

JOSÉ ANTONIO GOMES VIEIRA

CARACTERÍSTICA DE SECAGEM E AVALIAÇÃO DAS
PROPRIEDADE FÍSICAS DA BATATA DOCE

Tese apresentada à Escola Superior de
Agricultura de Lavras, como parte das
exigências do Curso de Mestrado em
Ciência dos Alimentos, para obtenção do
grau de Mestre.

ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA DE LAVRAS

LAVRAS - MINAS GERAIS

1991

JOSE ORTIZ GOMES VIANA

PROPRIEDADES FÍSICAS DA BATATA DOCE
E AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE SECAGEM

Tese apresentada à Escola Superior de
Agricultura de Lavras como parte das
exigências do Curso de Mestrado em
Ciência dos Alimentos para obtenção do
grau de Mestre.

[REDACTED]



ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA DE LAVRAS

LAVRAS - MINAS GERAIS

1991

CARACTERÍSTICA DE SECAGEM E AVALIAÇÃO
DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DA BATATA
DOCE

APROVADA:

Iracema

Prof. Dra. IRACEMA DE OLIVEIRA MORAES
Orientadora

Evódio

Prof. Dr. EVÓDIO RIBEIRO VILELA

Evandro Ferreira Passos

Prof. Dr. EVANDRO FERREIRA PASSOS

A Deus

A minha esposa, Fátima

A meus filhos, Livia e Vinicius

A meu pai, José Berto

A minha mãe, Maria José

AGRADECIMENTOS

À Escola Superior de Agricultura de Lavras, e seu Departamento de Ciência dos Alimentos pela oportunidade oferecida para a realização do curso.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos.

À Dra Iracema de Oliveira Moraes pela amizade, orientação e ensinamentos de fundamental importância para o sucesso deste trabalho.

Aos professores Dr. Evódio Ribeiro Vilela e Dr. Evandro Ferreira Passos pelas valiosas sugestões.

Aos professores do Departamento de Ciência dos Alimentos, em especial ao Dr. Adimilson Bosco Chitarra, pela compreensão e incentivo fazendo possível a conclusão deste curso.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos da UNESP pela amizade, apoio e agradável convívio.

À todos amigos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA DO AUTOR

JOSÉ ANTONIO GOMES VIEIRA, Filho de José Berto Vieira e Maria José Gomes Vieira, nasceu em Coimbra, estado de Minas Gerais, aos 23 do mês de agosto de 1957.

Em 1981, concluiu o Curso de Engenharia de Alimentos, pela Universidade Federal de Viçosa.

Prestou serviços a Pink Alimentos do Brasil a partir de 1981.

Em 1985, iniciou o curso de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos, na área de Engenharia de Alimentos na ESAL-Lavras.

Em 1989, engresou no Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos, Campos de São José do Rio Preto, como professor da UNESP-SP.

ÍNDICE

Conteúdo	pagina
LISTA DE FIGURAS -----	viii
LISTA DE QUADROS -----	ix
1. INTRODUÇÃO -----	1
2. REVISÃO DE LITERATURA -----	4
2.1. Princípios de secagem -----	4
2.2. Considerações sobre propriedades físicas -----	10
2.2.1. Condutividade térmica -----	10
2.2.2. Calor específico -----	13
2.2.3. Variação do volume e da massa específica na secagem-----	16
2.2.4. Isoterma de equilíbrio higroscópico -----	17
2.2.5. Coeficiente de transferência de energia e massa -----	18
3. MATERIAIS E MÉTODOS -----	21
3.1. Matéria prima -----	21
3.2. Curvas de secagem -----	22
3.3. Determinação da condutividade térmica -----	24

3.4. Determinação do calor específico -----	26
3.5. Variação do volume e da massa específica -----	29
3.6. Isotermas de equilíbrio higroscópico -----	29
3.7. Coeficiente de transferência de energia e massa --	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO -----	32
4.1. Composição química média -----	32
4.2. Curvas de secagem -----	33
4.3. Condutividade térmica -----	33
4.4. Calor específico -----	39
4.5. Volume e massa específica durante a secagem -----	41
4.6. Isotermas de equilíbrio higroscópico -----	46
4.7. Coeficiente de transferência de energia e massa --	48
5. CONCLUSÕES -----	50
6. RESUMO -----	51
7. SUMMARY -----	53
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	55
9. APÊNDICE -----	65

LISTA DE FIGURAS

Figura	pagina
1. Esquema do secador experimental -----	23
2. Esquema do sistema de medição da condutividade térmica -	25
3. Esquema do calorímetro de mistura direta -----	28
4. Curvas de razão de umidade da batata doce -----	34
5. Curvas de razão de umidade da batata doce -----	35
6. Variação da condutividade térmica com o teor de umidade-	37
7. Variação do calor específico com o teor de umidade -----	40
8. Variação do volume dos cilindros da batata doce com o teor de umidade , durante o proceso de secagem a 55°C --	43
9. Variação da massa específica dos cilindros da batata do- ce com o reor de umidade, durante o processo de secagem a 55°C -----	45
10. Curvas de teor de umidade de equilíbrio em função da umidade relativa nas condições experimentais -----	47

LISTA DE QUADROS

Quadro	pagina
1. Característica das soluções saturadas e suas respectivas umidades relativas em diferentes temperaturas ----	31
2. Composição química média -----	32
3. Valores dos coeficientes da equação 6 e respectivo coeficiente de determinação, considerando as temperaturas do ar de secagem -----	36
4. Valores dos coeficientes da equação 7 e respectivo coeficiente de determinação, considerando as temperaturas do ar de secagem -----	36
5. Coeficientes de transferência de energia e massa na secagem da batata doce e propriedades físicas do ar --	49

1. INTRODUÇÃO

A batata doce (Ipomoea batatas), cultivada em todas as regiões tropicais e subtropicais, destaca-se pelo seu rendimento de 10 a 20 toneladas por hectare. A sua produtividade aproxima-se muito da obtida com o arroz, de muito mais difícil cultivo, suplantando a do trigo por mais de 50% e sendo mais de três vezes superior à do milho, Pelo alto valor calórico, sendo também rica em provitamina A e vitamina C, constitui uma fonte de indiscutível importância na alimentação humana (23, 50, 59, 61).

O processamento da batata doce é requerido em maiores proporções, à medida em que há aumento de produção e consequente necessidade de preservar suas qualidades ou mesmo o preparo para o consumo. Esse processamento pode resultar em diversos produtos tais como: "chips", doces, batata doce em grânulo, flocos de batata doce, batata doce congelada, batata doce desidratada e amido de batata doce (9, 10, 16, 36, 58). A evolução desses processos e o desenvolvimento de novos métodos, requerem o conhecimento das propriedades físicas dessa matéria prima.

A desidratação é uma operação unitária comum à maioria desses processamentos. Esse método de preservação assume importância fundamental por proporcionar baixos custos de embalagem, de armazenamento e de transporte pela redução de volume e peso do produto final(30, 48).

O conhecimento das propriedades físicas do produto é um ponto chave para se aplicar um tratamento térmico de transformação a esse produto. Muitos dos problemas na desidrataação e armazenamento podem ser analisados através de princípios de transferência de calor. A maior limitação envolvida nesse estudo é a falta de dados na parte de propriedades físicas e térmicas. Na estimativa da quantidade de energia requerida para a mudança de temperatura do produto, o calor específico e o calor latente são as únicas propriedades térmicas necessárias. Contudo, o engenheiro deve também conhecer a taxa de transferência de calor para projetar processos e equipamentos mais eficientes. Nesse caso a difusividade térmica é necessária. Os parâmetros físicos são fundamentais à simulação do processo de secagem, utilizando as teorias mais modernas, sendo portanto, de grande importância, do ponto de vista de engenharia.

Objetivos:

Em virtude da escassez de informações na literatura consultada sobre pesquisas relativas à secagem e propriedades físicas da batata doce, o presente trabalho visa determinar:

- As propriedades térmicas da batata doce (condutividade e calor específico) em função do seu teor de umidade para a tempe-

ratura de 25°C;

- Os parâmetros físicos da batata doce (volume e massa específica), em função do seu teor de umidade para as condições de secagem, à temperatura de 55°C;

- As curvas de secagem da batata doce às temperaturas de 35°C, 45°C, 55°C e 65°C.

- As isotermas de equilíbrio higroscópico.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A análise de fenômenos de transporte em meios higroscópico capilar-porosos é de fundamental importância na engenharia de processos. Transferência simultânea de calor e massa ocorre num meio capilar-poroso sempre que o meio contiver umidade e estiver sujeito a qualquer ou a todos os gradientes de concentração: pressão parcial de vapor, temperatura, pressão total e campos de força externa, de acordo com LUIZ(34).

2.1. Princípios de secagem

A secagem de um produto, que é um processo de transporte de calor e massa, consiste na remoção de parte da umidade contida no interior do produto por meio de evaporação. A condição necessária para ocorrer a secagem é de que o teor de umidade do produto esteja acima do seu teor de umidade de equilíbrio, para condições pré-estabelecidas de umidade relativa e temperatura do ar de secagem, FORTES & OKOS (20).

BROOKER et alii (7) afirmam que há, pelo menos, dois períodos distintos de secagem de um produto agrícola: são o período de taxa de secagem constante, que normalmente ocorre em produtos com mais de 70% de umidade e o período de taxa de secagem decrescente. O teor de umidade que separa estes dois períodos (teor de umidade crítico) depende da forma do produto e das condições de secagem.

A velocidade de secagem durante o período de razão constante, depende de três fatores: (a) dos coeficientes de transferência de energia e massa; (b) da área da superfície onde ocorre a troca de energia e massa; (c) da diferença entre as temperaturas (ou as pressões de vapor) do ar que envolve o produto e da superfície desse produto. O mecanismo interno de migração de água não influencia a velocidade de secagem durante esse período (1 e 19). De acordo com Mc Cormick, citado por ALVARENGA (2), a taxa de secagem, para o período de razão constante, pode ser descrita pela equação 1.

$$\frac{dM}{dt} = \frac{h_T \cdot A \cdot T}{L_V} = \frac{h_m \cdot A \cdot P_V}{R_V \cdot T} \quad \text{eq. 1}$$

em que:

- $\frac{dM}{dt}$ - taxa de secagem, kg/s
 A - área, m²;
 T - temperatura absoluta, K
 h_T - coeficiente de transferência de energia, W/m².K
 h_m - coeficiente de transferência de massa, m-1.s;

- P_v - Pressão de vapor, W/m.s;
 L_v - entalpia de vaporização da água, J/kg;
 R_v - constante dos gases para o vapor d'água, 228 J/kg.K;
índices - a = ar que envolve o produto;
v = vapor.

Predizer teoricamente a taxa de secagem decrescente é mais complexo que a taxa constante, pois devem ser considerados não somente os mecanismos externos de transferência de calor e massa, mas também os internos do produto, BROOKER et alii (7). Para a maioria dos materiais granulares e sólidos porosos, de modo geral, esse período pode ser subdividido em dois regimes, segundo ALMEIDA (1) e FORTES & OKOS (18).

(a) a secagem ocorre em uma zona de superfície insaturada, isto é, não existe continuidade de água em toda a superfície de evaporação. A superfície de evaporação diminui, portanto, a taxa total de evaporação da superfície decresce - é a zona de superfície insaturada;

(b) a região de vaporização localiza-se no interior do material e a razão de secagem é controlada pelo movimento interno de água, sendo essa etapa pouco influenciada pelas condições ambientes é a zona de controle interno.

Existem métodos empíricos, teóricos e semi-teóricos para descrever matematicamente o processo de secagem (7, 18, 49).

O método empírico é utilizado para análise de secagem usando dados experimentais que podem ser determinados em laboratório

e na utilização de análise adimensional. Tal método geralmente se baseia nas condições externas de secagem não fornecendo indicações sobre o transporte de energia e massa no interior dos grãos, segundo FORTES & OKOS (18), muito embora forneça informações práticas para elaboração de projetos. Dentre os vários modelos existentes podemos mencionar os seguintes:

$$RU = e^{-kt^n} \quad \text{eq. 2}$$

$$RU = A \cdot e^{-kt} \quad \text{eq. 3}$$

em que:

$$RU = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad \text{eq. 4}$$

sendo:

M - teor de umidade;

M_e - teor de umidade de equilíbrio, decimal, base seca;

M_0 - teor de umidade inicial, decimal, base seca;

A, k e n - parâmetros de regressão;

t - tempo, s.

Os métodos teóricos consideram, não somente as condições externas, mas também o mecanismo de movimento interno de umidade e seus efeitos consequentes, de acordo com FORTES & OKOS (20). Muitas mudanças internas ocorrem durante a secagem, tais como mudanças na forma e estrutura do produto, quebra e transformações

enzimáticas em geral, etc., acentuando, assim, a necessidade do desenvolvimento de modelos teóricos.

Para que haja uma compatibilidade entre a teoria e a facilidade de uso, tem-se dado ênfase a modelos semi-teóricos. Esses modelos baseam-se na lei de Newton para o resfriamento, aplicada à transferência de massa. Na aplicação dessa lei considera-se que as condições são isotérmicas e que a resistência à transferência de umidade se dá somente na superfície do produto. Essas simplificações, no entanto, podem conduzir a erros, pela complexidade do fenômeno de secagem, segundo FORTES & OKOS (18).

A literatura menciona os seguintes possíveis mecanismos, de transporte de umidade em sólidos, conforme BROOKER et alii (7) e Van ARSDEL (57).

1. Movimento do líquido devido às forças superficiais - fluxo capilar;
2. Movimento do líquido devido a diferentes concentrações de umidade - difusão de líquido;
3. Movimento de vapor devido à difusão de umidade em uma superfície porosa - difusão de superfície;
4. Movimento de vapor devido a diferentes concentrações de umidade - difusão de vapor;
5. Movimento de vapor devido a um gradiente de temperatura - difusão térmica;
6. Movimento do vapor e água devido a um gradiente de pressão total - fluxo hidrodinâmico.

Além desses mecanismos básicos citados, pode-se mencionar o transporte do líquido por osmose. A migração foi analisada por Newitt e Coleman e por Wakabayashi, citado por LUIZ (34). O fenômeno de osmose só pode ocorrer diante da existência de alguma solução química do meio poroso, LUIZ (34).

