

Capítulo II

SECAGEM A NÍVEL DE PRODUTOR

Mario Eduardo R. M. Cavalcanti Mata¹

1. INTRODUÇÃO

2. SISTEMA DE SECAGEM

3. TIPOS DE SECADORES

4. VENTILADORES

5. AERAÇÃO

1. Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Agrícola/CCT/UFPB - C. Grande -PB

1. INTRODUÇÃO

A secagem mecânica de produtos agrícolas nas fazendas brasileiras ainda não é a desejável para os padrões de uma agricultura moderna, embora não se possa deixar de reconhecer que este tipo de secagem avançou significativamente desde a década de 70.

No Brasil, entre os anos 60 e 70, pouco se sabia sobre os processos de secagem mecânica, basta dizer que na década de 70 apenas a Universidade Federal de Viçosa, em todo o País, mantinha, no seu curso de Agronomia, um curso de Armazenagem de Produtos Agrícolas, e assim mesmo para os alunos diversificados em Engenharia Agrícola. A necessidade desse conhecimento ficou fortemente evidenciada quando se começou a noticiar ao mundo as potencialidades brasileiras de produção agrícola e as perdas assustadoras de 50% do que se produzia devido à falta de infra-estrutura de unidades de secagem e armazenagem.

Esse fato motivou alguns programas de ação governamental, como o Programa Nacional de Armazenagem - PRONAZEM, sob a coordenação da Companhia Brasileira de Armazenagem - CIBRAZEM, sendo um dos seus objetivos fortalecer a construção de unidades armazenadoras em todo o território nacional a juros abaixo do mercado. Entenda-se aqui unidades armazenadoras como edificações que permitem um conjunto de operações necessárias a armazenagem dos produtos, portanto, portadoras de sistemas de pré-limpeza, secagem, limpeza, seleção e expurgo. Nesse período, a capacidade estática de armazenamento no Brasil passou de 38,3 milhões de toneladas, em 1975, para 72 milhões de toneladas, em 1988 (SILVA, 1993).

O programa também contemplava a construção de unidades a nível de fazenda. Mas, a pergunta que se fazia nesta época era como implementar programas, quando só uma escola preparava técnicos com a devida habilitação. Nesse contexto surgiram, nas décadas de 70 e 80, os cursos de Engenharia Agrícola, Engenharia de Alimentos, Zootecnia, Veterinária e tantos outros derivados da Agronomia. Embora se tenha criado uma ampla discussão sobre esse tema, hoje a maioria dos educadores está convencida da amplitude do campo de saber da Agronomia e da impossibilidade de capacitar um ser humano, por mais genial que seja, com tantas informações e com um amplo domínio de todos esses conhecimentos.

Embora a criação desses cursos tenha dado um significativo avanço no sentido de resolver alguns problemas pertinentes a cada campo de domínio do conhecimento, outra pergunta precisava ser respondida: como dotar deste conhecimento os técnicos e leigos que já estavam atuando no setor de armazenagem inclusive contribuindo para que ocorressem essas enormes perdas? Para dar resposta a esta pergunta foi criado o Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem - CENTREINAR, em 1976, cujo objetivo era de treinar um contingente significativo de técnicos, nos seus diversos níveis operacionais, ligados ao setor de armazenagem de produtos, incluindo também as atividades de pesquisa e desenvolvimento de novos equipamentos.

Com o sucesso do CENTREINAR seguiu-se a implantação, em 1983, dos Núcleos de Tecnologia em Armazenagem na Universidade Federal da Paraíba (Campus de Campina Grande), NTA-UFPB, para atender a região Nordeste; na Universidade Federal de Mato Grosso, NTA-MT para atender a região Centro-Oeste; na Universidade Federal do Pará, NTA-PA, para atender a Região Norte; e na Universidade Federal do Paraná, NTA-PR, para atender a região Sul. Com o CENTREINAR ficou a responsabilidade da Coordenação Geral e da região Sudeste.

A importância desses núcleos nem sempre foi bem percebida pelas instituições que os abrigaram, pois no meio universitário é impossível convencer pessoas da importância de determinados instrumentos de desenvolvimento quando estas não conhecem o assunto na sua profundidade e estão mais interessadas em suas áreas de domínio, esquecendo-se das responsabilidades de administrador e da universalidade do conhecimento que cabe a estas instituições. Assim, só os Núcleos das Universidades Federal da Paraíba e do Mato Grosso se estruturaram e estiveram a serviço da comunidade rural.

Outras instituições, como é o caso do CENTREINAR, redimensionaram sua atividade de modo a adequar os seus objetivos aos poucos recursos advindos do Governo Federal.

Apesar desses distúrbios institucionais e governamentais, a necessidade do campo é bem maior e supera tais ocorrências.

Embora a secagem mecânica de produtos agrícolas nas fazendas seja feita por um número reduzido de agricultores, não se pode mais dizer que não existem experiências significativas dos avanços alcançados nesta área. Assim, este capítulo tem como objetivo principal dar uma visão das experiências realizadas com sucesso, até o presente momento, no setor de secagem de produtos agrícolas a nível de produtor.

