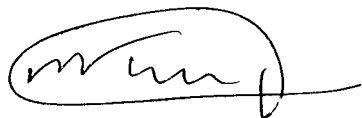


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS

MODELAGEM MATEMÁTICA DA SECAGEM
DE PESCADO

*Este exemplar corresponde a redação final da
Tese defendida por Maria de Jesus de Mesquita
Carneiro e aprovada pela Comissão Julga-
dora em 18.10.95*

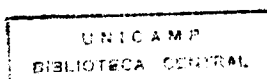


MARIA DE JESUS DE MESQUITA CARNEIRO
(Engenheira de Alimentos)

Prof.Dr. SATOSHI TOBINAGA
(Orientador)

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de
Alimentos da Universidade Estadual de Campinas para
obtenção do Título de Mestre em Engenharia de
Alimentos.

CAMPINAS - SP
1995

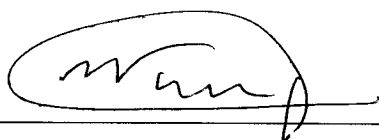


UNIDADE	BC
N.º CHAMADA	12/UNICAMP
	C215m
V.	E.
IMP.	26085
PREC.	433/95
C	☐
D	☒
PREC.	R\$ 11,00
DATA	18/11/95
N.º CPD	00079935-1

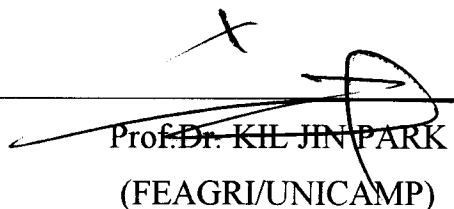
FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA F.E.A. - UNICAMP

C215m	Carneiro, Maria de Jesus de Mesquita
	Modelagem matemática da secagem de pescado / Maria de Jesus de Mesquita Carnerio. -- Campinas, SP: [s.n.], 1995.
	Orientador: Satoshi Tobinaga
	Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia de Alimentos.
	1. *Modelagem. 2. Secagem. 3. Pescados. I. Tobinaga, Satoshi. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos. III. Título.

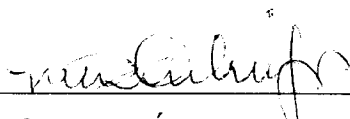
BANCA EXAMINADORA



Prof.Dr. SATOSHI TOBINAGA
(DEA /UNICAMP)



Prof.Dr. KIL JIN PARK
(FEAGRI/UNICAMP)



Profa.Dra. MÍRIAM DUPAS HUBINGER
(DEA/UNICAMP)



Profa.Dra. FERNANDA E. X. MURR
(DEA/UNICAMP)

**A meus pais e meus irmãos
pelo apoio e incentivo**

AGRADECIMENTOS

À Deus.

Ao Prof. Satoshi Tobinaga, pela amizade e orientação deste trabalho.

À banca examinadora, pelas correções e sugestões apresentadas.

À CAPES, pela concessão da bolsa de Mestrado.

A toda minha família.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia de Alimentos
- FEA - UNICAMP.

A todos os amigos que participaram de minhas alegrias e tristezas, em especial a
Simone Flôres.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

MUITO OBRIGADA.

ÍNDICE

ÍNDICE.....	iv
LISTA DE TABELAS.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	ix
NOMENCLATURA	xii
RESUMO.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1. Generalidades sobre secagem de pescado.....	2
2.2. Período de taxa constante.....	5
2.3. Período de taxa decrescente	7
2.4. Fatores que afetam a taxa de secagem	9
2.5. Secagem com encolhimento	11
2.6. Difusividade efetiva dependente da umidade.....	18

3.	MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1.	Secagem com encolhimento um modelo simplificado	23
3.2.	Secagem sem encolhimento	29
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.1.	Velocidade de encolhimento	32
4.2.	Ajuste da umidade adimensional	37
4.2.1.	Secagem com encolhimento	37
4.2.2.	Secagem sem encolhimento	40
4.3.	Análise da difusividade	42
5.	CONCLUSÕES	48
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
7.	APÊNDICE A	55
8.	APÊNDICE B	72

LISTA DE TABELAS

4.1. Valores de velocidade das amostras M/06/04 e M/12/04	35
4.2. Valores de velocidade das amostras M/11/02 e M/11/04	35
4.3. Valores de velocidade da amostras M/05/04 e M/15/02.....	36
4.4. Valores de velocidade das amostras M/07/04 e M/12/02	36
4.5. Valores de umidade adimensional para os dados experimentais e calculados das amostras M/11/02 e M/11/04, com encolhimento	38
4.6. Valores de umidade adimensional para os dados experimentais e calculados das amostras M/05/04 e M/15/02, com encolhimneto	38
4.7. Valores de umidade adimensional para os dados experimentais e calculados das amostras M/07/04 e M/12/02, com encolhimento	39
4.8. Valores de umidade adimensional para os dados experimentais e calculados das amostras M/06/04 e M/12/04, com encolhimento	39
4.9. Valores de umidade adimensional para os dados experimentais e calculados sem encolhimento. Amostras M/05/04 e M/06/04.....	40
4.10. Valores de umidade adimensional para os dados experimentais e calculados sem encolhimento. Amostras M/07/04 e M/12/02.....	40
4.11. Valores de umidade adimensional para os dados experimentais e calculados sem encolhimento. Amostras M/11/04 e M/12/04.....	41

4.12. Valores de umidade adimensional para os dados experimentais e calculados sem encolhimento. Amostras M/15/02 e M/11/02.....	41
4.13. Valores de difusividade para secagem com e sem encolhimento e desvios mínimos obtidos.....	43
A.1. Dados experimentais de comprimento, largura, espessura e umidade absoluta da amostra M/05/04 (PINTO, 1992)	56
A.2. Dados experimentais de comprimento, largura, espessura e umidade absoluta da amostra M/06/04 (PINTO, 1992)	57
A.3. Dados experimentais de comprimento, largura, espessura e umidade absoluta da amostra M/07/04 (PINTO, 1992)	58
A.4. Dados experimentais de comprimento, largura, espessura e umidade absoluta da amostra M/11/02.....	59
A.5. Dados experimentais de comprimento, largura, espessura e umidade absoluta da amostra M/11/04.....	59
A.6. Dados experimentais de comprimento, largura, espessura e umidade absoluta da amostra M/12/02.....	60
A.7. Dados experimentais de comprimento, largura, espessura e umidade absoluta da amostra M/12/04.....	61
A.8. Dados experimentais de comprimento, largura, espessura e umidade absoluta da amostra M/15/02.....	62
A.9. Valores de velocidade calculados por segmentos de reta e valores de difusividade obtidos para as amostras M/12/02 e M/05/04.....	63

A.10. Valores de velocidade calculados por segmentos de reta e valores de difusividade obtidos para as amostras M/12/02 e M/07/04.....	64
A.11. Valores de difusividade efetiva para diferentes tipos de amostras (PINTO, 1992)	64
A.12. Valores de umidade e tempo onde não mais ocorreu encolhimento e valores de umidade inicial e de equilíbrio (PINTO, 1992)	65
A.13. Condições de secagem: velocidade e temperatura do ar de secagem (PINTO, 1992)	65

LISTA DE FIGURAS

2.1. Taxa de secagem de filés de peixes em função da umidade absoluta	7
3.1. Gráfico esquemático de $y = -\beta_i \tan x$ e $y = x$	28
4.1. Espessura da amostra M/05/04 em função do tempo com ajuste polinomial de grau 5	33
4.2. Espessura da amostra M/06/04 em função do tempo com ajuste polinomial de grau 4	33
4.3. Espessura da amostra M/07/04 em função do tempo com ajuste polinomial de grau 4	34
4.4. Espessura da amostra M/15/02 em função do tempo com ajuste polinomial de grau 4	34
4.5. Curvas de secagem experimental e calculada para a amostra M/05/04.....	43
4.6. Curvas de secagem experimental e calculada para a amostra M/06/04.....	44
4.7. Curvas de secagem experimental e calculada para a amostra M/07/04.....	44
4.8. Curvas de secagem experimental e calculada para a amostra M/15/02.....	45
4.9. Curvas de secagem experimental e calculada para a amostra M/12/02.....	45
4.10. Curvas de secagem experimental e calculada para a amostra M/12/04.....	46

4.11. Curvas de secagem experimental e calculada para a amostra M/11/02.....	46
4.12. Curvas de secagem experimental e calculada para a amostra M/11/04.....	47
A.1. Espessura da amostra M/11/02 em função do tempo com ajuste polinomial de grau 5	66
A.2. Espessura da amostra M/11/04 em função do tempo com ajuste polinomial de grau 4	66
A.3. Espessura da amostra M/12/02 em função do tempo com ajuste polinomial de grau 5	67
A.4. Espessura da amostra M/12/04 em função do tempo com ajuste polinomial de grau 4	67
A.5. Curvas de secagem de Merluza. Valores calculados para as amostras M/05/04 e M/06/04.....	68
A.6 Curvas de secagem de Merluza. Valores calculados para as amostras M/07/04 e M/15/02.....	68
A.7. Curvas de secagem de Merluza. Valores calculados para as amostras M/11/02 e M/11/04.....	69
A.8. Curvas de secagem de Merluza. Valores calculados para as amostras M/12/02 e M/12/04.....	69
A.9. Curva de secagem obtida utilizando velocidade calculada por segmentos de reta. Amostra M/12/02.....	70
A.10. Curva de secagem obtida utilizando velocidade calculada por segmentos de reta. Amostra M/12/04.....	70

A.11. Curva de secagem obtida utilizando velocidade calculada por segmentos de reta. Amostra M/05/04.....	71
A.12. Curva de secagem obtida utilizando velocidade calculada por segmentos de reta. Amostra M/07/04.....	71

NOMENCLATURA

C_p - calor específico do material $[F] / [M][\theta]$

C_{ar} - concentração de vapor de água no ar $[M] / [L^3]$

C_{sup} - concent. de vapor de água da superfície da amostra $[M] / [L^3]$

D - difusividade - $[L^2] / [T]$

$[F]$ - dimensão fundamental de força

g ou $g(\eta)$ - variável auxiliar da Equação (3.7)

h - coeficiente de transferência de calor $[F] / [L^2][T][\theta]$

K - constante da Equação (2.3), adimensional

k - condutividade térmica do material $[F] / [L][T][\theta]$

K_m - coeficiente de transferência de massa $[L] / [T]$

L - espessura da amostra $[L]$

$[L]$ - dimensão fundamental de comprimento

$[M]$ - dimensão fundamental de massa

N - número de pontos, Equação (3.14)

- R - constante da Equação (2.3), adimensional
- r - raio do cilindro [L]
- S_b - coeficiente de encolhimento volumétrico, adimensional
- t - tempo [T]
- T - temperatura [θ]
- [T] - dimensão fundamental de tempo
- V - volume [L^3]
- v - velocidade de encolhimento [L] / [T]
- X - umidade em base seca da amostra [M] água / [M] sólido seco
- $\bar{X}$ - umidade média em base seca [M] água / [M] sólido seco

Letras gregas

- α_n - auto valores, Equação (3.9.2)
- ε - erro, Equação (3.14)
- λ_n - parâmetro definido na Equação (3.9.3)
- λ_v - calor de evaporação [F] / [M]

ϕ	- constante da equação (2.3.1) adimensional
Ω	- constante da equação (3.6.1), adimensional
ψ	- umidade em base seca da amostra, adimensional
ξ	- coordenada espacial generalizada
η	- espessura, adimensional
ρ	- densidade da amostra [M] / [L ³]
ρ_1	- densidade do líquido [M] / [L ³]
τ	- tempo, adimensional
[θ]	- dimensão fundamental de temperatura

Sub - índices

b	- amostra
bs	- bulbo seco
bu	- bulbo úmido
cal	- calculado
e	- equilíbrio

exp - experimental

f - final

o - inicial

s - sólido

RESUMO

Foi desenvolvido um modelo matemático simplificado de transferência de umidade durante a secagem de merluza (*Merluccius biliniaris*), usando os dados experimentais obtidos por PINTO (1992). O modelo admite que todos os pontos do filé deslocam-se em direção ao suporte com velocidade v constante.

Inicialmente, calculou-se a velocidade de encolhimento por aproximação de segmentos de reta, mas não se obteve um bom resultado com esse procedimento. Então, a velocidade foi calculada por ajuste polinomial dos dados de espessura em função do tempo com coeficiente de correlação médio de $99,8 \pm 0,2 \%$.

A solução numérica da equação resultante do modelo foi obtida utilizando o programa para cálculos matemáticos EUREKA e um programa escrito em linguagem QBASIC.

O perfil de umidade calculado foi comparado com os dados experimentais obtendo-se uma boa concordância entre eles, com um erro mínimo médio de $1,5 \%$ para o período de secagem com encolhimento e $2,1 \%$ para a parte sem encolhimento.

Os valores médios de difusividade obtidos do ajuste do perfil de umidade experimental e calculado foram de $(5,53 \pm 2,23) \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ para a secagem com encolhimento e $(4,53 \pm 1,87) \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ para a fase sem encolhimento.

ABSTRACT

A simplified mathematical model of moisture transfer in silver hare (*Merluccius biliniaris*) during drying was developed. Experimental data obtained by PINTO (1992) were used. For the mathematical modeling, it was assumed that all points of the sample displace in support direction with constant velocity v .

Initially, the shrinkage velocity was calculated for straight line segment approach, but this procedure did not achieve good results for moisture profiles. Thus, the velocity was calculated by polynomial fit of the thickness data versus time with a mean correlation coefficients of $99.8 \pm 0.2 \%$.

Numerical solution of the resulting equation of the model was achieved through a computer program for mathematical calculation, EUREKA, and another program written in QBASIC language.

The calculated moisture profiles were compared with experimental data. A good agreement was found, with the error mean values of 1.5 % for drying with shrinkage and 2.1 % for drying without shrinkage.

The mean values of diffusivity obtained by comparison between calculated and experimental moisture profiles were $(5.53 \pm 2.23) \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ for drying with shrinkage and $(4.53 \pm 1.87) \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ for drying stage without shrinkage.

1. INTRODUÇÃO

A secagem é um dos mais antigos métodos de preservação de alimentos de origem animal ou vegetal que facilita os trabalhos de armazenamento, transporte e de manuseio. Nota-se no comércio que os produtos salgados e secos, tais como peixes e carnes, apresentam uma longa vida de prateleira, mesmo sendo expostos ao ar diretamente.

Além de ser um método de preservação, a secagem, por ser parte essencial de processos de preservação pela salga e defumação e de vários processos de fabricação de alimentos, motivou e ainda motiva a realização de pesquisas pelos especialistas de diversas áreas. Essas pesquisas são realizadas visando buscar o aumento de produtividade e controlar o processo.

Do ponto de vista científico, o fenômeno estimula a criação de refinados modelos físicos e desenvolvimentos de métodos matemáticos para resolver as equações representativas dos modelos levando em conta a ocorrência de encolhimento e a dependência das propriedades de transporte de massa e de calor com a umidade da amostra (PINTO & TOBINAGA, 1993 e WAANANEN et alii, 1993).

Apesar da existência da grande quantidade de trabalhos sobre secagem e da possibilidade de obtenção de dados experimentais dos parâmetros que caracterizam a secagem, ainda não se encontra um modelo que possa ser generalizado para todos os gêneros alimentícios.

O presente trabalho visa desenvolver um modelo de secagem levando em conta o encolhimento, através de estudo dos dados experimentais de PINTO (1992). Estes dados foram obtidos da secagem de filés de peixes em forma de lâminas retangulares, com circulação de ar seco por adsorção em leito de sílica-gel, mantendo temperatura de bulbo seco (T_{bs}) e bulbo úmido (T_{bu}) aproximadamente constantes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada uma revisão dos principais trabalhos sobre secagem de alimentos de origem animal e de origem vegetal, especialmente a secagem de peixes. Os artigos foram selecionados com o objetivo de se ter:

- Uma visão global dos aspectos da secagem de peixes tais como o comportamento das propriedades de transporte nos períodos de taxa de secagem constante e taxa decrescente, fatores que afetam a taxa de secagem, efeito do encolhimento;
- Uma visão pormenorizada dos modelos simples da secagem de peixes e vegetais que consideram as propriedades de transporte constantes e não levam em conta o encolhimento;
- Uma visão pormenorizada dos modelos complexos da secagem de peixes e vegetais, onde se considera o encolhimento das amostras e que as propriedades de transporte dependem da umidade;
- Uma visão sobre métodos matemáticos para obtenção de soluções aproximadas das equações diferenciais resultantes.

2.1. Generalidades sobre secagem de pescado

Secagem é um termo utilizado para designar a remoção de água do material. Atualmente o movimento de água, do interior do material para fora, é descrito por diversos mecanismos que dependem da natureza e condições físicas do material e das condições ambientais de temperatura, pressão e umidade. FORTES & OKOS (1980), descreveram a migração de água, durante a secagem de alimentos, através dos seguintes mecanismos:

- Difusão de água devido ao gradiente de concentração;
- Difusão de vapor de água devido ao gradiente de pressão parcial de vapor;
- Movimento de água devido a forças capilares;
- Difusão superficial.

TOBINAGA & PINTO (1992) fizeram uma revisão de principais trabalhos, especialmente dos que se preocuparam com os aspectos teóricos, desde os mais simplificados, que levaram em conta somente o mecanismo de difusão, descrita em termos da Lei de Fick com difusividade constante, até os mais elaborados que levaram em conta as transferências simultâneas de calor e massa, as características celulares do tecido que compõe o material e os efeitos de encolhimento da amostra. Os trabalhos citados a seguir são reproduções de comentários de alguns trabalhos apresentados em TOBINAGA & PINTO (1992) e DAUDIN (1983):

- Teoria da migração de água por difusão - Lewis e Sherwood foram os primeiros a fazer referência à Lei de Fick ao interpretarem a secagem como um fenômeno de difusão de umidade. A lei de Fick exprime que o fluxo de massa é proporcional ao gradiente de concentração. A teoria da difusão não leva em conta o encolhimento, endurecimento ou isoterma de equilíbrio. Essa teoria é aplicada mais por causa de sua simplificação matemática do que por razões teóricas relativas aos fenômenos físicos;
- Teoria da capilaridade - refere-se ao fluxo de um líquido através dos interstícios e sobre a superfície de um sólido. O potencial capilar é usualmente assumido, como sendo proporcional ao gradiente de concentração de umidade, nas condições isotérmicas. Na área de alimentos, o fluxo capilar tem sido aceito como um mecanismo fundamental, principalmente no estágio de secagem de alta umidade;
- Teoria da evaporação e condensação - a teoria de Henry, leva em

consideração a difusão simultânea de calor e massa. Ele assume que a quantidade de vapor no sólido varia de maneira linear com a concentração e temperatura, e a difusividade como sendo constante. Um refinamento do modelo de Henry foi feito por Harmathy, que desenvolveu uma teoria para transferência simultânea de calor e massa durante o estado pendular do sistema poroso. Ele baseou seu modelo assumindo a teoria da evaporação e condensação e que o sistema é um sistema pseudo-homogêneo, concluindo que além da capilaridade também ocorre transferência de vapor por difusão;

- Teoria de Luikov - segundo sua teoria o gradiente de temperatura é também uma força-motriz para transferência de umidade em materiais. Ao desenvolver sua teoria, Luikov empregou os princípios da termodinâmica dos processos irreversíveis. Do ponto de vista do não equilíbrio termodinâmico a teoria de Luikov não é rigorosa. As soluções dão uma série de equações diferenciais que assumem coeficiente de transporte constante, sendo portanto, soluções não adequadas para a descrição da secagem de alimentos;
- Philip e De Vries - estabeleceram uma teoria de transferência de água nos meios porosos onde a transferência é influenciada pelo gradiente de temperatura. A teoria de Philip e DeVries assume que a água se move por difusão de vapor e capilaridade. Essa teoria não tem sido usada na análise de alimentos. Um refinamento dessa teoria foi feito por DeVries, incorporando calor úmido e transferência de calor sensível e fazendo diferença entre mudanças de umidade na fase líquida e vapor;
- Krischer - seu trabalho serviu como base para muitas teorias de secagem desenvolvidas. Em sua teoria Krischer assume que, durante a secagem a umidade pode migrar no estado líquido por capilaridade, e no vapor por um gradiente de concentração de vapor. De acordo com Berger e Pei, a principal dificuldade encontrada no modelo de Krischer é a aplicação de isoterma de equilíbrio para todos os valores de umidade, e o uso de condições de contorno de primeira espécie;

- Whitaker - desenvolveu uma teoria de transferência simultânea de calor e massa que leva em conta a estrutura do produto e os fenômenos físicos. Essa teoria não é diretamente empregada para a secagem de materiais biológicos;
- Harmathy - propôs um modelo onde a transferência de massa se faz unicamente na forma de vapor, a permeabilidade da estrutura porosa depende da umidade e em todo o produto há equilíbrio entre o líquido e vapor.

