

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

CINÉTICA DE SECAGEM DO MILHO SUPERDOCE

Autora: Cristiana Maria Pedroso Yoshida
Orientadora: Profa. Dra. Florencia Cecilia Menegalli

PARECER

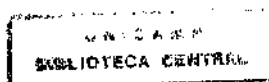
Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por CRISTIANA MARIA PEDROSO YOSHIDA e aprovada pela Comissão Julgadora em 19 de agosto de 1997.

Campinas, 19 de agosto de 1997.

Profa. Dra. FLORENCIA C. MENEGALLI
Presidente da Banca

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas, para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS

Campinas, agosto de 1997.



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

Y58c

Yoshida, Cristiana Maria Pedroso

Cinética de secagem do milho superdoce / Cristiana Maria Pedroso
Yoshida. --Campinas, SP : [s.n.], 1997.

Orientador : Florencia Cecilia Menegalli

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia de Alimentos.

1. Milho-doce 2. Secagem. 3. Curvas isotermas. I. Menegalli,
Florencia Cecilia II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade
de Engenharia de Alimentos. III. Título.

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	UNICAMP
	Y58c
V.	Ex.
TEMP. BC/31701	
PROJ. 284/97	
C	D ☒
PREÇO 38 \$ 11,00	
DATA 18/09/97	
N.º CPD	

CM-00100756-2

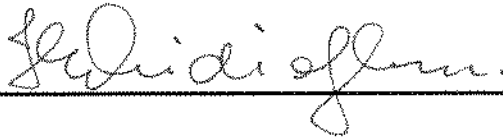
BANCA EXAMINADORA



Profa. Dra. Florencia Cecilia Menegalli
(Orientadora)



Prof. Dr. João Domingos Biagi
(Membro)



Profa. Dra. Fernanda E. X. Murr
(Membro)

Profa. Dra. Miriam Dupas Hubinger
(Membro)

Campinas,

de

de 1997.

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais Masao e Maria Lúcia,
por todo o amor e dedicação.*

AGRADECIMENTOS

À Florencia Cecilia Menegalli pela orientação, atenção e dedicação durante todo o trabalho.

À SERCON Serviços e Consultoria Ltda. (Uberlândia-MG), pelo fornecimento do milho superdoce.

À indústria De Marchi Supergelados, em especial, Seu Hilário, pela atenção e disposição do espaço para o preparo da matéria-prima.

À Prof. Dra. Miriam D. Hubinger pela atenção e simpatia em todos os momentos.

Aos meus pais, Masao e Maria Lúcia, meus irmãos: Helô, Keka e Paulo, pela força, apoio, credibilidade, companheirismo e tudo, tudo, tudo mais: **MUITO OBRIGADA!!!!** À Zélia por todos os incentivos. E, não posso esquecer do Bóris, Bruno, Bianca, Olívia, Marco Aurélio, e o mais novo, Fernando. Sem vocês seria completamente impossível!!!

À um amigo? Ou, irmão? Helder, não sei bem qual é o mais forte. Devo agradecer? Não, devo dizer o quanto foi maravilhoso dividir esta etapa da minha vida com você, curti tanto, que é difícil de expressar.

À uma amigona, companheirona e paciente Rosinha. Sério, muito obrigada por tudo, sei que não se agradece amizade, mas estou aqui para agradecer a pessoa que é!

À uma pessoa “velhinha”, mas muito amiguinha, que sua importância não cabe ser escrita, não é Lia!!!.

Para os amigos, que aqui escrevo seus nomes, mas espero ter demonstrado todo o meu **GRANDE CARINHO** ao longo de nossa convivência: Flávio, Dag, Lau, Henelyta, Jaime, Patrícia, Álvaro, Raniere, Karen, Lú, Mauro, Edilson, Paulo.

Ao Prof. Dr. Kil Jin Park pela disposição e atenção em todas as horas de dúvidas.

Ao pessoal do Departamento de Engenharia de Alimentos, em especial, o Reinaldo, Jaime, Dalila e Seu Alcides, pela atenção e sempre a boa disposição. Ao Jonas (xerox), pelo eterno bom humor! À Harumi e todo o seu pessoal pelo carinho e alegria.

Ao Prof. Ramón Hinojosa Gutierrez pela amizade e dedicação.

À Alessandra (técnica) pela paciência e ajuda.

À todos da biblioteca da FEA: Marli, Geraldo, Creusa, Zé, Toninho e Claudia. Ao pessoal da secretaria de pós-graduação: Margarete, Cosme, Cícera - sem vocês, com certeza não estaria tudo tão certinho!!

À CNPq pelo financiamento durante o trabalho. À FAEP pelo auxílio para terminar a dissertação.

À Banca Examinadora pela atenção e disponibilidade.

À Deus, mais do que qualquer um, sempre esteve comigo, em todos os momentos.

Kity

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE GERAL	vi
ÍNDICE DE TABELAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
NOMENCLATURA	xii
RESUMO	xiii
SUMMARY	xiv
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 - MILHO	3
2.1.1 - DESCRIÇÃO E ADAPTAÇÃO	3
2.1.2 - TIPOS	4
2.2 - MILHO SUPERDOCE	4
2.2.1 - COMPOSIÇÃO	5
2.2.2 - QUALIDADE DO MILHO SUPERDOCE	8
2.2.3 - USOS	9
2.3 - SECAGEM	9
2.3.1 - INTRODUÇÃO	9
2.3.2 - CINÉTICA DE SECAGEM	11
2.3.3 - MODELOS MATEMÁTICOS	13
2.3.4 - SECAGEM DO MILHO SUPERDOCE	19
2.4 - ATIVIDADE DE ÁGUA E ISOTERMAS DE SORÇÃO	21
2.4.1 - MÉTODOS DE MEDIDA	23
2.4.2 - MODELOS MATEMÁTICOS	26
2.4.3 - CALOR ISOSTÉRICO DE SORÇÃO	31

3 - MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1 - MATÉRIA-PRIMA	35
3.2 - CARACTERIZAÇÃO DO MILHO SUPERDOCE	36
3.2.1 - COMPOSIÇÃO CENTESIMAL	36
3.3 - ISOTERMAS DE SORÇÃO	39
3.4 - EQUIPAMENTO	41
3.4.1 - DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS	41
3.4.1.1 - Secador de bandejas com aquecimento elétrico	41
3.4.1.2 - Secador de bandeja com bomba de calor	43
3.4.2 - CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS	45
3.4.2.1 - Secador de bandejas com aquecimento elétrico	45
3.4.2.2 - Secador de bandeja com bomba de calor	46
4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS	47
4.1 - CARACTERIZAÇÃO DO MILHO SUPERDOCE	47
4.2 - ATIVIDADE DE ÁGUA	50
4.2.1 - CONSTRUÇÃO DAS ISOTERMAS	50
4.2.1.1 - Método Direto - Projeto COST 90	50
4.2.1.1.1 - Calor de sorção isostérico	60
4.2.1.1.2 - Extrapolação das isotermas	65
4.2.1.2 - Método Indireto - CAPRISTE e ROTSTEIN (1982)	67
4.2.2 - UNIÃO DOS MÉTODOS	70
4.3 - SECAGEM	73
4.3.1 - EFEITO DA TEMPERATURA DO AR	76
4.3.2 - EFEITO DA VELOCIDADE DO AR	80
4.3.3 - EFEITO DA UMIDADE RELATIVA DO AR	84
4.3.4 - DENSIDADE	87
4.3.5 - MODELOS MATEMÁTICOS	90
5 - CONCLUSÕES	96
6 - REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	98
6.1 - BIBLIOGRAFIA CITADA	98
6.2 - BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	107
APÊNDICES	113

ÍNDICE DE TABELAS

<u>Tabela 1</u> - Composição centesimal aproximada (base seca) do cultivo do milho superdoce 30 dias após a polinização (30 DAP)	5
<u>Tabela 2</u> - Amido, fitoglicogênio e açúcares solúveis contidos em milho superdoce após 30 dias de polinização (30 DAP).....	6
<u>Tabela 3</u> - Composição química, densidade absoluta e temperatura de gelatinização em amostras com amido isolado	6
<u>Tabela 4</u> - Efeito da umidade e quantidade de carboidrato, em várias épocas de colheitas, do milho superdoce Jubilee Sweet Corn.....	7
<u>Tabela 5</u> - Composição química do milho normal.....	7
<u>Tabela 6</u> - Variação da umidade relativa de equilíbrio com a temperatura (NOREÑA <i>et al.</i> , 1996).....	24
<u>Tabela 7</u> - Equações de regressão de $\ln a_w$ versus $1/T$ (K-1) para diferentes soluções salinas (LABUZA <i>et al.</i> , 1985).....	25
<u>Tabela 8</u> - Composição centesimal aproximada (base seca) do milho superdoce <i>in natura</i> e congelado	47
<u>Tabela 9</u> - Amido e açúcares solúveis contidos no milho superdoce <i>in natura</i> e congelado (expressos em base seca)	48
<u>Tabela 10</u> - Teor de umidade do milho superdoce <i>in natura</i> , após a data de colheita	49
<u>Tabela 11</u> - Teor de umidade de equilíbrio, em base seca (X_{bs} , kga/kgss) do milho superdoce e seus respectivos valores de atividade de água (a_w) para diferentes temperaturas, obtidas pelo Método Estático-Projeto COST 90.....	51
<u>Tabela 12</u> - Valores do coeficientes de correlação (R) e da porcentagem de confiança (P) obtidos através do ajuste dos modelos matemáticos para as isotermas de adsorção do milho superdoce, à diferentes temperaturas	52
<u>Tabela 13</u> - Parâmetros (X_m , C e K) da Equação de GAB calculados pelo ajuste das isotermas de adsorção do milho superdoce à diferentes condições de temperatura. ...	54
<u>Tabela 14</u> - Parâmetros (m, n) da Equação de Oswin, calculados pelo ajuste das isotermas de adsorção do milho superdoce à diferentes condições de temperatura. ...	56
<u>Tabela 15</u> - Parâmetros e coeficientes de correlação do ajuste da Equação de Aguerre, para diferentes temperaturas.....	58
<u>Tabela 16</u> - Valores calculados do calor de sorção do milho superdoce, para diferentes valores de umidade do milho superdoce.	62

<u>Tabela 17</u> - Parâmetros (k_1 , k_2 e m_0), coeficiente de correlação (R) e porcentagem de confiança (P) do ajuste da Equação de TOLABA e SUARÉZ (1995) para os dados de q_{st} e X	63
<u>Tabela 18</u> - Parâmetros (A e B), coeficiente de correlação (R) e porcentagem de confiança (P) do ajuste da Equação de SOPADE e AJISEGIRI (1994) para os dados de q_{st} e X	63
<u>Tabela 19</u> - Parâmetros (X_m , C e K), coeficiente de correlação (R) , e porcentagem de confiança (P) ajustados pela Equação de GAB, à diferentes temperaturas.....	66
<u>Tabela 20</u> - Relação entre a atividade de água e umidade das isotermas de dessorção do milho superdoce, obtidas pelo Método estático - CAPRISTE e ROTSTEIN (1982), à diferentes temperaturas.....	69
<u>Tabela 21</u> - Teor de açúcar das amostras de milho superdoce antes e após o processo de secagem à diferentes temperaturas.	80
<u>Tabela 22</u> - Densidade do grão de milho superdoce em função do tempo e umidade da amostra, ao longo de um processo de secagem.....	89
<u>Tabela 23</u> - Coeficiente de correlação (R) , porcentagem de confiança (P) dos testes de ajuste dos modelos matemáticos de cinética de secagem do milho superdoce, à diferentes temperaturas e velocidade de 1.28 m/s.....	93
<u>Tabela 24</u> - Parâmetros do Modelo Exponencial com 2 termos ajustado para os ensaios de secagem à diferentes temperaturas e velocidade de 1.28 m/s.....	94
<u>Tabela 25</u> - Parâmetros (C , K e n) da Equação de Page ajustados para o ensaio de secagem à diferentes temperaturas e velocidade de 1.28 m/s.....	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Curva geral de secagem.	12
Figura 2: Isoterma de sorção do milho normal.....	23
Figura 3: Esquema da bomba de calor acoplada à câmara de secagem.....	43
Figura 4: Isoterma de adsorção do milho superdoce na temperatura de 45°C, ajustada por diferentes modelos matemáticos.	53
Figura 5: Isotermas de adsorção do milho superdoce, à diferentes temperaturas, ajustadas pela Equação de GAB.	55
Figura 6: Isotermas de adsorção do milho superdoce, à diferentes temperaturas, ajustadas pela a Equação de Oswin.....	57
Figura 7: Isotermas de adsorção do milho superdoce, à diferentes temperaturas e ajustadas pela Equação de Aguerre (1986).	59
Figura 8: Relação entre a atividade de água e temperatura absoluta, baseada na Equação de Clausius-Clapeyron, para o milho superdoce.	61
Figura 9: Influência da quantidade de umidade no calor de sorção do milho superdoce.	64
Figura 10: Isotermas de adsorção do milho superdoce, obtidas à partir da extrapolação... ..	66
Figura 11: Isotermas de dessorção do milho superdoce, à diferentes temperaturas, obtidas pelo método alternativo, baseado em CAPRISTE e ROTSTEIN (1982).	68
Figura 12: Isotermas de sorção do milho superdoce à temperatura de 25°C, obtidas pelos métodos, baseados no Projeto COST 90; no CAPRISTE E ROTSTEIN (1982), e unindo os dois, ajustados pela Equação de GAB.....	71
Figura 13: Isotermas de sorção do milho superdoce à diferentes temperaturas, obtidas pelo método estático, baseado no Projeto COST 90 e CAPRISTE e ROTSTEIN (1982), ajustadas pela Equação de GAB.....	72
Figura 14 : Resultado do experimento número 05, em leito estático, sob camada fina (L=1cm), $Y_{abs}=0.014$ kgvapor água/kg ar seco.	73
Figura 15: Taxa de secagem do milho superdoce em função da umidade e tempo, nas condições de $X_o=2.13$ Kga/kgss; $v=1.28$ m/s; $T=60^{\circ}\text{C}$; $L=1$ cm; $Y_o=0.013$ Kgvapor/kg ar seco.	75

Figura 16: Efeito da temperatura do ar de secagem do milho superdoce, à $v=1.28$ m/s, $L=1$ cm. e Y_0 (kgvapor água/kg ar seco).	77
Figura 17: Efeito da temperatura do ar de secagem do milho superdoce à $v=1.28$ m/s, em escala semi-logarítmica e Y_0 expresso em kg vapor água/kg ar seco.....	78
Figura 18: Efeito da velocidade do ar de secagem, à uma temperatura de 50°C , $L=1$ cm e Y_0 expresso em kg vapor água/kg ar seco.....	81
Figura 19: Efeito da velocidade do ar, nas condições máxima e mínima trabalhada (1.28 e 0.75 m/s) à temperatura de 50°C	82
Figura 20: Efeito da velocidade de ar na taxa de secagem, à temperatura de 50°C e $L=1$ cm.	83
Figura 21: Efeito da umidade relativa do ar de entrada no secador, à uma temperatura de 40°C e velocidade de 0.5 m/s.	85
Figura 22: Curva de densidade do grão de milho superdoce ao longo do processo de secagem, à $T=35^{\circ}\text{C}$; $UR=37\%$ e $v=0.5$ m/s.	88
Figura 23: Curva de secagem do milho superdoce à temperatura de 50°C e $v= 1.28$ m/s, ajustada por diferentes modelos matemáticos.....	92

NOMENCLATURA

a_w - atividade de água
 C - constante de Guggenheim
 D_{ef} - coeficiente de difusão (m^2/s)
 H_i - calor de condensação da água pura
 H_m - calor total de sorção da 1ª camada
 H_n - calor total de sorção das multicamadas
 K - constante de secagem (s^{-1})
 k_g - coeficiente de transferência de massa
 L - altura do leito de secagem (cm)
 m_o - teor de umidade arbitrário
 p - pressão de vapor de água
 p_o - pressão de vapor de água pura
 Q_{st} - calor isostérico de sorção (kJ/kg)
 q_{st} - excesso de calor isostérico de sorção (kJ/kg)
 R - constante universal dos gases ($R=0.46188$ kJ/kg)
 r - coordenada da partícula
 dX_p/dt - taxa de secagem (kg/(kgss*min))
 R_p - raio da partícula (m)
 T - temperatura absoluta ($^{\circ}C$ ou K)
 t - tempo de secagem (min ou s)
 T_{β} - temperatura arbitrária da Equação de Aguerre et al. (1986)
 T_g - temperatura de entrada do ar ($^{\circ}C$)
 T_{sg} - temperatura de saída do ar ($^{\circ}C$)
 UR - umidade relativa do ar
 v - velocidade do ar de secagem (m/s)
 w_D - taxa de secagem
 X - umidade média
 X' - teor de umidade
 X_{bs} - umidade base seca (kg/kgss)
 X_{bu} - umidade base úmida (%)
 X_c - umidade crítica
 X_e - umidade de equilíbrio
 X_m - teor de umidade da monocamada
 X_o - umidade inicial
 X_r - umidade residual
 Y_{abs} - umidade absoluta (kgvapor/kgar seco)
 Y_o - umidade relativa do ar inicial
 Y_s - umidade da fase gasosa na superfície

ρ - densidade do grão (kg/m^3)
 θ - temperatura do produto
 μ_n - raiz da função zero de Bessel

$A, B, C_i, K_i, k_i, m, n, q, S$ - constantes das equações

RESUMO

Neste trabalho foi estudada a cinética de secagem do milho superdoce em leito estático, sob camada fina. Analisou-se o efeito das variáveis: temperatura, velocidade e umidade relativa do ar de entrada no secador, na taxa de secagem, concluindo-se que a temperatura do ar foi a variável de maior influência na secagem dos grãos. Foram feitos ajustes nos dados obtidos, através dos modelos matemáticos mais utilizados para este tipo de cereal, sendo o Modelo Exponencial com dois termos o que apresentou melhor ajuste. Durante o processo de secagem, avaliou-se a funcionalidade da densidade com a umidade das amostras, determinada através do método picnométrico, utilizando a areia como fluido picnométrico. Para complementar o trabalho, foi feita uma caracterização química e física do milho superdoce, assim como a obtenção das isotermas de adsorção à diferentes temperaturas (25°, 35°, 45° e 60°C) através do método direto, baseando-se no Projeto COST 90 (JOWITT et al., 1983) e isotermas de dessorção, nas temperaturas de 25°, 35° e 45°C, através do método indireto, baseando-se no estudo de CAPRISTE e ROTSTEIN (1982). Os dados de equilíbrio foram bem correlacionados pela Equação de GAB (Guggenheim-Anderson-deBoer). A partir das curvas de equilíbrio, calculou-se o valor do calor isostérico de sorção em função da umidade da amostra.

SUMMARY

The kinetics of drying of supersweet corn was studied in this work, using static tray dryers, one with electric heating and the other attached to a heat pump. The process variables analysed were temperature, velocity and relative air humidity at the entrance of dryer. The temperature of the gas was the variable that greatly influence drying of these grains. The drying curves were correlated with mathematical models used for this cereal grains and the Exponential Model with two terms gave the best fit. During the drying process, the density of the grain was determined at different moisture contents. This work was complemented with a chemical and physical characterization of the supersweet corn and an experimental adsorption and desorption construction of isotherms at different temperatures (25°, 35°, 45° e 60°C). The adsorption isotherms was obtained using direct method proposed by COST 90 Project (JOWITT et al., 1983) and the desorption isotherms were obtained by using indirect method, based on study of CAPRISTE e ROTSTEIN (1982). The results were well correlated by the GAB Equation (Guggenheim-Anderson-deBoer). Isosteric heats of sorption, as a function of moisture contents, were calculated using equilibrium curves.

1 - INTRODUÇÃO

O milho tem grande importância na produtividade agrícola brasileira, por ser um produto de fácil cultivo e bom rendimento. Seu consumo vem crescendo, tanto na forma de milho cozido, como em produtos industrializados, devido à sua versatilidade de uso na alimentação humana. Muitas pesquisas estão sendo realizadas com milho, no que diz respeito à sua constituição genética, composição química e valor nutricional, visando uma melhoria da qualidade em todos os setores: colheita, produção, comercialização e industrialização.

O milho superdoce (*Zea mays L.*) é resultado de uma dessas pesquisas, surgindo de uma mutação genética do milho normal, ou seja, a presença de um gene denominado "Shrunken-2" (Sh_2), que determina uma modificação na composição química, no valor nutricional e aspecto físico dos grãos de milho. A mudança principal deve-se ao aumento no teor de açúcar apresentado, caracterizando um sabor adocicado no milho; e também a diminuição no teor de amido, o que facilita a sua digestão. As vantagens observadas são um maior prazo para a colheita e comercialização *in natura*, e na industrialização, no que diz respeito ao rendimento da matéria-prima. A maior aplicação do milho superdoce tem sido na indústria de enlatados, refeições prontas (sopas, risotos, etc.) e sob a forma congelada.

O milho superdoce possui uma grande quantidade de carboidratos, principalmente açúcares, e um alto teor de umidade, facilitando a sua deterioração. Assim, mostra-se necessário buscar a melhor forma de manter sua qualidade. No Brasil, o risco de perdas na safra é acentuado, devido à falta de informações por parte dos agricultores ou condições precárias de armazenamento. Vários estudos foram realizados, com o objetivo de solucionar este problema, levando-se em consideração custo, facilidade de transporte e armazenamento, sendo que a secagem pode ser citada como um dos processos viáveis de conservação de grãos de cereais.

A secagem consiste na retirada de uma certa quantidade de umidade devido à um gradiente de temperatura ou de pressão, resultando no retardamento das possíveis reações de deterioração e na diminuição do peso, facilitando o transporte. A determinação da cinética de secagem do milho superdoce é necessária, uma vez que não se encontram dados disponíveis na literatura. À partir desta informação, pode-se analisar, simular e projetar secadores.

O objetivo deste trabalho foi estudar a cinética de secagem do milho superdoce, utilizando um secador em leito estático, determinando o efeito da temperatura, velocidade e umidade relativa do ar de entrada no secador; obter dados não encontrados na literatura para este tipo de milho, como as curvas de equilíbrio ou isotermas de sorção, através de diferentes métodos; e caracterizar química e fisicamente os grãos de milho superdoce.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Milho

2.1.1 - Descrição e adaptação

É uma planta de médio porte, pertencente à família *Graminae* (*Zea mays*). Desenvolve-se em regiões quentes, pois necessita de abundante luz solar, sendo a faixa de temperatura aceitável entre 10-45 °C. Devido à essa característica tropical, o Brasil pode ser considerado como um dos maiores produtores de milho, perdendo para os Estados Unidos e China, sendo que sua maior produção concentra-se, principalmente, nas regiões sudeste e centro-oeste (GO, MG, SP, PR e outros), (EMBRAPA, 1981).

Possui um ciclo curto de ocupação do solo, criando a vantagem de obter mais safras ao ano. Porém, é um produto perecível necessitando de colheita e distribuição bastante ágeis. A facilidade de cultivo, o rendimento alto e as várias formas de utilização (alimentação humana e animal) tornaram o milho um alimento base da alimentação humana (WATSON, 1987).

2.1.2 - Tipos

Conforme JUGENHEIMER (1995), o milho pode ser dividido em vários grupos, de acordo com as diferentes características genotípicas e físicas de suas sementes. Estas variedades resultam de vários estudos sobre o melhoramento do milho, no que diz respeito à maior prazo para colheitas, às condições climáticas e à composição (WATSON, 1987).

Uma divisão foi feita por BANDELL (1987), quanto à textura e aspecto, resultando os seguintes tipos: milho dentado (Dent Corn); milho duro ou cristalino (Flint Corn); milho pipoca (Popcorn); milho farináceo (Flour Corn); milho doce (Sweet Corn); milho ceroso (Waxy Corn); milho superdoce (Supersweet Corn).

2.2 - Milho Superdoce

Através de mutações genéticas, foi obtido um novo tipo de milho, o superdoce. Sua característica genética é a presença de um gene "Shrunken two (Sh2)", o qual lhe confere maior teor de açúcar, 25%, e menor de amido, 15-20%, (à título de comparação, o milho do tipo normal possui 3% de açúcar e 60-70% de amido), resultando em uma maior doçura. Seus grãos são mais tenros, cheios e amarelos (GLOBO RURAL, 1994; BURGMANS e LILL, 1987).

As vantagens observadas são (GLOBO RURAL, 1994):

- 30% mais produtivo comparado ao milho doce;
- maior rendimento industrial (em relação ao volume de espigas com palha e o peso dos grãos cortados);

- maior prazo para colheita (entre 8-12 dias) e ainda mais 4 dias para venda, ou seja, aumento do tempo de comercialização e decréscimo do risco de perda do produto. Esta é uma característica importante, avaliada por TOSELLO (1987), pois com essa combinação genotípica, a sacarose presente é conservada em até 90% até o quarto dia após a colheita, à temperatura ambiente. Após esse período, ela hidrolisa, e no endosperma imaturo é metabolizada para amido pela enzima sacarose-glucosil-transferase.

2.2.1 - Composição

Um estudo realizado por REYES *et al.* (1989), mostrou que, basicamente o milho superdoce é composto por proteínas, carboidratos, lipídios, fibras, cinzas. A análise de dados obtidos à partir do milho superdoce-SRR "Duro", após 30 dias de polinização, estão apresentados nas tabelas 1 e 2 :

Tabela 1 - Composição centesimal aproximada (base seca) do cultivo do milho superdoce 30 dias após a polinização (30 DAP) (REYES *et al.*, 1989)

Proteína (%N x 6.25)	Total de lipídios (%)	Cinzas (%)	Fibras (%)	Carboidratos (diferença) (%)
14.90	5.4	1.9	4.8	74.0

Tabela 2 - Amido, fitoglicogênio e açúcares solúveis contidos em milho superdoce após 30 dias de polinização (30 DAP) (REYES *et al.*, 1989)

Açúcares redutores (%)	Total de Açúcares (%)	Fitoglicogênio (%)	Amido (%)
4.5	24.3	1.0	20.8

* valores expressos como % em base seca

A avaliação da composição de amido isolado do milho superdoce SSR "Duro" (quantidade de amilose), foi feita por REYES *et al.* (1989), verificando-se os seguintes dados, apresentados na tabela 3 :

Tabela 3 - Composição química, densidade absoluta e temperatura de gelatinização em amostras com amido isolado (REYES *et al.*, 1989)

Proteína ¹ (%N x 6.25)	Total de lipídios ¹ (%)	Cinzas ¹ (%)	Fibras ¹ (%)	Amilose ¹ (%)	Densidade absoluta (g / cm ³)	Temp. de gelatinização (°C)
0.53	0.18	0.11	n.d.	26.8	1.526	66-71

1- expresso em base seca; n.d.- não detectável

O alto teor de açúcar no milho superdoce, foi estudado por AUNG *et al.* (1993), como mostra a tabela 4, indicando um acúmulo de sacarose, seguido de glicose, frutose, sorbitol e rafinose, em menores quantidades. O mesmo resultado foi obtido por ZHUS *et al.* (1992), que determinaram a maior presença de sacarose em 94.1% dos açúcares totais.

Tabela 4 - Efeito da umidade e quantidade de carboidrato, em várias épocas de colheitas, do milho superdoce Jubilee Sweet Corn(AUNG *et al.*, 1993)

data de colheita	umidade grão (%)	quantidade (mg / g massa fresca) de				
		frutose	glicose	sorbitol	sacarose	rafinose
06-9-90	72 ± 2.5	1.6 ± 0.2	8.7 ± 0.9	1.2 ± 0.2	68.2 ± 7.3	0.58 ± 0.2
18-9-90	69 ± 1.5	1.1 ± 0.1	5.0 ± 0.5	0.7 ± 0.2	40.3 ± 7.4	0.58 ± 0.1
26-9-90	56 ± 1.0	1.5 ± 0.6	2.7 ± 0.9	0.5 ± 0.2	40.5 ± 6.8	1.6 ± 0.5

± valor de erro

O teor de umidade do grão pode ser considerado como uma estimativa da maturidade do milho superdoce, mas é também importante como uma forma de determinar a data ótima de colheita. A rápida determinação de seu valor é um dado necessário para analisar o efeito da maturidade da semente na colheita e o vigor do milho superdoce Shrunken-2 (BOROWSKI e FRITZ, 1990).

À título de comparação, a composição química do milho normal, apresentada por WATSON (1987) e MACHADO (1988), a partir de uma análise aproximada de grãos pode ser observada na tabela 5.

Tabela 5 - Composição química do milho normal(WATSON, 1987; MACHADO, 1988)

Proteína	Cinzas ¹	Fibras	Amido	Açúcares	Lipídios
%Nx6.25	(%)	(%)	(%)	Totais ²	(%)
				(%)	
6-12	1.1-3.9	8.3-11.9	61-78	1.0-3.0	5

1- base seca; 2- como glicose

Portanto, este gene “Shrunken-2” provoca no milho superdoce, um aumento do teor de açúcar, proteína e um decréscimo no teor de amido e fibras, se comparado ao milho normal.

2.2.2 - Qualidade do Milho Superdoce

De acordo com AUNG *et al.* (1993), a qualidade do milho superdoce é controlada, principalmente, através do genótipo, composição do grão, desenvolvimento do amadurecimento e condições de estocagem após a colheita. A quantidade dos constituintes do grão, umidade e quantidade de carboidratos são fatores determinantes críticos da qualidade do milho doce fresco.

O tempo de vida de pós-colheita é limitado, devido à conversão enzimática dos açúcares, particularmente a sacarose, para amido e a perda da característica do sabor “doce”. A alteração dos açúcares é muito mais rápida em temperaturas ambientes (GEESON *et al.*, 1991). A presença da sacarose em maior quantidade que a frutose e glicose, determina a importância dela na avaliação da qualidade, ou seja, a alteração do teor da sacarose é muito mais rápido que dos outros tipos de açúcares (glicose, frutose e sorbitol), pois estes permitem até 11 dias de estocagem, nas condições ambiente (ZHUS *et al.*, 1992; HINDMARSH, 1979). A concentração de amido pode ser desprezada, uma vez que se trabalha com o sabor, aceitabilidade, “doçura” (OLSEN *et al.*, 1990).

2.2.3- Usos

Ainda existe preconceito do mercado brasileiro em relação ao consumo do milho superdoce *in natura*, devido ao aspecto de seus grãos (tenros, bem amarelos, firmes), sendo seu maior uso na indústria de enlatados, congelados, de processamento de refeições prontas (risoto, sopa) e sorvetes (ANON, 1982), ao contrário do mercado americano e europeu que o utilizam em larga escala, tanto *in natura*, industrializado e como matéria-prima para a extração de frutose. Atualmente, os produtores brasileiros estão começando a substituir a cultura de outros tipos de milho para este tipo, devido às vantagens que possui, como maior rendimento por unidade de área e variedade mais resistente ao ataque de pragas.

Em geral, a estocagem e comercialização é feita através do milho superdoce congelado ou na forma combinada, embalado por um filme e congelado.

Devido à diminuição do teor de amido, a preparação de doces típicos, como, curau e pamonha torna-se difícil, sendo necessário a adição de amido de milho (GLOBO RURAL, 1994).

2.3 - Secagem

2.3.1 - Introdução

O milho é constituído, em maior quantidade por carboidratos, e com as condições do meio ambiente, seu grão é vulnerável ao ataque de insetos e deterioração. A taxa de respiração depende diretamente do teor de umidade e da temperatura de estocagem, ou seja, como todo cereal, o milho possui um teor

de umidade aceitável para evitar sua deterioração durante o armazenamento. No caso, estima-se uma umidade na faixa de 10-14% (base úmida). Com isso, verifica-se a umidade como uma variável com influência significativa na qualidade, propriedades processadas e economia (HERUM, 1987). A umidade ótima de colheita do milho está entre 70-74% (base úmida), segundo HINDMARSH (1979) e OLSEN *et al.* (1990), e não é favorável ao transporte, estocagem ou muitos usos finais. Assim, após a colheita, o mais indicado seria secá-lo rapidamente, avaliando a melhor forma de retirar a água, para não alterar a qualidade do grão. Quanto à avaliação econômica, a umidade final é importante, pois a retirada de água consome muita energia, elevando o custo do processo (WATSON, 1987).

Segundo JOWITT *et al.* (1983), a secagem é uma das mais importantes técnicas para a preservação do grão. Através dessa operação unitária busca-se a preservação da qualidade e valor nutritivo, e garantia da germinação da semente (JOHNSON e LAMP, 1966). A perda natural de umidade pelas sementes de milho, na região sul, é muito demorada, sendo necessário a utilização da secagem artificial (TOLEDO, 1987). A escolha do tipo de processo é consequência do estudo das características químicas e físico-químicas da matéria-prima e da disponibilidade física e financeira.

Para a determinação das variáveis que caracterizam o processo de secagem, assim como a obtenção de um maior domínio e conhecimento nos fundamentos dos mecanismos envolvidos, muitos pesquisadores tem estudado a secagem de alimentos em camada fina (PINTO e TOBINAGA, 1996).

Num estudo feito por ESTRADA E LITCHFIELD (1993), abordando a secagem em camada fina (leito fixo) do milho híbrido dente amarelo com alto teor de umidade (70%), concluiu-se que uma das condições importantes é a temperatura do ar de secagem, pois altas temperaturas (entre 70 e 104°C) incorrem em qualidade inferior no milho seco. Isto ocorre, devido ao aumento no

aparecimento de tensões de cisalhamento no milho, o que provoca uma perda da resistência para impactos mecânicos durante o processo. No final do processo, o milho apresenta-se descolorido, rugoso, com bolhas ou cisalhado. Outra variável estudada foi a umidade relativa do ar de entrada no secador, concluindo que as taxas de secagem à baixa umidade relativa aumentaram em 44%.

A secagem, como outras operações de tratamento de vegetais, tem influência nas propriedades do produto, sendo as mais características: a perda do material, mudanças físicas detereorativas e reações químicas, ou seja, escurecimento enzimático e não enzimático, destruição de vitaminas, pigmentos, e outras (SZENTMARJAV *et al.*, 1996). No caso do milho normal, PUZZI (1977) determinou que à uma temperatura do ar de secagem acima de 60°C, ocorre alteração química em seu endosperma.

Assim, SZENTMARJAV *et al.* (1996) concluíram que os três fatores mais importantes que possuem efeitos consideráveis na taxa de secagem e qualidade do produto são: as propriedades da matéria-prima (composição, tamanho da partícula, estrutura, e outros); a aplicação de pré-tratamentos, que minimizam as reações de deterioração, assim como as possíveis modificações na estrutura do alimento, além de melhorar a taxa de transferência de massa na desidratação e reidratação; e os métodos e variáveis operacionais da secagem (temperatura e umidade do ar de secagem, temperatura do produto, tempo, tipo de secador, e outros).

2.3.2- Cinética de secagem

A secagem de produtos úmidos, de uma forma geral, possui 3 períodos (Figura 1) classificados como: período de regime não permanente (AB), que caracteriza-se pela adaptação da temperatura do sólido com o meio. É seguido de um período à taxa constante de secagem (BC), aonde a temperatura

do sólido molhado é igual a de bulbo úmido, ou seja, toda a superfície exposta do sólido está saturada de água. Este período caracteriza-se por uma transferência de calor, ou um fenômeno de evaporação, que finaliza quando atinge-se a umidade crítica (X_c). A partir deste momento, a temperatura da superfície aumenta e a taxa de secagem decresce rapidamente (tendendo a zero), significando que a secagem está sendo controlada pelo movimento da umidade do interior do sólido à superfície, acarretando mecanismos, como a difusão de umidade, gradientes de pressão de vapor e vaporização de umidade. Este período, denominado período à taxa decrescente, aproxima-se do equilíbrio, ou o menor teor de umidade atingível no processo de secagem, sendo chamado de umidade de equilíbrio (X_e).

Os grãos de cereais, geralmente, não apresentam período à taxa constante, ocorrendo apenas período à taxa decrescente, a menos que sejam colhidos em estágio imaturo ou tenha havido condensação de umidade ou chovido sobre eles.

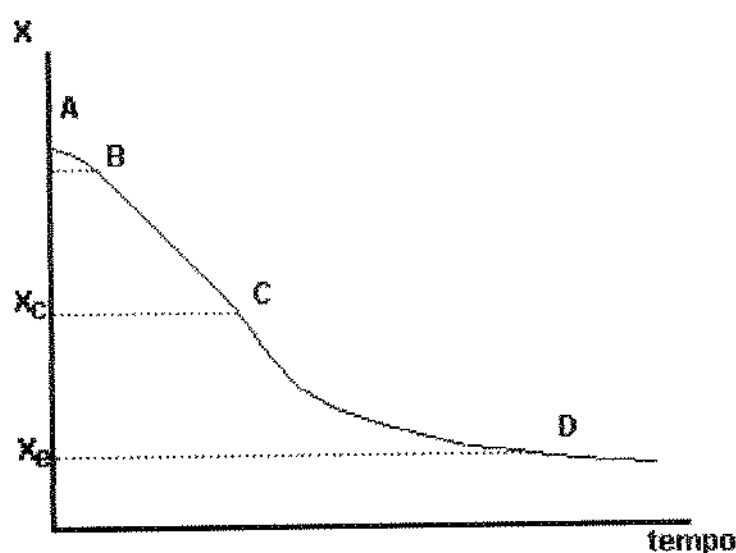


Figura 1: Curva geral de secagem.

BEKE *et al.* (1996) descreveram o mecanismo interno de transferência de umidade do milho normal, durante o processo de secagem por microondas, na faixa de temperatura igual à 80-120°C, umidade relativa do ar de entrada de 0%, e umidade inicial da amostra uniforme, obtida por uma pré-secagem em condições suaves ($T=20^{\circ}\text{C}$). Concluíram que ao longo do processo, o movimento da umidade tende na direção do embrião. Notaram que o embrião permanece úmido por todo o tempo de processo, explicando-se este fenômeno como resultado da estrutura interna e funcionalidade básica do grão, ou seja, desde a maior parte do grão, que é o pericarpo, o direcionamento do transporte de água tende a alimentar o embrião.

CURTOIS *et al.* (1991) citaram que vários autores, ao trabalharem com a secagem do milho, tem provado que o gradiente térmico entre o centro e a superfície do grão pode ser considerado desprezível nos primeiros minutos. A transferência de massa interna no grão é baseada no princípio da difusão, e a vaporização ocorre somente na parte mais externa, ou seja, a superfície.

A remoção da água, com auxílio de ar aquecido, depende essencialmente, dos seguintes fatores: pressões de vapor da água no grão e no ar de secagem, temperatura e velocidade do ar, velocidade de difusão da água no grão.

2.3.3 - Modelos Matemáticos

Várias teorias foram propostas para explicar os mecanismos de movimento de umidade em sólidos. Estas podem ser especificadas como: difusão de líquido devido ao gradiente de concentração, transporte por difusão de vapor devido ao gradiente de pressão, movimento de água devido às forças capilares, fluxo de líquido e vapor devido ao gradiente de pressão total, difusão

superficial e fluxos provocados por evaporação e condensação sucessivas (BROOKER *et al.*, 1974).

A simulação do processo de secagem pode ser dividida em dois grupos principais, dependendo do tipo de equação que se aplica em seus dados experimentais, sendo eles, os modelos empíricos e os teóricos (BEKE *et al.*, 1996).

O modelo teórico mais utilizado é o da difusão, ou quando o movimento de umidade dentro do sólido ocorre por mecanismo, predominantemente de difusão em fase líquida. Isto é descrito pela 2ª Lei de Fick:

$$\frac{\partial X'}{\partial t} = - \nabla(D_{ef} \cdot \nabla X') \quad (\text{Eq. 1})$$

onde X' é o teor de umidade, expresso em base seca; t é o tempo de secagem e D_{ef} o coeficiente de difusão.

A aplicação da Equação 1 é proposta para várias geometrias. No caso do milho, a forma de seus grãos muitas vezes não está inserida no modelo escolhido, cilindro, placa ou esfera. ESCARDINO *et al.* (1971) considerou o milho como um paralelepípedo, obtendo a solução baseando-se na proposta de Newman, ou seja, considerar a geometria como a intersecção entre três placas planas; TOLABA e SUARÉZ (1988) aplicaram com êxito esta equação, assumindo uma forma esférica para o milho, com difusividade constante, mas considerando a umidade da superfície como um parâmetro de ajuste; BRUNELLO e OLIVEIRA (1992) obtiveram uma boa correlação dos dados de secagem em grãos de sorgo.

BROOKER *et al.* (1974) adaptaram para a secagem de grãos de cereais a Teoria de Luikov, que utiliza um sistema de equação diferenciais parciais:

$$\frac{\partial X'}{\partial t} = \nabla^2 K_{11} X' + \nabla^2 K_{12} \theta \quad (\text{Eq.2.1})$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla^2 K_{21} X' + \nabla^2 K_{22} \theta \quad (\text{Eq.2.2})$$

onde θ corresponde à temperatura do produto, K_{ij} às constantes de secagem.

Em análises práticas de secagem de grãos, conclui-se que não se deve considerar gradientes de temperatura e o processo de transporte de umidade ocorre por difusão, portanto K_{11} pode ser chamado de coeficiente de difusão efetiva D_{ef} , e considera-se o fluxo apenas na direção radial. A partir disto, obtém-se a equação de Luikov simplificada, que coincide com a Equação 1:

$$\frac{\partial X'}{\partial t} = D_{ef} \left[\frac{\partial^2 X'}{\partial r^2} + \frac{q}{r} \left(\frac{\partial X'}{\partial r} \right) \right] \quad (\text{Eq.3})$$

onde o valor da variável q é:

- $q = 0 \rightarrow$ coordenadas planas
- $q = 1 \rightarrow$ coordenadas cilíndricas
- $q = 2 \rightarrow$ coordenadas esféricas

e r é a coordenada da partícula.

As condições inicial e de contorno podem ser escritas:

CI: $t=0 \rightarrow 0 < r < R \rightarrow X' = X_0$

CC1: $t > 0 \rightarrow r=0 \rightarrow \frac{\partial X'}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0$

CC2: $t > 0 \rightarrow r=R \rightarrow X'=X_e$

onde X_0 corresponde ao teor de umidade inicial da amostra e X_e , o teor de umidade de equilíbrio, sendo expressas em base seca.

A solução para a Eq.3 fornece o perfil interno da umidade, para as diversas geometrias (CRANK, 1957). Integrando-as, obtém-se a solução para a umidade média (X), expressa em base seca:

Placa plana:

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-(2n+1)^2 \pi^2 \frac{D_{eff} t}{4 l^2} \right] \quad (\text{Eq.4})$$

onde l é a espessura da placa.

Cilindro infinito:

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n^2} \exp \left(-\frac{\mu_n^2 D_{eff} t}{R_p^2} \right) \quad (\text{Eq.5})$$

onde μ_n são as raízes da função zero de Bessel e R_p , o raio da partícula.

Esfera:

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left(-\frac{n^2 \pi^2 D_{eff} t}{R_p^2} \right) \quad (\text{Eq.6})$$

De uma forma geral, estas equações podem ser simplificadas, dando uma equação empírica, do tipo exponencial:

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = A \exp (-Bt) \quad (\text{Eq.7})$$

onde A e B são parâmetros da equação.

Esta equação é semelhante à solução do modelo Fickiano para tempos de secagem longos, quando apenas o 1º termo da solução da série for significativo (PINTO e TOBINAGA, 1996).

Muitos autores tem utilizado este tipo de equação para ajuste de dados. SILVA (1993) utilizou esse modelo para ajustar os dados experimentais da secagem de urucum em leito de jorro, obtendo desvios menores que 9.5%. BARROSO *et al.* (1993) também a aplicaram para a secagem de soja em camada fina.

Um outro modelo, introduzido por Lewis (1921), é uma relação análoga à lei de Newton para resfriamento, aonde assume-se que a taxa de secagem é proporcional ao teor de água livre (PINTO e TOBINAGA, 1996):

$$\frac{dX}{dt} = -K(X - X_e) \quad (\text{Eq.8})$$

onde a resistência à difusão ocorre, principalmente, nas camadas mais externas do material, desconsiderando os efeitos no interior do mesmo. O fator de proporcionalidade K é denominado constante de secagem. Integrando a Equação 8, utilizando as mesmas condições de contorno da Equação 3, obtemos o modelo exponencial logarítmico com um termo. Este modelo tem sido bastante aplicado para secagem de alimentos em camada fina, aonde X_r é a umidade residual do material,

$$X_r = \frac{X(t) - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-Kt) \quad (\text{Eq.9})$$

Segundo SHARAF-ELDEEN *et al.* (1979), citado por RAPUSAS e DRISCOLL (1995), diversos pesquisadores determinaram que o modelo exponencial com dois termos (Equação 10) tem melhor resultado aos ajustes para a secagem de materiais biológicos:

$$X_r = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = C_1 \exp(-K_1 t) + C_2 \exp(-K_2 t) \quad (\text{Eq.10})$$

onde C_1 , C_2 , K_1 e K_2 são parâmetros da equação. As constantes K_i podem ser determinadas sem referência do tamanho ou encolhimento do material a ser

seco, o que é uma vantagem para partículas de alimentos que não podem ser especificadas com precisão, ou onde ocorrem grandes mudanças na geometria do produto. A influência das variáveis experimentais de secagem, sobre os parâmetros, C e K, podem ser correlacionadas, usando as expressões, tais como as equações 11 e 12.

$$C \text{ ou } K = \left(\beta_0 L^{\beta_1} H^{\beta_2} v^{\beta_3} \right) \exp \left(\frac{-\beta_4}{T} \right) \quad (\text{Eq.11})$$

$$C \text{ ou } K = \gamma_0 L^{\gamma_1} T^{\gamma_2} H^{\gamma_3} v^{\gamma_4} \quad (\text{Eq.12})$$

onde L é a espessura da amostra (m), H a umidade absoluta (kg água/kg ar seco); v é a velocidade do ar (m/s); β_i e γ_i são constantes das equações.