1.1 Temperatura e umidade

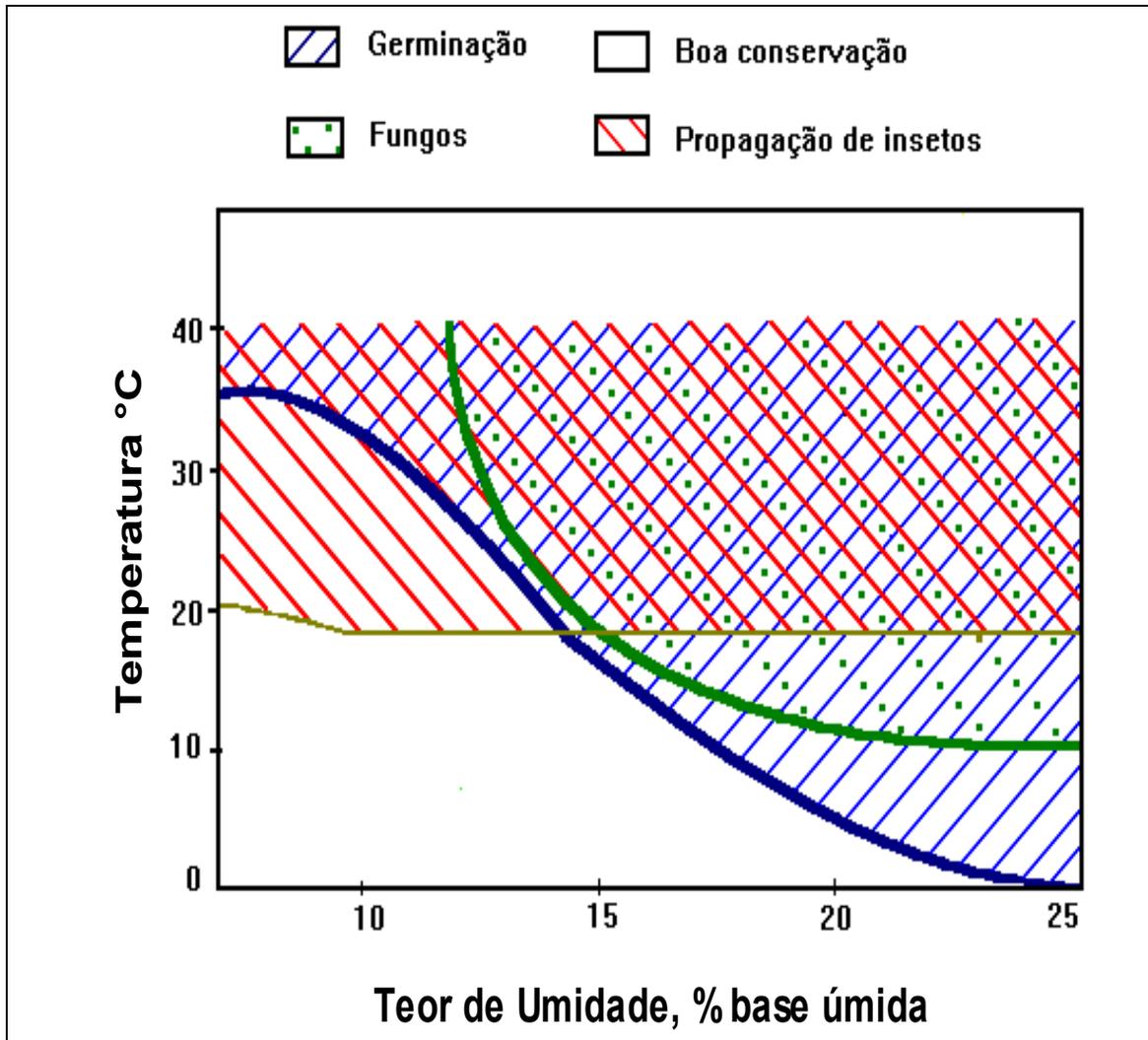
Durante o armazenamento, os grãos, as sementes, os tubérculos e os outros produtos agrícolas são, de maneira genérica, organismos vivos, e, enquanto estiverem vivos, respiram. Como resultado desta respiração, emitem calor, água e dióxido de carbono.

A diminuição dessa atividade biológica do produto depende da umidade e da temperatura a que o mesmo vai ser armazenado. As condições de alta umidade levam ao desenvolvimento de fungos, resultando em aumento de temperatura e umidade, que são as condições ideais para a propagação de insetos. As atividades dos insetos produzem aumento de temperatura, e estes se desenvolvem em temperaturas entre 25 e 35 °C.

A Figura 1 mostra a influência da umidade e temperatura no desenvolvimento de insetos e fungos e na capacidade de germinação do grão ou das sementes.

Para armazenagem prolongada, a umidade do produto armazenado deve ser suficientemente baixa, de modo que o desenvolvimento de fungos e insetos seja impossível ou tão demorado que o aumento de temperatura do produto armazenado seja insignificante; conseqüentemente, a umidade do produto é a base do sucesso da armazenagem.

Assim, a secagem do produto a ser armazenado surge como um meio de preservar o produto por curtos ou longos períodos de tempo.



Fonte: Calve, 1969 citado por BEER (1972)

Figura 1 - Influência da temperatura e umidade durante a armazenagem de grãos.