Embora vários modelos matemáticos de secagem tenham sido desenvolvidos para explicar os fenômenos que se verificam durante a secagem, nenhum satisfaz plenamente aos vários períodos do processo. Dentre as teorias mais complexas de secagem disponíveis na literatura, podem-se citar as de LUIKOV (33), BERGER & PEI (4), FORTES & OKOS (20), e PHILIP & De VRIES (43).

Com base nos conceitos de termodinâmica de processos irreversíveis, FORTES & OKOS (18, 19, 20), propuseram um modelo que incorpora a maioria das pesquisas mais recentes do fenômeno de secagem. O conjunto de equações desenvolvidas por esses autores, mostra a importância das propriedades físicas do produto, tais como: condutividade térmica, calor específico, isoterma de sorção, entalpia de vaporização da água no produto biológico, massa específica e variação de volume que ocorre durante o processo de secagem, além dos coeficientes de transferência de calor e massa.

Segundo NEVES (39), a diferença fundamental entre a teoria de FORTE & OKOS (18, 20) e as teorias já citadas, é que esses autores demonstraram que o gradiente para o movimento isotérmico, tanto de líquido quanto de vapor, é o gradiente do teor de umidade de equilíbrio e não o gradiente de teor de umidade simplesmente. Assim, o teor de umidade de equilíbrio é apresentado como

uma escolha mais natural para o potencial de transporte de massa que o conceito de potencial de transporte de massa criado por LUIKOV (33).

2.2. Considerações sobre propriedades físicas

Os centros de pesquisas de secagem, armazenamento, refrigeração e outros processamentos térmicos de produtos agrícolas, usam os modelos matemáticos que descrevem os balanços de calor e massa. Podem ser utilizados para recomendar a operação ótima desses processos, desde que se conheçam as várias propriedades físicas do material. Também projetos e análise de equipamentos utilizam essas propriedades.

2.2.1. Condutividade térmica

Condutividade térmica é a taxa de energia que flui por condução, por unidade de tempo, normal a uma superfície de área unitária, quando se estabelece um gradiente de temperatura, entre duas superfícies paralelas e de espessura unitária. A condutividade térmica é denominada aparente (ou efetiva) quando são incluídos outros mecanismos de transmissão de calor, segundo SASSERON (49) e SWEAT (54).

A determinação da condutividade térmica de materiais biológicos é complexa, devido ao transporte simultâneo de energia e massa, às reações químicas, e às mudanças estruturais e biológi-

cas que podem ocorrer durante a medição.

Os métodos estacionário e o transiente, são basicamente, os utilizados para medir a condutividade térmica, segundo ALMEIDA (1).

O estacionário consiste em resolver a equação de condução de calor para o regime estacionário, em placas paralelas, cilíndricas ou esferas concêntricas, segundo ALMEIDA (1) e MOHSENIN (35). Estas placas, sob diferentes temperaturas, ficam sob um gradiente de temperatura que é função apenas da espessura da amostra no regime estacionário. O uso deste método é limitado pelo longo tempo que demanda e as formas geométricas da amostra. Esse longo tempo pode causar perda de umidade da amostra e transferência de umidade no seu interior, FORTES & OKOS (17) e REIDDY & RIPPEN (46). Segundo esses últimos autores outros erros que podem ocorrer são: mau contato entre a resistência e a superfície da amostra; erro de medição do fluxo de calor e da temperatura; erro devido a transferência de calor por convecção na massa que constitui a amostra e heterogeneidade da mesma.

Os métodos de medição em regime transiente consistem na resolução da equação de calor em regime transiente. Hooper e Lepper, citados por KAZARIAN & HALL (28), foram os primeiros pesquisadores a utilizarem o método transiente para determinar a condutividade térmica.

SWEAT (54) e SWEAT & HAUGH (55) adaptaram para alimentos o método usado por De VRIES(14) para determinação da condutividade térmica do solo, considerando ser o mais adequado para materiais

biológicos (17,44,55). Para utilizar este método, um termopar e um fio aquecedor são colocados no interior de uma agulha hipodérmica (sonda), que é inserida na amostra. Quando o registrador, ligado ao termopar da sonda, indicar uma temperatura constante, faz-se passar uma corrente elétrica no fio aquecedor, registrando-se a curva de temperatura.

A condutividade térmica é dada, segundo SWEAT (54) por:

$$K = \frac{Q \cdot \ln(t_1/t_2)}{4 (T_1 / T_2)} \quad \text{Eq. 5}$$

em que:

K = Condutividade térmica, W/m.K;

Q = Potência dissipada pela fonte linear por unidade de comprimento, W/m;

T₁ e T₂ = Temperaturas do ponto médio da sonda, K, respectivamente para os tempos t₁ e t₂, s.

A equação 5 foi obtida admitindo-se fonte de calor linear de comprimento infinito, num meio homogêneo. Entretanto na prática, a amostra é finita, a fonte tem comprimento finito, a intensidade da corrente elétrica não é perfeitamente constante, o raio e a massa da fonte não são nulos e suas propriedades térmicas diferem do material teste, conforme ALMEIDA(1) e CHANDRA & MUIR (12). Assim, para compensar efeitos de comprimento da agulha, inércia térmica do sistema e outros erros, costuma-se acrescentar um termo de correção, sendo aconselhável, a calibragem do sistema empregando-se, geralmente, a glicerina (40, 41, 42).

Segundo CHANDRA & MUIR (12) os pequenos intervalos de tempo e pequenos gradientes de temperatura envolvidos, o efeito relativo ao mecanismo de transferência de energia e massa por convecção é desprezível.

Para os produtos biológicos a condutividade térmica depende do seu teor de umidade. Isto foi comprovado por vários autores (1, 17, 31, 41, 42, 49) que determinaram a variação da condutividade térmica de alguns produtos biológicos, em função de seu teor de umidade.

2.2.2. Calor específico

A variação de pressão para os processos que envolvem transferência de calor em materiais agrícolas é muito pequena. Em decorrência deste fato utiliza-se o conceito de calor específico à pressão constante (11, 15, 26, 49).

Várias expressões são disponíveis na literatura, para a determinação do calor específico de materiais biológicos com base em suas composições químicas. Siebel em 1892, citado por MOHSENIN (35) propôs uma equação simplificada para o calor específico de produtos agrícolas, baseado no teor de umidade do produto.

HELDMAN (24), para calcular o calor específico de grãos, apresenta, dentre outras, a expressão:

$$c = 1422,5 X_c + 1548,1 X_p + 1673,6 X_f + 836,8 X_a + 4184 X_m \quad \text{Eq. 6}$$

em que:

c = Calor específico do produto, J/kg.K;

X_c = Fração em peso de carboidrato no produto;

X_p = Fração em peso de proteína no produto;

X_f = Fração em peso de gordura no produto;

X_a = Fração em peso de cinzas no produto;

X_m = Fração em peso de umidade no produto.

LOPES FILHO (31) utilizou esta equação para batata, com base nos valores da composição química média, obtendo uma equação que descreveu o comportamento do calor específico com o teor de umidade.

DISNEY (15), KAZARIAN & HALL (28), SASSERON (49) relatam a dificuldade da obtenção do calor específico de materiais biológicos. A obtenção é complicada devido ao teor de umidade do material, calor de sorção e dessorção, movimentos internos de umidade e outros processos internos reversíveis ou irreversíveis.

A determinação experimental do calor específico de produtos agrícolas pode ser conduzida de duas maneiras: pelo método transiente ou método de mistura direta e pelo método do estado estacionário. O segundo método consiste em colocar a amostra numa pequena câmara aquecida por meio de corrente elétrica. A maior fonte de erro deste método está relacionada com a determinação da temperatura da amostra, devido ao gradiente de temperatura, segundo WHIGHT & PORTERFIELD (60).

O método mais usado, segundo vários autores, KAZARIAN &

HALL (28), MOHSENIN (35), DISNEY (15) e HWANG & HAYAKAWA (26), é o da mistura direta que consiste em utilizar um recipiente isolado, de capacidade calorífica conhecida, com um líquido inerte. A amostra, a uma temperatura diferente da do líquido calorimétrico, é colocada no recipiente e a temperatura de equilíbrio é medida. O calor específico é calculado pela equação:

$$c_a m_a (T_a - T_e) + C (T_a - T_e) = c_m m_m (T_e - T_m) \quad \text{eq. 7}$$

em que:

c_a - calor específico da água, J/kg.K

c_m - calor específico do material, J/kg.K

C - capacidade calorífica do calorímetro, J/K

m_a - massa da água, kg

m_m - massa do material, kg

T_a - temperatura da água, K

T_m - temperatura do material, K

T_e - temperatura de equilíbrio, K.

Dentre as fontes de erro desse método, as duas mais importantes são: a troca de calor entre calorímetro e ambiente e a energia adicionada ao sistema por agitação, conforme MOHSENIN (35) e SASSERON (49).

2.2.3. Variação do volume e da massa específica na secagem

A determinação do volume e da massa específica, de produtos agrícolas é problemática devido a forma irregular e porosa desses materiais.

Materiais celulares complexos contraem-se diferentemente nas direções longitudinal, tangencial e radial, segundo BROWNE (8).

O volume de um material capilar-poroso é frequentemente uma função linear do seu teor de umidade médio, afirma KEYE (29).

$$V = V_0(1 + BM) \quad \text{Eq. 8}$$

em que:

B = Coeficiente de dilatação global;

V_0 = Volume do produto seco, m^3 ;

M = teor de umidade médio.

Massa específica é a razão entre a massa de um material e o seu volume, definida por MOHSEIN (35) e ALMEIDA (1).

A determinação da massa específica pode ser feita segundo dois métodos, BROWNE (8). Um se baseia no deslocamento de um líquido e o outro no deslocamento de ar. O processo que emprega o deslocamento do líquido, consiste em se deslocar uma massa conhecida do produto em uma proveta graduada, contendo um volume conhecido de líquido (tolueno), FORTES & OKOS (17). Segundo MOHSEIN (35), o líquido mais eficaz para utilização no método do des-

locamento do líquido, é o tolueno, que tem as seguintes vantagens: pequena tendência de absorção pela amostra, baixa tensão superficial, pequena ação solvente sobre os constituintes da amostra, especialmente óleos e massa específica relativamente baixa. MOREIRA et alii (37) testaram vários líquidos para este método, concluindo que o óleo de soja pode ser usado como substituto do tolueno e que o uso da água destilada é totalmente inviável.

O método de deslocamento de ar é pouco utilizado por requerer equipamentos especiais (35 e 49).

2.2.4. Isotermas de Equilíbrio Higroscópico

A umidade de equilíbrio de um alimento é definida como o conteúdo de umidade do material depois de ter sido exposto a determinada condição de umidade relativa e temperatura por um período de tempo.

As decisões alusivas aos processos de secagem, armazenamento e manuseio dependem das curvas de teor de umidade de equilíbrio e do calor latente de vaporização da água do produto, HALL (22).

Os valores de teor de umidade de equilíbrio dos produtos biológicos dependem de vários fatores: umidade relativa do ar, temperatura do ar, tipo de produto, fenômenos de transferência de umidade, e o tempo de secagem empregados, ROSSI & ROA (46).

Dois métodos têm sido amplamente utilizados para determina-

ção de teor de umidade de equilíbrio dos produtos biológicos, HALL (22): método estático e método dinâmico. No método dinâmico, o ar com temperatura e umidade controlada, é forçado a passar, com certa velocidade, pelo material. No método estático esse ar permanece parado.

Diversos modelos que relacionam a umidade de equilíbrio com a temperatura e umidade relativa do ar, já foram desenvolvidos, BROOKER et alii (7). Entretanto, nenhum modelo teórico foi ainda capaz de atingir a precisão necessária, cobrindo largas faixas de variação da umidade relativa e da temperatura do ar. Dentre os modelos existentes podem-se destacar os obtidos por: SINICIO & ROA (53), HENDERSON (25) e CHUNG & PFOST (13). A equação de Henderson, quando utilizada para previsão de umidade de equilíbrio para alguns produtos biológicos fornece resultado confiáveis (27, 31, 52, 53).

2.2.5. Coeficientes de transferência de energia e massa

Chilton e Colburn, citados por BIRD et alii (5), correlacionaram dados de resistência ao escoamento de fluidos através de massa uniforme de partículas sólidas, usando o número de Reynolds modificado.

A determinação dos coeficientes de transferência de energia e massa, para produtos imersos em fluido escoando por convecção forçada, pode ser feita pela analogia de Chilton e Colburn.

$$J_H = J_D$$

eq. 9

sendo J_H e J_D os fatores de Chilton e Colburn para transferência de calor e massa, respectivamente.

Essa analogia para ser válida depende do número de Reynolds modificado, da geometria e das condições de contorno.

J_H e J_D podem ser expressos pelas equações, segundo BIRD et alii(5).

$$J_H = \frac{h_T}{a \cdot C_{pa} \cdot V} \left(\frac{U_a \cdot C_{pa}}{K_a} \right)^{2/3} \quad \text{eq. 10}$$

e

$$J_D = \frac{h_m \cdot R_v \cdot T_a}{V_a} \left(\frac{U_a}{a \cdot D_{atm}} \right)^{2/3} \quad \text{eq. 11}$$

em que:

h_T - coeficiente de transferência de energia e massa, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$;

a - massa específica do ar, $kg \cdot m^{-3}$;

C_{pa} - entalpia específica do ar, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$;

V - velocidade do ar, $m \cdot s^{-1}$;

U_a - viscosidade dinâmica do ar, $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$;

K_a - condutividade térmica do ar, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$;

h_m - coeficiente de transferência de massa, $s \cdot m^{-1}$;

D_{atm} - coeficiente de difusividade de massa, $m^2 \cdot s^{-1}$;

T_a - temperatura do ar, K.

Desde que a pressão total seja considerada constante, o coeficiente de difusividade pode ser expresso, de acordo com BIRD et alii(5).

$$D_{atm} = D'_{atm} \left(\frac{T_a}{273,16} \right)^{1,75}, \quad \text{eq.12}$$

sendo D'_{atm} o coeficiente de difusividade de massa, no ponto triplo, isto é, a 273,16 K.