2.2. Período de taxa constante

Esse período se caracteriza pelo fato da superfície do material ser mantido a um nível de umidade tal, que a secagem ocorre como se o sistema fosse água pura evaporando.

No período de taxa constante a secagem ocorre por difusão de vapor da superfície saturada do material através de um filme de ar estagnante no ambiente. O movimento de umidade dentro do sólido é rápido o suficiente para manter a saturação na superfície, e a velocidade de secagem é controlada pela velocidade da transferência de calor para a superfície evaporante. A velocidade da transferência de massa equilibra a velocidade de transferência de calor, e a temperatura da superfície permanece constante. E se calor é transferido somente por convecção, a temperatura da superfície aproxima-se à temperatura de bulbo úmido (PERRY - 1963).

Segundo JASON (1958), durante o período de taxa constante a secagem é controlada somente pelas condições ambiente. E este período termina quando nenhuma água livre permanece na superfície do sólido. Conforme SHERWOOD (1929) a secagem neste período é similar à evaporação de água de uma superfície líquida livre.

De acordo com FORTES & OKOS (1980) o período de taxa constante depende

dos coeficientes de transferência de calor e massa, área de secagem, geometria da amostra e diferença de temperatura e umidade entre o vapor e a superfície úmida do sólido. O mesmo foi concluído por PERRY (1963).

CHIRIFE (1983), verificou que o fim do período de taxa constante onde a umidade é definida como umidade crítica, corresponde ao tempo onde a migração de água para a superfície não suporta a taxa de evaporação correspondente a transferência de massa de água livre da superfície. Verificou também que o período de taxa constante é importante somente para situações em que o potencial de secagem é muito baixo ou a umidade do alimento é muito alta. VACCAREZZA et alii (1974) e ALZAMORA et alii (1979) não encontraram a existência do período de taxa constante durante a secagem de vegetais.

Ao analisar a secagem de pescado, PINTO (1992) verificou distintos períodos de taxa constante os quais tornam-se menores a cada etapa sucessiva (vide Figura 2.1). Constatou também que para amostras magras ($X_0 \geq 4,00$, b. s.) e as salgadas e gordas ($2,50 \leq X_0 \leq 3,50$, b. s.) colocadas sobre pratos maciços, a duração do período de taxa constante foi de aproximadamente 10 h. Nas amostras salgadas em pratos perfurados, o tempo de secagem foi aproximadamente a metade. A duração deste período está relacionada com a velocidade do ar, V_{ar} , com a umidade inicial, X_0 , (temperatura de bulbo seco e bulbo úmido ambos imersos no ar, T_{bs} e T_{bu}), com a forma e com a área da amostra.

Segundo BURGUES et alii (1967), a duração do período de taxa de secagem constante depende da taxa de perda de água. Se a secagem é lenta, mais água pode evaporar do peixe do que se a secagem é rápida. Verificaram também que para amostras do mesmo tamanho sob as mesmas condições de secagem, o período de taxa constante é menor para peixes gordos, tais como arenque ou salmão, do que para peixes magros tais como abadejo (haddock) ou bacalhau.

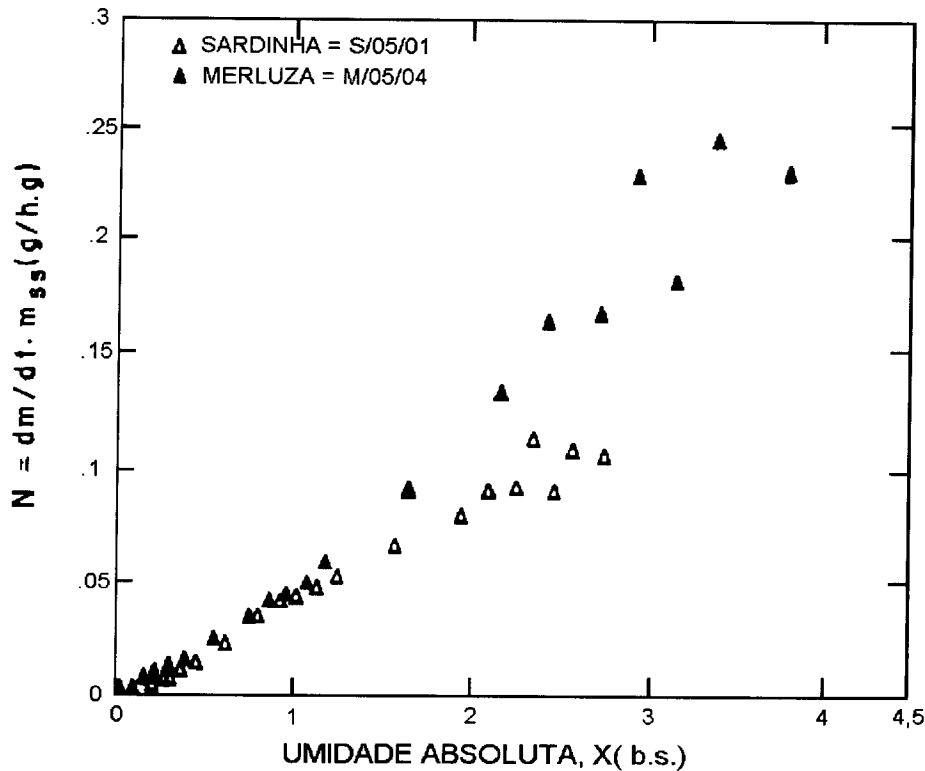


FIGURA 2.1 Taxa de secagem de filés de peixes em função da umidade absoluta; $T_{bs} = 29^{\circ}\text{C}$, $T_{bu} = 19^{\circ}\text{C}$, $V_{ar} \geq 0,5 \text{ m/s}$

2.3. Período de taxa decrescente

O período de taxa decrescente começa quando o período de taxa constante termina, na umidade crítica. Se a umidade inicial é abaixo da umidade crítica, todo o processo de secagem ocorre no período de taxa decrescente (PERRY, 1963).

Segundo SHERWOOD (1929) o período de taxa decrescente se divide em duas zonas distintas. A primeira, imediatamente após o ponto crítico é frequentemente caracterizada por uma relação linear entre a taxa de secagem e o teor de umidade. A segunda zona, se caracteriza por uma curva côncava para cima no gráfico da curva de

secagem em função da umidade. A presença de duas regiões de taxa decrescente também foi verificada por outros autores, CHIRIFE (1970), VACCAREZZA & CHIRIFE (1975), CRAPISTE et alii (1988), PINTO (1992) e outros.

JASON (1965) estudando a secagem de pescado verificou que quando o período de taxa constante termina, a difusão de umidade no interior do músculo não mantém um fluxo suficiente para suportar a taxa máxima de evaporação inicial. O término do período de taxa constante é seguido por um rápido declínio na taxa de secagem. A taxa de secagem continua a decrescer com a umidade do músculo do peixe se aproximando de um valor de equilíbrio. Durante esse período de taxa decrescente a difusão interna é o principal fator que controla o processo.

Trabalhando com peixe salgado, DEL VALLE & NICKERSON (1968) verificaram que o período de taxa decrescente era caracterizado por duas difusividades de água, com a do primeiro período sendo maior que a do segundo. Estes autores observaram também que, no primeiro período de taxa decrescente a difusividade era função do grau de salga do músculo, aumentando inicialmente, passando por um máximo e decrescendo com o aumento do grau de salga.

JASON (1958) observou que a difusividade para o primeiro período de taxa decrescente era aproximadamente igual para ambos, peixe salgado e não salgado, enquanto que para o segundo período era consideravelmente menor para peixe salgado. E que peixe salgado entra primeiro no segundo período de taxa decrescente do que peixe não salgado.

Estudando o mecanismo de transporte de umidade durante a secagem de beterraba, VACCAREZZA & CHIRIFE (1975), sugeriram dois diferentes mecanismos de transporte nos primeiros estágios do período de taxa decrescente: fluxo capilar e difusão líquida. Verificaram que embora a lei de Fick tenha sido usada por vários autores para predizer o tempo médio de secagem durante o primeiro período de taxa decrescente, a dificuldade em proceder com o conceito de difusão líquida em termos do mecanismo deve ser reconhecido.

Segundo DAUDIN (1983), desde que a quantidade de água na superfície diminua, a velocidade de secagem também diminuirá. A transferência de calor

aumenta, aumentando a temperatura do produto, tendendo para a temperatura do ar de secagem. Durante todo este período o fator limitante é a migração interna de água. No fim deste período o produto está em equilíbrio com o ar e a velocidade de secagem é nula.

De acordo com seus estudos, CHIRIFE (1983) concluiu que a lei de Fick, em termos do gradiente de umidade, constitui um bom modelo para descrever o procedimento de secagem de muitos alimentos durante a primeira fase do período de taxa decrescente. O mesmo foi concluído por VACCAREZZA & CHIRIFE (1975), ALZAMORA & CHIRIFE (1980), SUAREZ et alii (1980), AGUERRE et alii (1985), PINTO et alii (1992) e outros.

PINTO & TOBINAGA (1991) ao estudarem a secagem de músculos de peixes utilizando o modelo de difusão de Fick, também observaram a existência de duas fases no período de taxa decrescente. Para o peixe salgado a primeira fase teve uma duração menor do que para o peixe sem salgar (magro) e o mesmo apresentou uma menor difusividade efetiva na segunda fase. A transição entre as duas fases ocorreu por volta de 50 h com 20% de umidade (base seca).

De acordo com BURGUES et alii (1967), a umidade do peixe no final do período de taxa decrescente é cerca de 5% da quantidade total da água original.

Analisando modelos de secagem para sólidos porosos, WAANANEN et alii (1993) verificaram que durante o período de taxa decrescente a taxa de secagem decresce com o tempo, e a taxa de transferência de massa interna para a superfície do material controla o processo.

2.4. Fatores que afetam a taxa de secagem

De acordo com HOLDSWORTH (1971) os principais fatores que afetam a taxa de secagem são:

- Propriedades físicas do produto;
- Arranjo geométrico do produto em relação a superfície de transferência de calor ou meio;
- Propriedades físicas do ambiente de secagem;
- Características do equipamento de secagem.

Conforme VAN ARSDEL et alii (1973) de todos os fatores, o que mais influencia a taxa de secagem, é a natureza da matéria prima, compreendendo a constituição química e física das paredes de suas células.

A conclusão de VACCAREZZA et alii (1974), ao estudarem a secagem de beterraba foi que a taxa de secagem é afetada principalmente pela temperatura de secagem e tamanho da partícula, e em menor grau pela velocidade do ar.

Trabalhando com cação da espécie *Prionace glauca*, TORRANO & OKADA (1977) observaram uma variação da taxa de secagem em relação às amostras com e sem pele. Os pedaços com pele apresentaram taxas maiores do que os sem pele, isto devido à pele agir como uma membrana porosa, facilitando a saída de água e evitando a secagem rápida da superfície.

ALZAMORA & CHIRIFE (1980), ao estudarem a desidratação de abacate verificaram, dentre os fatores avaliados, o teor de óleo como sendo o que mais influenciou na taxa de secagem. E que a difusividade de água é afetada negativamente pelo teor de óleo. O mesmo foi concluído por JASON (1965) no estudo da secagem de pescado.

Ao analisarem o efeito de diferentes velocidades do ar na umidade do material durante a secagem de grão de sorgo, SUAREZ et alii (1980) concluíram que o movimento de umidade interna é o que mais afeta a taxa de perda de umidade, já que o acréscimo da velocidade não influe na taxa de secagem.

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

- Os coeficientes de transferência de calor e massa e as propriedades termodinâmicas do alimento, são funções da temperatura e umidade, e então a equação diferencial resultante do sistema torna-se não linear e somente pode ser resolvida por métodos numéricos. Verificaram que alguns autores assumem propriedades constantes por conveniência matemática para obtenção de solução analítica;
- O alimento encolhe consideravelmente, ocasionando mudanças no tamanho e forma , afetando a taxa de secagem. Alguns autores negligenciam o encolhimento considerando seus efeitos na difusividade efetiva. Quando o encolhimento é considerado, seu efeito é reconhecido somente como decréscimo nas dimensões da amostra.

2.5. Secagem com encolhimento

No processo de secagem, o estudo do fenômeno de encolhimento é importante, pois ocorre simultaneamente com a difusão de umidade e pode afetar a taxa de secagem. SUAREZ & VIOLLAZ (1991), analisando a secagem de batata usando a segunda lei de Fick considerando difusividade constante e sem encolhimento e a lei de Fick de difusão com encolhimento, encontraram resultados diferentes.

De acordo com VAN ARSDEL et alii (1973) os tecidos das células vivas apresentam uma propriedade de "turgor", significando que cada célula é distendida pelo líquido. Na secagem a tensão exercida pelo líquido sobre a parede celular é diminuída com a retirada da água ocasionando o encolhimento do material.

Ao estudar o efeito do encolhimento durante a secagem de vegetais, RATTI (1994) verificou que nos primeiros estágios de secagem a amostra mantém sua forma

original, mesmo ocorrendo encolhimento. Com a continuidade da secagem, o encolhimento é seguido de deformação das partículas. E a baixa umidade, a amostra apresenta-se de forma irregular. Levando-se em conta a velocidade do ar, verificou que a baixas velocidades, a resistência externa prevalece e o alimento encolhe uniformemente. Quando a velocidade do ar é alta, a resistência interna controla o processo, a superfície torna-se mais seca que o centro, e o encolhimento é irregular em diferentes pontos da amostra.

MADAMBA et alii (1994) e WANG & BRENNAN (1995), em seus estudos, verificaram que grande parte dos modelos matemáticos para secagem de grãos e vegetais encontrados na literatura, não leva em conta o encolhimento, nem o efeito da variação das propriedades físicas e térmicas, como densidade, porosidade, condutividade e calor específico. Essas considerações são mais por conveniência matemática, para facilitar a solução das equações de transporte de calor e massa. No entanto, esses modelos não são necessariamente válidos para todo alimento e em toda variação de umidade e condições de secagem.

Um modelo matemático de transferência simultânea de calor e massa foi proposto por WANG & BRENNAN (1995), com as seguintes considerações: o encolhimento não é negligenciado; as propriedades físicas e térmicas são funções da umidade e temperatura; durante a secagem não há fluxo de vapor de água; transferência de calor e massa proporcional à diferença de temperatura e pressão de vapor entre a superfície do sólido e o meio de secagem; a amostra é considerada como sendo uma placa plana infinita.

Do balanço de massa tem-se:

$$\rho_1 \frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \rho_1 \frac{\partial X}{\partial x} \right) \quad (2.1)$$

Do balanço de energia tem-se:

$$\rho_b C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2.2)$$

Com as seguintes condições:

$$K_m (C_{\text{superf}} - C_{\text{ar}}) = D \rho_1 \frac{\partial X}{\partial x} \quad x = 0 \quad (2.2.1)$$

$$h (T_{\text{ar}} - T_{\text{superf}}) = \lambda_v D \rho_1 \frac{\partial X}{\partial x} - k \frac{\partial T}{\partial x} \quad x = 0 \quad (2.2.2)$$

$$\frac{\partial X}{\partial x} = 0 \quad \text{e} \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad x = L \quad (2.2.3)$$

Estas equações foram resolvidas por eles, pelo método de diferenças finitas de CRANK-NICOLSON. Ao analisarem o modelo levando e não levando em conta o encolhimento, WANG & BRENNAN (1995) obtiveram melhores resultados quando o encolhimento foi considerado.

Segundo MISRA & YOUNG (1980), o encolhimento de produtos agrícolas durante a secagem é um fenômeno físico que ocorre simultaneamente com a difusão de umidade e pode ter um efeito significativo na difusividade mássica, e portanto na taxa de remoção de umidade. Porém, verificaram que considerar o encolhimento nos modelos de secagem é difícil devido não se ter informações sobre o coeficiente de encolhimento nem da relação funcional entre encolhimento e difusividade mássica.

Estudando o encolhimento durante a secagem de perca oceânica (*Sebastes marinus*) em secador a ar com umidade relativa de 35 %, temperatura de 25 °C e velocidade do ar de 36,5 m/min, BALABAN & PIGOTT (1986), verificaram que o comprimento e a largura das lâminas não encolhem na mesma proporção,

possivelmente devido a orientação das fibras dos músculos. A espessura foi a dimensão que mais encolheu durante a secagem. A densidade calculada foi de 1,38 g/cm³ a 15 % de umidade.

De acordo com PARK (1987), do ponto de vista matemático, o encolhimento durante a secagem ocasiona dificuldades devido à variação das condições de contorno.

Um modelo matemático para secagem de alimentos que leva em conta o encolhimento como parte fundamental da operação de secagem foi desenvolvido por VAGENAS et alii (1990). O modelo foi baseado nas seguintes proposições:

- A amostra de secagem é tratada de um ponto de vista macroscópico como um sistema pseudo-homogêneo;
- Durante a secagem, a umidade, pressão parcial de vapor e temperatura estão em equilíbrio termodinâmico;
- Nenhuma massa de água é produzida ou consumida durante a secagem.

VAGENAS et alii (1990), obtiveram uma boa concordância entre os valores calculados e os dados experimentais.

PINTO & TOBINAGA (1991) estudando a secagem de músculos de peixes também observaram a anisotropia do material em relação ao encolhimento, similar ao observado por BALABAN & PIGOTT (1986).

Trabalhando com merluza (*Meluccius biliniaris*), peixe porco (*Monocanthus hispidus*) e cação anequim (*Carcharodon carcharias*), PINTO & TOBINAGA (1992) verificaram que o modelo de secagem central de SUZUKI et alii era o que melhor se ajustava aos dados experimentais para determinação do coeficiente de encolhimento volumétrico (Sb).

$$S_b = K \left(X / X_o \right) + R \quad (2.3)$$

sendo

$$K = (1 + \Phi) X_o / (X_o - X_e) \quad (2.3.1)$$

$$R = (\Phi X_o - X_e) / (X_o - X_e) \quad (2.3.2)$$

$$\Phi = (\rho_{bo} / \rho_{be}) (X_e + 1) / (X_o + 1) \quad (2.3.3)$$

onde ρ_{bo} e ρ_{be} são as densidades inicial e de equilíbrio das amostras.

LOZANO et alii (1983), apresentaram um modelo que relaciona a variação de volume em função da umidade.

$$Sb = \frac{V_{b(x)}}{V_{bo}} \quad (2.4)$$

Estudando a secagem de vegetais KILPATRICK et alii (1955) verificaram que o volume de encolhimento é bem próximo ao volume de água evaporada nos estágios iniciais de secagem sendo que nos estágios finais o encolhimento é menor que a água removida e sugerem a expressão:

$$Sb = (\bar{X} + 0.8) / (X_o + 0.8) \quad (2.5)$$

O modelo requer o conhecimento da umidade inicial e da massa específica do material seco. A equação é válida para umidade acima de 15 a 20 % e massa específica do material seco de 1,25 g/cm³. O mesmo foi concluído por AKEREDOLU (1987), analisando o encolhimento em desidratação de raízes nigerianas tipo *Manihot Utilissima* e *Discorea Rotunda* usando o modelo de secagem uniforme de Suzuki et alii (1976).

PARK (1987) trabalhando com filé de tubarão tipo gralha preta (*Carchahinus limbatus*) verificou que a solução da segunda lei de Fick fornece um excelente ajuste

aos dados experimentais obtidos. No mesmo trabalho, ele apresentou a influência do encolhimento no referido ajuste. A solução da equação do modelo difusional com encolhimento, apresentado por PARK (1987) é:

$$\frac{\bar{C} - C_o}{C_o - C_e} = \frac{4}{r^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{b_n^2} \exp(-D b_n^2 t) \quad (2.6)$$

onde

$\bar{C}$ = umidade média em base seca por volume (X/vol (Kg H₂O/Kg ms m³))

C_e = umidade em equilíbrio em base seca por volume

C_o = umidade inicial em base seca por volume.