Com relação à umidade do produto, esta pode ser expressa em base seca ou base úmida, isto é:

$$\%U_{bu} = \frac{\text{Massa de Água}}{\text{Massa de Água + Massa de Material Seco}} \times 100 = \frac{MA}{MA + MMS} \times 100 \quad (1)$$

$$\%U_{bs} = \frac{\text{Massa de Água}}{\text{Massa de Material Seco}} \times 100 = \frac{MA}{MMS} \times 100 \quad (2)$$

Normalmente, o termo teor de umidade em base seca de um produto agrícola é mais empregado em trabalhos técnicos e, ou, científicos, e o teor de umidade em base úmida é mais usado na linguagem agrícola e comercial desses produtos.

1.2 Umidade relativa

A umidade relativa do ar é expressa normalmente em porcentagem (%), sendo definida como a relação entre a umidade contida em um determinado volume de ar a dada temperatura e a umidade teórica que este volume de ar teria quando saturado de água à mesma temperatura. A umidade relativa é, portanto, a medida da capacidade do ar de absorver umidade adicional. A umidade relativa também pode ser expressa como a relação entre a pressão de vapor d'água (P_v) e a pressão máxima (P_{vs}) que este vapor d'água poderia exercer quando estivesse nas condições de saturação, sem que haja alteração de temperatura (Equação 3).

$$UR = \frac{m_{va}}{m_{vs}} = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (3)$$

em que

UR = umidade relativa do ar, decimal

m_{va} = massa do vapor d'água, kg

m_{vs} = massa de vapor d'água na condição de saturação, kg

P_v = pressão de vapor d'água, Pa

P_{vs} = pressão de vapor d'água na condição de saturação, Pa

A determinação da umidade relativa do ar pode ser feita através das leituras de um termômetro de bulbo seco e de outro de bulbo molhado, mediante auxílio de uma tabela, ou através de cartas psicrométricas (Figura 2), ou ainda por cálculos, utilizando-se as equações psicrométricas do ar úmido.

Os psicrômetros mais utilizados no mercado são o a) psicrômetro comum e b) psicrômetro giratório, conforme indicado na Figura 3.

O psicrômetro comum é constituído de dois termômetros, sendo o primeiro um termômetro comum que mede a temperatura ambiente, chamado de termômetro de bulbo seco. No segundo termômetro, seu bulbo é envolto por uma mecha embebida em água, por isso recebe o nome de termômetro de bulbo molhado. Com auxílio da Tabela 1, pode-se determinar a umidade relativa do ar.

Figura 2 - Carta psicrométrica

Tabela 1 - Determinação da umidade relativa do ar para um psicrômetro comum

Temperatura °C	Diferença entre a temperatura do bulbo seco ea do bulbo molhado (T-T')													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	81	64	46	29	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	84	68	52	37	22	7	-	-	-	-	-	-	-	-
4	85	71	57	43	29	16	-	-	-	-	-	-	-	-
6	86	73	60	48	35	24	11	-	-	-	-	-	-	-
8	87	75	63	51	40	29	19	8	-	-	-	-	-	-
10	88	77	66	55	44	34	24	15	6	-	-	-	-	-
12	89	78	68	58	48	39	29	21	12	5	-	-	-	-
14	90	79	70	60	51	42	34	26	18	10	-	-	-	-
16	90	81	71	63	54	46	38	30	23	15	8	-	-	-
18	91	82	73	65	57	49	41	34	27	20	14	7	-	-
20	91	83	74	66	59	51	44	37	31	24	18	12	6	-
22	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28	22	17	11	6
24	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31	26	20	15	10
26	92	85	78	71	64	58	51	46	40	34	29	24	19	14
28	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37	32	27	22	18
30	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39	35	30	25	21
32	93	86	80	74	68	62	57	51	46	41	37	32	28	24
34	93	87	81	75	69	63	58	53	48	43	39	35	30	26
36	94	87	81	75	70	64	59	54	50	45	41	37	33	29
38	94	88	82	76	71	66	61	56	51	47	43	39	35	31
40	94	88	82	77	72	67	62	57	53	48	44	40	36	33
42	94	88	83	78	72	67	63	58	54	50	46	42	38	35
44	94	89	83	78	73	68	64	59	55	51	47	43	40	36

Por exemplo: suponha que a leitura do termômetro de bulbo seco seja de 25 °C e a de bulbo molhado de 20 °C; então, a umidade relativa será de 64%.

O psicrômetro giratório tem igualmente os termômetros de bulbo seco e bulbo molhado;