O número de Reynolds modificado é dado pela expressão:

$$Re_{mod} = (a \cdot V \cdot D_p) / U_a, \quad \text{eq. 13}$$

em que:

D_p - diâmetro equivalente, m.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Matéria prima

Utilizou-se batata doce da variedade Mona Lisa, adquirida de um produtor da região. O experimento foi conduzido no laboratório do Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos da UNESP, campus de São José do Rio Preto. O teor de umidade foi determinado pelo método de estufa a 70°C, sob vácuo de 508 mmHg por 12 horas. A composição química foi determinada segundo métodos da AOAC (3).

As amostras foram cortadas em cilindros de 3,6 cm de comprimento, no sentido longitudinal à fibras, utilizando um dispositivo de corte, em forma de um cilindro ôco, de diâmetro interno igual a 0,012m. De acordo com TALBURT & SMITH (56), imediatamente após o corte as amostras foram tratadas com metabissulfito de sódio 2% por 20s, para prevenção do escurecimento.

3.2. Curvas de secagem

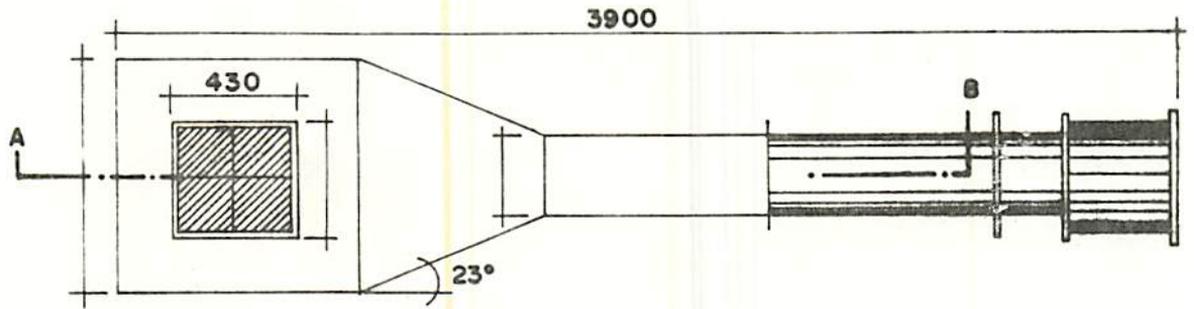
As amostras cilíndricas de batata doce foram levadas ao secador existente no laboratório (figura 1), após terem sido preparadas con

forme descrito no item 3.1. Para a pesagem foi utilizada uma balança METTLER modelo H54 Ar, de precisão de 0,01g. O ar de entrada do secador foi o ar ambiente do laboratório, cuja umidade relativa média foi determinada por meio de um psicrômetro e a temperatura por meio de termopares. Os testes de secagem foram conduzidos a uma velocidade média de 1,6m/s e temperaturas de 35°C, 45°C, 55°C e 65°C.

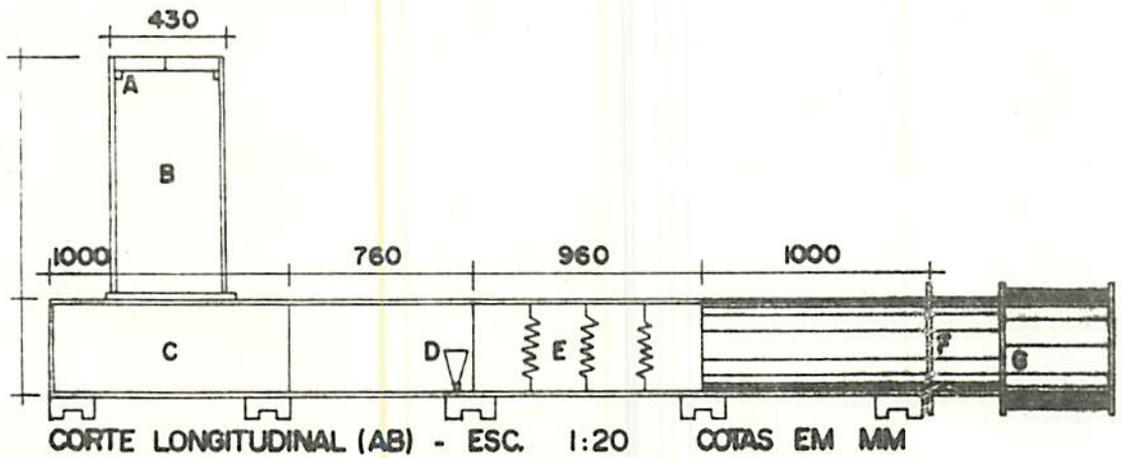
A velocidade do ar, determinada por um anemômetro de hélice, foi controlada por meio de um diafragma e mantida igual a 1,5m/s, à temperatura ambiente (entrada do secador). O aquecimento do ar foi feito por resistências elétricas, e sua temperatura ajustada por um variador de voltagem ligado a uma resistência. Sob a bandeja com o produto, foi instalado um termistor, ligado a um indicador digital de temperatura.

Os testes de secagem foram realizados até se obterem dados suficientes para a construção da curva de secagem

O teor de umidade de equilíbrio, foi determinado deixando as bandejas no secador até atingir o equilíbrio, para as temperaturas de 55 e 65°C. Para as outras temperaturas, foi utilizado estufa com circulação forçada na mesma temperatura de secagem da amostra.



PLANTA BAIXA - ESC. 1:20 COTAS EM MM



CORTE LONGITUDINAL (AB) - ESC. 1:20 COTAS EM MM

LE GENDA

A - BANDEJA
 B - DUTO
 C - "PLENUM"
 D - RESISTENCIA ELÉTRICA ADICIONAL

E - SISTEMA DE AGUECIMENTO
 (RESIST. ELÉTRICAS)
 F - VENTILADOR
 G - DIAFRAGMA

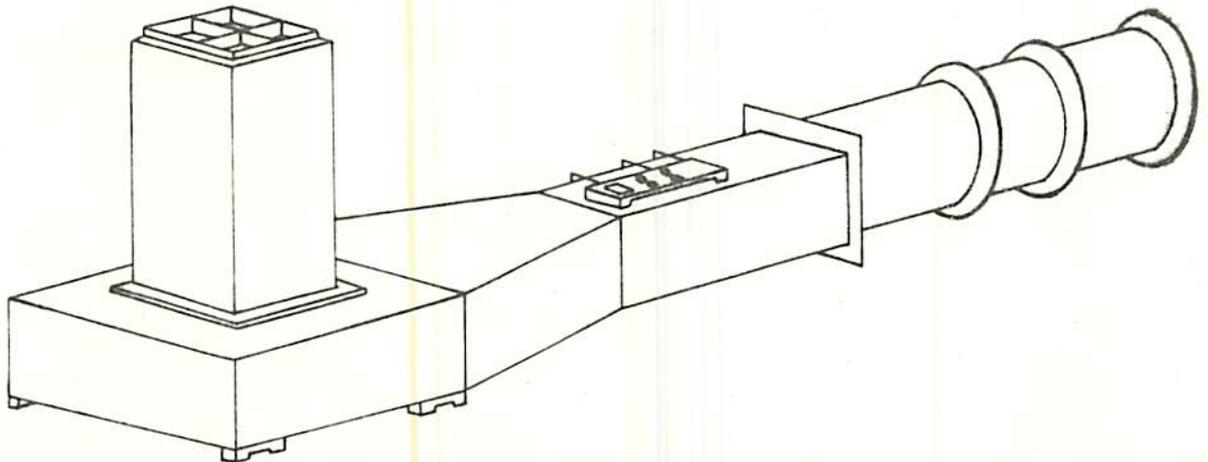


FIGURA 1. Esquema do secador experimental.

Calcularam-se os valores de razão de umidade, RU, correspondentes a cada teor de umidade. Estes dados e o tempo foram submetidos a uma análise de regressão não linear simples, visando ajustar os modelos correspondentes às equações 2 e 3.

3.3. Determinação da condutividade térmica.

Para medir a condutividade térmica da batata doce, utilizou-se a bancada automatizado por PASSOS et alii (40), que se constitui de uma sonda com fonte linear de energia. A sonda é constituída de uma agulha hipodérmica de 0,55 mm de diâmetro externo e 3,0 cm de comprimento, através da qual foi introduzida um par termoelétrico de cobre-constantan no seu ponto médio e um fio aquecedor de constantan, estendendo ao longo de todo comprimento. A relação comprimento diâmetro da sonda foi aproximadamente 54, satisfazendo à condição recomendada por BLACKWELL (6).

A bancada consistiu de dois circuitos independentes: o circuito do termopar, cujas extremidades são ligadas diretamente a um dos canais de aquisição de dados (modelo HP - 3421 - A), e o circuito do fio aquecedor, conectado em série a uma fonte reguladora de tensão, um resistor de constantan (R valendo cerca de 1 ohm) e um canal atuador da aquisição de dados (canal 0) - (figura 2). A aquisição de dados está conectada a um microcomputador tipo IBM - PC - XT, através de uma interface IEEE - 488. Através de um programa feito em turbo-pascal, o canal zero é fechado, energizando a sonda com uma corrente da ordem de 180 mA, que vale

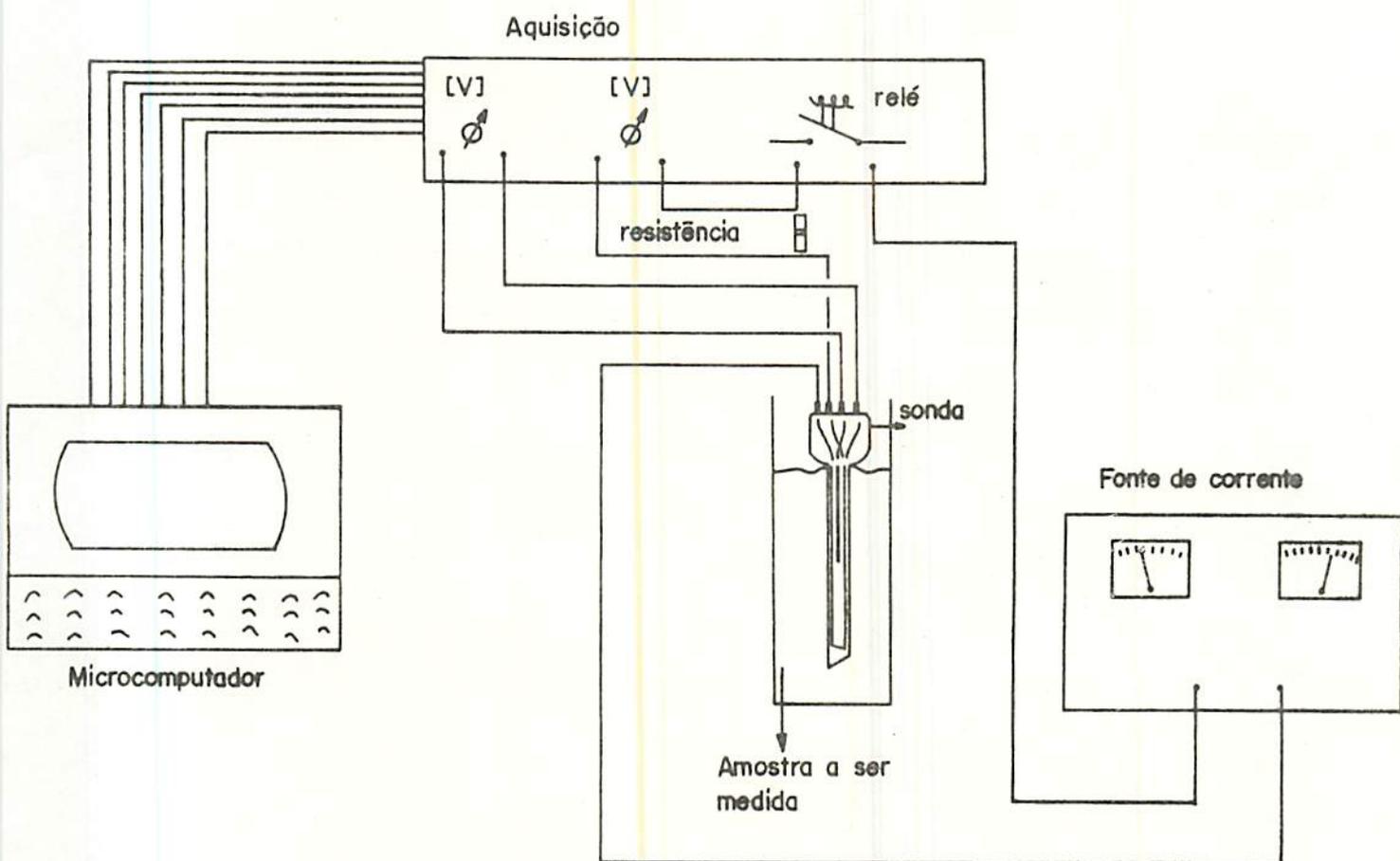


FIGURA 2. Esquema do sistema de medição da condutividade térmica.

por unidade de comprimento da sonda cerca de 3,22 W/m. Após testes, optou-se pelo intervalo de tempo de 1,7 a 4,8 segundos, sendo considerados os pontos entre a sexta e a décima sétima medidas de temperatura, que são usados no cálculo da inclinação da reta, temperatura versus \ln do tempo.

As amostras cortadas em cilindros de 1,2 cm de diâmetro por 3,6 cm de comprimento, foram tratadas com metabissulfito de sódio, pesadas e submetidas a secagem em estufa com ventilação forçada a 55°C. Em intervalo pré-estabelecido, retirava-se uma amostra que, após a pesagem, era colocada em sacos de polietileno, permanecendo na sala de medição por um período mínimo de 20 horas, visando obter um equilíbrio térmico destas amostras com o ambiente. Este tempo permitiu também a redistribuição da umidade nos cilindros da batata doce. Após esse período colocava-se uma sonda no centro e na direção longitudinal das amostras. Os valores da condutividade térmica da batata doce foram obtidos pela média aritmética de trinta repetições.