Outra equação empírica, bastante útil é a Equação de Page, representada pela equação 13. OGIHARA (1989) utilizou a equação de Page para ajustar seus dados de secagem de milho doce Nutrimaiz em secador de bandejas. Segundo PINTO e TOBINAGA (1996), esta equação é bastante utilizada em secagem de produtos agrícolas, em particular grãos e sementes,

$$X_r = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-Kt^n) \quad (\text{Eq.13})$$

onde K e n são constantes da equação, que dependem das condições de operação do processo de secagem e características do material a ser seco.

THOMPSON, citado por BROOKER *et al.* (1974), desenvolveu uma das várias equações empíricas propostas para a secagem de grãos:

$$t = A \ln X_r + B (\ln X_r)^2 \quad (\text{Eq.14})$$

onde A e B são constantes dependentes da temperatura do ar. O estudo feito para milho no estado seco, obteve os seguintes valores para as variáveis:

$$A = 1.86178 + 0.004880; B = 427.364 \exp(-0.033010).$$

2.3.4 - Secagem do Milho Superdoce

Poucos estudos foram realizados sobre a secagem do milho superdoce, e os que se encontram são qualitativos.

STEINKRAUS e MACDONALD (1967) analisaram a vantagem de secar este tipo de milho, baseando-se no peso e perecibilidade, uma vez que, a comercialização era apenas feita *in natura*, sendo bastante perecível; enlatado, que apesar de possuir excelente qualidade, apresenta grande peso e volume; e, sob a forma congelada, aonde deveriam ser armazenados apenas em freezer ou estocagem a frio. Como tópicos importantes para a aquisição de um produto final com qualidade, deve-se selecionar as condições para a desidratação, dando maior importância para a temperatura de secagem.

Segundo JOHNSON *et al.* (1966), o milho superdoce durante a secagem, perde a umidade bem devagar, devido ao elevado teor de açúcar. Assim, a quantidade de umidade pode ser considerada como outra característica de destaque, pois além de determinar a maturidade dos grãos (seleção da data ótima de colheita), também limita as condições do processo, uma vez que o alto teor de umidade, contribui para a caramelização dos açúcares presentes. BOROWSKI e FRITZ (1990) concluíram que a disponibilidade de energia, o tempo de secagem e a perda de massa necessária são característicos para cada colheita. BURGMANS e LILL (1987) verificaram algumas dificuldades em obter um teor de umidade suficientemente baixo, e o alto teor de açúcar provocaram escurecimento e aglomeração dos flocos de milho superdoce obtidos.

Secando-se os grãos deste milho, nota-se que as variáveis, tempo-consumo e custo, são mais altas que para o milho doce "padrão". A temperatura e a taxa de secagem são críticas, uma vez que deseja-se um produto final com qualidade. Outro fator importante a ser avaliado antes de iniciar a secagem, é a

composição física, pois o embrião deste tipo de milho é mais exposto, assim o endosperma tende a secar a taxas diferentes e sob maior encolhimento, comparado ao pericarpo (MARSHAL, 1987). Para BURGMANS e LILL (1987), a resistência do pericarpo pode ser considerada como uma desvantagem no processo de secagem.

TISCHER *et al.* (1953) determinaram que para o milho doce seco adquirir uma estabilidade na cor durante a armazenagem, é necessário a adição de dióxido de enxofre, que tem como objetivo matar insetos e larvas. Para WATSON *et al.* (1979), esta adição é importante para garantir ao produto seco, um melhor sabor e um menor tempo de reidratação.

Quando esses híbridos são processados à altas temperaturas (acima de 60°C) e longo tempo, o produto final adquire uma aparência escura e sem sabor, ou seja, significa a ocorrência da caramelização dos açúcares contidos no milho (MARSHALL, 1987). WATSON *et al.* (1979) determinaram que a temperatura do ar de secagem influi também na taxa de reidratação. FORTES e OKOS (1980) associaram o uso de altas temperaturas em milho à mudanças não regulares das propriedades físicas dos grãos.

KAYA (1995) realizou uma pesquisa sobre a secagem de milho superdoce em leite estático, utilizando um secador de bandejas. A aquisição de matéria-prima era na forma congelada, havendo a necessidade de aguardar o descongelamento para iniciar o processo. De acordo com os dados experimentais obtidos, a umidade inicial do milho estava em torno de 75 % e, a umidade final, devido à falta de referência bibliográfica, foi fixada em função da umidade determinada em amostras de milho obtidas à partir de um arroz preparado, comercializado pela Knorr. O resultado parcial obtido foi de uma umidade final aproximadamente 6 %, e atividade de água igual à 0.361.

2.4 - Atividade de água e Isotermas de Sorção

Na secagem, a atividade de água é importante por determinar o mínimo teor de umidade que o grão pode atingir durante o processo, ou seja, fornece condições de operação (BROOKER *et al.*, 1974).

A atividade de água é um tema bastante pesquisado, devido à sua importância na indústria de alimentos. É através desse parâmetro que pode-se diagnosticar o estado de conservação de um produto, pela sua relação direta com possíveis reações de deterioração (mudanças químicas, físicas e biológicas).

Segundo RIZVI (1986), o conhecimento das propriedades termodinâmicas envolvendo o comportamento de sorção da água em alimentos é importante para o processo de desidratação do mesmo, no que diz respeito à obtenção de dados sobre a concentração de equilíbrio de água em alimentos, e para analisar o transporte de massa e calor durante o processo. As relações envolvidas no equilíbrio água-alimento, podem ser compreendidas, supondo o alimento como um sistema em equilíbrio termodinâmico com o meio, à temperatura e umidade relativa constantes. Como está no equilíbrio, o potencial químico da água no alimento deve ser igual ao do vapor de água ao redor dele. A variação do potencial químico da água no alimento em relação à água pura, pode ser calculado em função da atividade de água (a_w), como:

$$a_w = \frac{p}{p_0} \quad (\text{Eq.15})$$

onde p é a pressão de vapor de água no alimento, à uma determinada temperatura e p_0 é a pressão da água pura na mesma temperatura.

De uma forma geral, um alimento com $a_w < 0.6$ é estável em função do crescimento microbiano, podendo ser classificado como desidratado (LABUZA, 1980).

As isotermas de sorção podem ser descritas como a relação entre a umidade relativa de equilíbrio, ou da pressão parcial de vapor de um produto em função do seu teor de umidade à uma dada temperatura. De uma outra forma, é uma predição da capacidade do produto adsorver ou dessorver água. Segundo ANDRIEU *et al.* (1986), a determinação das isotermas de sorção é importante para a análises ou simulações de muitos processos na Engenharia de Alimentos, tais como armazenamento, embalagem e secagem.

Para uma mesma condição de umidade relativa do ar e temperatura, pode-se construir duas isotermas, a de adsorção e a de dessorção, dependendo apenas do teor de umidade inicial do produto, ou seja, dependendo da maneira como o material atinge o equilíbrio, adsorvendo ou dessorvendo água. Em geral, a isoterma de dessorção caracteriza-se por valores de umidade de equilíbrio superiores ao da isoterma de adsorção (YOUNG e NELSON, 1967). A defasagem entre estas duas curvas é denominada histerese, sendo um fenômeno bastante comum em produtos biológicos.

O gráfico da umidade relativa (à temperatura constante) com a porcentagem do teor de umidade de um grão (base seca) assume, geralmente, uma forma sigmoidal. IGLESIAS e CHIRIFE (1982) construíram as isotermas para milho normal (através do método estático dos dessecadores), como mostra a figura 2. Verifica-se, neste caso, o fenômeno da histerese mencionado anteriormente.

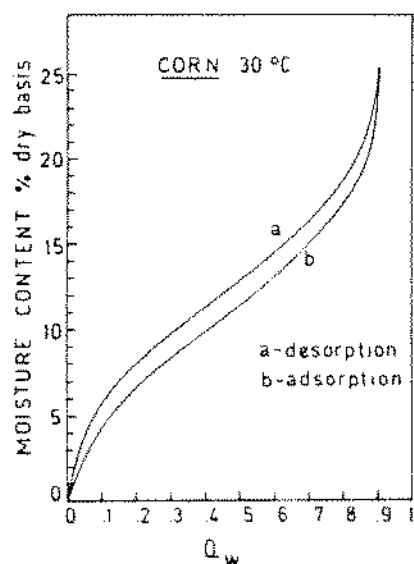


Figura 2: Isoterma de sorção do milho normal.

Na secagem, o uso de equações para representar as isotermas de sorção, possui uma importância de ordem prática, no que diz respeito à avaliação das propriedades do material seco e na obtenção da estabilidade do mesmo (BOKI e OHNO, 1991).

Não são encontradas na literatura, isotermas de sorção do milho superdoce, sendo necessária a sua determinação, quando se trabalha com secagem, pois estão diretamente relacionadas ao do teor de umidade final e à taxa de secagem do produto (dependendo das condições de operação).

2.4.1 - Métodos de Medida

A determinação do valor de atividade de água pode ser efetuada por diversos métodos, sendo eles classificados em diretos e indiretos. As

características mais importantes dos métodos de medida são a precisão, reprodutibilidade, rapidez, baixo custo, fácil utilização e durabilidade (NOREÑA *et al.*, 1996).

No caso de grãos de milho, muitos pesquisadores utilizaram o método gravimétrico, que determina a curva de sorção de umidade do material à uma certa temperatura, permitindo posteriormente calcular a atividade de água da amostra, para uma dada umidade. Este método consiste em medir o teor de umidade das amostras, após atingirem o equilíbrio, quando colocadas sob diversas umidades relativas conhecidas. Estas são obtidas através de soluções salinas saturadas, com atividade de água entre 0.1 até 0.9, sendo que a tabela 6 apresenta estes valores para os sais mais utilizados. Deve-se ressaltar que, o controle da temperatura deve ser eficiente, evitando, assim a condensação da água na amostra (NOREÑA *et al.*, 1996).

Tabela 6 - Variação da umidade relativa de equilíbrio com a temperatura (NOREÑA *et al.*, 1996; GONTARD, 1991)

Sais	UR (%)				
	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C
NaOH	7.0	7.0	6.5	6.0	2.0
LiCl	11.2	11.2	11.0	11.0	11.0
MgCl ₂	33.2	32.5	31.7	31.7	29.5
NaBr	57.7	56.0	—	50.9	—
NaNO ₂	65.5	63.5	61.5	60.0	59.0
NaCl	75.5	75.5	75.5	74.5	74.0
KCl	85.3	83.5	82.0	81.0	79.5
BaCl ₂	90.7	90.0	89.3	88.5	87.0
CuSO ₄	97.3	96.8	96.2	95.0	92.5

LABUZA *et al.* (1985) confirmaram o efeito direto da temperatura nos valores da atividade de água das soluções salinas, concluindo que com o aumento da temperatura, decrescem os valores da atividade de água, sendo este fenômeno explicado pelo aumento da solubilidade dos sais. Na Tabela 7, estão apresentadas expressões que permitem calcular a_w , obtidas das equações de regressão do logaritmo neperiano da atividade de água versus o inverso da temperatura ($1/T$) para oito soluções salinas diferentes, determinadas através do método dos mínimos quadrados.

Pode-se observar que o efeito da temperatura sobre a atividade de água é diferente para cada sal, devido às soluções salinas possuírem diferentes calores de solução, podendo ser verificado através dos diferentes valores dos coeficientes angulares das equações de regressão (LABUZA *et al.*, 1985).

Tabela 7 - Equações de regressão de $\ln a_w$ versus $1/T$ (K^{-1}) para diferentes soluções salinas (LABUZA *et al.*, 1985)

SAIS	Equações de regressão	r^2
LiCl	$\ln a_w = 500.95 \cdot 1/T - 3.85$	0.976
KC ₂ H ₃ O ₂	$\ln a_w = 861.39 \cdot 1/T - 4.33$	0.965
MgCl ₂	$\ln a_w = 303.35 \cdot 1/T - 2.13$	0.995
K ₂ CO ₃	$\ln a_w = 145.00 \cdot 1/T - 1.30$	0.967
MgNO ₃	$\ln a_w = 356.60 \cdot 1/T - 1.82$	0.987
NaNO ₂	$\ln a_w = 435.96 \cdot 1/T - 1.88$	0.974
NaCl	$\ln a_w = 228.92 \cdot 1/T - 1.04$	0.961
KCl	$\ln a_w = 367.58 \cdot 1/T - 1.39$	0.967

Um outro método para o levantamento das curvas, também estático, foi utilizado por CAPRISTE e ROTSTEIN (1982), que consiste em um método indireto, ou seja, quantifica atividade de água, através de um medidor eletrônico, de amostras com diferentes teores de umidade, obtidas à partir de um processo de secagem sob condições suaves. As amostras são retiradas do secador em intervalos de tempo pré-definidos, colocando-as em recipientes herméticos termostizados, a fim de homogeneizar a temperatura e a distribuição da umidade. A vantagem de utilizar esta metodologia é a aquisição de um maior número de dados experimentais, melhorando a precisão da curva de sorção. Como a aquisição dos dados é feita através de um processo de secagem, possui a vantagem de diminuir o tempo de equilíbrio e atingir valores de atividade de água altos. Isto é vantajoso em relação ao método gravimétrico, onde muitas vezes perde-se amostras por deterioração, em altos valores de atividade de água.

ROTSTEIN e CORNISH (1978), citado por CAPRISTE e ROTSTEIN (1982), aplicaram este método para alimentos que contém açúcares, resultando em bons dados experimentais.

2.4.2 - Modelos matemáticos

Existem inúmeras equações, usadas para representar as curvas de sorção de alimentos, sendo que algumas delas são apresentadas abaixo (BROOKER *et al.*, 1974; JOWITT *et al.*, 1983; RIZVI, 1986):

1. Equação de BET (Brunauer-Emmett-Tetter, 1938): é a mais utilizada e fornece um bom ajuste para uma variedade de alimentos na região de atividade de água entre 0.05 e 0.45, sendo expressa da seguinte forma:

$$\frac{a_w}{(1-a_w)} \frac{1}{X} = \frac{1}{X_m C'} + \frac{a_w(C'-1)}{X_m C'} \quad (\text{Eq.16})$$

onde a_w = atividade de água

X = teor de umidade (base seca)

X_m = teor de umidade da monocamada

C' = constante relacionada ao calor de sorção, sendo,

$$C' = k' \exp \left(\frac{\Delta H_{\text{BET}}}{RT} \right) \quad (\text{Eq.17})$$

onde ΔH_{BET} é a entalpia de absorção da monocamada e k' é uma constante da equação.

O conceito de teor de umidade da monocamada (X_m), tem sido bastante estudado em alimentos, devido à sua relação com a estabilidade química e física de alimentos desidratados.

2. Equação de Halsey (1948): foi desenvolvida supondo-se que, a condensação ocorre em multicamadas, assumindo que o potencial de energia da molécula varia inversamente com uma distância (r) da superfície, resultando na seguinte equação:

$$a_w = \exp \left(\frac{-A}{RT\theta^r} \right) \quad (\text{Eq.18})$$

onde A e r são parâmetros da equação

$$\theta = X_m/X$$

Para Halsey, o valor do parâmetro r está relacionado com a interação solvente-adsorvido.

IGLESIAS e CHIRIFE (1976b) reconheceram que o uso do termo RT não eliminava a dependência de A e r com a temperatura, simplificando a equação de Halsey, tornando-a:

$$a_w = \exp \left(-\frac{S}{X^r} \right) \quad (\text{Eq.19})$$

onde S e r são parâmetros da equação.

3. Equação de Oswin (1946): este modelo é baseado na expansão de uma série matemática para curvas sigmoidais, aplicadas para isotermas:

$$X = m \left(\frac{a_w}{1-a_w} \right)^n \quad (\text{Eq.20})$$

onde m e n são constantes da equação, sem nenhum significado físico.

4. Equação de Henderson (1952): trata-se de uma equação desenvolvida empiricamente, bastante aplicada para alimentos:

$$1-a_w = \exp \left(-B T (100X)^c \right) \quad (\text{Eq.21})$$

onde B e c são constantes

T = temperatura absoluta, expressa em Kelvin (K)

5. Equação de GAB (Guggenheim-Anderson-De Boer): é um modelo de três parâmetros, fisicamente significativos, que tem sido sugerida como o modelo matemático mais versátil para a sorção de alimentos. É expressa da seguinte forma:

$$X = \frac{X_m C K a_w}{(1-K a_w) (1-K a_w + C K a_w)} \quad (\text{Eq. 22})$$

onde C = constante de Guggenheim

$$C = c \exp \left(\frac{(H_m - H_n)}{RT} \right) \quad (\text{Eq.23})$$

onde H_m = calor total de sorção da primeira camada

H_n = calor total de sorção das multicamadas

c = constante da equação

K = constante da equação

$$K = k \exp \left(\frac{(H_l - H_n)}{RT} \right) \quad (\text{Eq.24})$$

onde H_l = calor de condensação da água pura

X_m = teor de umidade correspondente à saturação de todos os sítios de adsorção primários por uma molécula de água.

As vantagens encontradas para esta equação são a viabilidade de conhecimentos teóricos; a descrição da sorção abrangendo uma faixa de atividade de água entre 0.1 e 0.9; a forma matemática simples, com parâmetros que possuem significado físico; e a capacidade de descrever alguns efeitos da temperatura.

6. Equação de Aguerre, Suaréz e Viollaz (1976): consiste em uma equação semi-empírica, que fornece uma formulação matemática da dependência da temperatura nas isotermas de sorção

$$\ln a_w = - \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_\beta} \right) K_1 K_2^{(X)} \quad (\text{Eq.25})$$

onde K_1 e K_2 são constantes independentes de T, sendo característica do produto, T = temperatura absoluta (K), T_β = temperatura, calculada baseando-se no efeito da entalpia-entropia.

Esta equação foi testada por Aguerre *et al.* (1986) com arroz, obtendo resultados satisfatórios. Em seguida, estendeu-se esta proposta utilizando-a, com sucesso em outras variedades de produtos alimentícios, tais como farinha de trigo, amido, amêndoas, milho, sorgo e outros. TOLABA e SUARÉZ (1995) modificaram a equação de Aguerre, testando com milho, arroz e trigo, aumentando o número de parâmetros, sendo expressa da seguinte forma:

$$\ln a_w = - \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_\beta} \right) K_1 \left(K_2^{(X/m_o)} \right) \quad (\text{Eq.26})$$

onde os parâmetros são T_β , K_1 , K_2 e m_o

m_o = teor de umidade arbitrário

Segundo JOWITT *et al.* (1983), o modelo GAB pode ser considerado uma extensão do BET multimolecular para produtos de adsorção homogênea. OGIHARA (1989), construiu as isotermas de adsorção para o milho doce Nutrimaiz no estado de milho verde correlacionadas por GAB. LABUZA *et al.* (1985) aplicaram a equação proposta por GAB e BET para a farinha de milho, concluindo a vantagem do modelo GAB sobre o do BET, concluindo que o modelo GAB apresenta melhores resultados para modelar isotermas de sorção na faixa de valores de atividade de água até 0.9, enquanto BET limita-se à faixa de 0.45 à 0.50 de atividade de água. ANDRIEU *et al.* (1986) obtiveram o melhor ajuste para a isoterma de dessorção de pasta de milho através da equação de GAB, seguida de Oswin.

Um estudo realizado por BOQUET *et al.* (1978), avaliando as várias equações propostas para a construção de isotermas de diferentes tipos de alimentos, conclui que a equação de Oswin, seguida da Henderson e Halsey são as que melhor representam os alimentos que contém amido. A equação de Henderson ofereceu bons resultados no estudo de isotermas de sorção para milho e sorgo, realizado por SOPADE e AJISEGIRI (1994), como também para a adsorção de amido, obtida por BOKI e OHNO (1991).

2.4.3 - Calor Isostérico de Sorção

O calor isostérico de sorção (Q_{st}) é um parâmetro termodinâmico, geralmente obtido à partir de dados de sorção, e representa a diferença entre a entalpia da água na fase vapor e a entalpia parcial da água líquida adsorvida no sólido, à uma dada concentração, ou seja, representa a quantidade de energia necessária para evaporar a água adsorvida na fase sólida. Seu valor é frequentemente calculado através da Equação de Clausius-Clapeyron, que relaciona a mudança da atividade de água com a temperatura:

$$\left. \frac{\partial \ln (p/p_0)}{\partial (1/T)} \right|_X = \left. \frac{\partial \ln (a_w)}{\partial (1/T)} \right|_X = - \frac{Q_{st} - \Delta H_{vap}}{R} \quad (\text{Eq.27})$$

onde R é a constante universal dos gases, T , a temperatura absoluta e p a pressão de equilíbrio.

Subtraindo a relação correspondente para o vapor da água pura no equilíbrio, à mesma temperatura, tem-se:

$$\left. \frac{\partial (\ln p)}{\partial (1/T)} \right|_X - \left. \frac{\partial (\ln p_0)}{\partial (1/T)} \right|_X = - \frac{Q_{st} - \Delta H_{vap}}{R} \left. \frac{\partial (1/T)}{\partial (1/T)} \right|_X \quad (\text{Eq.28})$$

onde ΔH_{vap} é o calor de vaporização da água pura. Integrando esta equação entre as temperaturas T_1 e T_2 , respectivamente:

$$\ln \left(\frac{a_{w2}}{a_{w1}} \right) \Big|_X = - \frac{q_{st}}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (\text{Eq.29})$$

onde q_{st} é o excesso de calor de sorção, ou seja,

$$q_{st} = Q_{st} - \Delta H_{vap}$$

Para estimar q_{st} com precisão é necessário construir isotermas de sorção à diversas temperaturas, na faixa de interesse, sendo necessárias, no mínimo, duas temperaturas diferentes. Isto se deve as considerações que são feitas na aplicação da equação de Clausius-Clapeyron. Primeiro, o calor de vaporização da água pura (ΔH_{vap}) e o excesso de calor de sorção (q_{st}) não devem variar com a temperatura e segundo, a equação é aplicada apenas quando o teor de umidade do sistema permanece constante. Para o caso de alimentos, que são sistemas complexos, deve-se ressaltar que algumas mudanças irreversíveis podem ocorrer nas propriedades da água do sistema, especialmente quando se trabalha com extrapolação para temperaturas muito altas (LABUZA *et al.*, 1985).

Segundo IGLESIAS e CHIRIFE (1976), a determinação deste parâmetro tem-se mostrado importante no que diz respeito à informação sobre o processo energético da sorção de água em alimentos. Para TOLABA e SUARÉZ (1995), o conhecimento da dependência do calor de sorção em função do teor de umidade, é essencial em estudos de secagem e armazenamento de cereais, pois serve para estimar as necessidades energéticas do processo de secagem, além de fornecer dados sobre o estado da água no produto.

Quando os dados são plotados, em escala semi-logarítmica, a atividade de água versus o inverso da temperatura absoluta, obtém-se, em geral, uma reta, para cada condição de umidade da amostra, aonde o coeficiente angular corresponde à $-q_{st}/R$. A tendência das retas isostéricas a configurarem uma ligeira forma curvilínea, indica uma baixa dependência do excesso de calor isostérico com a temperatura (FALABELLA *et al.*, 1989).

DURAL e HINES (1993) descreveram como um outro motivo importante para o cálculo do calor isostérico de sorção, a caracterização da natureza da superfície adsorvente. Para superfícies energeticamente uniformes, espera-se que as curvas de calor apresentem uma linha reta com coeficiente angular próximo à zero na região da monocamada, representando o calor de adsorção na primeira camada. Em regiões de multicamadas, ocorre um decréscimo suave na inclinação das curvas, dependendo da resistência do campo de energia de adsorção. Se o campo de energia é grande, o calor de adsorção da segunda camada deverá ser maior, e assim por diante. Contudo, para as forças de interação menores, a influência da superfície nas multicamadas deverá ser menor. Assim, o calor isostérico de adsorção de multicamadas deverá ser quase constante e igual ao calor de condensação. Para uma superfície energeticamente não uniforme, os sítios com diferentes potenciais de adsorção é que induzem à variação do q_{st} de adsorção à diferentes intensidades, até mesmo na região de multicamadas. Em tais superfícies, a adsorção ocorre inicialmente nos sítios menos ativos, liberando uma menor quantidade de calor. Portanto, os gráficos de q_{st} de adsorção a diferentes conteúdos de sorvido, geralmente mostra um declive inicial na região da monocamada, seguindo de um decréscimo suave nas multicamadas formadas, e finalmente, estabiliza-se. Tais curvas são as melhores indicações da heterogeneidade da superfície. Ou seja, no caso de sorção de água, verifica-se uma queda do calor de sorção em função da umidade sorvida.

SOPADE e AJISEGIRI (1994) utilizaram uma equação exponencial para descrever a relação entre o calor de sorção e o teor de umidade para o caso de milho normal, tanto para a adsorção, como para a dessorção, expressa da seguinte forma:

$$q_{st} = A \exp(B X) \quad (\text{Eq.30})$$

onde A e B são parâmetros da equação e X corresponde ao teor de umidade, expresso em base seca.

TOLABA e SUARÉZ (1995) obtiveram uma equação para prever o excesso de calor de sorção isostérico em função da umidade do grão, utilizando um modelo de equilíbrio com três parâmetros, que predizem o efeito da temperatura nas propriedades de sorção. Para calcular o q_{st} , foi feita uma derivação da equação de Aguerre *et al.* (1986) (Eq. 25), em relação ao inverso da temperatura, e este resultado é substituído na equação de Clausius-Clapeyron, obtendo-se:

$$q_{st} = R \, k_1 \, k_2^{(X/m_0)} \quad \text{(Eq.31)}$$

onde k_1 , k_2 e m_0 são constantes da equação, R é a constante universal dos gases e X é o teor de umidade, expresso em base seca. Esta equação foi aplicada para arroz, milho e trigo. Para fins comparativos, foram graficados os valores de q_{st} obtidos junto com outros publicados na literatura, verificando-se que os valores preditos concordam aceitavelmente com os encontrados na literatura.

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - Matéria-Prima

A matéria-prima utilizada foi o milho Superdoce do tipo amarelo, cultivar Colorado DO-0₃, fornecido pela Sercon Serviços e Consultoria Ltda., situada em Uberlândia-MG, que presta serviços para fazendas produtoras de milho. O ponto de colheita foi determinado pelo tempo de cultivo (aproximadamente 100 dias), sendo colhido no mês de junho e pelo estágio de maturidade de seus grãos denominado estágio leitoso.

O preparo da matéria-prima foi feito na indústria De Marchi Supergelados, situada em Jundiaí-SP. As espigas foram despalhadas e branqueadas em tanques com água fervente (100°C) por 4 minutos, a fim de inativar as enzimas, desnaturar outras proteínas e gelificar os polissacarídeos. As espigas foram resfriadas e os grãos foram cortados com facas, tentando simular os cortadores automáticos de indústrias processadoras de milho. Os grãos foram colocados em bandejas para serem congelados em câmara frigorífica à uma temperatura igual à -35°C, num período de 6 horas. Em seguida, as amostras foram condicionadas em sacos plásticos e, então conservadas em câmara frigorífica à temperatura de -20°C.

Para o descongelamento, as amostras foram colocadas em sacos plásticos pequenos e submetidas à água corrente de torneira, por um período de trinta minutos. Este é um procedimento adaptado ao que a indústria de enlatamento do milho superdoce efetua.

Com o objetivo de padronizar os grãos de milho superdoce, após o descongelamento, efetuava-se uma peneiragem manual, utilizando a peneira com abertura igual a 9.52 mm. Em seguida, selecionavam-se os grãos, desprezando os que apresentavam-se muito cortados.

3.2 - Caracterização do Milho Superdoce

Uma série de análises físicas e físico-químicas foram realizadas, a fim de avaliar a composição e características da matéria-prima. As análises foram baseadas em estudos anteriores com milho, e adaptadas para as características das amostras.

Determinou-se a composição centesimal dos principais constituintes do milho superdoce como, amido, açúcares redutores e totais, proteínas, fibras, lipídios e cinzas. As metodologias empregadas estão desenvolvidas de uma forma geral a seguir:

3.2.1- Composição centesimal:

Efetuados por métodos padronizados:

- Amido

Método de Ewers modificado por Handorn e Doewelear (ANGELUCCI *et al.*, 1987). Consiste na solubilização de certa quantidade de amido (conhecida) em solução, e determina-se a rotação óptica do amido e açúcares presentes, utilizando um polarímetro Polax Atago nº 21813 Japan. Numa segunda amostra o amido é precipitado, e os açúcares restantes são hidrolisados e o desvio da solução é determinado. A soma algébrica dos desvios multiplicada por um fator corresponde à % amido na amostra.

- Fibras

Ainda é difícil determinar um método adequado para a quantificação e caracterização das fibras dietéticas. Estas são constituintes do alimento resistentes à ação hidrolítica das enzimas digestivas, sendo explicado pela sua estrutura ou por alguma modificação física ou química sofrida. Dentre os existentes optou-se pelo Método Enzimático, que consiste em determinar fibras dietéticas solúveis e insolúveis, baseando-se no resíduo da digestão enzimática (ASP *et al.*, 1983).

- Açúcares redutores e totais

Método A.O.A.C.. (13º ed., 1978) - Método Lane e Eynon.

Açúcares redutores: consiste em reduzir o cobre, presente na solução de Fehling, em solução cúprica, através de substâncias redutoras, constituídas principalmente por glicose e frutose, sendo, então quantificadas e calculadas como açúcares invertidos. A quantidade de açúcares redutores será expressa por porcentagem de glicose.

Açúcares totais: consiste em somar a quantidade de sacarose com a de açúcares redutores presentes na amostra.

- Proteínas

Método de Kjeldahl - Método A.O.A.C. (13° ed., 1978): as proteínas são determinadas pela quantidade de nitrogênio total da amostra. O método baseia-se no princípio que proteínas e compostos nitrogenados são decompostos na presença de H_2SO_4 concentrado à quente, produzindo sulfato de amônia. Este, em presença de solução de hidróxido de sódio libera NH_3 , que é recebido na solução de ácido bórico. Da titulação desta última solução com HCl (normalidade conhecida) determina-se o teor de nitrogênio na amostra. E para cálculo da proteína bruta, basta multiplicar o resultado pelo fator geral (6.25) ou específico.

- Cinzas

Método A.O.A.C. (13° ed., 1978). Em alimentos, as cinzas são os resíduos inorgânicos remanescentes da queima da matéria orgânica, sem resíduos de carvão. O perfil da cinza pode ser considerado como medida geral de qualidade e frequentemente é utilizado como critério na identificação de alimentos. O método fundamenta-se na perda de peso que ocorre quando o produto é incinerado, em uma mufla, à $525^{\circ}C$, com destruição da matéria orgânica, sem apreciável decomposição dos constituintes do resíduo mineral ou perda por volatilização (ANGELUCCI *et al.*, 1987).

- Lipídios

Utilizou-se o método adaptado de BLIGH e DRYER (1959). Este método possui vantagens sobre outros mais tradicionais, no que diz respeito à extração de todas as classes de lipídios, não somente os de compostos neutros. A extração pode ser realizada sem aquecimento, e pode ser utilizada com produtos completamente secos ou com alto teor de umidade. Devido à facilidade de seus equipamentos, podem ser efetuadas inúmeras análises de uma única vez. O procedimento consiste em diluir os lipídios em clorofórmio, através de

uma solução homogênea de clorofórmio:metanol:água; em seguida, é feita a evaporação do solvente à temperatura de 100°C, restando apenas o peso de lipídios.

- **Conteúdo de Umidade**

Outra característica importante quantificada foi o teor de umidade nos grãos de milho superdoce. Foram efetuados ensaios sob a forma *in natura*, congelada e seca. O método baseou-se no método padronizado para cereais A.O.A.C.. (13° ed., 1978) adaptado para o caso particular do milho superdoce. Consistiu em pesar amostras (aproximadamente 3 gramas) em pesa-filtros, secando-as em estufa de convecção forçada por 24 horas, na temperatura de 60°C, em seguida foi colocada em estufa à vácuo por 12 horas, na temperatura de 70°C

Como característica física da amostra foi analisada a densidade do milho superdoce, através do Método de Areia, que consiste num método picnométrico, utilizando a areia como fluido picnométrico. Foi feita uma determinação prévia da densidade da areia, e em seguida a do grão em estudo.

3.3 - Isotermas de sorção

As isotermas de sorção foram determinadas por dois métodos, paralelamente:

- **Método Estático-Direto:** baseando-se no projeto COST 90 (JOWITT *et al.*, 1983)

O preparo das amostras de milho consistiu numa liofilização, onde, previamente os grãos foram seccionados ao meio, a fim de obter maior área de

transferência durante o processo. Utilizou-se o equipamento Hetosicc Freeze Dryer tipo FD3, num período de 12 horas, aonde a temperatura trabalhada foi de -54°C . Em seguida, conservaram-se as amostras em dessecador contendo P_2O_5 , por 7 dias, com o objetivo de garantir a retirada máxima de umidade.

As amostras foram distribuídas em 9 potes contendo soluções salinas saturadas com diferentes umidade relativas, pesando em média 3 à 4 g. Os potes foram acondicionados em banhos termostáticos ou estufa de convecção forçada para garantir a temperatura constante de trabalho, no caso, as temperaturas de 25° , 35° , 45° e 60°C . Uma vez atingido o equilíbrio, um período de aproximadamente 20 dias, determinou-se o teor de umidade das amostras em estufa de convecção forçada (60°C , por 24 horas), e em seguida em estufa à vácuo (70°C , por 12 horas).

A seleção das soluções salinas utilizadas foi baseada em estudos anteriores de determinação de isotermas de sorção de alimentos, visando abranger o maior intervalo de umidade relativa, sendo que são elas: hidróxido de sódio (NaOH), cloreto de lítio (LiCl), cloreto de magnésio (MgCl_2), carbonato de potássio (KCO_3), brometo de sódio (NaBr), cloreto de sódio (NaCl), cloreto de potássio (KCl), cloreto de bário (BaCl_2) e sulfato de cobre (CuSO_4).

- Método Estático-Indireto, baseado no estudo efetuado por CAPRISTE e ROTSTEIN (1982):

Os grãos de milho superdoce, previamente selecionados pelo tamanho e corte, foram submetidos à um processo de secagem em condições suaves. O equipamento utilizado foi um secador provido de uma bomba de calor, nas condições de temperatura do ar igual à 40°C , velocidade de 0.5 m/s e umidade relativa do ar reduzida para 30%; e o período do processo foi pré-determinado, totalizando em 4 horas.

Com o objetivo de obter amostras com diferentes teores de umidade, foram retiradas em intervalos de tempo previamente fixados (inicialmente 10 minutos, seguido de 20 minutos), e então foram acondicionadas em potes hermeticamente fechados.

Os potes eram colocados em geladeira, à 10°C, num período de 5 dias, a fim de equilibrar a umidade e temperatura das amostras. Posteriormente, mediram-se os valores da atividade de água, através de um sensor apropriado, no nosso caso, utilizou-se o equipamento Novasina Thermoconstanter Humidat Center, nas temperaturas de 25°, 35° e 45°C, e paralelamente, determinaram-se o teor de umidade das amostras, através do método padronizado para o milho superdoce, citado anteriormente, sendo que o resultado era a média entre 3 amostras.

3.4 - EQUIPAMENTO

3.4.1 - Descrição dos equipamentos

3.4.1.1 - Secador de bandejas com aquecimento elétrico

Utilizou-se um secador de bandejas, projetado e construído no Departamento de Engenharia de Alimentos, UNICAMP. Este equipamento já foi utilizado em várias pesquisas anteriores, tais como a desidratação de cebola (HUBINGER, 1984), secagem de fatias de cebolas (SILVA, 1985), secagem de proteínas texturizadas de soja (ROMERO, 1988), sendo suas características físicas:

- Cabine de secagem: consta de um corpo vertical de madeira compensada de 2 cm de espessura, de secção quadrada de 441 cm², de 2.2 m de altura, com oito compartimentos individuais para encaixe das bandejas. Cada compartimento tem uma porta de acesso à bandeja.

- Bandejas: feitas em alumínio, bitola 18, com 400 cm² de área e 10 cm de altura, com rebarbas de 1 cm nas extremidades superior e inferior, permitindo a sustentação no secador e garantindo a passagem do ar exclusivamente através do leito. O fundo da tela é confeccionado em aço inoxidável, com malha quadrada, com 1.2 mm de abertura.

- Ventilador: A alimentação do ar atmosférico é efetuada através do ventilador centrífugo da marca Asten, que está ligado à um motor trifásico assíncrono de 0.7HP, 3400 rpm e 60 Hz. A ligação do mesmo é feita através de tubos PVC com 10 cm de diâmetro interno e 2.5 m de comprimento. Na saída do ventilador há um controlador de vazão de gás. À tubulação da cabine, está ligado um cone invertido, para suavizar a expansão de ar.

- Sistema de aquecimento: o ar ambiente é aquecido eletricamente através de um sistema de resistências de fio Ni-Cr de resistividade 2.122 Ω /m, de 30 m de comprimento, cada uma enroladas em suportes de amianto. Três estão colocadas em paralelo com conexões independentes, e uma ligada em série com um transformador variável do tipo Variac, para efetuar o controle da temperatura do ar por um ajuste fino.

A cabine de madeira possui orifícios, permitindo a instalação de termopares antes e depois de cada bandeja, possibilitando a medida da temperatura do ar de entrada e saída de secagem.

3.4.1.2 - Secador de bandeja com bomba de calor

Um outro secador de bandejas, acoplado a uma bomba de calor, foi também utilizado, com a finalidade de diminuir a umidade relativa do ar de entrada no secador. Utilizou-se um secador de bandejas, provido de uma câmara de secagem (CS), acoplado à bomba de calor, com base num sistema de refrigeração por compressão de vapor, da qual é utilizado um fluido refrigerante R22, com compressor do tipo aberto, alternativo, um condensador a ar (CD) e um evaporador (EV), como mostra a Figura 3. Seu funcionamento consiste em: o ar ambiente é succionado através do evaporador, aonde ocorre a desumidificação, em seguida passa pelo condensador, ocorrendo a condensação do refrigerante, e o ar desumidificado é descarregado na câmara de secagem.

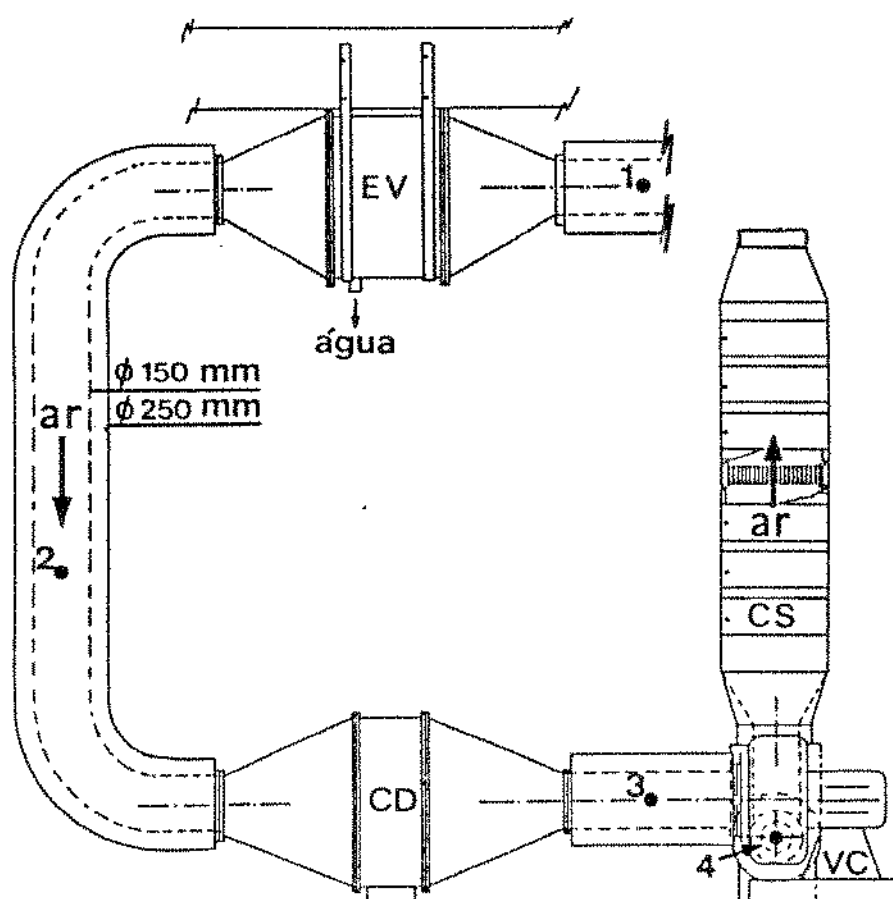


Figura 3: Esquema da bomba de calor acoplada à câmara de secagem.

Este equipamento foi construído e testado por ROSSI (1993), aonde efetuou a secagem de vários alimentos. Quanto às suas características físicas, basicamente são:

- Câmara de secagem (CS): foi construída com características idênticas ao secador de bandejas com resistência elétrica, acima exposto, no item 4.4.1.1 . Assim, as bandejas utilizadas anteriormente são as mesmas para este equipamento.

- Ventilador: é o responsável pela movimentação do ar, tem sua extremidade acoplada ao duto de saída do condensador, através de tubo PVC com 50 cm de comprimento (isolado por calhas de poliuretano). Sua carcaça é isolada com lã de vidro. Possui na saída uma válvula borboleta, para controle manual da vazão de ar. Consiste em um ventilador centrífugo da marca ASTEN, com motor trifásico de 0.75 CV.

- Condensador (CD): da marca RADIO-FRIGOR, modelo UC-210. Neste compartimento ocorre a condensação do fluido refrigerante, que sai do evaporador, sob a forma gasosa. Possui dutos cônicos acoplados em sua entrada e saída.

- Evaporador (EV): O ar ambiente é succionado neste compartimento, aonde ocorre a desumidificação do mesmo, possuindo uma abertura para a saída da água condensada. Dutos cônicos de madeira estão acoplados em sua entrada e saída, e está ligado à entrada do condensador através de tubo de PVC, isolado térmicamente.

- Tubulação do refrigerante: o refrigerante R22, fica armazenado na garrafa de líquido, que é um acessório do condensador. Possui linhas de ligação

com o evaporador, compressor e condensador, sendo que para todos, existem válvulas borboletas, para controle da vazão.

Para o caso da secagem do milho superdoce, foram instalados termopares apenas dentro da câmara de secagem, aonde media-se temperatura de bulbo seco e bulbo úmido.

3.4.2 - Condições de operação dos equipamentos

3.4.2.1 - Secador de bandejas com aquecimento elétrico

Um estudo preliminar foi realizado com milho superdoce, aonde variou-se a temperatura de secagem, num intervalo de 40° à 60°C (KAYA, 1995). Baseando-se nele, foi possível determinar algumas variáveis de operação.

O estudo de cinética de secagem foi efetuado em camada fina, portanto a espessura de camada do leito foi de aproximadamente de 1 cm. As variáveis de controle foram: a temperatura do ar de entrada (tendo esta fundamental importância, devido à presença dos açúcares), sendo trabalhada nos valores de 40°, 50° e 60°C; a velocidade do ar, num intervalo de 0.5 - 1.3 m/s, sendo que atingiu-se os seguintes valores, 1.28, 1.15, 0.87, 0.75 e 0.50 m/s; umidade do ar ambiente na faixa de 50 à 80% e o tempo de secagem foi estipulado até a obtenção de peso constante das amostras, variando para cada ensaio, ou melhor, para as diferentes condições de operação.

3.4.2.2 - Secador de bandeja com bomba de calor

Com o objetivo de analisar o efeito da umidade relativa do ar na cinética de secagem do milho superdoce, utilizou-se este outro secador, que provoca condições de umidade relativas do ar mais baixas. A temperatura máxima atingida por este equipamento é de 40°C, uma vez que foi construído com o intuito de minimizar o gasto energético. A velocidade máxima do ar é de 0.5 m/s.

Após várias tentativas, obteve-se o valor mínimo da umidade relativa do ar no intervalo de 25 à 30%, causando uma diminuição de aproximadamente 35 % da umidade relativa ambiente.

O tempo de secagem foi o mesmo estipulado acima, com o outro secador, ou seja, até a amostra atingir peso constante.

4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 - Caracterização Do Milho Superdoce

A caracterização química e física dos grãos de milho superdoce foi feita sob a forma *in natura* e após o congelamento e descongelamento, utilizando técnicas padronizadas e adaptadas para cereais descritas no item 3.2. Na Tabela 8, temos os resultados das análises, aonde todos os valores estão expressos em base seca. Na Tabela 9, comprova-se o alto teor de açúcar e baixo teor de amido, se comparado ao milho normal, que possui aproximadamente 3% de açúcares totais e 78% de amido. A análise foi feita logo após a colheita, pois um período acima de 4 dias após a data da colheita alteraria sua composição química, ou seja a sacarose presente, se transformaria em amido.

Tabela 8 - Composição centesimal aproximada (base seca) do milho superdoce *in natura* e congelado

	Proteína (%N x 6.25)	Lipídios (%)	Cinzas (%)	Fibras (%)	Carboidratos (diferença, %)
<i>in natura</i>	16.2	7.6	1.9	4.3	70.0
congelado	9.7	6.4	1.8	3.4	78.7

Tabela 9 - Amido e açúcares solúveis contidos no milho superdoce *in natura* e congelado (expressos em base seca)

	Açúcar redutor (%)	Açúcar total (%)	Amido (%)
<i>in natura</i>	3.6	27.5	21.6
congelado	1.9	24.6	21.1

Nas análises efetuadas com o milho superdoce *in natura*, os grãos apresentavam-se inteiros, pois foram debulhados manualmente, ao contrário do milho congelado, que possuía uma pequena parte do embrião seccionado, devido ao corte com faca. Assim, pode-se associar a alteração na composição de proteínas, lipídios à esse corte, pois é no embrião que se encontram a maior parte destes componentes. As composições de açúcares redutores e amido apresentaram uma pequena alteração, quase desprezível, explicando-se também através do corte, uma vez que os carboidratos armazenam-se no endosperma do grão de milho, sendo esta, uma parte pouco afetada. Quanto aos açúcares redutores, pode ocorrer uma perda na água de descongelamento.