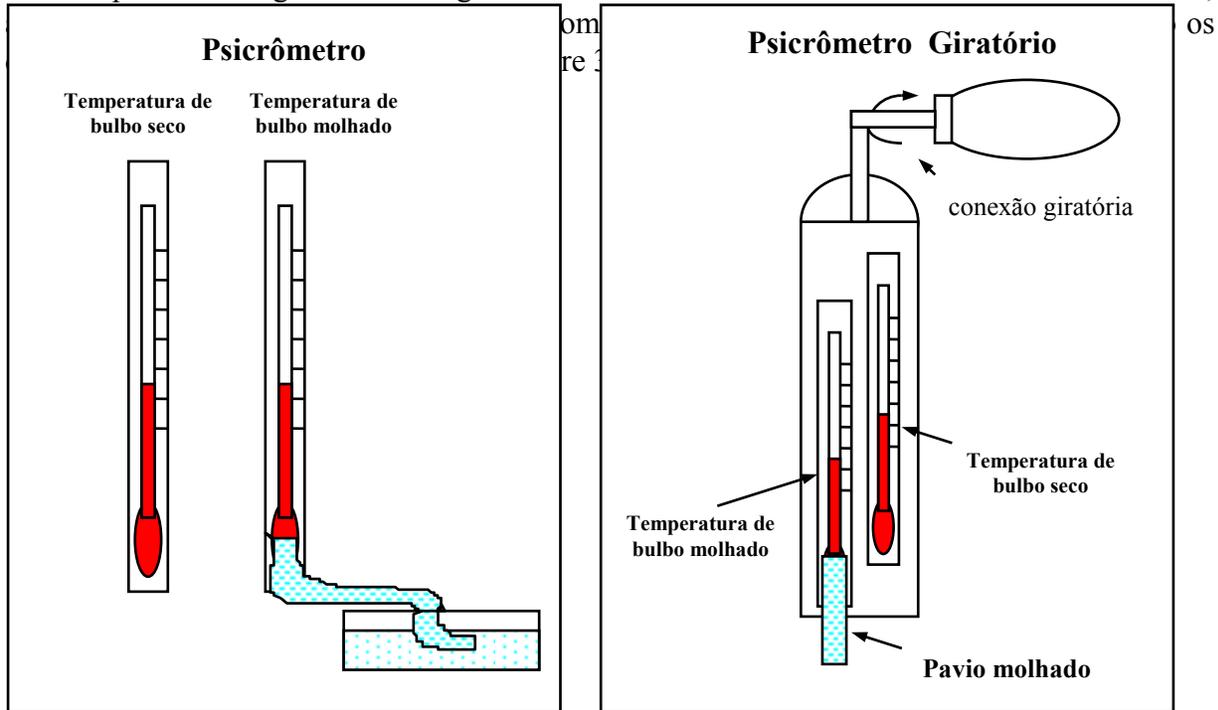


Figura 3 - Tipos de psicrômetros

Caso se necessite obter dados mais precisos do que os obtidos na Tabela, podem ser utilizadas as equações propostas por WILHELM (1976), para valores de temperatura entre 0 e 150 °C. A seqüência de cálculos, no caso de se ter as leituras de 25 °C para a temperatura de bulbo seco e 20 °C para a temperatura de bulbo molhado, será:

a) Calcule inicialmente a pressão de vapor de saturação à temperatura do bulbo molhado, através da seguinte fórmula:

$$P_{vs} = \frac{\text{EXP} \left[\left(A + \frac{B}{T_{abs}} + C \cdot (T_{abs}) + D \cdot \ln(T_{abs}) + E \cdot (T_{abs})^4 + F \cdot (T_{abs})^2 + G \cdot (T_{abs})^3 \right) \right]}{H} \quad (4)$$

em que

A = 89,63121 **B** = -7511,52 **C** = 0,02399897 **D** = -12,150799 **E** = 2,0998405.10⁻¹¹
F = - 1,1654551.10⁻⁵ **G** = -1,2810336.10⁻⁸ **H** = 0,1333

em que $T_{abs} = 273,16 + 20 = 293,16$ K, então, tem-se:

$$P_{vs} = \frac{\text{EXP} \left[(89,63121 - \frac{7511,52}{T_{abs}} + 0,02399897(T_{abs}) - 12,105799 \cdot \text{Ln}(T_{abs}) + 2,00998405 \cdot 10^{-11} \cdot (T_{abs})^4 - 1,1654551 \cdot 10^{-5} \cdot (T_{abs})^2 - 1,2810336 \cdot 10^{-8} \cdot (T_{abs})^3 \right]}{0,1333} \quad (5)$$

Portanto,

$$P_{vbu} = 17,544 \text{ mmHg}$$

b) Na seqüência calcula-se a razão de mistura do ar à temperatura do bulbo molhado que é dada através da seguinte equação:

$$RM_{bu} = \frac{0,622 \cdot P_{vbm}}{P_{atm} - P_{vbm}} = RM_{bm} = \frac{0,622 \cdot (17,544)}{760 - 17,544} = 0,0147 \text{ kg de água/kg de ar seco} \quad (6)$$

em que

RM_{bm} = razão de mistura do ar à temperatura do bulbo molhado, kg de água/kg de ar seco

P_{atm} = pressão atmosférica, mmHg

P_{vbm} = pressão de vapor d'água à temperatura do bulbo molhado, mmHg

c) O passo seguinte é o cálculo da razão de mistura à temperatura do bulbo seco, que é dada pela equação:

$$RM = \frac{(2501 - 2,411 \cdot T_{bm}) \cdot RM_{bm} - (1,006 \cdot (T_{bs} - T_{bm}))}{2501 + 1,775 \cdot (T_{bs}) - 4,1866 \cdot (T_{bm})} \quad (7)$$

RM = razão de mistura do ar à temperatura do bulbo seco, kg de água/kg de ar seco

