UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA

PRO - REITORIA PARA ASSUNTOS DO INTERIOR

CENTRO DE CIENCIAS E TECNOLOGIA

CURSO DE POS GRADUACAO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

SECAGEM DE MILHO EM SECADOR DE CONVECÇAO NATURAL UTILIZANDO-SE RESIDUO DA PROPRIA CULTURA

Renato Fonseca Aragão

CAMPINA GRANDE - PARAIBA

JUNHO - 1991

RENATO FONSECA ARAGAO

SECAGEM DE MILHO EM SECADOR DE CONVECÇAO NATURAL UTILIZANDO-SE RESIDUO DA PROPRIA CULTURA

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola da Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências para obtenção do Grau de Mestre.

AREA DE CONCENTRACAO: PROCESSAMENTO E ARMAZENAMENTO DE PRODUTOS AGRICOLAS

ORIENTADOR: Prof. Adjunto MARIO EDUARDO R. M. CAVALCANTI MATA (M.Sc.)

CO - ORIENTADOR: Prof. Adjunto JOSE HELVECIO MARTINS (Ph.D)

CAMPINA GRANDE - PARAIBA

JUNHO - 1991

A659s Aragao, Renato Fonseca
Secagem de milho em secador de conveccao natural utilizando-se residuo da propria cultura / Renato Fonseca Aragao. - Campina Grande, 1991.
65 f.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Agricola) - Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e Tescologia

1. Secagem - Milho. 2. Milho - Secagem. 3. Secador de Conveccap natural. 4. Engenharia Agricola. 5. Dissertacao. I. Mata, Mario Eduardo R. M. Cavalcante, Prof. M.Sc. II. Universidade Federal da Paraiba - Campina Grande (PB) III. Título

CDU 66.047.7:633.15(043)

SECAGEM DE MILHO EM SECADOR DE CONVECÇAO NATURAL

UTILIZANDO RESIDUO DA PROPRIA CULTURA

Renato Fonsêca Aragão

Dissertação aprovada em 20 de Junho de 1991.

Prof. Mário Eduardo R. M. Cavalcanti Mata

Orientador

Prof. José Helvecio Martins

Co-Orientador

Prof. Kepler Borges França

Examinador

CAMPINA GRANDE - PB

JUNHO - 1991

DEDICATORIA

A Deus

A minha esposa Suelena

A minhas filhas Thayse e Renata.

A meus pais.

dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao Núcleo de Tecnologia em Armazenagem pela oportunidade oferecida para que pudesse realizar o curso de mestrado.

A Universidade Federal da Paraíba, por intermédio do Departamento de Engenharia Agrícola, que tornou possivel a realização deste curso.

Ao professor Mário Eduardo R. M. Cavalcanti Mata pela valiosa e constante orientação, pela ajuda na formação profissional e pela amizade.

Ao professor Dr. José Helvecio Martins pelas valiosas sugestões apresentadas em prol deste trabalho e pela amizade.

A minha esposa Suelena, pela compreensão e pelo estímulo.

Aos colegas do curso de Pós-Graduação pela amizade e pelo convívio.

Aos colegas funcionários do Núcleo de Tecnologia em Armazenagem, que direta ou indiretamente contribuiram para a realização deste trabalho.

Ao estagiário Marcos Joel pela colaboração durante a realização dos testes experimentais de secagem.

A professora Leônia Leão pela excelente revisão deste trabalho.

CONTEÚDO

Página

LISTA DE FIGURAS vii

LISTA DE TABELAS viii

RESUMO x

1. INTRODUÇÃO 1

2. REVISÃO DE LITERATURA 4

2.1. Calor Específico 4

2.2. Secagem 6

2.2.1. Secagem em Lotes. 12

2.3. Simulação de Secagem 13

2.3.1. Modelo de Hukill. 14

2.4. Convecção Natural 17

2.5. Secador por Convecção Natural 19

3. MATERIAIS E METODOS 22

3.1. Procedimento Experimental 22

3.1.1. Matéria Prima 22

3.1.1.1. Determinação da Quantidade de Sabugo de Milho 23

3.1.2. Determinação do Calor Específico do Sabugo de Milho a Diferentes Teores de Umidade 23

3.1.2.1. Determinação da Capacidade Calorífica do Calorímetro. . . 24

3.1.2.2. Determinação do Calor Específico do Sabugo de Milho 25

3.1.3. Construção do Secador 27

3.1.3.1. Câmara de Uniformização de Temperatura. 27

3.1.3.2. Câmara de Secagem 31

3.1.3.3. Piso Perfurado 31

3.1.3.4. Queimador - Trocador de Calor. 31

3.1.3.5. Chaminé. 32

3.1.3.6. Cobertura. 32

3.1.4. Secagem 33

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 36

4.1. Calor Específico 36

4.2. Secagem 39

4.2.1. Energia Térmica do Sabugo de Milho . . 43

4.2.2. Simulação de Secagem 45

5. CONCLUSÕES. 52

6. RECOMENDAÇÕES 53

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS. 54

APENDICE 58

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Corte longitudinal e vista superior do calorímetro.....	26
2	Planta baixa do secador experimental.....	28
3	Corte A - A' do secador experimental.....	29
4	Vista lateral do secador experimental.....	30
5	Curvas de secagem experimentais e simuladas pelo modelo de Hukill para a camada de 0,05m de altura.....	49
6	Curvas de secagem experimentais e simuladas pelo modelo de Hukill para a camada de 0,15m de altura.....	50
7	Curvas de secagem experimentais e simuladas pelo modelo de Hukill para a camada de 0,30m de altura.....	51

LISTAS DE TABELAS

Tabela		Página
1	Valores médios do calor especifico do sabugo de milho a diferentes teores de umidade.....	36
2	Análise de variância do calor especifico do sabugo em função do teor de umidade.....	37
3	Valores médios dos teores de umidade do milho a diferentes alturas da camada de secagem (0,0 e 0,05m) em secador de convecção natural em camada estacionária.....	40
4	Valores médios dos teores de umidade do milho a diferentes alturas da camada de secagem (0,0; 0,05; 0,10 e 0,15 m) em secador de convecção natural em camada estacionária.....	41
5	Valores médios dos teores de umidade do milho a diferentes alturas da camada de secagem (0,0; 0,10; 0,20 e 0,30m) em secador de convecção natural em camada estacionária.....	42

Tabelas Pagina

6 Parâmetros quantitativos da secagem, utilizando-se resíduo da cultura como fonte de energia térmica..... 44

7 Parâmetros médios de entrada usados para simulação de secagem através do modelo de Hukill.. 46

8 Teores médios de umidade obtidos por simulação de secagem através do modelo de Hukill para camada de 0,05m a diferentes alturas..... 47

9 Teores médios de umidade obtidos por simulação de secagem através do modelo de Hukill para camada de 0,15m a diferentes alturas..... 47

10 Teores médios de umidade obtidos por simulação de secagem através do modelo de Hukill para camada de 0,30m a diferentes alturas..... 48

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo determinar o poder calorífico do sabugo de milho a diferentes teores de umidade, bem como o de estudar a secagem de milho em camada espessa, usando-se um secador com o ar de secagem movimentado por convecção natural, utilizando-se como combustível o sabugo da própria cultura.

Os dados experimentais de secagem foram comparados com os dados simulados pelo modelo de Hukill, utilizando-se o software SASG-3, desenvolvido pelo Núcleo de Tecnologia em Armazenagem em DBASE III.

Concluiu-se que o calor específico médio do sabugo de milho foi de aproximadamente, 1.256 J/kg°C e não variou significativamente com o aumento do teor de umidade ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de F.

O sabugo proveniente da debulha de 120 kg de milho forneceu energia térmica suficiente para secá-lo de 19.9% para 12.9% de umidade, b.u., para uma espessura da camada de 0,05 m no secador de convecção natural.

As curvas de secagem experimentais e simuladas pelo modelo de Hukill não diferiram significativamente ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de qui-quadrado.

SUMMARY

The objective of this study was to determine the caloric power of corncob at different moisture contents as well as to study drying of corn in a thick layer using a drier with drying air movement by natural convection utilising corncob residue as fuel.

The experimental data of drying were compared with data simulated by Hukill model utilising software SASG-3 developed by Nucleus of Storage Technology in DBASE III.

It is conclued that the mean specific heat of corncob residue was approximately 1256 J/kg° and did not vary significantly with moisture content increase at 1% level of probability by F test.

The cob residue obtained by thrashing of 120 kg of corn furmished sufficient termic energy to dry a 0.05 m corn layer from 20% to 13% moisture (wet basis) in natural convection drier. The experimental and simulated (Hukill model)curves did not differ significantly at 1% level of probability by chi square test.

1. INTRODUÇÃO

Dentre os grãos cultivados no Brasil, o milho ocupa o primeiro lugar, tendo sido cultivado no ano de 1989 uma área de 12.890.453 ha, com produção de 26.568.776 t (IBGE, 1990).

Tanto no Brasil como em toda a América Latina, a maior parte da produção de milho é obtida por agricultores de baixa renda com capacidade técnica reduzida (BERNAL, 1982).

Grande parte desta produção é perdida antes das colheitas, as quais são chamadas de perdas no campo. Isto acontece porque o agricultor deixa o produto no campo, sofrendo um processo de secagem natural, ou seja, secando na própria planta. Esta prática de colheita tardia acarreta muitos problemas, pois depende das condições atmosféricas, além de expor o produto ao ataque de insetos, fungos, pássaros, roedores e à intempérie. (PEREIRA et alii, 1985).

Segundo ROA (1979) a secagem natural responde pela maior parte das perdas dos grãos no Brasil.

A prática correta para evitar o prejuízo decorrente da secagem natural no campo seria antecipar a colheita e, através do processo de secagem artificial, diminuir o teor de umidade do produto até que atinja níveis seguros para a armazenagem.

A secagem artificial realizada através de secadores convencionais, teria um custo elevado de equipamentos, além de o produtor necessitar de energia elétrica em sua propriedade ou utilizar derivados de petróleo para movimentar ventiladores e aquecer o ar de secagem. Esta prática, devido a seu alto custo inicial, só pode ser usada por grandes produtores das regiões mais desenvolvidas do país. Portanto, esta tecnologia não poderia ser aplicada ao pequeno produtor, especialmente ao da região Nordeste (CAVALCANTI MATA, 1988/90).

Em vista disso, estudos têm sido realizados para que o pequeno produtor possa utilizar em sua propriedade, secadores de convecção natural que são de baixo custo e podem ser construídos com mão-de-obra não especializada, podendo, também, usar-se como combustível a lenha ou o carvão. Diversos autores, entre os quais PEREIRA et alii (1985) sugerem o uso de resíduos agrícolas tais como sabugo de milho, casca de arroz e outros, como combustíveis para a secagem de grãos.

No entanto, a literatura consultada não apresenta trabalhos de secagem realizados, usando-se resíduos agrícolas, nem fornece dados sobre a capacidade calorífica desses materiais em função de seus teores de umidade.

O presente trabalho teve como objetivo :

1. Determinar o calor específico do sabugo de milho a diferentes teores de umidade.

2. Estudar a secagem de milho em camada espessa, usando-se um secador com ar movimentado por convecção natural, servindo como combustível, o sabugo da própria cultura.

3. Estudar a simulação de secagem através do modelo de Hukill.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Calor Específico

A quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de um corpo de 1°C é denominada de capacidade calorífica do corpo, que é proporcional à sua massa. A capacidade calorífica por unidade de massa é denominada de calor específico e é dada pela equação abaixo.

$$c_p = \frac{C}{m} \qquad (1)$$

em que

c_p = Calor específico J/kg °C

C = Capacidade calorífica, J/°C

m = Massa do corpo, kg

Segundo TIPPLER (1984) o calor específico da água varia apenas de 1% na faixa de temperatura de 0°C a 100°C, à pressão de 1 atm. podemos usualmente desprezar esta variação e considerar o calor específico da água como sendo de 4,186 KJ/kg °C ou 1,00 Kcal/kg °C no intervalo de temperatura de 0°C a 100°C .