3.4. Determinação do calor específico

Determinou-se o calor específico, segundo duas abordagens: pela composição química média da batata doce, usando a equação proposta por HELDMAN (24) e pelo método calorimétrico de mistura direta.

O calorímetro utilizado constituiu-se de uma garrafa térmica de 1000 ml no interior de um cilindro de PVC, com enchimento de

lã de rocha. Na determinação da temperatura no interior do calorímetro, usou-se um termômetro digital de $0,1^{\circ}\text{C}$ de precisão.

A determinação da capacidade térmica ou calibração do calorímetro foi obtida em duas fases, conforme ALMEIDA (1): a primeira consistiu em se colocar 350 ml de água destilada a 25°C , no calorímetro e agita-lo manualmente durante cerca de 120 segundos (testes preliminares indicaram que esse tempo era suficiente para estabelecer o equilíbrio térmico entre o calorímetro e a água), em seguida determinou-se a temperatura do sistema. A segunda fase consistiu na adição de mais 350 ml de água a 4°C , ao sistema, perfazendo um volume de 700 ml. O calorímetro era novamente agitado, pelo mesmo tempo e determinada a temperatura. Por meio da equação determinou-se a capacidade térmica do calorímetro.

Utilizaram-se aproximadamente 150g de amostras em 4 repetições, para 13 níveis de umidade. As amostras eram pesadas e colocadas numa câmara fria, cerca de 5°C , por pelo menos 20 horas para ocorrer o equilíbrio térmico.

A determinação do calor específico da batata doce, foi realizada em duas fases, sendo a primeira idêntica à primeira fase de calibração. A segunda consistiu na introdução da amostra no líquido calorimétrico e agitação, visando obter o equilíbrio térmico entre o sistema e a amostra. As massas e temperaturas da água e da amostra, antes e após o equilíbrio térmico, eram usadas para determinar o calor específico da batata doce segundo a equação 7.

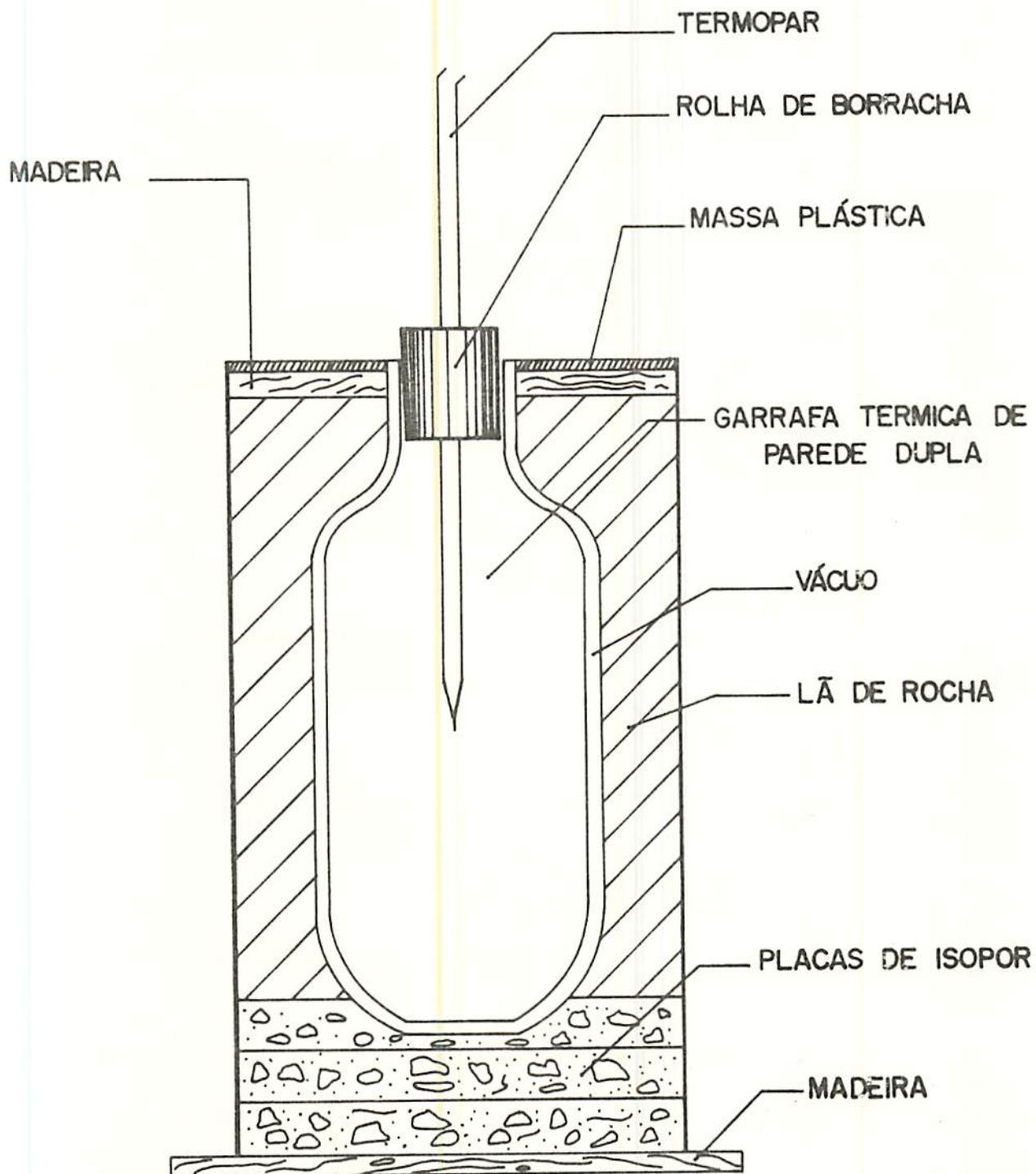


FIGURA 3. Esquema do calorímetro de mistura direta.

3.5. Variação de volume e da massa específica

Utilizou-se uma proveta graduada com 250 ml de tolueno. Utilizaram-se amostras de batata doce com diferentes teores de umidade para determinação do volume. Estas amostras foram inicialmente pesadas e colocadas no secador por um tempo suficiente para atingir o teor de umidade desejado. Retiradas do secador, foram novamente pesadas e colocadas em sacos plásticos de polietileno até entrarem em equilíbrio térmico com o ambiente. Logo a seguir, determinou-se o volume pelo método de deslocamento de líquido (tolueno). A massa específica para cada teor de umidade foi determinada a partir da massa e do volume correspondente das amostras.

3.6. Isotermas de equilíbrio higroscópico

Na determinação das curvas de teor de umidade de equilíbrio utilizou-se o método estático das soluções saturadas de sais, conforme HALL (22) e ROSSI & ROA (47). Empregou-se três câmaras com temperatura controlada: 30°C, 45°C e 60°C. As soluções saturadas de sais empregados e a umidade relativa por elas fornecidas, em função da temperatura, encontra-se no quadro 1. Em intervalos regulares de tempo fazia-se aferição das umidades relativas com Higrômetro Airguide modelo 111.

Amostras de batata doce preparadas, conforme descrito no item 3.1, sofreram secagem parcial, com ar a 35°C e 45% de umida-

de relativa. Esse procedimento visava a que as amostras resultantes sofressem dessorção durante o experimento e que não deteriorassem no interior dos dessecadores o que ocorre a umidades relativas superiores a 75%.

A amostra, pesando aproximadamente 10g, era colocado em frascos de vidro apropriados à metodologia e esses no interior dos dessecadores, que continham a solução. Os frascos eram pesados diariamente até peso constante. As pesagens foram feitas em balança METTLER, modelo H54 Ar. Atingindo o equilíbrio, procedia-se à determinação da umidade, pelo método de estufa de convecção natural. Os resultados foram expressos em porcentagem de base seca. As determinações foram realizadas em duplicata.

3.7. Coeficientes de transferência de energia e massa

Com auxílio das equações 6, 7, 8, 9, 10 e 14, da relação entre o fator J_H e o número de Reynolds modificado,

$$J_H = 0,44768 Re_{mod}^{-0,4599} \quad \text{eq. 14}$$

$$R^2 = 0,998$$

apresentada por LOPES FILHO (31) e das propriedades físicas do ar, obtidas por NASHCHOKIN (38), foram calculados os coeficientes de transferência de energia e massa, para as condições de secagem da batata doce.

QUADRO 1 - Características das soluções saturadas e suas respectivas umidades relativas em diferentes temperaturas, HALL (22).

Soluções	Umidade relativa (%)		
	35°C	45°C	60°C
KOH	8,4	8,1	7,7
LiCl.H ₂ O	11,5	11,0	10,8
MgCl ₂ .6H ₂ O	33,3	32,8	32,3
K ₂ CO ₃	43,4	43,0	42,8
NaNO ₂	65,4	64,9	63,8
NaCl	75,5	75,2	74,7
KCl	86,0	85,0	84,2

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Composição química média

O quadro 2 apresenta a composição química média da batata doce. As porcentagens obtidas experimentalmente, estão de acordo com o mencionado na literatura, para esta variedade (9, 10, 61).

Quadro 2. Composição química média.

Componentes	porcentagem
umidade	72,70
proteína	01,37
gordura	00,38
carboidrato	22,65
cinza	02,90

4.2. Curvas de Secagem

As figuras 4 e 5 mostram as curvas de secagem da batata doce ajustadas, respectivamente, segundo as equações 2 e 3 e os dados experimentais para as temperaturas estudadas. Os parâmetros de regressão e os coeficientes de determinação, são apresentados nos quadros 3 e 4, respectivamente. Estas equações por serem de natureza empírica, devem ser usadas para secagem na faixa de temperatura estudada e em camadas finas, segundo SASSERON (49).

Do ponto de vista de precisão de dados para as condições estudadas, a equação 2, descreve muito bem o processo de secagem, podendo integrar modelos de simulação de secagem. A aplicabilidade desta equação vem confirmar resultados obtidos por Pinheiro, mencionados por SASSERON (49), na secagem de amêndoas de cacau em camadas finas. O mesmo não ocorreu com a equação 3, que não descreveu realisticamente todo o processo de secagem, com desvios inaceitáveis do ponto de vista de engenharia.

4.3. Condutividade Térmica

A variação da condutividade térmica em função do teor de umidade da batata doce é mostrado na figura 6. Observa-se que a condutividade térmica aumenta de acordo com o teor de umidade até o nível de 2,0 b.s.. Para teores mais elevados, verifica-se uma oscilação da condutividade térmica em torno de um valor médio de 0,48 W/m-K. O mesmo comportamento foi observado para a batata, em

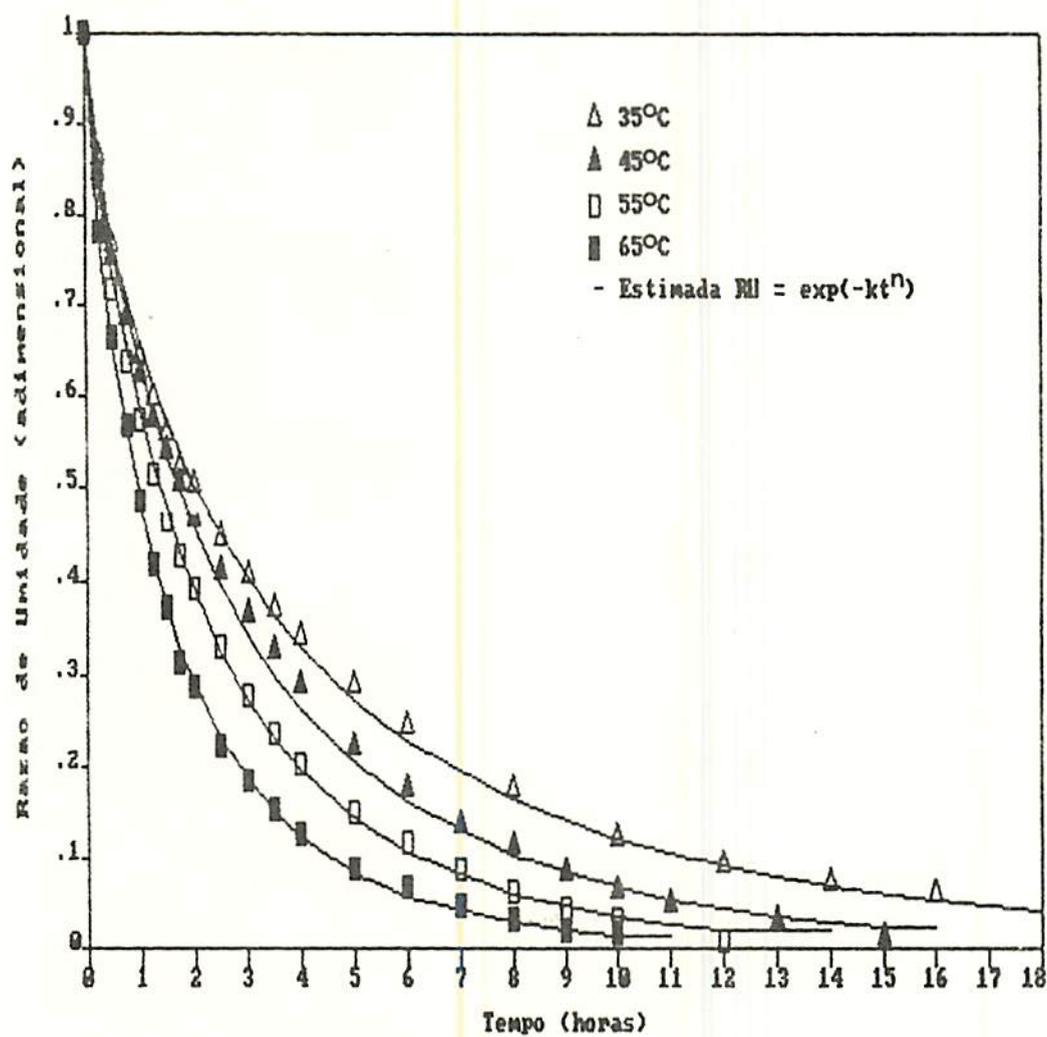


FIGURA 4. Curvas de Razão de Umidade da Batata Doce.