T_{bm} = temperatura do bulbo molhado, °C

T_{bs} = temperatura de bulbo seco, °C

$$RM = \frac{(2501 - 2,411 \cdot (20)) \cdot 0,0147 - (1,006 \cdot (25 - 20))}{2501 + 1,775 \cdot (25) - 4,1866 \cdot (20)} \quad (8)$$

$$RM = \frac{31,0258}{2461,643} = 0,0126 \text{ kg de água/kg de ar seco} \quad (9)$$

d) Finalmente, obtém-se a umidade relativa do ar, usando-se a seguinte equação:

$$UR = \frac{RM \cdot P_{atm}}{P_{vbs} \cdot (RM + 0,622)} = \frac{0,0126 \cdot (760)}{23,77 \cdot (0,0126 + 0,622)} = \frac{9,5788}{15,084} = 0,6350 \text{ ou } 63,5\% \quad (10)$$

Outra maneira de se determinar a umidade relativa é utilizando um higrômetro, que pode ser constituído de fios de cabelo desengordurados (Figura 4), e de sensores elétricos. Existem também no mercado os higrógrafos que utilizam estes dois princípios mas em vez do ponteiro

indicador, possuem um ponteiro tipo caneta tinteiro, que registra a umidade relativa do ar continuamente.

O princípio de funcionamento do higrômetro ou higrógrafo com fio de cabelo consiste no fato de o cabelo humano desengordurado ter a propriedade de aumentar de comprimento quando absorve água e de diminuir quando perde água. Nesses equipamentos, entre as umidades relativas de 30 e 100%, existe uma certa linearidade na sua variação, mas, entre 5 e 30%, esta linearidade não se verifica e os valores lidos podem ficar comprometidos se o equipamento não for bem calibrado para esta faixa.

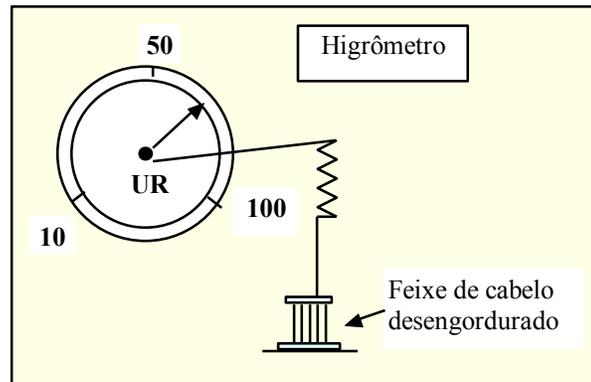


Figura 4 - Princípio de funcionamento de um higrômetro de fio de cabelo.

1.3 Umidade de equilíbrio

Os grãos ou as sementes são produtos higroscópicos, o que significa que ganham ou perdem umidade de acordo com as condições ambientais a que estão submetidos; portanto, o conhecimento das isotermas de umidade de equilíbrio higroscópico de grãos e sementes é de essencial importância, por estarem diretamente ligadas aos problemas de armazenagem e secagem destes produtos.

O teor de umidade de equilíbrio é definido como a quantidade de massa de água que o produto contém quando é submetido a determinada condição controlada de temperatura e umidade do ar. Portanto, para determinadas condições de secagem, dadas pela temperatura e umidade relativa do ar, existe uma umidade de equilíbrio do produto. O diferencial entre a umidade inicial do produto a ser seco e a umidade de equilíbrio ($U_0 - U_e$) é definido como o potencial de secagem. De outra forma, o produto só poderá ser seco até a umidade de equilíbrio para as condições de temperatura e umidade relativa pré-estabelecidas.

A umidade de equilíbrio varia para os diferentes produtos agrícolas e depende também da temperatura. Nas Figuras de 5 a 10 estão as isotermas de arroz, feijão, milho, soja, sorgo e trigo para as temperaturas entre 0 e 50 °C. A Tabela 2 contém as equações de umidade de equilíbrio para diferentes produtos, entre os quais os mostrados nas Figuras de 5 a 10.

Com base nas Figuras de 5 a 10, podem-se determinar as circunstâncias em que um produto ganhará ou perderá umidade. Por exemplo, se o feijão com 13 % b.u. de umidade é exposto a uma temperatura do ar de 25 °C e a uma umidade relativa de 75%, de acordo com a Figura 6, a umidade do feijão se elevará para 15,5 % b.u.. No entanto, para uma condição em que o ar de secagem esteja com 40°C e umidade relativa de 40%, de acordo com a Figura 6, o mesmo feijão perderá umidade para o ar até que o grão alcance umidade de aproximadamente 9,5% b.u.

Tabela 2 - Coeficientes das equações de equilíbrio higroscópico para diversos produtos agrícolas