Os dados experimentais obtidos (tabela 8 e 9) coincidem com os dados encontrados na literatura (tabela 1 e 2), permitindo assegurar que a preparação da matéria-prima preservou as características da mesma.

Estes dados confirmam o estudo realizado por HUSTRULID (1962) com milho normal, aonde concluiu que o uso de amostras congeladas ou não podem ser feito indistintamente. WATSON *et al.* (1979) pesquisaram o milho doce congelado, sem ressaltar as alterações dos resultados, devido à técnica utilizada como preservação. OGIHARA (1989) determinou uma diferença totalmente desprezível na taxa de secagem do milho doce Nutrimaiz para a forma congelada e *in natura*.

Segundo FANCELLI (1982), a colheita é uma das fases mais importantes do processo produtivo do milho, devendo ser bem planejada, aonde o momento da colheita pode ser determinado em função do teor de umidade dos grãos. No caso do milho superdoce, deve ser colhido no estágio leitoso, ou melhor, entre o 18º e 20º dia após a polinização, quando os grãos apresentam o máximo de umidade (70-75%). Assim, devido ao alto teor de umidade e também de açúcar, este tipo de milho tem uma tendência à deterioração rápida, com um prazo de no máximo 4 dias para a comercialização e processamento. Após este período, verifica-se uma pequena perda no teor de umidade, podendo ser indicado como um dos fatores da transformação do açúcar em amido. Foram feitos ensaios de umidade do milho superdoce *in natura*, após a colheita para verificar a perda de umidade durante o período de 6 dias, como mostra a Tabela 10.

Tabela 10 - Teor de umidade do milho superdoce *in natura*, após a data de colheita

Dias após a colheita	X_{bs} (kg/kgss)	X_{bu} (%)
1	2.3887	70.49
2	2.2883	69.57
4	2.2883	69.56
6	2.2791	69.21

X_{bs} - base seca; X_{bu} - base úmida

4.2 - Atividade De Água

4.2.1 - Construção das isotermas

4.2.1.1. - Método Direto - Projeto COST 90

As curvas de equilíbrio, ou isotermas de adsorção do milho superdoce, previamente liofilizado, foram determinadas através dos resultados obtidos pelo Método estático e direto, baseado no Projeto COST 90 (JOWITT *et al.*, 1983). Na representação gráfica, utilizaram-se valores padrões de atividade de água de soluções salinas saturadas (tabela 6) ou calculados através das equações de regressão, estudadas por LABUZA *et al.* (1985), (tabela 7). Quanto à umidade de equilíbrio atingida para cada temperatura (25°, 35°, 45°, 60°C) é o resultado da média entre 3 amostras, sendo que os dados estão apresentados na Tabela 11.

A baixas temperaturas, as amostras que eram mantidas em soluções salinas saturadas com alto teor de umidade tendiam a deteriorar-se, antes de atingir o equilíbrio, apesar do uso de anti-fungicida. A presença de um alto teor de açúcar em sua composição combinado a umidades relativas do ar altas, favorecem a rápida deterioração.

Foram selecionados alguns modelos matemáticos para ajustar os valores experimentais de equilíbrio do milho superdoce à diversas temperaturas, baseando-se em estudos anteriores com milho ou alimentos que contém açúcar e amido, sendo eles: equação de BET (Eq. 16); equação de Halsey modificada (Eq. 19); equação de Oswin (Eq. 20); equação de Henderson (Eq. 21); equação de GAB (Eq. 22) e equação de Aguerre, Suaréz e Viollaz (Eq. 26).

Tabela 11 - Teor de umidade de equilíbrio, em base seca (X_{bs} , kga/kgss) do milho superdoce e seus respectivos valores de atividade de água (a_w) para diferentes temperaturas, obtidas pelo Método Estático-Projeto COST 90

Solução	T=25°C		T=35°C		T=45°C		T=60°C	
Salina	a_w	X_{bs}	a_w	X_{bs}	a_w	X_{bs}	a_w	X_{bs}
NaOH	0.0700	0.0436	0.0650	0.0293	0.0625	0.0161	0.0200	0.0116
LiCl	*	*	*	*	0.1030	0.0234	0.0958	0.0189
MgCl ₂	0.3290	0.0670	0.3238	0.0687	0.3090	0.0445	0.2955	0.0308
K ₂ CO ₃	0.4430	0.0813	0.4317	0.0838	0.4290	0.0606	0.4212	0.0357
NaBr	0.5770	0.1164	0.5603	0.0933	0.5093	0.0697	0.5048	0.0480
NaCl	0.7650	0.2085	*	*	0.7270	0.1655	0.7029	0.1352
KCl	0.8460	0.3851	0.8362	0.2996	0.7860	0.2131	**	**
BaCl ₂	0.9019	**	0.8980	**	0.8823	0.3359	0.8980	0.4286
CuSO ₄	0.9370	**	0.9700	**	**	**	0.9700	0.5291

*- amostras perdidas; ** -amostras deterioradas

Os ajustes foram efetuados com o auxílio de um software estatístico Statistica version 5.0 (1995), utilizando o segmento de regressão não-linear. A avaliação dos melhores ajustes foi feita através de coeficientes de correlação (R) e das porcentagens de confiança (P), calculados pelo programa, para cada equação acima citada, e para cada condição trabalhada. Estes valores podem ser observados na Tabela 12, e os gráficos estão apresentados no Apêndice A, item A.1.1.

A partir destes resultados, conclui-se que o melhor modelo para os dados experimentais em questão é a Equação de GAB, seguida da de Oswin, Halsey, BET e Henderson, respectivamente. Assim, existe uma relação com o estudo de OGIHARA (1989) para milho doce Nutrimaiz, que também concluiu que a Equação de GAB, seguida da de Halsey, ofereciam melhores ajustes, e também

para o de BOQUET *et al.* (1978), que definiram para alimentos que contém amido, a Equação de Oswin, podendo também considerar Henderson e Halsey como bons ajustes. ANDRIEU *et al.* (1986) concluíram que a equação de GAB seguida de Oswin ajustaram bem para isotermas de dessorção de pasta de milho. A Figura 4 compara o ajuste dos modelos selecionados à isoterma de adsorção à 45°C.

Tabela 12 - Valores do coeficientes de correlação (R) e da porcentagem de confiança (P) obtidos através do ajuste dos modelos matemáticos para as isotermas de adsorção do milho superdoce, à diferentes temperaturas

T (°C)	MODELO	R	P (%)
25	GAB	0.99908	99.816
	Oswin	0.98244	96.519
	Halsey	0.99128	98.263
	BET	0.98836	97.686
	Henderson	0.94884	90.029
35	GAB	0.98185	96.403
	Oswin	0.98140	96.315
	Halsey	0.97920	95.884
	BET	0.97013	94.116
	Henderson	0.97933	95.908
45	GAB	0.99936	99.774
	Oswin	0.99802	99.605
	Halsey	0.99562	99.127
	BET	0.99344	98.692
	Henderson	0.98344	96.716
60	GAB	0.99804	99.638
	Oswin	0.99711	99.620
	Halsey	0.99549	99.099
	BET	0.99507	98.900
	Henderson	0.93236	86.981

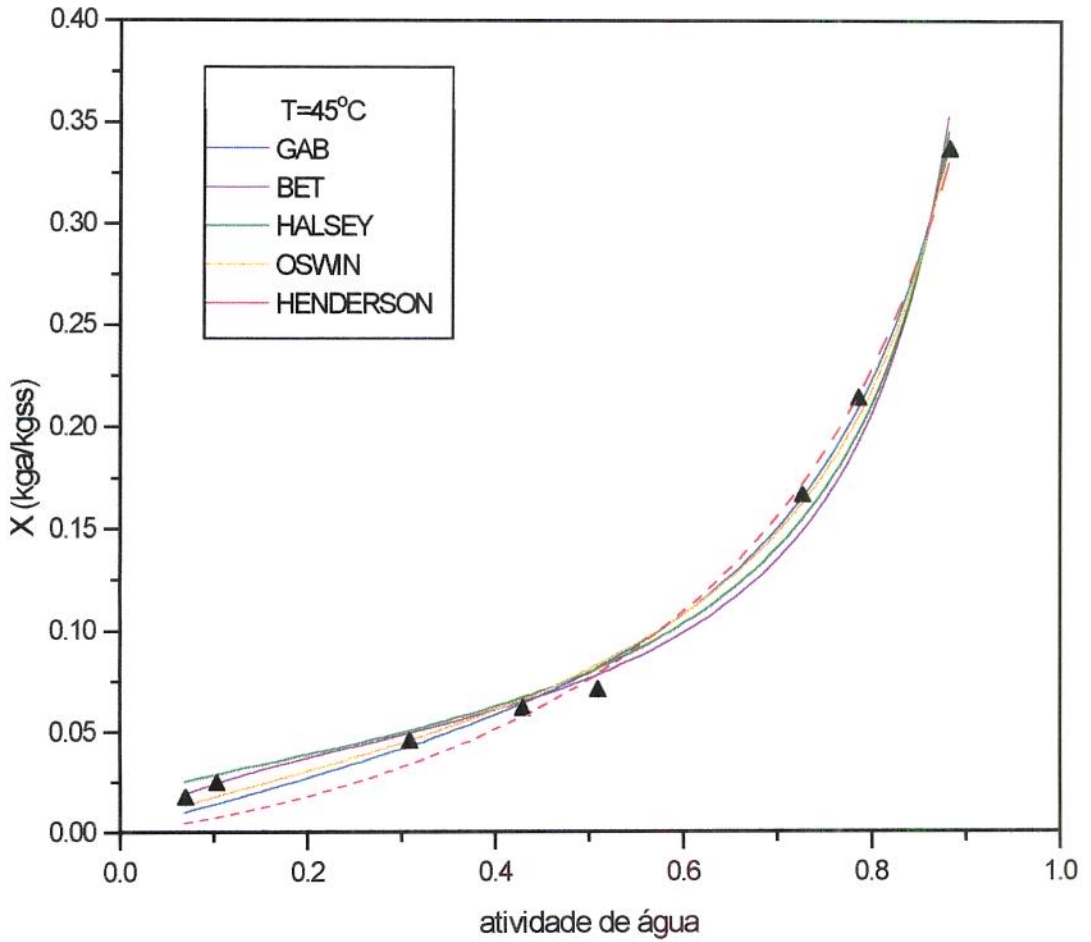


Figura 4: Isoterma de adsorção do milho superdoce na temperatura de 45°C, ajustada por diferentes modelos matemáticos.

Analisando a Figura 4, pode-se observar que a Equação de Oswin é a que mais se aproxima da Equação de GAB, e no intervalo de atividade de água entre 0.5 e 0.7, as duas coincidem, sendo que nas extremidades a diferença é pequena.

Os valores dos parâmetros (X_m , C e K) da Equação de GAB, calculados pelo programa estatístico, podem ser observados na Tabela 13.

Tabela 13 - Parâmetros (X_m , C e K) da Equação de GAB calculados pelo ajuste das isotermas de adsorção do milho superdoce à diferentes condições de temperatura.

T (°C)	X_m	C	K
25	0.042649	2015.908	1.050475
35	0.066834	5.762170	0.904495
45	0.156047	0.552948	0.817855
60	1.657167	0.029500	0.804167

Os valores da monocamada, X_m , aumentam com o aumento da temperatura, ao contrário da constante de Guggenheim, C e do fator de correção, K , que diminuem. O mesmo resultado foi obtido por ANDRIEU *et al.* (1986) para pasta de milho, no que diz respeito à proporção de X_m e a temperatura. SOPADE e AJISEGIRI (1994) mostraram que o valor de X_m do milho é o parâmetro que possui maior sensibilidade à temperatura, dentre os grãos de cereais que estudaram. Para a isoterma de adsorção do milho doce Nutrimaiz, construída por OGIHARA (1989), os valores de X_m encontrados foram bem maiores se comparado aos obtidos para o milho superdoce. A Figura 5 apresenta as curvas de isotermas de adsorção obtidas a diferentes temperaturas e ajustadas pela Equação de GAB.

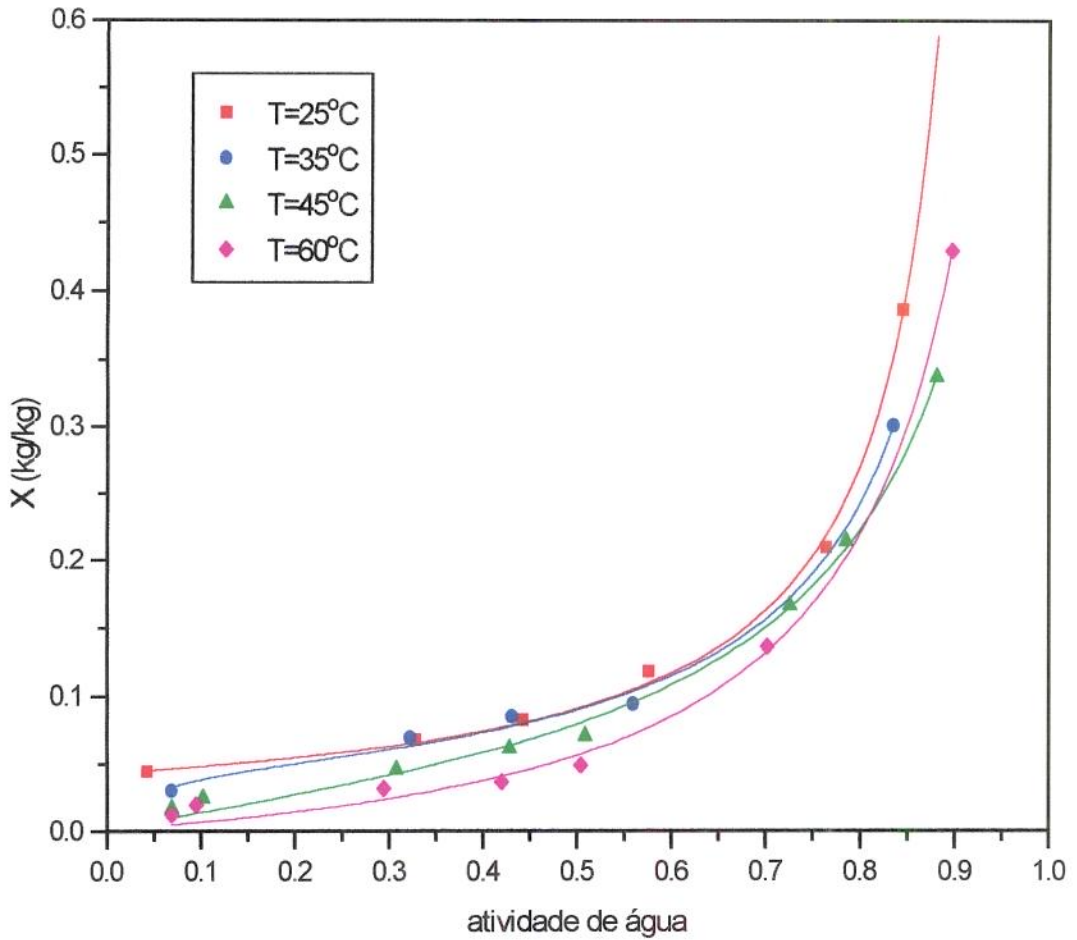


Figura 5: Isotermas de adsorção do milho superdoce, à diferentes temperaturas, ajustadas pela Equação de GAB.

Observa-se o efeito da temperatura nas isotermas de adsorção, através da Figura 5, mostrando o aparecimento de duas regiões. Para valores de atividade de água menores que 0.80, o efeito da temperatura é o esperado pela teoria de adsorção, ou seja, a quantidade de água adsorvida aumenta à uma dada umidade relativa, com o decréscimo da temperatura. Para valores superiores a 0.80, ocorre uma inversão na curva de equilíbrio à 60°C. Isto pode

ser explicado, segundo LONCIN et al. (1968), citado por MAZZA e LEMAGUER (1978), pela contribuição dos açúcares, presentes no milho superdoce, que apresentam curvas de equilíbrio com este mesmo comportamento. Resultados semelhantes foram obtidos por MAZZA e LEMAGUER (1978) para isotermas de adsorção de cebolas “Yellow Globe”; por SILVA (1985) com cebolas “Baia Periforme”, e por IGLESIAS et al. (1976) para isotermas de adsorção de beterrabas. Todos são produtos com alto teor de açúcares em sua composição.

À título de comparação, a Equação de Oswin foi a que também apresentou bons resultados para o ajuste, assim seus parâmetros calculados encontram-se na Tabela 14, e para os demais modelos trabalhados, os dados e gráficos obtidos estão apresentados no Apêndice A, itens A.1 e A.2.

Tabela 14 - Parâmetros (m, n) da Equação de Oswin, calculados pelo ajuste das isotermas de adsorção do milho superdoce à diferentes condições de temperatura.

T(°C)	m	n
25	0.091033	0.820823
35	0.100588	0.584210
45	0.079889	0.719031
60	0.062500	0.885000

Nota-se uma diminuição da constante m da Equação de Oswin, com o aumento da temperatura. Isto contraria o resultado obtido por OGIHARA (1989) para milho doce Nutrimaiz. Quanto à constante n, não observa-se uma proporcionalidade com a temperatura, indicando apenas uma reversão dos valores com a mesma. A Figura 6 mostra as curvas de adsorção, nas diferentes temperaturas, ajustadas pela Equação de Oswin. Pode-se observar que o

ajuste não foi muito eficiente para valores de atividade de água aproximadamente igual à 0.1, aonde as curvas tendem a coincidir.

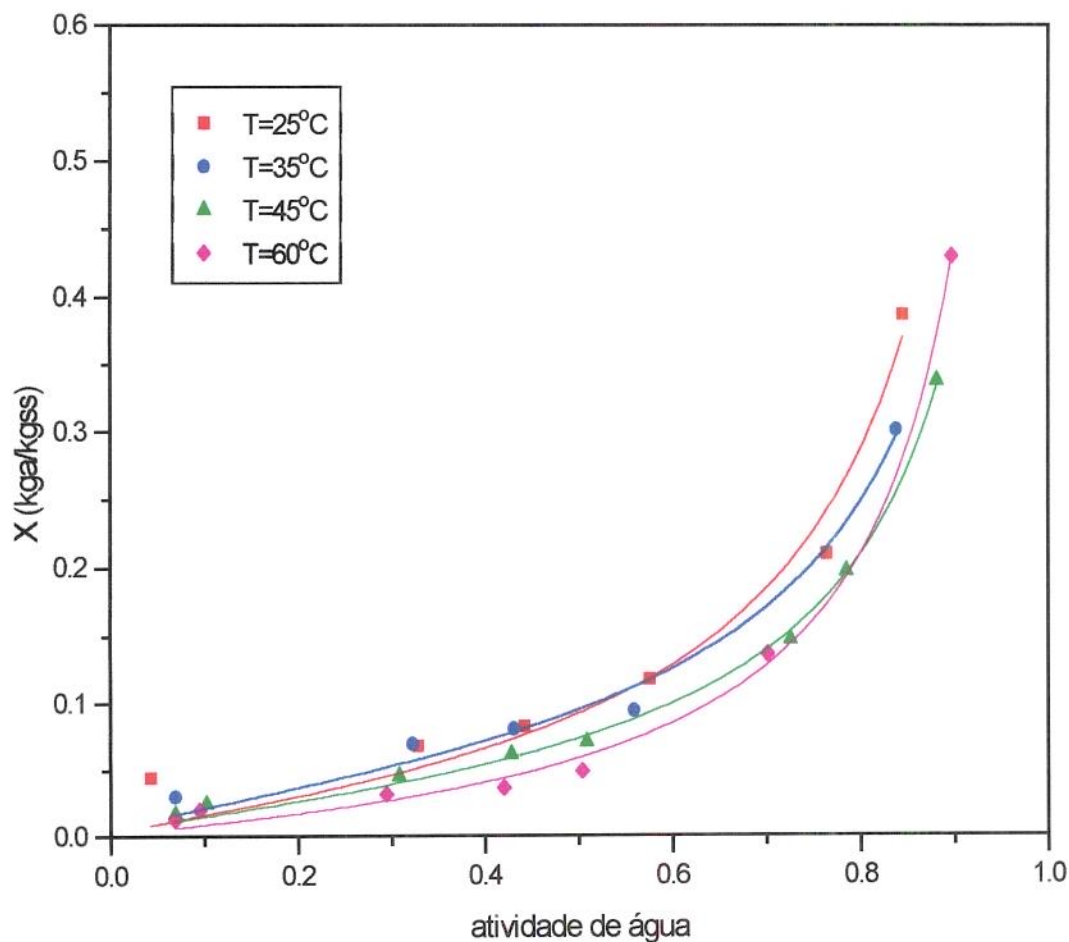


Figura 6: Isotermas de adsorção do milho superdoce, à diferentes temperaturas, ajustadas pela a Equação de Oswin.

Segundo a classificação de Brunaer, pode-se considerar as isotermas do milho superdoce do tipo III, concordando com a afirmação de RIZVI (1986), que diz que alimentos ricos em sólidos solúveis, tal como açúcar, apresentam isotermas de adsorção deste tipo.

A equação de AGUERRE *et al.* (1986), foi proposta como um ajuste alternativo, com a finalidade de obter uma única equação matemática representando as isotermas de adsorção do milho superdoce, à diferentes temperaturas. A vantagem encontrada para esta equação, segundo AGUERRE *et al.* (1989) é que a dependência da temperatura aparece de forma mais simples e as constantes K_1 e K_2 dependem apenas do tipo de material.

Deve-se ressaltar que o ajuste efetuado, relaciona-se à todas as temperaturas trabalhadas, ou seja, 25°, 35° 45° e 60°C, e foram realizados através do software estatístico Statistica version 5.0. Os parâmetros, assim como, o coeficiente de correlação (R) e a porcentagem de confiança (P) estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Parâmetros e coeficientes de correlação do ajuste da Equação de Aguerre, para diferentes temperaturas

$T_p(K)$	K_1	K_2	X_o	R	P (%)
126.7734	29711.781	0.3951	0.0709	0.9489	90.034

Comparando-se os resultados obtidos, com os encontrados por TOLABA e SUARÉZ (1995) para milho normal, existe uma concordância. Para uma visualização do ajuste desta equação, construiu-se o gráfico, aplicando os parâmetros calculados, para cada condição de temperatura, como pode ser visto na Figura 7.

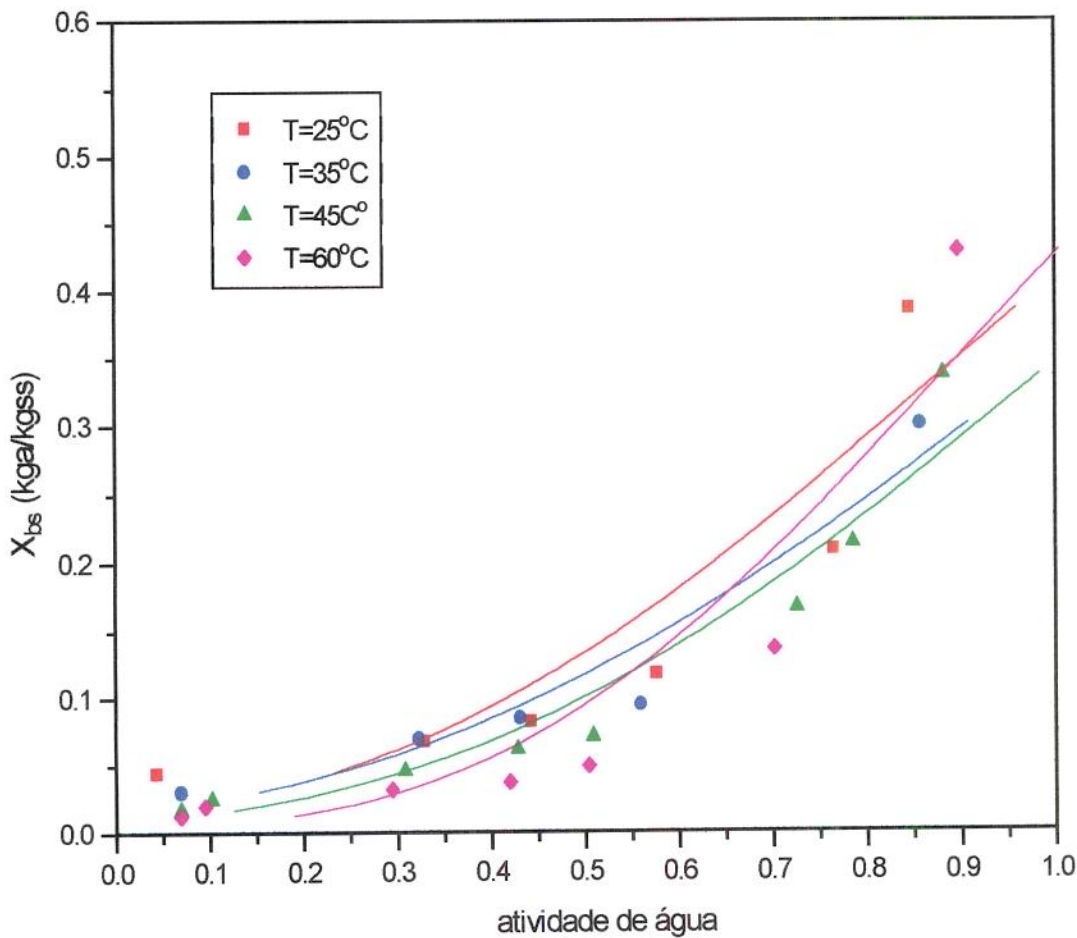


Figura 7: Isotermas de adsorção do milho superdoce, à diferentes temperaturas e ajustadas pela Equação de Aguerre (1986).

Apesar da equação de Aguerre não apresentar um bom ajuste, especialmente para altos valores de atividade de água e altas temperaturas, pode-se considerá-la como um modelo vantajoso, se comparado com os outros utilizados, no que diz respeito a facilidade em cálculos futuros e simulações, pois possui um menor número de constantes.

O Método Estático, baseando-se no Projeto COST 90, foi considerado eficiente, para adquirir dados experimentais à baixos valores de umidade relativa, no caso das isothermas de adsorção do milho superdoce, sendo que as amostras expostas em condições de alta umidade relativa, tendiam a uma deterioração rápida, sendo explicada pelo alto teor de açúcar presente.

4.2.1.1.1 - Calor de sorção isostérico

A partir das isothermas de adsorção construídas para o milho superdoce, através do método estático, e ajustadas pela Equação de GAB, determinou-se o excesso de calor de sorção isostérico (q_{st}) em função da umidade do grão (X). A finalidade deste estudo é analisar parâmetros energéticos da atividade de água na matéria-prima. Baseando-se no cálculo à partir dos dados de equilíbrio, utilizando a equação 28, determinaram-se os valores de q_{st} .

Foi feita uma regressão linear dos dados do logaritmo neperiano das atividades de água versus o inverso da temperatura, à diferentes umidades, como mostra a Figura 8; aonde o valor do calor de sorção corresponde ao coeficiente angular da cada reta, multiplicada pela constante universal dos gases ($R=0.46188$ kJ/kg).

Os resultados obtidos do calor de sorção, calculados do gráfico acima exposto, estão apresentados na Tabela 16. Para baixos teores de umidade, nota-se a influência da temperatura nas curvas isostéricas, ou seja, a atividade de água aumenta com o aumento da temperatura. Assim, para umidades acima de 0.10, o calor isostérico decresce, eventualmente à valores negativos, indicando segundo MYHARA *et al.* (1996) que ocorre uma interação mais fraca, entre absorbante e absorbato, tanto quanto na liberação do calor endotérmico de dissolução dos açúcares presentes, nas condições de alto teor de umidade.

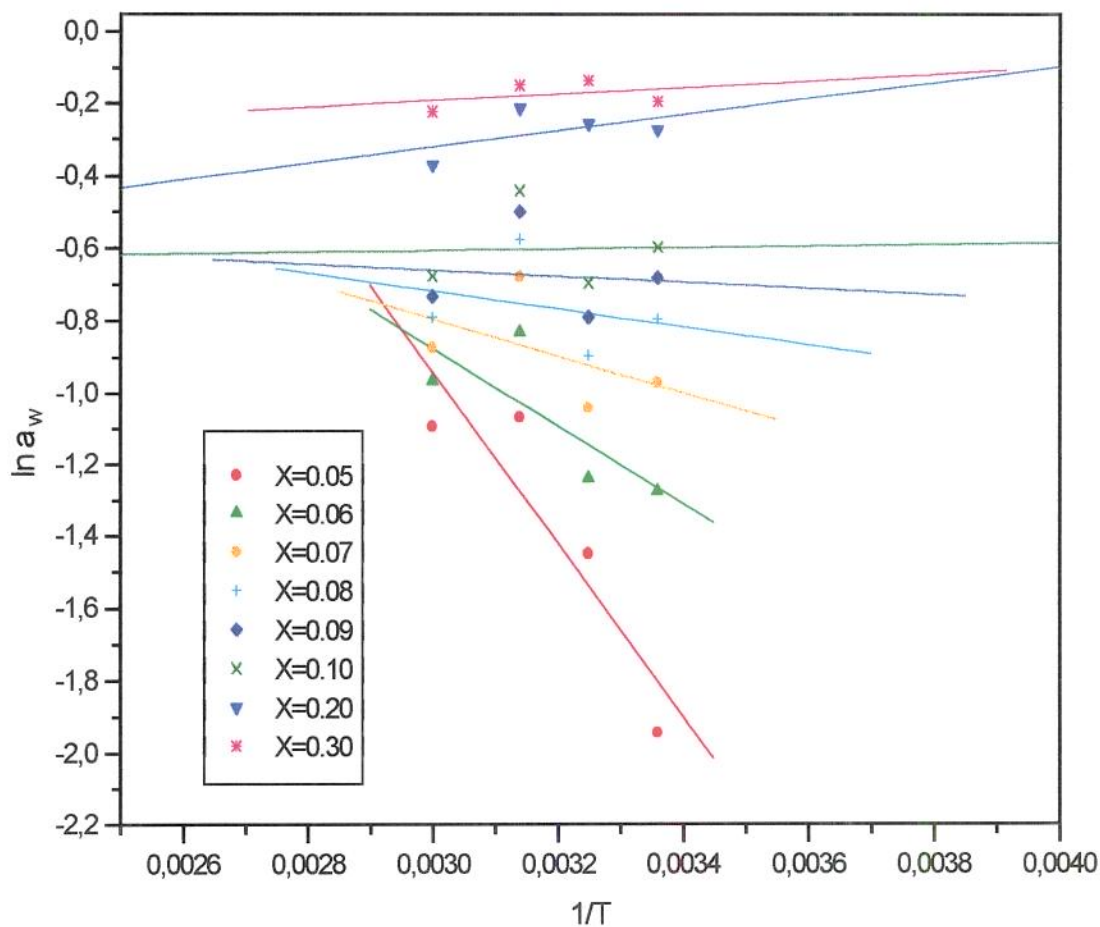


Figura 8: Relação entre a atividade de água e temperatura absoluta, baseada na Equação de Clausius-Clapeyron, para o milho superdoce.

O comportamento das curvas isotérmicas, indica que, o excesso de calor isotérmico (q_{st}) também depende da temperatura, o que segundo FALABELLA *et al.* (1989) procede, pois com a variação da temperatura, ocorrem mudanças no número ou natureza dos sítios de adsorção.

Tabela 16 - Valores calculados do calor de sorção do milho superdoce, para diferentes valores de umidade.

X (kga/kgss)	q_{st} (kJ/kg)
0.05	1103.19
0.06	499.04
0.07	235.39
0.08	114.53
0.09	39.45
0.10	-10.06
0.20	-30.25
0.30	-43.46

Os dados de q_{st} e X foram ajustados através de duas equações utilizadas para milho normal, uma exponencial, aplicada por SOPADE e AJISEGIRI (1994), equação 30, com parâmetros A e B, a outra, aplicada por TOLABA e SUARÉZ (1995), equação 31, com parâmetros k_1 , k_2 e m_o .

Os ajustes foram feitos com o auxílio de um software estatístico Statistica version 5.0, aonde foram calculados os parâmetros, o coeficiente de correlação (R) e a porcentagem de confiança (P). Estes dois últimos foram as determinantes para a escolha do melhor ajuste, tendo resultado a equação aplicada por TOLABA e SUARÉZ (1995), a que melhor ajustou os dados de calor isostérico de sorção, apesar dos coeficientes não apresentarem diferenças muito significativas, como pode-se verificar nas tabelas 17 e 18. Os gráficos de ajuste estão apresentados no Apêndice A, Item A.3.

Tabela 17 - Parâmetros (k_1 , k_2 e m_o), coeficiente de correlação (R) e porcentagem de confiança (P) do ajuste da Equação de TOLABA e SUARÉZ (1995) para os dados de q_{st} e X .

k_1	k_2	m_o	R	P (%)
122642.4	0.0344	0.0428	0.9982	99.628

Tabela 18 - Parâmetros (A e B), coeficiente de correlação (R) e porcentagem de confiança (P) do ajuste da Equação de SOPADE e AJISEGIRI (1994) para os dados de q_{st} e X .

A	B	R	P (%)
56510.95	-78.7233	0.9971	99.527

Através da Figura 9, pode-se analisar a relação entre o calor de sorção isostérico com a umidade, ajustado pela equação aplicada por TOLABA e SUARÉZ (1995). Observa-se que o calor de sorção para a adsorção decresce com o aumento da umidade, conferindo com o estudo realizado por SOPADE e AJISEGIRI (1994) com milho normal, aonde determinaram que quanto mais alto o teor de umidade, mais o calor isostérico se aproxima do calor latente da água pura na média das temperaturas.

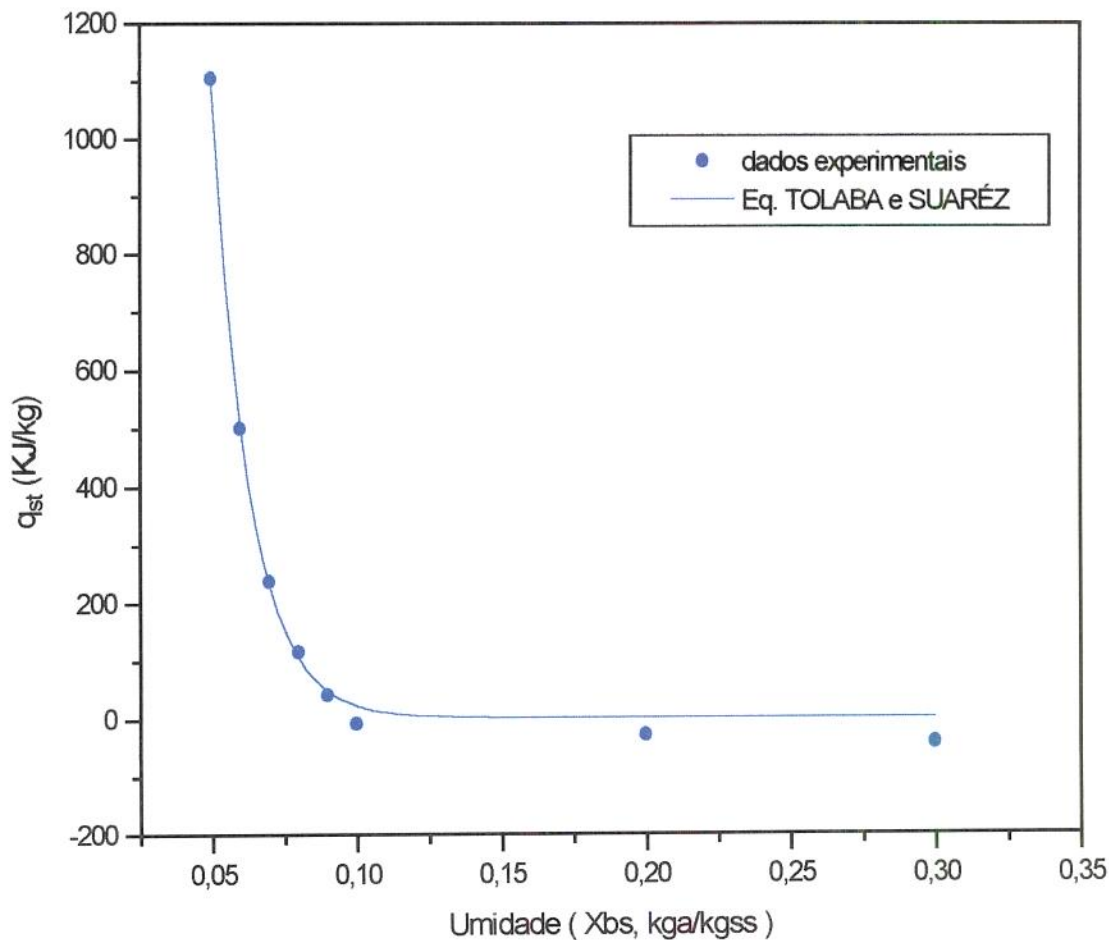


Figura 9: Influência da quantidade de umidade no calor de sorção do milho superdoce.

À partir deste gráfico, pode-se confirmar o estudo de IGLESIAS e CHIRIFE (1976a) sugeriram essa proporcionalidade inversa de q_{st} e X , é resultado da sorção ocorrendo inicialmente nos sítios disponíveis, mais ativos, sendo o ponto de maior interação de energia. Mas ao longo do processo, a disponibilidade de sítios ativos de sorção decresce.

Segundo DURAL e HINES (1993), pode-se concluir que a superfície do milho superdoce é energeticamente heterogênea, quando analisa-se a curva, pois apresenta um declive inicial, representando a região de monocamada, decrescendo suavemente, quando são formadas as multicamadas, até estabilizar-se.

4.2.1.1.2 - Extrapolação das isotermas

A extrapolação dos dados experimentais das isotermas de adsorção do milho superdoce, tornou-se necessária, uma vez que as condições do processo de secagem utilizadas nos experimentos do estudo da cinética, precisavam da determinação da umidade de equilíbrio, pois a utilização da umidade final ao invés da umidade de equilíbrio, no cálculo da umidade reduzida altera o comportamento da curva de secagem. Os ensaios de secagem foram efetuados nas temperaturas de 40°, 50° e 60°C. Assim, construíram-se as isotermas de 40° e 50°C, por extrapolação, baseando-se também na Equação de Clausius-Clapeyron, que relaciona a temperatura com a pressão de vapor, como mostra a Figura 8, apresentada no item anterior. Os cálculos encontram-se tabelados no Apêndice A (Item A.2). Os dados obtidos foram ajustados pela Equação de GAB, com o auxílio do programa Statistica version 5.0 (1995), originando os parâmetros (X_m , C e K), o coeficiente de correlação (R) e a porcentagem de confiança (P), como mostra a Tabela 19.

Estes resultados confirmam a afirmação acima exposta, no que diz respeito à relação entre os parâmetros da Equação de GAB e a temperatura. As curvas obtidas podem ser observadas na Figura 10.

Tabela 19 - Parâmetros (X_m , C e K), coeficiente de correlação (R), e porcentagem de confiança (P) ajustados pela Equação de GAB, à diferentes temperaturas

T (°C)	X_m	C	K	R	$P(\%)$
40	0.047671	11.81534	1.009636	0.99947	99.894
50	0.053646	4.686554	0.978305	0.99979	99.959

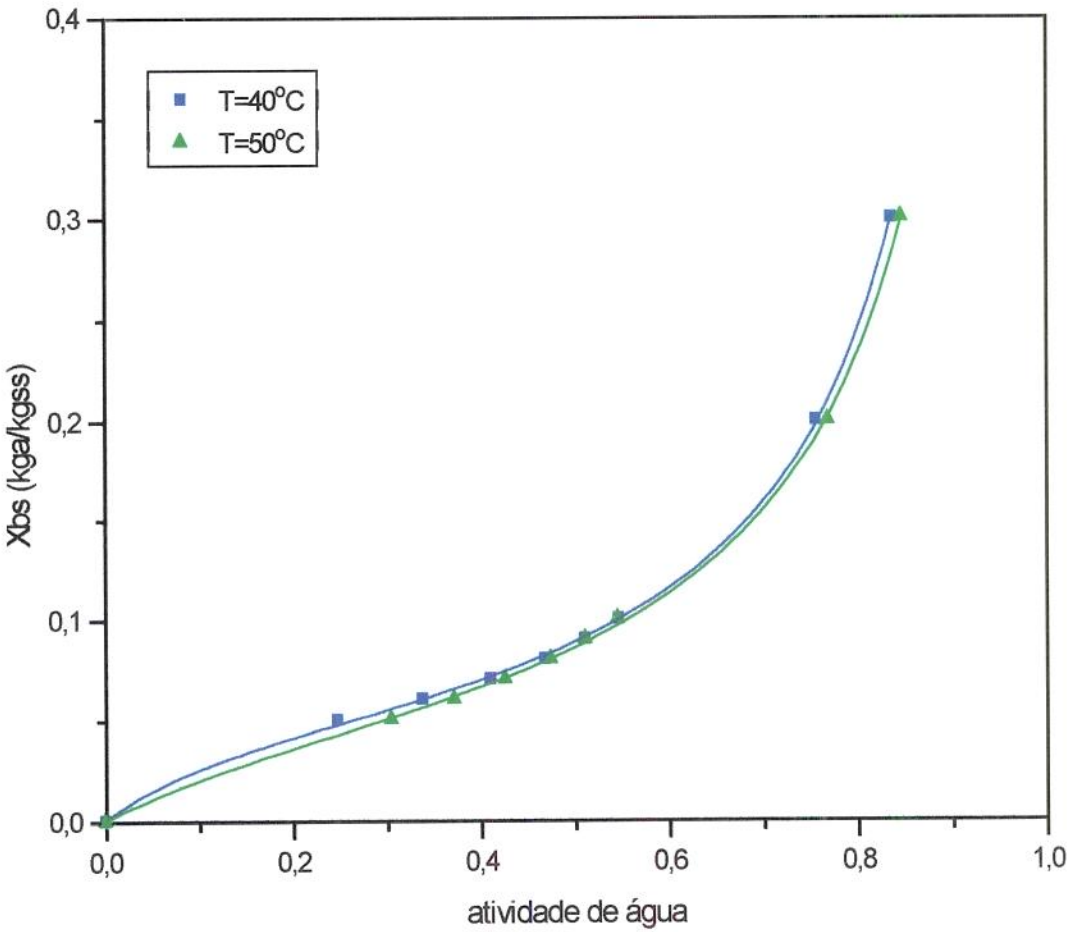


Figura 10: Isotermas de adsorção do milho superdoce, obtidas à partir da extrapolação.

4.2.1.2 - Método Indireto - CAPRISTE e ROTSTEIN (1982)

Foram feitos ensaios para a determinação das isotermas de dessorção do milho superdoce, utilizando um método alternativo, com o objetivo de avaliar a tendência das curvas à altas umidades relativas. O estudo partiu de uma secagem suave das amostras, e uma posterior determinação da atividade de água, através de um medidor eletrônico (item 2.4.1). Segundo CAPRISTE e ROTSTEIN (1982), obtiveram-se bons resultados com este método, para alimentos que contém açúcar ou com composição mais heterogênea (amido-proteína-açúcar-sal). Este método, além de fornecer dados experimentais em regiões com alto teor de umidade, difíceis de atingir através do outro método trabalhado, possui a vantagem de conseguir um maior número de pontos na curva, permitindo predizer as isotermas de sorção, em toda a faixa da quantidade de água, ou melhor, em todo o intervalo da atividade de água no alimento.

Na Figura 11, plotaram-se os valores da atividade de água das amostras, medidos através do equipamento Novasina Thermoconstanter Humidat Center, retiradas em intervalos de tempo pré definidos, versus a média das umidades, expressas em base seca. Assim, pode-se concluir que, as condições de secagem utilizadas não foram suficientes para atingir valores baixos de atividade de água (inferiores à 0.7). Analisando o gráfico, nota-se que as curvas de 35° e 45°C coincidem, apresentando uma pequena diferença entre as curvas, como também um afastamento da isoterma de 25°C, podendo ser explicado pela instabilidade do equipamento Novasina Thermoconstant Humidat Center para valores de atividade de água maiores que 0.95. Assim, conclui-se a necessidade de efetuar uma secagem mais eficiente, atingindo valores mais baixos de atividade de água, para poder diferenciar as duas curvas. Para uma melhor análise, os dados podem ser observados na Tabela 20.