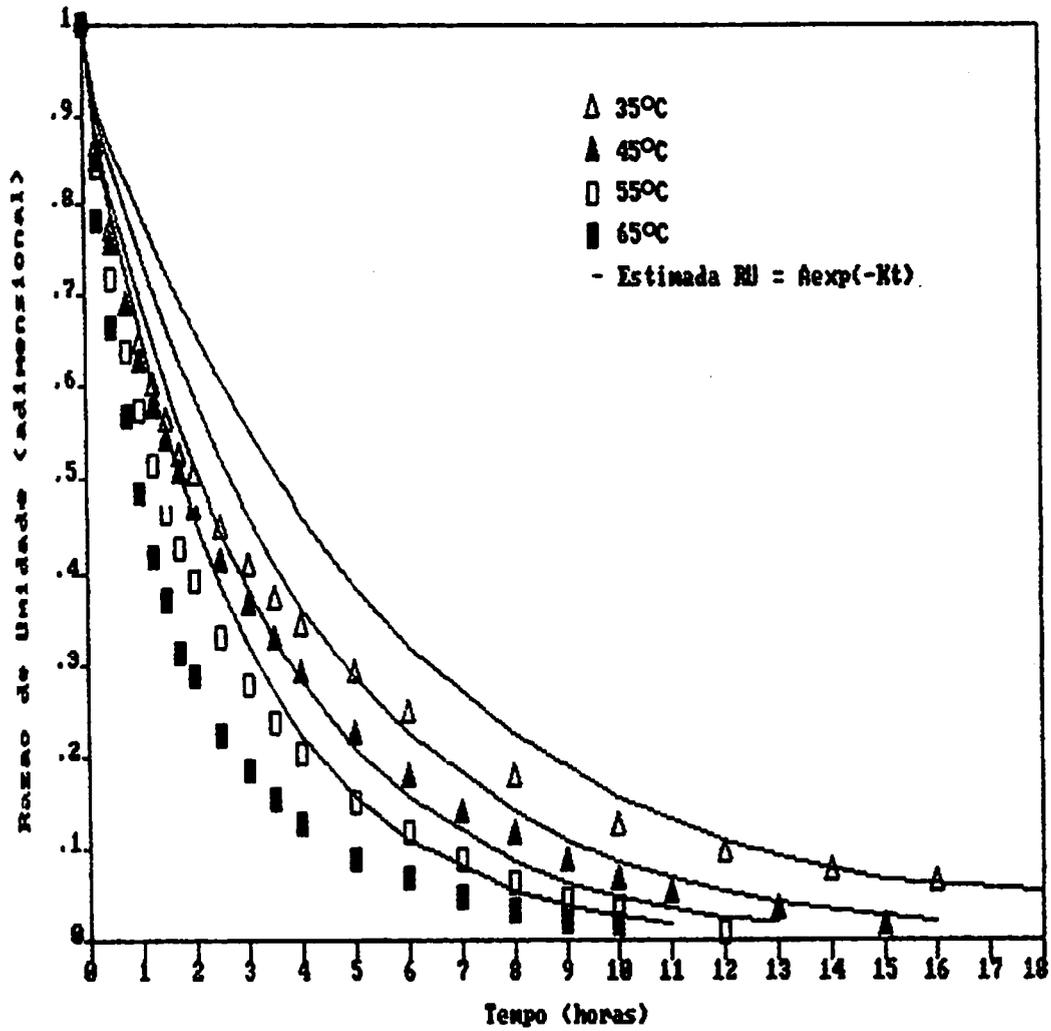


FIGURA 5. Curvas de Razão de Umidade de Batata Doce.

Quadro 3. Valores dos coeficientes da Equação 2 e respectivo coeficiente de determinação, considerando as temperaturas do ar de secagem.

	Temperatura (°C)			
	35	45	55	65
n	0,7062	0,7722	0,7987	0,7671
k	0,0230	0,0193	0,0204	0,0312
R ²	0,99	0,99	0,99	0,99

Quadro 4. Valores dos coeficientes da Equação 3 e respectivo coeficiente de determinação, considerando as temperaturas do ar de secagem.

	Temperatura (°C)			
	35	45	55	65
A	0,954	0,958	0,945	0,951
k	0,003	0,004	0,005	0,006
R ²	0.78	0.77	0.78	0.79

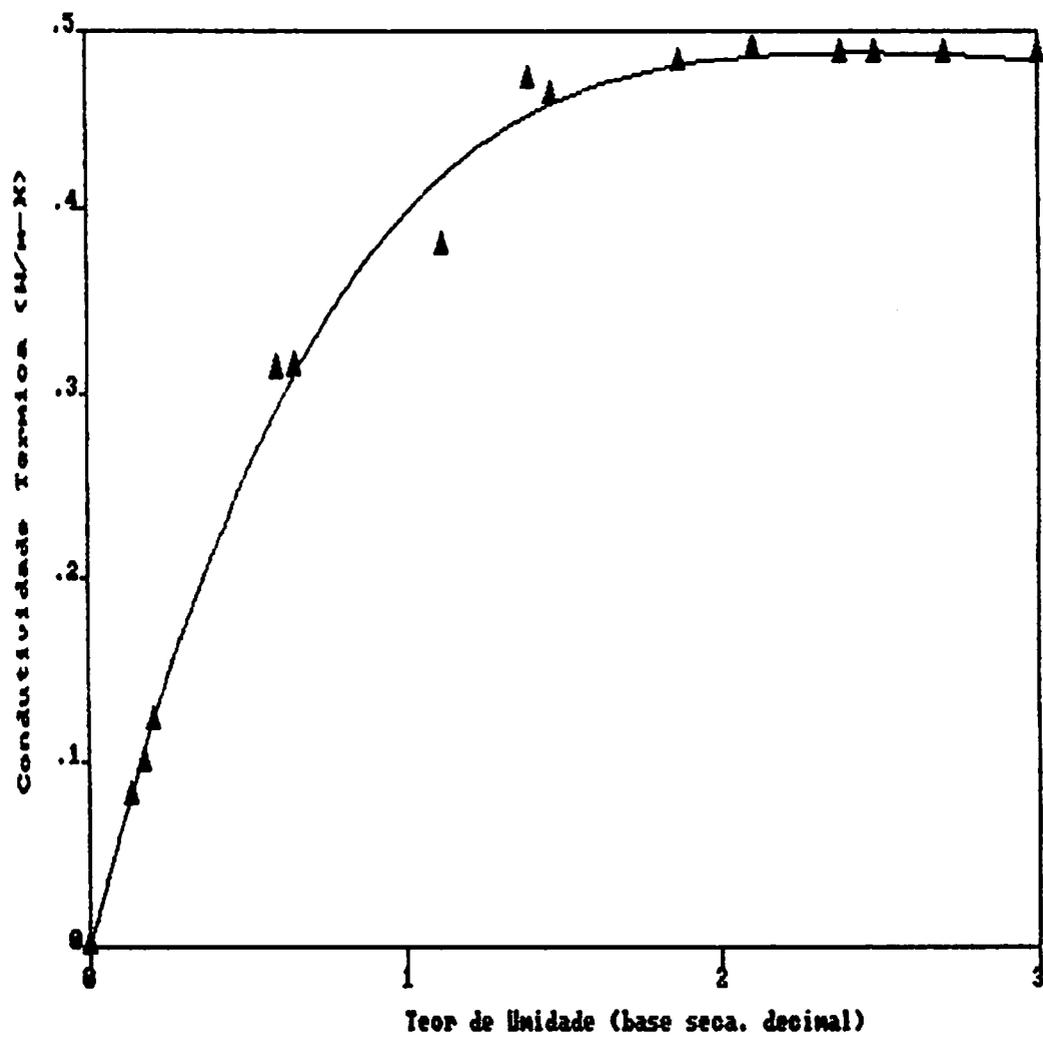


FIGURA 6. Variação da Condutividade Térmica com o Teor de Umidade.

estudos realizados por LOPES FILHO (31).

A equação 15, que é representada na mesma figura, descreve o comportamento da condutividade térmica da batata doce, a 25°C, com o teor de umidade.

$$K_T = 0,0044 + 1,8770M - 2,4520M^2 + 1,0700M^3 \quad \text{eq. 15}$$

em que:

K_T - condutividade Térmica, W/m-K;

M - teor de umidade decimal (bs).

O valor do coeficiente de determinação ($R^2 = 0,995$) indica que a equação polinomial de terceiro grau descreve bem o comportamento dos dados observados.

Relações lineares entre a condutividade térmica e teor de umidade obtida para vários materiais biológicos, foram citados por RAO & RIZVI (45) e ALMEIDA (1). Este mesmo comportamento foi verificado para amêndoas de cacau, determinado por SASSERON (49). Uma relação exponencial foi obtida por LOZANO et alii (32) para maçã, utilizando o mesmo método de determinação da condutividade térmica, sendo que estes autores concluíram que a condutividade térmica é independente da temperatura, para a faixa de processamento da maçã (22°C a 60°C).

As oscilações nos valores da condutividade térmica podem ser explicadas pelas mudanças na estrutura da batata doce, dura-

nte a secagem, como pode ser observado pela variação do volume e da massa específica, apresentados nas figuras 8 e 9.

4.4. Calor Específico

Os resultados experimentais e os calculados pela equação de HELDMAN (24), encontram-se na figura 7.

Uma relação linear entre o calor específico de alguns materiais biológicos e o seu teor de umidade é sugerida por uns pesquisadores (1, 28, 35, 51), enquanto outros (11, 49), mencionam relações quadráticas.

O calor específico da batata doce e o seu teor de umidade, calculado pela equação 3 de HELDMAN (24), apresentou uma relação cúbica e não uma relação linear como sugerido pela equação, devido ao fato de ter sido utilizado, no gráfico da figura 7, o teor de umidade em base seca. Uma equação quadrática foi a que melhor se ajustou aos dados experimentais.

Os resultados obtidos para o calor específico da batata doce usando a equação 3 e o método das misturas diretas apresentaram uma discrepância. Isto se deve ao fato dessa equação ter sido desenvolvida para grãos. Embora alguns autores (24 e 31) tenham utilizados para outros materiais biológicos. Para o caso específico da batata doce não é recomendado o uso da mesma.

A equação ajustada para os dados experimentais, obtidos pelo método da mistura direta, foi:

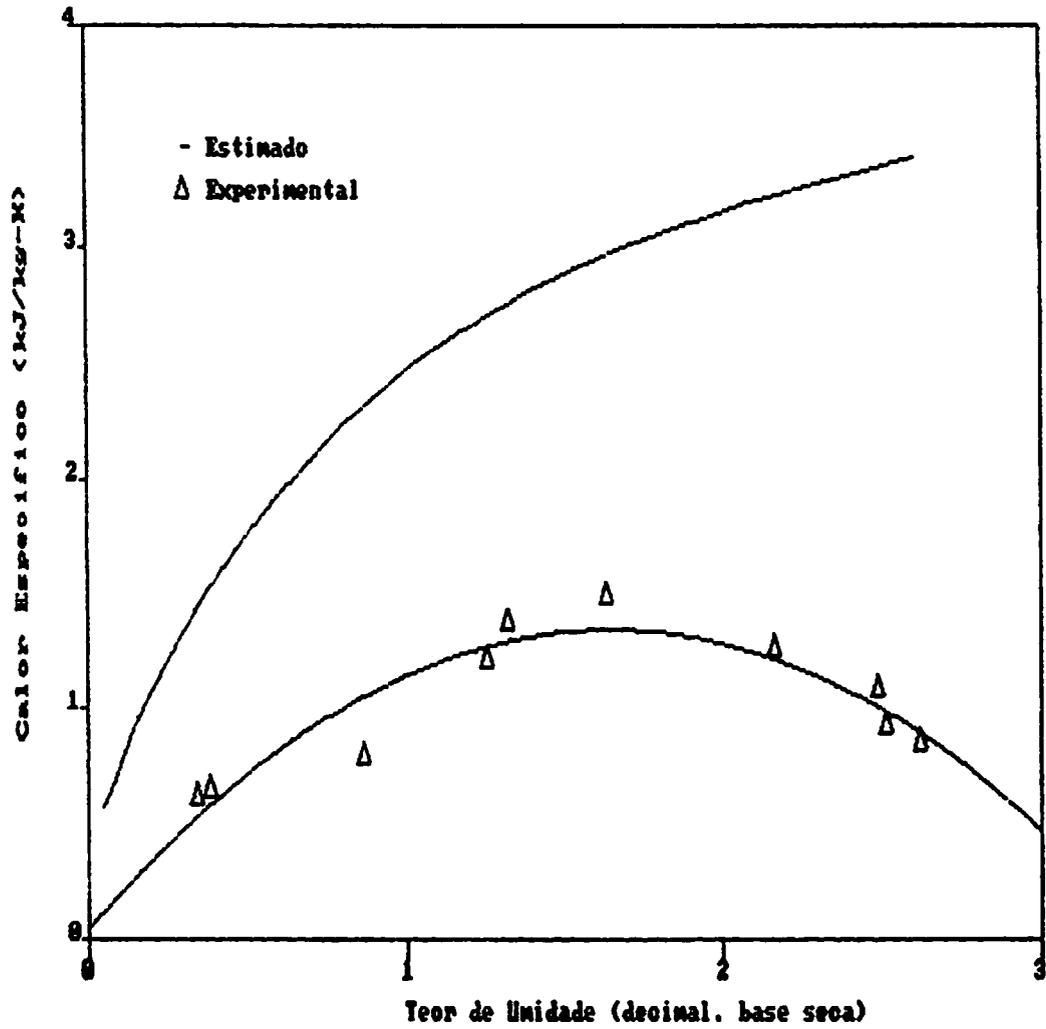


FIGURA 7. Variação do calor específico com o teor de umidade

$$c_m = 0.0046 + 4.7050M - 4.2840M^2 \quad \text{eq. 16}$$

em que:

c_m - calor específico, kJ/kg-K,

M - teor de umidade, decimal (bs).

Podemos relacionar alguns possíveis erros que tenham ocorrido durante a fase experimental:

a) agitação do sistema, levando em consideração a energia dissipada por esta agitação e efeito sobre a troca de calor com o meio ambiente;

b) interação entre a troca de calor calorímetro-ambiente e o tempo necessário para se atingir o equilíbrio;

c) existência de energia de adsorção, devido a higroscopicidade da batata doce, com baixo teor de umidade.