Existem vários métodos para a determinação do calor

específico. Segundo ALMEIDA (1979) os principais são:

1. A relação entre a condutividade térmica, a massa específica e a difusividade térmica.
2. O processo das misturas
3. Calorímetro de varredura diferencial
4. Calorimetria do gelo
5. Bomba calorimétrica

O método 1 consiste em determinar inicialmente a condutividade térmica, a massa específica e a difusividade térmica do corpo e calcular o calor específico usando-se a fórmula:

$$c_p = \frac{K}{\rho\ \alpha} \qquad (2)$$

em que

c_p = Calor específico, J/kg°C

K = Condutividade térmica, W/m°C

ρ = Massa específica, kg/m³

α = Difusividade térmica, m²/s

Os demais métodos baseiam-se no equilíbrio térmico estabelecido entre o corpo, cujo calor específico pretende-se determinar, e um segundo corpo de calor específico conhecido.

Segundo MOHSENIN (1980) o método mais comum para

determinação do calor específico de grãos e sementes é o do método das misturas. Ao invés de água como líquido calorimétrico, alguns pesquisadores têm usado tolueno, cuja densidade é de 0.86 e o calor específico é de, aproximadamente, 0,39 Btu/lb°F. A baixa densidade possibilita à semente e grãos submergirem no líquido.

Estudando a variação do calor específico em amêndoas de cacau, ALMEIDA (1979) concluiu que o calor específico aumenta com o teor de umidade e cita vários autores, entre eles Alan e Duncan que observaram o aumento do calor específico com o teor de umidade para vários materiais biológicos.

2.2. Secagem

O processo de secagem dos produtos agrícolas, segundo ROSSI e ROA (1980) consiste na remoção de parte da água inicialmente contida nos produtos a um nível máximo de umidade no qual possam ser armazenados em condições ambientais por longos períodos, sem as perdas de suas propriedades nutricionais e organolépticas.

Segundo DALPASQUALE (1983) secam-se produtos agrícolas desde os primórdios da civilização de maneira bem natural, usando-se apenas a energia do sol e o movimento natural do ar. Algum tempo depois, passou-se a usar fogões

especiais e salas aquecidas para tal finalidade.

A secagem de grãos teve extraordinário progresso em período de tempo relativamente curto, embora a prática de secagem artificial tenha surgido há mais de cem anos. Foster e Peart, citados por FOSTER (s.d.) relatam que o maior desenvolvimento da secagem de grãos tem ocorrido nas últimas duas ou três décadas.

Os métodos utilizados para se processar a secagem de grãos são muitos. Segundo DALPASQUALE (1983) podem ser classificados da seguinte maneira:

a) Secagem Natural

- No campo
- Em terreiro

b) Secagem Artificial

- A baixas temperaturas
  . Ar natural e ar levemente aquecido
- A altas temperaturas
  . Em camada fixa, em cascata, em fluxo concorrente, em fluxo contracorrente e em sistemas combinados.

A escolha de um desses métodos depende de diversos fatores, dentre os quais o do nível de instrução tecnológica

do produtor, de seu poder aquisitivo, do volume de produção, da velocidade de colheita e do fim a que se destinam os grãos. (DALPASQUALE, 1983).

Segundo ROA (1979) o processo de secagem natural é idêntico ao praticado desde o início da produção agrária, há vários séculos, e consiste basicamente numa das seguintes modalidades:

- O produto é deixado na própria planta para secar
- A planta é cortada e deixada no campo para secar
- O produto é deixado em terreiro ou em bandejas com exposição direta à radiação solar e removido periodicamente.

Portanto, no processo natural, a capacidade e o tempo de secagem e, conseqüentemente, a qualidade final do produto seco dependem exclusivamente das condições climáticas. O resultado varia entre os dois extremos possíveis, ótima qualidade ou perda total do produto.Por isso é um sistema altamente imprevisível.

A história agrícola de outros países e, recentemente a do Brasil, indicam que o uso da secagem natural tende a desaparecer. Não obstante, ainda é a técnica mais difundida no Brasil e responde por mais de 70 % dos processos de secagem.

PUZZI (1989) e LASSERAN (1978) relatam que a secagem

artificial consiste em submeter o produto a ação de uma corrente de ar quente que atravessa a massa de grãos e, embora apresente algumas vantagens sobre a secagem natural, é uma operação cara.

Segundo PUZZI (1989) na secagem mecânica de um produto, o ar ambiente aquecido atinge duas finalidades:

1 - A pressão do vapor da água existente nos grãos é aumentada pelo aquecimento do produto, facilitando a saída da umidade. Parte do ar secante proporciona aumento da temperatura do produto (calor sensível) e, parte fornece o calor necessário para a vaporização da água contida nos grãos (calor latente).

2 - Aumentando-se a temperatura do ar ambiente a sua umidade relativa diminui e, conseqüentemente sua capacidade de absorver umidade, aumenta.

SILVA et alii (1988) dizem que a escolha do sistema de secagem deve levar em consideração em primeiro lugar a capacidade dinâmica e o custo inicial do sistema e, em segundo lugar, a quantidade e o tipo de energia consumida.

Os produtos agrícolas devem ser secos por diferentes métodos, de acordo com as características próprias dos grãos e com a finalidade a que se destinam. Em relação às características próprias do produto, os seguintes fatores

devem ser considerados na secagem (SILVA et alii, 1988):

1 - Tolerância a altas temperaturas: porquanto podem reduzir a germinação e provocar cozimento do produto, mudando suas características físicas, químicas e biológicas.

2 - Resposta à umidade relativa do ar: grãos que sofrem mudanças fisiológicas devem ser secos com o ar a determinada umidade relativa. Por exemplo: se a soja for usada para semente, a umidade relativa do ar de secagem deve estar acima de 40%, independente da temperatura de secagem. Abaixo de 40% irão ocorrer trincas nas sementes se a temperatura for muito elevada.

3 - Esforços de compressão: materiais que se esmagam ou se deformam facilmente devem ser secos em camadas delgadas.

4 - Fluidez: milho em espiga, café cereja ou outros materiais com baixa taxa de carregamento não devem ser secos em secadores contínuos. O ângulo de repouso do material afeta grandemente a configuração do secador.

Segundo MERCH e GOMES (1982) a remoção da umidade contida nos grãos após a colheita envolve dois fenômenos físicos distintos:

1 - O movimento da água contida no grão para a superfície externa.

2 - Retirada da umidade da superfície periférica do grão para o meio exterior.

A condição necessária e suficiente para que ocorra o fenômeno de secagem é que a pressão parcial de vapor d'água sobre a superfície do material seja maior do que a pressão de vapor d'água do ar nas vizinhanças (MERCH e GOMES, 1982).

Os grãos são maus condutores de calor e sua condutividade térmica assemelha-se à dos isolantes (madeira, solo seco etc.). Devido à grande influência da umidade dos grãos e da temperatura sobre a condutividade térmica, torna-se quase impossível determinar com segurança a propagação do calor na parte úmida da massa de grãos. Grãos úmidos possuem os poros saturados de água e de ar, tornando-se bastante difícil determinar a proporção de cada componente (água e ar) em cada poro (MERCH e GOMES, 1982).

Segundo MERCH e GOMES (1982) a propagação de calor de um ponto a outro da massa de grãos, deve-se ao deslocamento das moléculas de ar aquecidas (propagação por convecção) ou pelo contato das superfícies frias com as aquecidas (propagação por condução).

Segundo MERCH e GOMES (1982) durante a secagem, o ar aquecido é um dos responsáveis pelo fenômeno de

evaporação. Isto decorre da troca de calor entre o ar e o grão.formando uma corrente de convecção no interior da massa de grãos. O ar desempenha duplo papel: o de fluido transportador de calor e o de fluido transportador de vapor. A energia térmica necessária para a evaporação da água é trazida pelo ar (transferência de calor para o produto a ser seco). A água evaporada do grão é, em seguida, absorvida e transportada por esse ar (transferência de matéria do produto para o fluido de secagem).

Não é possível calcular com exatidão o tempo de secagem devido a muitas variáveis que envolvem o processo. Os elementos variáveis incluem umidade relativa e temperatura do ar ambiente, umidade do ar secante que sai do secador após sua passagem pela massa de grãos, seu grau de limpeza, a intensidade do fluxo de ar secante etc. (PUZZI, 1989).

2.2.1. Secagem em Lotes

Na secagem em lotes, o material é colocado em reservatórios (tanque ou silo) nos quais o ar atravessa a massa de grãos por intermédio de dutos ou, mais freqüentemente , através de assoalho feito com chapas perfuradas. Na secagem em lotes, a eficiência térmica pode ser alta, mas, neste caso, a camada de grãos deve ser de pelo menos 0,60 m de altura. Para camadas de maior profundidade, o gradiente de umidade é fator limitante. O

usuário deverá decidir pela economia de energia ou pela uniformidade de secagem (SILVA et alii, 1988).

Segundo PUZZI (1989) os secadores de carga são aqueles que secam determinada quantidade de grãos depositados em uma câmara, através da qual o ar quente é forçado por meio de ventilador motorizado. Quando a secagem de um lote ou carga estiver concluída a massa de grãos é resfriada e o secador é reabastecido com grãos úmidos.

2.3. Simulação de Secagem

Simulação, segundo Giffin, citado por MARTINS e CAVALCANTI MATA (1984) refere-se à operação dinâmica de um modelo de sistema, mantendo um alto grau de isomorfismo com os fenômenos do mundo real que representa. Quando comparado com a experimentação real deve encontrar-se bem próxima desta. Entretanto, o aumento de realismo implica em aumento de despesas, dificuldade de manejo e de discernimento de causa e efeito.

Segundo SINICIO e ROA (1984) ao projetar-se uma simulação, a primeira coisa a fazer é construir um modelo matemático, por meio do qual se descreve o processo. É comum acontecer que a formulação matemática dos modelos conduza a dificuldades que não podem ser superadas pelos

procedimentos da própria matemática. As soluções entretanto, são obtidas de maneira aproximada, simulando-se o processo físico em computadores.

Segundo QUEIROZ et alii (1982) a secagem é importante etapa na produção e processamento de grãos e envolve fenômenos de transporte de calor e massa entre os grãos e o ar de secagem. Tais fenômenos podem ser equacionados e agrupados em modelos matemáticos de simulação de secagem. A simulação tem demostrado ser importante instrumento na análise de secagem de grãos, e o computador é o elemento fundamental para a resolução das equações dos modelos existentes.

Ramirez, citado por MARTINS (1982) diz que as equações de balanceamento e as relações mecanísticas de um processo constituem seu modelamento matemático.

Cada uso do modelo, com avanço no tempo, a partir de um conjunto de parâmetros de entrada, constitui a simulação (Parente et alii, citado por MARTINS 1982).

2.3.1. Modelo de Hukill

Segundo Bakker Arkema et alii, citado por QUEIROZ et alii (1982) o primeiro trabalho de grande importância em simulação de secagem foi realizado por Hukill em 1947. Hukill,de acordo com esses autores, desenvolveu

expressão analítica para a umidade do grão, relacionada com a altura total da camada de grãos e com o tempo de secagem, desprezando o calor sensível dos grãos e, admitindo que a temperatura do ar de secagem decresce, exponencialmente, à medida em que o ar vai passando pela massa de grãos. Seu modelo, conquanto apresente simplicidade, tem sido muito usado em solução de problemas de secagem de grãos.

A equação proposta por Hukill para descrever a secagem de uma massa de grãos é a seguinte:

$$RU = \frac{2^D}{2^D + 2^Y - 1} \qquad (3)$$

em que

RU = Razão de umidade = $(U - U_e)/(U_o - U_e)$, admensional

U = Umidade dos grãos em determinado tempo e local no secador, decimal b.s.