Produtos	K	D	N	Equações	Fontes
Arroz	$1,9187 \times 10^{-5}$	51,161	2,4451	$U_e = [\text{Ln}(1-UR)/-K.(T+D)]^{1/N}$	ASAE - Standards (1993)
Amendoim	0,22241	20,8355	0,0388	$U_e = K - N. \text{Ln}[R_o.(T'+D). \text{Ln}(UR)]$	KOSOSKI (1977)
Cacau	$4,19419 \times 10^{-5}$	-	2,7296	$U_e = [\text{Ln}(1-UR)/-K.(T)]^{1/N}$	SILVA <i>et alii</i> (1979)
Feijão	$2,0899 \times 10^{-5}$	254,23	1,8812	$U_e = [\text{Ln}(1-UR)/-K.(T+D)]^{1/N}$	ASAE - Standards (1993)
Feijão carioca	0,003944	0,29328	1,7126	$U_e = [\text{Ln}(1-UR)/-K.(T^D)]^{1/N}$	CAVALCANTI MATA (1997)
Feijão preto	0,474988	18,7013	0,01493	$U_e = K - N. \text{Ln}[R_o.(T'+D). \text{Ln}(UR)]$	KOSOSKI (1977)
Milho	$8,6541 \times 10^{-5}$	49,810	1,8634	$U_e = [\text{Ln}(1-UR)/-K.(T+D)]^{1/N}$	ASAE - Standards (1993)
Milho branco	8,00906	0,89499	2,1157	$U_e = [\text{Ln}(1-UR)/-K.(T^D)]^{1/N}$	BRAGA e CAVALCANTI MATA (1992)
Soja	$30,5327 \times 10^{-5}$	143,136	1,2164	$U_e = [\text{Ln}(1-UR)/-K.(T+D)]^{1/N}$	ASAE - Standards (1993)
Sorgo	$0,8532 \times 10^{-5}$	113,725	2,4757	$U_e = [\text{Ln}(1-UR)/-K.(T+D)]^{1/N}$	ASAE - Standards (1993)
Trigo duro	$2,5738 \times 10^{-5}$	70,318	2,2110	$U_e = [\text{Ln}(1-UR)/-K.(T+D)]^{1/N}$	ASAE - Standards (1993)

$R_o =$ constante universal dos gases, $287 \text{ J.Kg.mol}^{-1} . \text{K}^{-1}$

Portanto, o agricultor deverá ter especial atenção com essas curvas, pois o produto, mesmo após a secagem, se colocado em ambientes inadequados, poderá absorver água do meio ambiente, o que poderá causar-lhe danos significativos, após atingir teores de umidade acima de 13,% b.u.

Os valores de umidade de equilíbrio também poderão ser obtidos utilizando-se as equações descritas na Tabela 2 para cada produto especificado. Nas situações descritas anteriormente para o feijão, o cálculo seria:

$$U_e = \left[\frac{\text{Ln}(1-UR)}{-K.(T+D)} \right]^{1/N} = \left[\frac{\text{Ln}(1-0,75)}{-2,0899.10^{-5} . (25+254,23)} \right]^{1/1,8812} = 18,32\% \text{ b.s. ou } 15,48\% \text{ b.u.} \quad (11)$$

Para a temperatura de 40 °C e umidade relativa de 40% o cálculo é:

$$U_e = \left[\frac{\ln(1 - 0,40)}{-2,0899 \cdot 10^{-5} \cdot (40 + 254,23)} \right]^{1,8812} = 10,48\% \text{ b.s. ou } 9,48\% \text{ b.u.} \quad (12)$$

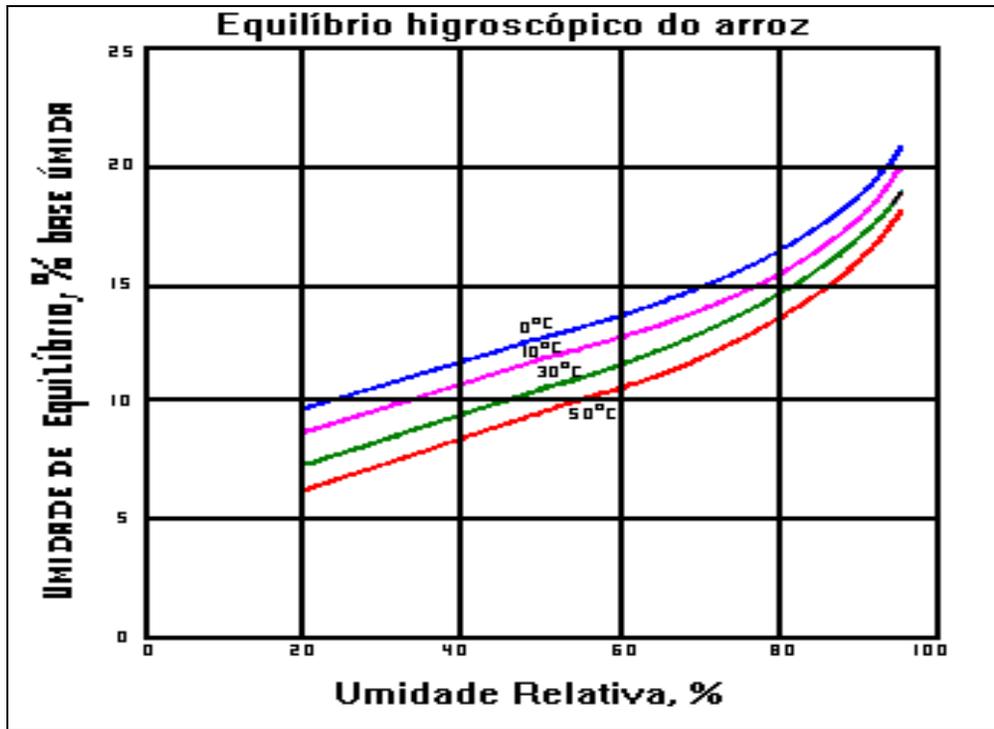


Figura 5 - Umidade de equilíbrio do arroz.