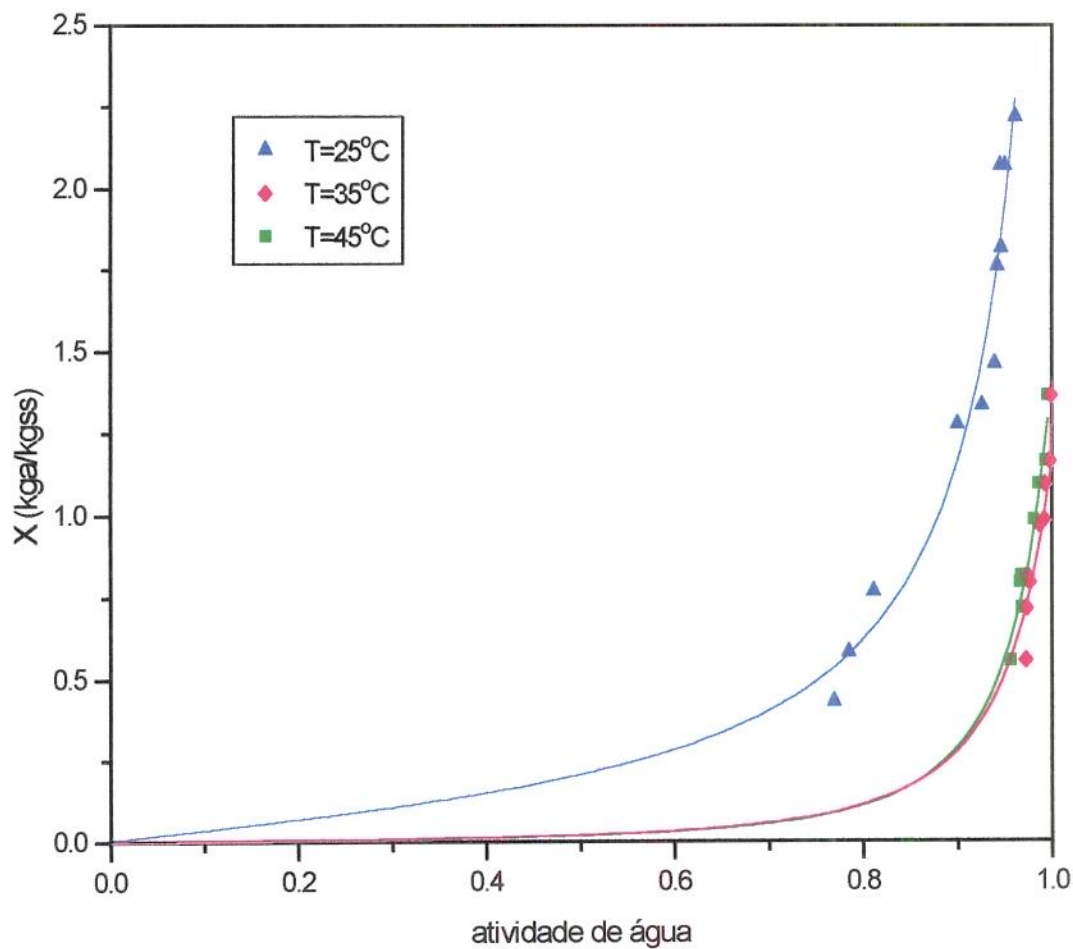


Figura 11: Isotermas de dessorção do milho superdoce, à diferentes temperaturas, obtidas pelo método alternativo, baseado em CAPRISTE e ROTSTEIN (1982).

No caso do milho superdoce, existe a necessidade de alterar as condições do processo de secagem, tais como aumentar a velocidade do ar e diminuir o teor de umidade relativa do ar de entrada, o que não foi possível realizar, uma vez que foram utilizadas condições limites do equipamento. Outro fator que deve-se ressaltar, é a falta de precisão para altas atividades de água,

do equipamento de medição utilizado (Novasina Thermoconstanter Humidat Center), nesta faixa de medida. Entretanto, conseguiu-se obter uma boa quantidade de dados, com pouca dispersão, numa zona em que o método direto, baseado no Projeto COST 90, não conseguiu atingir.

Tabela 20 - Relação entre a atividade de água e umidade das isotermas de dessorção do milho superdoce, obtidas pelo Método estático - CAPRISTE e ROTSTEIN (1982), à diferentes temperaturas.

tempo (min)	T=25°C			T=35°C			T=45°C		
	a_w	X_{bs}	$X_{bu}(\%)$	a_w	X_{bs}	$X_{bu}(\%)$	a_w	X_{bs}	$X_{bu}(\%)$
10	0.961	2.479	71.25	1.040	2.517	71,518	**	**	**
20	0.972	2.393	70.53	1.040	1.910	65,560	**	**	**
30	0.969	2.226	68.99	1.040	1.771	63.837	0.994	1.771	63.837
40	0.962	2.216	68.91	0.996	1.361	57.644	1.009	1.361	57.644
50	0.946	2.065	67.37	0.994	1.162	53.734	0.983	1.162	53.734
60	0.951	1.823	64.58	0.987	1.092	52.201	0.989	1.092	52.201
80	0.947	1.812	64.44	0.991	0.982	49.553	0.993	0.982	49.553
100	0.943	1.756	63.71	0.996	0.965	49.105	0.978	0.965	49.105
120	0.940	1.456	59.28	0.996	0.789	44.119	0.975	0.789	44.119
150	0.927	1.330	57.08	0.978	0.809	44.735	0.997	0.809	44.735
180	0.901	1.271	55.96	0.978	0.712	41.583	0.974	0.712	41.583
210	0.812	0.762	43.25	0.957	0.552	35.631	0.956	0.552	35.631
240	0.786	0.577	36.58	0.965	0.444	30.735	0.943	0.444	30.735
270	0.770	0.428	29.97	--	--	--	--	--	--

X_{bs} - umidade em base seca (kga/kgss)

** - amostras deterioradas

X_{bu} - umidade em base úmida

4.2.2 - União dos Métodos

Como foi visto no item 4.2.1.1, o método estático e direto, baseado no Projeto COST 90, forneceu dados para a construção da isoterma de adsorção do milho superdoce, atingindo apenas baixos valores de atividade de água, ao contrário do método estático e indireto, baseado no estudo de CAPRISTE E ROTSTEIN (1982), aonde determinou-se a isoterma de dessorção, para altos valores de atividade de água. Assim, com o objetivo de comparar os dois métodos, plotaram-se os dados obtidos para a temperatura de 25°C, que foram ajustados pela equação de GAB, como mostra a Figura 12.

Foram feitos três ajustes, um para os dados da isoterma de adsorção, outro para a de dessorção e um terceiro unindo os dois métodos. Apesar do efeito da histerese, este último ajuste foi determinado com a finalidade de adquirir uma única equação, abrangendo todo o intervalo, caracterizando a isoterma de sorção do milho superdoce, o que facilitará estudos futuros em simulação dos dados.

Na faixa de atividade água entre 0.75 e 0.85, pode-se verificar o afastamento dos dados experimentais, indicando a ocorrência da histerese entre a adsorção e a dessorção, confirmando o estudo de LABUZA (1968), citado por MAZZA e LEMAGUER (1978), aonde o fenômeno da histerese pode ocorrer apenas em valores de atividade de água maiores que 0.6, uma vez que a proposta que explica é baseada na combinação de condensação capilar e mudanças estruturais que ocorrem durante a adsorção e dessorção de umidade. No caso do milho superdoce, o alto teor de açúcar influi, uma vez que os açúcares, que apresentam-se em estado de alta higroscopicidade, promovem sua cristalização, sob qualquer acréscimo de umidade acima da qual a amostra tenha sido desidratada.

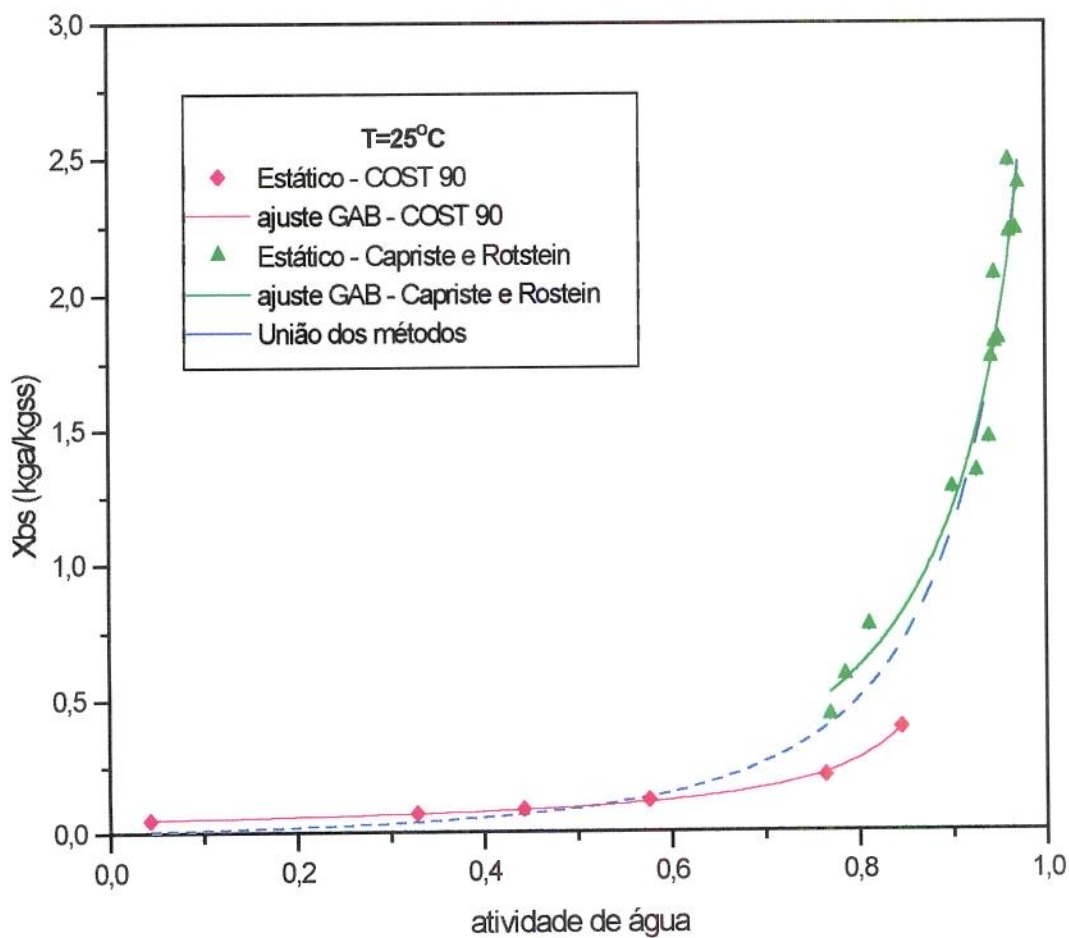


Figura 12: Isotermas de sorção do milho superdoce à temperatura de 25°C, obtidas pelos métodos, baseados no Projeto COST 90; em CAPRISTE E ROTSTEIN (1982), e unindo os dois, ajustados pela Equação de GAB.

Na Figura 13, apresentam-se as curvas de sorção para as temperaturas de 25°, 35° e 45°C, unindo os dois métodos trabalhados. As curvas de 35° e 45°C são coincidentes até a atividade de água igual à 0.7, apresentando uma pequena variação na extremidade superior. Isto pode ser justificado devido

à erros experimentais durante a determinação dos dados de atividade de água no Método de CAPRISTE e ROTSTEIN (1982), como já fora mencionado, no que diz respeito à precisão do equipamento para valores de atividade de água acima de 0.95. As curvas apresentadas foram todas ajustadas através da equação de GAB.

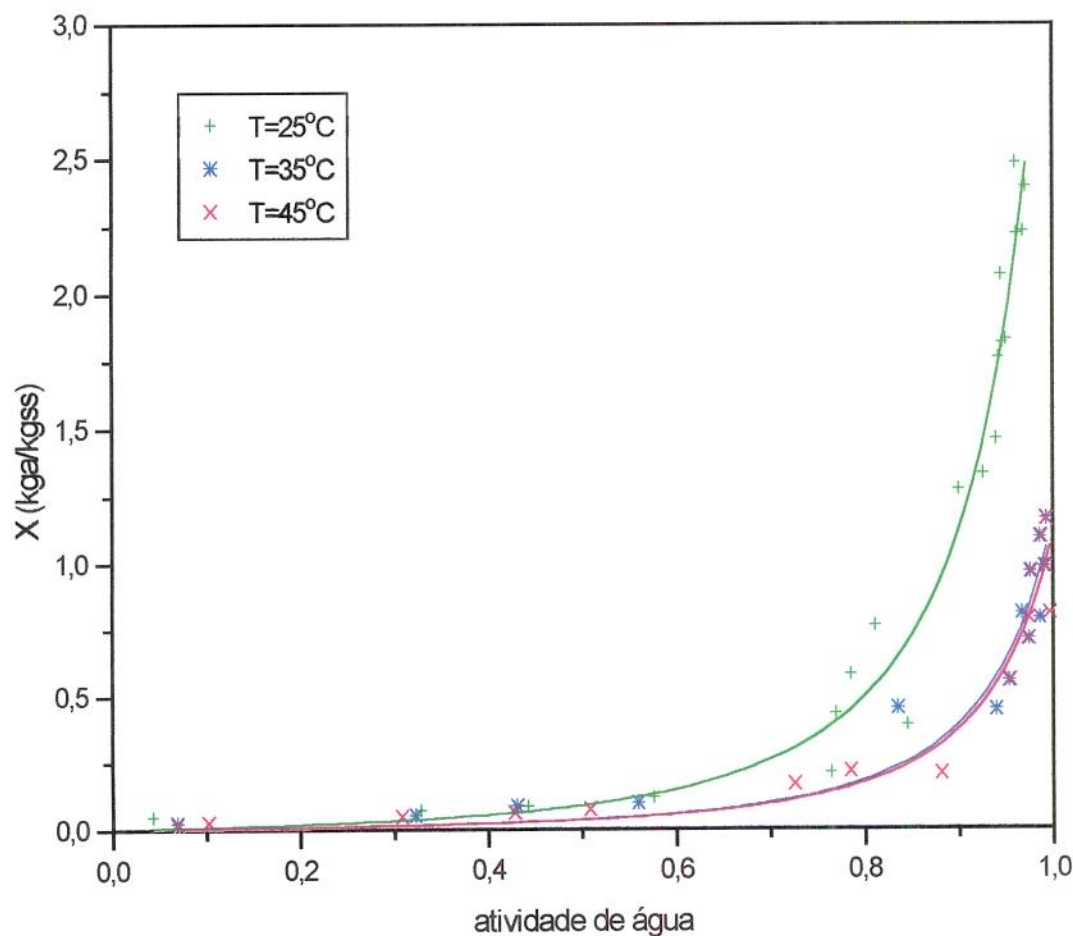


Figura 13: Isotermas de sorção do milho superdoce à diferentes temperaturas, obtidas pelo método estático, baseado no Projeto COST 90 e CAPRISTE e ROTSTEIN (1982), ajustadas pela Equação de GAB.

4.3 - SECAGEM

Estudou-se a cinética de secagem do milho superdoce, em camada fina, avaliando-se o efeito das principais variáveis do processo, como a temperatura, velocidade e umidade relativa do ar. As tabelas de resultados e os demais cálculos estão apresentados no Apêndice B.

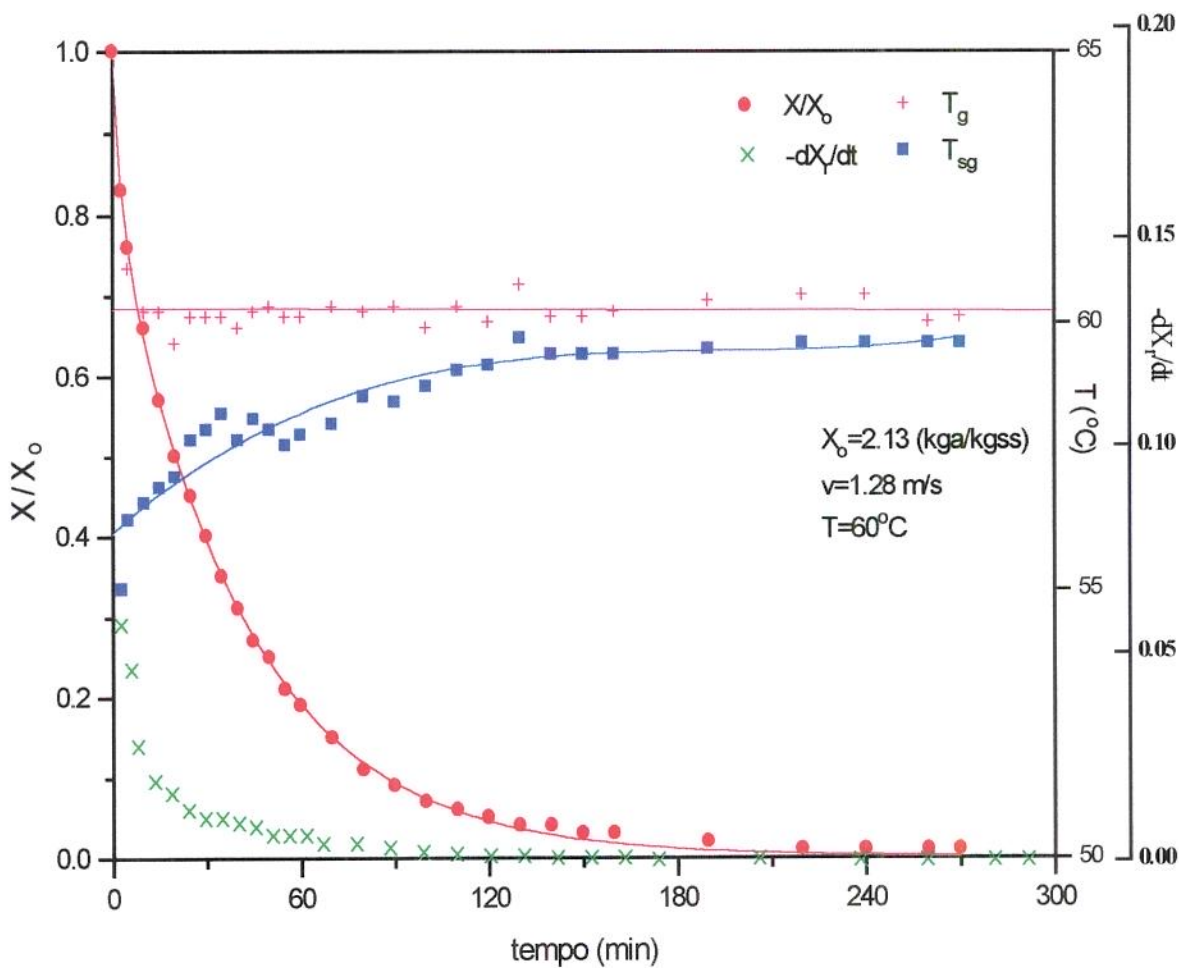


Figura 14 : Resultado do experimento número 05, em leito estático, sob camada fina ($L=1$ cm), $Y_{abs}=0.014$ kgvapor água/kg ar seco.

A Figura 14, apresenta as medidas realizadas para uma experiência característica, tais como: as variações do teor de umidade e da temperatura com o tempo de processo, ocorridas durante um ensaio de secagem, à temperatura de 60°C, velocidade do ar igual à 1.28 m/s e umidade relativa do ar ambiente de 58%, aonde foram medidas a temperatura de entrada do gás (T_g), temperatura de saída do gás (T_{sg}). Calculou-se a taxa de secagem ($-dX_r/dt$), através de uma rotina matemática do programa gráfico Origin 3.1. Os dados experimentais obtidos estão tabelados no Apêndice B, sob o número de experiência 05.

Observa-se que no início do processo, a temperatura do gás apresentou uma diferença na entrada e na saída, sendo da ordem de 6.20°C, reduzindo-se após 180 minutos de processo, para uma diferença de aproximadamente 1°C. Isto indica a existência de um gradiente de força motriz da secagem ao longo do leito, ainda que o leito seja muito fino.

Analisando-se as curvas de X versus tempo, temperatura de saída e taxa de secagem, pode-se observar que o processo de secagem ocorre no período à taxa decrescente.

Isto também pode ser verificado, a partir das curvas da taxa de secagem construídas em função do teor de umidade e do tempo de processo, apresentadas na Figura 15 (15a e 15b, respectivamente), nas condições de temperatura igual à 50°C, velocidade de 1.28 m/s e umidade relativa do ar ambiente de 63%, onde pode-se concluir que a secagem do milho superdoce ocorre no período à taxa decrescente, não apresentando período à taxa constante. Isto mostra que a difusão é provavelmente o mecanismo físico que governa o movimento da umidade através da estrutura, para este tipo de milho, isto é, a velocidade de secagem é controlada pela velocidade de difusão do líquido através do sólido.

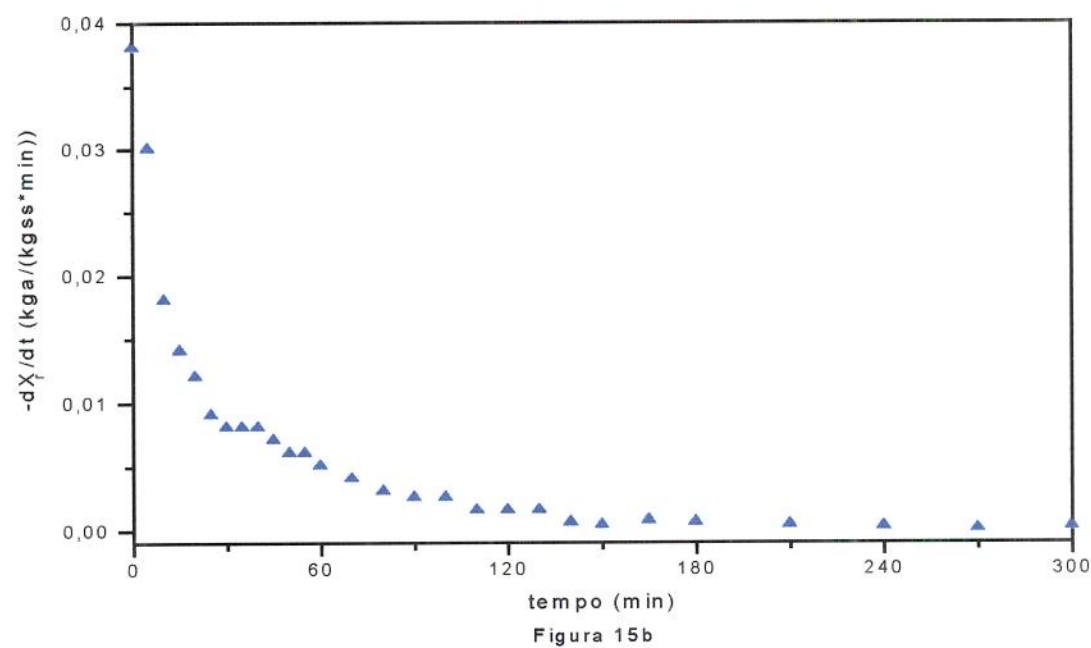
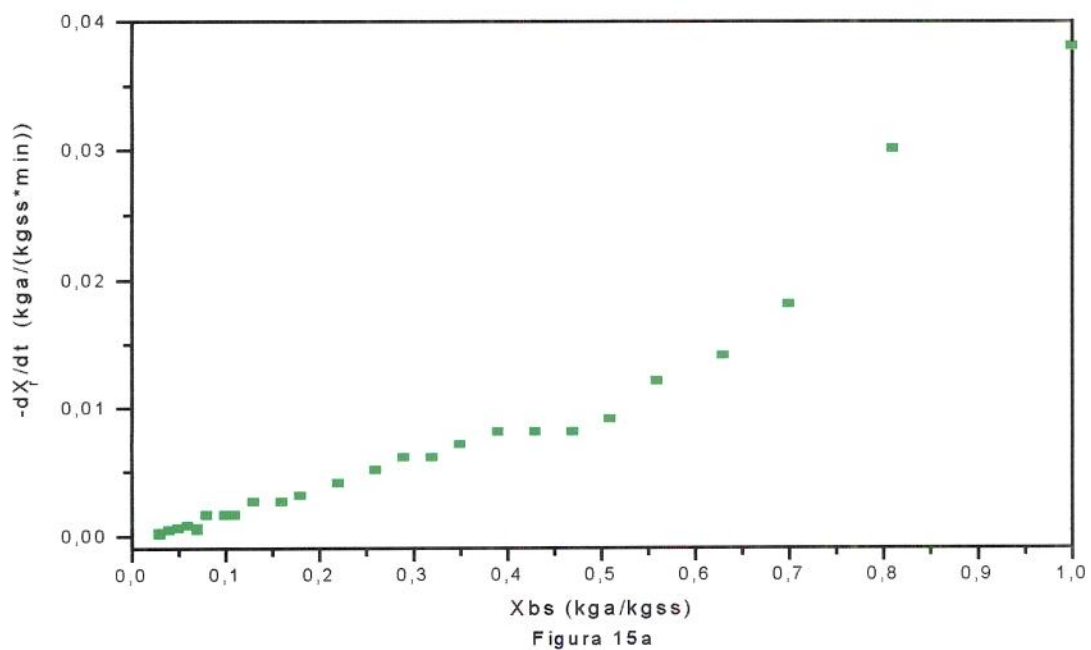


Figura 15: Taxa de secagem do milho superdoce em função da umidade e tempo, nas condições de $X_o=2.13$ Kga/kgss; $v=1.28$ m/s; $T=60^{\circ}C$; $L=1$ cm; $Y_o=0.013$ Kgvapor/kg ar seco.

4.3.1- Efeito da temperatura do ar

Várias pesquisas em secagem de alimentos consideram a temperatura do ar de secagem como o parâmetro de maior influência na cinética e na qualidade do produto final. Para a determinação da temperatura máxima, estudos anteriores, tais como o de STEINKRAUS e MacDONALD (1967), sugerem que a temperatura final de secagem do milho doce, não deveria exceder 74°C. Para a obtenção de um produto com umidade final de 5%, valores maiores, provocam o escurecimento, apesar da diminuição no tempo de secagem; OGIHARA (1989) realizou testes para o milho doce Nutrimaiz, verificando que temperaturas superiores à 80°C, favoreciam visivelmente a reação de escurecimento, sendo então adotada 70°C, como o limite máximo. AUNG *et al.* (1993) determinaram para o milho superdoce a temperatura máxima permissível de 60°C, pois acima deste valor pode ocorrer a alteração da qualidade, uma vez que inicia-se o processo da caramelização dos açúcares presentes.

Baseando-se nestas conclusões, selecionaram-se as temperaturas de 40°, 50° e 60°C como condições do processo para os ensaios de secagem. Na Figura 16, tem-se as curvas de secagem obtidas à uma velocidade de 1.28 m/s, para as diferentes temperaturas, aonde temos na abscissa o tempo de secagem expresso em minutos e na ordenada a umidade residual (X/X_o). As curvas de secagem mostram, que para um mesmo tempo de processo, quanto maior for a temperatura do ar, maior é a taxa de secagem, sendo um resultado já esperado.

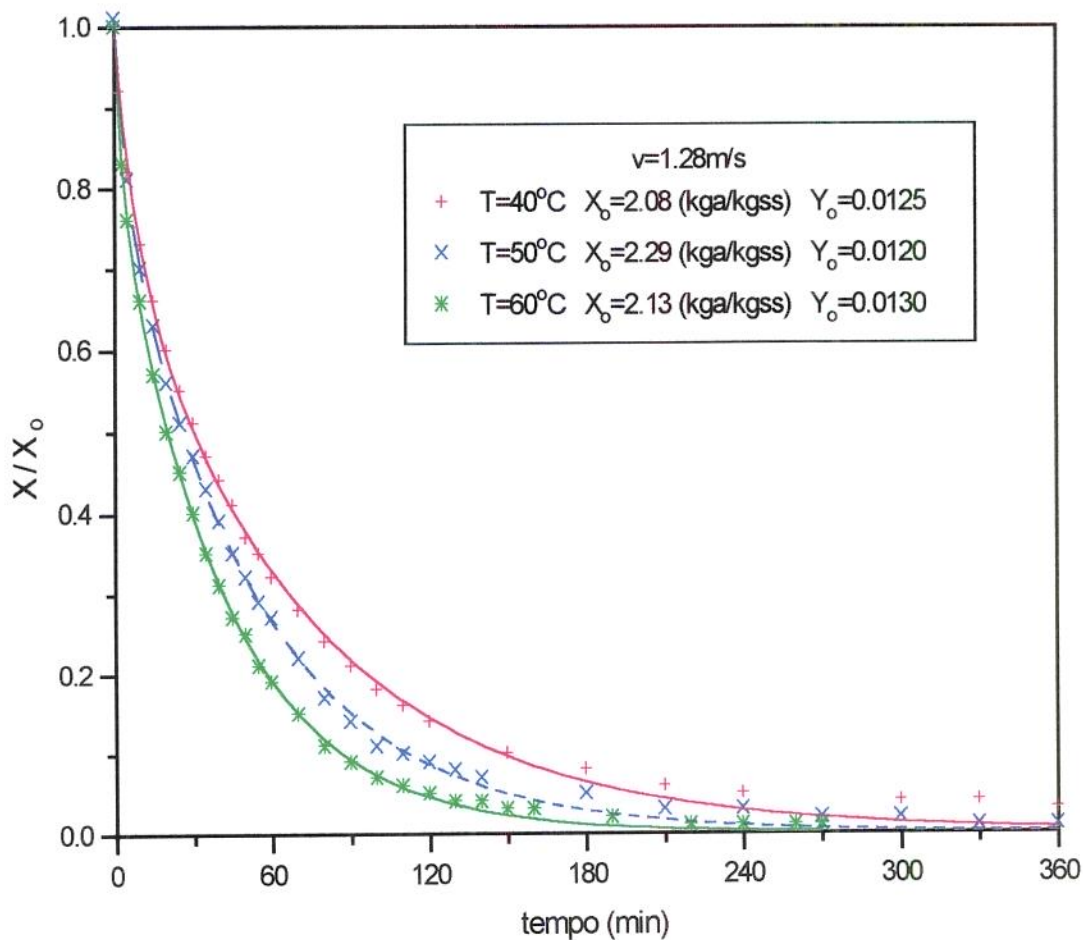


Figura 16: Efeito da temperatura do ar de secagem do milho superdoce, à $v=1.28 \text{ m/s}$, $L=1 \text{ cm}$. e Y_0 (kg vapor água/kg ar seco).

A Figura 17 apresenta as mesmas curvas dos experimentos da Figura 16, mas plotadas em escala semi-logarítmica, aonde na abscissa tem-se o tempo, expresso em minutos e na ordenada o logaritmo neperiano da umidade adimensional (X_r). Esta foi obtida através da subtração do valor da umidade de

equilíbrio (X_e), determinada através das isotermas de sorção, ajustadas pela equação de GAB, construídas no Item 4.2 e pelas condições da umidade relativa do ar aquecido.

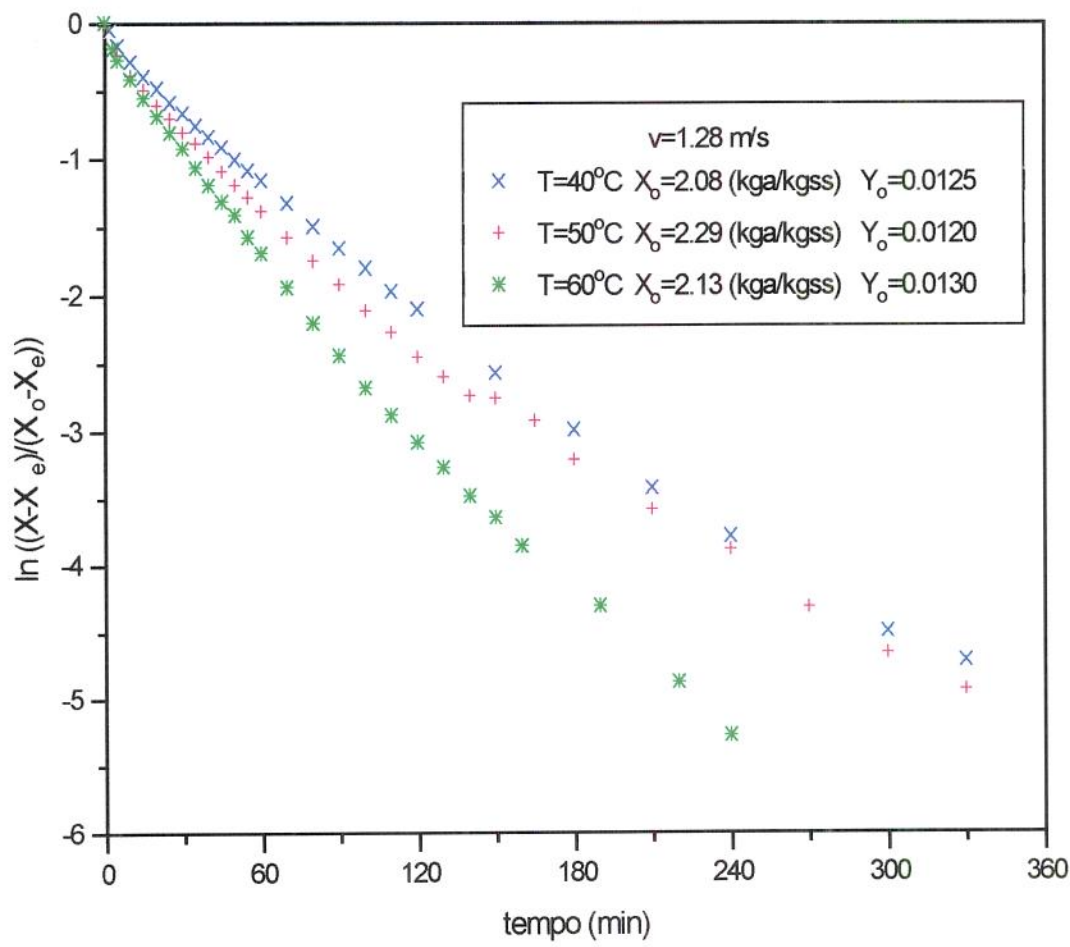


Figura 17: Efeito da temperatura do ar de secagem do milho superdoce à $v=1.28 \text{ m/s}$, em escala semi-logarítmica e Y_0 expresso em kg vapor água/kg ar seco.

Nota-se que as curvas tendem à uma convexidade, sem se aproximar à reta assintótica, ou seja, os pontos não tendem a descrever retas, o que ocorre com muitos vegetais seccionados. Isto pode ser explicado associando o comportamento da secagem do milho superdoce, sendo governado por uma interação entre a permeabilidade da cutícula e a difusividade da água no endosperma, sendo que estas variáveis dependem do teor de umidade. BURGMANS e LILL (1987), ressaltaram a importância da resistência do pericarpo deste tipo de milho em processos de desidratação. OGIHARA (1989) chegou à semelhante conclusão em seu trabalho com milho doce, obtendo curvas mais convexas.

Análises quantitativas do teor de açúcar foram efetuadas com as amostras finais, a fim de avaliar a qualidade do milho superdoce após o processo de secagem em condições diferentes de temperatura do ar. Deve-se ressaltar que estas análises foram feitas após seis meses de estocagem, podendo ter iniciado um processo de deterioração durante este período. Os dados encontrados estão apresentados na Tabela 21, onde as amostras de milho superdoce seco apresentavam um teor de umidade de 5 %, expresso em base úmida. Observa-se que a perda do teor de açúcares totais foi da ordem de 10% e dos açúcares redutores da ordem de 40%, se comparado com o milho após o congelamento. Estes valores devem ser avaliados apenas à título qualitativo do processo, pois deve-se considerar o período de estocagem das amostras finais.

Tabela 21 - Teor de açúcar das amostras de milho superdoce antes e após o processo de secagem à diferentes temperaturas.

	Açúcares	
	redutores (%)	totais (%)
in natura	3.6	27.5
congelado	1.9	24.6
T=40°C	0.8	21.3
T=50°C	0.9	22.7
T=60°C	0.8	22.8

A influência da temperatura do ar de secagem foi também observada sob o aspecto qualitativo das amostras finais, quanto à sua cor, onde notou-se uma coloração gradativamente mais escura com o aumento da temperatura. Este fenômeno explica-se por iniciar-se uma provável reação de caramelização dos açúcares presentes no milho superdoce.

4.3.2 - Efeito da velocidade do ar

A velocidade do ar de entrada no secador, foi outra variável estudada, fixando-se a temperatura e variando-se gradativamente a velocidade, obtendo os valores de 1.28, 0.87 e 0.75 m/s. A Figura 18 mostra o efeito desta variável, para os ensaios realizados à temperatura de 50°C.

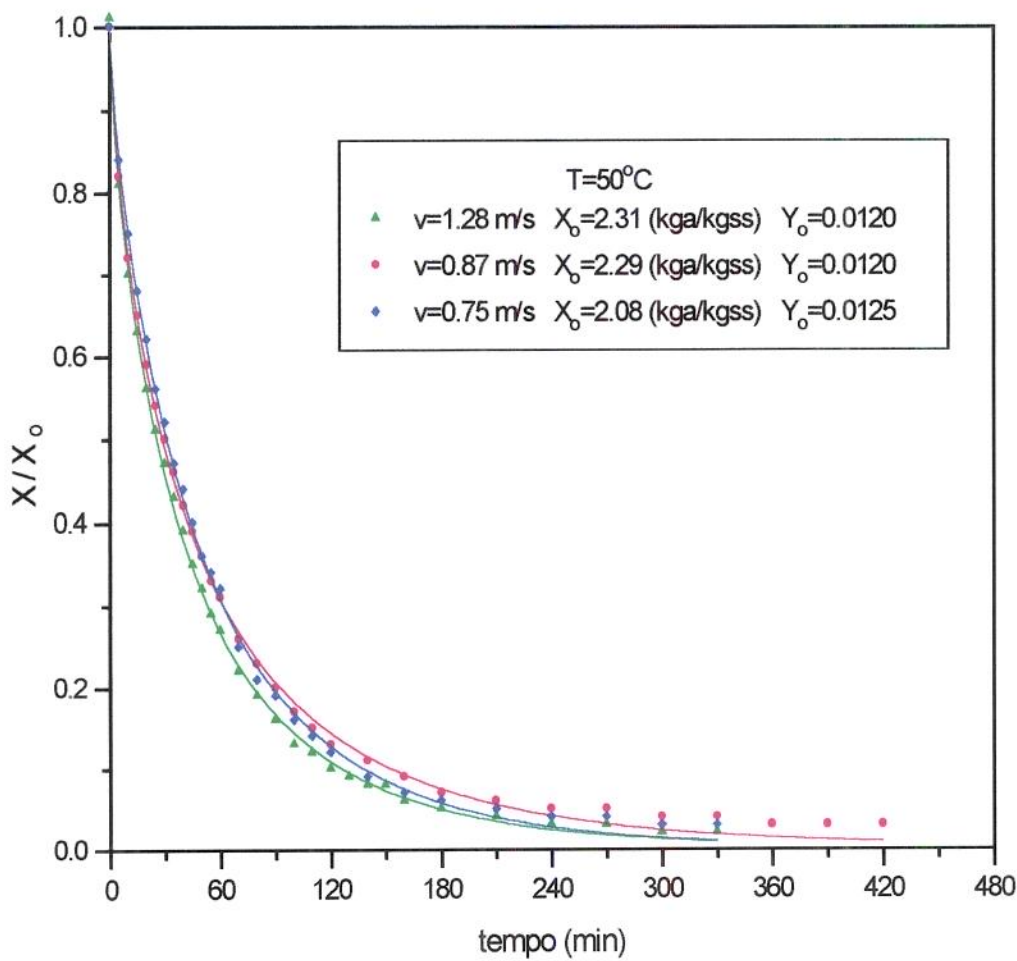


Figura 18: Efeito da velocidade do ar de secagem, à uma temperatura de 50°C, L=1 cm e Y_0 expresso em kg vapor água/kg ar seco.

Para uma melhor visualização, construiu-se o gráfico apenas com as condições máxima e mínima de velocidade, ou seja, à 1.28 e 0.75 m/s, respectivamente, apresentado na Figura 19.

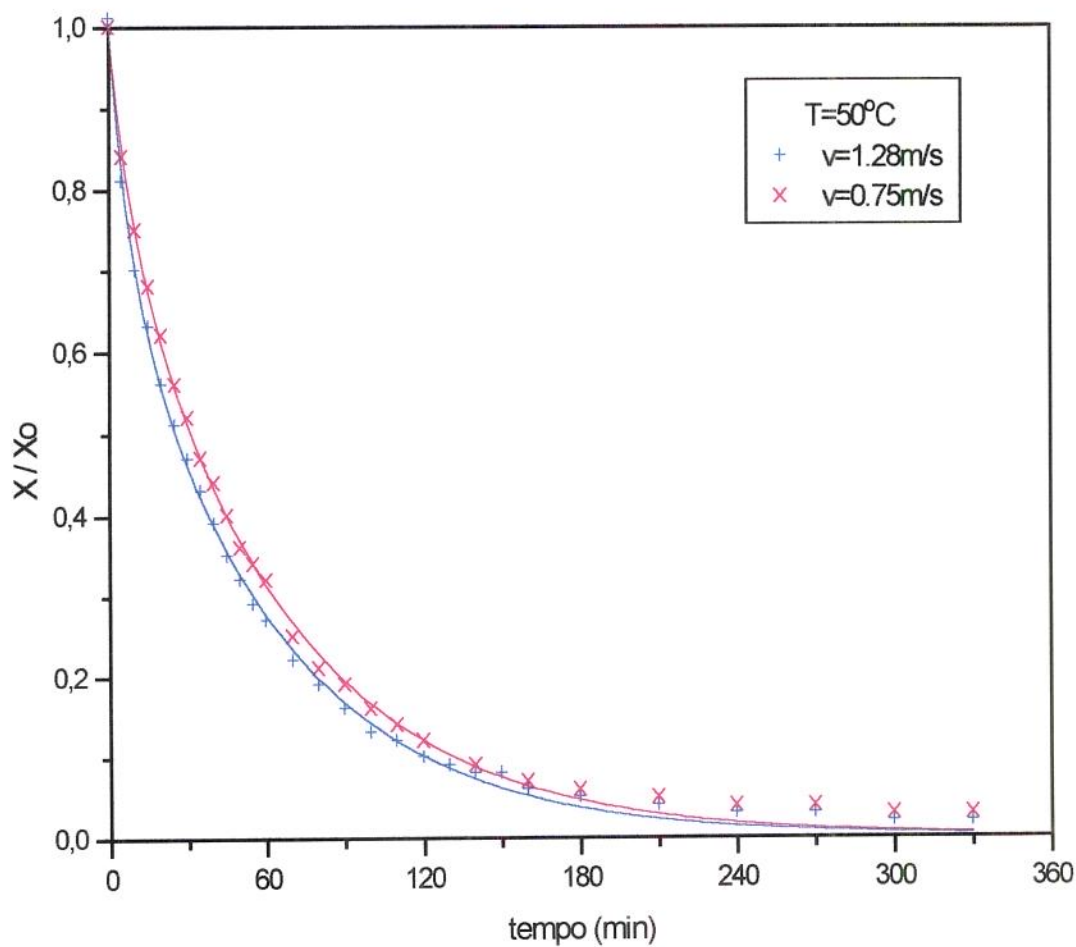


Figura 19: Efeito da velocidade do ar, nas condições máxima e mínima trabalhada (1.28 e 0.75 m/s) à temperatura de 50°C .

A partir destes resultados, conclui-se que a taxa de secagem tem um pequeno aumento quando se trabalha com valores de velocidade maiores. Sendo assim, pode-se considerar que a velocidade do ar tem um pequeno efeito sob as curvas de secagem do milho superdoce. Assim, esta variável tem menor importância, à medida que o controle da velocidade de secagem, pela difusão de

calor e massa, cresce. RAPUSAS e DRISCOLL (1995) obtiveram a mesma conclusão para a cinética em camada fina de cebolas. Na Figura 20, observa-se melhor este efeito, pois graficou-se a taxa de secagem em função da umidade, para as diferentes velocidades.

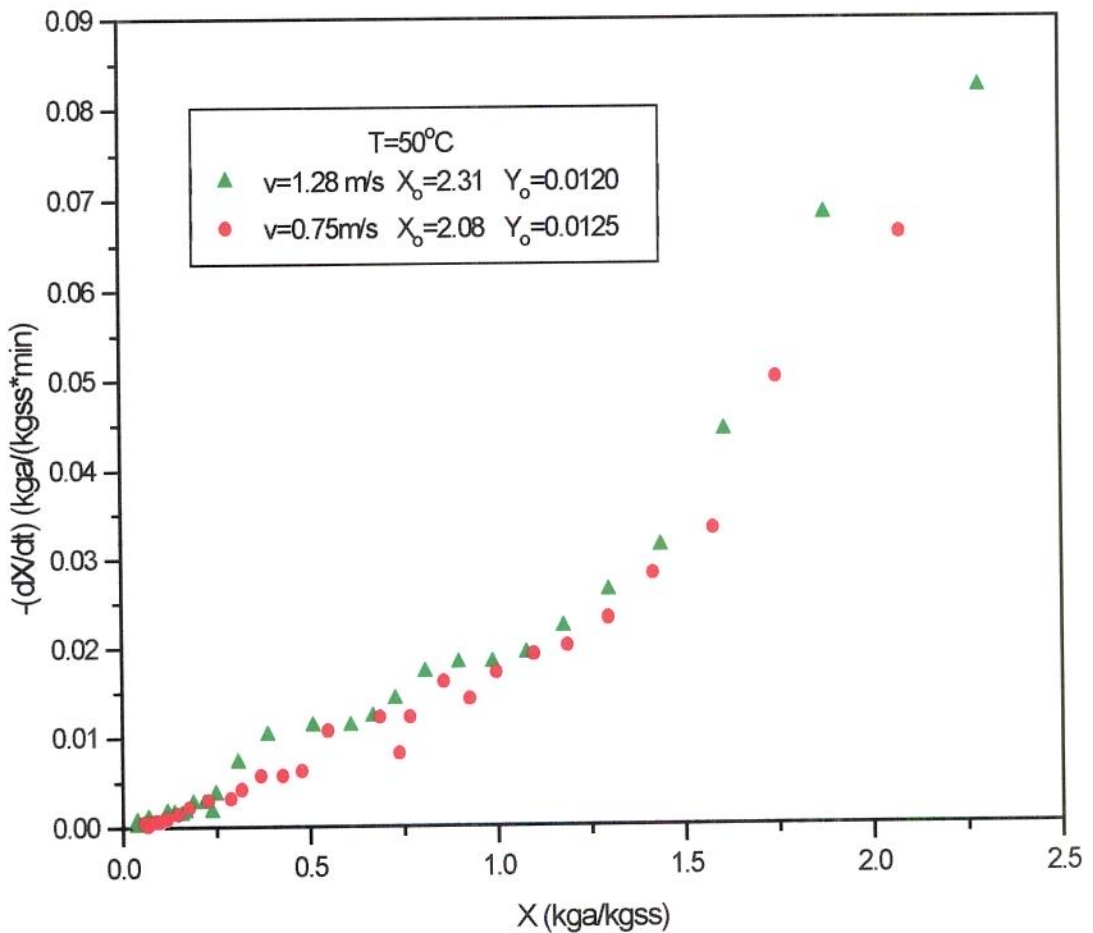


Figura 20: Efeito da velocidade de ar na taxa de secagem, à temperatura de 50°C e $L=1$ cm.