Ue = Umidade de equilíbrio dos grãos com as condições iniciais do ar, decimal b.s.

Uo = Umidade inicial dos grãos, decimal b.s.

D = Adimensional de profundidade para o ponto em que é computado.

Y = Adimensional de tempo até que U seja computado.

O admensional de profundidade é definido por:

$$D = \frac{X \; W \; hfg \; (Uo - Ueq)}{ca \; m \; H \; (To - Tg)} \qquad (4)$$

em que

X = Distância do ponto de entrada do ar até a altura da camada de grãos, m

W = Massa específica real (matéria seca por unidade de volume), kg/m³

hfg = Calor latente de vaporização da umidade do grão, Kcal/kg Calculado pela equação abaixo.

$$hfg = (606 - 0.57\ T)\ [1 + 4.35 \exp(-0.2825)\ U] \qquad (5)$$

T = Temperatura do ar, °C

U = Teor de umidade no tempo t, decimal b.s.

ca = Calor específico do ar seco, Kcal / kg°C

m = Fluxo de massa do ar, kg / m² h

H = Tempo de meia resposta que e o tempo para que uma camada de grão atinja uma razão de umidade igual a 0,5, sob determinada condição do ar, h

To = Temperatura inicial do grão, °C

Tg = Temperatura na qual o ar está em equilibrio com os grãos com seu teor de umidade inicial, depois de o ar ter sido resfriado ao longo de uma linha de temperatura de bulbo úmido constante, °C

O admensional de tempo é definido por:

$$Y = \frac{t}{H} \qquad (6)$$

em que

t = tempo de secagem acumulado em horas

Segundo QUEIROZ **et alii** (1982) para grãos de milho, o tempo de meia resposta pode ser determinado por meio da equação abaixo, obtida por regressão linear, mediante os dados de Brooker.

$$H = \exp [2,413 - 0,016\ Uo + 0,003\ T - 0,001\ Uo\ T] \qquad (7)$$

em que

Uo = Teor de umidade inicial, % b.s.

T = Temperatura do ar de secagem, °C

H = Tempo de meia resposta, h

2.4. Convecção Natural

A transmissão de calor por convecção natural ocorre sempre que um corpo é colocado em contato com um fluido a uma temperatura maior ou menor do que a do corpo. Em conseqüência da diferença de temperatura, o calor flui entre o fluido e o

corpo se a temperatura do fluido for maior do que a do corpo, e causa variação da densidade nas camadas fluídicas situadas na vizinhança de sua superfície. A diferença de densidade entre o fluido mais pesado (frio) e o fluido mais leve (quente) causa escoamento ascendente do fluido mais leve. Se o movimento é causado unicamente por diferenças de densidade, resultante dos gradientes de temperatura, sem o auxílio de bombas ou de ventiladores, o mecanismo de transmissão de calor associado é chamado de convecção natural ou livre (KREITH, 1977).

O calor transmitido por unidade de tempo por convecção entre uma superfície e um fluido pode ser calculado pela equação:

$$q_c = \overline{h_c}\ A\ \Delta t \qquad (8)$$

em que

q_c = calor transmitido por unidade de tempo por convecção, Kcal/h

A = área de transmissão de calor, m^2

Δt = diferença entre as temperaturas da superfície do corpo e a do fluido, °C

h_c = coeficiente médio de transmissão de calor por convecção, Kcal/h m^2 °C

2.5. Secador por Convecção Natural

Na maioria dos secadores, o ar é forçado a passar pela massa de grãos por meio de ventiladores. Entretanto, existem secadores nos quais o ar é movimentado devido aos gradientes de pressão produzidos pela diferença de temperatura e umidade entre o ar de secagem e o ar ambiente. Estes secadores recebem o nome de secadores com ar movimentado por convecção natural (PEREIRA et alii, 1985).

Segundo BOLDUC (1978) todos os modelos de secador de convecção natural baseados no secador tipo Brook, têm o mesmo princípio de secagem: convecção natural e força de empuxo. A expansão pelo aquecimento do ar no plenum destes secadores, causada pela radiação de calor do trocador de calor, faz com que o ar aquecido torne-se menos denso do que o ar ambiente exterior. Devido à força de empuxo ascendente (F_b) do ar ambiente ser maior do que o peso do ar aquecido no plenum (W), o ar expandido pelo calor é forçado para cima através do fundo falso do secador. Existe uma força resultante ascendente porque (F_b) é maior que (W) fazendo com que o ar aquecido flua para cima a certa taxa, até F_b = W. É óbvio que a resistência do grão também exerce papel importante sobre a taxa de fluxo de ar causado por este princípio.

A razão entre as massas específicas do fluido entre dois pontos segundo Kutateladze, citado por RYU (1976) é :

$$\rho_0/\rho = 1 + \beta\ (T - T_\infty) \qquad (9)$$

em que

T_∞= Temperatura de referência

T = Temperatura em dado ponto

ρ_0= Massa específica num ponto de referência

ρ = Massa específica em dado ponto

β = Coeficiente de expansão térmica

Da equação (9) obtém-se:

$$\rho_0 - \rho = \rho\ \beta\ (\ T - T_\infty\ ) \qquad (10)$$

A força de empuxo por unidade de volume é dada pela Equação (10) multiplicada pela aceleração da gravidfade (g) e tomada com o sinal oposto. Assim, a força de empuxo é:

$$F_b = -\rho g\ \beta(\ T - T_\infty) \qquad (11)$$

PEREIRA et alii (1985) sugere os secadores de ar movimentados pelo efeito da convecção natural como alternativa para a solução dos problemas de secagem a nível de pequeno produtor, pois têm sido adotados com sucesso na Asia e na Africa.

O primeiro desses secadores de que se tem notícia é o do secador tipo Samoa, usado para secar copra. O inconveniente deste secador era a contaminação do produto

pela fumaça, além dos danos causados pelo calor pois ficava diretamente acima do fogo (PEREIRA et alii, 1985).

Entre 1961 e 1963, na Nigéria, James Brook, introduziu modificações no secador Samoa, que passou a ser denominado de secador Brook ou tipo T. (PEREIRA et alii,1985)

As primeiras adaptações realizadas por Brook foram:

a) Adaptação de trocador de calor
b) Aumento da altura da estrutura perfurada em relação ao trocador
c) Construção de chaminé para retirar os gases de combustão
d) Construção das paredes do secador em adobe

Segundo PEREIRA et alii (1985) os parâmetros que se devem levar em consideração quando da construçao de secadores tipo Brook são os seguintes:

a) Dimensões da entrada de ar
b) Espessura da camada de grãos
c) Distância entre o trocador de calor e a estrutura perfurada que sustenta o produto
d) Area de troca de calor.

3. MATERIAIS E METODOS

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas do Núcleo de Tecnologia em Armazenagem da Universidade Federeal da Paraíba, Campus II, Campina Grande - PB.

3.1. Procedimento Experimental

3.1.1. Materia Prima

O presente trabalho foi executado em duas etapas. Na primeira, dois testes de secagem foram realizados com milho oriundo do Colégio Agrícola Assis Chateaubriand no município de Lagoa Seca - PB. Após a colheita manual, o milho foi transportado para o Núcleo de Tecnologia em Armazenagem onde foi realizada a debulha em máquina debulhadora marca Nogueira, acoplada ao trator Valmet.

Na segunda etapa, os testes foram realizados com milho proveniente do município de Alagoinha - PB. Este produto foi adquirido já debulhado e foi levado para a Usina de Beneficiamento de Sementes da Empresa Agropecuária da Paraíba S.A. (E M E P A) onde o produto foi beneficiado e, em seguida, transportado para o Núcleo de Tecnologia em Armazenagem onde chegou com um teor de umidade de 12% b.u.

3.1.1.1. Determinação da quantidade de sabugo de milho

Para a determinação da quantidade de sabugo produzida por certa quantidade de milho, escolheram-se aleatoriamente 30 espigas, as quais foram debulhadas manualmente. Em seguida, pesaram-se os grãos e o sabugo correspondente a cada espiga e fez-se relação entre o peso do milho e o peso do sabugo a 13% de umidade, b.u. que é o teor de umidade em que o sabugo já pode ser usado como combustível. Assim, conhecendo a quantidade de milho que deve ser secado pode-se determinar a quantidade de sabugo dele proveniente.

3.1.2. Determinação do Calor Específico do Sabugo de milho a diferentes teores de umidade.

Inicialmente, o sabugo do milho apresentava teor de umidade de 12,8 % b.u. Parte deste material foi reumedecido para se obterem teores de umidade mais elevados. Para o reumedecimento, o sabugo foi colocado submerso em bandeja com água destilada por um período de quatro horas e, em seguida, deixado secar à temperatura ambiente por períodos que variaram de 20 a 72 horas. Desta maneira foram obtidos diferentes teores de umidade.

O calor específico do sabugo de milho foi

determinado pelo método das misturas: foi usado calorímetro construído no Núcleo de Tecnologia em Armazenagem, constituído por uma garrafa térmica de volume igual a 1000 ml, isolada com lã de vidro e instalada dentro de um tubo de PVC de 150 mm de diâmetro e vedada com rolha de borracha como mostra a Figura 1.

3.1.2.1. Determinação da Capacidade Calorífica do Calorímetro.

Para se determinar a capacidade calorífica do calorímetro, usou-se 100 g de água destilada no estado natural, a qual foi colocada no interior do calorímetro. Agitou-se o calorímetro por 2 minutos e, em seguida, com o auxílio de um termômetro digital com precisão de 0,1 °C foi determinada a temperatura T_1. Após esse equilíbrio térmico colocou-se mais 100 g de água destilada a uma temperatura em torno de 2°C dentro do calorímetro e mediu-se a temperatura T_3, após o novo equilíbrio térmico.

De posse das temperaturas T_1, T_2 e T_3 e das massas m_1 e m_2, calculou-se a capacidade calorífica do calorímetro pela equação abaixo.

$$c_p\, m_1\, (T_1 - T_3) + C_{cal}\, (T_1 - T_3) = c_p\, m_2\, (T_3 - T_2) \quad (12)$$

em que

C_{cal} = Capacidade calorífica do calorímetro, cal/°C

c_p = Calor específico da água, cal/g°C

m_1 = massa de água no estado natural, g

m_2 = massa de água fria, g

T_1 = Temperatura da água no estado natural, °C

T_2 = Temperatura da água fria, °C

T_3 = Temperatura de equilíbrio térmico entre as duas massas de água, °C

3.1.2.2. Determinação do calor específico do sabugo de milho.

De posse das temperaturas T_1, T_2 e T_3 colocou-se uma amostra de sabugo de milho a uma temperatura T_4 dentro do calorímetro agitou-se por, aproximadamente, 2 mimutos e mediu-se a temperatura de equilíbrio da mistura, T_5.

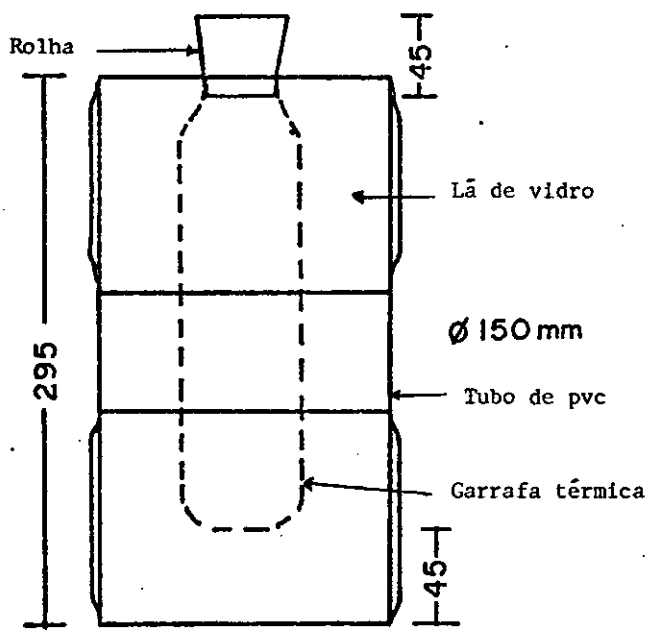
O calor específico do sabugo foi determinado pela seguinte equação:

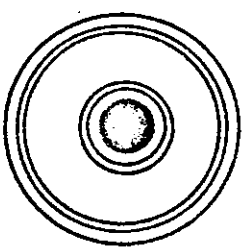
$$m_p\, c_p(T_4 - T_5) = c\, m(T_5 - T_3) + C_{cal}\,(T_5 - T_3) \qquad (13)$$

em que

c_p = Calor específico do sabugo, cal/g°C

m_p = Massa do sabugo de milho, g





Vista Superior

Figura - 1 Corte longitudinal e vista superior do calorímetro.

m = Massa de água $(m_1 + m_2)$, g

T_4 = Temperatura do sabugo, °C

T_5 = Temperatura de equilíbrio térmico entre a massa de água e o sabugo de milho, °C.