Um modelo apresentado por SERENO & MEDEIROS (1990) para prever a secagem de alimentos, é baseado nas propriedades físicas e de transportes tais como difusividade de massa e calor. O modelo leva em conta o efeito da interação umidade-sólido na superfície de secagem por meio de uma equação de equilíbrio e a variação na densidade do sólido devido ao encolhimento. O modelo físico considerado consiste de um sólido poroso, homogêneo e isotrópico, submetido à secagem por ar quente. É descrito por uma equação de conservação de energia e calor não-estacionário. A equação é simplificada por assumir que o gradiente de temperatura e concentração são as únicas forças motrizes responsáveis pela transferência de calor e massa respectivamente. O modelo foi testado por MEDEIROS & SERENO (1994) na avaliação das propriedades físicas e de transporte durante a secagem de ervilhas por ar quente. Foi encontrada uma diferença relativa média entre os valores experimentais e calculados de 6.1%.

VACCAREZZA & CHIRIFE (1978) desenvolveram um modelo quantitativo baseado nos efeitos de transferência de calor para demonstrar que a dependência da taxa de secagem com a espessura é menor do que o predito pelo modelo de Fick. Isto também foi verificado por JASON (1965) trabalhando com pescado e ALZAMORRA et alii (1979) trabalhando com abacate.

Segundo JASON (1965), no músculo de peixe a difusão de água é praticamente isotrópica e quase todas as espécies magras possuem a mesma difusividade. Verificou também que inicialmente o músculo do peixe possui umidade por volta de 4g água/g sólido seco e que quando o sistema é o músculo no seu estado natural e ocorre encolhimento durante a secagem, a difusividade permanece constante até a concentração de umidade cair para aproximadamente 0,1g água/g sólido seco. E que para peixes gordos, a difusividade decresce com o acréscimo de gordura.

KECHAOU & ROQUES (1989), citado por PINTO & TOBINAGA (1993) considerando o processo quasi-isotérmico e levando em conta o encolhimento na espessura, propõem o seguinte modelo:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{D(X, T)}{(1 + \alpha X)^2} \frac{\partial X}{\partial \xi} \right) \quad (2.7)$$

sendo

$$dz = (1 + \alpha X) d\xi \quad (2.7.1)$$

$$\xi = \int_0^z \frac{dz}{(1 + \alpha X)} \quad (2.7.2)$$

onde α é o coeficiente de encolhimento linear, representado pela expressão:

$$L_t = L_s (1 + \alpha X) \quad (2.7.3)$$

e o perfil de umidade médio é dado por:

$$\bar{X}_t = \frac{1}{L_t} \int_0^{L_t} X d\xi \quad (2.8)$$

Ao analisarem a utilização da segunda lei de Fick para determinação da difusividade, AGUERRE et alii (1985) verificaram que como outros processos na indústria de alimentos, a secagem é controlada por difusão interna, e que em muitos casos a difusividade é considerada constante e é calculada através da segunda lei de Fick. A difusão de água em alimento durante a secagem é um fenômeno complexo, influenciada pelas considerações estruturais, encolhimento e interações podendo desviar o procedimento de difusão daquele predito pela solução formal da equação diferencial para difusão.

2.6. Difusividade efetiva dependente da umidade

Uma outra abordagem interessante para descrição de secagem é desprezar os efeitos de encolhimento e levar em conta a dependência da difusividade com a umidade. Nesta linha de abordagem encontram-se os trabalhos de secagem de géis, dentre os quais destacam-se:

KARATHANOS et alii (1990) usando dados de secagem de géis de amido, analisaram o método de inclinação simplificado baseado na solução da equação de Fick para difusão em regime transiente, determinando a difusividade, usando a equação

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{\eta^p} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(D \eta^p \frac{\partial X}{\partial \eta} \right) \quad (2.9)$$

$$\text{condição inicial} \quad t = 0 \quad 0 < \eta < \eta_0 \quad X = X_0 \quad (2.9.1)$$

$$\text{contorno} \quad t > 0 \quad \eta = 0 \quad \partial X / \partial \eta = 0 \quad (2.9.2)$$

$$t > 0 \quad \eta = \eta_0 \quad X = X_e \quad (2.9.3)$$

Para placa plana, $p=0$, e a solução analítica em termos da umidade média obtida por CRANK (1975) é:

$$W = \frac{\bar{X} - X_e}{X_o - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D t}{4r_o^2}\right] \quad (2.10)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{L} \int_0^L X dx \quad (2.11)$$

onde

W - umidade adimensional

r_o - semi-espessura da amostra para secagem em ambos os lados ou a espessura da amostra para secagem em um só lado.

Para esfera de raio r_o , $p = 2$, a solução fica

$$W = \frac{\bar{X} - X_e}{X_o - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left[-\frac{n^2 \pi^2 D t}{r_o^2}\right] \quad (2.12)$$

A difusividade líquida efetiva (D_{ef}) a uma dada razão de umidade (W) ou umidade (X) é estimada, segundo KARATHANOS et alii (1990), da equação

$$D_{ef} = [(dW/dt)_{exp} / (dW/dF_o)_{cal}] r_o^2 \quad (2.13)$$

$$\text{com } F_o = Dt/r_o^2 \text{ - número de Fourier para difusão} \quad (2.14)$$

Comparando esse método com o de simulação em computador, KARATHANOS et alii (1990) verificaram que os dois apresentaram resultados

similares de difusividade líquida efetiva em materiais onde a difusão líquida predomina.

De acordo com SARAVACOS & RAOUEOS (1984), a variação da difusividade com a umidade é um fenômeno comum em polímeros, causado pela expansão da cadeia dos mesmos. Eles analisaram essa dependência durante a secagem de géis de amido, e verificaram que o gel seca essencialmente durante o período de taxa decrescente com significativo encolhimento. A curva da taxa de secagem tem sido usada para estimar o valor da difusividade, entretanto em muitos produtos alimentícios a difusividade varia com a umidade, evidenciado pela forma da curva de secagem. Verificaram ainda que para alguns alimentos (por exemplo peixes) a curva experimental sugere dois valores distintos de difusividade.

VAGENAS & KARATHANOS (1993) citam que o amido e outros polímeros naturais são materiais utilizados na simulação de experimentos de secagem para estimar a difusividade efetiva. Durante seus experimentos verificaram que materiais gelatinizados desenvolvem uma estrutura porosa e neste caso a difusividade estimada corresponde à difusividade líquida efetiva, que é expressa como função das difusividades das fases gasosa (D_g) e sólida (D_s) e da porosidade (γ)

$$D_{ef} = f(D_s, D_g, \gamma) \quad (2.15)$$

$$D_s = D_s(X) \quad (2.16)$$

$$D_g = D_w \frac{1}{\rho_s (\partial f / \partial c_w)} \quad (2.17)$$

onde

D_w - difusividade de vapor de água no ar (m^2/s);

ρ_s - densidade na fase sólida (Kg/m^3);

c_w - concentração de vapor de água no ar (Kg/m^3);

f - função isoterma de sorção líquida definida pela equação $X = f(c_w, T)$.

O cálculo da difusividade líquida efetiva foi feito usando o método de inclinação usado por KARATHANOS et alii (1990).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para os testes da modelagem foram utilizados dados experimentais da secagem de filés de MERLUZA (*Meluccius biliniaries*) obtidos por PINTO (1992). As dimensões, procedimentos e as condições por ele utilizados foram:

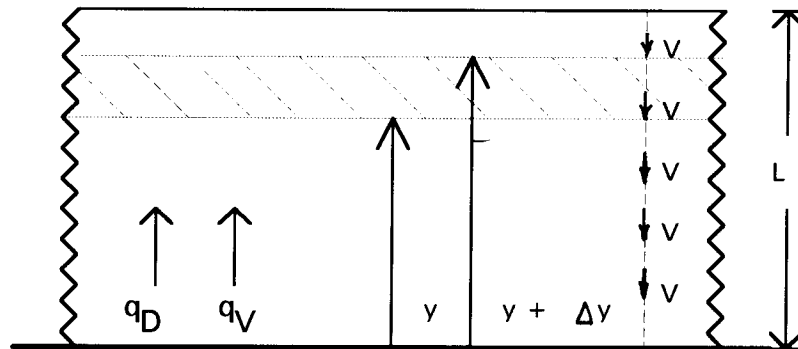
- Dimensões aproximadas: comprimento 10,0 cm, largura 5,0 cm, espessura 1,0 cm. Eixo longitudinal do peixe coincidiu com a maior dimensão da amostra;
- Procedimentos experimentais: logo após serem pesadas e medidas, uma a uma, as amostras eram colocadas sobre lâminas de aço inoxidável levadas ao secador mantido a temperatura de bulbo seco de 29° C e bulbo úmido de 19° C. O ar de secagem, com umidade constante, era feito circular, internamente ao secador, passando por uma das faces da amostra com velocidade de 0,5 m/s;
- As medidas de espessura e da massa das amostras, a cada intervalo de tempo, foram feitas sem retirá-las do secador.

Para os cálculos matemáticos, foram usados o programa computacional EUREKA e os programas em linguagem QBASIC, Fluxogramas (01) e (02) do Apêndice (B).

O gráfico da tangente, Figura (3.1), foi utilizado para encontrar os valores aproximados dos auto-valores.

3.1 Secagem com encolhimento um modelo simplificado

Considerou-se a secagem de filé de peixe de espessura L , homogêneo, com umidade inicial uniforme X_0 , colocado sobre uma placa plana impermeável, em um meio ambiente de temperatura T_∞ e umidade X_∞ constantes, onde o ar escoa paralelamente ao filé com velocidade $u > 0,5$ m/s. O modelo físico escolhido foi que o encolhimento na direção normal ao filé fosse resultado do movimento de aproximação ao suporte, de todos os pontos do mesmo, com velocidade v constante, igual à velocidade de encolhimento. Efetuando o balanço de massa obtem-se a Equação (3.1) em termos dos fluxos difusivo (q_D) e convectivo (q_V).



$$-\frac{\partial q_D}{\partial y} - \frac{\partial q_V}{\partial y} = \frac{\partial X}{\partial t} \quad 0 < y < L \quad t > 0 \quad (3.1)$$

Para o fluxo de massa difusivo foi admitida a lei de Fick, com difusividade D que poderá ser ou não constante, Equação (3.1.1). Para o fluxo convectivo é válida a Equação (3.1.2).

$$q_D = -D \frac{\partial X}{\partial y} \quad (3.1.1)$$

$$q_V = -vX \quad (3.1.2)$$

Das Equações (3.1), (3.1.1) e (3.1.2) obtem-se:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial X}{\partial y} \right) + v \frac{\partial X}{\partial y} = \frac{\partial X}{\partial t} \quad 0 < y < L \quad t > 0 \quad (3.2)$$

As condições experimentais assumidas por PINTO (1992), para obtenção dos dados de secagem, utilizados no presente trabalho, foram as seguintes:

$$\text{inicial} \quad X = X_0 \quad t = 0 \quad \text{e} \quad 0 < y < L \quad (3.2.1)$$

$$\text{contorno} \quad \frac{\partial X}{\partial y} = 0 \quad t > 0 \quad y = 0 \quad (3.2.2)$$

$$X = X_e \quad t > 0 \quad y = L \quad (3.2.3)$$

A Equação (3.2) pode ser adimensionalizada através das seguintes mudanças de variáveis:

$$\psi = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (3.3)$$

$$\eta = \frac{y}{L_0} \quad (3.4)$$

$$\tau = \frac{D t}{L_0^2} \quad (3.5)$$

Em termos dessas variáveis tem-se:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial \eta^2} + \Omega \frac{\partial \psi}{\partial \eta} = \frac{\partial \psi}{\partial \tau} \quad (3.6)$$

onde

$$\Omega = \frac{vLo}{D} = \text{constante} \quad (3.6.1)$$

$$\psi = 1 \quad \tau = 0 \quad 0 < \eta < L \quad (3.6.2)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial \eta} = 0 \quad \tau > 0 \quad \eta = 0 \quad (3.6.3)$$

$$\psi = 0 \quad \tau > 0 \quad \eta = \frac{L}{L_0} = l \quad (3.6.4)$$

$$\text{Fazendo } \psi = g(\eta) \exp \left(-\frac{\Omega}{2} \eta - \lambda^2 \tau \right) \quad (3.7)$$

$$\text{obtem-se } \frac{d^2 g}{d\eta^2} + \alpha^2 g = 0 \quad (3.8)$$

$$\text{onde } \alpha^2 = \lambda^2 - \frac{\Omega^2}{4} \quad (3.8.1)$$

As condições de contorno passam a ser

$$\left. \frac{dg}{d\eta} \right|_{\eta=0} = \frac{\Omega}{2} g(0) \quad (3.8.2)$$

$$g(l) = 0 \quad (3.8.3)$$

Das Equações (3.6.2), (3.7), (3.8), (3.8.2) e (3.8.3) obtém-se a solução da Equação (3.6):

$$\psi = \sum_{n=1}^{\infty} \exp(P) \frac{2 \operatorname{sen}(2\alpha_n l) \exp\left(\frac{\Omega}{2} l\right) \cos(\alpha_n l)}{\Omega l + 2 \cos^2(\alpha_n l)} \left[\operatorname{sen}(\alpha_n \eta) - \operatorname{tg}(\alpha_n l) \cos(\alpha_n \eta) \right] \quad (3.9)$$

onde

$$P = \left(-\lambda_n^2 \tau - \frac{\Omega}{2} \eta \right) \quad (3.9.1)$$

Os auto-valores α_n são os zeros positivos da equação

$$\alpha_n = -\frac{\Omega}{2} \operatorname{tg}(\alpha_n l) \quad (3.9.2)$$

$$\text{e} \quad \lambda_n^2 = \alpha_n^2 + \frac{\Omega^2}{4} \quad (3.9.3)$$

Do perfil de umidade dado pela Equação (3.9), obtém-se para a umidade média volumétrica $\bar{\psi} = \frac{1}{V} \int \psi \, dv$, desprezando a contração na área do filé, a equação

$$\bar{\psi} = \frac{2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-\lambda_n^2 \tau) \frac{\operatorname{sen}^2(2\alpha_n l) \exp\left(\frac{\Omega}{2} l\right)}{\Omega l + 2 \cos^2(\alpha_n l)} \frac{\exp\left(-\frac{\Omega}{2} l\right) - 2 \cos(\alpha_n l)}{\Omega} \quad (3.10)$$

No cálculo da umidade adimensional, utilizando a Equação (3.10) empregou-se o seguinte procedimento:

1.) No tempo $t = 0$, arbitrou-se um valor para Ω . Com esse valor e o valor da velocidade inicial, foi calculado o valor de D com a Equação (3.6.1);
2.) Com o valor de Ω arbitrado, calculava-se os auto-valores α_n que são os zeros positivos da Equação (3.9.2), utilizando o programa computacional EUREKA, no qual entrava-se com a equação em questão e com os valores aproximados da solução. O programa fornecia os auto-valores (α_n). Os valores aproximados de α_n foram encontrados para cada β_i , a partir do gráfico esquemático abaixo, onde o eixo x está em radianos e $y = -\beta_i \tan x$. A reta é $y = x$;
3.) Com os valores de Ω e α_n foram calculados os valores de λ_n por meio da Equação (3.9.3);
4.) Com os valores de D e t , foi calculado o valor de τ por meio da Equação (3.5);
5.) Com os valores de Ω , α_n , λ_n e τ calculou-se a umidade adimensional no instante $t = 0$ através da Equação (3.10) utilizando um programa computacional em linguagem QBASIC (Fluxograma - 01);
6.) No instante t_2 , manteve-se o valor de D encontrado no item (1) e com a velocidade v_2 calculou-se um novo Ω ;
7.) Com o valor de Ω , calculado em (6), repetem-se os mesmos procedimentos descritos anteriormente para o cálculo da umidade adimensional no instante t_2 ;
8.) Esse procedimento foi repetido para todos os valores de t ;

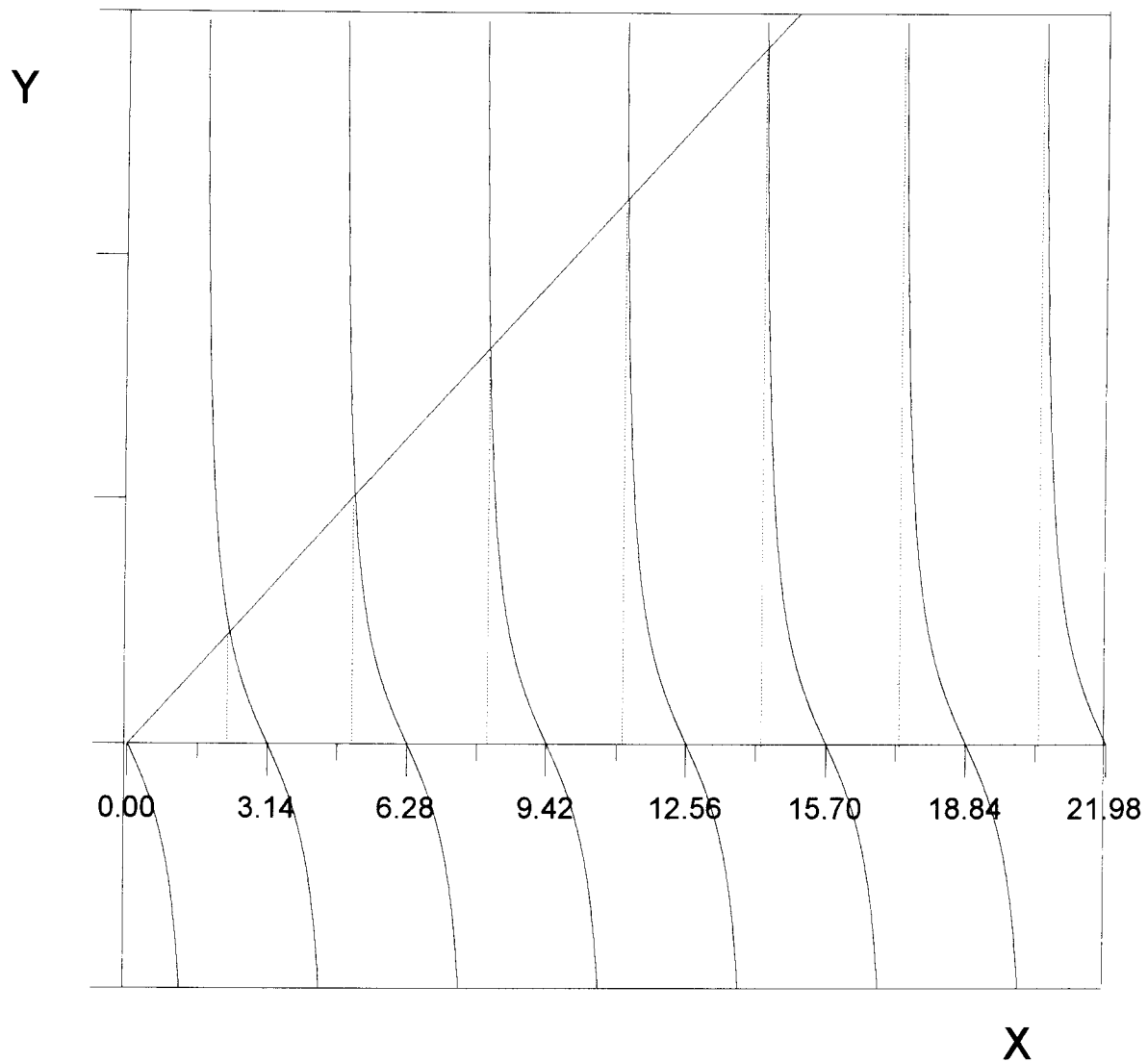


FIGURA 3.1. Gráfico esquemático de $y = -\beta_1 \tan x$ e $y = x$

9.) Os valores de umidade adimensional calculados foram comparados com os valores obtidos experimentalmente, através da Equação (3.14), obtendo-se o desvio entre eles;
10.) Todo esse procedimento, arbitrando Ω e portanto, o valor de D foi repetido até encontrar o mínimo do desvio definido pela Equação (3.14);

3.2 Secagem sem encolhimento

De acordo com PINTO (1992), após um certo intervalo de tempo de secagem a espessura da amostra não mais encolhe. A equação do modelo difusivo sem encolhimento, considerando difusividade efetiva constante, é:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} \quad (3.11)$$

Com as seguintes condições inicial e de contorno

$$X = X_f \quad t = 0 \quad 0 \leq y \leq L_f \quad (3.11.1)$$

$$X = X_e \quad t \geq 0 \quad y = L_f \quad (3.11.2)$$

$$\frac{\partial X}{\partial y} = 0 \quad t \geq 0 \quad y = 0 \quad (3.11.3)$$

Onde L_f é a espessura final. A variável tempo t , aqui utilizada é medida a partir do instante em que a secagem ocorre sem encolhimento.

