é de 89,8%(b.u) e 8,8039 (b.s.) e a umidade de equilíbrio de 0,04 (b.s.). A massa inicial da bandeja foi de 71,01g.

Tempo (min)	$\bar{X}$ (g <sub>H2O</sub> /g <sub>SS</sub> )	$\bar{X}/X_0$	N(g <sub>H2O</sub> /(g <sub>SS</sub> min))	$((\bar{X}-X_E)/(X_0-X_E))$	L(m)
0	8,804	1,0000	0,0439	1,0000	0,004365
5	8,584	0,9751	0,0483	0,9750	
10	8,343	0,9476	0,0558	0,9474	
15	8,064	0,9159	0,0552	0,9156	
20	7,788	0,8846	0,0577	0,8841	
25	7,499	0,8518	0,0547	0,8511	
30	7,226	0,8208	0,0527	0,8199	
35	6,962	0,7908	0,0555	0,7898	
40	6,685	0,7593	0,0572	0,7582	
45	6,399	0,7268	0,0569	0,7256	
50	6,114	0,6945	0,0558	0,6931	
55	5,836	0,6628	0,0555	0,6613	0,003715
60	5,558	0,6313	0,0555	0,6296	
65	5,281	0,5998	0,0533	0,5980	
70	5,014	0,5695	0,0549	0,5676	
75	4,739	0,5383	0,0439	0,5362	
80	4,520	0,5134	0,0522	0,5112	
85	4,259	0,4837	0,0527	0,4814	0,003323
90	3,995	0,4538	0,0538	0,4513	
95	3,726	0,4232	0,0522	0,4206	
100	3,465	0,3936	0,0503	0,3908	
105	3,214	0,3650	0,0508	0,3621	
110	2,960	0,3362	0,0492	0,3331	0,00280
115	2,714	0,3083	0,0450	0,3051	
120	2,489	0,2827	0,0337	0,2794	
125	2,320	0,2636	0,0445	0,2602	
130	2,098	0,2383	0,0403	0,2348	
135	1,897	0,2154	0,0373	0,2118	
140	1,710	0,1943	0,0345	0,1906	0,002333
145	1,538	0,1747	0,0326	0,1709	
150	1,375	0,1561	0,0304	0,1523	
155	1,223	0,1389	0,0268	0,1350	
160	1,089	0,1237	0,0260	0,1197	
165	0,959	0,1089	0,0221	0,1049	0,0021
170	0,849	0,0964	0,0199	0,0923	
175	0,749	0,0851	0,0174	0,0809	
180	0,662	0,0752	0,0157	0,0710	
185	0,584	0,0663	0,0116	0,0620	
190	0,526	0,0597	0,0064	0,0554	
195	0,494	0,0561	0,0202	0,0518	0,001943
200	0,393	0,0446	0,0039	0,0403	

Continuação da Tabela A14					
205	0,374	0,0425	0,0144	0,0381	
210	0,302	0,0343	0,0059	0,0299	
220	0,243	0,0276	0,0052	0,0231	
230	0,190	0,0216	0,0043	0,0171	
240	0,147	0,0167	0,0030	0,0122	
250	0,117	0,0133	0,0010	0,0088	
270	0,096	0,0109	0,0007	0,0064	
300	0,076	0,0086	-0,0003	0,0041	0,00181

Na Tabela A15 estão os dados do adimensional de água livre experimental ( $Y_{exp}$ ), do número de Fourier teórico ( $Fo_{teo}$ ), da variação do adimensional de água livre experimental com o tempo  $(dY/dt)_{exp}$ , da variação do adimensional de água livre com o Fourier  $(dY/dFo)_{teo}$  e da difusividade efetiva de umidade variável ( $D_{EF}$ ), para o período de taxa decrescente (dados utilizados no 3º Artigo).

Tabela A15: Dados experimentais e teóricos da secagem de quitosana purificada em camada delgada com temperatura do ar de secagem de 60°C e espessura da bandeja de 4,365mm. A umidade inicial da amostra é de 89,8%(b.u) e 8,8039 (b.s.) e a umidade de equilíbrio de 0,04 (b.s.). A massa inicial da bandeja foi de 71,01g.