Assim, a influência da velocidade decresce com a umidade, proporcionalmente, concordando com o estudo de ROMERO (1988) para secagem de proteína texturizada, que propôs a existência de uma resistência externa à transferência de calor e uma interna à transferência de umidade no interior da partícula, que simultaneamente determina a velocidade de secagem.

4.3.3 - Efeito da umidade relativa do ar

Quando um produto é colocado em um ambiente apresentando determinada umidade relativa, estabelece-se uma transferência de umidade entre o grão e o ar, até que seja atingido o equilíbrio higroscópico. No período à taxa constante, a quantidade de água eliminada é diretamente proporcional à diferença entre a umidade de equilíbrio (X_e), que é função da temperatura da partícula, e a umidade da fase gasosa (Y_o). No período à taxa decrescente, o controle é dado apenas pela difusão, e o que se está variando é a condição de equilíbrio, ou seja, a umidade no contorno da partícula. Assim, para determinar a influência da umidade relativa do ar na cinética de secagem do milho superdoce, utilizou-se o secador provido de resistências elétricas, descrito no item 3.4.1.1, nas seguintes condições de processo: temperatura de 40°C, velocidade de 0.5 m/s e umidade relativa do ar de entrada de 45%; sendo as condições ambientais de 80%, e através do secador com bomba de calor, descrito no item 3.4.1.2, conseguiu-se reduzir a umidade relativa do ar para 27%, nas mesmas condições de temperatura e velocidade, sendo que os resultados obtidos, em ambos os casos, estão graficados na Figura 21.

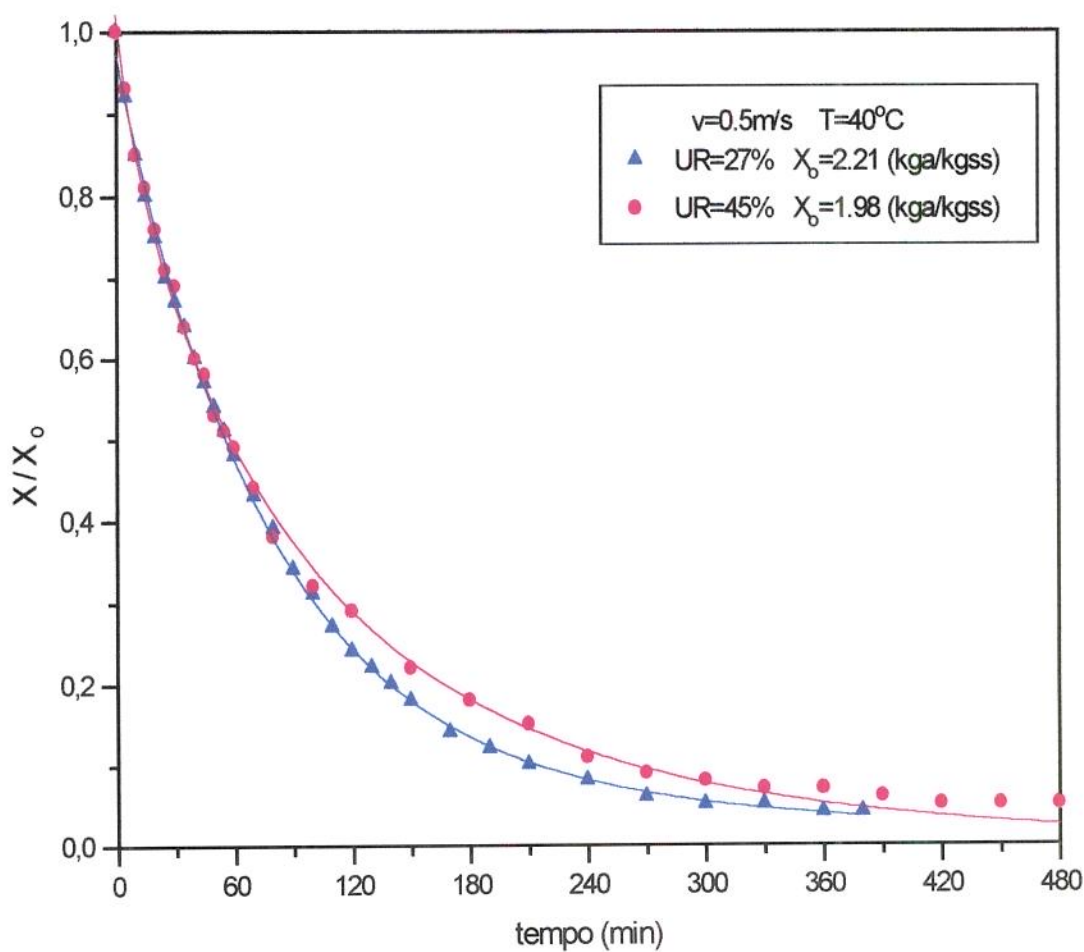


Figura 21: Efeito da umidade relativa do ar de entrada no secador, à uma temperatura de 40°C e velocidade de 0.5 m/s .

Pode-se verificar que, no início do processo de secagem, primeiros 60 minutos, as curvas não apresentaram diferença na taxa de secagem. A partir deste ponto é que o efeito da umidade relativa do ar passa a ter influência. Isto pode ser explicado, se considerarmos a resistência à transferência de massa, tendo como fator principal limitante, as condições externas e a camada limite do

gás no produto. Assim, pode-se escrever a taxa de evaporação em função do coeficiente de transferência de massa (k_g) e do gradiente de umidade do ar ($Y_s - Y_o$), como mostra a equação abaixo (STRUMILLO e KUDRA, 1986),

$$w_D = k_g (Y_s - Y_o) \quad (\text{Eq.32})$$

onde, Y_s é a umidade absoluta do gás na superfície da camada de líquido que cobre o material; Y_o é a umidade absoluta do ar de entrada no secador; k_g é o coeficiente de transferência de massa, que à uma velocidade constante do ar, permanece constante.

Para o caso do milho superdoce, a umidade inicial da amostra é muito alta, concluindo-se que Y_s é muito maior que Y_o , no período inicial do processo de secagem, conseqüentemente, variações no valor de Y_o afetariam menos. Pode-se associar este comportamento à um controle misto na taxa de secagem, um interno e outro externo, uma vez que a umidade na superfície é bastante alta. Para comprovar este mecanismo, foi feito o cálculo do gradiente de umidade do ar, ao longo do processo, para os ensaios em questão, verificando que, para valores com alto teor de umidade (X), ou seja, no período inicial do processo de secagem, a taxa de evaporação nos dois ensaios não apresentam uma diferença significativa, sendo da ordem de 25%. À partir de $X=0.45$, tem-se um gradiente de umidade do ar da ordem de 60%, podendo-se notar o início do efeito da umidade relativa do ar de entrada na cinética de secagem, ou seja, o término do controle misto, permanecendo, apenas o controle interno no processo de secagem. Conclui-se que, a alteração do teor de umidade do ar de entrada no secador tem efeito após um certo tempo de processo, quando os teores de umidades são mais baixos.

Para uma redução na umidade do ar, da ordem de 20%, a variação na taxa de secagem pode ser considerada pequena, ou seja, esta variável tem também um pequeno efeito sob a cinética de secagem do milho superdoce. ESTRADA e LITCHFIELD (1993) obtiveram resultados semelhantes, comparando a secagem do milho normal à altas temperaturas, com alta e baixa umidade relativa do ar, encontrando uma redução da taxa de secagem com alta umidade relativa de 44% em comparação a condição de baixa umidade relativa.

Comparando-se as amostras finais do milho superdoce obtidos pelos dois tipos de secadores, ou seja, com e sem redução da umidade relativa do ar, observou-se que os grãos secos sob a condição com redução da umidade relativa do ar apresentavam-se com uma coloração mais próxima ao seu estado *in natura*, concluindo que utilizando-se condições mais rígidas, sob baixas temperaturas, obtém-se um melhor aspecto visual da amostra final.

4.3.4 - Densidade

A densidade volumétrica é considerada como uma das propriedades físicas importantes, no que diz respeito à caracterização da textura, qualidade e fenômeno de transporte de alimentos secos. Assim, utilizando o método picnométrico, determinou-se a densidade do milho superdoce versus a umidade da amostra (expressa em base seca), ao longo de um ensaio de secagem, nas condições de temperatura igual à 35°C, umidade relativa do ar à 37% e num período de 260 minutos. A funcionalidade da densidade em função da umidade, pode ser verificada na Figura 22.

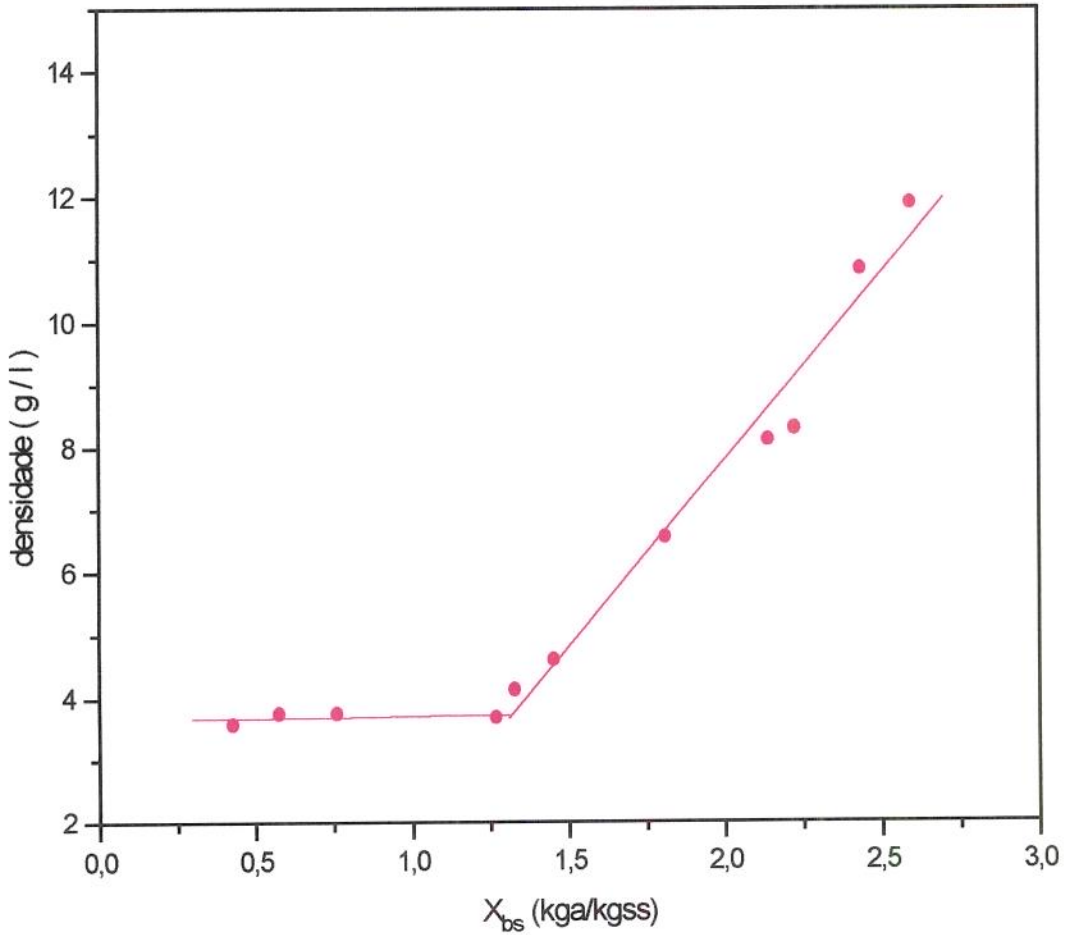


Figura 22: Curva de densidade do grão de milho superdoce ao longo do processo de secagem, à $T=35^{\circ}\text{C}$; $UR=37\%$ e $v=0.5\text{ m/s}$.

Os resultados obtidos no ensaio estão apresentados na Tabela 22, observando-se uma proporcionalidade entre a densidade e a umidade do grão do milho superdoce, ou seja, para valores mais baixos de umidade, tem-se menores densidades.

Tabela 22 - Densidade do grão de milho superdoce em função do tempo e umidade da amostra, ao longo de um processo de secagem

t (min)	ρ (g/l)	X_{bs} (kga/kgss)	X_{bu} (%)
0	11.87	2.60	71.25
15	10.82	2.44	70.89
30	8.27	2.23	69.00
45	8.09	2.14	68.14
60	8.18	1.82	64.58
80	6.53	1.81	64.44
100	5.09	1.76	63.71
120	4.58	1.46	59.28
150	4.11	1.33	57.08
180	3.66	1.27	55.96
210	3.73	0.76	43.25
240	3.72	0.58	36.58
260	3.55	0.43	29.97

A densidade do milho superdoce decresce com a remoção da água, tornando-se constante à valores de umidade baixos ($X_{bs} < 1.25$ kga/kgss). Isto pode estar indicando que o efeito da porosidade do grão não poder ser considerado desprezível, ou seja, há a necessidade de se efetuar um estudo mais profundo para caracterizar este parâmetro.

4.3.5 - Modelos Matemáticos

O estudo da cinética de secagem, foi efetuado sob camada fina, à diferentes temperaturas, velocidades e umidade relativas do ar, como descrito no item 3.4.2. Os dados obtidos foram correlacionados através de diversas equações, com o objetivo de determinar uma equação adequada ao projeto de simulação de secadores. Através da simulação, pode-se prever as condições a que os grãos são submetidos durante o processo, e também, determinar os efeitos das mudanças de certas variáveis na eficiência de secagem, ou ainda, minimizar os custos de operação (BROOKER *et al.*, 1974).

No item 4.3.1, apresentou-se o gráfico do logaritmo neperiano de $(X-X_e)/(X_0-X_e)$ versus o tempo de secagem, aonde obtiveram-se curvas que tendiam à convexidade. Devido à este comportamento, foram selecionados modelos matemáticos, baseando-se em estudos anteriores, que apresentavam tal comportamento. Os modelos selecionados para correlacionar os dados experimentais da secagem do milho superdoce foram:

- Modelo Exponencial

$$X_r = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-Kt) \quad (\text{Eq.7})$$

com os parâmetros C e K;

- Modelo Exponencial com dois termos

$$X_r = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = C_1 \exp(-K_1 t) + C_2 \exp(-K_2 t) \quad (\text{Eq.10})$$

com os parâmetros C_1 , K_1 , C_2 e K_2 ;

- Equação de Page

$$X_r = \frac{X - X_e}{X_o - X_e} = C \exp(-Kt^n) \quad (\text{Eq.13})$$

com os parâmetros C, K e n.

OGIHARA (1989) correlacionou melhor seus dados para a secagem de milho doce Nutrimaiz através da Equação de Page. KALWAR *et al.* (1991) também aplicaram esta equação para secagem de grãos de milho, analisando a geometria, variáveis de operação e características dos grãos, determinando ser um modelo apropriado para descrever a cinética de secagem do milho. Segundo PINTO e TOBINAGA (1996), o modelo exponencial é uma correlação semi-empírica importante na secagem de alimentos, sendo utilizada por diversos pesquisadores. SHARAF-ELDEEN *et al.*, citado por RAPUSAS e DRISCOLL (1995), obtiveram um ajuste mais preciso para o milho normal através do modelo exponencial com dois termos, da qual afirmaram ser uma equação vantajosa em casos aonde a geometria de partículas de alimentos não podem ser especificadas com segurança, ou para aqueles produtos que sofrem grandes mudanças geométricas durante o processo de secagem.

Os testes de ajuste dos modelos matemáticos foram realizados através de um software estatístico, Statistica version 5.0 (1995), utilizando-se a rotina de regressão não-linear, obtendo-se os valores dos parâmetros estimados, coeficiente de correlação (R) e a porcentagem de confiança (P) para cada modelo testado, assim como, para cada condição de processo trabalhada. Os gráficos com os dados experimentais e as curvas ajustadas para cada modelo obtidos podem ser encontradas no Apêndice B, item B.2.2.

Na Figura 23, tem-se o ajuste para os três modelos selecionados, nas condições de processo de temperatura igual à 50°C e velocidade de 1.28 m/s.

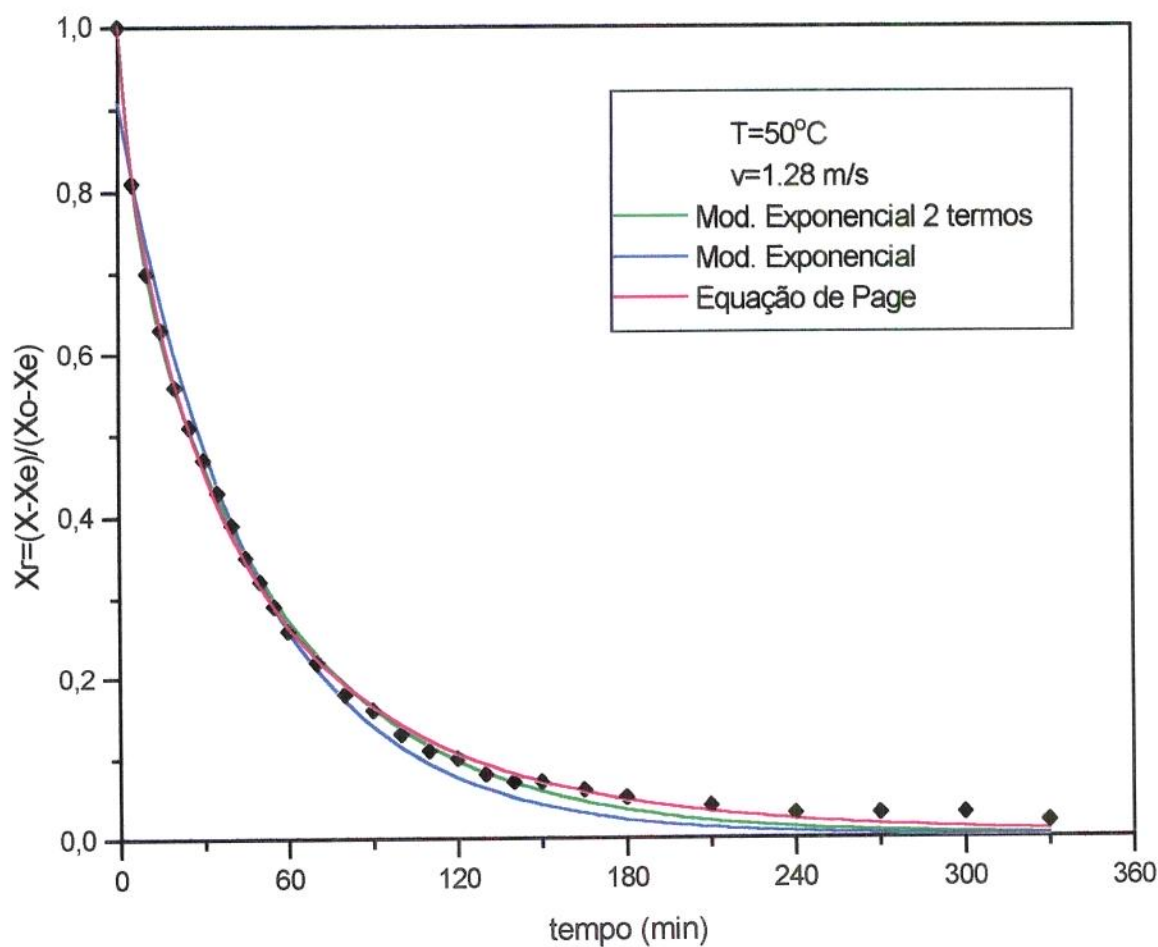


Figura 23: Curva de secagem do milho superdoce à temperatura de 50°C e $v = 1.28 \text{ m/s}$, ajustada por diferentes modelos matemáticos.

A determinação do modelo matemático que melhor se ajustou para o milho superdoce, foi baseada no maior coeficiente de correlação e na maior porcentagem de confiança, ambos calculados pelo software estatístico. A Tabela 23, exemplifica os resultados obtidos para o ensaio à diferentes temperaturas e velocidade fixa de 1.28 m/s. Para as demais condições de processo efetuadas os resultados podem ser analisados no Apêndice B, item B.2.1.

Tabela 23 - Coeficiente de correlação (R) , porcentagem de confiança (P) dos testes de ajuste dos modelos matemáticos de cinética de secagem do milho superdoce, à diferentes temperaturas e velocidade de 1.28 m/s

MODELO	T=40°C		T=50°C		T=60°C	
	R	P(%)	R	P(%)	R	P(%)
Exp. 2 termos	0.99993	99.985	0.99959	99.917	0.99987	99.973
Page	0.99888	99.775	0.99949	99.899	0.99892	99.784
Exponencial	0.99736	99.473	0.99338	98.680	0.99672	99.344

A melhor correlação encontrada nos testes de ajuste, foi obtida pelo Modelo Exponencial com 2 termos, seguida da Equação de Page e Modelo Exponencial, respectivamente. WERES e JAYAS (1994) obtiveram também melhor precisão para representar as curvas de secagem do milho normal, em camada fina, através do modelo exponencial com 2 termos, seguido da Equação de Page. Outros pesquisadores também determinaram que o Modelo Exponencial com 2 termos melhora a precisão da predição da secagem de materiais biológicos (RAPUSAS e DRISCOLL, 1995).

Todas as figuras apresentadas nos itens anteriores, foram ajustadas pelo Modelo Exponencial com 2 termos.

Os parâmetros do Modelo Exponencial com 2 termos, calculados por regressão não-linear, para as condições de processo, acima expostas, encontram-se na Tabela 24, e para as demais condições trabalhadas, os resultados dos parâmetros obtidos podem ser verificados no Apêndice B, item B.2.1.

Tabela 24 - Parâmetros do Modelo Exponencial com 2 termos ajustado para os ensaios de secagem à diferentes temperaturas e velocidade de 1.28 m/s.

T (°C)	C ₁	K ₁ (min ⁻¹)	C ₂	K ₂ (min ⁻¹)
40	0.818790	0.016060	0.184928	0.128098
50	0.760740	0.017089	0.248067	0.141115
60	0.842398	0.025400	0.154150	0.857576

Observando a Tabela 24, nota-se que os valores das constantes, K₁ e K₂ aumentam com o aumento da temperatura, mostrando então a proporcionalidade do parâmetro K com a mesma. À partir do trabalho de WERES e JAYAS (1994) com a cinética de secagem do milho normal, os valores das constantes obtidas, para o modelo exponencial com 2 termos, apresentaram uma grandeza menor, mas com a condição de que a soma dos parâmetros C₁ e C₂ é igual à 1. Esta condição pode ser verificada também para o caso do milho superdoce, com pequenas variações em torno de 1, podendo ser explicado por possíveis erros experimentais.

O outro modelo testado foi a Equação de Page, que obteve também bons resultados de ajuste. Os parâmetros calculados para esta equação, sob as mesmas condições de processo acima expostas, podem ser observados na Tabela 25.

Tabela 25 - Parâmetros (C, K e n) da Equação de Page ajustados para o ensaio de secagem à diferentes temperaturas e velocidade de 1.28 m/s

T (°C)	C	K (min ⁻¹)	n
40	1.041602	0.063089	0.724849
50	1.006470	0.061041	0.753531
60	0.960082	0.057114	0.820422

Nota-se que a constante K é inversamente proporcional à temperatura. Esta relação entre a constante K e a temperatura, difere do estudo de OGIHARA (1989) com a secagem do milho doce Nutrimaiz e normal, que obteve proporcionalidade direta, ou seja, quanto maior a temperatura, maior o valor de K. PARTI e DUGMANICS (1990), que também trabalharam com milho normal, concordam com essa proporcionalidade. Quanto à constante n, que pode ser considerada como um fator que modifica-se para a variável tempo, refletindo na extensão da resistência interna para a secagem do grão, varia proporcionalmente com a temperatura, no caso do milho superdoce, concordando com o estudo de PARTI e DUGMANICS (1990) com milho normal, como também para o milho doce Nutrimaiz (OGIHARA, 1989). Assim, segundo MISRA e BROOKER (1980), as variáveis independentes que afetam significativamente o parâmetro K, são a temperatura e velocidade do ar de secagem. E, para a constante n, determinou-se ser função da umidade relativa do ar e do teor de umidade inicial do grão de milho.

5 - CONCLUSÕES

1. A temperatura do ar de entrada no secador é a variável que mais influi na cinética de secagem do milho superdoce, se comparada à velocidade e umidade relativa do ar. Para a manutenção da qualidade do milho, recomenda-se trabalhar com a condição combinada de uma temperatura mais baixa e umidade relativa do ar de entrada reduzida.

2. As curvas de secagem, quando expressas em escalas semi-logarítmicas, apresentam-se sob a forma convexa, como em muitos vegetais cortados, podendo ser explicado associando-se o comportamento da secagem do milho superdoce, sendo governado por uma interação entre a permeabilidade da cutícula e a difusividade da água no endosperma.

3. O Modelo Exponencial com dois termos foi o que melhor representou os dados para a cinética de secagem do milho superdoce.

4. As isotermas de sorção construídas baseando-se no estudo de CAPRISTE e ROTSTEIN (1982) fornecem dados em regiões de alta umidade relativa e uma maior quantidade de dados, ao contrário das isotermas obtidas à partir do Projeto COST 90 (JOWITT et al., 1983) que fornecem dados à baixas umidades relativas e menor quantidade.

5. A Equação de GAB (Guggenheim-Anderson-deBoer) foi a que melhor descreveu os dados da curva de equilíbrio do milho superdoce.

6. A temperatura tem efeito nas isotermas de adsorção, coincidindo com a teoria de absorção, somente para valores inferiores à 0.80 unidades de atividade de água. Para valores superiores à 0.80, a curva de equilíbrio à 60°C, apresentou uma inversão, que pode ser explicada pela presença de açúcares no milho superdoce, pois possuem curvas de equilíbrio com este comportamento.

6 - REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

6.1 - Bibliografia Citada

- AGUERRE, R.J. ; SUARÉZ, C. e VIOLLAZ, P.E. Enthalpy-entropy compensation in sorption phenomena: application to the prediction of the effect of the temperature on food isotherms. *Journal of Food Science*, 51(6):1547-1549, 1986.
- AGUERRE, R.J. ; SUARÉZ, C. e VIOLLAZ, P.E. Modeling temperature dependence of food sorption isotherms. *Lebensm.-Wiss. u- Technol.*, 22: 1-5, 1989.
- ANDRIEU, J. ; STAMATOPOULOS, A. e ZAFIROPOULOS, M. Corn pasta water desorption isotherms. *Lebensm. -Wiss. u. -Technol.*, 19: 415-418, 1986.
- ANGELUCCI, E.; CARVALHO, C. R. L.; CARVALHO, P. R. N.; FIGUEIREDO, I. B.; MANTOVANI, D. M. B. e MORAES, R. M. Análises Químicas de Alimentos. *Manual Técnico Instituto de Tecnologia de Alimentos*, Campinas, 1987.

- ANON Sweet Corn powder flavours, thickness, soups and souces. *Food Development* (January): 20, 1982.
- ASP, N.; JOHANSSON, H.H. e SILJESTRÖM, M. Rapid enzymatic assay of insoluble and soluble dietary Fiber. *Journal of Agriculture Chemical*, 31:476-482, 1983.
- AUNG, L.H.; FOUSE, D.C. e HARRIS, C.M. Effect of postharvest desiccation at high temperature on soluble sugar changes of two supersweet sweet corn cultivars. *Journal of Horticultural Science*, 67(6):745-750, 1992.
- AUNG, L.H.; FOUSE, D.C., BRANDL, D.G. e HARRIS, C.M. Effects of imbibition and modified atmospheres on the soluble sugars content of supersweet sweet corn embryo and endosperm. *Journal of Horticultural Science*, 68(1): 37-43, 1993.
- BARROZO, M.A.S.; HENRIQUE, H.M. e SARTORI, D.J.M. Secagem de grãos em camada delgada, um estudo sobre o modelo "Fickiano". *Anais XXI Encontro sobre escoamento em meios porosos*, Vol.2, Ouro Preto, 1993.
- BEKE, J.; MUJUMDAR, A.S. e GIROUX, M. Some features of microwave drying of corn and potato samples. *Dryinig 96-Proceedings of the 10th International Drying Symposium*, vol.A: 888-896, Poland, 1996.
- BLIGH, E. G. e DYER, W. J. A rapid method of total lipid extraction and purification. *Canadian Journal of Biochemical Physiology*, 37: 911-917, 1959.
- BOKI, K. e OHNO, S. Equilibrium isotherm equations to represent moisture sorption on starch. *Journal of Food Science*, 56(4): 1106-1110, 1991.

- BOQUET, R., CHIRIFE, J. e IGLESIAS, H. Equations for fitting water sorption isotherms of foods. *Journal of Food Technology*, 13: 319-327, 1978.
- BOROWSKI, A.M. e FRITZ, V.A. Comparison of moisture determination techniques over a range of sweet corn seed maturities. *Hortscience*, 25(3): 361, 1990.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W. e HALL, C. W. *Drying cereal grains*. Westport, Connecticut, 1974.
- BRUNELLO, G. e OLIVEIRA, W.S. Le séchage du sorgho en lit fluidisé. *Revista Brasileira de Engenharia*, nº especial 4, 1992.
- BURGMANS, J.L. e LILL, R.E. Sweet Corn: observations on supersweet cultivars for processing and fresh-market use in New Zealand. *New Zealand Journal of Experimental Agriculture*, 15: 199-203, 1987.
- CAPRISTE, G.H. e ROTSTEIN, E. Prediction of sorptional equilibrium data for starch-containing foodstuffs. *Journal of Food Science*, 47: 1501-1507, 1982.
- COURTOIS, F. LEBERT, A., DUQUENOY, A., LASSERAN, J.C. e BIMBENET, J.J. Modelling of drying in order to improve processing quality of maize. *Drying Technology*, 9(4): 927-945, 1991.
- CRANK, J. *The Mathematics of Diffusion*. 2ed. S.I. . Claredon Press Oxford, 414p., 1975.
- DURAL, N.H. e HINES, A.L. Adsorption of water on Cereal-Bread type dietary fibers. *Journal of Food Engineering*, 20: 17-43, 1993.

EMBRAPA - Programa Nacional de Pesquisa Milho . Brasília, 1981.

ESCARDINO, A.; RUIZ, F.; MIRA, F. Mecanismo y cinetica del secado de maiz en grano con aire caliente. *Revista de Agroquímica y Tecnologia de Alimentos*, 11(4): 541-548, 1971.

ESTRADA, J.A., LITCHFIELD, J.B. High humidity drying of corn: effect on drying rate and product quality. *Drying Technology*, 11(1): 65-84, 1993.

FALABELLA, M.C. ; AGUERRE, R.J. e SUARÉZ, C. Determination of the heat of water vapor sorption by means os eletronic hygrometers. *Lebensm.-Wiss.u.-Technol.*, 22: 11-14, 1989.

FANCELLI, A. L. e LIMA, U. A. *Milho: produção, pré-processamento e trnasformação agro-industrial*. São Paulo: Secrestaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia, 1982.

FORTES, M. e OKOS, M. R. Changes in Physical Properties of Corn During Drying. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, 4, 1980.

GEESON, J.D.; BROWNE, K.M.eGRIFFITHS, N.M. Quality changes in sweetcorn cobs of several cultivars during short-term ice-bank storage. *Journal of Horticultural Science*, 66(4): 409-414, 1991.

GLOBO RURAL: Milho Verde. Junho, 1994.

GONTARD, N. *Films et enrobages comestibles: étude et amélioration des propriétés du gluten*. Tese de doctorat, Academie de Montpellier. France, 1991.

- HERUM, F. L. *Corn: chemistry and technology*. American Association of cereal chemists, Inc.. St. Paul, Minnesota, 1987.
- HINDMARSH, K. When to harvest sweet corns. *Rural Researchs*, 104: 7-8, 1979.
- HUBINGER, M. D. Avaliação técnica e econômica de um processo de desidratação de cebolas pela combinação de prensagem e secagem com ar aquecido. Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos. Tese (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, 1984.
- IGLESIAS, H. A. e CHIRIFE, J. Isosteric heats of water vapor sorption on dehydrated foods. Part I. Analyses of the differential heat curves. *Lebensm. Wiss. Technol.*, 9:116-122, 1976a.
- IGLESIAS, H. A. e CHIRIFE, J. Equilibrium moisture contents of air dried beef dependence on drying temperature. *Journal of Food Technology*, 11: 565-573, 1976b.
- IGLESIAS, H. A. e CHIRIFE, J. *Handbook of isotherms: water sorption parameters for food and food components*. Nova Iorque, Academic Press, 1982.
- IGLESIAS, H.A.; CHIRIFE, J. e VIOLLAZ, P. Thermodynamics of water vapour sorption by sugar beet root. *Journal of Food Technology*, 11: 91-101, 1976.
- JOHNSON, W.H. e LAMP, B.J. *Principles, equipment and system for Corn Harvesting*. Ohio, 1966.

- JOWITT, R.; ESCHER, F.; HALLSTÖM, B.; MEFFERT, H.F.T.; SPIESS, W.E.L.; VOS, G. *Physical Properties of foods*. Applied Science Publishers, London and New York, 1983.
- KALWAR, M. I. ; KUDRA, T. ; RAGHAVAN, G. S. V. e MUJUMDAR, A. S. Drying of grains in a drafted two dimensional spouted bed. *Journal of Food Process Engineering*, 13: 321-332, 1991.
- LABUZA, T.P. The effect of water activity on reaction kinetics of food deterioration. *Food Technology*, 34(4): 36-41, 1980.
- LABUZA, T.P., KAAANANE, A. e CHEN, J.Y. Effect of temperature on the moisture sorption isotherms and water activity shift of two dehydrated foods. *Journal of Food Science*, 50: 385-391, 1985.
- LANE, J.H. e EYNON, L. *Off. Methods A.O.A.C.*. J. Soc. Chem. Ind., 42:32T-37T, London, 1923.
- MACHADO, M. C. M. S. T. *Estudo da composição química, características agronômicas e sensoriais de um novo cultivar de milho, com endosperma triplo mutante Sugary-Opaque 2-Waxy*. Campinas, 1988. 113p. (Tese de Mestrado) - FEA-Unicamp.
- MARSHALL, S. W. *Corn: chemistry and technology*. American Association of cereal chemists, Inc.. St. Paul, Minnesota, 1987.
- MAZZA, G. e LEMAGUER, M. Water sorption properties of yellow globe onion (*Allium Cepa* L.). *Canadian Institute Science Technology Journal*, 11(4): 189-193, 1978.

- MISRA, R. N. e BROOKER, D. B. Thin layer and rewetting equations for shelled yellow corn. *Transactions of the ASAE*, 23(5): 1254-1260, 1980.
- MYHARA, R. ; TAYLOR, M. e AL-BULUSHI, I. The moisture sorption isotherms of omani dates. *Drying'96-Proceedings of the 10th International Drying Symposium*, Vol. B: 989-996, 1996.
- NOREÑA, C.Z.; HUBINGER, M.D. e MENEGALLI, F.C. Técnicas básicas de determinação de atividade de água: uma revisão. *Boletim SBCTA*, 30(1): 91-96, jan/jul, 1996.
- OFFICIAL METHODS OF ANALYSIS OF THE ASSOCIATION OF OFFICIAL AGRICULTURAL CHEMISTS, 13th Edition, 1978.
- OGIHARA, L.A. *Determinação dos parâmetros de secagem de milho verde e ensaios de armazenamento*. Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos. Tese (mestrado)-Universidade Estadual de Campinas, 1989.
- OLSEN, J.K.; GILES, J.E. e JORDAN, R.A. Post-harvest carbohydrate changes and sensory quality of three sweet corn cultivars. *Scientia Horticulturae*, 44: 179-189, 1990.
- PARTI, M. e DUGMANS, I. Diffusion coefficient for corn drying. *Transactions of ASAE*, 33(5): 1652-1656, 1990.
- PINTO, L.A.A. e TOBINAGA, S. Modelos de secagem em camada fina de alimentos: uma revisão da literatura. *Vetor*, 6: 33-49, Rio Grande, 1996.
- RAPUSAS, R.S. e DRISCOLL, R.H. The thin-layer drying characteristics of white onion slices. *Drying Technology*, 13(8 & 9): 1905-1931, 1995.

- REYES, F.G.R.; GOIA, C.H. e SGARBIERI, V.C. Comparative study of cultivars 30 days after pollinization (30 DAP): characterization of starch. *Archivos Latinoamericanos de Nutricion*, 39(1): 36-45, 1989.
- REYES, F.G.R.; IGUTI, A.M. e SGARBIERI, V.C. Comparative study of maize cultivars 30 days after pollinization (30 DAP): carbohydrates and protein. *Archivos Latinoamericanos de nutricion*, 39(1): 27-35, 1989.
- RIZVI, S.S.H. Thermodynamic properties of foods in dehydration. *Engineering Properties of Foods*, (M.A. Rao e S.S.H. Rizvi, eds.), pp.265-279, Academic Press, New York, 1986.
- ROMERO, J.T. *Secagem de proteína texturizada de soja em leite estático e deslizante*. Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos. Tese (mestrado)-Universidade Estadual de Campinas, 1988.
- TOLABA, M. e SUAREZ, C. Simulation of the thin-layer drying of corn by means of the diffusion model. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, 21(2):83-86, 1988.
- SILVA, G.F. e ALSINA, O.L.S. Secagem de urucum em leite de jorro: estudo do modelo difusional. *Anais XXI Encontro sobre escoamento em meios porosos*, Vol.2, Ouro Preto, 1993.
- SILVA, R.Z.M. *Avaliação de condições de armazenamento na deterioração da qualidade de fatias de cebolas desidratadas*. Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, 1985. Tese (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas.

- SOPADE, P.A. e AJISEGIRI, E.S. Moisture sorption study on nigerian foods: maize and sorghum. *Journal of Food Process Engineering*, 17(1): 33-56, 1994.
- STEINKRAUS, K.H. e MacDONALD, G.E. Processing quick-cooking dehydrated sweet corn. *Food Technology*, 21: 84-88, 1967.
- STRUMILLO, C. e KUDRA, T. *Drying: principles, applications and design*. Gordon and Breach Science Publishers, 1986.
- SZENTMARJAY, T.; PALLAI, E. e SZEKRENYESSY, K. Product quality and operational parameters of drying. *Drying 96-Proceedings of the 10th International Drying Symposium*, vol.B: 839-846, Poland, 1996.
- TISCHER, R. G.; JERGER, E. W.; KEMPTHORNE, O.; CARLIN, A. F. e ZOELLNER, A. J. Influence of variety on quality of dehydrated sweet corn. *Food Technology*, 7: 223, 1953.
- TOLABA, M. P. e SUAREZ, C. Simulation of the thin-layer drying of corn by means of the diffusion model. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, 21(2): 83-85, 1988.
- TOLABA, M. e SUARÉZ, C. Expresiones analíticas para el cálculo de calores de sorción de cereales. *Anais do I Congresso Ibero-Americano de Engenharia de Alimentos*, Campinas, 1995.
- TOLEDO, F. F. Melhoramento e produção de milho. *Fundação Cargill*, vol.2, Campinas, 1987.

TOSELLO, G. A. Melhoramento e produção de milho. *Fundação Cargill*, vol.1, Campinas, 1987.

WATSON, E.L., GARLAND, M.R., TUNG, M.A. e MAURER, A.R. Dehydrated sweet corn quality. *Canadian Institute of Food Science Technology Journal*, 12(1): 1-6, 1979.

WATSON, S.A. *Corn: Chemistry and Technology*. American Association of Cereal Chemists, Inc., Minnesota, EUA, 1987.

WERES, J. e JAYAS, D.S. Thin-layer drying of corn: experimental validation of a new numerical structural model. *Canadian Agricultural Engineering*, 36(2): 85-91, 1994.

YOUNG, J. H. e NELSON, G. L. Theory of hysteresis between sorption and desorption isotherms in biological materials. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, Michigan, V.10, n.2, 260-263, 1967.

6.2 - Bibliografia Consultada

AMEOBI, J.B. e WOODS, J.L. Determination of moisture content in maize ears. *Drying Technology*, 11(5): 1093-1106, 1993.

AUNG, L.H. e FOUSE, D.C. The distribution of carbohydrates in the organs of *Sechium edule* Sw.. *Journal of Horticultural Science*, 66(2): 253-257, 1991.

BANDEL, G. *Melhoramento e produção de milho*. Fundação Cargill, vol.1, Campinas, 1987.

- BEKE, J. e MUJUMDAR, A.S. Influence of drying conditions on the fragility of corn kernels. *Drying Technology*, 11(3): 603-614, 1993.
- BRUNELLO, G.; NASCIMENTO, C.A.O. e SHIMIZU, P.A. The drying of rice grains in a vacuum dryer. *Third International Drying Symposium*, Vol.1, Inglaterra, 1982.
- CARVALHO, N. M. e NAKAGAWA, J. *Sementes: ciência, tecnologia e produção*. Fundação Cargill, 3 ed., Campinas, 1979.
- COOLINS, J.L.; ZHUS, S. e MOUNT, J.R. Sugar and soluble solids changes in refrigerated sweet corn (*Zea mays* L>). *Journal of Food Science*, 57(2): 454-457, 1992.
- DEAK, T., HEATON, E.K., HUNG, Y.C. e BEUCHAT, L.R. Extending the shelf life of fresh sweet corn by shrink-wrapping, refrigeration e irradiation. *Journal of Food Science*, 52(6): 1625-1631, 1987.
- DOANE, W.M. Opportunities and challenges for new industrial uses of starch. *Feature*, 39(8): 556-564, 1994.
- FORTES, R. A. Secagem e armazenamento. *Informe Agropecuário*. Belo Horizonte, EPAMIG, 6(72): 66-69, 1980.
- GONZALES, J.W.; RHODES, A.M. e DICKSON, D.B. Carbohydrate and enzymic characterization of a high sucrose sugary inbred line of sweet corn. *Plant Physiology*, 58: 28-32, 1976.

- KALWAR, M.I. e RAGHAVAN, G.S.V. Batch drying of shelled corn in two-dimensional spouted beds with draft plates. *Drying Technology*, 11(2): 339-354, 1993.
- KIRLEIS, A. W. e STROSHINE, R. L. Effects of hardness and drying air temperature on breakage susceptibility and dry-milling characteristics of yellow dent corn. *Cereal Chemistry*, 67(6): 523-528, 1990.
- LONCIN, M.; BIMBENET, J. J. e LENGUES, J. Influence of the activity of water on the spoilage of foodstuffs. *Journal of Food Technology*, 3 (2): 131-142, 1968.
- LOZANO, J. E.; ROTSTEIN, E. e URBICAN, M.J. Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents. *Journal of Food Science*, 48: 1497-1553, 1983.
- MADAMBA, P.S. ; DRISCOLL, R. H. e BUCKLE, K. A. Shrinkage, density and porosity of garlic during drying. *Journal of Food Engineering*, 23(3): 309-319, 1994.
- MAROUSIS, S. N. e SARAVACOS, G. D. Density and porosity in drying starch materials. *Journal of Food Science*, 55(5): 1367-1372, 1990.
- MATA, M.E.R.M.C. Secagem de sementes de milho à baixas temperaturas através de uma bomba de calor. *XXIV Encontro de Meios Porosos*, Uberlândia, 1996.
- Ministério do Interior-Contribuição ao Desenvolvimento da Agroind. *Milho*. Vol. 14. Campinas, 1974.

- MOREIRA, R.G. e BAKKER-ARKEMA, F.W. Unsteady-State simulation of a multi-stage concurrent-flow maize dryer. *Drying Technology*, 8(1): 61-75, 1990.
- MUJUMDAR, A. S. *Handbook of industrial drying*. Nova Iorque, 1987.
- MUJUMDAR, A. S. *Advances in drying*. Vol.1, Montreal, 1980.
- MUJUMDAR, A.S. *Advances in drying*. Vol.3, Montreal, 1984.
- NORMAS ANALÍTICAS DO INSTITUO ADOLFO LUTZ. *Métodos Químicos e Físicos para Análise de Alimentos*, 2ed.:24-25, Brasil, 1976.
- PARK, K.J. e OTAGA, N. Evaluation of density determination methods for grated coconut. *The 5th World Congress of Chemical Engineering*, Vol. VI: 301-306, California, 1996.
- PARK, K.J.; ALONSO, L.F.T.; RODRIGUES, R.A. e SCAVRONI, C.M.S. Desorption isotherms of red ginger (Sho-ga): experimental determination and evaluation of mathematical models. *Drying 96-Proceedings of the 10th International Drying Symposium*, vol.B: 1023-1028, Poland, 1996.
- PEPLINSKI, A. J. ; PAULSEN, M.R. ; ANDERSON, R.A. e KWOLEK, W.F. Physical, chemical and dry-milling characteristics of corn hybrids from various genotypes. *Cereal Chemistry*, 66(2): 117-120, 1989.
- PEPLINSKI, A.J. ; PAULIS, J.W. ; BIETZ, J.A. e PRATT, R.C. Drying of high-moisture corn: changes in properties and physical quality. *Cereal Chemistry*, 71(2): 129-133, 1994.