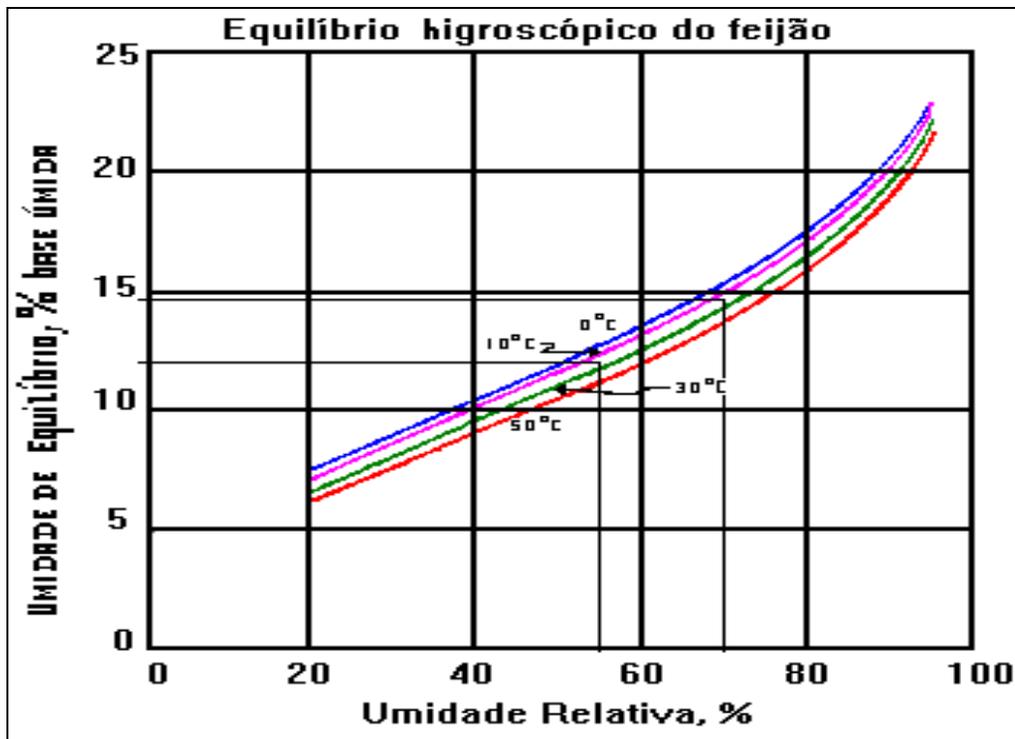


Figura 6 - Umidade de equilíbrio do feijão.

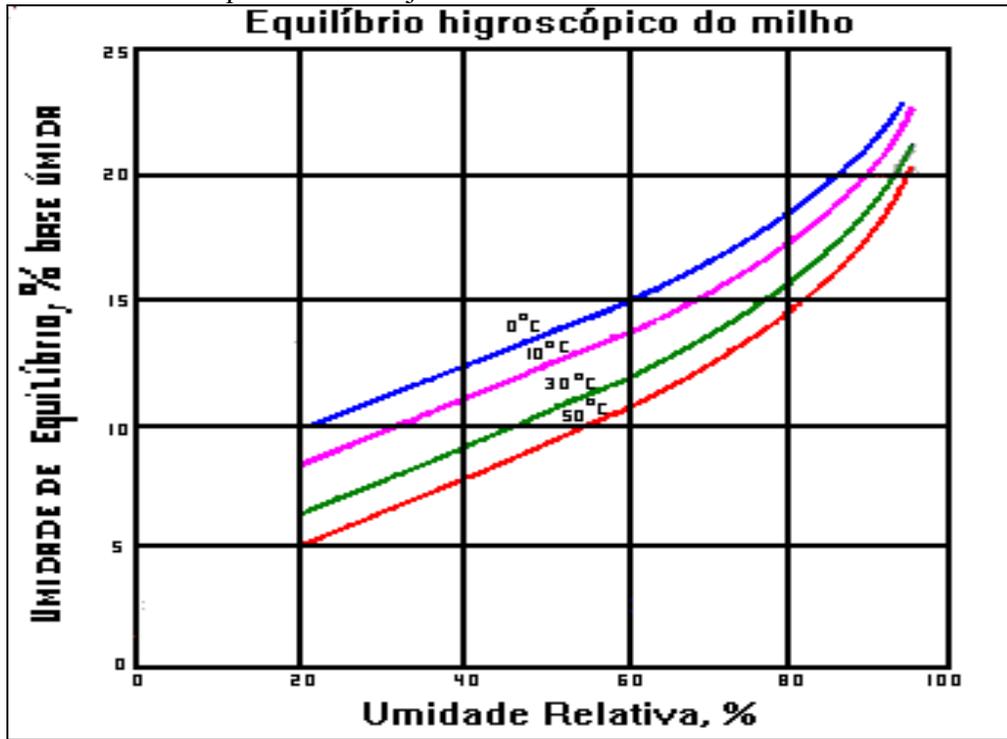


Figura 7 - Umidade de equilíbrio do milho.