Tempo (h)	$Y_{exp}$	$(dY/dt)_{exp}$ ( $h^{-1}$ )	$Fo$	$(dY/dFo)_{teo}$	$D_{EF}$ ( $m^2/s$ )
0,0000	1,0000	0,6628	0,0000	25,2771	$4,19 \times 10^{-11}$
0,0833	0,9448	0,5296	0,0022	6,3841	$1,33 \times 10^{-10}$
0,1667	0,9006	0,6295	0,0091	4,8559	$2,07 \times 10^{-10}$
0,2500	0,8482	0,6362	0,0199	3,7158	$2,74 \times 10^{-10}$
0,3333	0,7952	0,6495	0,0342	2,9119	$3,57 \times 10^{-10}$
0,4167	0,7410	0,6295	0,0528	2,3433	$4,29 \times 10^{-10}$
0,5000	0,6886	0,6062	0,0751	1,9423	$4,99 \times 10^{-10}$
0,5833	0,6381	0,6129	0,1012	1,6469	$5,95 \times 10^{-10}$
0,6667	0,5870	0,5929	0,1322	1,4251	$6,66 \times 10^{-10}$
0,7500	0,5376	0,5429	0,1668	1,2628	$6,88 \times 10^{-10}$
0,8333	0,4923	0,4064	0,2027	1,1523	$5,64 \times 10^{-10}$
0,9167	0,4585	0,5363	0,2320	1,0581	$8,11 \times 10^{-10}$
1,0000	0,4138	0,4863	0,2743	0,9664	$8,05 \times 10^{-10}$
1,0833	0,3733	0,4497	0,3162	0,8849	$8,13 \times 10^{-10}$
1,1667	0,3358	0,4164	0,3586	0,8059	$8,27 \times 10^{-10}$
1,2500	0,3011	0,3930	0,4016	0,7253	$8,67 \times 10^{-10}$
1,3333	0,2683	0,3664	0,4468	0,6427	$9,12 \times 10^{-10}$
1,4167	0,2378	0,3231	0,4943	0,5630	$9,18 \times 10^{-10}$
1,5000	0,2109	0,3131	0,5421	0,4875	$1,03 \times 10^{-09}$
1,5833	0,1848	0,2665	0,5956	0,4202	$1,01 \times 10^{-09}$
1,6667	0,1626	0,2398	0,6485	0,3640	$1,05 \times 10^{-09}$
1,7500	0,1426	0,2098	0,7034	0,3174	$1,06 \times 10^{-09}$
1,8333	0,1251	0,1899	0,7585	0,2792	$1,09 \times 10^{-09}$
1,9167	0,1093	0,1399	0,8151	0,2501	$8,95 \times 10^{-10}$
2,0000	0,0976	0,0766	0,8617	0,2324	$5,27 \times 10^{-10}$
2,0833	0,0912	0,2431	0,8892	0,2075	$1,87 \times 10^{-09}$
2,1667	0,0710	0,0466	0,9868	0,1875	$3,98 \times 10^{-10}$
2,2500	0,0671	0,1732	1,0076	0,1731	$1,60 \times 10^{-09}$

---

Continuação da Tabela A15

2,3333	0,0527	0,0716	1,0909	0,1543	$7,43 \times 10^{-10}$
2,5000	0,0407	0,0633	1,1683	0,1397	$7,25 \times 10^{-10}$
2,6667	0,0302	0,0516	1,2438	0,1284	$6,43 \times 10^{-10}$
2,8333	0,0216	0,0366	1,3108	0,1203	$4,87 \times 10^{-10}$
3,0000	0,0155	0,0125	1,3616	0,1149	$1,74 \times 10^{-10}$
3,3333	0,0113	0,0083	1,3978	0,1107	$1,20 \times 10^{-10}$
3,8333	0,0071	0,0063	1,4354	0,1095	$0,99 \times 10^{-10}$

---