Verificou-se que houve adsorção de certa quantidade de umidade, produzindo calor de umidecimento, que provavelmente tenha ocasionado aumento de temperatura, da batata doce de baixo teor de umidade. Este mesmo fenômeno, também foi observado por ALMEIDA (1) e SASSERON (49) que trabalharam com amêndoas de cacau.

4.5. Volume e Massa Específica durante a Secagem

As figuras 8 e 9 mostram a variação do volume e da massa específica dos cilindros de batata doce com o teor de umidade,

para a temperatura de secagem de 55°C. O fato de ser ter estudado a variação destas propriedades só para uma temperatura de secagem, se deve ao efeito não significativo, ao nível de 5%, sobre as mesmas, em ensaios preliminares. Tal fato foi verificado, por outros autores, ALMEIDA (1) e LOPES FILHO (31).

Uma relação linear, com coeficiente de determinação de 0,910, foi observado. A análise de regressão usando os dados do volume e umidade apresentou a seguinte equação:

$$V = 4,3790 + 5,953M \quad \text{eq. 17}$$

em que:

V - volume, m³;

M - teor de umidade, decimal (bs).

A relação linear entre o volume e o teor de umidade obtido, apresenta um comportamento semelhante ao obtido por LOPES FILHO (31). Por sua vez Wraten et alii, citado por SASSERON (49) e FORTES & OKOS (17), encontraram relações aproximadamente lineares entre o volume dos grãos submetidos à secagem com seu teor de umidade, para uma faixa de temperatura de 32 a 95°C, para o arroz e milho, respectivamente.

Para verificar a absorção do tolueno pelos cilindros da batata doce, durante a medição do volume, realizaram-se testes, que consistiam na pesagem dos cilindros antes e após a imersão no tolueno. Eles demonstraram que para teores de umidade mais elevados

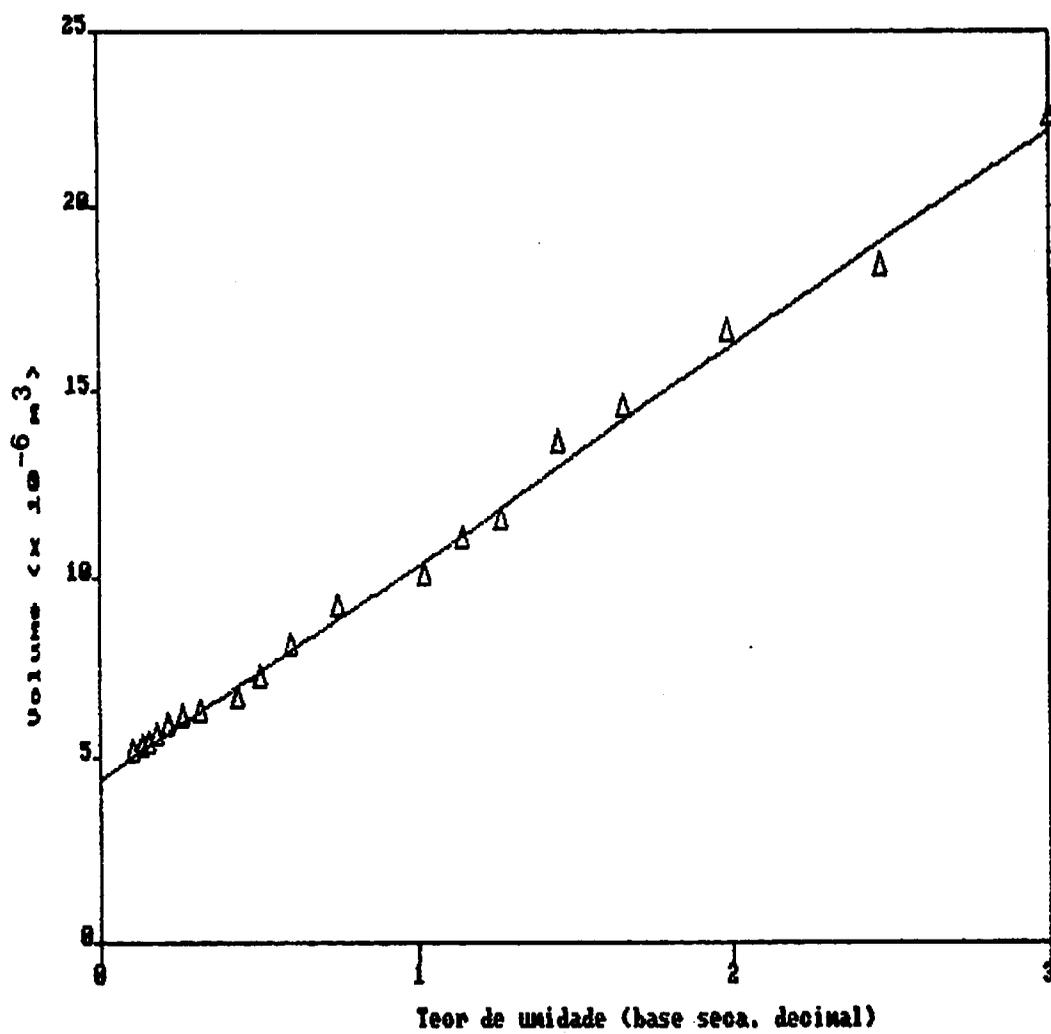


FIGURA 8. Variação do Volume dos Cilindros de Batata Doce com Teor de Umidade, durante o Processo de Secagem a 55°C.

não houve absorção apreciável de tolueno (0,07%). Para teores mais baixos, verificou-se uma pequena absorção do tolueno, obtendo um erro máximo de 2,2% entre a massa da batata doce antes e depois da imersão. Pode-se deduzir que o erro do volume medido deverá ser inferior a 2,2%, pois o volume dos cilindros cresce linearmente com o volume de tolueno absorvido.

Há uma variação no comportamento da massa específica em relação ao teor de umidade dos materiais biológicos, mencionados na literatura. LOPES FILHO (31) encontrou uma relação irregular da massa específica da batata com seu teor de umidade, crescendo até níveis de umidade de 0,9 decimal (bs) e decrescendo para teores maiores. ALMEIDA (1) e SASSERON (49) obtiveram uma relação linear para amêndoas de cacau, para teores de umidade na faixa de 0% a 50% bu. PEREIRA (41) encontrou variação cúbica com teor de umidade e temperatura para mandioca cortada em cilindros. GUSTAFSON e HALL (21) apresentaram relações lineares para alguns tipos de grãos, com um decréscimo da massa específica, com o aumento do teor de umidade.

Os dados experimentais, figura 9, mostram que durante a secagem até teores de umidade em torno de 1,5 bs, decimal, a massa específica da batata doce decresce com a umidade. A partir desse valor, a massa específica tende a conservar-se praticamente constante.

A equação que melhor se ajustou aos dados experimentais da massa específica com teor de umidade foi:

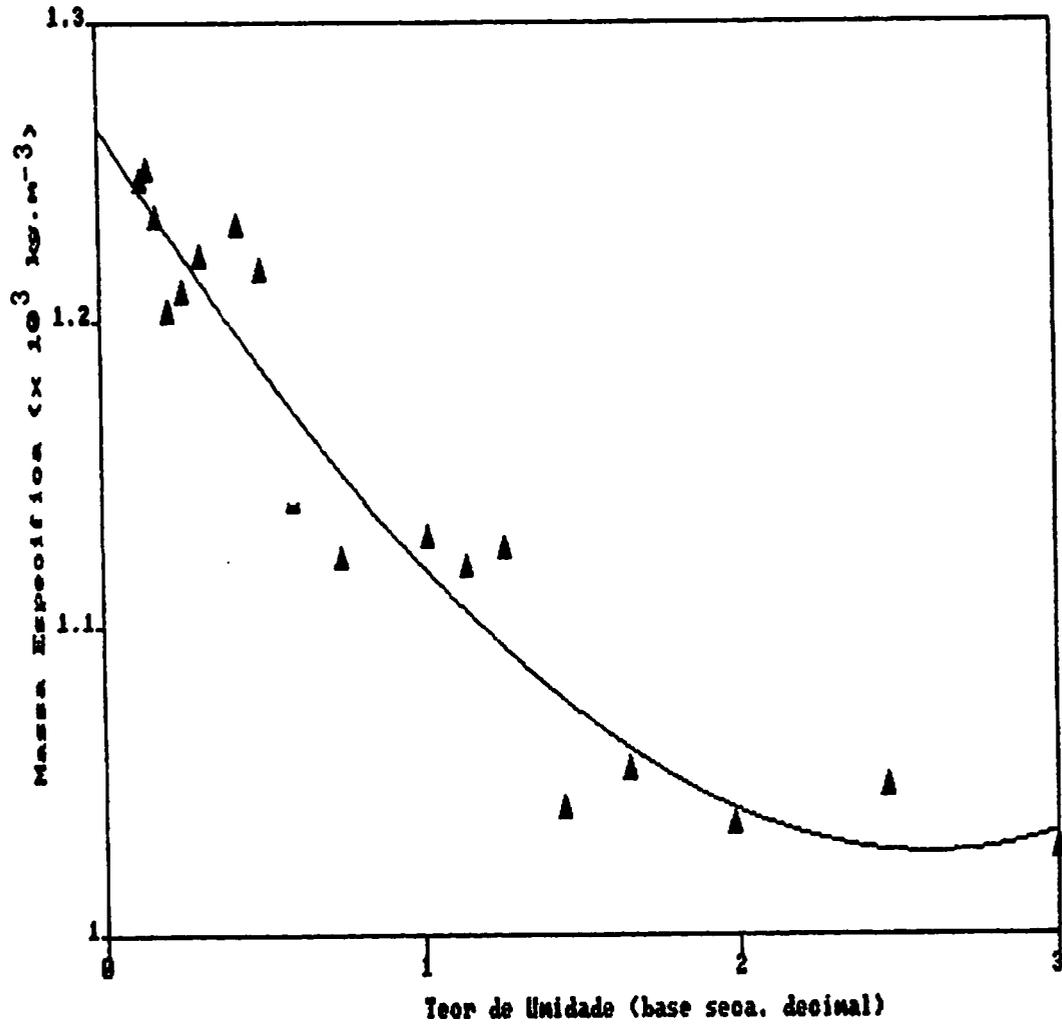


FIGURA 9. Variação da Massa Específica dos Cilindros de Batata Doce, com o Teor de Umidade durante o Processo de secagem a 55°C .

$$\rho = 1,2640 - 0,5154M + 0,2388M^2 + 0,0045M^3. \quad \text{eq. 18}$$

em que:

ρ - massa específica, kg.m^{-3} ;

M - teor de umidade, decimal (bs)

R^2 - 0,61

4.6. Isotermas de equilíbrio higroscópico

Na figura 10 vêem-se as curvas de equilíbrio higroscópico da batata doce. Nenhum dos modelos existentes na literatura descreveram realisticamente a umidade de equilíbrio em função da umidade relativa, para as temperaturas estudadas. Desta forma procurou-se encontrar um modelo, através de análise de regressão, que expressasse os valores encontrados experimentalmente, conforme mostra nas equações 19, 20 e 21, para as respectivas temperaturas.

$$U_e = 0.102 + 89.420U - 406.000U^2 + 819.500U^3 - 443.400U^4 \quad \text{eq.19}$$

$$U_e = 0.098 + 63.020U - 225.000U^2 + 411.800U^3 - 212.000U^4 \quad \text{eq.20}$$

$$U_e = 0.001 + 52.950U - 154.900U^2 + 219.700U^3 - 100.900U^4 \quad \text{eq.21}$$

em que:

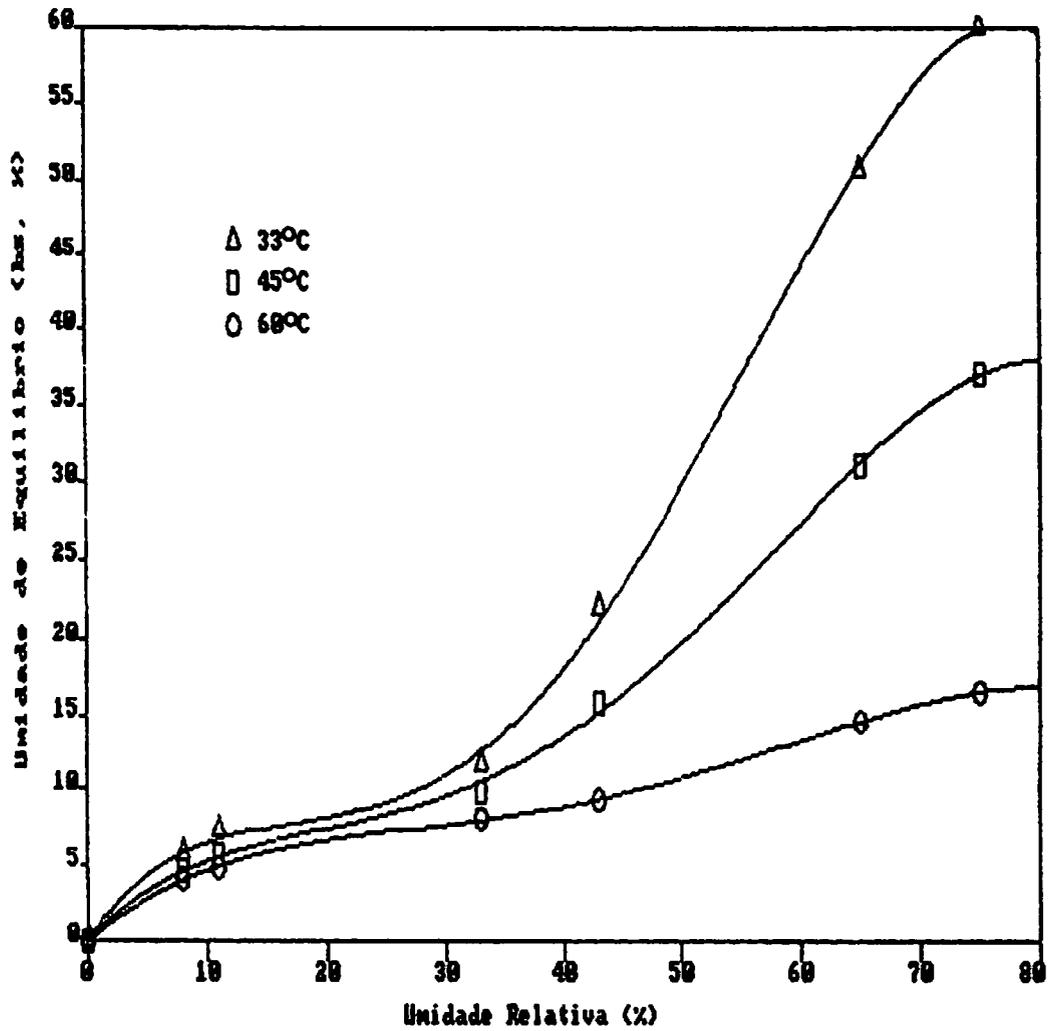


FIGURA 10. Curvas de teor de umidade de equilíbrio em função da umidade relativa, nas condições experimentais.