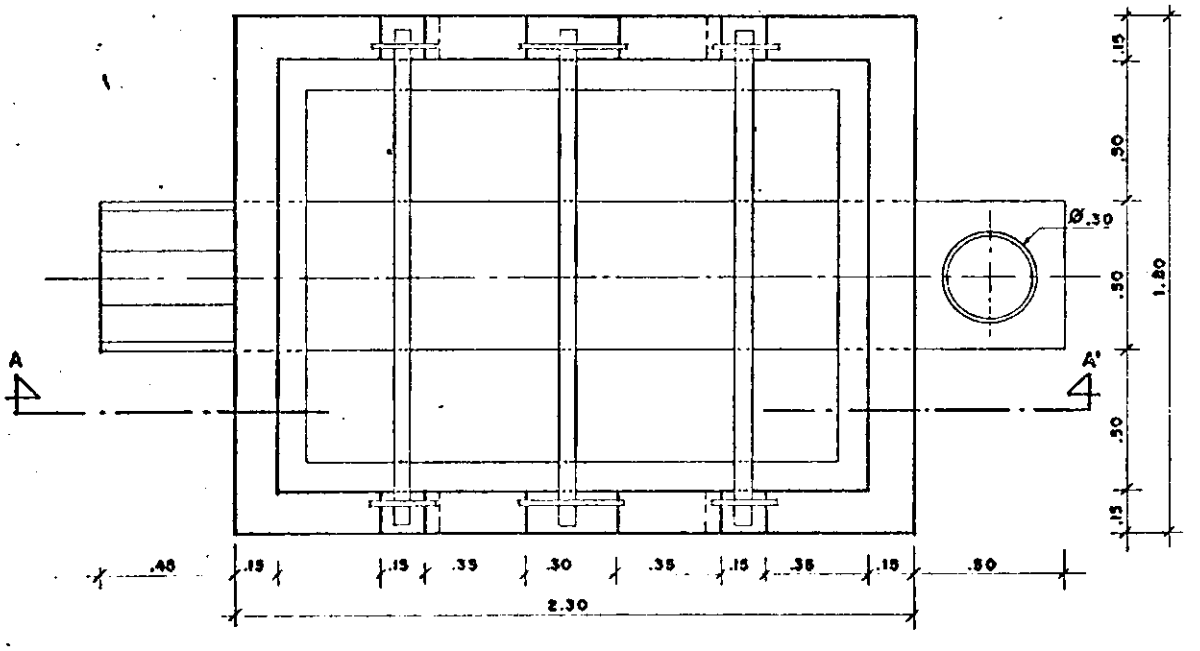
3.1.3. Construção do Secador

Foi construído um secador experimental, tipo Brook, com 2,3 m de comprimento por 1,8 m de largura e 1,5 m de altura em alvenaria (Figuras 2, 3 e 4). Este secador consta das seguintes partes:

- Câmara de uniformização de temperatura do ar de secagem (plenum)
- Câmara de secagem
- Piso perfurado ou fundo falso
- Queimador trocador de calor
- Chaminé
- Cobertura

3.1.3.1. Câmara de Uniformização de Temperatura (Plenum)

A câmara de uniformização de temperatura mede 1,84 m de comprimento por 1,30 m de largura por 0,90 m de altura e possui duas entradas de ar nas paredes laterais



PLANTA BAIXA – Esc. 1:20

Figura - 2 Planta baixa do secador experimental

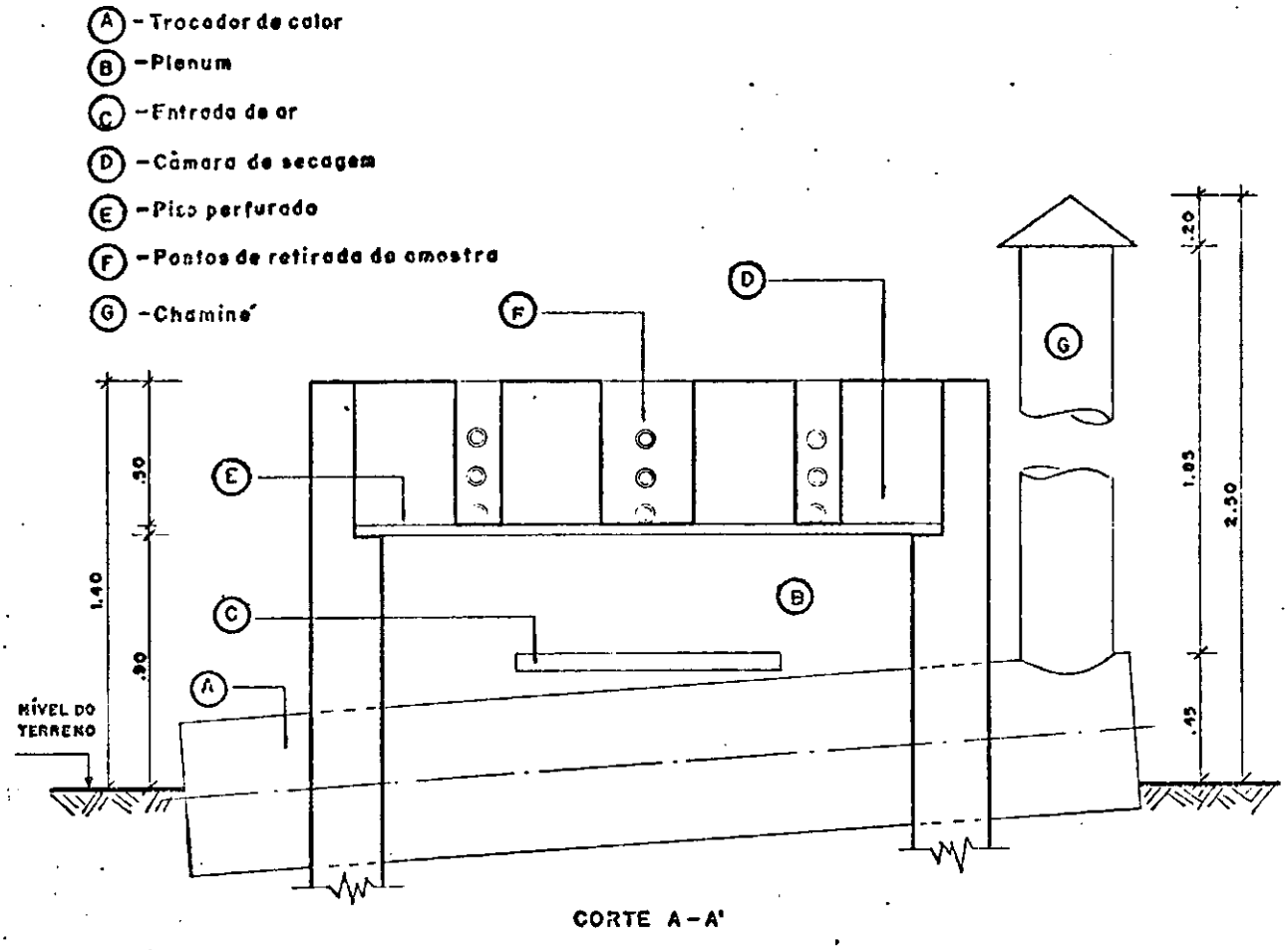


Figura - 3 Corte A - A' do secador experimental

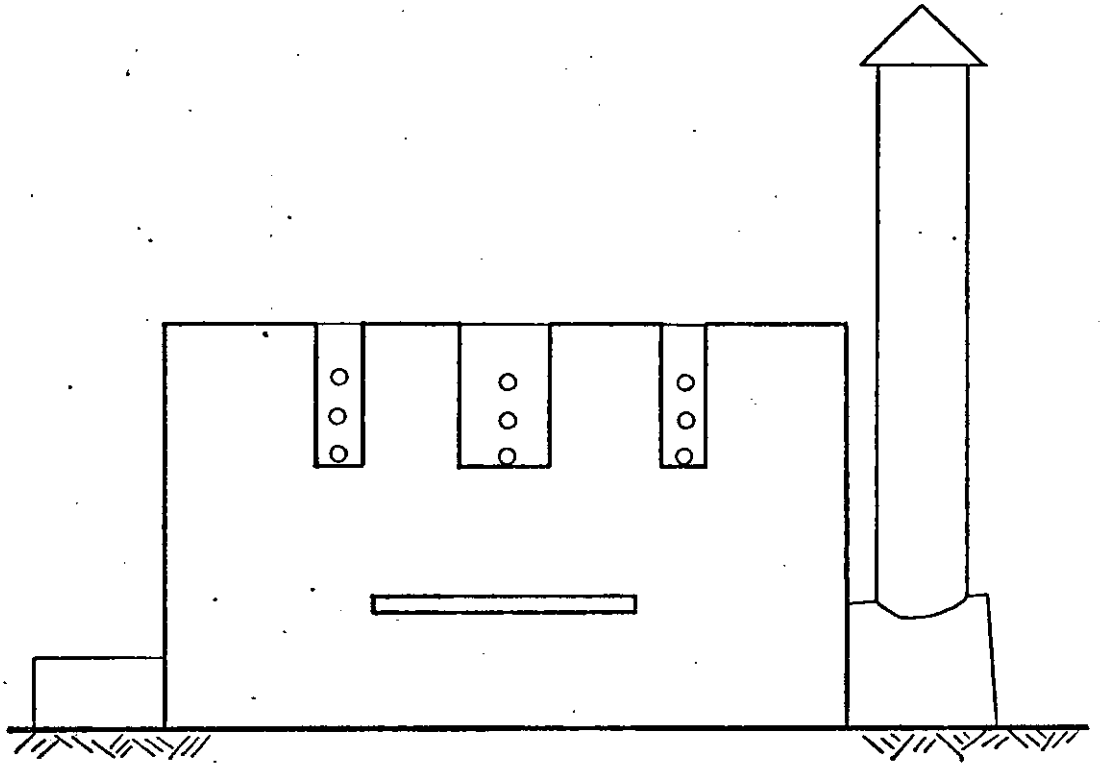


Figura - 4 Vista lateral do secador experimental

medindo cada uma 0,85 m de comprimento por 0,07 m de larguara.

3.1.3.2. Câmara de Secagem

A câmara de secagem possui as dimensões de 2,0 m de comprimento por 1,50 m de largura e comporta de madeira de 0,30 m de largura por 0,48 m de altura na parte lateral para descarga do produto.

3.1.3.3. Piso Perfurado ou Fundo Falso

O fundo falso foi construído com tela de arame com 90 % de área perfurada, medindo 1,84m de comprimento por 1,30 m de largura, e foi reforçado com estrutura metálica para proporcionar maior rigidez à tela, sob a qual fica o produto para secar.