- POMERANZ, Y. e MELOAN, C.E. *Food Analysis: Theory and Practice*. The Avi Publishing Company, Inc., 1971.
- RAGHAVAN, V. G. S. *Handbook of industrial drying*. Nova Iorque, 1987.
- RISSE, L.A. e MCDONALD, R.E. Quality of Supersweet Corn Film-overwrapped in trays. *Hortscience*, 25(3): 322-324, 1990.
- RIZVI, S.S.H. e BENADO, A.L. Thermodynamic properties of dehydrated foods. *Food Technology*, 83-92, 1984.
- ROCKLAND, L. B. e STEWART, G. F. *Water activity: influences on food quality*. Nova Iorque, 1981.
- ROCKLAND, L. B. e BEUCHAT, L. R. *Water activity: theory and applications to food*. Chicago, 1986.
- ROCKLAND, L.B. Water activity and storage stability. *Food Technology*, 23: 11-21, 1969.
- SGARBIERI, V.C. A genética e a tecnologia a serviço da alimentação e da nutrição. *Revista Nutrição PUCCAMP*, 1(1): 45-55, Campinas, 1988.
- SGARBIERI, V.C. *Desenvolvimento de novas tecnologias cultivares de milho geneticamente em alimentação humana*. Projeto Funcamp c693, Campinas, 1991
- SIBLEY, K.J. e RAGHAVAN, S.V. Parameters affecting grain drying by immersion in a hot particulate medium. *Drying Technology*, 3 (1): 75-99, 1985.

- TRAVAGLINI, D. A.; NETO, M. P.; BLEINROTH, E. W. e LEITÃO, M.F.F. Banana-Passa: Princípios de secagem, conservação e produção industrial. *Manual Técnico n°12, ITAL*. Campinas, 1993.
- VIÉGAS, G. P. e PEETEN, H. *Melhoramento e produção de milho*. Fundação Cargill, vol.2, Campinas, 1987.
- ZOGZAS, N.P. ; MAROULIS, Z.B. e MARINOS-KOURIS, D. Densities, shrinkage and porosity of some vegetables during air drying. *Drying Technology*, 12(7): 1653-1666, 1994.

APÊNDICE A

Construção das Isotermas de Sorção do Milho Superdoce

A.1 - Ajustes dos Modelos Matemáticos para isotermas de adsorção, obtidas baseando-se no Método Direto - Projeto COST 90 (JOWITT *et al.*, 1983)

A.1.1 - Parâmetros das equações, coeficiente de correlação (R) e porcentagem de confiança (P), obtidos para as equações de BET, Halsey e Henderson, através do programa estatístico, Statistic version 5.0.

Tabela A.1 - Equação de BET

T (°C)	X_m	C	R	P (%)
25	0.0557	28.0729	0.9884	97.686
35	0.0453	32.8258	0.9701	94.116
45	0.0421	8.7419	0.9934	98.692
60	0.0470	1.7210	0.9951	98.900

Tabela A.2 - Equação de Halsey

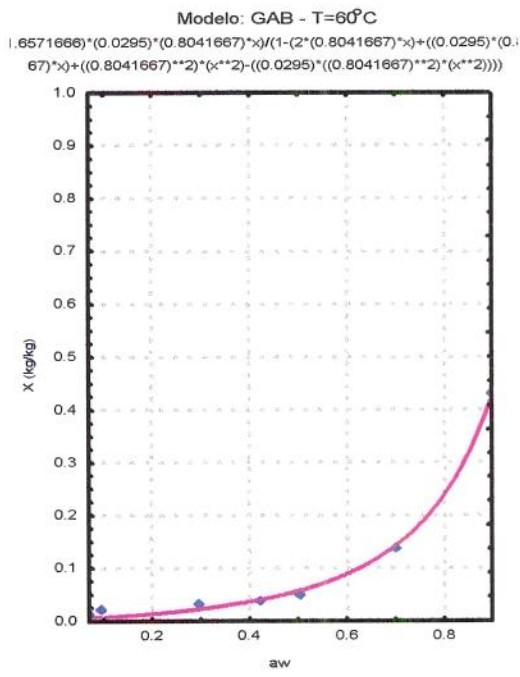
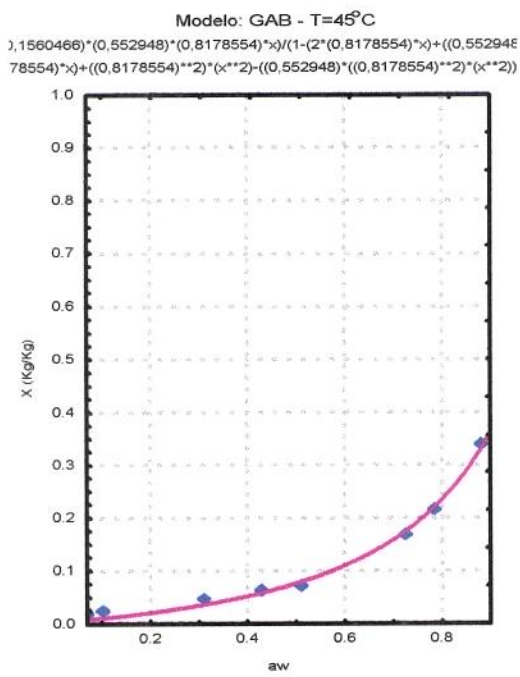
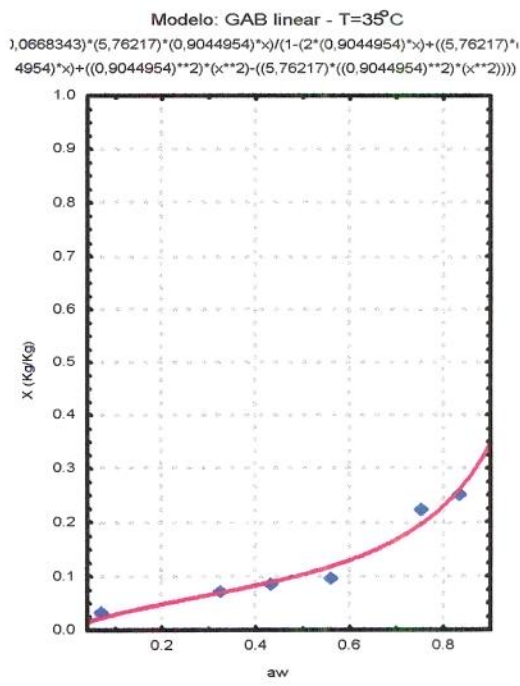
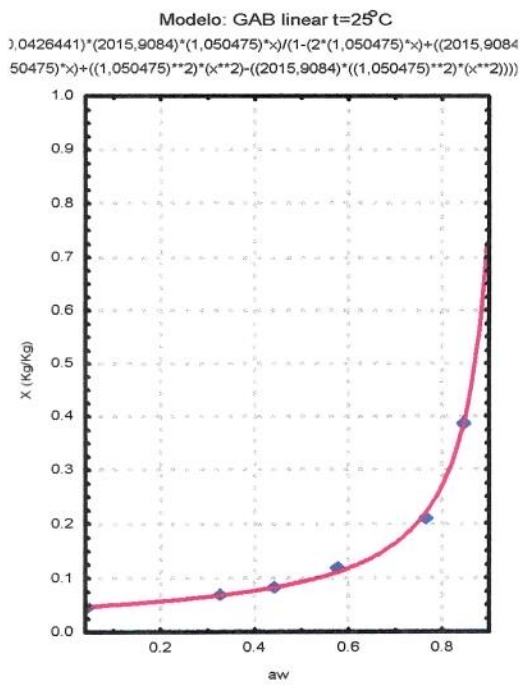
T (°C)	S	r	R	P (%)
25	0.0612	1.0171	0.9913	98.263
35	0.0297	1.3507	0.9792	95.884
45	0.0366	1.1573	0.9956	99.127
60	0.0135	1.4534	0.9955	99.099

Tabela A.3 - Equação de Henderson

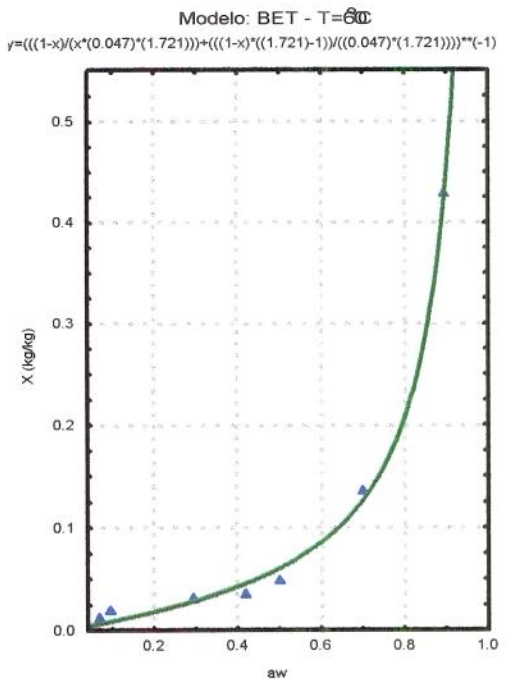
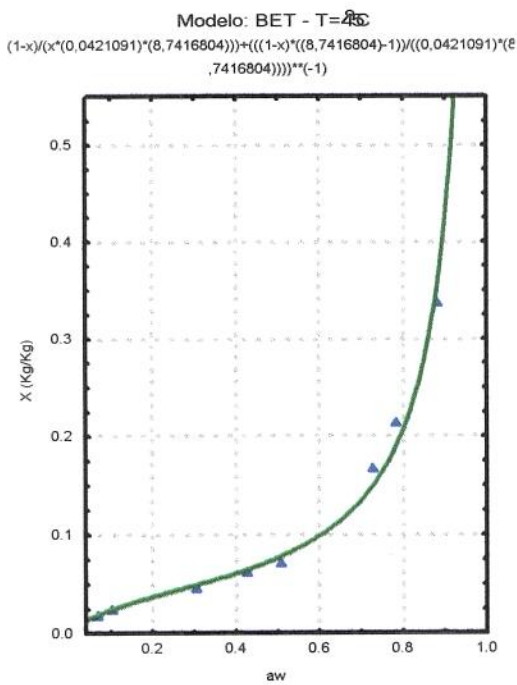
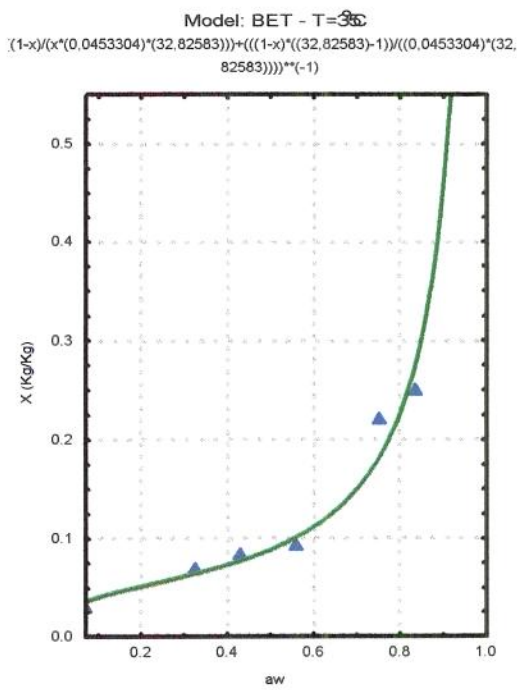
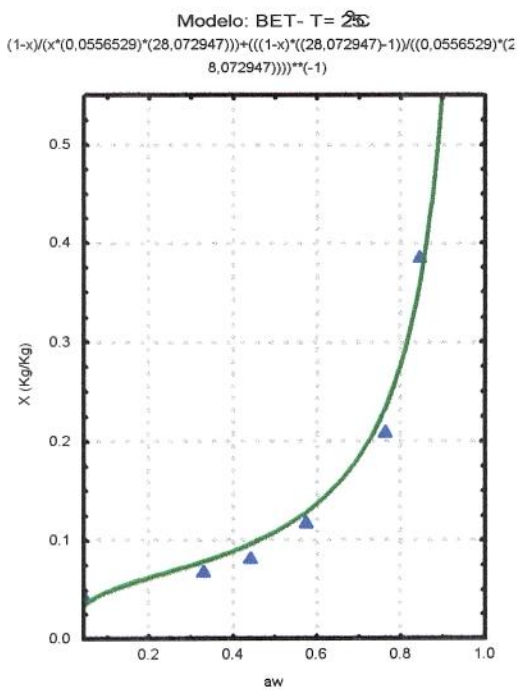
T (°C)	B	C	R	P (%)
25	0.0001	1.1612	0.9488	90.029
35	0.0084	-0.3589	0.9793	95.908
45	0.0002	1.1815	0.9834	96.716
60	0.0005	0.6600	0.9326	86.981

A.1.2 - Gráficos obtidos dos ajustes efetuados pelo programa Statistic version 5.0 (1995), para as equações citadas no item 2.4.2, nas diferentes temperaturas.

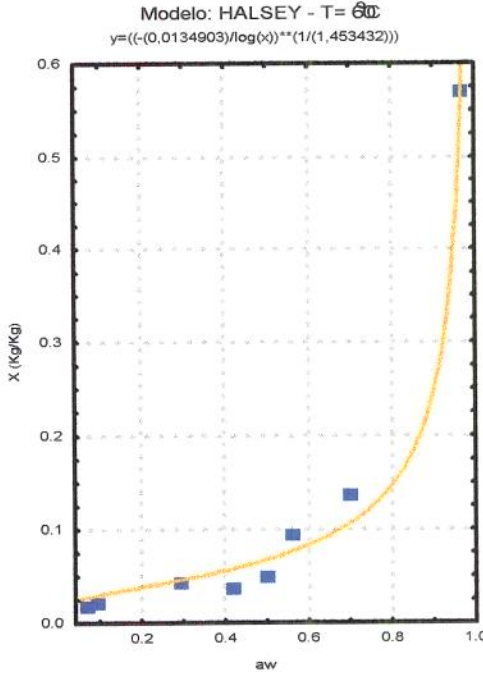
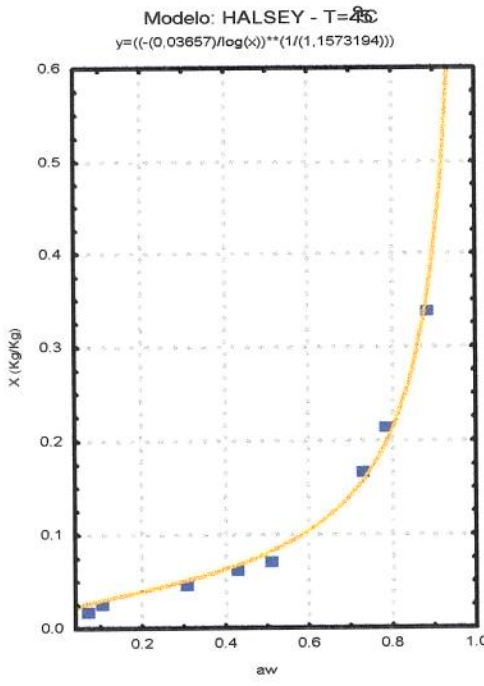
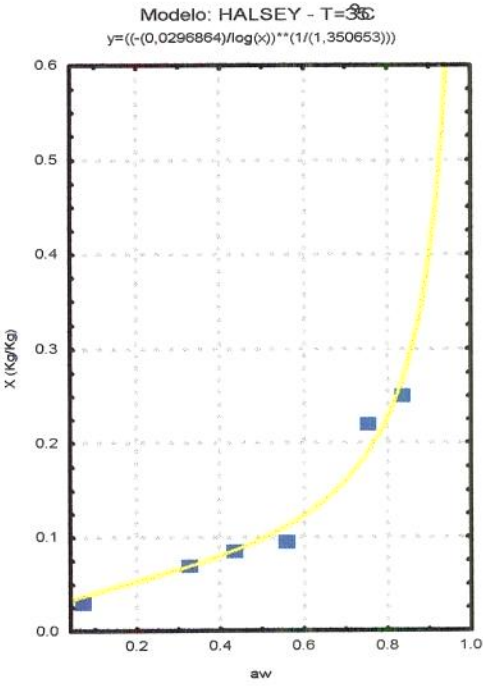
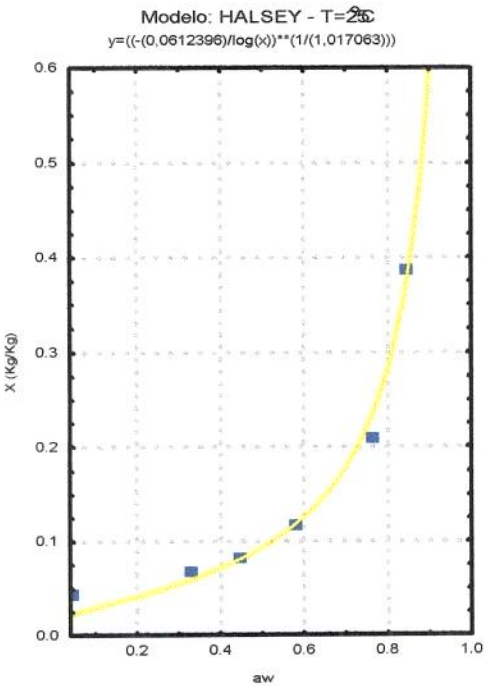
1) EQUAÇÃO DE GAB



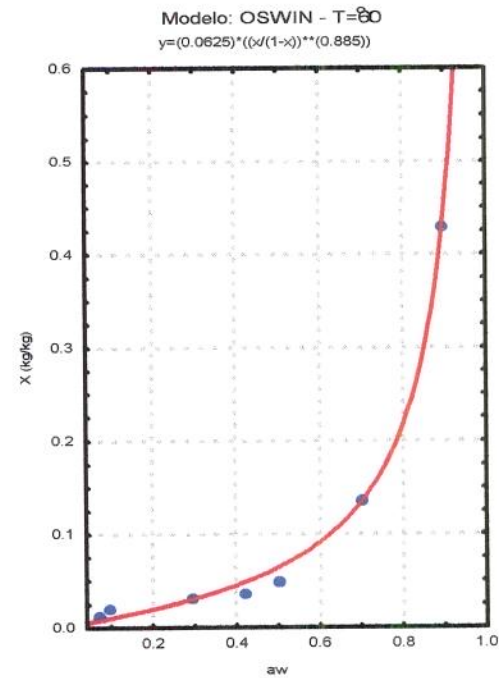
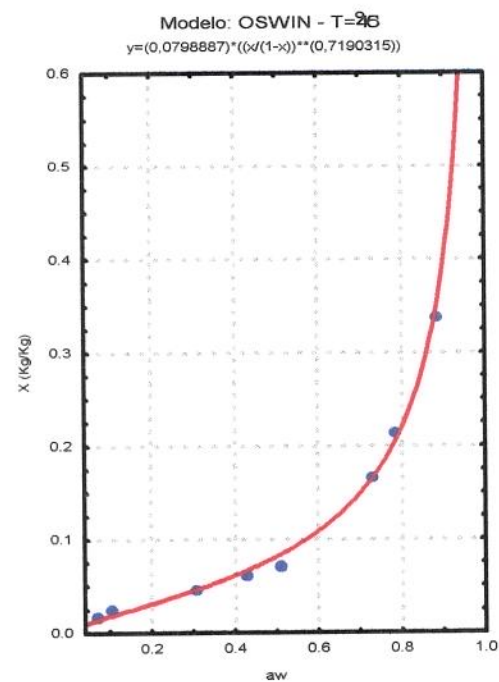
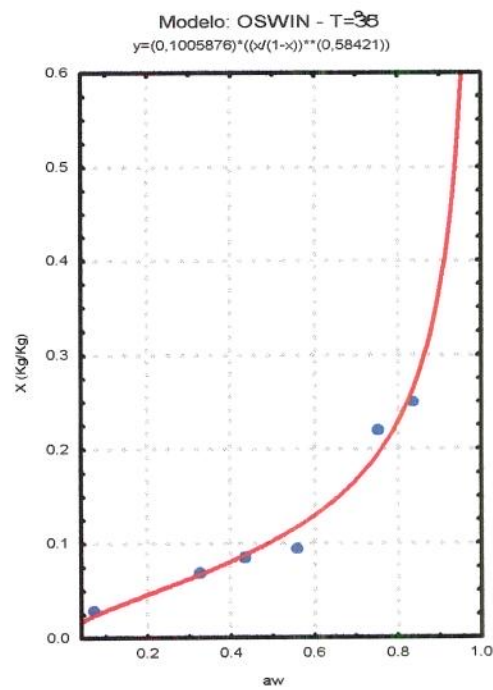
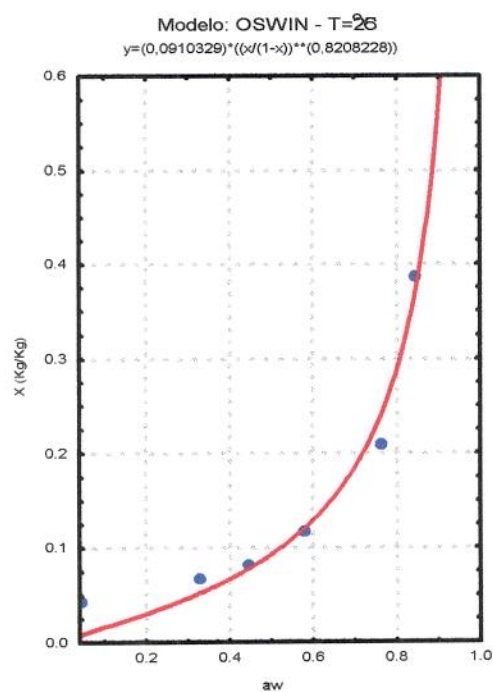
2) EQUAÇÃO DE BET



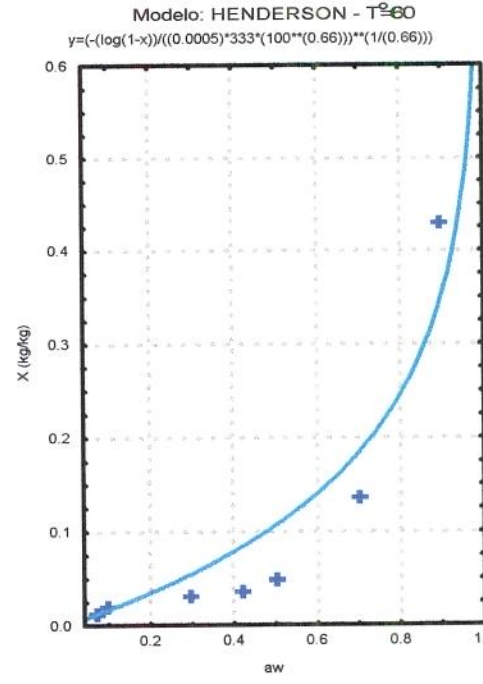
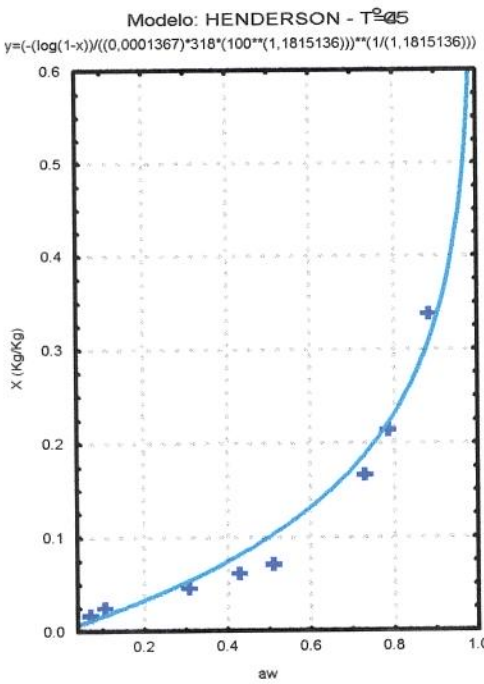
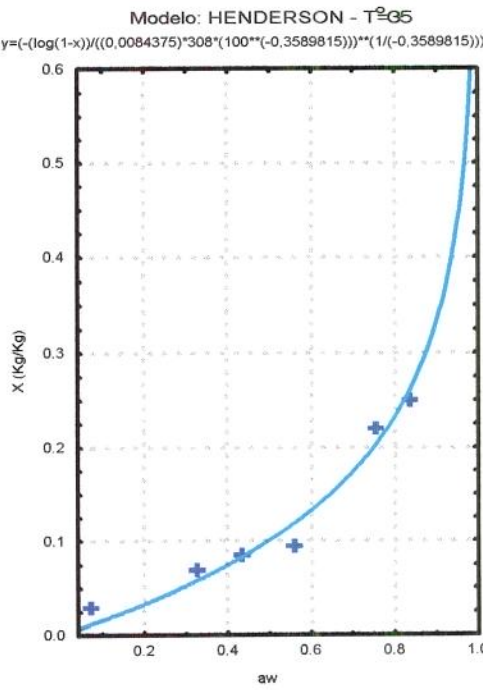
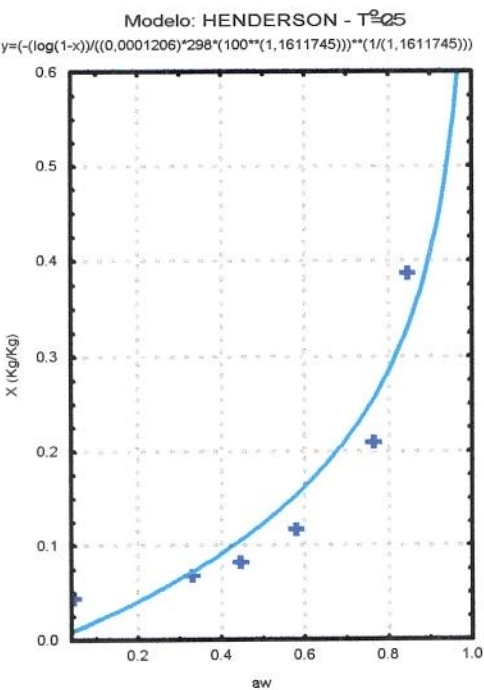
3) EQUAÇÃO DE HALSEY



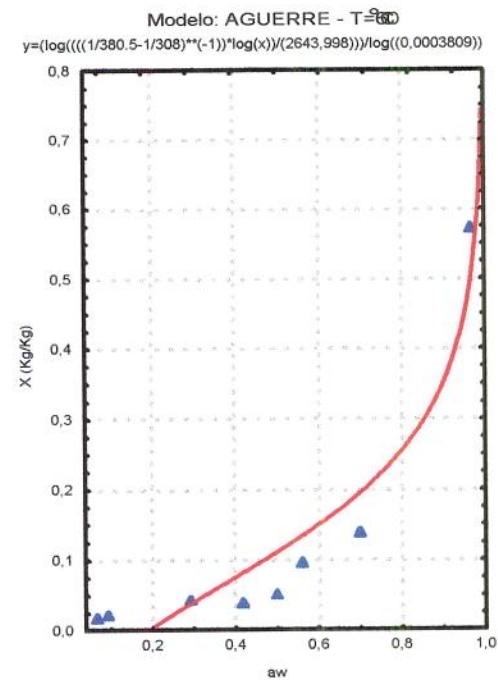
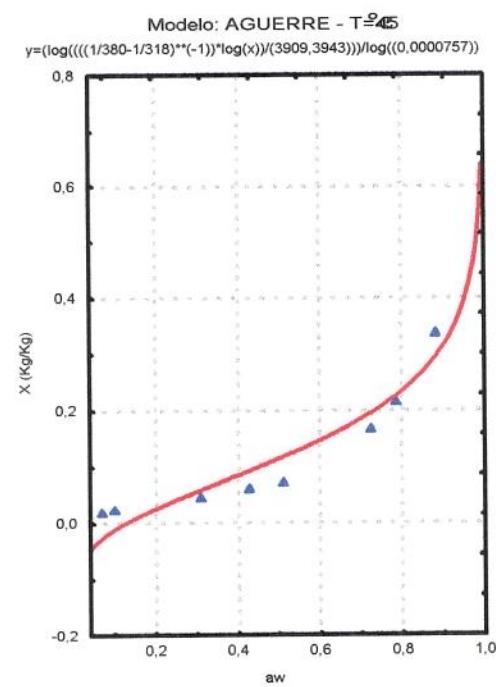
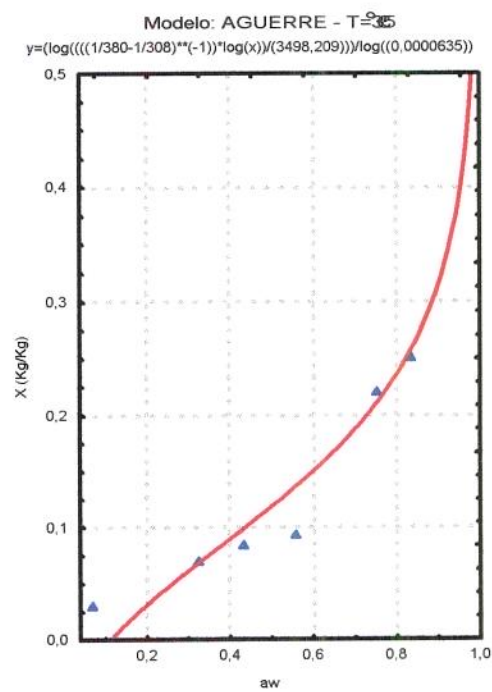
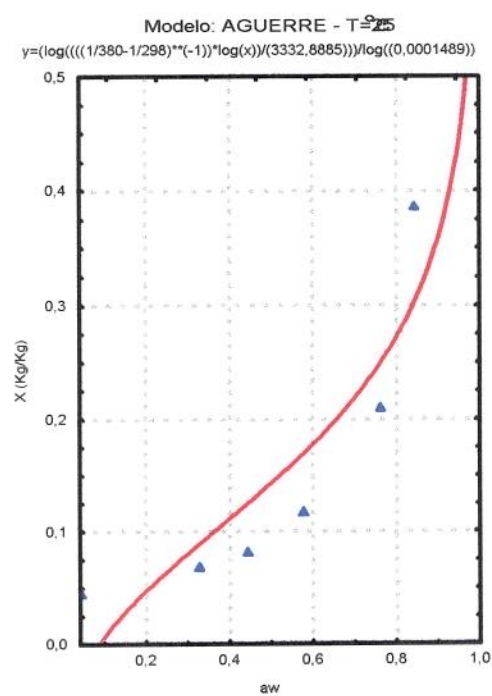
4) EQUAÇÃO DE OSWIN



5) EQUAÇÃO DE HENDERSON



6) EQUAÇÃO DE AGUERRE, SUARÉZ E VIOLLAZ (1986)

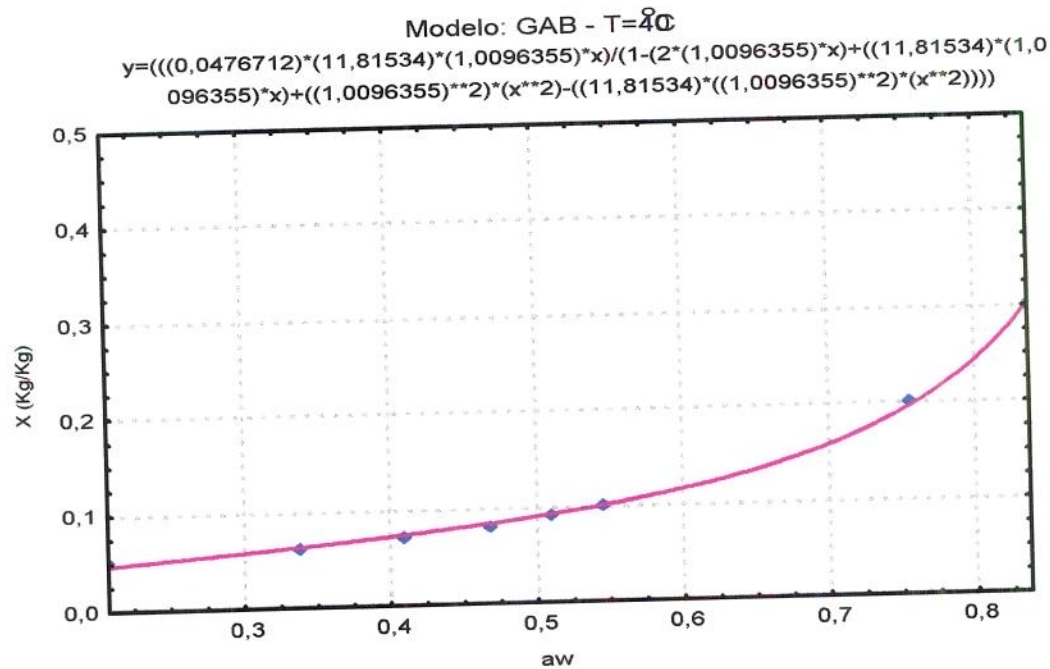


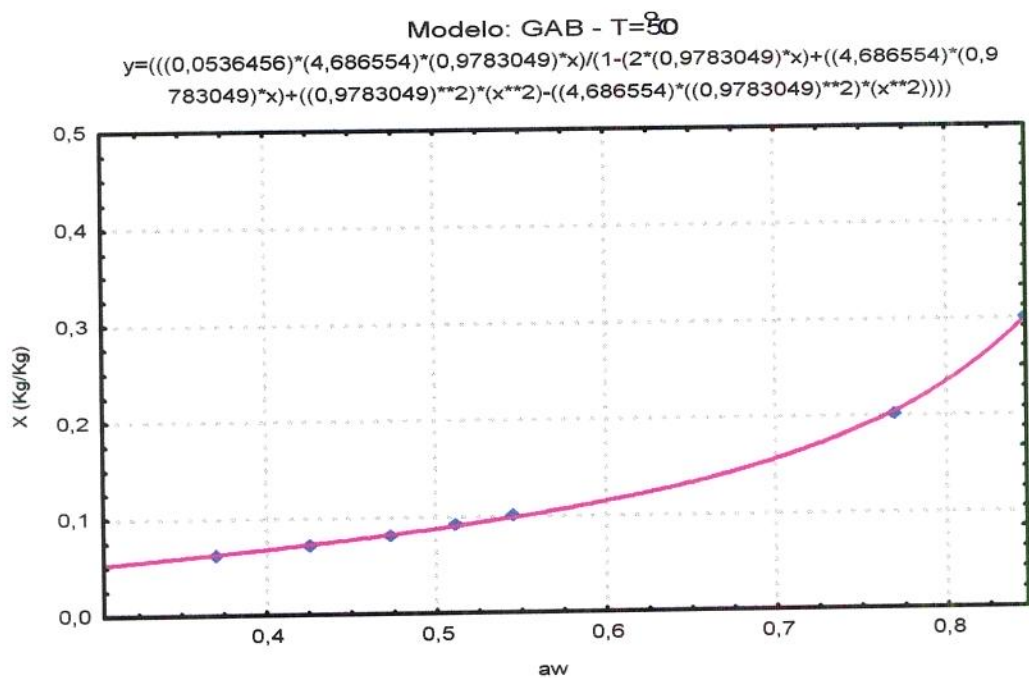
A.2 - Extrapolação das isothermas de adsorção

Tabela A.4 - Cálculos efetuados para a determinação das isothermas de adsorção do milho superdoce à 40° e 50°C

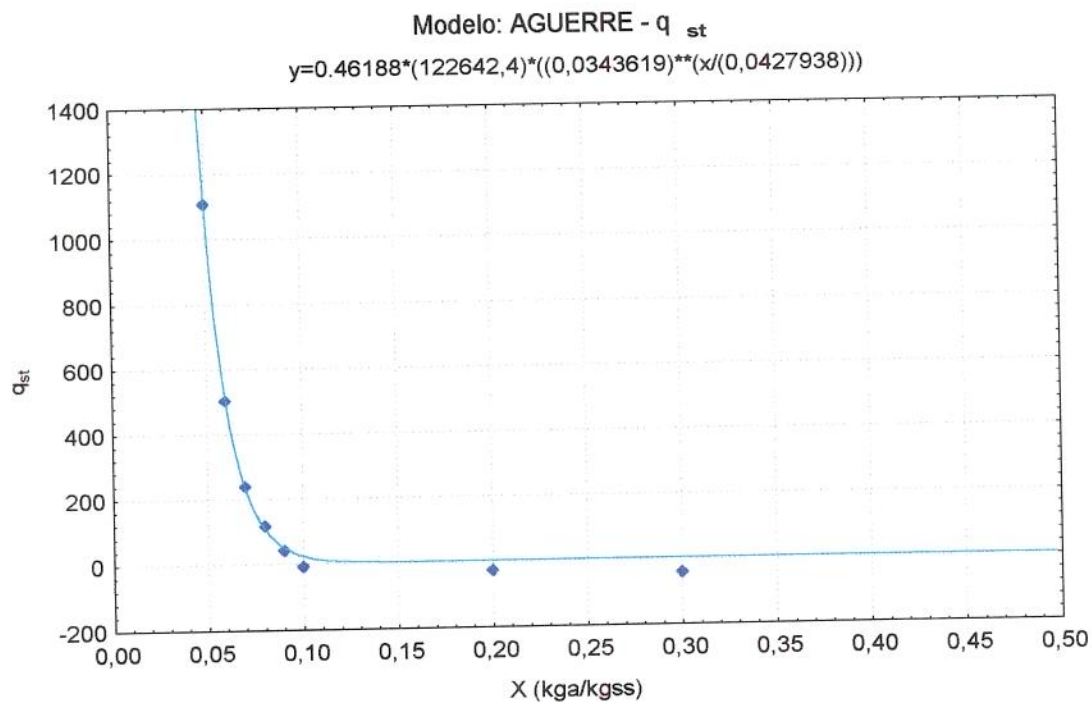
T=40°C			T=50°C		
Xi	lnawi	aw	Xi	lnawi	aw
0,05	-1,39723	0,20728	0,05	-1,18981	0,30428
0,06	-1,08485	0,33795	0,06	-0,99102	0,37120
0,07	-0,89189	0,40988	0,07	-0,85434	0,42556
0,08	-0,75928	0,46800	0,08	-0,74688	0,47384
0,09	-0,67237	0,51050	0,09	-0,67137	0,51101
0,10	-0,60490	0,54613	0,10	-0,60682	0,54508
0,20	-0,28004	0,75575	0,20	-0,30243	0,76902
0,30	-0,17893	0,83616	0,30	-0,19032	0,84669

A.2.1 - Ajustes das isothermas extrapoladas, obtidas pelo programa estatístico Statistica version 5.0 (1995)



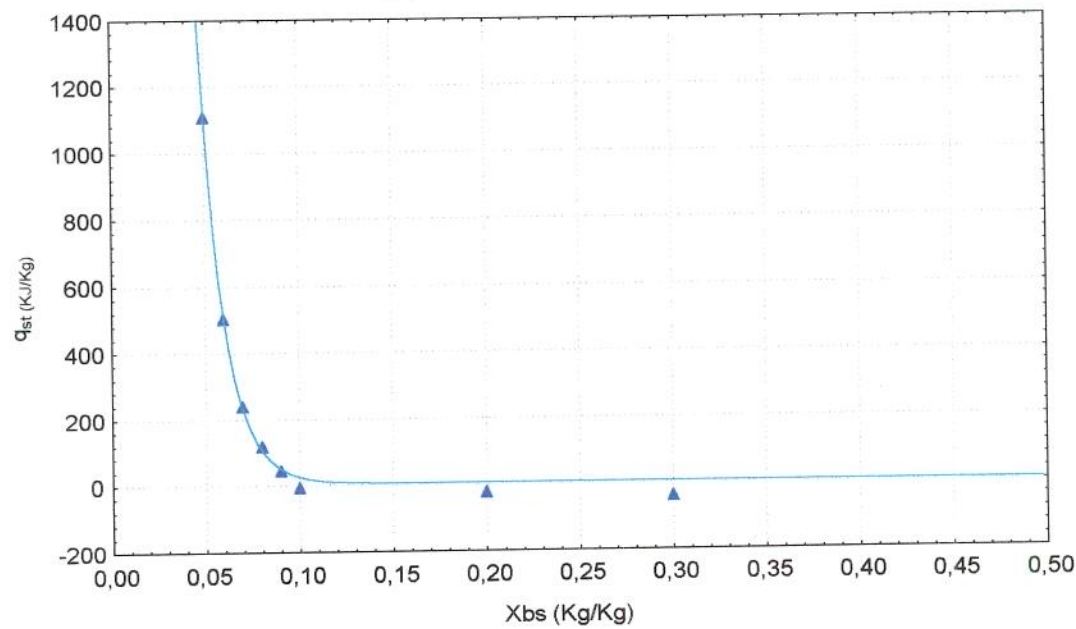


A.3 - Ajustes das equações para o calor isotérico de sorção versus o tempo, obtidos através do software estatístico, Statistica version 5.0 (1995)

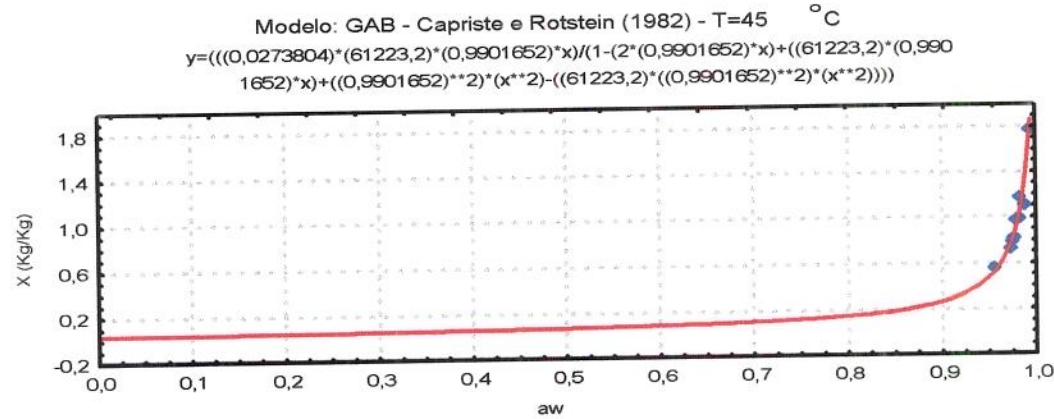
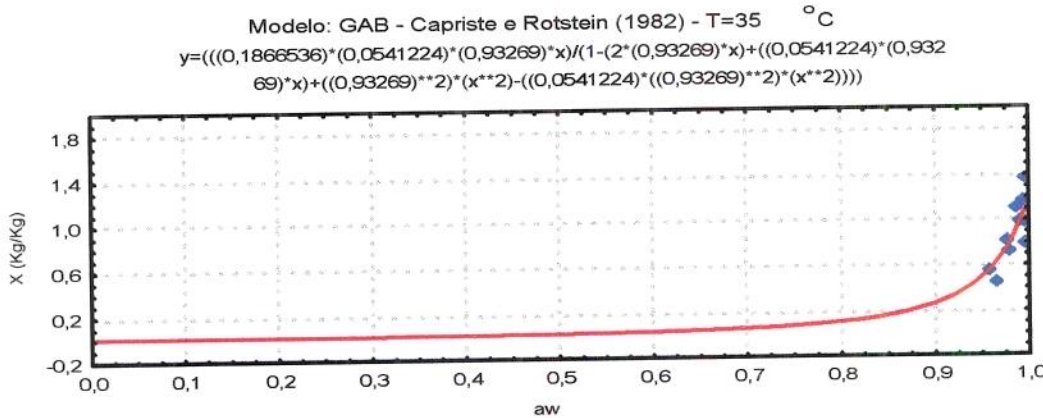
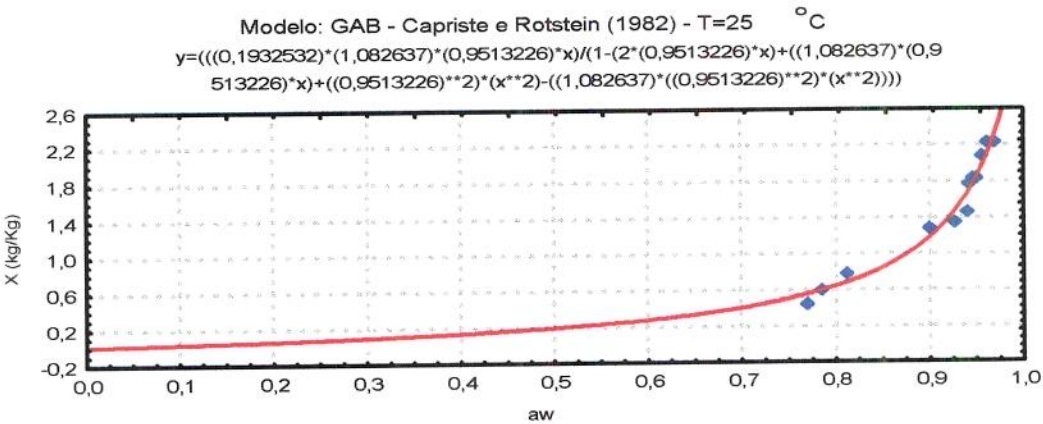


Modelo: SOPADE e AJISEGIRI (1994)