O perfil de umidade que satisfaz a Equação (3.11) e as condições (3.11.1), (3.11.2) e (3.11.3) é:

$$\psi = \frac{X - X_e}{X_f - X_e} = \frac{4}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{(2m+1)\pi} \cos \left(m + \frac{1}{2} \right) \pi \eta \exp(-\lambda_m^2 \tau) \quad (3.12)$$

cuja média volumétrica é:

$$\bar{\psi} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=0}^{\infty} \exp(-\lambda_m^2 \tau) \frac{1}{(2m+1)^2} \quad (3.13)$$

onde

$$\lambda_m = (2m + 1) \frac{\pi}{2} \quad m = 0, 1, 2 \dots \quad (3.13.1)$$

$$\tau = \frac{D t}{L_f^2} \quad (3.13.2)$$

$$\eta = \frac{y}{L_f} \quad (3.13.3)$$

Procedimento para o cálculo da umidade adimensional utilizando a Equação (3.13):

1.) O valor de D que melhor ajustou os valores de umidade adimensional calculados aos experimentais no procedimento anterior (Tabela - 4.13) foi utilizado para calcular o valor de τ através da Equação (3.13.2);
2.) Com os valores de τ , calculou-se a umidade adimensional através da Equação (3.13) utilizando um programa computacional em linguagem QBASIC (Fluxograma - 02);
3.) Os valores de umidade adimensional calculados, juntamente com os valores de umidade adimensional da parte com encolhimento que melhor ajustaram-se aos dados experimentais, foram novamente comparados através da Equação (3.14);
4.) Arbitrou-se um novo valor para D e os procedimentos (2) e (3) foram repetidos até encontrar o menor desvio entre os valores de umidade adimensional experimentais e calculados através da Equação (3.14).

A equação usada para o cálculo do desvio entre os valores de umidade experimental e calculado é:

$$\varepsilon = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\frac{Y_{\text{exp}} - Y_{\text{cal}}}{Y_{\text{exp}}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.14)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Velocidade de encolhimento

A velocidade de encolhimento foi calculada, aproximando a curva do gráfico de espessura em função do tempo à sucessão de segmentos de reta, mas essa técnica não conduziu a um bom resultado. Ao passar de um segmento para outro, para algumas amostras, alguns pontos calculados se desviavam completamente da curva experimental. Foi verificado que esses desvios eram ocasionados pelo salto brusco de velocidade obtida através de dois segmentos sucessivos. Os valores de velocidade obtidos para algumas amostras e os valores de difusividade que melhor ajustaram a curva de umidade adimensional calculada à experimental, usando essa técnica, são apresentados nas Tabelas (A.9) e (A.10) do Apêndice (A). As curvas de umidade adimensional obtidas com os valores calculados são mostradas nas Figuras (A.9) a (A.12) do Apêndice (A). Para sanar estes problemas, a velocidade de encolhimento da amostra foi calculada a partir da curva de ajuste polinomial dos dados de espessura em função do tempo. Em todas as amostras, o ajuste apresentou coeficiente de correlação médio de $99,8 \pm 0,2$ %. As curvas obtidas são mostradas nas Figuras (4.1) a (4.4) e (A.1) a (A.4) do Apêndice A, e os valores das velocidades de cada amostra e os dados experimentais utilizados no cálculo das mesmas, nas Tabelas (4.1) a (4.4).

As curvas de velocidade apresentaram o mesmo comportamento. A diferença nos valores de velocidade entre as amostras, deve-se provavelmente à variação na espessura e umidade inicial.

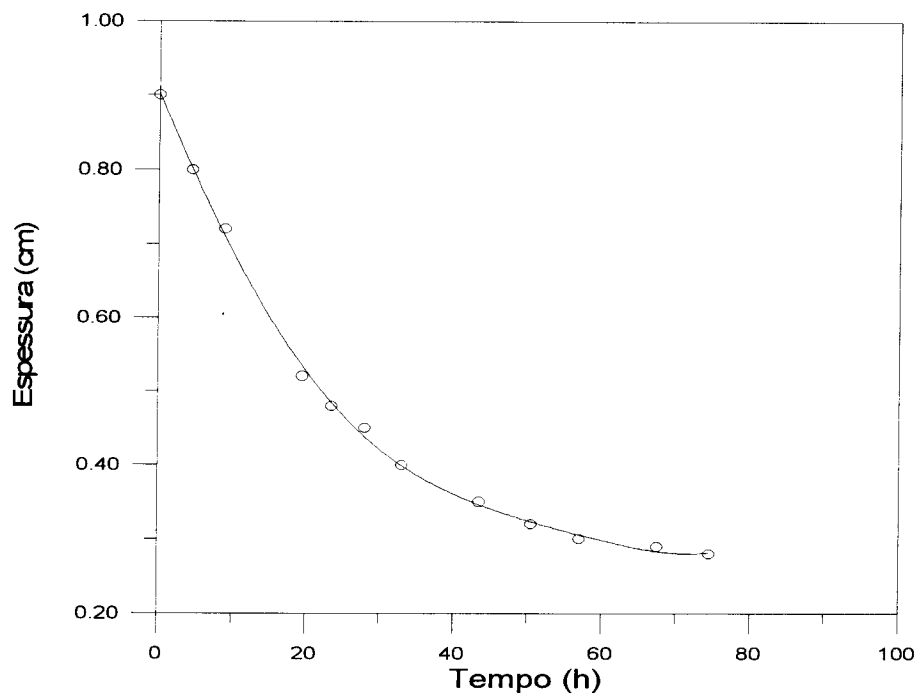


FIGURA 4.1. Espessura da amostra M/05/04 em função do tempo com ajuste polinomial de grau 5

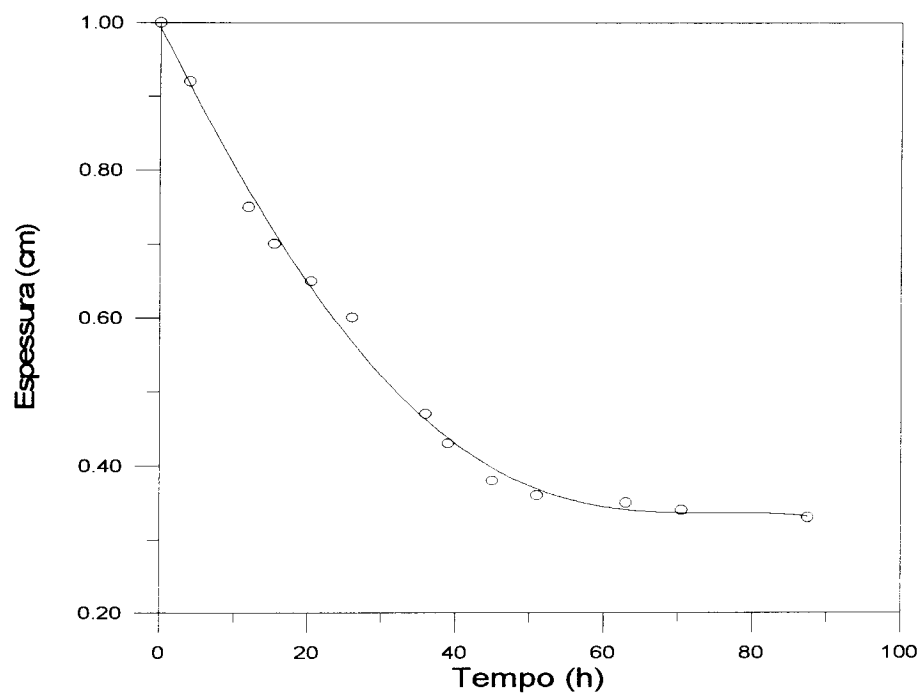


FIGURA 4.2. Espessura da amostra M/06/04 em função do tempo com ajuste polinomial de grau 4

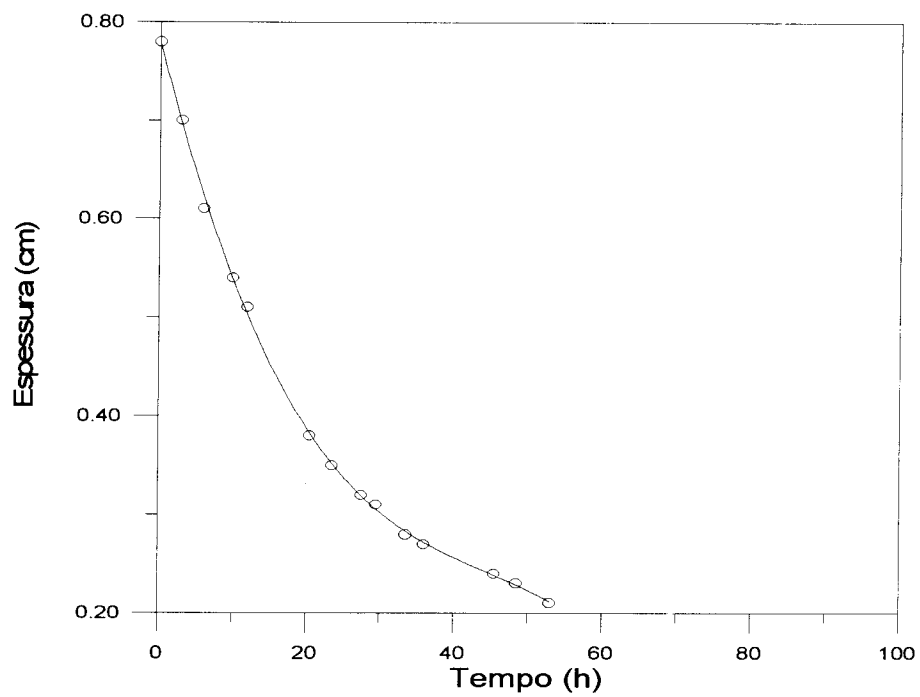


FIGURA 4.3. Espessura da amostra M/07/04 em função do tempo com ajuste polinomial de grau 4

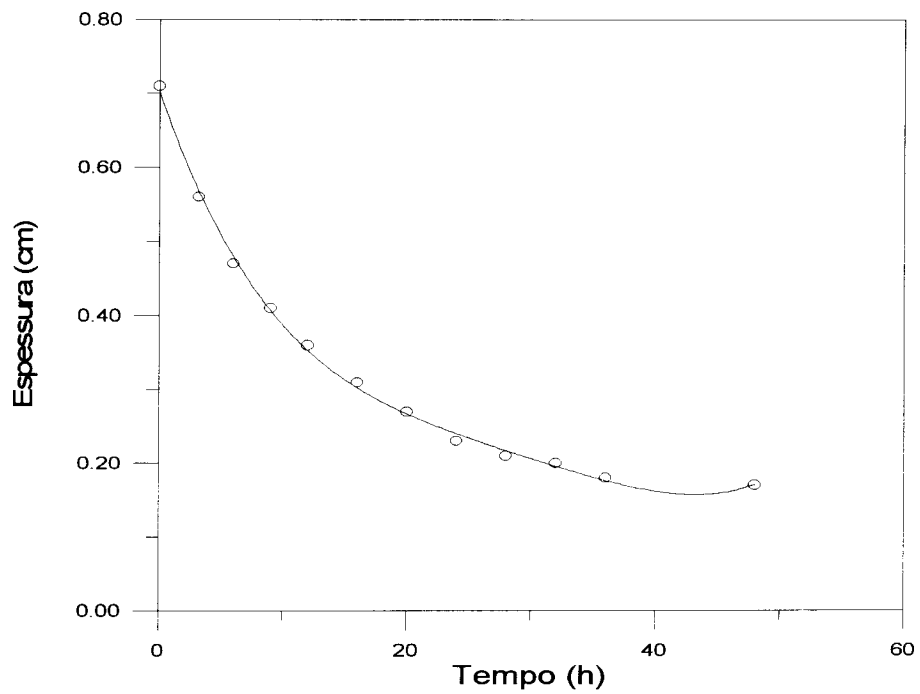


FIGURA 4.4 Espessura da amostra M/15/02 em função do tempo com ajuste polinomial de grau 4

TABELA 4.1. Valores de velocidade das amostras M/06/04* e M/12/04*

M/06/04			M/12/04		
tempo (h)	espessura (cm)	velocidade 10^6 (cm/s)	tempo (h)	espessura (cm)	velocidade 10^6 (cm/s)
0,0	1,00	6,42	0,0	0,80	11,90
4,0	0,92	5,82	2,0	0,73	10,80
12,0	0,75	4,76	4,0	0,66	9,75
15,5	0,70	4,33	6,0	0,60	8,76
20,5	0,65	3,76	8,5	0,52	7,61
26,0	0,60	3,18	10,0	0,47	6,96
36,0	0,47	2,26	12,0	0,43	6,15
39,0	0,43	2,02	14,0	0,38	5,41
45,0	0,38	1,58	18,5	0,30	3,93
51,0	0,36	1,20	21,0	0,28	3,22
63,0	0,35	0,86	23,0	0,26	2,71
70,5	0,34	0,30	26,0	0,23	2,04
87,5	0,33	0,08	28,0	0,22	1,65
			30,0	0,21	1,30
			43,5	0,19	0,10

* M = Merluza
06 = nº corrida
04 = nº prato

TABELA 4.2. Valores de velocidade das amostras M/11/02* e M/11/04*

M/11/02			M/11/04		
tempo (h)	espessura (cm)	velocidade 10^6 (cm/s)	tempo (h)	espessura (cm)	velocidade 10^6 (cm/s)
0,0	0,58	14,70	0,0	0,94	17,10
2,0	0,48	11,90	2,0	0,79	14,90
5,0	0,37	8,52	5,0	0,69	12,10
8,0	0,30	5,83	8,0	0,55	9,61
11,0	0,25	3,76	11,0	0,46	7,57
15,0	0,20	1,82	15,0	0,37	5,49
21,0	0,19	0,30	21,0	0,30	3,76
			28,0	0,26	3,82

* Mesma legenda utilizada na Tabela 4.1

TABELA 4.3. Valores de velocidade das amostras M/05/04* e M/15/02*

M/05/04			M/15/02		
tempo (h)	espessura (cm)	velocidade 10^6 (cm/s)	tempo (h)	espessura (cm)	velocidade 10^6 (cm/s)
0,0	0,90	7,32	0,0	0,71	11,00
4,5	0,80	6,28	3,17	0,56	9,01
9,0	0,72	5,36	6,0	0,47	7,48
19,5	0,52	3,59	9,0	0,41	6,07
23,5	0,48	3,05	12,0	0,36	4,85
28,0	0,45	2,52	16,0	0,31	3,50
33,0	0,40	2,01	20,0	0,27	2,43
43,5	0,35	1,19	24,0	0,23	1,62
50,5	0,32	0,80	28,0	0,21	1,04
57,0	0,30	0,53	32,0	0,20	0,64
67,5	0,29	0,25	36,0	0,18	0,39
74,5	0,28	0,14	48,0	0,17	0,25

* Mesma legenda utilizada na Tabela 4.1

TABELA 4.4. Valores de velocidade das amostras M/07/04* e M/12/02*

M/07/04			M/12/02		
tempo (h)	espessura (cm)	velocidade 10^6 (cm/s)	tempo (h)	espessura (cm)	velocidade 10^6 (cm/s)
0,0	0,78	8,15	0,0	0,70	16,10
3,0	0,70	7,23	2,0	0,58	13,60
6,0	0,61	6,37	4,0	0,49	11,40
10,0	0,54	5,31	6,0	0,42	9,44
12,0	0,51	4,81	8,5	0,35	7,37
20,5	0,38	2,98	10,0	0,31	6,29
23,5	0,35	2,43	12,0	0,27	5,04
27,5	0,32	1,78	14,0	0,24	3,98
29,5	0,31	1,49	18,5	0,19	2,17
33,5	0,28	0,97	21,0	0,17	1,47
36,0	0,27	0,69	23,0	0,16	1,04
45,5	0,24	0,08	26,0	0,15	0,56
48,5	0,23	0,20	28,0	0,14	0,34

* Mesma legenda utilizada na tabela 4.1

4.2. Ajuste da umidade adimensional

Durante o processo de secagem foi verificada a ocorrência de encolhimento da amostra em todas as dimensões, sendo a espessura a dimensão que mais encolheu. Observou-se que esse encolhimento ocorria até a amostra ficar com umidade média de 3 % do valor de umidade inicial. Os valores de umidade adimensional foram então calculados levando-se em conta a secagem com e sem encolhimento, respectivamente pelas Equações (3.10) e (3.13). Os valores das dimensões para cada amostra são apresentados nas Tabelas (A.1) a (A.8) do Apêndice (A).

4.2.1. Secagem com encolhimento

Analisando o encolhimento ocorrido durante o processo de secagem, verificou-se que no segundo período de taxa decrescente as amostras não mais encolhiam já que de acordo com PINTO (1992), a transição do primeiro para o segundo período de taxa decrescente ocorria com a amostra apresentando umidade média de $0,237 \pm 0,015$ e foi observado que as amostras encolhiam até as mesmas ficarem com umidade média de $0,128 \pm 0,047$. (Tabela - A.12, do Apêndice A).

As curvas de umidade adimensional calculada foram analisadas, verificando-se que algumas amostras apresentaram no início do processo, valores de umidade maiores que os experimentais, enquanto outras mostraram valores de umidade menores. Outras apresentaram uma variação durante o processo, o que é evidenciado pelos dados nas Tabelas (4.5) a (4.8).

Dos valores de umidade adimensional calculados para a fase de secagem com encolhimento comparados com os experimentais, obteve-se um desvio mínimo médio de 1,5% conforme pode ser observado pela Tabela (4.13).