3.1.3.4. Queimador - Trocador de Calor

Para construção do queimador foram utilizados 4 tambores de 200 litros, medindo cada um 0,82 m de comprimento e 0,58 m de diâmetro, facilmente encontrados no comércio como sucata: de dois tambores foram retirados as tampas e os fundos e, dos outros dois apenas as tampas. Em seguida foram soldados uns aos outros, formando um cilindro com aproximadamente 3,30 m de comprimento. Em cada

extremidade foi colocada uma abertura com sistema de regulagem para fechar parcialmente a entrada do queimador com a finalidade de evitar a ação do vento que aumenta a combustão e conseqüentemente o consumo de combustivel sólido. Serve, também, para a retirada das cinzas oriundas da combustão. Partes deste cilindro correspondendo a 0,42 m na parte frontal e 0,54 m na parte posterior, ficam fora da câmara de uniformização de temperatura. Na parte posterior que fica de fora desta câmara, foi colocada a chaminé. O queimador-trocador de calor foi enterrado em um canal no solo com uma declividade de 2 %, deixando exposta uma área de transferência de calor de 2,0 m².

3.1.3.5. Chaminé

Foi construído um cilindro de 0,30 m de diâmetro e 2,0 m de altura em zinco, e soldado a uma das extremidades do queimador-trocador de calor, para expelir os gases da combustão.

3.1.3.6. Cobertura

Uma cobertura de telha de amianto com área coberta de 17 m² foi construida para abrigar o secador.

3.1.4. Secagem

Foram realizados três testes de secagem, correspondendo às alturas da camada de grãos de 0,05; 0,15 e 0,30 m.

O primeiro teste foi realizado com uma altura da camada de grão de 0,05 m. Primeiramente foi determinado o teor de umidade inicial do produto e, em seguida, o milho foi colocado no secador e iniciado o processo de combustão do sabugo de milho no queimador - trocador de calor. Uma hora após ter sido iniciado o processo de secagem foram retiradas 5 amostras de diferentes pontos do secador a 0,0 m de altura e mais 5 amostras a 0,05 m de altura para que fossem determinados os teores de umidade. A cada intervalo de 1 hora esta operação era repetida. Para determinação do teor de umidade foi utilizada uma estufa Fanen, Modelo 330, a 105°C por 24 horas. Eram também registradas a temperatura e a umidade relativa ambientes, com um Termohigrometro Modelo DH 100. A temperatura do ar de secagem era obtida através de Termopar Brasterm e a velocidade do vento medida com Anemômetro de palheta. O consumo de combustível foi também computado ao longo da secagem.

O segundo teste foi realizado à altura da camada de 0,15 m; neste caso para se acompanhar a perda de peso que reflete a perda do teor de umidade dos grãos a diferentes profundidades, foram instalados na câmara de

secagem, no sentido transversal ao eixo do trocador de calor, tubos de ferro galvanizado de uma polegada de diâmetro espaçados de 0,50m nas alturas de 0,0 ,ou seja em contato com o fundo falso, 0,05, e 0,10 m como mostram as Figuras 3 e 4. Nestes tubos foram abertas janelas para que o ar aquecido pudesse passar através delas, sem que oferecessem resistência a sua passagem. Estes tubos foram envolvidos por um cilindro de tela de malha número 10, fio 24, para servir de guia, dentro da massa de grãos, para dois outros cilindros de 0,02 m de diâmetro e 0,62 m de comprimento, também de tela, que permaneceram cheios de grãos com peso e umidade previamente conhecidos. Como foram colocados 9 tubos - guia, tinhamos 18 pequenos cilindros cheios de grãos. Na superfície do produto também foram colocados 6 cilindros sem que houvesse necessidade dos tubos - guia. Todos eram retirados de hora em hora e pesados em balança Mettler com precisão de 0,01 gramas. A balança foi colocada ao lado do secador em caixa de acrílico transparente que servia de proteção para evitar oscilações nas leituras uma vez que o vento afetava sua sensibilidade. Os cilindros cheios de grãos eram retirados dos tubos que serviam de guia, imediatamente pesados e através da perda de peso do produto era determinada a variação do teor de umidade ao longo do tempo de secagem.

O terceiro teste foi realizado com camada de 0,30 m de altura e o procedimento experimental foi o mesmo da

camada de 0,15 m, variando apenas as alturas em que foram colocados os cilindros guia que são de 0,0; 0,10 e 0,20 m.

Este teste foi realizado com milho reumedecido, pois, na época não foi possível conseguir milho úmido. O milho, ao chegar ao laboratório de Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas do Núcleo de Tecnologia em armazenagem, proveniente da Unidade de Beneficiamento de Sementes, estava com um teor de umidade de 12% b.u. Para realizar os testes de secagem foi necessário fazer o reumedecimento do produto.O método utilizado para tal foi colocar o produto em 5 tambores de volume igual a 200 litros, cerca de 120 kg do produto por tambor, e adicionar água. A medida em que o produto absorvia a água outra quantidade era colocada para que permanecesse sempre submerso. Após um período de 12 horas, o excesso de água foi drenado e o material foi espalhado em galpão para que a umidade superficial fosse removida e houvesse, assim, uniformização da umidade. O produto permaneceu espalhado por um período de 12 horas, tempo necessário para remover a umidade superficial. Em seguida, o produto foi levado ao secador e iniciado o processo de secagem. Determinou-se o teor de umidade inicial, utilizando-se uma estufa Fanen, modelo 330, com ventilação, a 105 °C por um período de 24 horas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Calor Específico

A Tabela 1 mostra os valores médios do calor específico do sabugo de milho para vários teores de umidade .

TABELA 1 - Valores médios do calor específico do sabugo de milho a diferentes teores de umidade.

Teor de Umidade (%) bu	Calor Específico (cal/g°C)	(J/Kg °C)
12,8	0,2991	1252,2
15,7	0,3079	1289,1
19,8	0,3049	1276,5
23,6	0,2720	1138,8
31,6	0,2860	1197,4

A Tabela 2 apresenta a análise de variância do calor específico em função do teor de umidade.

TABELA 2 - Análise de Variância do Calor Específico do sabugo de milho em função do teor de umidade.

FONTE DE VARIAÇÃO	G.L.	QUADRADO MEDIO	F	PROB.
Tratamento	04	$1,102 \times 10^{-3}$	0,470	0,757 NS
Erros	20	$2,344 \times 10^{-3}$		
T O T A L	24			

A Análise de Variância mostrou que não existe diferença significativa entre nenhuma média de calor específico para diferentes teores de umidade ao nível de 1% de probabilidade.

Não foi verificada diferença significativa a nivel de 1% de probabilidade como mostra a Tabela 2 da Análise de Variância

Os resultados obtidos diferem dos encontrados por alguns pesquisadores, os quais mostraram que o calor específico de vários materiais biológicos aumentam com o teor de umidade. Este fato pode ser atribuído ao baixo valor da massa especifica do sabugo de milho, fazendo com que flutuasse no liquido calorimétrico quando da determinação do calor específico, o que pode ter alterado os resultados, tendo em vista que não há contato perfeito entre o líquido calorimetrico e o material, embora o calorimetro tenha sido

agitado manualmente por período de dois minutos. Por isto, MOHSENIN (1980) relata que vários pesquisadores recomendam que, na determinação do calor específico de grãos e sementes leves, seja usado como líquido calorimétrico o tolueno ou o N-hexano que têm baixa densidade, permitindo que sementes leves possam ficar totalmente submersas quando colocados no calorímetro.

Outro fator que pode ter contribuído para que não houvesse variação do calor específico com o aumento do teor de umidade, é o calor de umedecimento verificado por ALMEIDA (1979) quando de sua determinação do calor específico em amêndoas de cacau, o qual diz que segundo Sharma e Thompson o calor de umedecimentos varia inversamente com o aumento do teor de umidade em materiais biológicos.

Pelo fato de o sabugo de milho ser material esponjoso e muito higroscópico, absorve parte do líquido calorimétrico quando da determinação do calor específico, que pode ter contribuído para a não variação do calor específico do sabugo com o aumento do teor de umidade. Outro fator que pode ter contribuído para que não houvesse variação nos resultados do calor específico é, quando da determinação do teor de umidade do sabugo, que por ser material esponjoso absorve partículas de vapor d'água nos seus espaços capilares, contribuindo para que o teor de umidade determinado não seja real.

4.2. Secagem

As Tabelas 3, 4 e 5 apresentam os teores medios de umidade observados durante a secagem a diferentes alturas das camadas de grãos, utilizando-se como energia térmica o sabugo de milho. Observa-se na Tabela 3 que foi possível secar milho à altura da camada igual a 0,05 m, de aproximadamente 19.9% para um teor médio de umidade de 7.2 % , em 6 horas e de 19.9% para 12.9% em 3 horas para uma altura da camada de secagem 0,15 m (tabela 4); a secagem do milho de 25,6 para uma média de 13,7% de umidade levou 10 horas de secagem. Isto sugere que é preferível realizar 3 secagens sucessivas com a altura da camada de 0,05 m, evitando-se assim, teores de umidade muito elevados na camada superior e teores de umidade muito baixos na camada inferior, denotando super secagem nas camadas inferiores.

A secagem a 0,30 m (Tabela 5) foi interrompida após 20 horas, pois evidenciou-se defasagens muito grandes do teor de umidade entre as camadas inferiores e as superiores, iniciando a germinação do produto nas camadas superiores.

TABELA 3 - Valores medios dos teores de umidade (% b.u.) do milho a diferentes alturas da camada de secagem (0,0 e 0,05 m) em secador de convecção natural em camada estacionária.

tempo de secagem (h)	altura da camada (0,0 cm)	altura da camada (5.0 cm)	valores medios
0,0	19,9	19,9	19.9
1,0	16,8	18,6	17.7
2,0	13,7	17,3	15.5
3,0	11,5	14,3	12.9
4,0	8,5	12,7	10.6
5,0	5,5	10,9	8.2
6,0	5,2	9,3	7.2

TABELA 4 - Valores médios dos teores de umidade (% b.u.) do milho a diferentes alturas da camada de secagem (0,0; 0,05; 0,10 e 0,15 m) em secador de convecção natural em camada estacionária.

tempo de secagem (h)	altura da camada (0,0 cm)	altura da camada (5,0 cm)	altura da camada (10,0 cm)	altura da camada (15,0 cm)	valores médios
0,0	25,6	25,6	25,6	25,6	25.6
1,0	25,6	25,4	25,2	24,7	25.2
2,0	25,3	25,3	24,8	23,9	24.8
3,0	25,1	25,2	24,5	23,6	24.6
4,0	20,6	24,8	24,9	22,7	23.2
5,0	17,1	24,4	24,4	22,7	22.1
6,0	14,8	20,2	23,1	22,6	20.2
7,0	12,8	16,4	23,7	22,8	18.9
8,0	9,0	13,0	24,0	22,8	17.2
9,0	4,0	9,1	21,4	22,6	14.3
10,0	4,0	7,2	20,9	22,8	13.7

TABELA 5 - Valores médios dos teores de umidade (% b.u.) do milho a diferentes alturas da camada de secagem (0,0; 0,10; 0,20 e 0,30 m) em secador de convecção natural em camada estacionária.

tempo de secagem (h)	altura da camada (0,0 cm)	altura da camada (10,0 cm)	altura da camada (20,0 cm)	altura da camada (30,0 cm)	valores médios
0,0	29,4	29,4	29,4	29,4	29.4
1,0	23,7	28,7	27,9	27,1	26.8
2,0	19,9	28,8	28,1	26,8	25.9
3,0	17,5	28,7	28,3	26,7	25.3
4,0	15,2	28,6	28,2	26,5	24.6
5,0	11,3	28,5	28,1	26,3	23.6
6,0	8,9	28,4	27,9	25,9	22.8
7,0	7,1	28,3	27,8	25,4	22.1
8,0	5,6	28,0	27,8	25,4	21.7
9,0	5,0	27,9	27,6	25,0	21.4
10,0	4,7	27,8	27,6	24,8	21.2
11,0	3,1	27,6	27,3	26,2	21.0
12,0	2,6	27,3	27,6	25,6	20.8
13,0	2,2	26,7	27,5	25,9	20.6
14,0	1,9	25,0	27,4	25,7	20.0
15,0	1,5	24,6	27,3	25,5	19.7
16,0	1,2	23,6	27,3	25,2	19.3
17,0	0,9	21,9	27,3	25,2	18.8
18,0	0,7	20,6	27,3	24,5	18.3
19,0	0,5	19,0	27,2	24,0	17.7
20,0	0,4	17,5	26,7	22,7	16.8

4.2.1. Energia Termica do Sabugo de Milho

A Tabela 6 apresenta o resumo da secagem de milho, utilizando-se a energia térmica proveniente do sabugo. Observa-se nesta tabela que, para a camada de 0,05 m de altura, no secador de convecção natural, o sabugo de milho só conseguiu suprir metade da energia térmica nessessária para a secagem de milho de 19.9 % para 7.2% de umidade b.u. Como no experimento, a secagem de milho de 19.9 % para 7.2 % foi realizada em seis horas e a secagem de 19.9 % para 12.9% gastou apenas 3 horas, pode-se dizer que para este caso a quantidade de sabugo oriunda da espiga de milho foi suficiente para secar a quantidade de grãos que lhe era proveniente.