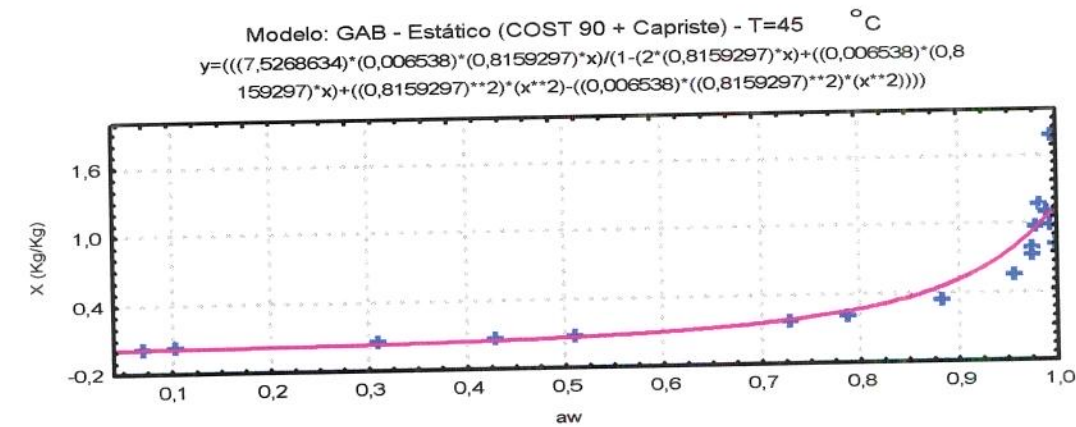
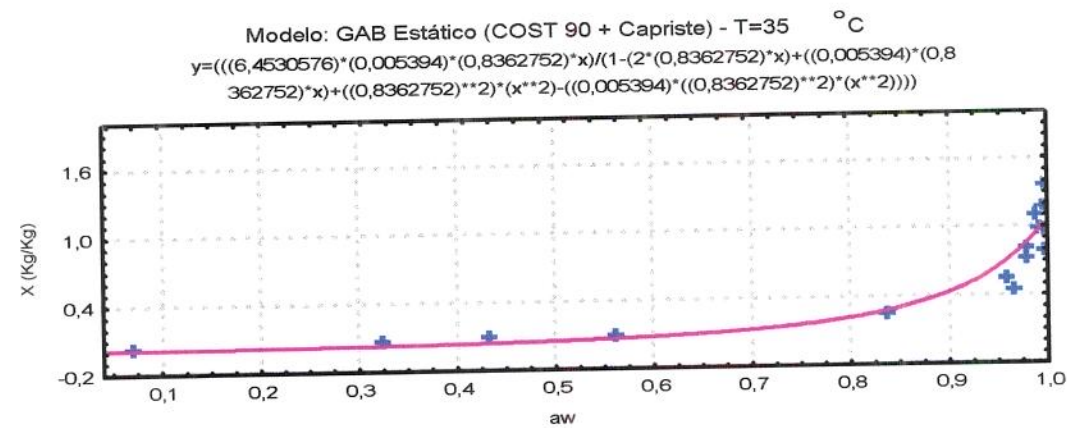
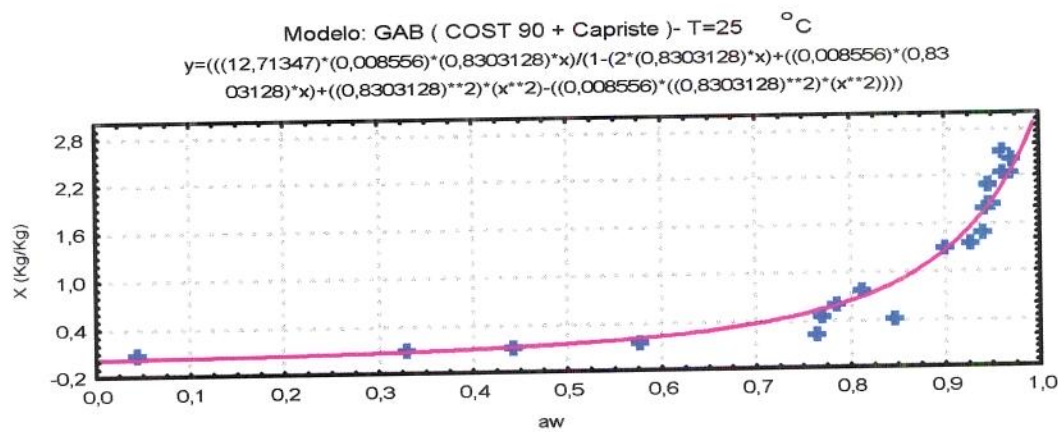
$$y=(56510,95)*\exp((-78,723255)*x)$$



A.4 - Ajuste da Equação de GAB nas isotermas de dessorção, obtidas à partir do método indireto, baseando-se no estudo de CAPRISTE e ROTSTEIN (1982), calculadas através do software estatístico Statistica version 5.0 (1995)



A.4 - União dos métodos (Projeto COST 90 (JOWITT *et al.* (1983) e o estudo de CAPRISTE e ROTSTEIN (1982)): ajuste dos dados, pela Equação de GAB, obtidos pelo software estatístico Statistica version 5.0 (1995)



APÊNDICE B

Secagem do milho Superdoce

B.1 - Tabelas das experiências efetuadas para a obtenção das curvas de secagem

EXPERIÊNCIA 01

Data: 23 / julho / 96

mbandeja= 366.38 g

L = 1 cm

mbandeja+milho= 591.88 g

tipo: Milho Superdoce

Xo= 70 % (bu)

Xf= 4 %

Tent, bs = 50 C

Dh (mmH₂O)= 173

t (min)	X/Xo	massa (g)	Xi=f(Xo)	Xi=f(Xf)	Tent,bs	Tsaida,bs	Tbu,saida	X _r
0	1,00	222,84	2,29	2,23	21,50	50,00	23,40	1,01
5	0,81	194,50	1,88	1,82		45,90	23,10	0,81
10	0,70	176,84	1,61	1,57		47,50	23,60	0,70
15	0,63	165,39	1,44	1,40		47,40	24,80	0,63
20	0,56	155,50	1,30	1,26		47,90	23,50	0,55
25	0,51	147,39	1,18	1,14		48,70	24,10	0,51
30	0,47	140,55	1,08	1,04		49,40	24,80	0,47
35	0,43	134,95	0,99	0,96		49,20	24,60	0,43
40	0,39	128,61	0,90	0,87		49,10	24,10	0,39
45	0,35	122,31	0,81	0,77		49,40	24,00	0,35
50	0,32	117,35	0,73	0,70		49,30	24,00	0,32
55	0,29	113,14	0,67	0,64		49,20	24,30	0,29
60	0,27	109,06	0,61	0,58		50,50	24,70	0,26
70	0,22	102,36	0,51	0,49		49,70	24,10	0,22
80	0,17	94,00	0,39	0,36	22,00	50,70	24,40	0,18
90	0,14	88,74	0,31	0,29		50,70	24,40	0,16
100	0,11	84,67	0,25	0,23		52,20	24,90	0,13
110	0,10	83,99	0,24	0,22		51,90	24,90	0,11
120	0,09	82,23	0,22	0,19	23,00	51,50	24,50	0,10
130	0,08	80,34	0,19	0,17	22,50	51,70	25,20	0,08
140	0,07	78,89	0,17	0,14		51,60	25,20	0,07
150	0,07	78,68	0,16	0,14		51,50	30,30	0,07
165	0,06	77,14	0,14	0,12	23,00	52,70	27,60	0,06
180	0,05	76,07	0,12	0,10	22,80	52,70	24,30	0,05
210	0,03	72,37	0,07	0,05	23,10	53,10	25,30	0,04
240	0,03	72,24	0,07	0,05	22,90	52,40	25,00	0,03
270	0,02	70,57	0,04	0,02	22,00	51,90	24,30	0,03
300	0,02	70,19	0,04	0,02	21,50	52,20	24,20	0,03
330	0,02	70,03	0,04	0,02		51,80	24,40	0,02

EXPERIÊNCIA 02

Data: 24 / julho / 96

L = 1 cm

tipo: Milho Superdoce

Xo=67%(b)

carga =

Tent, bs = 50,5 C

Dh (mmH₂O)= 173

mbandeja(g) = 366.44

mbandeja+milho

(g)=556.08

mmilho=

Xf=3.00

	X / Xo	massa (g)	X=f (Xf)	X=f (Xo)	Tsaida,bs	Tbu,saida	X _r
0	1,29	189,64	2,13	2,03	50,70	22,90	0.93
5	0,99	159,93	1,64	1,56	49,30	23,00	0.68
10	0,85	146,15	1,41	1,34	48,30	23,20	0.57
15	0,75	135,95	1,24	1,17	48,50	23,40	0.48
20	0,67	128,04	1,11	1,05	49,30	23,70	0.42
25	0,60	121,00	1,00	0,93	49,10	23,80	0.36
30	0,53	115,00	0,90	0,84	48,70	23,70	0.31
35	0,48	109,49	0,81	0,75	49,10	24,00	0.26
40	0,43	104,73	0,73	0,67	48,50	24,40	0.22
45	0,38	100,26	0,66	0,60	48,30	23,90	0.18
50	0,35	96,44	0,59	0,54	48,00	25,10	0.15
55	0,31	92,76	0,53	0,48	48,60	24,30	0.12
60	0,28	89,80	0,48	0,43	48,90	24,30	0.10
65	0,25	87,08	0,44	0,39	49,20	24,30	0.07
70	0,22	84,33	0,39	0,35	48,30	24,20	0.05
74	0,20	81,82	0,35	0,31	48,50	24,10	0.03
80	0,18	80,31	0,33	0,28	48,60	24,30	0.02
90	0,14	76,76	0,27	0,23	49,20	24,60	-0.01
100	0,12	74,35	0,23	0,19	49,20	24,40	-0.03
110	0,10	72,39	0,20	0,16	49,20	24,10	-0.05
120	0,08	70,59	0,17	0,13	52,60	25,00	-0.06
135	0,06	68,76	0,14	0,10	52,50	24,60	-0.08
140	0,06	68,09	0,12	0,09	52,20	23,80	-0.08
150	0,05	67,12	0,11	0,07	53,50	25,40	-0.09
170	0,03	65,89	0,09	0,05	52,70	25,30	-0.10
200	0,02	64,68	0,07	0,03	50,30	24,80	-0.11
230	0,01	63,56	0,05	0,02	49,90		-0.12
260	0,01	63,21	0,04	0,01	50,80	24,70	-0.13
290	0,00	62,62	0,03	0,00	50,30	24,70	-0.13
300	0,00	62,62	0,03	0,00	49,20	24,40	-0.13
310	0,00	62,52	0,03	0,00	51,40	24,50	-0.13
320	0,00	62,46	0,03	0,00	49,10	24,70	-0.13
330	0,00	62,45	0,03	0,00	49,00	24,40	-0.13

EXPERIÊNCIA 03

Data: 31 / julho / 96

L = 1 cm

tipo: milho superdoce

Xo= 66 %

carga =

Tent, bs = 40 C

Dh(mmH₂O)= 173 mm

mbandeja= 366.38 g

mbandeja+milho= 536.22 g

Xf= 6 %

t (min)	X/Xo	massa (g)	Xi=f(xo)	Xi=f(xf)	Tent,bs	Tsaida,b	Tbu,saida	X _r
0	1,00	169,84	1,94	2,14	43,30	43,30	24,60	1,00
5	0,80	147,49	1,55	1,72		40,90	24,20	0,80
10	0,70	136,06	1,36	1,51		41,40	24,60	0,69
15	0,62	127,59	1,21	1,36		41,90	24,90	0,62
20	0,57	121,27	1,10	1,24		41,70	24,70	0,56
25	0,51	115,11	0,99	1,13		42,50	24,60	0,50
30	0,46	109,73	0,90	1,03		43,20	24,70	0,45
35	0,42	104,71	0,81	0,93		42,90	25,00	0,41
40	0,39	101,06	0,75	0,87		43,20	25,00	0,37
45	0,36	98,39	0,70	0,82		43,00	24,60	0,35
50	0,33	94,70	0,64	0,75		42,70	24,70	0,32
55	0,30	91,39	0,58	0,69		43,40	24,90	0,29
60	0,28	88,60	0,53	0,64		43,20	24,90	0,26
70	0,23	83,05	0,44	0,53		43,40	25,20	0,21
80	0,19	79,41	0,38	0,47		43,60	25,20	0,18
90	0,17	76,23	0,32	0,41		43,60	25,20	0,15
100	0,13	72,56	0,26	0,34		43,90	25,30	0,11
110	0,11	70,35	0,22	0,30		44,20	25,40	0,09
120	0,10	68,50	0,19	0,27		44,30	25,50	0,08
130	0,08	66,84	0,16	0,23		44,10	25,50	0,06
160	0,05	63,28	0,10	0,17		43,90	25,70	0,03
190	0,03	61,04	0,06	0,13		43,10	25,80	0,01
220	0,02	59,71	0,03	0,10		43,90	25,80	0,00
250	0,01	58,69	0,02	0,08		44,00	25,50	0,00
280	0,00	58,11	0,01	0,07		43,50	25,50	0,00
310	0,00	58,03	0,00	0,07		44,10	26,20	0,00
340	0,00	57,60	0,00	0,06		44,40	25,90	0,00

EXPERIÊNCIA 04

Data: 01 / agosto / 96

mbandeja= 366.40 g

L = 1 cm

mbandeja+milho= 563.66 g

tipo: milho superdoce

Xo= 66 %

Xf= 5 %

carga =

Tent, bs = 40 C

Dh(mmH₂O)= 173 mm

t (min)	X/Xo	massa(g)	X=f(Xo)	X=f(xf)	Tent,bs	Tsaida,bs	Tbu,saida	X _r
0	1,00	203,22	1,94	2,02	42,10	42,10	22,20	1.00
2	0,92	191,00	1,76	1,84		36,80	21,30	0.95
5	0,82	178,33	1,58	1,65		38,10	21,70	0.85
10	0,73	165,55	1,40	1,46		38,90	22,00	0.75
15	0,66	156,00	1,26	1,32		40,40	22,10	0.67
20	0,60	148,45	1,15	1,21		41,00	22,30	0.61
25	0,55	141,63	1,05	1,10		40,30	22,30	0.56
30	0,51	136,11	0,97	1,02		40,60	22,10	0.51
35	0,47	130,55	0,89	0,94		40,00	22,20	0.47
40	0,44	126,00	0,82	0,87		40,60	22,30	0.43
45	0,41	121,89	0,76	0,81		40,60	22,10	0.40
50	0,37	117,54	0,70	0,75		41,20	22,10	0.37
55	0,35	114,00	0,65	0,69		40,10	22,20	0.34
60	0,32	111,04	0,61	0,65		40,20	22,20	0.31
70	0,28	104,66	0,51	0,56		39,50	22,30	0.26
80	0,24	99,69	0,44	0,48		39,80	22,30	0.22
90	0,21	95,40	0,38	0,42		41,90	22,30	0.19
100	0,18	91,99	0,33	0,37		41,00	22,40	0.16
110	0,16	88,86	0,29	0,32		40,30	22,50	0.14
120	0,14	86,72	0,26	0,29		40,10	22,60	0.12
150	0,10	80,98	0,17	0,20		41,30	22,60	0.08
180	0,08	77,70	0,12	0,15		42,00	23,00	0.05
210	0,06	75,54	0,09	0,12		40,60	23,00	0.03
240	0,05	74,29	0,08	0,10		42,30	23,20	0.02
300	0,04	72,84	0,05	0,08		38,90	21,60	0.01
330	0,04	72,56	0,05	0,08		39,40	22,40	0.01
360	0,03	71,88	0,04	0,07		38,80	21,90	0.00
390	0,03	71,34	0,03	0,06		40,00	21,60	0.00
420	0,03	71,28	0,03	0,06		39,70	21,20	0.00
450	0,03	70,97	0,03	0,05		40,40	21,50	0.00
480	0,03	70,84	0,03	0,05		38,80	21,90	0.00

EXPERIÊNCIA 05

Data: 05 / agosto / 96

mbandeja= 366.38 g

L = 1 cm

mbandeja+milho= 599.28 g

tipo: milho superdoce

Xo= 68 %

Xf= 3.5 %

carga =

Tent, bs = 60 C

Dh(mmH₂O)= 172 mm

t (min)	X/Xo	massa(g)	X=f(Xo)	X=f(xf)	Tent,bs	Tsaida,bs	Tbu,saida	X _r
0	1,00	232,90	2,13	2,18	60,30	60,30	28,30	1.00
3	0,83	205,95	1,76	1,81	61,20	55,00	27,00	0.83
5	0,76	194,84	1,61	1,66	61,00	56,30	27,10	0.76
10	0,66	178,85	1,40	1,44	60,20	56,60	27,40	0.65
15	0,57	165,42	1,22	1,26	60,20	56,90	27,30	0.57
20	0,50	154,73	1,08	1,11	59,60	56,40	27,40	0.50
25	0,45	145,39	0,95	0,98	60,10	57,80	27,40	0.44
30	0,40	137,84	0,85	0,88	60,10	58,00	27,50	0.39
35	0,35	129,61	0,74	0,77	60,10	58,30	27,60	0.34
40	0,31	123,24	0,65	0,68	59,90	57,80	27,50	0.30
45	0,27	117,61	0,58	0,60	60,20	58,20	27,50	0.27
50	0,25	113,47	0,52	0,55	60,30	58,00	27,40	0.24
55	0,21	108,07	0,45	0,47	60,10	57,70	27,70	0.21
60	0,19	104,32	0,40	0,42	60,10	57,90	27,50	0.18
70	0,15	97,85	0,31	0,33	60,30	58,10	27,70	0.14
80	0,11	92,77	0,24	0,27	60,20	58,60	28,00	0.11
90	0,09	89,13	0,20	0,22	60,30	58,50	28,20	0.09
100	0,07	86,20	0,16	0,18	59,90	58,80	28,00	0.07
110	0,06	84,24	0,13	0,15	60,30	59,10	28,10	0.06
120	0,05	82,67	0,11	0,13	60,00	58,90	28,10	0.05
130	0,04	81,42	0,09	0,11	60,70	59,70	28,40	0.04
140	0,04	80,29	0,08	0,09	60,10	59,00	28,00	0.03
150	0,03	79,59	0,07	0,09	60,10	59,20	28,20	0.03
160	0,03	78,78	0,06	0,07	60,20	59,20	28,40	0.02
190	0,02	77,58	0,04	0,06	60,40	59,40	28,10	0.01
220	0,01	76,66	0,03	0,05	60,50	59,60	28,20	0.01
240	0,01	76,27	0,02	0,04	60,50	59,50	28,30	0.01
260	0,01	76,04	0,02	0,04	60,00	59,20	28,30	0.00
270	0,01	75,99	0,02	0,04	60,10	59,30	28,10	0.00

EXPERIÊNCIA 06

Data: 07 / agosto / 96

mbandeja= 366,45 g

L = 1 cm

mbandeja+milho= 552,77 g

tipo: milho superdoce

Xo= % 66,38%

Xf= 6.19 %

carga =

Tent, bs = 60 C

Dh(mmH₂O)= 173 mm

t (min)	X/Xo	massa(g)	X=f(Xo)	X=f(xf)	Tent,bs	Tsaida,bs	Tbu,saida	X _r
0	1,01	186,32	2,03	2,39	60,17	59,95	30,50	1.01
2,50	0,86	168,21	1,74	2,06	60,75	54,99	29,50	0.86
5	0,78	158,77	1,58	1,89	60,94	56,25	30,10	0.78
10	0,67	144,83	1,36	1,64	61,04	58,00	30,70	0.66
15	0,59	134,54	1,19	1,45	61,14	58,10	30,70	0.59
20	0,52	126,23	1,05	1,30	60,75	58,49	30,60	0.52
25	0,47	119,20	0,94	1,17	60,65	58,88	30,50	0.46
30	0,41	112,54	0,83	1,05	60,56	58,78	30,70	0.41
35	0,36	105,88	0,72	0,93	60,17	57,13	30,60	0.35
40	0,32	101,63	0,65	0,85	60,56	57,42	30,70	0.32
45	0,29	96,88	0,58	0,76	60,65	57,81	30,60	0.28
50	0,26	93,13	0,51	0,70	60,27	57,42	30,40	0.25
55	0,22	88,72	0,44	0,62	60,27	57,23	30,20	0.21
60	0,20	85,67	0,39	0,56	60,65	59,08	30,40	0.19
70	0,15	79,75	0,30	0,45	60,85	56,25	30,70	0.14
80	0,11	75,36	0,23	0,37	60,94	56,45	30,90	0.11
90	0,08	71,89	0,17	0,31	60,85	60,54	30,80	0.08
100	0,06	68,74	0,12	0,25	60,75	57,81	30,70	0.05
110	0,04	66,65	0,08	0,21	60,85	59,85	30,70	0.04
120	0,03	64,85	0,05	0,18	60,46	57,61	30,40	0.02
130	0,02	63,61	0,03	0,16	60,27	58,30	30,40	0.01
150	0,00	61,73	0,00	0,12	60,85	59,66	30,80	0.00
180	-0,01	59,73	-0,03	0,09	60,56	59,17	31,40	-0.02
210	-0,02	58,60	-0,05	0,07	61,43	57,91	31,80	-0.03
240	-0,03	57,80	-0,06	0,05	61,04	59,66	31,40	-0.04
260	-0,02	58,53	-0,05	0,07	60,56	60,24	31,90	-0.03

EXPERIÊNCIA 07

Data: 16 / agosto / 96

mbandeja= 366.37 g

L = 1 cm

mbandeja+milho= 568.99 g

tipo: milho superdoce

Xo= 62.77 %

Xf= 7.1 %

carga =

Tent, bs = 50 C

Dh(mmH₂O)= 173 mm

t (min)	X/Xo	massa(g)	X=f(Xo)	X=f(xf)	Tent,bs	Tsaida,bs	Tbu,saida	X _r
0	1,02	202,62	1,69	2,16	50,29	50,51	25,10	1,02
5	0,83	179,51	1,38	1,80	50,19	48,17	26,40	0,83
10	0,75	168,62	1,24	1,63	50,48	48,27	26,90	0,74
15	0,68	159,74	1,12	1,49	50,48	49,53	27,20	0,67
20	0,62	153,18	1,03	1,39	50,29	48,85	27,10	0,62
25	0,56	145,85	0,93	1,27	50,29	49,04	26,30	0,56
30	0,52	140,61	0,86	1,19	50,39	48,65	27,10	0,52
35	0,48	135,22	0,79	1,11	50,48	49,43	27,10	0,47
40	0,42	128,18	0,70	1,00	50,58	49,63	27,20	0,41
45	0,39	123,73	0,64	0,93	50,87	49,14	27,20	0,38
50	0,36	119,78	0,59	0,87	50,39	48,85	27,40	0,35
55	0,33	116,10	0,54	0,81	50,87	49,14	27,50	0,32
60	0,30	112,38	0,49	0,75	50,77	48,65	27,50	0,29
65	0,27	109,68	0,45	0,71	50,77	48,36	27,40	0,26
70	0,25	106,32	0,41	0,66	50,97	49,04	27,30	0,24
75	0,22	103,38	0,37	0,61	50,87	48,75	27,30	0,21
85	0,18	97,98	0,30	0,53	50,77	48,56	27,90	0,17
90	0,16	95,90	0,27	0,49	50,97	48,65	27,60	0,15
100	0,13	91,62	0,21	0,43	50,87	49,43	27,40	0,12
110	0,10	88,52	0,17	0,38	50,97	50,12	27,80	0,09
120	0,09	86,23	0,14	0,34	50,87	50,21	28,40	0,07
140	0,05	81,11	0,08	0,26	50,97	50,21	27,50	0,03
160	0,02	77,71	0,03	0,21	51,26	50,99	28,00	0,00
180	0,01	76,36	0,01	0,19	51,55	49,63	29,00	-0,01
210	-0,02	73,43	-0,03	0,14	51,26	50,99	29,20	-0,03
240	-0,02	72,94	-0,03	0,14	51,36	51,48	29,80	-0,03

EXPERIÊNCIA 09

Data: 03 / setembro / 96

mbandeja= 366.04 g

L = 1 cm

mbandeja+milho= 599.66 g

tipo: milho superdoce

Xo= 66.26 %

Xf= 2.76 %

carga =

Tent, bs = 60 C

Dh(mmH₂O)= 141 mm

t (min)	X/Xo	massa(g)	X=f(Xo)	X=f(Xf)	Tent,bs	Tsaida,bs	Tbu,saida	X _r
0	1,00	233,62	1,96	2,07	59,88	60,63	30,20	1.00
5	0,80	202,51	1,57	1,66	60,17	57,13	30,10	0.80
10	0,72	190,40	1,42	1,50	60,17	57,91	30,50	0.72
15	0,65	179,41	1,28	1,36	60,17	57,03	30,30	0.64
20	0,58	169,07	1,14	1,22	60,27	55,76	30,10	0.58
25	0,53	160,64	1,04	1,11	60,07	54,30	30,00	0.52
30	0,49	153,96	0,95	1,02	60,17	55,67	30,50	0.48
35	0,44	147,13	0,87	0,93	60,27	55,47	30,40	0.43
40	0,40	141,45	0,79	0,86	60,17	54,21	30,10	0.40
45	0,37	135,73	0,72	0,78	60,17	54,69	30,20	0.36
50	0,34	130,75	0,66	0,72	60,17	54,89	30,10	0.33
55	0,30	125,84	0,60	0,65	60,36	56,84	30,20	0.29
60	0,28	121,64	0,54	0,60	60,36	54,89	30,20	0.27
65	0,25	117,40	0,49	0,54	60,27	56,15	30,20	0.24
70	0,23	113,82	0,44	0,49	60,46	55,67	30,20	0.21
75	0,20	110,47	0,40	0,45	60,46	54,50	30,20	0.19
80	0,19	107,77	0,37	0,42	60,36	55,67	30,20	0.17
85	0,17	104,95	0,33	0,38	60,56	54,99	30,20	0.16
90	0,15	102,49	0,30	0,35	60,56	55,37	30,40	0.14
100	0,12	96,95	0,23	0,27	60,56	55,08	30,40	0.10
110	0,10	93,56	0,19	0,23	60,85	56,64	30,50	0.08
120	0,08	91,69	0,16	0,20	60,17	55,37	30,60	0.07
140	0,06	87,59	0,11	0,15	59,68	54,40	30,10	0.04
160	0,05	86,10	0,09	0,13	60,27	54,99	30,20	0.03
190	0,03	83,08	0,05	0,09	60,17	55,28	30,40	0.01
220	0,02	81,62	0,04	0,07	60,36	56,93	30,20	0.00
250	0,01	80,73	0,02	0,06			30,00	0.00
280	0,00	79,38	0,01	0,04			30,10	-0.01
315	0,00	79,02	0,00	0,04			30,20	-0.01
340	0,00	78,47	0,00	0,03			30,20	-0.02

EXPERIÊNCIA 10

Data: 05 / setembro / 96

L = 1 cm

tipo: milho superdoce

Xo= 67.14 %

carga =

Tent, bs = 50 C

Dh(mmH₂O)= 140 mm

mbandeja= 366.08 g

mbandeja+milho= 576.00 g

Xf= 2.76 %

t (min)	X/Xo	massa(g)	X=f(Xo)	X=f(Xf)	Tent,bs	Tsaida,bs	Tbu,saida	X _r
0	1,00	209,92	2,04	2,15	52,13	51,97	27,90	1.00
5	0,81	183,58	1,66	1,75	53,00	49,63	28,50	0.81
10	0,73	172,03	1,49	1,58	53,29	50,70	28,00	0.73
15	0,67	163,47	1,37	1,45	53,10	51,19	28,50	0.66
20	0,61	155,60	1,26	1,33	53,20	51,38	28,40	0.61
25	0,56	148,41	1,15	1,23	53,29	51,48	28,80	0.56
30	0,51	141,36	1,05	1,12	53,39	52,26	28,20	0.51
35	0,47	135,92	0,97	1,04	53,49	51,48	28,40	0.47
40	0,44	130,69	0,89	0,96	53,20	51,77	28,10	0.43
45	0,40	125,71	0,82	0,88	53,10	51,97	28,30	0.39
50	0,37	121,01	0,75	0,81	53,00	52,84	28,00	0.36
55	0,34	116,91	0,69	0,75	53,29	52,06	28,20	0.33
60	0,31	112,84	0,64	0,69	53,29	51,97	28,30	0.30
65	0,29	109,26	0,58	0,64	53,39	51,67	28,80	0.27
70	0,26	106,25	0,54	0,59	53,29	52,45	28,60	0.25
75	0,24	102,71	0,49	0,54	53,49	50,02	29,70	0.23
80	0,22	99,96	0,45	0,50	53,39	49,24	29,80	0.21
85	0,20	97,59	0,41	0,46	53,20	50,21	30,00	0.19
90	0,19	95,20	0,38	0,43	53,49	52,06	29,70	0.17
100	0,16	90,99	0,32	0,36	53,39	51,38	29,90	0.14
110	0,13	87,72	0,27	0,32	53,39	50,80	30,20	0.12
120	0,11	84,84	0,23	0,27	53,39	50,70	29,70	0.10
130	0,10	82,63	0,20	0,24	53,39	52,16	29,70	0.08
140	0,08	80,54	0,17	0,21	53,39	52,45	29,80	0.07
150	0,07	78,63	0,14	0,18	53,68	51,77	29,90	0.05
180	0,05	75,51	0,09	0,13	53,58	50,89	29,70	0.03
210	0,03	73,37	0,06	0,10	54,26	53,23	30,10	0.02
240	0,02	72,16	0,05	0,08	53,97	52,16	30,20	0.01
270	0,02	71,12	0,03	0,07	53,78	50,89	30,30	0.00
300	0,01	70,86	0,03	0,06	53,87	51,19	29,90	0.00
330	0,01	70,21	0,02	0,05	53,68	53,23	29,80	-0.01
360	0,00	69,56	0,01	0,04	54,26	52,94	30,30	-0.01
390	0,00	69,23	0,00	0,04	54,16	52,65	30,20	-0.01
420	0,00	68,74	0,00	0,03	54,75	52,36	30,00	-0.02

EXPERIÊNCIA 11

Data: 17 / setembro / 96

L = 1 cm

tipo: milho superdoce

Xo= 71.33 %

carga =

Tent, bs = 60 C

Dh(mmH₂O)= 80 mm

mbandeja= 365.86 g

mbandeja+milho= 598.59 g

Xf= 4.06 %

t (min)	X/Xo	massa(g)	X=f(Xo)	X=f(Xf)	Tent,bs	Tsaida,bs	Tbu,saida	X _r
0	1,00	232,73	2,49	2,46	61,72	61,51	31,70	1,00
5	0,78	196,03	1,94	1,91	62,40	56,45	31,20	0,78
10	0,67	177,25	1,66	1,63	62,11	57,81	31,30	0,66
15	0,59	163,94	1,46	1,43	61,62	54,99	31,40	0,58
20	0,49	148,03	1,22	1,20	61,04	56,45	31,70	0,49
26	0,46	143,31	1,15	1,13	61,14	53,62	31,50	0,46
30	0,36	126,23	0,89	0,87	60,65	55,18	31,40	0,35
35	0,34	123,80	0,86	0,84	60,75	57,91	31,50	0,34
40	0,33	122,02	0,83	0,81	60,94	57,91	31,60	0,33
45	0,30	116,77	0,75	0,73	61,14	58,49	31,60	0,30
50	0,27	111,49	0,67	0,66	60,65	55,96	31,70	0,26
55	0,24	107,08	0,60	0,59	60,65	57,32	31,70	0,24
60	0,22	103,10	0,55	0,53	60,94	57,61	31,80	0,21
70	0,18	96,33	0,44	0,43	60,94	57,32	32,10	0,17
80	0,15	91,06	0,36	0,35	60,85	57,61	32,10	0,14
90	0,12	86,76	0,30	0,29	61,14	57,91	32,20	0,11
100	0,10	83,66	0,25	0,24	60,94	58,98	32,00	0,09
110	0,09	80,94	0,21	0,20	60,94	58,69	31,90	0,08
120	0,07	78,98	0,18	0,17	61,14	58,88	31,80	0,07
140	0,06	76,07	0,14	0,13	61,52	59,27	32,00	0,05
160	0,05	74,48	0,12	0,11	61,23	56,06	31,90	0,04
180	0,04	73,19	0,10	0,09	61,52	57,52	32,10	0,03
200	0,03	72,17	0,08	0,07	61,91	56,06	32,10	0,02
220	0,03	71,68	0,07	0,06	61,52	57,81	32,20	0,02
240	0,03	71,26	0,07	0,06	61,23	56,06	32,10	0,02
270	0,03	70,88	0,06	0,05	61,23	57,23	31,90	0,02
300	0,02	70,46	0,06	0,05	60,56	56,74	31,80	0,01
330	0,02	70,18	0,05	0,04	60,46	56,84	31,70	0,01

EXPERIÊNCIA 12

Data: 19 / setembro / 96

L = 1 cm

tipo: milho superdoce

Xo= 69.62 %

carga =

Tent, bs = 50 C

Dh(mmH₂O)= 80 mm

mbandeja= 365.85 g

mbandeja+milho= 596.22 g

Xf= 5.86 %

t (min)	X/Xo	massa(g)	X=f(Xo)	X=f(Xf)	Tent,bs	Tsaida,bs	Tbu,saida	X _r
0	1,00	230,37	2,29	2,26	50,58	50,51	31,70	1,00
5	0,82	202,48	1,89	1,87	50,68	47,00	27,90	0,82
10	0,72	186,72	1,67	1,64	50,48	48,36	27,90	0,73
15	0,65	175,26	1,50	1,48	50,68	48,56	27,90	0,65
20	0,59	165,84	1,37	1,35	50,58	48,85	28,00	0,59
25	0,54	156,37	1,23	1,22	50,48	49,04	27,90	0,53
30	0,50	150,59	1,15	1,13	50,97	49,53	28,10	0,50
35	0,46	144,12	1,06	1,04	51,06	49,73	28,00	0,46
40	0,42	137,34	0,96	0,95	50,39	49,34	28,00	0,41
45	0,39	133,13	0,90	0,89	50,97	49,43	28,00	0,39
50	0,36	128,36	0,83	0,82	50,58	49,53	27,90	0,36
55	0,33	123,60	0,77	0,75	50,48	49,34	27,90	0,33
60	0,31	120,38	0,72	0,71	50,58	49,43	28,00	0,31
70	0,26	112,56	0,61	0,59	50,87	48,75	27,70	0,26
80	0,23	106,46	0,52	0,51	50,68	48,75	27,70	0,22
90	0,20	101,62	0,45	0,44	50,19	48,56	27,70	0,19
100	0,17	97,65	0,40	0,38	50,48	49,34	27,90	0,16
110	0,15	94,49	0,35	0,34	50,48	49,43	27,90	0,14
120	0,13	91,54	0,31	0,30	50,77	50,02	27,90	0,13
140	0,11	87,19	0,25	0,24	50,39	49,53	27,90	0,10
160	0,09	83,92	0,20	0,19	51,45	50,60	28,10	0,08
180	0,07	81,98	0,17	0,16	50,68	49,73	27,70	0,07
210	0,06	79,75	0,14	0,13	50,97	49,73	27,70	0,05
240	0,05	78,32	0,12	0,11	50,68	49,14	27,80	0,04
270	0,05	77,32	0,10	0,10	50,58	48,65	27,90	0,04
300	0,04	76,47	0,09	0,08	50,77	49,43	27,90	0,03
330	0,04	76,00	0,09	0,08	51,36	50,21	28,30	0,03
360	0,03	75,56	0,08	0,07	49,90	49,04	28,00	0,02
390	0,03	75,14	0,07	0,06	50,58	49,34	28,20	0,02
420	0,03	74,99	0,07	0,06	50,48	49,24	28,00	0,02

EXPERIÊNCIA 13

Data: 01 / outubro / 96

L = 1 cm

tipo: milho superdoce

Xo= 66.59 %

carga =

Tent, bs = 60 C

Dh(mmH2O)= 60 mm

mbandeja= 339.6 g

mbandeja+milho= 687.33 g

Xf= 3.41 %

t (min)	X/Xo	massa(g)	X=f(Xo)	X=f(Xf)	Tent,bs	Tsaida,bs	Tbu,saida	Xr
0	1,00	347,73	1,99	1,78	60,17	59,95	30,20	1,00
5	0,83	310,20	1,67	1,48	61,04	54,79	30,00	0,83
10	0,72	284,17	1,45	1,27	61,82	58,10	30,50	0,72
15	0,65	267,30	1,30	1,14	59,10	55,08	30,50	0,65
20	0,60	255,84	1,20	1,05	61,52	57,52	30,60	0,60
25	0,55	243,20	1,09	0,95	59,68	55,28	30,60	0,54
30	0,50	233,57	1,01	0,87	58,91	53,33	31,00	0,50
35	0,46	223,59	0,92	0,79	59,68	55,57	31,10	0,46
40	0,42	214,62	0,85	0,72	62,40	57,61	31,20	0,42
45	0,38	205,58	0,77	0,65	60,07	56,45	31,30	0,38
50	0,34	196,28	0,69	0,57	59,10	55,18	31,30	0,35
55	0,33	193,48	0,67	0,55	58,72	53,13	31,10	0,33
60	0,30	186,17	0,60	0,49	62,30	58,39	31,20	0,29
65	0,27	178,84	0,54	0,43	62,98	54,99	31,60	0,27
70	0,23	170,51	0,47	0,36	60,07	55,37	31,60	0,25
80	0,20	163,40	0,41	0,31	63,17	59,76	31,60	0,21
85	0,19	161,28	0,39	0,29	60,46	58,10	31,60	0,19
90	0,17	155,89	0,34	0,25	59,68	57,52	31,60	0,18
100	0,14	149,28	0,28	0,19	63,36	59,17	32,00	0,16
110	0,13	146,38	0,26	0,17	62,98	59,47	32,10	0,13
120	0,10	139,95	0,20	0,12	64,14	60,05	32,10	0,12
130	0,10	138,98	0,20	0,11	59,68	58,49	32,00	0,11
140	0,08	135,90	0,17	0,09	62,88	59,17	31,80	0,10
170	0,08	134,01	0,15	0,07	58,52	56,25	31,00	0,08
180	0,07	131,56	0,13	0,05	63,56	60,93	32,40	0,07
210	0,04	126,40	0,09	0,01	60,56	58,10	31,60	0,06
240	0,04	125,39	0,08	0,00	59,01	57,81	31,60	0,06
270	0,03	123,32	0,06	-0,01	58,72	56,25	31,50	0,06
300	0,03	122,76	0,06	-0,02			31,50	0,05
330	0,03	122,23	0,05	-0,02				0,05
360	0,03	122,05	0,05	-0,02				0,05
400	0,02	121,34	0,04	-0,03				0,05

EXPERIÊNCIA 14

Data: 04 / outubro / 96

L = 1 cm

tipo: milho superdoce

Xo= 73.21 %

carga =

Tent, bs = 40 C

Dh(mmH₂O)= 60 mm

mbandeja= 365.95 g

mbandeja+milho= 614.00 g

Xf= 6.62 %

t (min)	X/Xo	massa(g)	X=f(Xo)	X=f(Xf)	Tent,bs	Tsaida,bs	Tbu,saida	X _r
0	1,00	248,05	2,73	2,49	41,26	41,16	27,10	1,00
5	0,88	227,27	2,42	2,20	41,48	37,36	25,90	0,88
10	0,80	213,43	2,21	2,00	41,48	38,14	25,80	0,81
15	0,73	201,60	2,03	1,84	41,38	38,82	25,60	0,74
20	0,69	192,85	1,90	1,71	41,48	38,82	25,70	0,69
25	0,64	184,82	1,78	1,60	41,57	39,01	25,70	0,64
30	0,60	176,84	1,66	1,49	41,48	39,21	25,70	0,60
35	0,56	170,27	1,56	1,40	41,57	39,21	25,90	0,56
40	0,52	163,73	1,46	1,30	41,57	39,40	25,90	0,53
45	0,48	156,60	1,36	1,20	41,67	39,50	25,90	0,49
50	0,46	152,05	1,29	1,14	41,57	39,31	26,00	0,46
55	0,43	147,15	1,21	1,07	41,57	39,31	25,90	0,43
60	0,40	142,71	1,15	1,01	41,67	39,21	26,00	0,41
65	0,38	138,16	1,08	0,94	41,57	39,79	26,00	0,38
70	0,35	133,73	1,01	0,88	41,57	39,89	26,70	0,36
75	0,33	129,98	0,96	0,83	41,57	39,89	26,40	0,34
80	0,31	126,00	0,90	0,77	41,57	39,99	26,00	0,32
85	0,29	122,85	0,85	0,73	41,57	39,60	26,10	0,30
90	0,27	119,82	0,80	0,69	41,57	39,79	25,80	0,28
100	0,24	114,05	0,72	0,60	41,57	39,69	26,00	0,25
110	0,21	108,21	0,63	0,52	41,67	40,08	26,00	0,22
120	0,19	105,13	0,58	0,48	41,86	40,08	26,10	0,20
140	0,15	97,63	0,47	0,37	41,86	40,28	25,90	0,16
160	0,12	93,00	0,40	0,31	41,77	39,99	26,10	0,13
180	0,10	89,67	0,35	0,26	41,67	39,79	26,00	0,11
210	0,08	85,93	0,29	0,21	41,77	40,08	26,10	0,09
240	0,07	82,80	0,25	0,17	41,77	39,60	26,30	0,07
270	0,06	81,32	0,22	0,14	41,77	39,89	26,60	0,06
270	0,06	81,01	0,22	0,14	40,90	40,77	25,60	0,06
300	0,04	78,39	0,18	0,10	42,25	41,35	26,10	0,05
330	0,04	77,56	0,17	0,09	41,38	40,96	26,30	0,04
360	0,03	76,96	0,16	0,08	41,77	41,16	26,20	0,04
390	0,03	76,56	0,15	0,08	41,77	41,16	26,50	0,04
420	0,03	76,10	0,15	0,07	42,15	41,84	26,70	0,04

EXPERIÊNCIA 15

Data: 08 / outubro / 96

L = 1 cm

tipo: milho superdoce

Xo=

66,38 %

carga =

Tent, bs =

50 C

Dh(mmH₂O)= 60 mm

mbandeja= 365.86 g

mbandeja+milho=

559,55 g

Xf= 5,85

%

t (min)	X/Xo	massa(g)	X=f(Xo)	X=f(Xf)	Tent,bs	Tsaida,bs	Tbu,saida	X _r
0	1,00	193,69	1,97	2,10	50,19	49,92	33,00	1.00
5	0,84	173,31	1,66	1,78	50,58	46,90	30,40	0.84
10	0,75	162,14	1,49	1,60	50,39	47,97	30,10	0.75
15	0,68	152,58	1,34	1,44	50,39	47,78	29,90	0.68
20	0,62	144,91	1,22	1,32	50,39	47,29	29,60	0.62
25	0,56	138,00	1,12	1,21	50,48	48,27	29,60	0.57
30	0,52	132,16	1,03	1,12	50,39	47,97	29,30	0.52
35	0,47	125,98	0,93	1,02	50,48	47,58	29,50	0.48
40	0,44	121,41	0,86	0,94	50,58	46,71	29,40	0.44
45	0,40	116,98	0,79	0,87	50,48	47,88	29,30	0.41
50	0,36	111,62	0,71	0,79	50,19	46,80	29,20	0.36
55	0,34	109,35	0,68	0,75	50,58	47,10	29,30	0.35
60	0,32	106,22	0,63	0,70	50,48	46,51	29,80	0.32
70	0,25	97,64	0,50	0,56	50,87	48,17	29,90	0.26
80	0,21	92,92	0,42	0,49	50,39	47,68	30,00	0.22
90	0,19	89,88	0,38	0,44	50,68	48,17	30,00	0.20
100	0,16	86,23	0,32	0,38	50,77	48,85	30,10	0.17
110	0,14	83,20	0,28	0,33	50,58	49,24	30,40	0.14
120	0,12	81,01	0,24	0,30	50,39	49,92	30,30	0.13
140	0,10	78,18	0,20	0,25	50,48	47,97	30,50	0.10
160	0,09	76,34	0,17	0,22	50,68	48,07	31,10	0.08
180	0,07	74,44	0,14	0,19	50,39	47,10	30,50	0.06
210	0,05	71,78	0,10	0,15	50,39	48,36	30,60	0.05
240	0,05	71,14	0,09	0,14	50,39	49,04	30,50	0.04
270	0,04	70,64	0,08	0,13	50,58	49,24	29,90	0.03
300	0,03	68,56	0,05	0,10	50,29	48,75	29,60	0.02
330	0,03	68,51	0,05	0,10	49,71	47,49	29,00	0.02
400	0,03	68,48	0,05	0,10	50,00	47,19	29,20	0.02
420	0,03	68,46	0,05	0,10	50,29	48,27	28,40	0.01

(Secador Bomba de Calor)

EXPERIÊNCIA 16

Data: 26 / novembro / 96

mbandeja= 342,4 g

mbandeja+milho= 599,68g

tipo: milho superdoce

 $X_o = 68,78 \%$ $X_f = 9,72 \%$ $X_{obs} = 2,21$ $X_{fbs} = 0,107$

Tent, bs = 40 C

t (min)	X/X _o	massa(g)	X=f(X _o)	X=f(X _f)	T _{bs,ent}	T _{bu,saida}	X _r
0	1,00	257,28	2,20	2,09	40,00	24,00	1,00
5	0,92	243,31	2,03	1,92			0,92
10	0,85	231,40	1,88	1,78			0,85
15	0,80	222,43	1,77	1,67			0,80
20	0,75	213,19	1,65	1,56			0,75
25	0,70	204,81	1,55	1,46			0,70
30	0,67	199,71	1,49	1,40			0,67
35	0,64	192,93	1,40	1,32			0,64
40	0,60	185,91	1,31	1,23			0,60
45	0,57	180,58	1,25	1,17			0,57
50	0,54	175,90	1,19	1,11			0,54
55	0,51	170,28	1,12	1,04			0,51
60	0,48	165,39	1,06	0,99	40,00	25,00	0,48
70	0,43	156,64	0,95	0,88			0,43
80	0,39	149,00	0,86	0,79			0,39
90	0,34	140,91	0,75	0,69	41,00	25,00	0,34
100	0,31	134,71	0,68	0,62			0,31
110	0,27	128,28	0,60	0,54			0,27
120	0,24	123,49	0,54	0,48			0,24
130	0,22	119,02	0,48	0,43			0,22
140	0,20	114,87	0,43	0,38	41,00	25,50	0,20
150	0,18	111,35	0,39	0,34			0,18
170	0,14	104,78	0,30	0,26			0,14
190	0,12	100,93	0,26	0,21			0,12
210	0,10	97,89	0,22	0,18	41,00	26,00	0,10
240	0,08	93,93	0,17	0,13			0,08
270	0,06	91,37	0,14	0,10			0,06
300	0,05	89,98	0,12	0,08			0,05
330	0,05	88,41	0,10	0,06			0,05
360	0,04	87,39	0,09	0,05			0,04
380	0,04	87,18	0,09	0,05			0,04

EXPERIÊNCIA 18

Data: 15/janeiro/97

L = 1 cm

tipo: milho superdoce

Xo=

67,33 %

carga =

Tent, bs =

40 C

Dh(mmH₂O)= 30 mm

mbandeja= 366,21 g

mbandeja+milho=

583,88 g

Xf= 8,99

%

t (min)	X/Xo	massa(g)	X=f(Xo)	X=f(Xf)	Tent,bs	Tsaida,bs	Tbu,saida	X _r
0	1,00	217,67	2,06	2,04	42,35	42,91	28,70	1.00
5	0,93	208,12	1,93	1,91	43,61	38,72	28,80	0.87
10	0,85	196,78	1,77	1,75	43,99	39,79	28,20	0.79
15	0,81	189,77	1,67	1,65	43,03	39,21	28,80	0.74
20	0,76	182,58	1,57	1,55	44,48	41,64	29,20	0.68
25	0,71	176,45	1,48	1,46	40,22	39,31	28,60	0.63
30	0,69	172,07	1,42	1,40	42,83	40,18	28,70	0.60
35	0,64	166,01	1,33	1,32	42,64	39,89	28,50	0.57
40	0,60	159,12	1,24	1,22	39,93	39,60	28,50	0.52
45	0,58	156,17	1,20	1,18	42,74	40,77	28,60	0.50
50	0,53	149,87	1,11	1,09	43,41	40,47	29,00	0.47
55	0,51	145,84	1,05	1,04	43,41	40,86	29,00	0.43
60	0,49	143,56	1,02	1,00	43,12	39,79	29,00	0.41
70	0,44	135,54	0,91	0,89	41,67	40,57	28,60	0.36
80	0,38	127,97	0,80	0,79	41,28	40,57	28,50	0.32
100	0,32	119,09	0,67	0,66	40,90	40,77	28,20	0.25
120	0,29	114,00	0,60	0,59	40,80	40,86	28,30	0.21
150	0,22	104,29	0,47	0,46	40,70	41,06	28,50	0.15
180	0,18	98,59	0,39	0,38	40,70	42,42	28,50	0.11
210	0,15	93,88	0,32	0,31	40,80	40,77	28,40	0.08
210	0,15	93,33	0,31	0,30	41,96	41,25	27,50	0.08
240	0,11	87,73	0,23	0,22	40,70	41,25	28,10	0.04
270	0,09	84,81	0,19	0,18	40,99	41,45	28,30	0.03
300	0,08	82,78	0,16	0,16	40,99	41,45	28,30	0.02
330	0,07	82,46	0,16	0,15	41,19	41,35	28,40	0.02
360	0,07	81,44	0,15	0,14	41,28	41,25	28,70	0.01
390	0,06	79,79	0,12	0,11	41,28	41,35	28,70	0.01
420	0,05	79,33	0,12	0,11	41,19	41,16	28,70	0.01
450	0,05	78,94	0,11	0,10	41,19	1,62	28,70	0.00
480	0,05	78,70	0,11	0,10	40,99	1,62	28,80	0.00

B.2 - Ajuste dos modelos matemáticos para as curvas de secagem, nas diferentes condições de processo, obtidos pelo programa Statistica version 5.0.