TABELA 4.5. Valores de umidade adimensional para os dados experimentais e calculados das amostras M/11/02* e M/11/04*, com encolhimento

M/11/02		M/11/04	
$(\bar{X}-X_e)/(X_o-X_e)$ experimental (x 100)	$(\bar{X}-X_e)/(X_o-X_e)$ calculado (x 100)	$(\bar{X}-X_e)/(X_o-X_e)$ experimental (x 100)	$(\bar{X}-X_e)/(X_o-X_e)$ calculado (x 100)
100,00	90,00	100,00	90,00
74,24	73,64	80,48	82,05
45,77	43,73	59,25	62,28
29,83	26,36	41,95	40,84
19,42	16,41	29,82	26,87
10,48	6,86	18,54	8,39
2,95	3,48	8,38	4,97
		3,56	0,97

* Mesma legenda utilizada na Tabela 4.1

TABELA 4.6. Valores de umidade adimensional para os dados experimentais e calculados das amostras M/05/04* e M/15/02*, com encolhimento

M/05/04		M/15/02	
$(\bar{X}-X_e)/(X_o-X_e)$ experimental (x 100)	$(\bar{X}-X_e)/(X_o-X_e)$ calculado (x 100)	$(\bar{X}-X_e)/(X_o-X_e)$ experimental (x 100)	$(\bar{X}-X_e)/(X_o-X_e)$ calculado (x 100)
100,00	90,00	100,00	90,00
74,97	79,76	72,87	76,24
54,83	65,25	54,68	57,60
29,02	34,18	41,30	41,79
23,55	27,79	31,60	30,95
18,66	23,13	23,31	23,15
14,51	16,85	17,45	18,15
8,57	9,83	12,19	12,33
6,05	5,94	7,86	8,87
3,84	3,58	5,44	6,65
2,00	2,03	3,79	3,19
1,42	1,16	0,96	0,76

* Mesma legenda utilizada na Tabela 4.1

TABELA 4.7. Valores de umidade adimensional para os dados experimentais e calculados das amostras M/07/04* e M/12/02*, com encolhimento

M/07/04		M/12/02	
$(\bar{X}-X_e)/(X_o-X_e)$ experimental (x 100)	$(\bar{X}-X_e)/(X_o-X_e)$ calculado (x 100)	$(\bar{X}-X_e)/(X_o-X_e)$ experimental (x 100)	$(\bar{X}-X_e)/(X_o-X_e)$ calculado (x 100)
100,00	90,00	100,00	90,00
82,71	82,34	81,05	77,84
65,60	68,12	64,97	62,47
48,38	51,93	51,54	45,84
42,46	45,12	38,29	29,89
24,77	23,99	31,90	23,20
20,65	19,97	25,35	18,35
16,18	16,01	20,10	15,86
14,04	14,67	11,43	11,60
10,56	10,48	8,44	8,91
8,82	8,99	6,66	7,31
4,41	3,93	4,66	5,35
3,54	2,17	3,79	3,42

* Mesma legenda utilizada na Tabela 4.1

TABELA 4.8. Valores de umidade adimensional para os dados experimentais e calculados das amostras M/06/04* e M/12/04*, com encolhimento

M/06/04		M/12/02	
$(\bar{X}-X_e)/(X_o-X_e)$ experimental (x 100)	$(\bar{X}-X_e)/(X_o-X_e)$ calculado (x 100)	$(\bar{X}-X_e)/(X_o-X_e)$ experimental (x 100)	$(\bar{X}-X_e)/(X_o-X_e)$ calculado (x 100)
100,00	90,00	100,00	90,00
77,99	82,47	87,83	85,50
51,26	57,746	76,91	73,71
43,16	48,36	66,11	62,23
33,96	38,22	52,71	47,19
25,81	29,86	45,30	38,07
13,38	14,99	37,93	30,13
10,52	10,91	31,37	22,77
6,47	6,00	19,85	13,66
4,13	4,00	15,48	11,96
2,32	2,51	12,74	10,11
1,75	1,66	9,44	7,50
1,13	0,61	7,81	6,07
		6,40	5,02
		1,47	1,93

* Mesma legenda utilizada na Tabela 4.1

4.2.2. Secagem sem encolhimento

Durante a secagem sem encolhimento, verificou-se que cerca de 75 % das amostras analisadas apresentaram valores de umidade calculada menor que o experimental. Os valores de umidade adimensional experimentais e calculados encontram-se nas Tabelas (4.9) a (4.12).

TABELA 4.9. Valores de umidade adimensional para os dados experimentais e calculados sem encolhimento. Amostras M/05/04* e M/06/04*

M/05/04		M/06/04	
$(\bar{X}-X_e)/(X_o-X_e)$ experimental x (1000)	$(\bar{X}-X_e)/(X_o-X_e)$ calculado x (1000)	$(\bar{X}-X_e)/(X_o-X_e)$ experimental x (1000)	$(\bar{X}-X_e)/(X_o-X_e)$ calculado x (1000)
10,5	3,84	7,02	7,40
7,34	2,42	6,07	5,93
6,35	1,78	3,69	3,43
2,67	0,42		
0,04	0,05		

* Mesma legenda utilizada na Tabela 4.1

TABELA 4.10. Valores de umidade adimensional para os dados experimentais e calculados sem encolhimento. Amostra M/07/04* e M/12/02*

M/07/04		M/12/02	
$(\bar{X}-X_e)/(X_o-X_e)$ experimental x (1000)	$(\bar{X}-X_e)/(X_o-X_e)$ calculado x (1000)	$(\bar{X}-X_e)/(X_o-X_e)$ experimental (x 1000)	$(\bar{X}-X_e)/(X_o-X_e)$ calculado (x 1000)
12,20	10,90	30,70	14,20
7,54	7,63	6,51	6,09
5,80	6,19	5,73	4,75
4,06	5,02	5,53	3,37
2,90	3,24	0,06	0,07
0,58	0,27		

* Mesma legenda utilizada na Tabela 4.1

TABELA 4.11. Valores de umidade adimensional para os dados experimentais e calculados sem encolhimento. Amostra M/11/04* e M/12/04*

M/11/04		M/12/04	
$(\bar{X}-X_e)/(X_o-X_e)$ experimental (x 1000)	$(\bar{X}-X_e)/(X_o-X_e)$ calculado (x 1000)	$(\bar{X}-X_e)/(X_o-X_e)$ experimental (x 1000)	$(\bar{X}-X_e)/(X_o-X_e)$ experimental (x 1000)
26,00	15,20	11,30	7,05
1,44	1,56	9,58	5,24
		0,15	0,18

* Mesma legenda da Tabela 4.1

TABELA 4.12. Valores de umidade adimensional para os dados experimentais e calculados sem encolhimento. Amostra M/15/02* e M/11/02*

M/15/02		M/11/02	
$(\bar{X}-X_e)/(X_o-X_e)$ experimental (x 1000)	$(\bar{X}-X_e)/(X_o-X_e)$ calculado (x 1000)	$(\bar{X}-X_e)/(X_o-X_e)$ experimental (x 1000)	$(\bar{X}-X_e)/(X_o-X_e)$ calculado (x 1000)
2,28	1,27	10,87	6,10
0,66	0,78	8,91	4,56
		0,08	0,11

* Mesma legenda utilizada na Tabela 4.1

Nas Figuras (4.5) a (4.12) são apresentadas as curvas de secagem experimentais e calculadas que apresentaram os menores desvios para as fases de secagem com e sem encolhimento. Comparando-se essas curvas, foi encontrado um desvio mínimo médio de 2,1%, conforme valores apresentados na Tabela (4.13)

4.3 Análise da difusividade

A difusividade efetiva para os dois períodos de taxa decrescente foi calculada por PINTO (1992), por regressão linear nas curvas de secagem experimental. A Tabela (A.11) do Apêndice A, mostra os valores para diferentes tipos de amostra. Nota-se que em todas as amostras a difusividade efetiva foi sempre maior na primeira fase do período de taxa decrescente do que na segunda fase. O mesmo foi observado por JASON (1958), trabalhando com pescado. Para Merluza, a difusividade efetiva para a primeira fase era igual a $(2,24 \pm 0,18) \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ e para a segunda, $(0,96 \pm 0,02) \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$. Os valores médios encontrados pelo ajuste das curvas de secagem experimentais e calculados através das Equações (3.10) e (3.13), foi de $(4,53 \pm 2,23) \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ para a parte com encolhimento e $(4,53 \pm 1,87) \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ sem encolhimento. Valores apresentados na Tabela (4.13).

Foi analisado o comportamento da secagem para tentar explicar a variação de difusividade efetiva encontrada, ou seja, porque parte das amostras apresentou difusividade efetiva maior durante a fase de encolhimento, enquanto outra parte apresentou difusividade maior durante a fase sem encolhimento. Analisaram-se as condições de secagem observando a velocidade e temperatura do ar de secagem, umidade inicial, umidade de equilíbrio e umidade onde não mais ocorreu encolhimento (Tabelas A.12 e A.13, do Apêndice A) e não foi possível se chegar a uma resposta fenomenologicamente convincente. Certamente essa variação irregular na difusividade é consequência do modelo físico utilizado, que foi o de identificar o encolhimento como o movimento de todos os pontos do filé em direção ao suporte.

TABELA 4.13. Valores de difusividade para a secagem com e sem encolhimento e os desvios mínimos obtidos

	com encolhimento		sem encolhimento	
	D (x 10 ⁷)	desvio mínimo (x 100)	D (x 10 ⁷)	desvio mínimo (x 100)
M/05/04	4,88	1,08	3,90	0,85
M/06/04	6,76	1,29	2,90	1,07
M/07/04	4,24	0,72	2,65	1,48
M/11/02	5,86	1,43	4,05	3,73
M/11/04	5,73	3,49	6,40	3,73
M/12/02	2,30	1,16	3,80	2,25
M/12/04	3,41	1,99	4,30	2,68
M/15/02	2,99	0,67	3,84	1,40

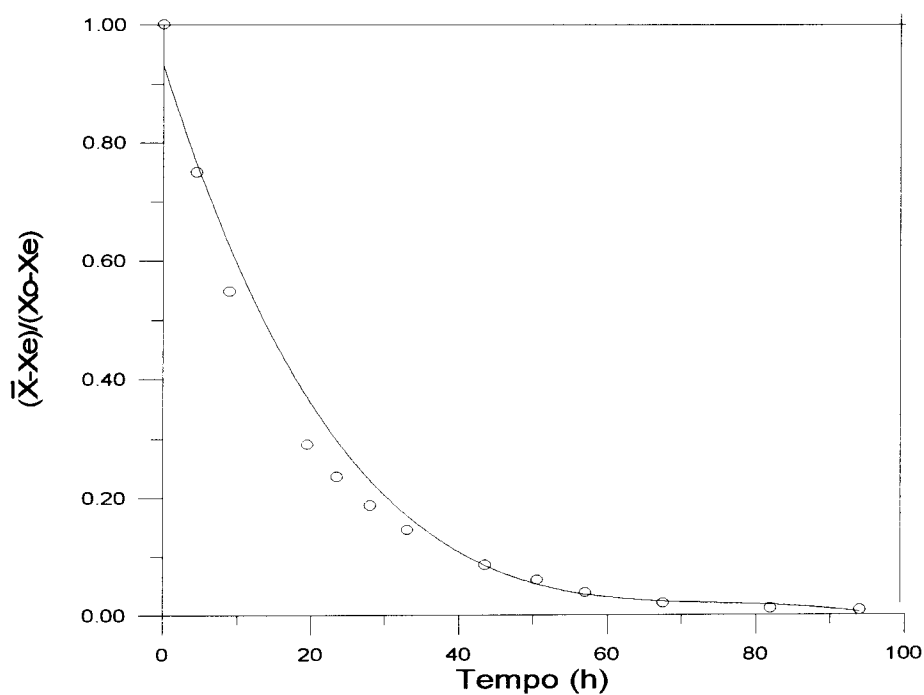


FIGURA 4.5. Curvas de secagem experimental (pontos) e calculada (linha contínua) para a amostra M/05/04

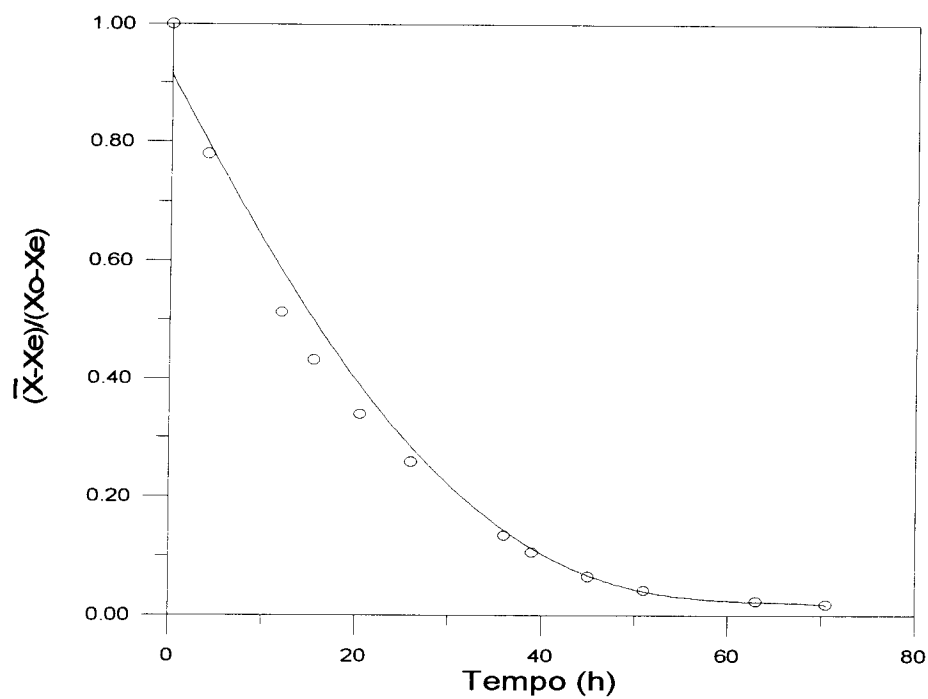


FIGURA 4.6. Curvas de secagem experimental (pontos) e calculada (linha contínua) para a amostra M/06/04

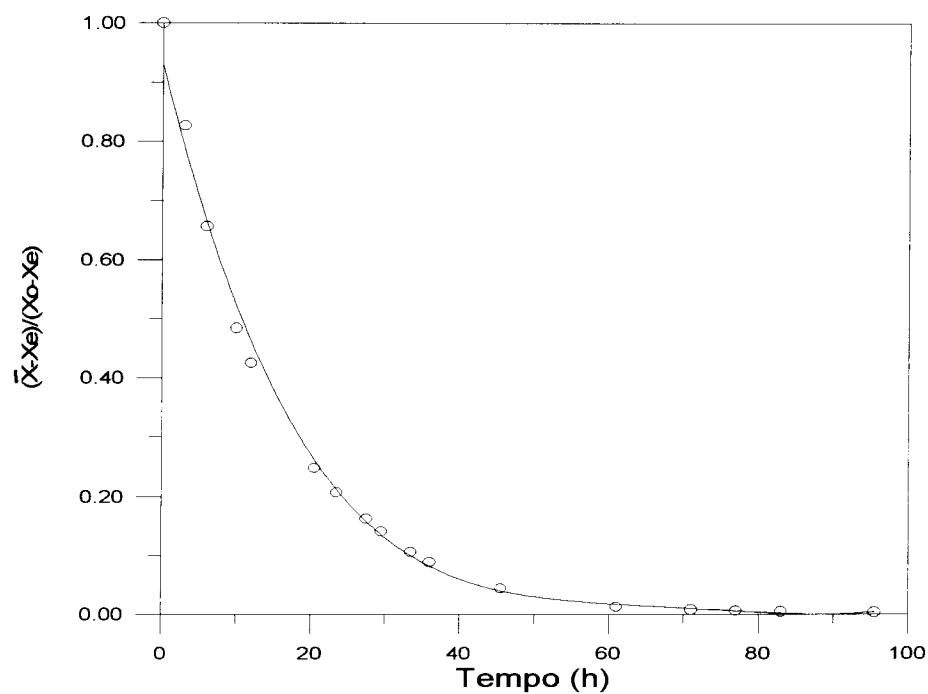


FIGURA 4.7. Curvas de secagem experimental (pontos e calculada (linha contínua) para a amostra M/07/04

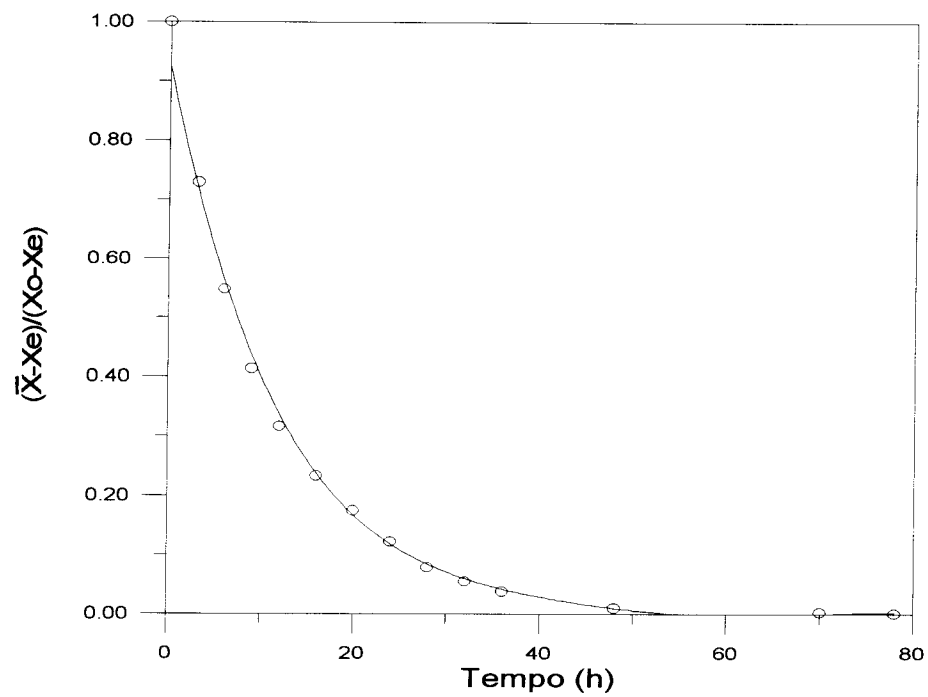


FIGURA 4.8. Curvas de secagem experimental (pontos) e calculada (linha contínua) para a amostra M/15/02

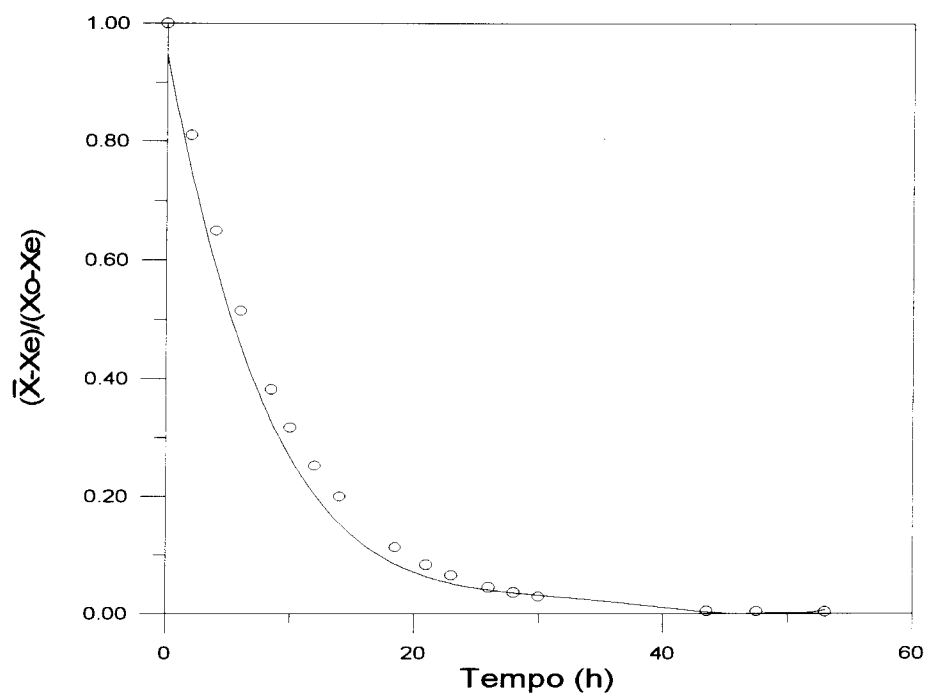


FIGURA 4.9. Curvas de secagem experimental (pontos) e calculada (linha contínua) para a amostra M/12/02

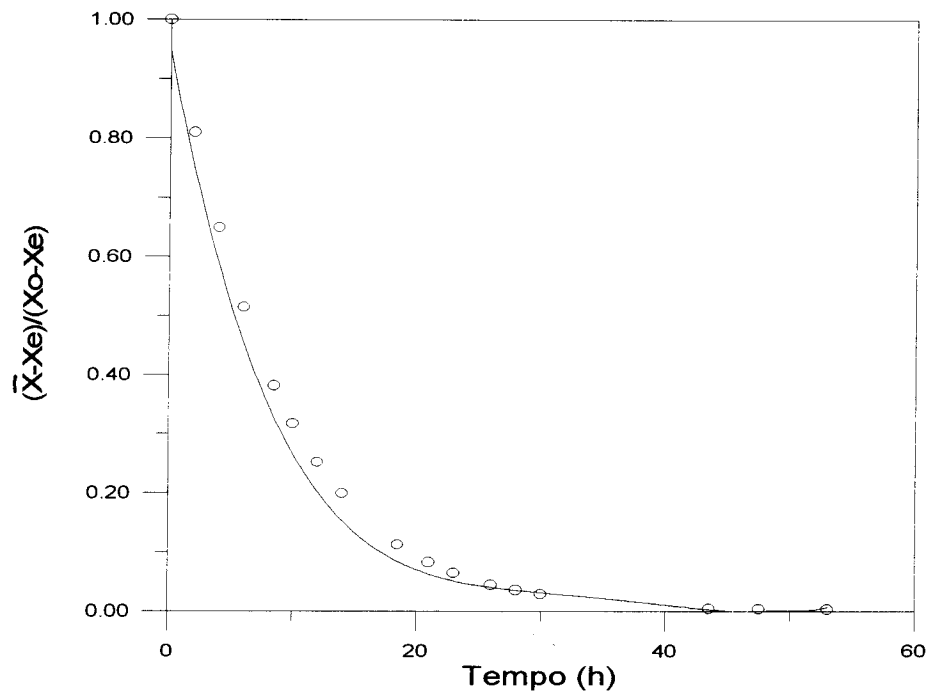


FIGURA 4.10. Curvas de secagem experimental (pontos) e calculada (linha contínua) para a amostra M/12/04