U_e - umidade de equilíbrio, % bs;

U - umidade relativa, %

Os dados experimentais, bem como os calculados pelas equações anteriores, foram plotados por computador, como se vê na figura 10.

De acordo com os dados experimentais, verifica-se que as umidades de equilíbrio crescem de acordo com o aumento da umidade relativa e a diminuição da temperatura. Para umidades relativas acima de 40% a umidade de equilíbrio variou mais fortemente com a temperatura.

Uma vez que a literatura consultada não se refere a esses valores para a batata doce, torna-se impossível a comparação destes resultados. No entanto, os valores encontrados, apresentam o mesmo comportamento, ao obtido por SINICIO & ROA (53) para a batata.

4.7. Coeficientes de transferência de energia e massa

As propriedades do ar de secagem obtidos na literatura e os valores calculados dos coeficientes de transferência de energia e massa, são apresentados no quadro 5. Para as condições de secagem, esses coeficientes foram determinados com o auxílio das equações 6, 7, 8, 9, 10 e 14.

Quadro 5. Coeficientes de Transferência de Energia e Massa na secagem da Batata Doce e Propriedades Físicas do ar.

	Temperatura (°C)				Unidades

	35	45	55	60	
Velocidade do ar	1,55	1,60	1,65	1,70	m.s ⁻¹
U _a	1,885	1,935	1,985	2,035	(10 ⁻⁵)kg.m ⁻¹ .s ⁻¹
K _a	2,716	2,791	2,861	2,931	(10 ⁻²)W.m ⁻¹ .K ⁻¹
C _{pa}	1,005	1,005	1,005	1,007	(10 ³)J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
ρ _a	1,1465	1,1105	1,0765	1,0445	kg.m ⁻³
Re _{mod}	1885	1836	1790	1745	adimensional
Pr	0,700	0,699	0,697	0,695	adimensional
Sc	0,600	0,600	0,600	0,600	adimensional
D _{atm}	2,990	3,160	3,333	3,513	(10 ⁻⁵)m ² .s ⁻¹
h _T	39,97	40,55	41,00	41,02	W.m ⁻² .K ⁻¹
h _m	4,60	4,64	4,70	4,74	(10 ⁻⁷)s.m ⁻¹

Na obtenção dos dados do quadro 5, considerou-se uma vazão mássica constante igual a 1,776 kg.m⁻².s⁻¹. Verificou-se um aumento na velocidade do ar na saída do secador, o que pode ser explicado pela diminuição da massa específica do ar para temperaturas maiores.

5. CONCLUSÕES

1. O teor de umidade decresce exponencialmente com o tempo de secagem, comportamento típico dos produtos biológicos. O modelo da equação 11 foi o que melhor se ajustou aos dados de secagem.

2. A condutividade térmica cresce com o teor de umidade até 2,0 b.s., decimal. A partir desse valor, verifica-se uma oscilação em torno de 0,48 W/m-K.

3. O calor específico e o teor de umidade segue uma relação quadrática, segundo o modelo da equação 16. A equação de Heldman não descreve realisticamente o comportamento do calor específico da batata doce em função do teor de umidade.

4. O volume cresce linearmente com o teor de umidade. O comportamento linear foi semelhante ao da batata(31).

5. A massa específica decresce com o teor de umidade até o nível de 1,5 b.s. decimal e para valores maiores tende a conservar-se praticamente constante, segundo o modelo da equação 18.

6. Os modelos que se ajustaram melhor aos dados experimentais das isotermas, foram os das equações 19, 20 e 21.

6. RESUMO

CARACTERÍSTICA DE SECAGEM E AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DA BATATA DOCE

O conhecimento das propriedades físicas de materiais biológicos é um ponto chave nos projetos de equipamentos e simulação de secagem e resfriamento. Este trabalho teve como objetivo principal obter os parâmetros físicos da batata doce (Ipomoea batatas), necessários à utilização em estudos de simulação e projetos de secadores.

A batata doce foi cortada em cilindros, tratada com solução de metabissulfito e submetida a secagem.

As curvas de secagem foram determinadas com ar a 35°C, 45°C, 55°C e 65°C e velocidade de 1,5 m.s⁻¹. A condutividade térmica, calor específico, volume e massa específica foram determinados a 25°C. Dentre os modelos matemáticos de secagem estudados, o que melhor se ajustou aos dados experimentais foi a equação: $RU = \exp(-kt^n)$. A condutividade térmica, determinada pelo método transiente, aumentou com o teor de umidade até 2,0, (decimal, bs) e a partir deste permaneceu praticamente constante. Relativamente

ao teor de umidade, o calor específico foi determinado pelo método das misturas diretas e segue uma relação quadrática, o volume varia linearmente enquanto que a massa específica apresentou uma relação cúbica. As isotermas de equilíbrio foram descritas por um polinômio de 4º grau.

Por meio de dados e equações da literatura, foram obtidos os coeficientes de transferência de energia e massa dos cilindros de batata doce.

7. SUMMARY

DRYING CHARACTERISTICS AND PHYSICAL PROPERTIES OF SWEET POTATOES EVALUATION

The knowledge of the physical properties of biological material is one key point in the equipments design and drying simulation and cooling. The main objective of this work was to determine the parameters of the sweet potato (Ipomoea batatas), necessary to study the drying process and simulation.

The sweet potato was cut in cylinders, treated with solution of metabisulfite and submitted to the drying process.

The drying curves were determined with air at 35°C, 45°C, 55°C and 65°C and velocity of 1,5 m/s. The thermal conductivity, specific heat, volume and specific mass were determined at 25°C and at the drying temperature of 55°C. Among the mathematical models of drying studied, was a better agreement with the use of the equation $RU = \exp(-kt^n)$. The thermal conductivity, determined for the transient method, increased with water content up to 2,0, (decimal, bs) and after this value remain practically constant. Concerning to the water content the specific heat was determined.

it followed one quadratic polynomial, the volume change linearly, while the specific mass exhibit one cubic expression. The isotherms of higroscopic equilibrium were related as a polynomial of 4th grade.

Through data and equations from the literature, the transfer coefficient of energy and mass, of the cylinders of sweet potato, were obtained.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALMEIDA, B.V. Determinação de propriedades físicas de amêndoa de cacau (Theobroma cacao). Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, Imprensa Universitária, 1979. 70 p. (Tese MS).
2. ALVARENGA, L.C. Transporte de água em grãos de feijão-preto sob condições de secagem e repouso. Viçosa, Imprensa Universitária, 1979 58 p. (tese MS).
3. ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists. 11 ed. Washington, 1970. 1015 p.
4. BERGER, D. & PEI, D.C.T. Drying of higroscopic capillary porous solids - A theoretical approach. International Journal Heat Mass Transfer, London, **23:293-302**, 1973.
5. BIRD, R.B.; STEWART, W E. & LIGHTFOOT, E.N. Transport phenomena. New York, John Wiley & Sons, 1960. 780p.

6. BLACKWELL, J.H. The axial-flow error in the thermal conductivity by probe. Canadian Journal of Physics, Ottawa, 34(4):412-17, Apr. 1956.
7. BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W. & HALL, C.H. Drying cereal grains. Westport, The Publishing Company, 1978. 265 p.
8. BROWNE, D A. Removing trapped air density determination on seeds. Journal of Agriculture Engineering Research, London, 70(3):23-29, Mar. 1962.
9. CEREDA, M.P.; CAGLIARI, A.M.; HEEZEN, A.M. & FIORETTO, R.A. Estudo comparativo de cultivares de batata doce visando o aproveitamento industrial. Revista de Olericultura, Viçosa, 17:195-203, 1979.
10. _____; WOSIACKI, G. & CONCEIÇÃO, F.A.D. Avaliação físico-química e reológica de vinte e seis cultivares de batata doce. Revista Horticultura Brasileira, Brasília, 2(1):6-12, jan. 1984.
11. CHAKRABART, S.M. & JOHNSON, W.H. Specific heat of flue cured tobacco by differential scanning calorimetry. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 15(5):928-31, Sept./Oct. 1972.

12. CHANDRA, S. & MUIR, W.E. Thermal conductivity of spring wheat at low temperatures. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 14(4):644-646, July/Aug. 1971.
13. CHUNG, D.S. & PFOST, H.B. Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains, and their products. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 10(4):552-575, July/Aug. 1967.
14. De VRIES, D.A. A nonstationary method for determining thermal conductivity of soil in situ. Soil Science, Baltimore, 73(2):83-9, Mar./Apr. 1952.
15. DISNEY, R.W. The specific heat of some cereal grains. Cereal chemistry, St. Paul, 31(3):229-39, Mar. 1954.
16. EDMOND, J.B. Sweet potatoes; production, processing, marketing. Westport, The AVI Publishing Company, 1971. 334 p.
17. FORTES, M. & OKOS, M.R. Changes in physical properties of corn during drying. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 23(4):1004-8, July/Aug. 1972.
18. _____ & _____. Drying theories; their bases and limitations as applied to foods and grains. In: MUJUNDAR, A.S., ed. Advances in Drying. New York, Science Press, 1980. p. 153-62.

19. FORTES, M. & OKOS, M.R. A non-equilibrium thermodynamics approach to heat and mass transfer in corn kernels. Transaction of the ASAE, St. Joseph, 24(4):761-69, July/Aug. 1981.

20. _____ & _____. A non-equilibrium thermodynamics approach to transport phenomena in capillary porous media. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 24(4):756-60, July/Aug. 1981.

21. GUSTAFSON, J.R. & HALL, G.E. Density and porosity changes of shelled corn during drying. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 15(3):523-5, May/June 1972.

22. HALL, C.W. Drying farm crops. Ann Arbor, Edward Brohers, 1971. 336 p.

23. HAMED, M.G.E.; HUSSEIN, M.F.; REFAI, F.Y. & EL-SAMAHY, S.K. Preparation and chemical composition of sweet potato flour. Cereal chemistry. St. Paul, 50(2):133-36, Mar./Apr. 1973.

24. HELDMAN, D.R. Food Process Engineering, Westport, Conn. The Avi Publishing Company, 1975. 401 p.

25. HENDERSON, S.M. Equilibrium moisture content of small grain

- histeresis. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 13(4):762-4, July/Aug. 1970.
26. HWAN, M.P. & HAYAKAWA, K. Development of a new procedure for the determination of specific heat of food products. Journal Series, New Brunswick, University of New Jersey (Paper nº 08903).
27. IGBEKA, J.C.; BLAISDELL, J.L.; HERUM, F.L. & HANDY, M.Y. Equilibrium moisture content of cassava and potato. Transaction of the ASAE, St. Joseph, 18(6):1-23, Dec. 1975.
28. KAZARIAN, E.A. & HALL, C.M. Thermal properties of grain. Transaction of the ASAE, St. Joseph, 8(1):33-8, Jan./Feb. 1965.
29. KEEY, R.B. Moisture-solid relationship. In: _____. ed. Drying Principles and Practice, Oxford, Pergamon Press, 1972. p. 134-40.
30. LANBERG, I. & HALLSTROM, B. Thermal properties of potatoes and a computer simulation model of a branching process. Journal of Food Technology, London, 21(5):577-85, May 1986.
31. LOPES FILHO, J.F. Propriedades térmicas e característica de secagem de batata. Viçosa, Imprensa Univeritária, Univer-

- sidade Federal de Viçosa, 1983. 43p. (Tese MS).
32. LOSANO, J.E.; URBICAIN, M.J. & ROTSTEIN, E. Thermal conductivity of apples as a function of moisture content. Journal of Food Science, Chicago, 44(1):198-9, Jan. 1979.
33. LUIKOV, A.V. Heat and mass transfer in capillary porous bodies. In: _____. ed. Advances in Heat Transfer. New York, Academic Press, 1964. V.1. p.5-24.
34. LUIZ, A.M. Modelos para a pesquisas a secagem de meios porosos. Rio de Janeiro, COOPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1982. 278 p. (Tese de Doutorado).
35. MOHSEIN, N.N. Thermal properties of food and agricultural materials. New York, Science Publishers, 1980. 407 p.
36. MONTEIRO, C.L.B., PETRUY, R. & KRIEGER, N. Contribuição ao estudo da secagem da batata doce. Boletim do centro de pesquisa e procesamento de alimentos. Curitiba, 2(2):17-40, jul./dez. 1984.
37. MOREIRA, S.M.C. , CHAVES, M.A. & OLIVEIRA, L.M. Comparação da eficiência de líquidos na determinação da massa específica aparente de grãos agrícolas. Revista Brasileira de Armazenamento, Viçosa, 9/10(1,2):22-4, jun./dez. 1984.