Para maior altura da camada de grãos pode-se melhorar a secagem, realizando-se o revolvimento; no entanto, como analisado no item anterior, as secagens para as camadas de 0,15 e 0,30 m de altura em secador de convecção natural não devem ser recomendadas, pois apresentam nas partes superiores teores de umidade muito elevados e nas partes inferiores super secagem. Segundo PUZZI (1989) este fato deve ser evitado, pois, a super secagem causa quebra dos grãos durante o manuseio, e a umidade excessiva, mesmo quando o produto é misturado com grãos de teores de umidade mais baixos, podem provocar focos de deterioração no interior dos silos.

TABELA 6 - Parâmetros quantitativos da secagem, utilizando-se resíduo da cultura como fonte de energia térmica.

ESPESSURA DA CAMADA (m)	0,05	0,15	0,30
Quantidade de Milho (kg)	120,0	340,0	650,0
Consumo de Lenha (kg)	19,0	87,0	131,0
Consumo de Sabugo (kg)	30,0	--	--
Sabugo Necessário p/toda a secagem (kg)	63,0*	165,0*	249,0*
Sabugo proveniente do Milho (kg)	30,0	85,0	162,0
Percentagem de Sabugo a ser utilizado na secagem	48	51	65
Secagem de Milho realizada (% b.u.)	20 - 7,2	25,6 - 13,8	29,4 - 16,8

* Equivalência térmica entre o sabugo de milho e a lenha. (Apêndice B)

4.2.2. Simulação de Secagem

A Tabela 7 mostra os parâmetros de entrada para a simulação de secagem através do modelo de Hukill.

As Tabelas 8, 9 e 10 apresentam os teores de umidade médios obtidos por simulação de secagem, através do modelo de Hukill, usando-se software desenvolvido no Núcleo de Tecnologia em Armazenagem, denominado de SASG-3, apresentado no Apêndice A.

O teste de qui-quadrado mostrou que não há diferença significativa ao nível de 1% de probabilidade entre os dados experimentais e os simulados.

Embora não exista entre os dados experimentais e simulados diferenças significativas, aparentemente o modelo de Hukill não representa tão bem os dados obtidos experimentalmente (Figuras 5,6 e 7). No entanto, isto pode ser atribuído ao fato de que, no processo de secagem em secador de convecção natural, dependendo do caso, a secagem pode variar de 6 a 20 horas, e a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem não são constantes, assim como não o é o fluxo de ar de secagem. Para os cálculos de simulação são considerados valores médios obtidos durante todo o experimento.

TABELA 7 - Parâmetros médios de entrada para a simulação de secagem através do modelo de Hukill.

PARAMETROS	ALT.DA CAMADA 0.05 m	ALT.DA CAMADA 0.15 m	ALT.DA CAMADA 0,30 m
UR do Ar Ambiente (%)	86,7	77,7	71,6
Temperatura Ambiente (°C)	20,2	22,7	26,1
Temperatura do Ar de Secagem (°C)	83,3	74,3	85,0
U. Inicial do Produto (%)	19,5	25,6	29,4
U. Final do Produto (%)	7,2	13,8	16,8
Vazão do Ar (m^3/min)	13,8	4,5	3,8
Massa Específica do Produto (kg de matéria seca por m^3 do produto)	560,0	560,0	560,0
Número de Camadas	2	4	4

TABELA 8 - Teores de umidade médios obtidos por simulação de secagem, através do modelo de Hukill para uma camada de 0,05 m a diferentes alturas

tempo de secagem (h)	altura da camada (0,0 cm)	altura da camada (5,0 cm)	valores médios
0,0	19,9	19,9	19.9
1,0	17,0	17,5	17.2
2,0	14,5	15,4	14.9
3,0	12,4	13,4	12.9
4,0	10,7	11,7	11.2
5,0	9,2	10,2	9.7
6,0	8,0	8,9	8.4

TABELA 9 - Teores de umidade médios obtidos por simulação de secagem, através do modelo de Hukill para uma camada de 0,15 m a diferentes alturas

tempo de secagem (h)	altura da camada (0,0 cm)	altura da camada (5,0 cm)	altura da camada (10,0 cm)	altura da camada (15,0 cm)	valores médios
0,0	25,6	25,6	25,6	25,6	25.6
1,0	22,8	24,6	25,3	25,5	24.5
2,0	19,9	23,5	24,9	25,4	23.4
3,0	17,2	22,1	24,4	25,2	22.2
4,0	14,7	20,5	23,8	25,0	21.0
5,0	12,5	18,8	23,0	24,7	19.7
6,0	10,6	17,0	22,0	24,4	18.5
7,0	9,0	15,1	20,8	23,9	17.2
8,0	7,7	13,3	19,5	23,3	15.9
9,0	6,7	11,6	18,0	22,5	14.7
10,0	5,9	10,0	16,4	21.6	13.5

TABELA 10- Teores de umidade médios obtidos por simulação de secagem, através do modelo de Hukill para uma camada de 0,30 m a diferentes alturas

tempo de secagem (h)	altura da camada (0,0 cm)	altura da camada (10,0 cm)	altura da camada (20,0 cm)	altura da camada (30,0 cm)	valores medios
0,0	29.4	29,4	29,4	29,4	29.4
1,0	28,4	29,4	29,4	29,4	29.1
2,0	26,9	29,4	29,4	29,4	28.8
3,0	24,9	29,3	29,4	29,4	28.2
4,0	22,3	29,3	29,4	29,4	27.6
5,0	19,2	29,3	29,4	29,4	26.8
6,0	15,9	29,2	29,4	29,4	26.0
7,0	12,8	29,0	29,4	29,4	25.1
8,0	10,0	28,8	29,4	29,4	24.4
9,0	7,8	28,5	29,4	29,4	23.8
10,0	6,1	27,9	29,4	29,4	23.2
11,0	5,0	27,1	29,4	29,4	22.7
12,0	4,2	25,9	29,4	29,4	22.2
13,0	3,7	24,3	29,4	29,4	21.7
14,0	3,3	22,1	29,3	29,4	21.0
15,0	3,1	19,3	29,3	29,4	20.3
16,0	3,0	16,3	29,2	29,4	19.5
17,0	2,9	13,9	29,1	29,4	18.8
18,0	2,8	10,5	28,9	29,4	17.9
19,0	2,8	8,2	28,5	29,4	17.2
20,0	2,8	6,5	28.1	29,4	16.7

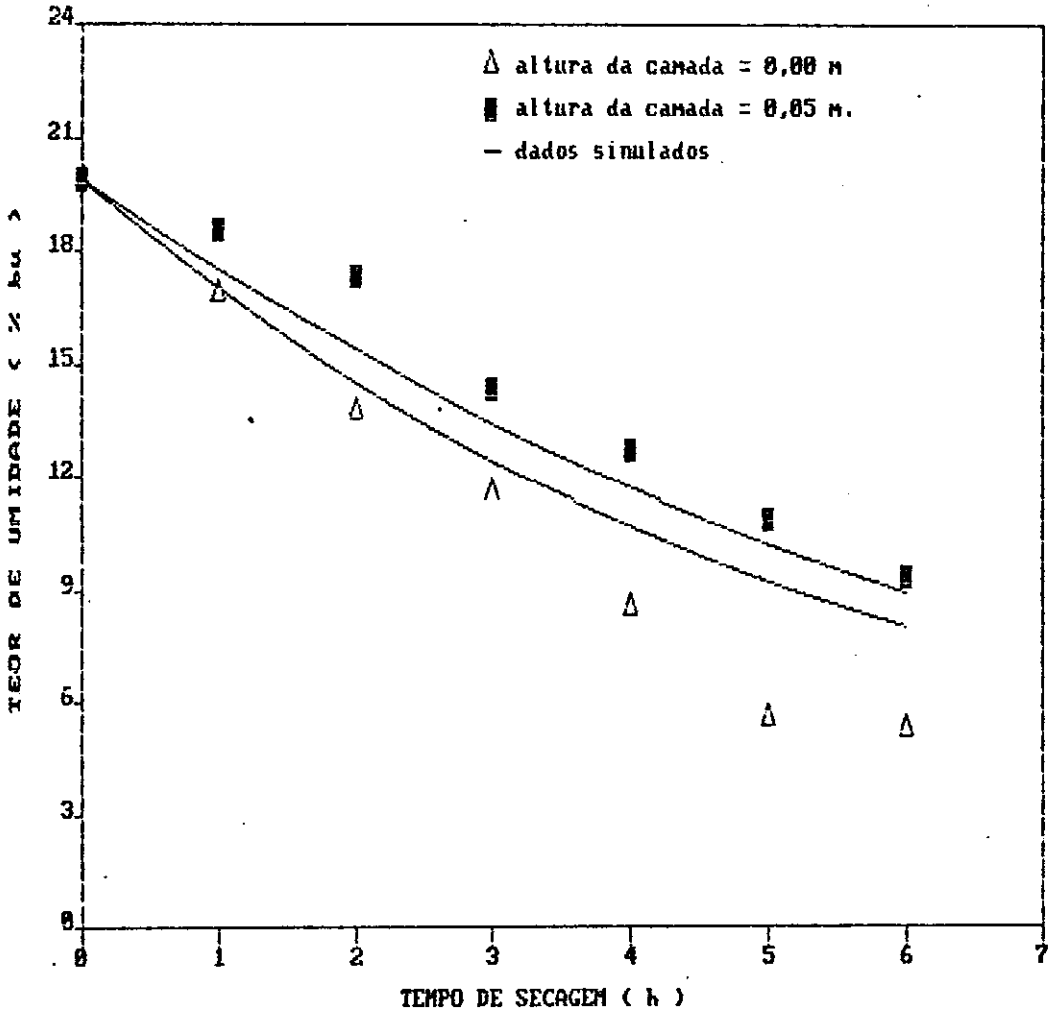


Figura - 5 Curvas de secagem experimentais e simuladas pelo modelo de Hukill para camada de 0,05 m de altura.