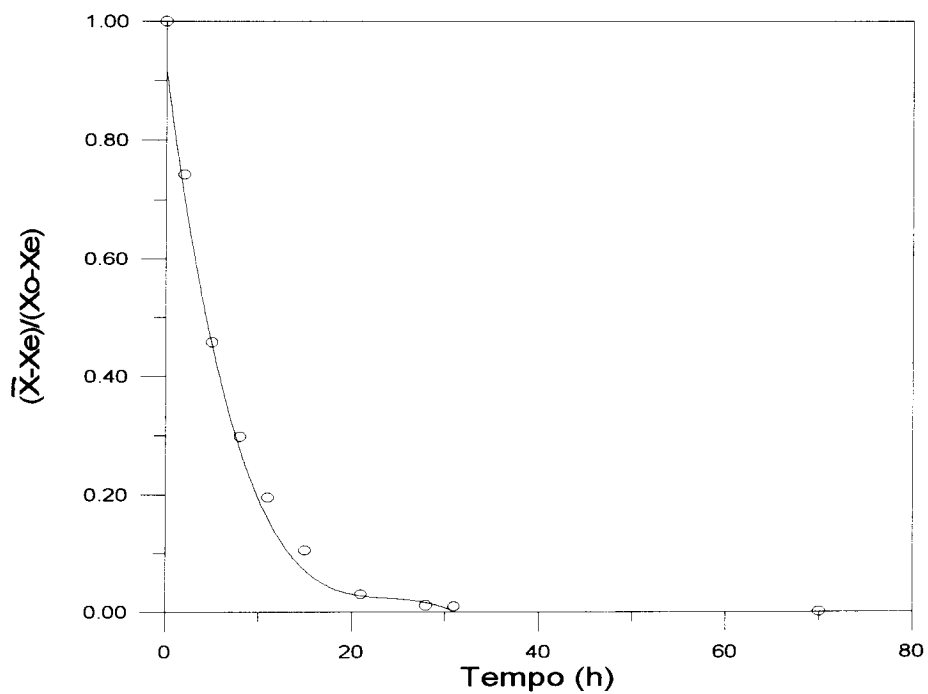


FIGURA 4.11. Curvas de secagem experimental (pontos) e calculada (linha contínua) para a amostra M/11/02

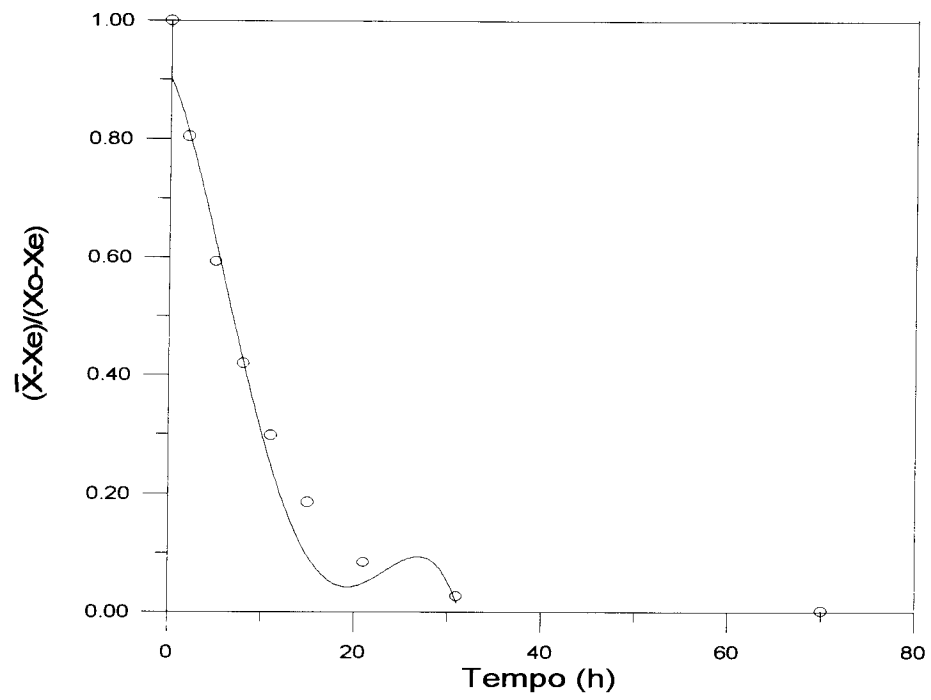


FIGURA 4.12. Curvas de secagem experimental (pontos) e calculada (linha contínua) para a amostra M/11/04

5. CONCLUSÃO

Ao se calcular a velocidade por aproximação da curva de espessura em função do tempo à sucessão de segmentos de reta, verificou-se que esse não era um bom procedimento, pois os resultados de umidade adimensional obtidos, não se ajustaram bem aos dados experimentais. Calculando-se então a velocidade por ajuste polinomial da curva de espessura em função do tempo, conseguiu-se um bom resultado, com coeficiente de correlação médio de $99,8 \pm 0,2 \%$.

Como o encolhimento da amostra foi levado em consideração, a umidade adimensional foi analisada para a secagem com e sem encolhimento. Durante o processo com encolhimento, verificou-se que algumas amostras apresentaram maior umidade adimensional, em relação aos dados experimentais, nos primeiros estágios de secagem, enquanto outras apresentaram um maior valor de umidade no final do processo. Na fase sem encolhimento, a grande maioria das amostras apresentou valor de umidade menor que os experimentais. Notou-se porém que mesmo ocorrendo essa variação de umidade, os valores calculados ficaram bem próximos dos dados experimentais, conseguindo-se um bom ajuste das curvas de secagem com um erro mínimo médio de $1,5 \%$ para a parte com encolhimento e $2,1 \%$ para a parte sem encolhimento.

Na fase de secagem com encolhimento foi encontrado valor médio de difusividade de $(5,53 \pm 2,23) \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, e na parte sem encolhimento, um valor médio de $(4,53 \pm 1,87) \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$. Parte das amostras apresentou maior valor de difusividade na fase com encolhimento, enquanto algumas amostras apresentaram valores de difusividade maior na fase sem encolhimento o que não é explicável fisicamente.

Apesar da simplicidade do modelo físico, considerando o encolhimento como movimento de todos os pontos em direção ao suporte, com a mesma velocidade, conseguiu-se um bom resultado no cálculo de umidade durante a secagem de filés de Merluza.

5. 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 Food Technology, 20: 623 - 629, 1985.
- AGUERRE, R., SUAREZ, C. & VIOLLAZ, P. E. Drying kinetics of rough rice grain. Journal Food Technology, 17: 679 - 686, 1982.
- AKEREDOLU, F. Shrinkage in dehydration of *Manihot Utilissima* e *Dioscorea Rotunda*. Drying Technology, 5 (1): 107- 128, 1987.
- ALZAMORA, S. M. & CHIRIFE, J. Some factors controlling the kinetics of moisture movement during avocado dehydration. Journal of Food Science, 45: 1649 - 1657, 1980.
- ALZAMORA, S. M., CHIRIFE, J. & VIOLLAZ, P. A simplified model for predicting the temperatures of foods during air dehydration. Journal Food Technology, 14: 369 - 380, 1979.
- BALABAN, M. & PIGOTT, G. M. Shrinkage in fish muscle during drying. Journal of Food Science, 51(2): 510 - 511, 1986.
- BURGESS, G. H. O, CUTTING, C. L, LOVERN, J. A. & WATERMAN, J. J. Drying. In: Fish handling and processing. Chemical Publishing Company, inc. New York. 1967. 320 p.
- CHIRIFE, J. Diffusional process in the drying of tapioca root. Journal Food Science, 36: 327 - 330, 1971.

- CHIRIFE, J. Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods. In: Advances in Drying, ed. Arum S. Mujundar, Hemisphere Publishing Corporation. Washington, 73 - 102, 1983.
- CRANK, J. The Mathematics of Diffusion. 2. ed. Claredon Press Oxford, 1975. 414 p.
- DAUDIN, J. D. Calcul des cinétiques de séchage par l'air chaud des produits biologiques solides. Sciences des Aliments. 3 (1): 1 - 36, 1983.
- DEL VALLE, F. R. & NICKERSON, J. T. R. Salting and drying fish. 3. Diffusion of water. Journal of Food Science, 33: 499 - 503, 1968.
- FORTES, M. & OKOS, M. Drying Theories: Their bases and limitations as applied to foods and grains. In: Advances in Drying, ed. Arum S. Mujundar, Hemisphere Publishing Corporation. Washington. 1: 119 - 154, 1980.
- FUSCO, A. J., AVANZA, J. R., AGUERRE, R. J. & GABITTO, J. F. A diffusional model for drying with volume change. Drying Technology, 9 (2): 397 - 417, 1991.
- HOLDSWORTH, S. D. Dehydration of food products. A review. Journal of Food Technology, 6: 331 - 370, 1971.
- JASON, A. C. Drying and dehydration. In: Fish as Food. New York: Academic Press, 1965. v.3, p. 1 - 54.
- JASON, A. C. A study of evaporation and diffusion process in the drying of fish muscle. In: Fundamentals Aspects of the Dehydration of Foodstuffs. New york. The Society of Chemical Industry, 1958. p. 103 - 135.
- KARATHANOS, V. T., VILLALOBOS, G. & SARAVACOS, G. D. Comparison of two methods of estimation of the effective moisture diffusivity from drying data. Journal of Food Science, 55 (1): 218 - 233, 1990.

- KILPATRICK, P. C., LOWE, E. & VAN ARSDEL, W. B. Tunnel dehydration for fruits and vegetables. In: Van Arsdell, W. B. Advances in Food Research. Academic Press New York. 1955, v.4 p. 313 - 371.
- LOZANO, J. E., ROTSTEIN, E. & URBICAIN, M. J. Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents. Journal of Food Science, 48: 1497 - 1502, 1983.
- MADAMBA, P. S., DRISCOLL, R. H. & BUCKLE, K. A. Shrinkage, density and porosity of garlic during drying. Journal of Food Engineering, 23: 309 - 319, 1994.
- MEDEIROS, G. L. & SERENO, A. M. Physical and transport properties of peas during warm air drying. Journal Food Engineering, 21: 355 -363, 1994.
- MISRA, R. N., & YOUNG, J. H. Numerical solution of simultaneous moisture diffusion and shrinkage during soybean drying. Transactions of the ASAE. 1277 - 1282, 1980.
- PARK, K. J. Estudo Comparativo do Coeficiente de Difusão sem e com Encolhimento Durante a Secagem. Campinas, 1987. 54 p. (Tese de Livre Docência) - Faculdade de Engenharia de Alimentos - Universidade Estadual de Campinas.
- PERRY, J. H. Chemical Engineer's Handbook. Tokyo, McGraw - Hill Book Company, 4^a ed. 1963.
- PINTO, L. A. A. Secagem de Materiais Fibrosos: Músculos de Peixes. São Carlos, 1992. 104 p. Tese (Mestre em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos.
- PINTO, L. A, PENEIREIRO, J. B, & TOBINAGA, S. Difusão líquida na secagem de músculos de peixes. IN: XX Encontro sobre Escoamentos em Meios Porosos, São Carlos, 1992. Anais. São Carlos, FINEP, FAPESP, CNPQ, UFSCAR, 1993. v. 2, p. 555 - 562.

- PINTO, L. A. A. & TOBINAGA, S. Secagem e encolhimento de materiais fibrosos: Músculos de peixes. In: Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, Campinas, 1991, Anais. Campinas, FAPESP/ CNPQ/ UNICAMP, 1991. v. 2, p. 568 - 579.
- PINTO, L. A. A. & TOBINAGA, S. Modelos na secagem de alimentos em camada fina: Uma revisão da literatura. 1993, Trabalho não publicado.
- RATTI, C. Shrinkage during drying of foodstuffs. Journal of Food Engineering, 23: 91 - 105, 1994.
- SARAVACOS, G. D. & RAOUZEOS, G. S. Diffusivity of moisture in air-drying of starch gels. Engineering and Food vol. 1, Eng. Sc. in the Food Industry. Edite by Brian M. McKenna, 1984, 499 - 507.
- SERENO, A. M. & MEDEIROS, G. L. A simplified model for the prediction of drying rates for foods. Journal Food Engineering, 12: 1 - 11, 1990.
- SHERWOOD, T. K. The drying of solids - II. Industrial and Engineering Chemistry, 21(10): 976 - 980, 1929.
- SUAREZ, C. & VIOLLAZ, P. E. Shrinkage on drying behavior of potato slabs. Journal of Food Engineering, 13: 103 - 104, 1991.
- SUAREZ, C., VIOLLAZ, P. & CHIRIFE, J. Diffusional analysis of air drying of grain sorghum. Journal Food Technology, 15: 523 - 531, 1980.
- SUZUKI, K; KUBOTA, K.;HASEGAWA, T.; HOSAKA, H. Shrinkage in dehydration of root vegetables. Journal of Food Science, 41 (5): 1189 - 1193, 1976.
- TOBINAGA, S. & PINTO, L. A. A. Secagem de materiais fibrosos: Músculos de peixes. In: Tópicos Especiais em Secagem, editado por J. T. Freire e D. J. M. Sartori, UFSCar, 1992. v. 1, 211 - 251.

- TOBINAGA, S. , SUZUKI, K. , KAGUEI, S. & WAKAO, N. Liquid - phase adsorption of p-Xilene onto zeolite Y - surface diffusion model and pore diffusion model -. Sekiyu Gakkaishi, 34 (6): 518 - 523, 1991.
- TORRANO, A. D. M. & OKADA, M. Processamento do cação salgado e seco. Boletim do Instituto de Tecnologia de Alimentos, 54: 153 - 166, nov./dez. 1977.
- VACCAREZZA, L. M. & CHIRIFE, J. On the application of Fick's law for the kinetic analysis of air drying of foods. Journal of Food Science, 43: 236 - 238, 1978.
- VACCAREZZA, L. M. & CHIRIFE, J. On the mechanism of moisture transport during air drying of sugar beet root. Journal Food Science 40: 1286 - 1289, 1975.
- VACCAREZZA, L. M., LOMBARDI, J. L. & CHIRIFE, J. Kinetics of moisture movement during air drying of sugar beet root. Journal of Food Technology, 9: 317 - 327, 1974.
- VAGENAS, G. K. & KARATHANOS, V. T. Prediction of the effective moisture diffusivity in gelatinized food systems. Journal of Food Engineering, 18: 159 - 170, 1993.
- VAGENAS, G. K., MARINOS-KOURIS, D. & SARAVACOS, G. D. An analysis of mass transfer in air-drying of foods. Drying Technology, 8 (2): 323 - 342, 1990.
- VAN ARSDEL, W. B., COPLEY, M. & MORGAN JR, A. Food Dehydration. The AVI Publishing Company Inc. 1973. v.2, 529 p.
- VIOLLAZ, P. & SUAREZ, C. Drying of shrinking bodies. AIChE Journal, 31 (9): 1566 - 1568, 1985.
- WAANANEN, K. M., LITCHFIELD, J. B. & OKOS, M. R. Classification of drying models for porous solids. Drying Technology, 11 (1): 1 - 40, 1993.

WANG. N & BRENNAN, J. G. A mathematical model of simultaneous heat and moisture transfer during drying of potato. Journal of Food Engineering, 24: 47 - 60, 1995.

APÊNDICE A

TABELA A.1. Dados experimentais de comprimento (c), lagura (l),
 espessura (L) e umidade absoluta (X) da amostra
 M/05/04*. (PINTO, 1992)

tempo (h)	comp (c) (cm)	lar (l) (cm)	esp (L) (cm)	(X) dim (bs)
0,0	8,05	3,20	0,90	4,078
4,5	8,02	2,90	0,80	3,080
9,0	8,00	2,60	0,72	2,278
19,5	7,92	2,40	0,52	1,247
23,5	7,90	2,32	0,48	1,029
28,0	7,85	2,24	0,45	0,834
33,0	7,80	2,23	0,40	0,669
43,5	7,80	2,18	0,35	0,432
50,5	7,75	2,15	0,32	0,331
57,0	7,73	2,03	0,30	0,243
67,5	7,72	1,92	0,29	0,170
74,5	7,70	1,90	0,28	0,147
82,0	7,65	1,90	0,28	0,132
94,0	7,60	1,89	0,28	0,119
102,0	7,60	1,87	0,28	0,115
139,5	7,60	1,85	0,28	0,101
196,0	7,60	1,85	0,28	0,090

* M = Merluza

05 = n^o corrida

04 = n^o prato

TABELA A.2. Dados experimentais de comprimento (c), largura (l), espessura (L) e umidade absoluta (X) da amostra M/06/04*. (PINTO, 1992)

tempo (h)	comp (c) (cm)	lar (l) (cm)	esp (L) (cm)	(X) dim (bs)
0,0	9,00	2,82	1,00	4,173
4,0	8,91	2,60	0,92	3,274
12,0	8,89	2,32	0,75	2,183
15,5	8,82	2,23	0,70	1,852
20,5	8,82	2,05	0,65	1,477
26,0	8,80	1,89	0,60	1,144
36,0	8,74	1,73	0,47	0,636
39,0	8,70	1,72	0,43	0,519
45,0	8,67	1,71	0,38	0,354
51,0	8,64	1,65	0,36	0,259
63,0	8,60	1,60	0,35	0,185
70,5	8,55	1,60	0,34	0,161
87,5	8,50	1,60	0,33	0,136
108,0	8,50	1,55	0,33	0,119
117,5	8,50	1,53	0,33	0,115
141,0	8,48	1,53	0,33	0,105

* Mesma legenda utilizada na Tabela A.1

TABELA A.3. Dados experimentais de comprimento (c), largura (l), espessura (L) e umidade absoluta (X) da amostra M/07/04*. (PINTO, 1992)

tempo (h)	comp (c) (cm)	lar (l) (cm)	esp (L) (cm)	(X) dim (bs)
0,0	7,27	3,65	0,78	4,400
3,0	7,25	3,45	0,70	3,655
6,0	7,20	3,30	0,61	2,918
10,0	7,20	3,05	0,54	2,175
12,0	7,20	2,95	0,51	1,920
20,5	7,14	2,83	0,38	1,158
23,5	7,12	2,80	0,35	0,980
27,5	7,10	2,60	0,32	0,788
29,5	7,08	2,70	0,31	0,695
33,5	7,06	2,69	0,28	0,545
36,0	7,05	2,65	0,27	0,470
45,5	7,05	2,53	0,24	0,280
48,5	7,05	2,48	0,23	0,243
61,0	7,03	2,41	0,21	0,143
71,0	7,02	2,35	0,21	0,123
77,0	7,02	2,32	0,21	0,110
83,0	7,02	2,30	0,21	0,108
95,5	6,98	2,30	0,21	0,103
167,0	6,98	2,28	0,21	0,093

* Mesma legenda utilizada na Tabela A.1

TABELA A.4. Dados experimentais de comprimento (c), largura (l), espessura (L) e umidade absoluta (X) da amostra M/11/02*. (PINTO, 1992)

tempo (h)	comp (c) (cm)	lar (l) (cm)	esp (L) (cm)	(X) dim (bs)
0,0	8,00	4,54	0,58	3,941
2,0	7,60	4,30	0,48	2,938
5,0	7,50	3,94	0,37	1,831
8,0	7,30	3,90	0,30	1,211
11,0	7,63	3,78	0,25	0,805
15,0	7,60	3,40	0,20	0,458
21,0	7,60	2,80	0,19	0,165
28,0	7,60	2,70	0,19	0,092
31,0	7,58	2,60	0,19	0,085
70,0	7,58	2,60	0,19	0,050