B.2.1 - Tabelas dos parâmetros obtidos, coeficiente de correlação (R) e porcentagem de confiança (P)

1) MODELO EXPONENCIAL (Eq. 7)

Tabela B.1 - Parâmetros (A e B) da equação, coeficiente de correlação (R) e porcentagem de confiança (P) à diferentes velocidades do ar de entrada e temperatura

v (m/s)	T (°C)	A	B	R	P (%)
1.28	40	0.909496	0.017465	0.99313	98.630
	50	0.905199	0.020542	0.99274	98.554
	60	0.903380	0.027080	0.99644	99.289
0.75	40	0.926447	0.013706	0.99655	99.310
	50	0.924268	0.018327	0.99724	99.448
	60	0.896688	0.017844	0.98936	97.882

Tabela B.2 - Parâmetros (A e B) da equação, coeficiente de correlação (R) e porcentagem de confiança (P) à diferentes umidades relativas do ar de entrada e temperatura igual à 40 °C

UR (%)	A	B	R	P (%)
27	0.960480	0.011447	0.99896	99.792
45	0.935399	0.010092	0.99485	98.973

2) EQUAÇÃO DE PAGE (Eq. 13)

Tabela B.3 - Parâmetros (A, K e n) da equação, coeficiente de correlação (R) e porcentagem de confiança (P) à diferentes velocidades do ar de entrada e temperatura

v (m/s)	T(°C)	A	K	n	R	P(%)
1.28	40	1.006823	0.059970	0.719613	0.99938	99.877
	50	1.008081	0.062521	0.745278	0.99941	99.883
	60	0.971120	0.060968	0.801606	0.99927	99.854
0.75	40	0.994430	0.032125	0.817975	0.99971	99.942
	50	1.046932	0.067121	0.709741	0.99803	99.606
	60	1.037505	0.077629	0.673695	0.99689	99.379

Tabela B.4 - Parâmetros (A, K e n) da equação, coeficiente de correlação (R) e porcentagem de confiança (P) à diferentes umidades relativas do ar de entrada e temperatura igual à 40 °C

UR (%)	A	K	n	R	P(%)
27	0.995058	0.018263	0.903990	0.99970	99.939
45	1.018700	0.029237	0.785400	0.99915	99.829

3) MODELO EXPONENCIAL COM 2 TERMOS (Eq. 10)

Tabela B.5 - Parâmetros (C_1 , C_2 , K_1 e K_2) da equação, coeficiente de correlação (R) e porcentagem de confiança (P) à diferentes velocidades do ar de entrada e temperatura

v	T(°C)	C_1	K_1	C_2	K_2	R	P(%)
1.28	40	0.721910	0.013174	0.269063	0.097373	0.99861	99.721
	50	0.261496	0.128421	0.745755	0.016527	0.99884	99.768
	60	0.826993	0.024457	0.168788	0.447963	0.99974	99.947
0.75	40	0.328240	0.035065	0.645549	0.00976	0.99940	99.879
	50	0.826088	0.016091	0.166258	0.126327	0.99953	99.905
	60	0.798189	0.025785	0.146261	0.003160	0.99817	99.633

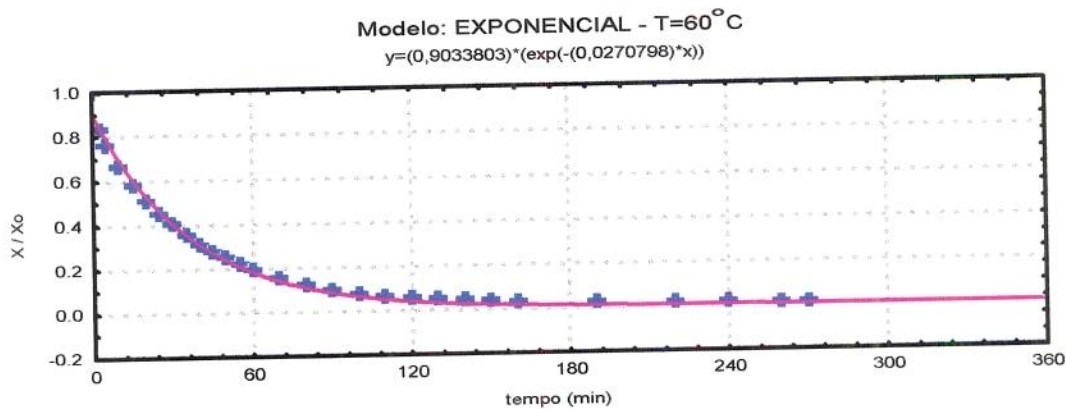
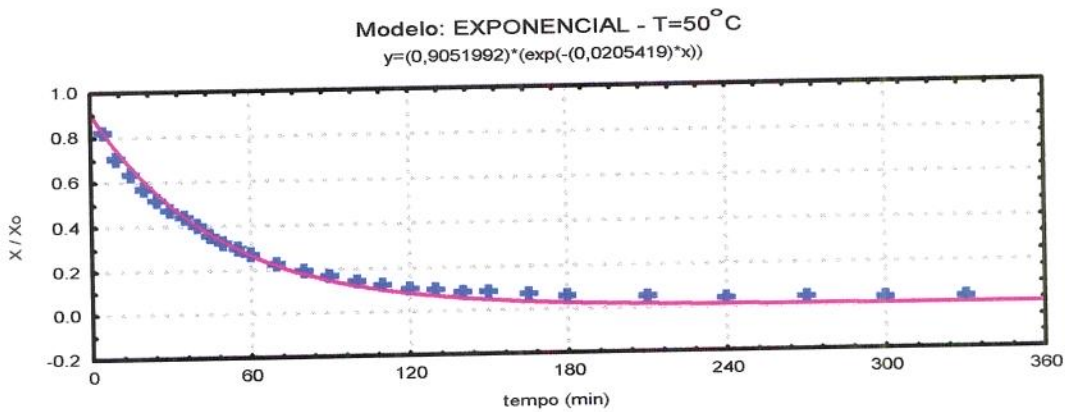
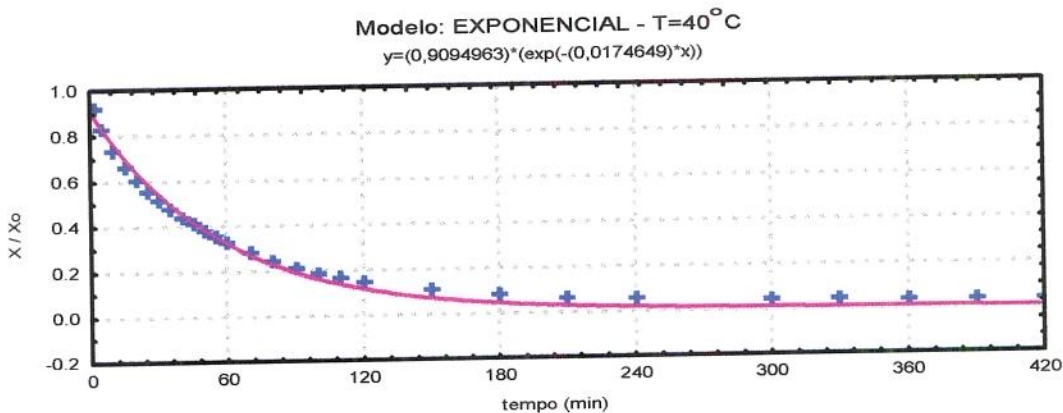
Tabela B.6 - Parâmetros (C_1 , C_2 , K_1 e K_2) da equação, coeficiente de correlação (R) e porcentagem de confiança (P) à diferentes umidades relativas do ar de entrada e temperatura igual à 40 °C

UR (%)	C_1	K_1	C_2	K_2	R	P(%)
27	0.103665	0.003541	0.871604	0.013363	0.99965	99.930
45	0.610992	0.018379	0.375959	0.004916	0.99966	99.931

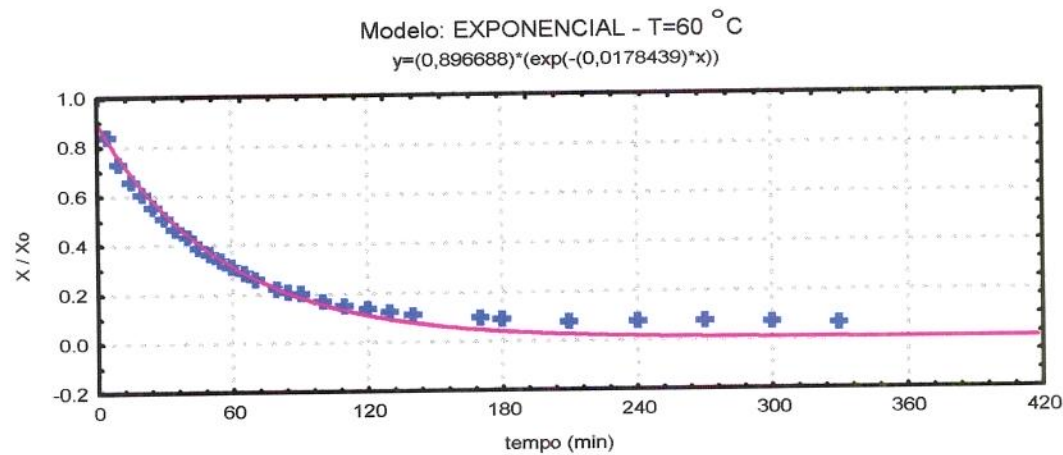
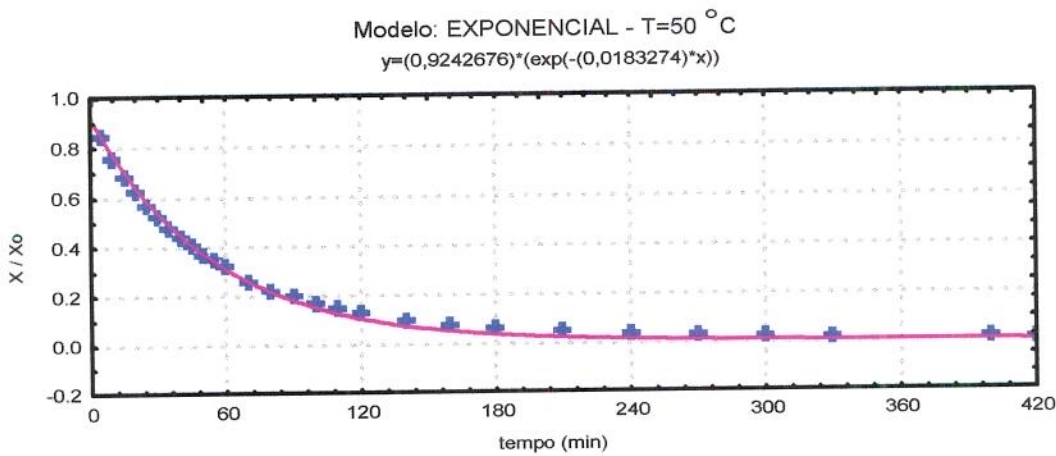
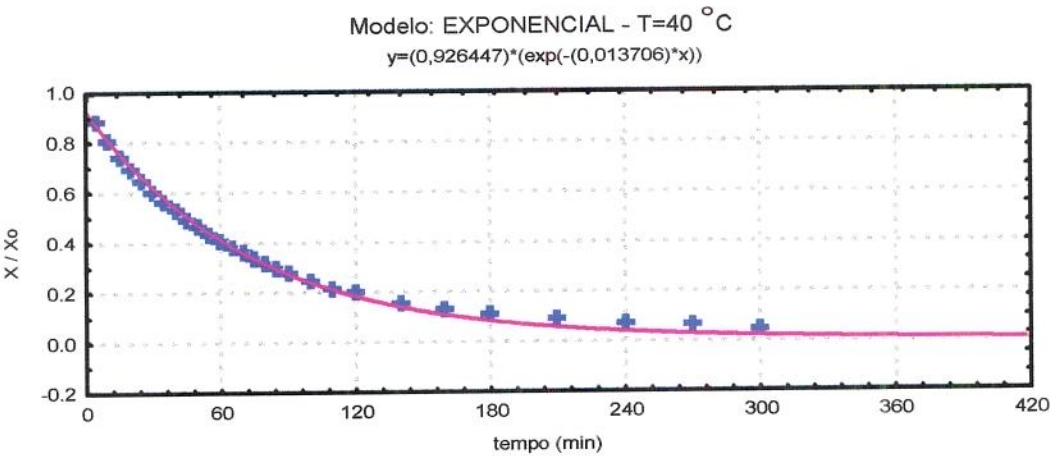
B.2.2 - Gráficos obtidos pelas equações através do programa estatístico Statistica version 5.0.

1) MODELO EXPONENCIAL (Eq. 7)

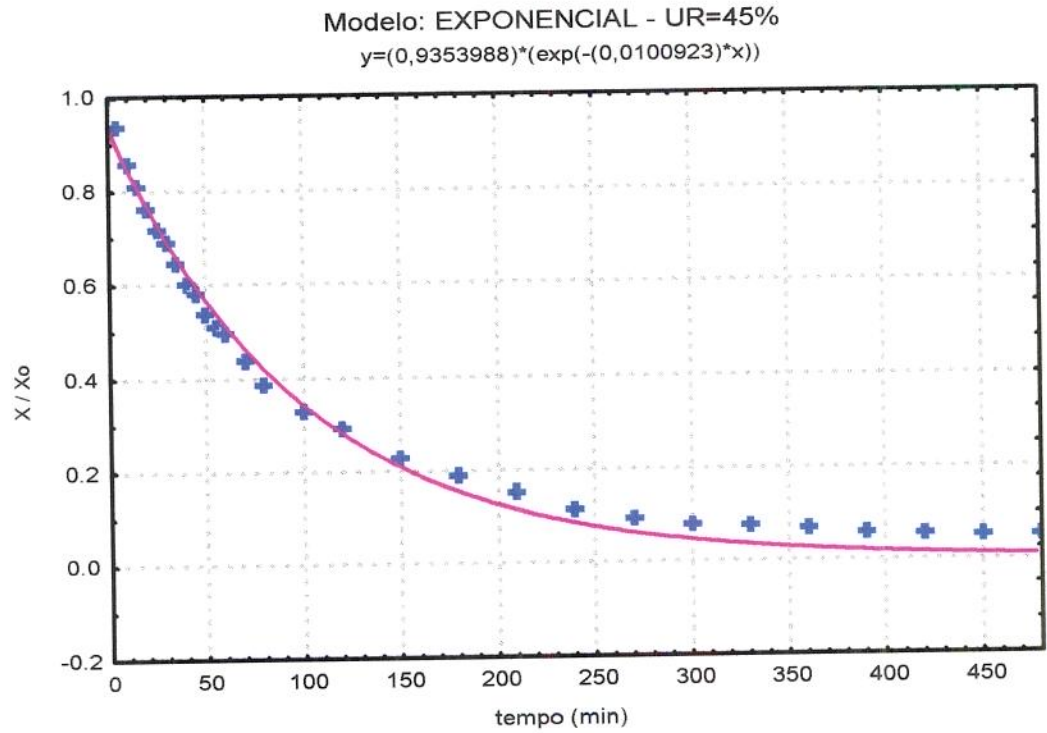
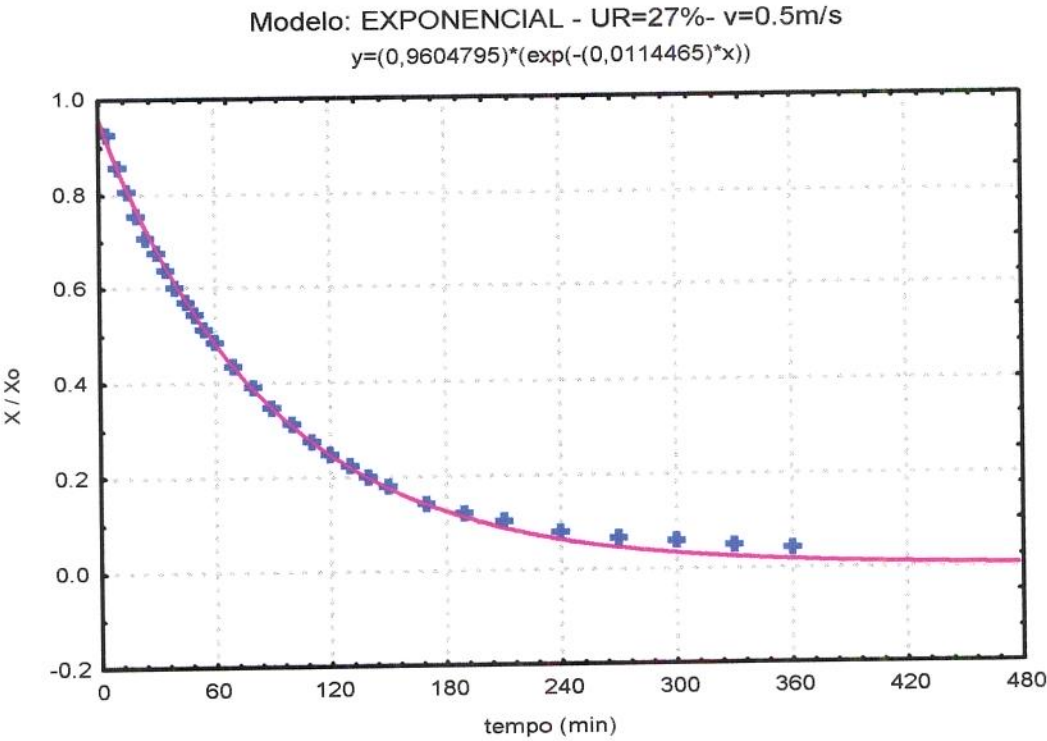
a) $v=1.28\text{ m/s}$



b) $v=0.75\text{ m/s}$

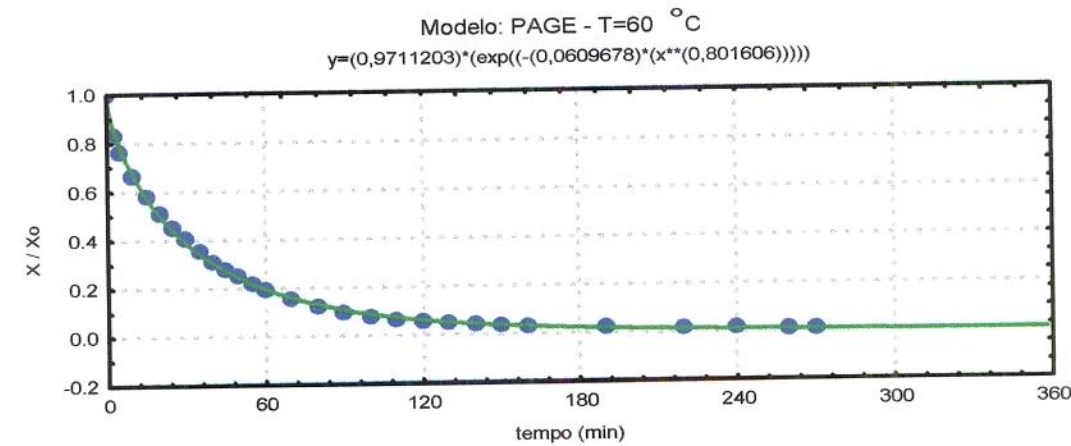
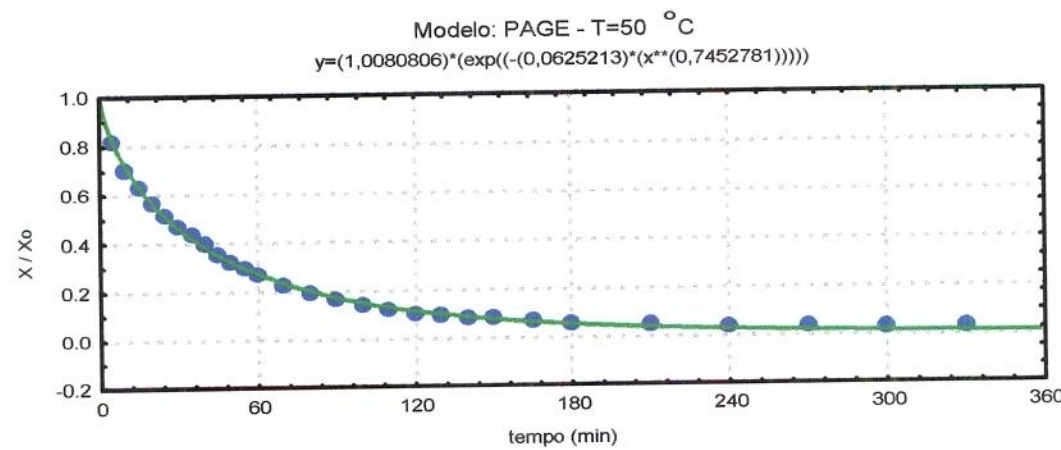
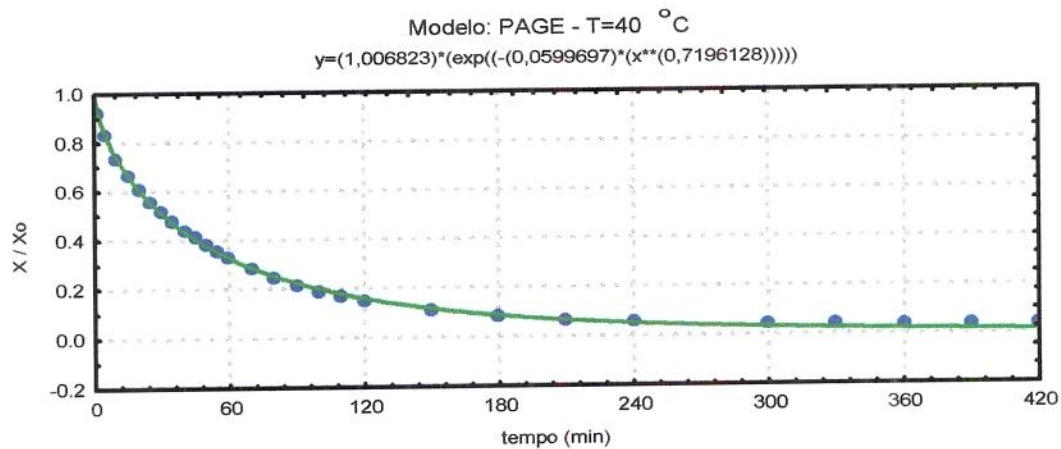


c) diferentes umidades relativa do ar de entrada, T=40°C e v=0.5m/s

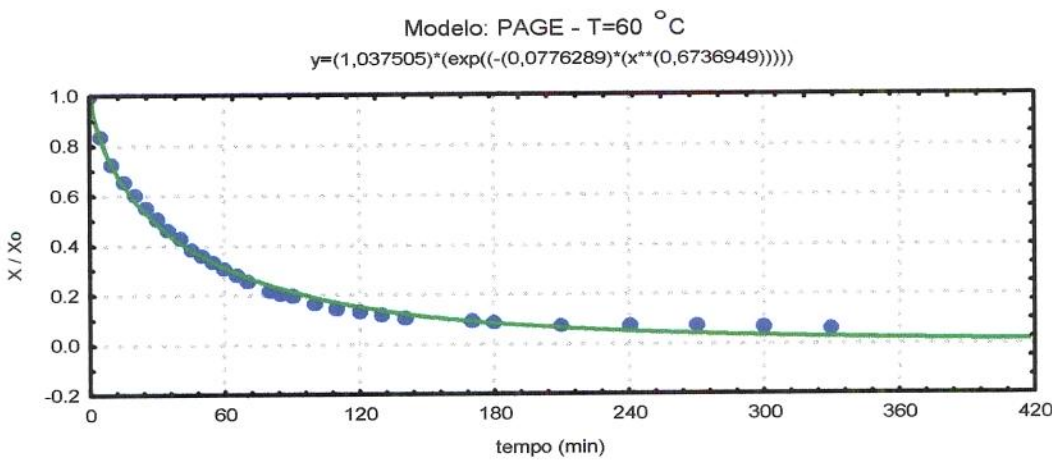
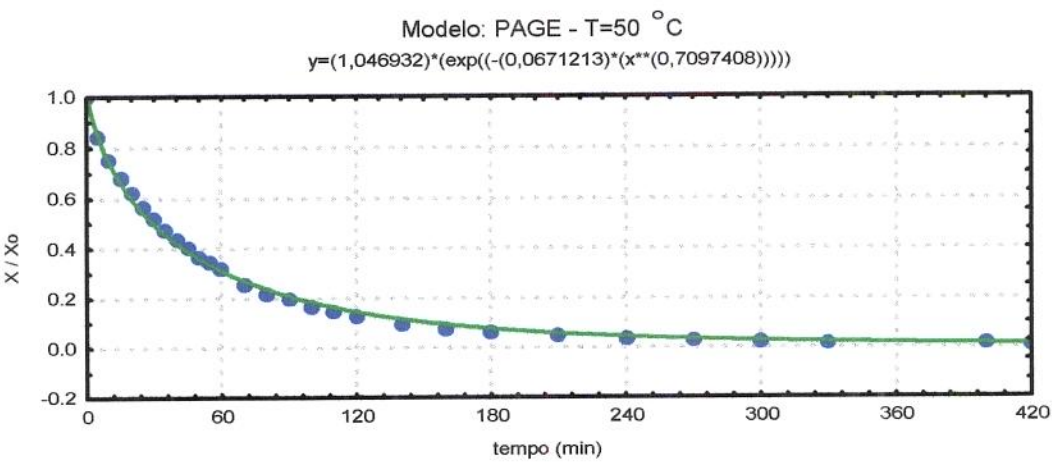
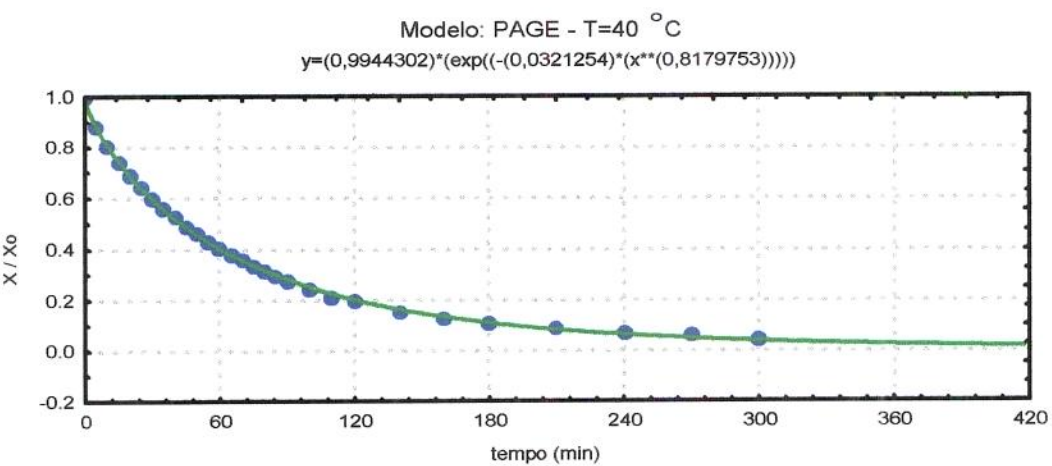


2) EQUAÇÃO DE PAGE (Eq. 13)

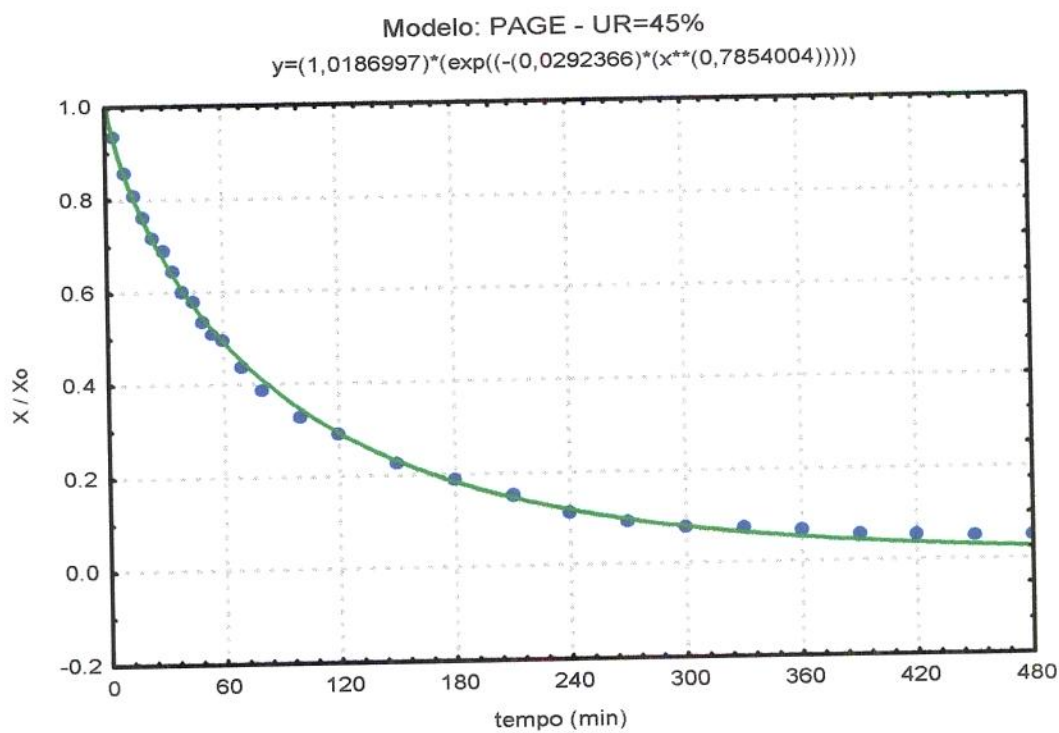
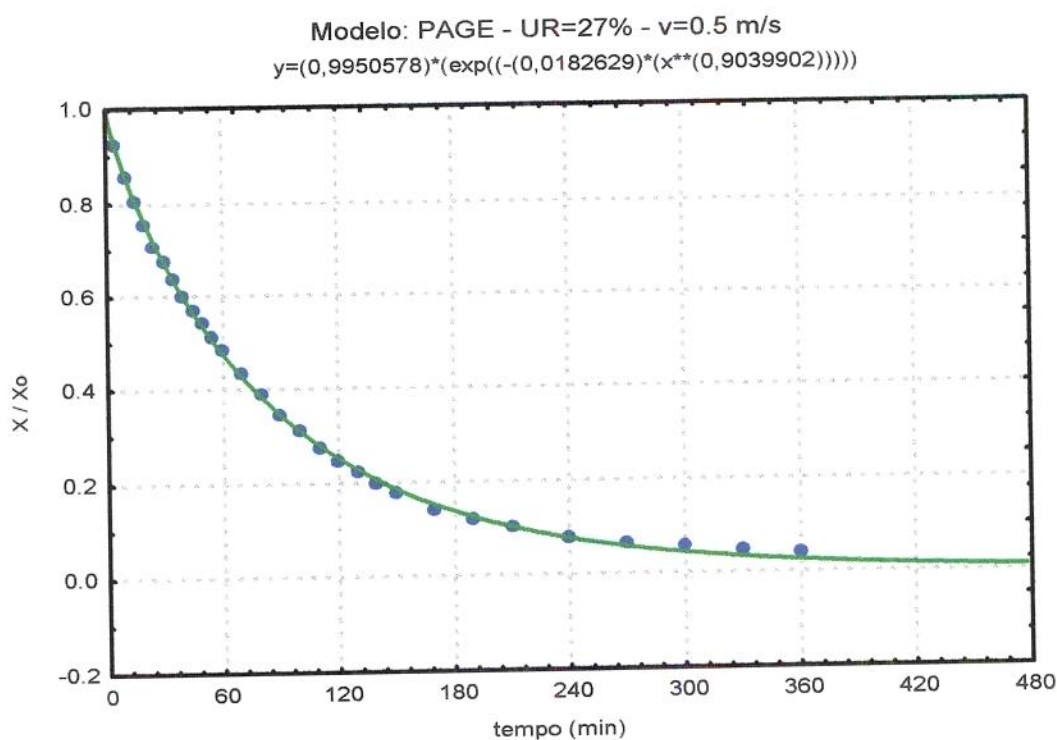
a) $v=1.28\text{ m/s}$



b) $v=0.75\text{ m/s}$

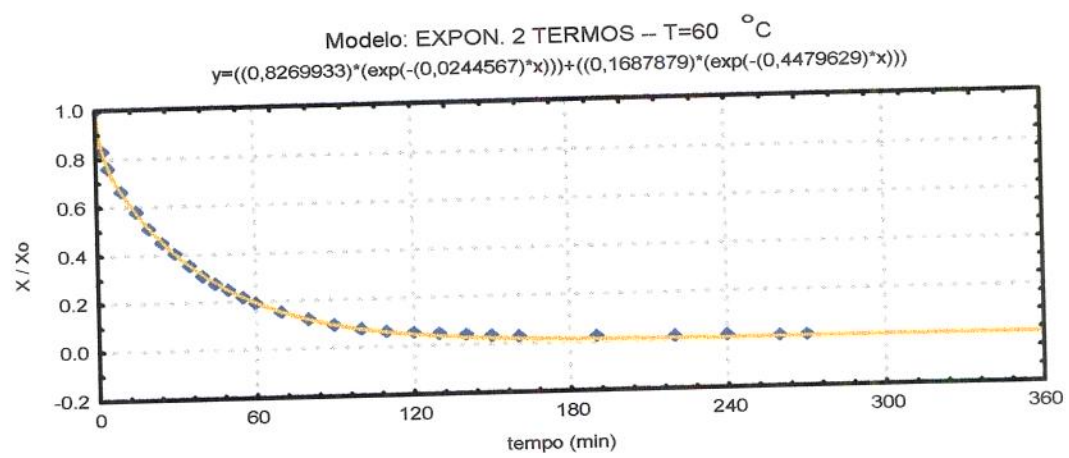
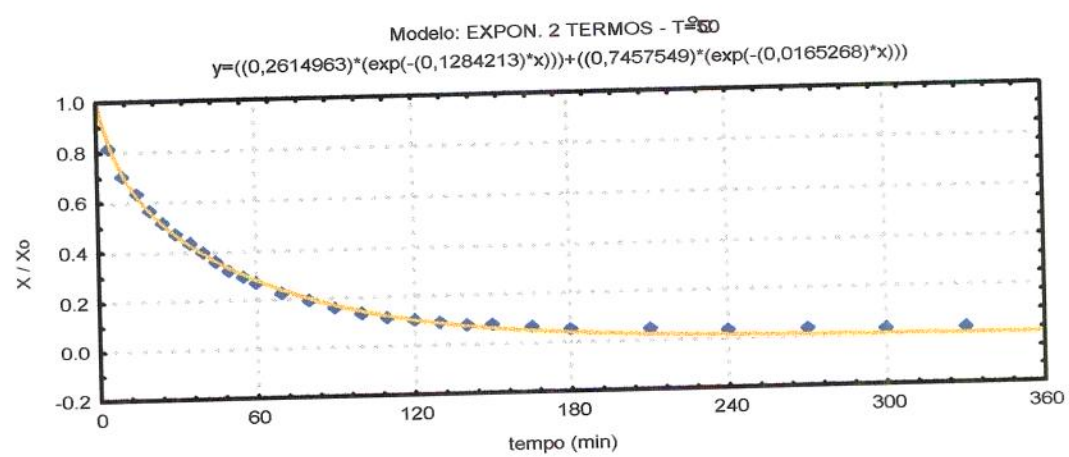
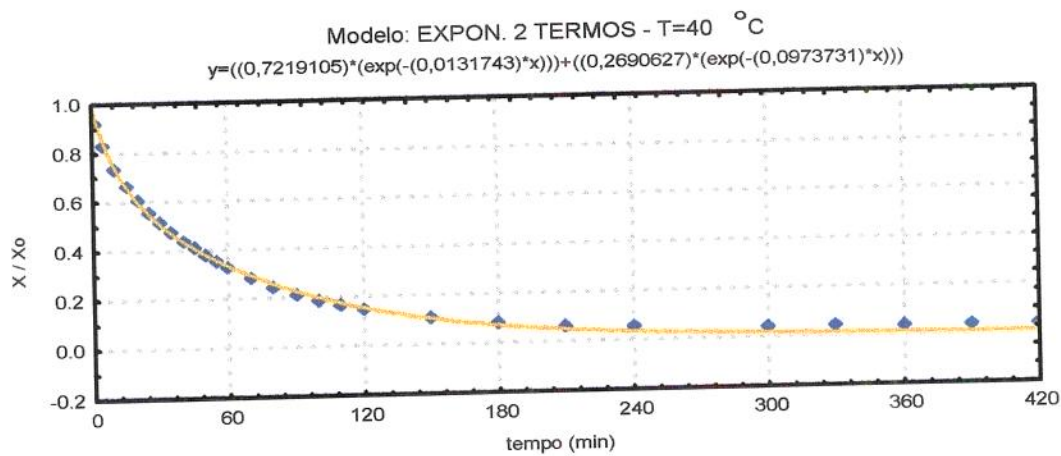


c) diferentes umidades relativa do ar de entrada, $T=40^{\circ}\text{C}$ e $v=0.5\text{m/s}$

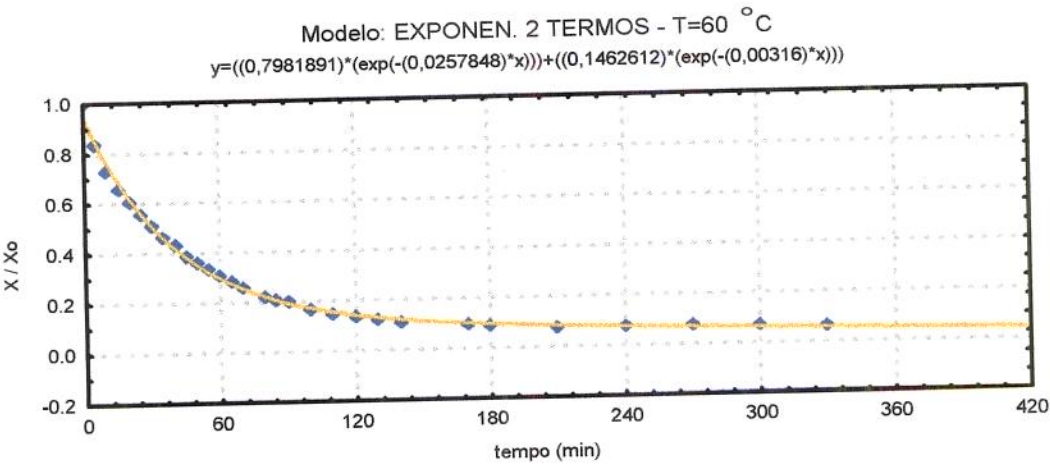
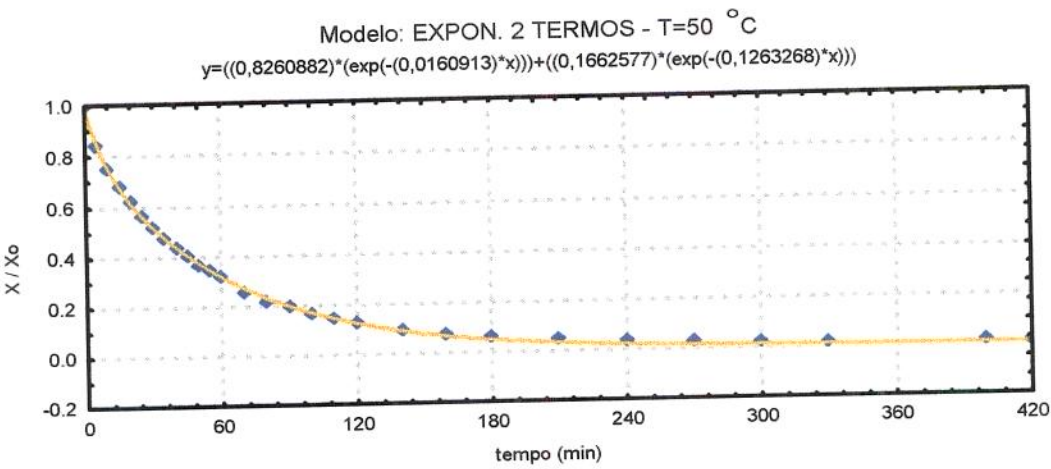
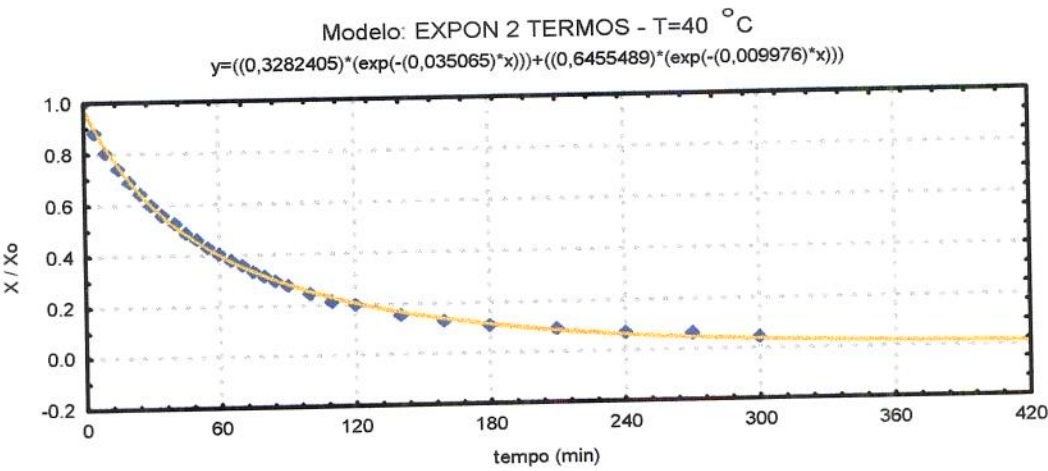


3) MODELO EXPONENCIAL COM 2 TERMOS (Eq. 10)

a) $v=1.28 \text{ m/s}$



b) $v=0.75\text{ m/s}$



c) diferentes umidades relativa do ar de entrada, T=40°C e v=0.5m/s