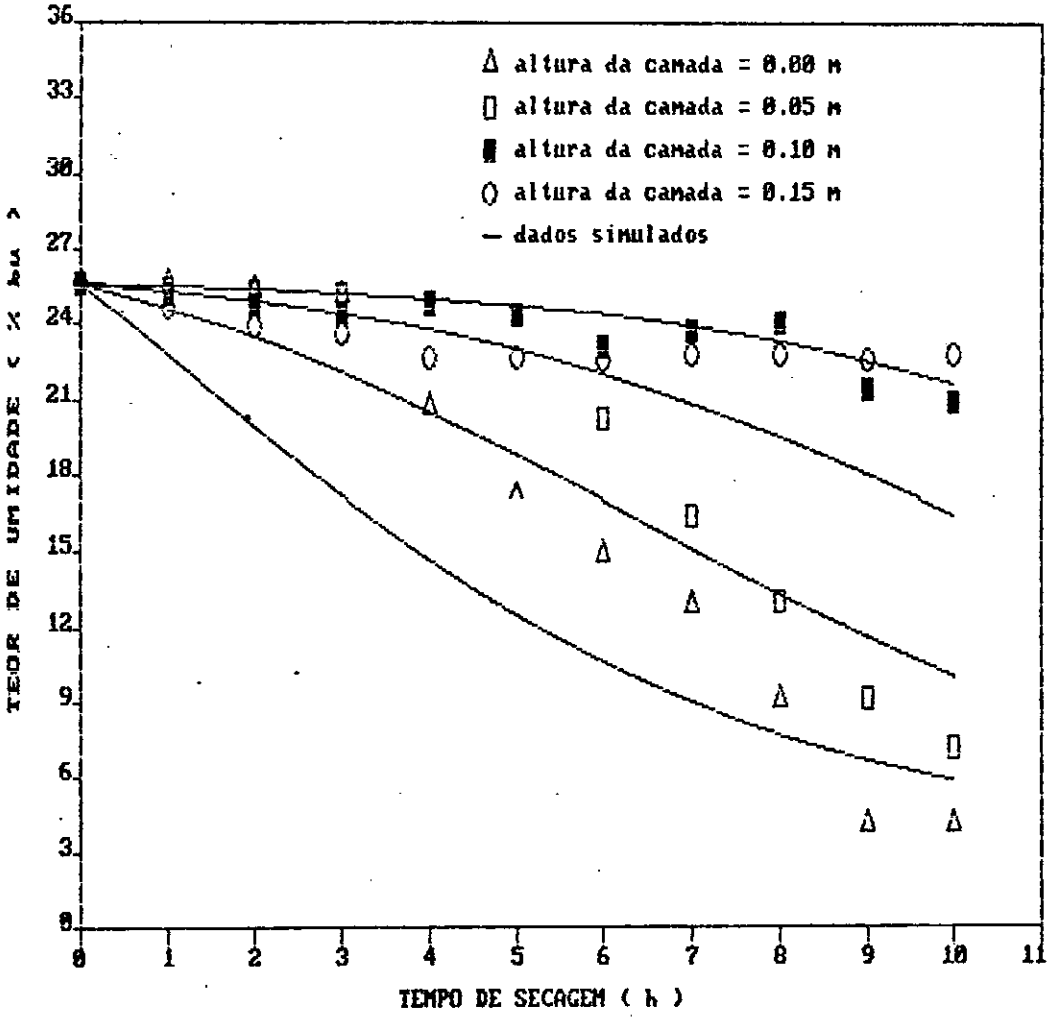


Figura - 6 Curvas de secagem experimentais e simuladas pelo modelo de Hukill para camada de 0,15 m de altura.

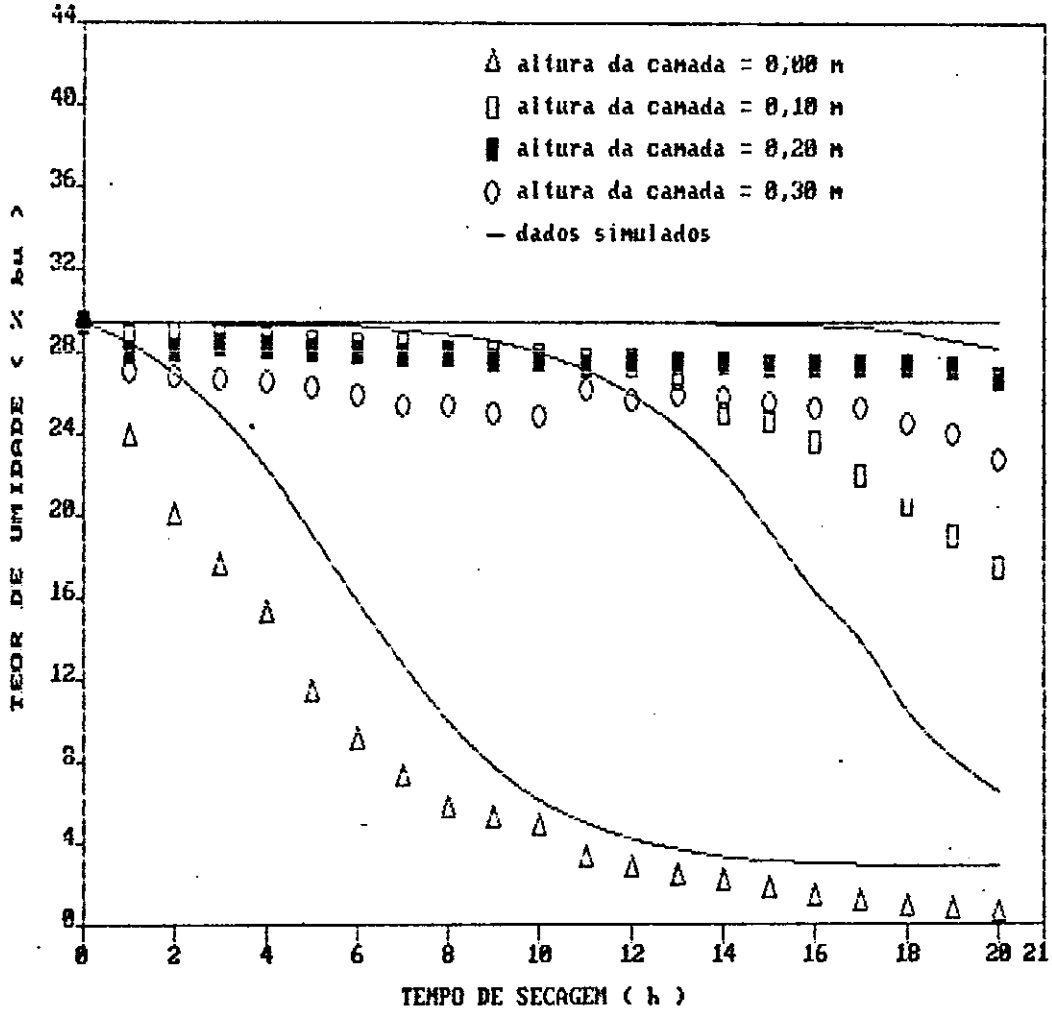


Figura - 7 Curvas de secagem experimentais e simuladas pelo modelo de Hukill para camada de 0,30 m de altura.

5. CONCLUSÕES

São as seguintes as conclusões deste trabalho:

1) De acordo com a metodologia utilizada, o calor específico do sabugo de milho não apresentou variação com o teor de umidade.

2) O sabugo proveniente da debulha de 120 kg de milho, forneceu energia térmica suficiente para a secagem da mesma quantidade de milho de 19.9% para 12.9% de umidade, a uma espessura da camada de 0,05 m, em secador de convecção natural.

3) A secagem em secador de convecção natural acima de 0,15 m de espessura de camada, não é satisfatória. pois apresenta super secagem nas camadas inferiores e excesso de umidade nas camadas superiores, ficando fora da faixa dos teores de umidade recomendados para a armazenagem.

4) As curvas de secagem simuladas pelo modelo de Hukill e as curvas experimentais, não apresentaram diferenças significativas ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de qui-quadrado.

6. RECONMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 - Repetir as determinações do calor específico pelo método das misturas, utilizando-se substâncias com densidades inferiores à da água.

6.2 - Estudar as possíveis perdas de energia no secador de convecção natural, visando a eficiência de secagem.

6.3 - Conduzir outros experimentos, utilizando diferentes resíduos agrícolas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, B. V. Determinação das Propriedades Físicas de Amêndoas de Cacao. Viçosa. UFV. 1979 (Tese M. S.)

BERNAL, H. R. G. Construçao e avaliação de um secador de grãos com ar movimentado por convecção natural. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa. 1982. 59p. (Tese M. S.)

BOLDUC. F .N. Development of a natural convection drier for on-farm use in developing countries. Manhattan, Kansas State University. 1978. 98p. (M. S. Thesis)

BROOKER, D. B.; BAKKER - ARKEMA, F. W. and HALL, C. Druying cereal grains. Wesport, the Avi Publishing Company,INC., 1974, 256 p.

CAVALCANTI MATA, M. E. R. M. Projeto de secagem e armazenagem de produtos agrícolas. N. T. A. Campina Grande - PB, 1988/90 50 P. (Relatório de Pesquiza)

DALPASQUALE, V. A. Secagem de grãos com ar natural: uma opção pouco utilizada no Brasil. Informe agropecuário Belo Horizonte, 9 (99): 6-7, março 1983.

FOSTER, G.H. Drying Cereal Grains. s.n.t.

I.B.G.E. Instituto Braisileiro de Geografia e Estatistica. Anuário Estatistico do Brasil . 1989. Rio de Janeiro,

KREITH, F. Princípios de transmissão de calor. Editora Edgard Bluger. São Paulo. 1977. 539p.

LASSERAN, J. C. Princípios gerais de secagem. Revista brasileira de armagenagem. Viçosa, 3 (3): 17 - 46, Julho 1978.

MARTINS, J. H.; Simulação de secagem de milho em camadas estacionária. Viçosa - Mg. 1982. 97 p. (Tese M. S.)

MARTINS, J. H.; MATA, M. E. R. M. C.; Introdução a teoria de simulação matemática de secagem de grãos. Núcleo de Tecnologia em Armazenagem. Campina Grande, Pb. 1984. 104p.

MERC, R. F. e GOMES, N. K. Beneficiamento e armazenamento de grãos. Companhia Estadual de Silos e Armazéns.104 p.

MOHSENIN, N. N. Termal Properties of Food And Agricultural Materials. New York. Gordon And Breach, 1980, 407 p.

PEREIRA, J. A. M ; QUEIROZ, D. M. DE e RIBEIRO, A. L. Secador de grãos com ar movimentado por convecção natural. Jornal da armazenagem. VII (21): 5-6, mar./jun. 1985.

PUZZI, D. Abastecimento e Armazenagem de grãos. São Paulo 603 p. 1989.

QUEIROS, D. M., SILVA, J.S. e MELO E. C. Práticas de simulação de secagem em calculadoras programáveis. Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem. CENTREINAR. Viçosa - Mg. 1982 . p.

ROA, G. M. Secagem e armazenamento dos principais alimentos brasileiros usando ar natural coletores solares, sistemas armazenadores de energia solar e gasogênio. Centro Nacional em Armazenagem. (CENTREINAR). Cidade Universitária - Viçosa, MG. 75 p. Dez. 1979.

ROSSI, S. J. e ROA, G. Secagem e armazenamento de produtos agropécuarios com uso de energia solar e ar natural. Academia do Estado de São Paulo-ACIESP. nº 22, 1980. 295p.

RYU, K. H. Factors affecing drying performance of a natural convection drier for developing countries.Manattan, Kansas State University. 1976. 78 p. (M.S. Thesis).

SILVA, J. S.; FILHO, A. F. L. e DALPASQUALE, V. A. Metodos de secagem e secadores. Informe agropeario. Belo Horizonte, 9 (99): 3-5, mar. 1988.

SINICIO, R.; ROA, G. Simulação matemática de Secagem. Centro de Treinamento em Armagenagem. CENTREINAR. Viçosa. 1980. 47 p.

TIPLER, P.A. Física I . Rio de Janeiro, Guanabara Dois. 2ª Ed. 1984. 596 p.