* Mesma legenda utilizada na Tabela A.1

TABELA A.5. Dados experimentais de comprimento (c) largura (l), espessura (L) e umidade absoluta (X) da amostra M/11/04*. (PINTO, 1992)

tempo (h)	comp (c) (cm)	lar (l) (cm)	esp (L) (cm)	(X) dim (bs)
0,0	8,24	4,63	0,94	3,725
2,0	8,22	4,63	0,79	3,008
5,0	8,15	4,27	0,69	2,227
8,0	8,10	4,20	0,55	1,592
11,0	8,10	4,05	0,46	1,146
15,0	8,00	4,02	0,37	0,731
21,0	7,95	3,80	0,30	0,358
31,0	7,90	3,55	0,26	0,146
70,0	7,90	3,35	0,26	0,055

*Mesma legenda utilizada na Tabela A.1

TABELA A.6. Dados experimentais de comprimento (c), largura (l), espessura (L) e umidade absoluta (X) da amostra M/12/04*. (PINTO, 1992)

tempo (h)	comp (c) (cm)	lar (l) (cm)	esp (L) (cm)	(X) dim (bs)
0,0	7,5	4,65	0,80	4,351
2,0	7,42	4,60	0,73	3,829
4,0	7,45	4,55	0,66	3,360
6,0	7,42	4,46	0,60	2,897
8,5	7,41	4,35	0,52	2,322
10,0	7,42	4,30	0,47	2,004
12,0	7,40	4,25	0,43	1,688
14,0	7,35	4,20	0,38	1,406
18,5	7,38	4,10	0,30	0,912
21,0	7,30	4,00	0,28	0,724
23,0	7,30	3,93	0,26	0,607
26,0	7,30	3,95	0,23	0,465
28,0	7,30	3,92	0,22	0,395
30,0	7,30	3,85	0,21	0,335
43,5	7,20	3,54	0,19	0,123
47,5	7,20	3,50	0,19	0,108
53,0	7,22	3,40	0,19	0,101
116,0	7,22	3,20	0,19	0,061

* Mesma legenda utilizada na Tabela A.1

TABELA A.7. Dados experimentais de comprimento (c), largura (l), espessura (L) e umidade absoluta (X) da amostra M/12/02*. (PINTO, 1992)

tempo (h)	comp (c) (cm)	lar (l) (cm)	esp (L) (cm)	(X) dim (bs)
0,0	8,74	5,20	0,70	4,477
2,0	8,70	5,20	0,58	3,638
4,0	8,70	5,20	0,49	2,926
6,0	8,68	5,08	0,42	2,332
8,5	8,65	5,02	0,35	1,745
10,0	8,63	4,96	0,31	1,462
12,0	8,62	4,96	0,27	1,173
14,0	8,60	4,95	0,24	0,940
18,5	8,62	4,90	0,19	0,556
21,0	8,60	4,90	0,17	0,424
23,0	8,55	4,80	0,16	0,345
26,0	8,58	4,8	0,15	0,256
28,0	8,60	4,80	0,15	0,218
30,0	8,60	4,65	0,15	0,186
43,5	8,53	4,00	0,15	0,079
47,5	8,50	4,00	0,15	0,075
53,0	8,48	3,95	0,15	0,074

* Mesma legenda utilizada na Tabela A.1

TABELA A.8. Dados experimentais de comprimento (C), largura (l), espessura (L) e umidade absoluta (X) da amostra M/15/02*. (PINTO, 1992)

tempo (h)	comp (c) (cm)	lar (l) (cm)	esp (L) (cm)	(X) dim (bs)
0,00	8,25	5,05	0,71	4,261
3,17	8,20	4,98	0,56	3,130
6,00	8,20	4,80	0,47	2,371
9,00	8,20	4,52	0,41	1,813
12,00	8,20	4,30	0,36	1,408
16,00	8,20	4,15	0,31	1,062
20,00	8,20	4,15	0,27	0,818
24,00	8,20	4,18	0,23	0,599
28,00	8,12	3,96	0,21	0,418
32,00	8,20	3,74	0,20	0,317
36,00	8,12	3,88	0,18	0,248
48,00	8,18	3,70	0,17	0,130
70,00	8,14	3,34	0,17	0,099
78,00	8,08	3,42	0,17	0,093

* Mesma legenda utilizada na Tabela A.1

TABELA A.9. Valores de velocidade calculados por segmentos de reta e

TABELA A.9. Valores de velocidade calculados por segmentos de reta e valores de difusividade (D) para as amostras M/12/02* e M/05/04*

M/12/02 D=2.28 x 10 ⁻⁷			M/05/04 D=4.43 x10 ⁻⁷		
t (h)	L (cm)	v (cm/s) x 10 ⁶	t (h)	L (cm)	v (cm/s) x 10 ⁶
0,0	0,70	11,40	0,0	0,90	5,41
2,0	0,58	11,40	4,5	0,80	5,41
4,0	0,49	11,40	9,0	0,72	5,41
6,0	0,42	11,40	9,5	0,52	2,47
8,5	0,35	4,48	23,5	0,48	2,47
10,0	0,31	4,48	28,0	0,45	2,47
12,0	0,27	4,48	33,0	0,40	2,47
14,0	0,24	4,48	43,5	0,35	1,27
18,5	0,19	1,48	50,5	0,32	1,27
21,0	0,17	1,48	57,0	0,30	0,86
23,0	0,16	1,48	74,5	0,29	0,22
23,0	0,15	1,48	82,0	0,28	0,22

* Mesma legenda utilizada em A.1

TABELA A.10. Valores de velocidade calculados por segmentos de reta e valores de difusividade (D) para as amostras M/12/04* e M/07/04*

M/12/04 D=2.28 x 10 ⁻⁷			M/07/04 D=2.92 x 10 ⁻⁷		
t (h)	L (cm)	v (cm/s) x 10 ⁶	t (h)	L (cm)	v (cm/s) x 10 ⁶
0,0	0,80	9,17	0,0	0,78	7,87
2,0	0,73	9,17	3,0	0,70	7,87
4,0	0,66	9,17	6,0	0,61	4,13
6,0	0,60	9,17	10,0	0,54	4,13
8,5	0,52	5,56	12,0	0,51	4,13
10,0	0,47	5,56	20,5	0,38	4,13
12,0	0,43	5,56	23,5	0,35	1,94
14,0	0,38	5,56	27,5	0,32	1,94
18,5	0,30	2,34	29,5	0,31	1,94
21,0	0,28	2,34	33,5	0,28	1,00
23,0	0,26	2,34	36,0	0,27	1,00
26,0	0,23	0,54	45,5	0,24	1,00
28,0	0,22	0,54	48,5	0,23	1,00
30,0	0,21	0,54	53,0	0,21	1,00
43,5	0,19	0,54	—	—	—

* Mesma legenda utilizada em A.1

TABELA A.11. Valores de difusividade para diferentes tipos de amostras (Tbs = 29° C, Tbu = 19° C, Var = 0.5 m/s) (PINTO, 1992)

AMOSTRA	ESPÉCIE	D x 10 ⁶ (cm ² /s)	
		1ª fase	2ª fase
magra (não - salgada)	merluza	2.24 ± 0.18	0.96 ± 0.02
	peixe porco	1.84 ± 0.05	0.81 ± 0.10
	cação	2.96 ± 0.06	1.26 ± 0.11
gorda	sardinha	1.11 ± 0.11	0.71 ± 0.05
salgada	merluza / cação	1.28 ± 0.13	1.03 ± 0.05

TABELA A.12: valores de umidade (X) e tempo (t) onde não mais ocorreu encolhimento e valores de umidade de equilíbrio (X_e) e umidade inicial (X_o), (PINTO, 1992)

	X (b.s.)	tempo (h)	X_e (b.s.)	X_o (b.s)
M/05/04	0,132	82,0	0,09	4,078
M/06/04	0,119	108,0	0,09	4,173
M/07/04	0,143	61,0	0,09	4,400
M/11/02	0,092	28,0	0,05	3,941
M/11/04	0,146	31,0	0,05	3,725
M/12/02	0,186	30,0	0,06	4,477
M/12/04	0,108	47,5	0,05	4,351
M/15/02	0,099	70,0	0,09	4,261

TABELA A.13. Condições de secagem: velocidade do ar (V_{ar}), temperaturuta do ar (T) com temperatura de bulbo úmido = 19 °C, (PINTO, 1992)

	T (°C)	V_{ar} (m/s)
M/05/04	30	0,7 - 0,8
M/06/04	30	0,7 - 0,8
M/0704	30	0,7 - 0,8
M/11/02	40	1,0 - 1,1
M/11/04	40	0,7 - 0,8
M/12/02	35	1,0 - 1,1
M/12/04	35	0,7 - 0,8
M/15/02	30	1,0 - 1,1

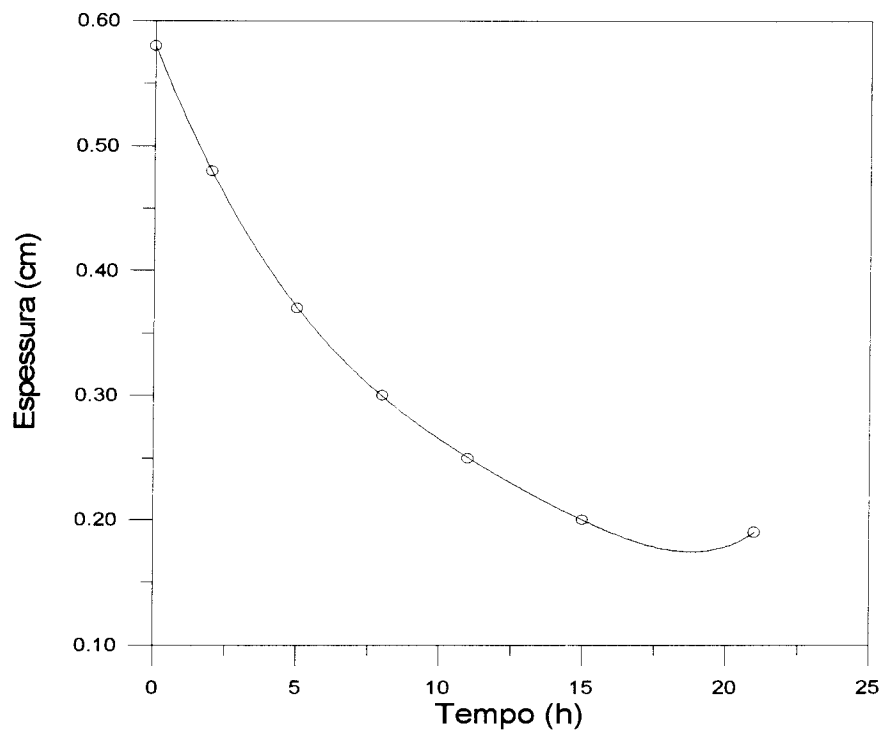


FIGURA A.1. Espessura da amostra M/11/02 em função do tempo com ajuste polinomial de grau 5

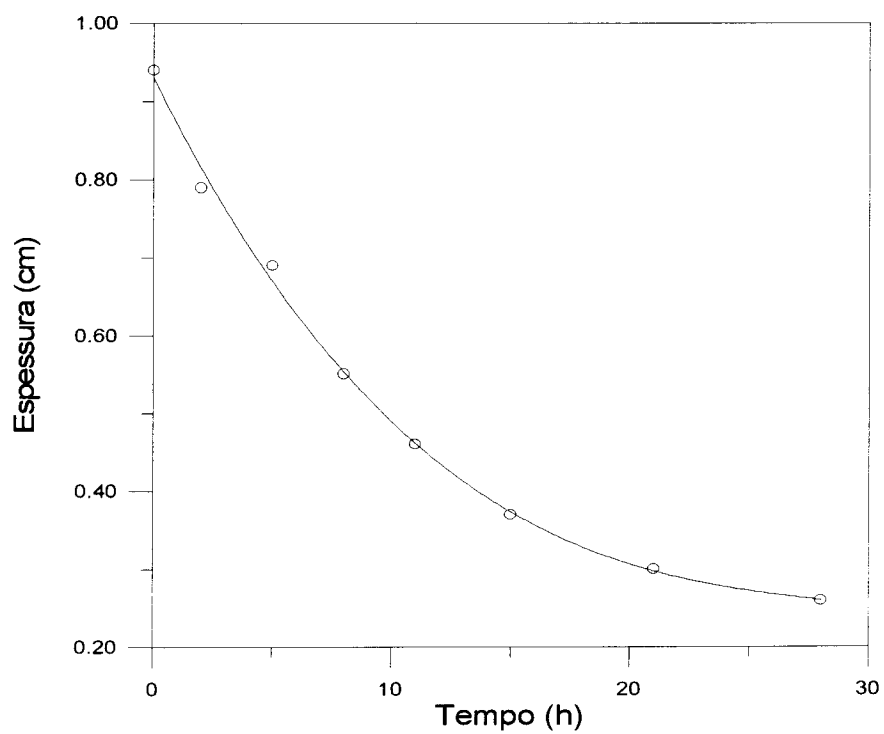


FIGURA A.2. Espessura da amostra M/11/04 em função do tempo com ajuste polinomial de grau 4

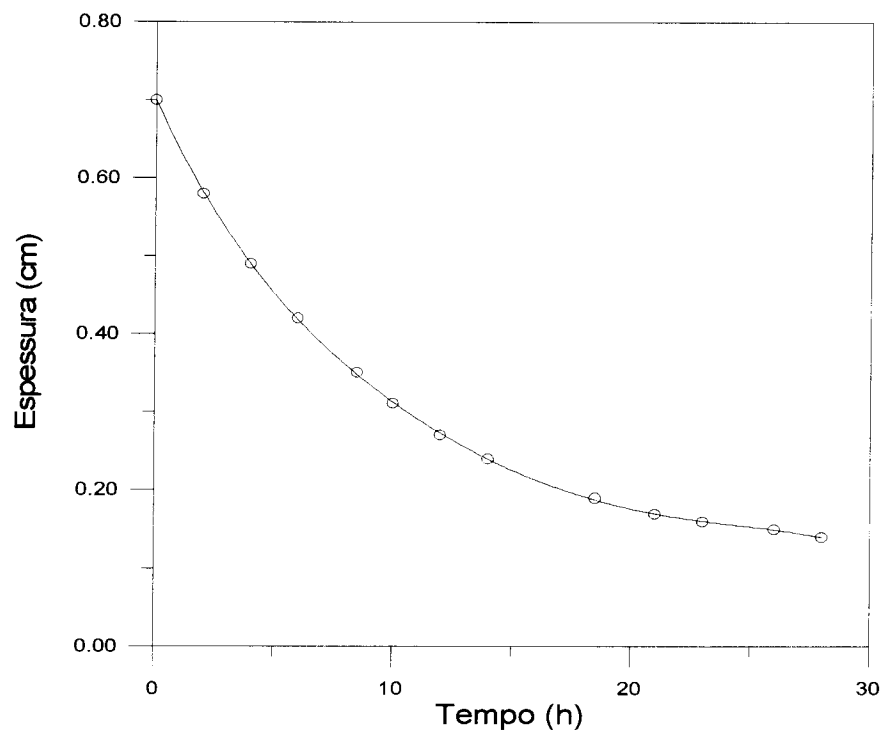


FIGURA A.3 Espessura da amostra M/12/02 em função do tempo com ajuste polinomial de grau 4

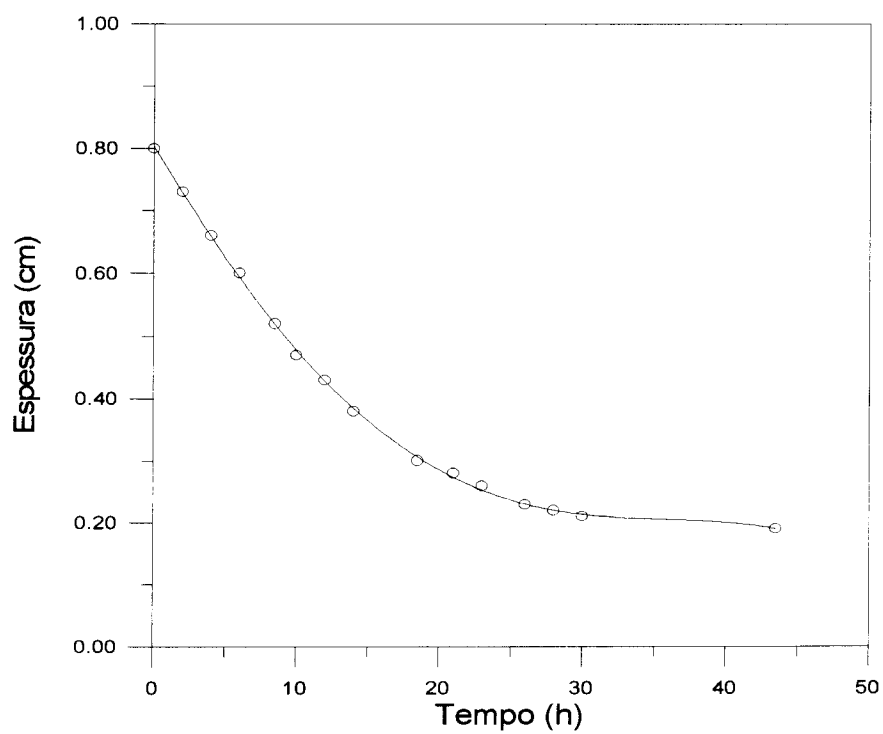


FIGURA A.4. Espessura da amostra M/12/04 em função do tempo com ajuste polinomial de grau 4

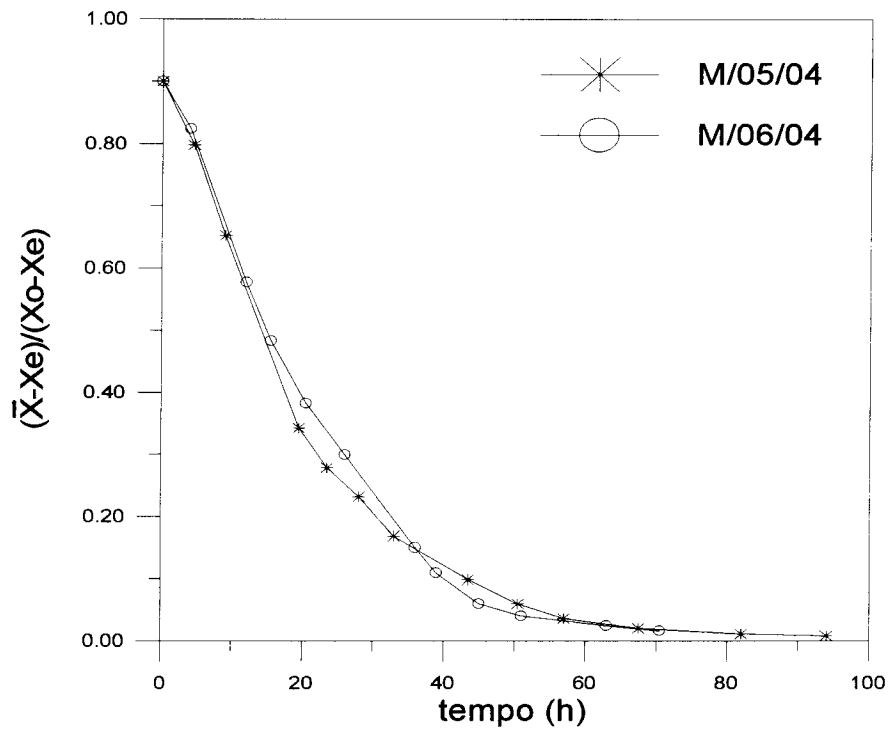


FIGURA A.5. Curvas de secagem de Merluza. Valores calculados para as amostras M/05/04 e M/06/04