38. NASHCHOKIN, V.V. Engineering thermodynamics and heat transfer, Moscou, Mir Publishen Moscou, 1979. 371 p.
39. NEVES, M.J.B. Modelagem físico-matemática do processo de seca-aeração, Viçosa, Imprensa Universitária, Universidade Federal de Viçosa, 1982, 52 p. (Tese MS).
40. PASSOS, E.F.; ESCOBEDO, J.F.; NUNES, E.L.; GEOCZE, K.C. & OLIVEIRA, C.F.P. Automatização de uma bancada para medição de condutividade térmica com sonda miniaturas. In: SEMINÁRIO DA ASSOCIAÇÃO DOS DOCENTES DA UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA, XI, Guaratingueta, 1990. Trabalhos apresentados... Guaratingueta, UNESP, 1990. p. 17-22.
41. _____; FORTES, M. & MELLO, J.C. Condutividade térmica da pasta de mandioca. Revista Ceres, Viçosa, 29(162):222-31, 1982.
42. PEREIRA, J.A.M. Estudo de secagem e avaliação das propriedades físicas de mandioca, Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, Imprensa Universitária, 1983. 52 p. (Tese MS).
43. PHILIP, J.R. & De VRIES, D.A. Moisture moviment in porous materials under temperature gradiente. Transactions American Geophys Union, St. Joseph, 38(2):222-32, Mar./Apr. 1957.

44. RAO, M.A.; BARNARD, J. & KENNY, J.F. Thermal conductivity and thermal diffusivity of process variety squash and white potatoes. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 18(6):1188-92, Nov./Dec. 1975.
45. RAO, M.A. & RIZVI, S.S. Engineering Properties of Foods. New York, Marcel Dekker, 1986. 398p.
46. REIDY, G.A. & RIPEEN, A.L. Methods for determining thermal conductivity in foods. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 14(2):248-54, Mar./Apr. 1971.
47. ROSSI, S.J. & ROA, G. Secagem e armazenamento de produtos agropecuários com uso de energia solar e ar natural, Publicação Academia de Ciências do Estado de São Paulo. nº 22. São Paulo, 1980. 295 p.
48. SARAVASCO, G.D. & CHARM, S.E. A study of the mechanism of fruit and vegetable dehydration. Food Technology, Chicago, 16(1):78-81, Jan. 1962.
49. SASSERON, J.L. Avaliação de propriedades físicas e curvas de secagem em camadas finas de amêndoa de cacau. Viçosa, Universidade Federal de viçosa, Imprensa Universitária, 1984. 61p. (Tese MS).

50. SCHWARTZ, S.J.; WALTER, W.M.; CARROL, D.E. & GIESBRECHT, F.G. Chemical, physical and sensory properties of a sweet potato french-fry type product during frozen storage. Journal Food Science, Chicago, 52(3):617-19, Mar. 1987.
51. SHARMA, D.K. & THOMPSON, T.L. The specific heat and thermal conductivity of grain sorghum, Transactions of the ASAE, St. Joseph, 16(1):114-7, Jan./Feb. 1973.
52. SILVA, J.N.; PINHEIRO FILHO, J.B.; SEDIYAMA, G.C. & CONDÉ, A.R. Curvas de equilíbrio higroscópico do cacau. Revista Brasileira de Armazenamento, Viçosa, 4(2):31-8, dez. 1979.
53. SINICIO, R. & ROA, G. Curvas e equações de equilíbrio higroscópico para 15 produtos agrícolas. Revista Brasileira de Armazenamento, Viçosa, 4(2):45-55, dez. 1979.
54. SWEAT, V.E. A miniature thermal conductivity probe for foods. AIChE Journal, New York 22(2):76-94, Mar./Apr. 1976.
55. _____; & HAUGH, C.G. A thermal conductivity probe for small food samples. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 17(1):56-8, Jan./Feb. 1974.
56. TALBURT, W.F. & SMITH, O. Potato processing. 3.ed. Westport, The AVI Publishing Company, 1975. 705 p.

57. Van ARSDEL, W.B.; COPLEY, M.J. & MORGAN, A.I. Food dihydration; Drying Methods and Phenomena. 2. ed. Westport, The Avi Publishing Company, 1973. v.1. 285 p.
58. WADSWORTH, J.I.; KOLTER, S.P. ; GALLO, A.S.; ZIEGER, G.M. & SPADARO, J.J. Instant sweet potato flakes: factores affecting drying rote on double drum dryer. Food Technology, Chicago, 20(3):815-22, 1966.
59. WALTER, W.W.Jr. Effect of curing on sensory properties and carbohydrate composition of baked sweet potatoes. Journal Food Science, Chicago. 52(4):1026-9, Apr. 1987.
60. WHIGHT, M.E. & PORTERFIELD, J.G. Specific heat of spanish peanut. Transaction of the ASAE, St. Joseph, 13(4):508-10, July/Aug. 1970.
61. WOSIACKI, G.; CEREDA, M.P.; BRITO, O.R. & CÉSAR, E.O. Avaliação de doze cultivares de batata doce colhidas na área experimental da Universidade Estadual de Londrina. Boletim do Centro de Pesquisa e Processamento de Alimentos, Curitiba, 6(2):65-72, jul./dez. 1988.

9. APÊEDICE

QUADRO 1A. Valores Experimentais e Calculados pela Equação e Erros Absolutos da Razão de Umidade para a Temperatura de Secagem de 35°C.

Tempo (min)	Valores		Desvios
	Experimental	Calculado	Absolutos
00	1.000	1.000	0.000
.15	0.865	0.871	0.006
30	0.768	0.775	0.007
60	0.644	0.660	0.016
75	0.595	0.615	0.020
90	0.558	0.575	0.017
105	0.521	0.540	0.019
150	0.448	0.453	0.005
180	0.407	0.406	0.001
210	0.370	0.366	0.004
240	0.341	0.331	0.010
300	0.288	0.274	0.014
360	0.244	0.230	0.014
480	0.172	0.165	0.007
600	0.121	0.121	0.000
720	0.089	0.091	0.002
840	0.077	0.069	0.008
960	0.059	0.053	0.006
1080	0.021	0.041	0.020

QUADRO 2A. Valores Experimentais e Calculados pela Equação e Erros Absolutos da Razão de Umidade para a Temperatura de Secagem de 45°C.

Tempo (min)	Valores		Desvios
	Experimentais	Calculados	Absolutos
00	1.000	1.000	0.000
15	0.847	0.855	0.008
30	0.754	0.765	0.011
60	0.625	0.634	0.009
90	0.538	0.536	0.002
120	0.469	0.459	0.010
150	0.413	0.396	0.017
180	0.365	0.344	0.019
210	0.326	0.301	0.025
240	0.288	0.264	0.024
300	0.222	0.206	0.016
360	0.175	0.162	0.013
420	0.136	0.129	0.007
480	0.113	0.103	0.010
540	0.081	0.083	0.002
600	0.062	0.067	0.005
660	0.048	0.054	0.006
780	0.028	0.036	0.008
900	0.013	0.025	0.012

QUADRO 3A. Valores Experimentais e Calculados pela Equação e erros Absolutos da Razão de Umidade para a Temperatura de Secagem de 55°C.

Tempo (min)	Valores		Desvios
	Experimentais	Calculados	Absolutos
00	1.000	1.000	0.000
15	0.845	0.837	0.008
30	0.718	0.734	0.016
45	0.639	0.652	0.013
60	0.575	0.584	0.002
90	0.469	0.476	0.007
105	0.428	0.432	0.004
120	0.394	0.393	0.001
150	0.332	0.327	0.005
180	0.280	0.275	0.005
210	0.239	0.232	0.007
240	0.204	0.197	0.007
300	0.150	0.143	0.007
360	0.117	0.105	0.012
420	0.087	0.078	0.009
480	0.062	0.059	0.003
540	0.044	0.044	0.000
600	0.032	0.034	0.002
720	0.020	0.020	0.000

QUADRO 4A. Valores Experimentais e Calculados pela Equação e Erros Absolutos da Razão de Umidade para a Temperatura de Secagem de 65°C.

Tempo (min)	Valores		Desvios
	Experimentais	Calculados	Absolutos
00	1.000	1.000	0.000
15	0.782	0.776	0.006
30	0.664	0.654	0.010
45	0.566	0.560	0.006
60	0.481	0.486	0.005
75	0.421	0.424	0.003
90	0.374	0.373	0.001
120	0.288	0.293	0.005
150	0.224	0.233	0.009
180	0.186	0.187	0.001
210	0.153	0.151	0.002
240	0.127	0.123	0.004
300	0.088	0.083	0.005
360	0.066	0.057	0.009
420	0.046	0.040	0.006
480	0.034	0.028	0.006
540	0.023	0.020	0.003
600	0.015	0.015	0.000

QUADRO 5A. Valores Experimentais e Calculados pela Equação e Erros Absolutos da Razão de Umidade para a Temperatura de Secagem de 35°C.

Tempo (min)	Valores		Desvios
	Experimental	Calculado	Absolutos
00	1.000	1.000	0.000
15	0.8655	0.912	0.047
30	0.7685	0.871	0.103
60	0.6444	0.796	0.152
75	0.5957	0.761	0.166
90	0.5581	0.728	0.170
105	0.5217	0.696	0.175
150	0.4480	0.608	0.160
180	0.4073	0.555	0.148
210	0.3703	0.508	0.138
240	0.3419	0.464	0.123
300	0.2881	0.387	0.099
360	0.244	0.323	0.079
480	0.172	0.226	0.054
600	0.121	0.157	0.036
720	0.089	0.110	0.021
840	0.077	0.091	0.084
960	0.059	0.064	0.005
1080	0.021	0.053	0.012

QUADRO 6A. Valores Experimentais e Calculados pela Equação e Erros Absolutos da Razão de Umidade para a Temperatura de Secagem de 45°C.

Tempo (min)	Valores		Desvios
	Experimentais	Calculados	Absolutos
00	1.000	1.000	0.000
15	0.847	0.902	0.055
30	0.754	0.849	0.095
60	0.625	0.753	0.128
90	0.538	0.668	0.130
120	0.469	0.629	0.160
150	0.413	0.525	0.112
180	0.365	0.466	0.101
210	0.326	0.413	0.087
240	0.288	0.366	0.078
300	0.222	0.288	0.066
360	0.175	0.226	0.051
420	0.136	0.178	0.042
480	0.113	0.140	0.027
540	0.081	0.110	0.029
600	0.062	0.086	0.024
660	0.048	0.068	0.020
780	0.028	0.042	0.014
900	0.013	0.026	0.013

QUADRO 7A. Valores Experimentais e Calculados pela Equação e erros Absolutos da Razão de Umidade para a Temperatura de Secagem de 55°C.

Tempo (min)	Valores		Desvios
	Experimentais	Calculados	Absolutos
00	1.000	1.000	0.000
15	0.845	0.876	0.031
30	0.718	0.813	0.095
45	0.639	0.754	0.115
60	0.575	0.700	0.125
90	0.469	0.602	0.133
105	0.428	0.559	0.131
120	0.394	0.518	0.124
150	0.332	0.446	0.114
180	0.280	0.384	0.104
210	0.239	0.330	0.091
240	0.204	0.284	0.080
300	0.150	0.210	0.060
360	0.117	0.156	0.039
420	0.087	0.115	0.028
480	0.062	0.085	0.023
540	0.044	0.063	0.029
600	0.032	0.047	0.015
720	0.020	0.025	0.005

QUADRO 8A. Valores Experimentais e Calculados pela Equação e Erros Absolutos da Razão de Umidade para a Temperatura de Secagem de 65°C.

Tempo (min)	Valores		Desvios
	Experimentais	Calculados	Absolutos
00	1.000	1.000	0.000
15	0.782	0.614	0.168
30	0.664	0.561	0.103
45	0.566	0.513	0.053
60	0.481	0.468	0.013
75	0.421	0.428	0.007
90	0.374	0.391	0.020
120	0.288	0.327	0.039
150	0.224	0.273	0.049
180	0.186	0.228	0.042
210	0.153	0.190	0.047
240	0.127	0.159	0.032
300	0.088	0.111	0.023
360	0.066	0.077	0.011
420	0.046	0.054	0.008
480	0.034	0.037	0.003
540	0.023	0.026	0.003
600	0.015	0.018	0.003

QUADRO 9A. Valores médios da Condutividade Térmica Observados para Diferentes Teores de Umidade da Batata Doce.

Observação	Teor de Umidade (decimal, b.s.)	Condutividade Térmica (W.m ⁻¹ . k ⁻¹)
1	2.704	0.484
2	2.487	0.485
3	2.381	0.484
4	2.107	0.488
5	1.875	0.481
6	1.469	0.462
7	1.397	0.471
8	1.115	0.377
9	0.651	0.313
10	0.556	0.312
11	0.201	0.120
12	0.175	0.098
13	0.134	0.081

QUADRO 10A. Valores Médios do Calor Específico Observados para Diferentes Teores de Umidade da Batata Doce.

Observados	Teor de Umidade (decimal, b.s.)	Calor Específico (kj.kg ⁻¹ .k ⁻¹)
1	2.617	0.834
2	2.514	0.904
3	2.489	1.075
4	2.160	1.251
5	1.635	1.480
6	1.318	1.368
7	1.254	1.200
8	0.861	0.780
9	0.766	0.637
10	0.382	0.637
11	0.342	0.636

QUADRO 11A. Valores do Volume e da Massa Específica Observados para Diferentes Teores de Umidade da Batata Doce.

Teor de Umidade (decimal, b.s.)	Volume ($\times 10^{-6}$ m ³)	Massa Específica (kg.m ⁻³)
3.000	22.50	1.026
2.466	18.33	1.047
1.982	16.58	1.034
1.654	14.50	1.052
1.445	13.52	1.039
1.262	11.56	1.125
1.140	11.00	1.119
1.020	10.02	1.129
0.746	09.00	1.122
0.598	08.05	1.141
0.500	07.10	1.215
0.431	06.58	1.230
0.315	06.20	1.219
0.261	06.00	1.208
0.212	05.80	1.202
0.179	05.50	1.233
0.153	05.31	1.248
0.131	05.22	1.245

QUADRO 12A. Valores do Teor de Umidade de Equilíbrio Observados,
para Temperaturas de 30°C, 45°C e 60°C.

Umidade Relativa	Umidade de Equilíbrio (% bs)		
Média	-----		
(%)	30°C	45°C	60°C
8	5.6	4.6	4.0
11	7.2	5.7	4.8
33	11.6	9.9	8.6
43	22.1	15.9	9.3
65	50.7	31.0	14.7
75	61.0	37.1	16.6