A P E N D I C E

APÊNDICE A

PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DE SECAGEM DE MILHO EM CAMADA FIXA USANDO O MODELO DE HUKILL

```
SET DEVICE TO SCREEN
SET TALK OFF
CLEAR ALL
STORE SPACE(77) TO limpa
STORE 4 TO lin
DO WHILE (lin < 22)
   @ lin,2  SAY limpa
   STORE (lin + 1) TO lin
ENDDO
@  2,2  SAY limpa
@  2,10 SAY "Modelo de Secagem de HUKILL:  LEITO FIXO"
STORE " " TO cond
@ 23,2  SAY limpa
@  6,5  SAY "Vazao do AR ..........................[m3/min]:"
@  7,5  SAY "Temperatura de Bulbo Seco do Ar ...["+CHR(248)+"C]:"
@  8,5  SAY "Umidade Relativa do Ar ................[ % ]:"
@  9,5  SAY "Temperatura de Bulbo Umido do Ar ..["+CHR(248)+"C]:"
@ 10,5  SAY "Teor de Umidade Inicial ..............[% b.u.]:"
@ 11,5  SAY "Teor de Umidade Final ................[% b.u.]:"
@ 12,5  SAY "Volume Especifico do Ar ............[m3/Kg(ar)]:"
@ 13,5  SAY "Incremento de Tempo ....................[ h ]:"
@ 14,5  SAY "Peso Especifico do Produto em Base Seca [Kg/m3]:"
@ 15,5  SAY "Altura Total da Camada de Graos ..........[ m ]:"
@ 16,5  SAY "Area do Secador ........................[m2]:"
@ 23,10 SAY "TECLE:  <C> para  CANCELAR;          <ENTER> para
             CONTINUAR" GET cond PICTURE "!"
READ
IF ((cond = "C") .OR. (cond = "I"))
   STORE "X" TO cond
ELSE
   @ 23,2  SAY limpa
   STORE 000.0000000000 TO q,tbs,ur,tbu,muo,muf,vesp,dt,w,l,a,t1,
                           tmr,mso,hfg,m1,meq
   STORE 000.0000000000 TO d1,y1,m,mbu,mu1,mu2,mu3,mu4,med,muf,h,
                           d,y2,ms
   STORE 1 TO x
   @  4,5  SAY "Entre com os dados abaixo:"
   @  6,5  SAY "Vazao do AR .[m3/min.]:" GET q PICTURE "999.9999"
   @  7,5  SAY "Temperatura de Bulbo Seco do Ar ....["+CHR(248)+
               "C]:" GET tbs PICTURE "999.9999"
   @  8,5  SAY "Umidade Relativa do Ar .........[ % ]:" GET ur
               PICTURE "999.9999"

   @  9,5  SAY "Temperatura de Bulbo Umido do Ar ...["+CHR(248)+
```

```
                "C]:" GET tbu PICTURE "999.9999"
    @ 10,5  SAY "Teor de Umidade Inicial .......[% b.u.]:" GET muo
                PICTURE "999.9999"
    @ 11,5  SAY "Teor de Umidade Final .........[% b.u.]:" GET muf
                PICTURE "999.9999"
    @ 12,5  SAY "Volume Especifico do Ar ...[m3/Kg(ar)]:" GET vesp
                PICTURE "999.9999"
    @ 13,5  SAY "Incremento de Tempo .......[ h ]:" GET dt PICTURE
                "999.9999"
    @ 14,5  SAY "Peso Especifico do Produto em Base Seca [Kg/m3]:
                " GET w PICTURE "999.9999"
    @ 15,5  SAY "Altura Total da Camada de Graos ...[ m ]:" GET l
                PICTURE "999.9999"
    @ 16,5  SAY "Area do Secador ..[m2]:" GET a PICTURE "999.9999"
    READ
    STORE 4 TO lin
    DO WHILE (lin < 22)
       @ lin,2  SAY limpa
       STORE (lin + 1) TO lin
    ENDDO
    STORE " " TO cond
    @  8,10 SAY "Para a SAIDA dos resultados, temos dois MODOS:"
    @ 10,10 SAY "[ V ] - VIDEO;"
    @ 11,10 SAY "[ I ] - IMPRESSORA"
    @ 13,10 SAY "ESCOLHA  O  SEU  MODO" GET cond PICTURE "!"
    READ
ENDIF
IF (cond = "V")
    STORE 4 TO lin
    DO WHILE (lin < 22)
       @ lin,2  SAY limpa
       STORE (lin + 1) TO lin
    ENDDO
    @  5,5  SAY "Tempo 1. Camada 2. Camada 3. Camada 4. Camada"
    STORE 7 TO lin
    STORE EXP(((0.003325-(0.00073412*muo))*tbs)+2.412584-
             (0.0156482*muo)) TO tmr
    STORE muo/(100-muo) TO mso
    STORE (606-(0.57*tbs))*(1+(4.35*EXP(-28.25*mso))) TO hfg
    STORE (q*60)/(vesp*a) TO m1
    IF (ur >= 52.00)
       STORE (21.2198*EXP(0.0146*tbs))/(LOG(1.8*tbs)+32) TO meq
    ELSE
       STORE (7.4776*(ur**0.4548))/(LOG((1.8*tbs)+32)) TO meq
    ENDIF
    STORE meq/(100-meq) TO meq
    DO WHILE (x = 1)
       STORE 1/4 TO dl
       STORE (t1+dt) TO t1


       @ lin,5  SAY t1 PICTURE "999.99"
```

```
STORE d1/2 TO y1
DO srp6
DO mbu6
STORE mbu TO m
STORE m TO mu1
@ lin,17 SAY mu1 PICTURE "999.99"
STORE d1*1.5 TO y1
DO srp6
DO mbu6
STORE mbu TO m
STORE m TO mu2
@ lin,33 SAY mu2 PICTURE "999.99"
STORE d1*2.5 TO y1
DO srp6
DO mbu6
STORE mbu TO m
STORE m TO mu3
@ lin,49 SAY mu3 PICTURE "999.99"
STORE (d1*3.5) TO y1
DO srp6
DO mbu6
STORE mbu TO m
STORE m TO mu4
@ lin,65 SAY mu4 PICTURE "999.99"
STORE (mu1+mu2+mu3+mu4)/4 TO med
STORE (lin + 1) TO lin
IF (med <= muf)
   STORE (lin + 1) TO lin
   @ lin,5  SAY "Tempo de Secagem -----> ["
   @ lin,30 SAY t1 PICTURE "999.99"
   @ lin,36 SAY "]"
   @ lin,40 SAY "Umidade Media Final --> ["
   @ lin,65 SAY med PICTURE "999.99"
   @ lin,71 SAY "]"
   EXIT
ELSE
   IF (lin = 20)
      STORE " " TO cond
      @ 23,2  SAY limpa
      @ 23,10 SAY "Aperte  Q.Q.  TECLA" GET cond
      READ
      STORE 6 TO lin
      DO WHILE (lin < 22)
         @ lin,2  SAY limpa
         STORE (lin + 1) TO lin
      ENDDO
      STORE 6 TO lin
   ENDIF
   LOOP

ENDIF
```

```
   ENDDO
ENDIF
IF (cond = "I")
   STORE "NUCLEO  DE  TECNOLOGIA  EM  ARMAZENAGEM" TO cabec1
   STORE "SOFTWARE  APLICATIVO  A  SECAGEM  DE  GRAOS" TO cabec2
   STORE "Modelo  de  HUKILL:  SECAGEM  EM  LEITO  FIXO" TO cabec3
   STORE " -----  --------  --------  --------  --------" TO linha
   STORE "¦Tempo¦ 1. Cam.¦ 2. Cam.¦ 3. Cam.¦ 4. Cam.¦" TO linha1
   STORE "¦-----¦--------¦--------¦--------¦--------¦" TO linha2
   STORE " " TO modo
   @ 17,10 SAY "TECLE: <<ENTER>>  Se  a  IMPRESSORA  estiver OK.
               " GET modo
   READ
   SET DEVICE TO PRINT
   @  1,1  SAY cabec1
   @  3,1  SAY cabec2
   @  5,1  SAY cabec3
   @  7,1  SAY linha
   @  8,1  SAY linha1
   @  9,1  SAY linha2
   STORE 10 TO lin
   STORE EXP(((0.003325-(0.00073412*muo))*tbs)+2.412584-
           (0.0156482*muo)) TO tmr
   STORE muo/(100-muo) TO mso
   STORE (606-(0.57*tbs))*(1+(4.35*EXP(-28.25*mso))) TO hfg
   STORE (q*60)/(vesp*a) TO m1
   IF (ur >= 52.00)
      STORE (21.2198*EXP(0.0146*tbs))/(LOG(1.8*tbs)+32) TO meq
   ELSE
      STORE (7.4776*(ur**0.4548))/(LOG((1.8*tbs)+32)) TO meq
   ENDIF
   STORE meq/(100-meq) TO meq
   DO WHILE (x = 1)
      STORE 1/4 TO d1
      STORE (t1+dt) TO t1
      @ lin,1  SAY "¦"
      @ lin,2  SAY t1 PICTURE "999.99"
      STORE d1/2 TO y1
      DO srp6
      DO mbu6
      STORE mbu TO m
      STORE m TO mu1
      @ lin,9  SAY "¦"
      @ lin,12 SAY mu1 PICTURE "999.99"
      STORE d1*1.5 TO y1
      DO srp6
      DO mbu6
      STORE mbu TO m
      STORE m TO mu2


      @ lin,21 SAY "¦"
```

```
      @ lin,24 SAY mu2 PICTURE "999.99"
      STORE dI*2.5 TO y1
      DO srp6
      DO mbu6
      STORE mbu TO m
      STORE m TO mu3
      @ lin,33 SAY "¦"
      @ lin,36 SAY mu3 PICTURE "999.99"
      STORE (d1*3.5) TO y1
      DO srp6
      DO mbu6
      STORE mbu TO m
      STORE m TO mu4
      @ lin,45 SAY "¦"
      @ lin,48 SAY mu4 PICTURE "999.99"
      @ lin,57 SAY "¦"
      STORE (mu1+mu2+mu3+mu4)/4 TO med
      STORE (lin + 1) TO lin
      IF (med <= muf)
         @ lin,1  SAY linha
         STORE (lin + 2) TO lin
         @ lin,5  SAY "Tempo de Secagem -----> ["
         @ lin,30 SAY t1 PICTURE "999.99"
         @ lin,36 SAY "]"
         STORE (lin + 2) TO lin
         @ lin,5  SAY "Umidade Media Final --> ["
         @ lin,30 SAY med PICTURE "999.99"
         @ lin,36 SAY "]"
         EXIT
      ELSE
         IF (lin > 59)
            @ lin,1  SAY linha
            EJECT
            @  1,1  SAY cabec1
            @  3,1  SAY cabec2
            @  5,1  SAY cabec3
            @  7,1  SAY linha
            @  8,1  SAY linha1
            @  9,1  SAY linha2
            STORE 10 TO lin
         ELSE
            @ lin,1  SAY linha2
            STORE (lin + 1) TO lin
         ENDIF
         LOOP
      ENDIF
   ENDDO
   EJECT
   SET DEVICE TO SCREEN

ENDIF
```

```
STORE " " TO sim
@ 23,2  SAY limpa
@ 23,10 SAY "Aperte  QUALQUER  tecla" GET sim
READ
CLEAR ALL
RETURN

SUBROTINA  PARA CALCULO DE TRANSFORMAÇ~AO DE BASE SECA PARA  BASE
UMIDA

SET TALK OFF
*PARAMETERS ms
STORE (ms*100)/(1+ms) TO mbu
RETURN

SUBROTINA PRINCIPAL
SET TALK OFF
*PARAMETERS y1,w,hfg,tbs,tbu,mso,meq,m1,t1,tmr,h
d = (y1*w*hfg*(mso-meq))/(0.24*m1*tmr*(tbs-tbu))
y2 = t1/tmr
mr = (2**d)/((2**d)+(2**y2)-1)
ms = (mr*(mso-meq))+meq
RETURN
```

APÊNDICE B

Para se fazer a equivalência térmica entre o sabugo do milho e a lenha, usou-se a seguinte expressão:

$$m_l \; C_{pl} = m_s \; C_{ps}$$

em que

m_l = Massa da lenha, kg

C_{pl} = Calor espécifico da lenha, Kcal/kg °C

m_s = Massa do sabugo, kg

C_{ps} = Calor espécifico do sabugo, Kcal/kg °C