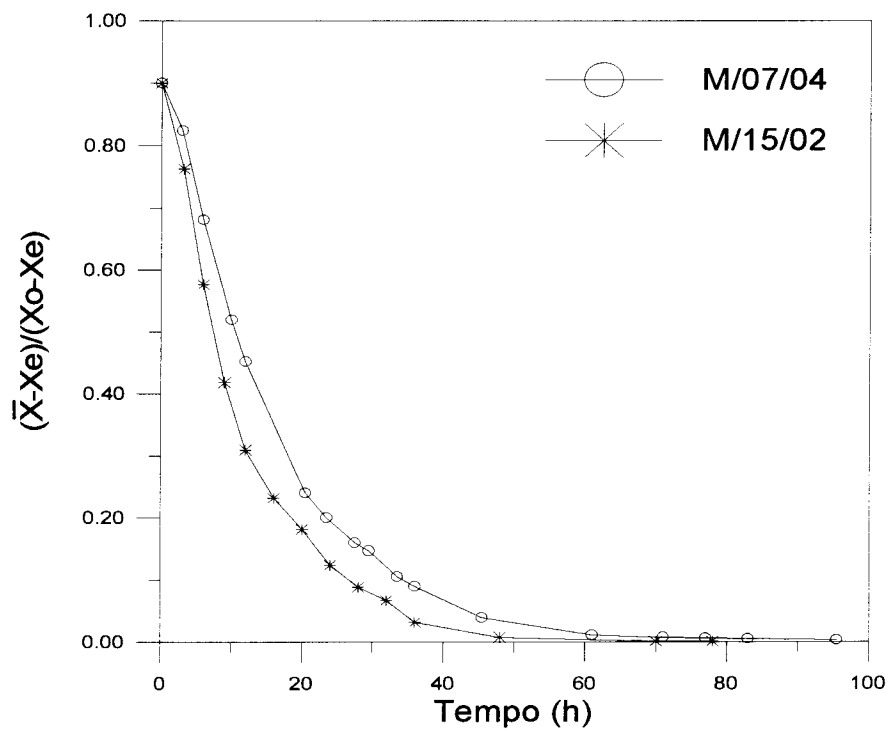


FIGURA A.6. Curvas de secagem de Merluza. Valores calculados para as amostras M/07/04 e M/15/02

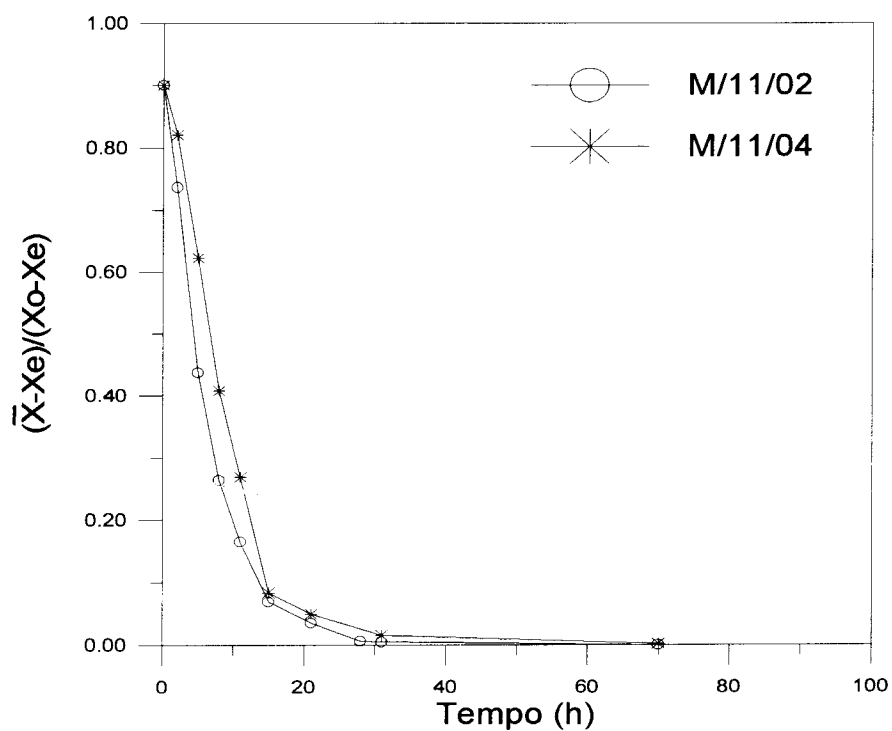


FIGURA A.7. Curvas de secagem de Merluza. Valores calculados para as amostras M/11/02 e M/11/04

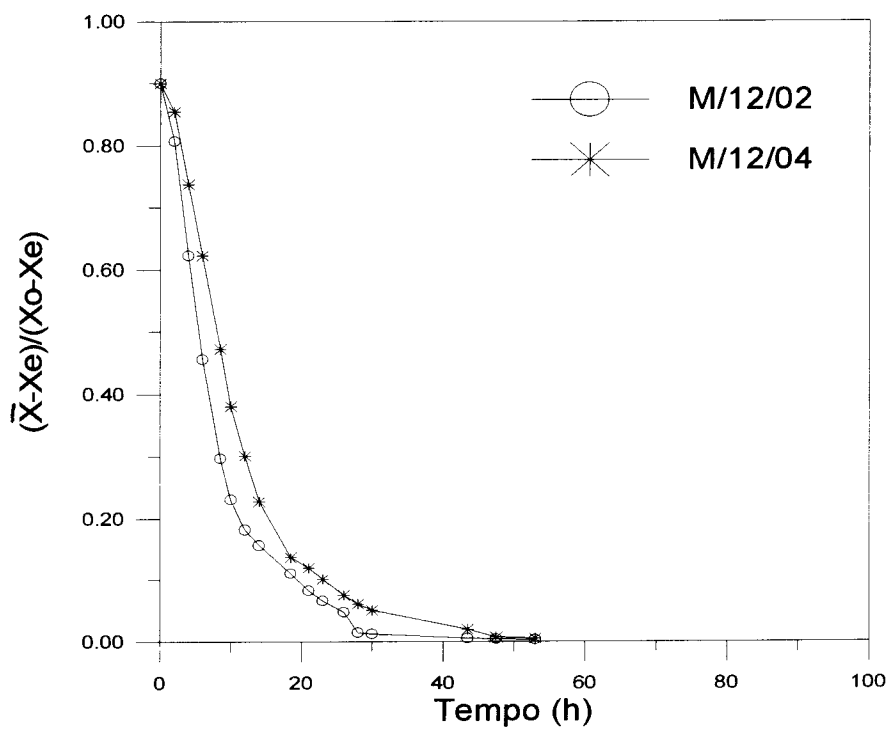


FIGURA A.8. Curvas de secagem de Merluza. Valores calculados para as amostras M/12/02 e M/12/04

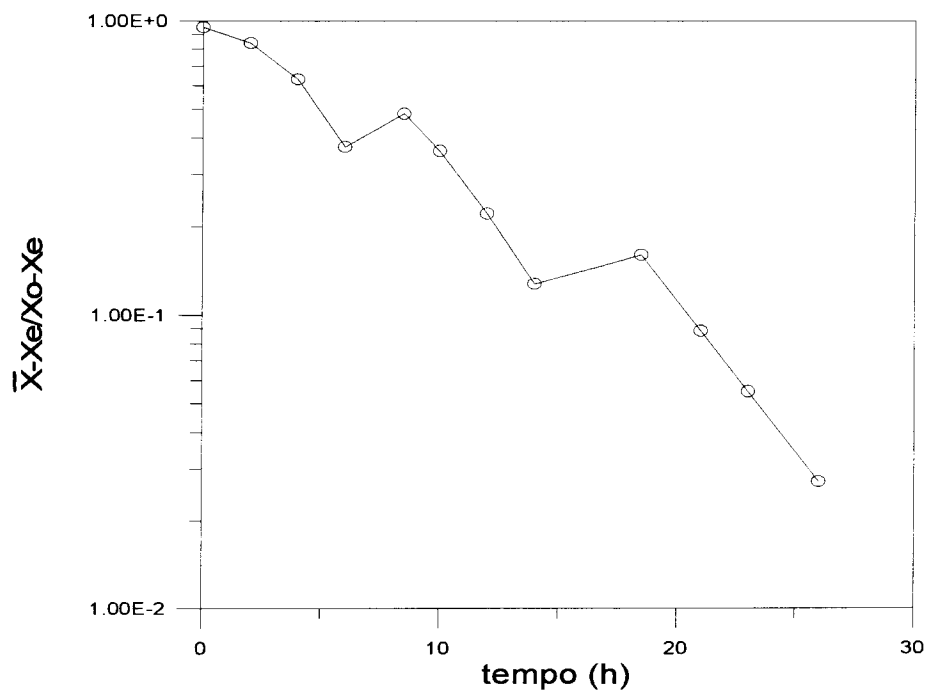


FIGURA A.9. Curva de secagem obtida utilizando velocidade calculada por segmentos de reta. Amostra M/12/02

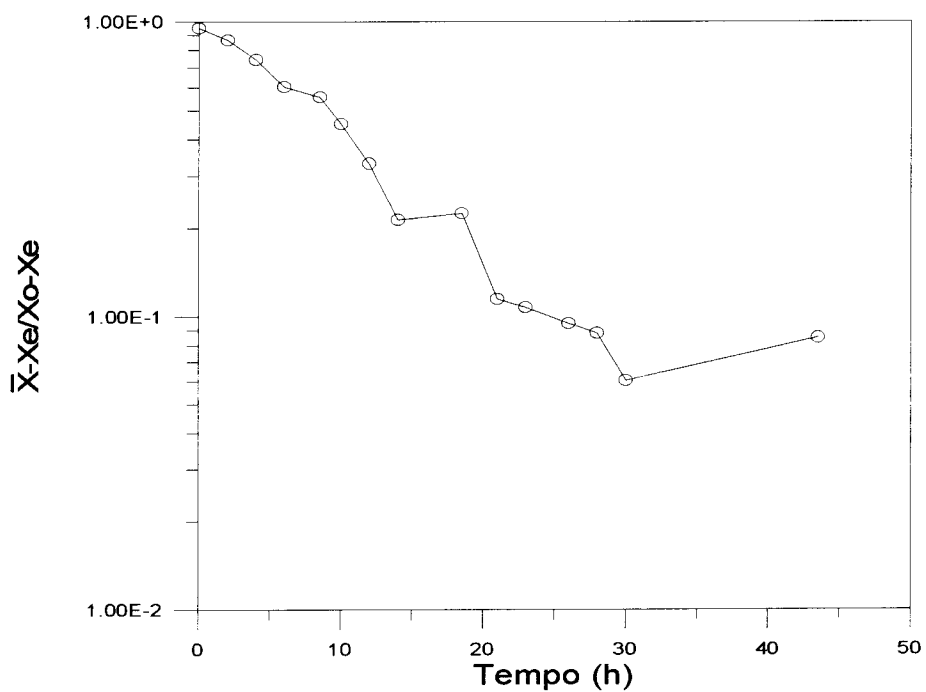


FIGURA A.10. Curva de secagem obtida utilizando velocidade calculada por segmentos de reta. Amostra M/12/04

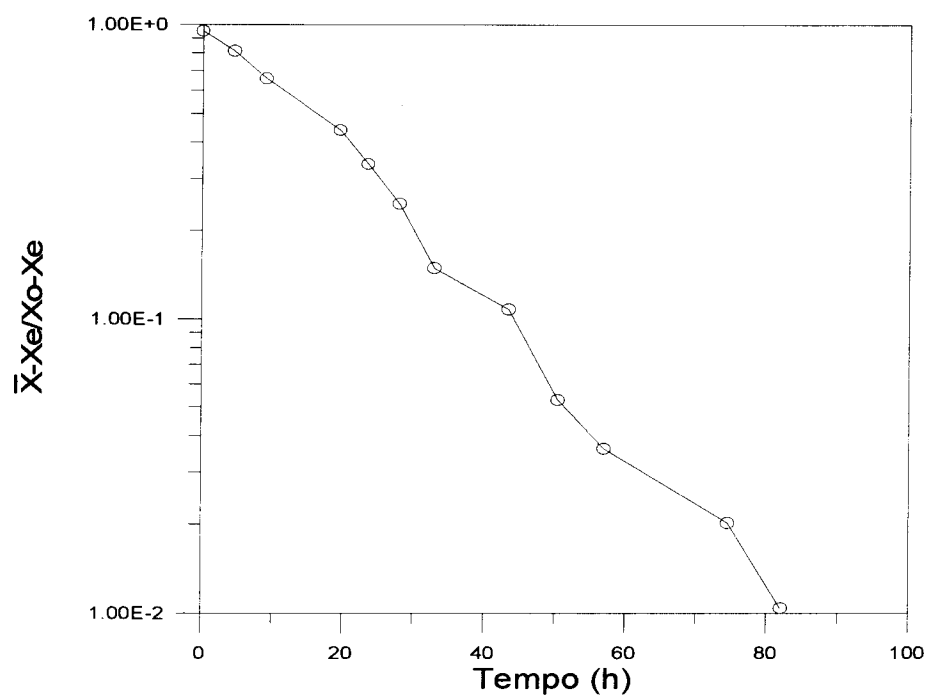


FIGURA A.11. Curva de secagem obtida utilizando velocidade calculada por segmentos de reta. Amostra M/05/04

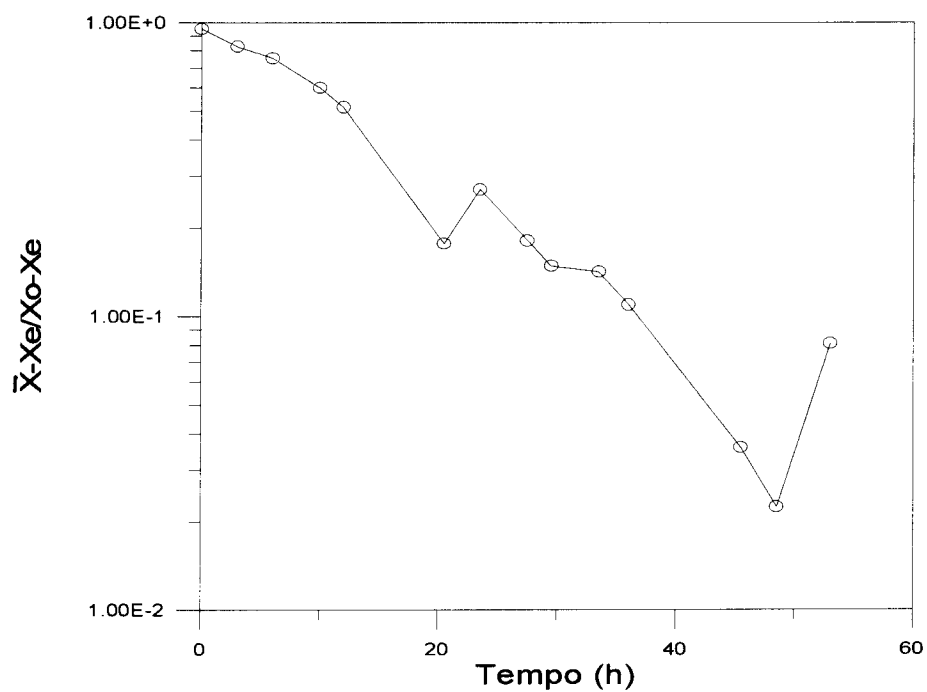
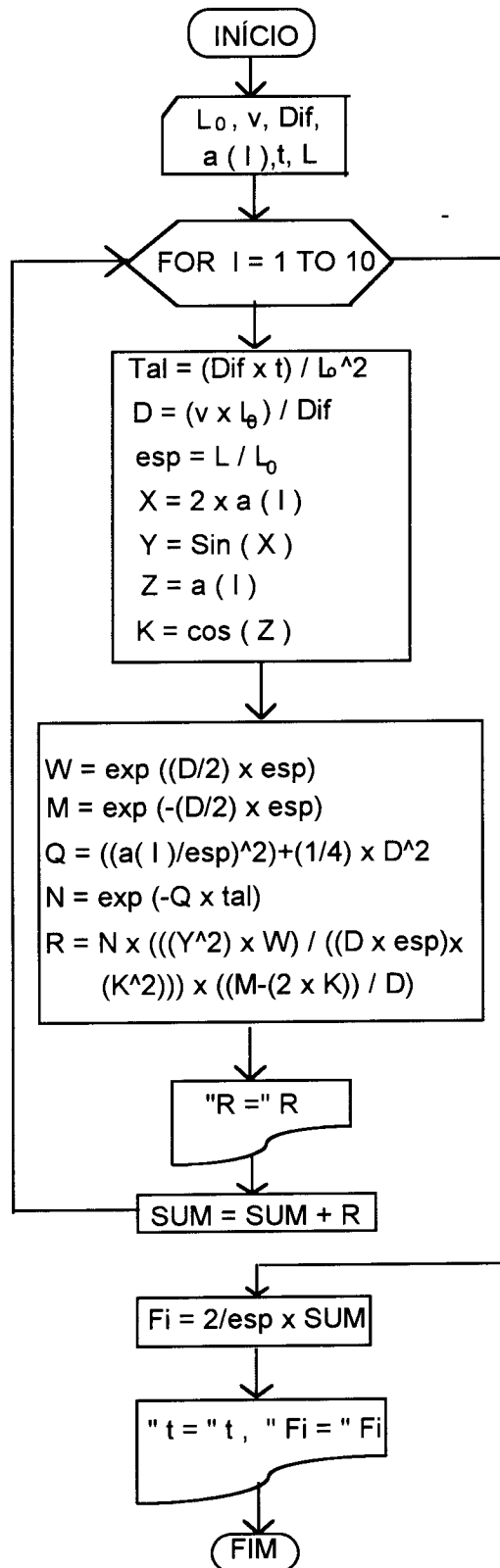
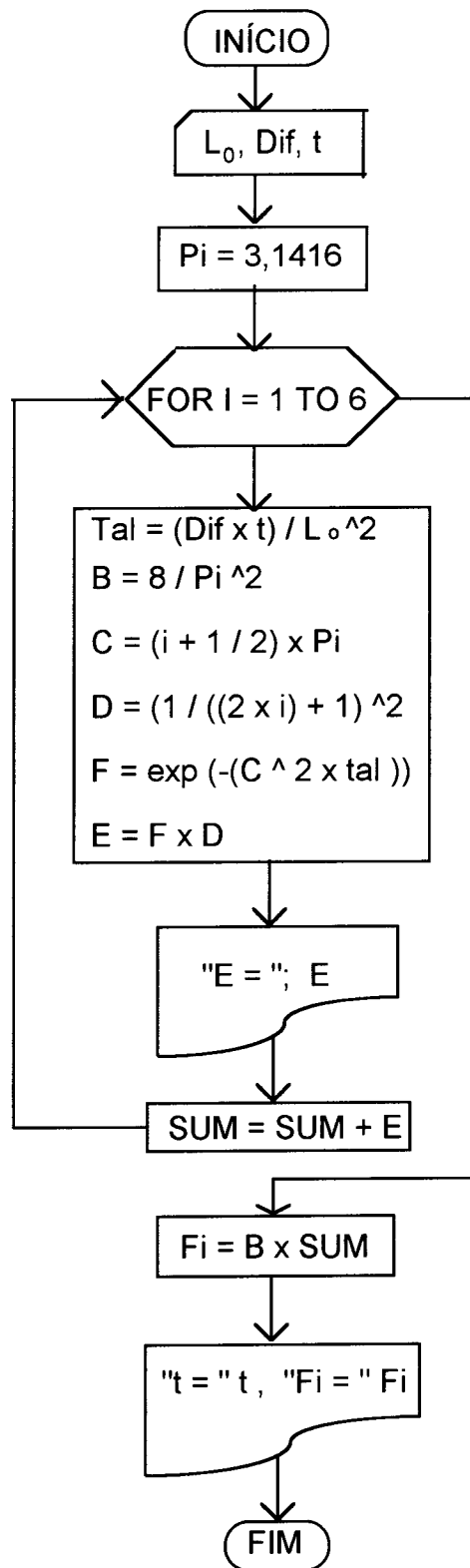


FIGURA A.12. Curva de secagem obtida utilizando velocidade calculada por segmentos de reta. Amostra M/07/04

APÊNDICE B



FLUXOGRAMA 1. Cálculo de umidade adimensional com encolhimento



FLUXOGRAMA 2. Cálculo de umidade adimensional sem encolhimento