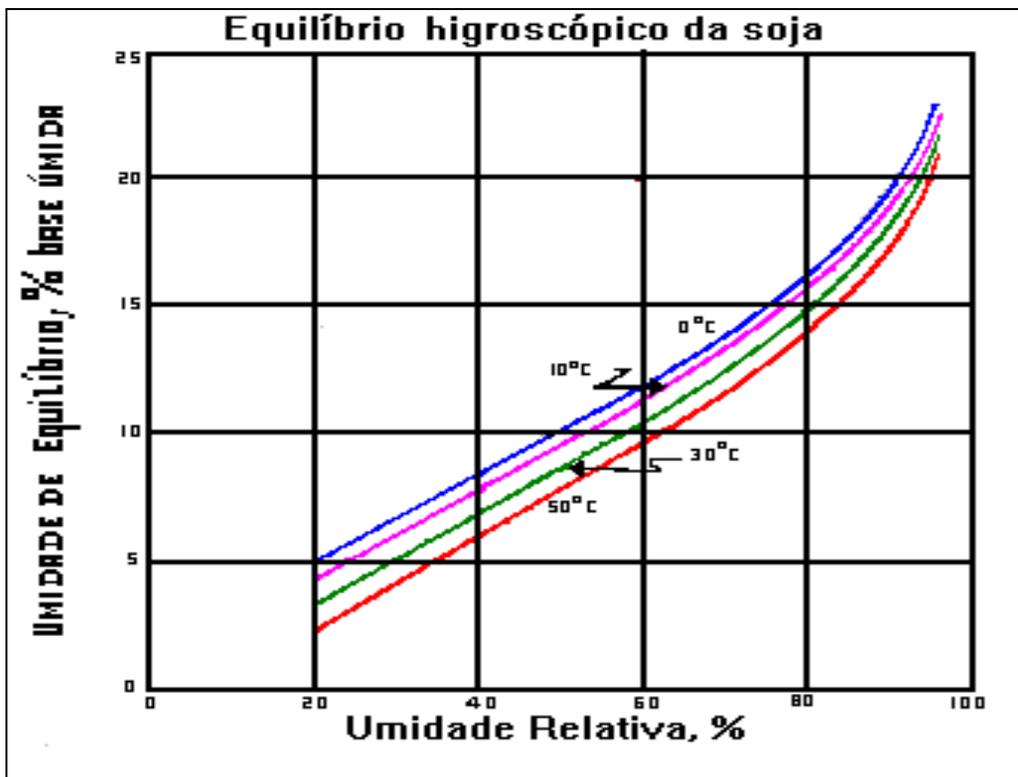


Figura 8 - Umidade de equilíbrio da soja.

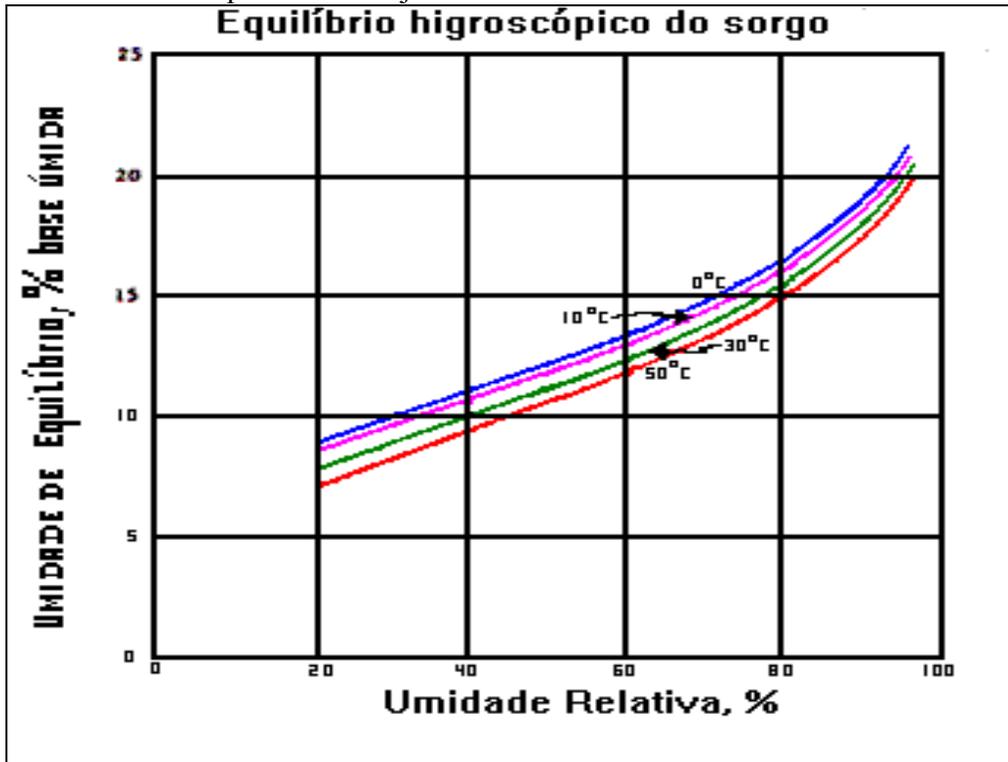


Figura 9 - Umidade de equilíbrio do sorgo.

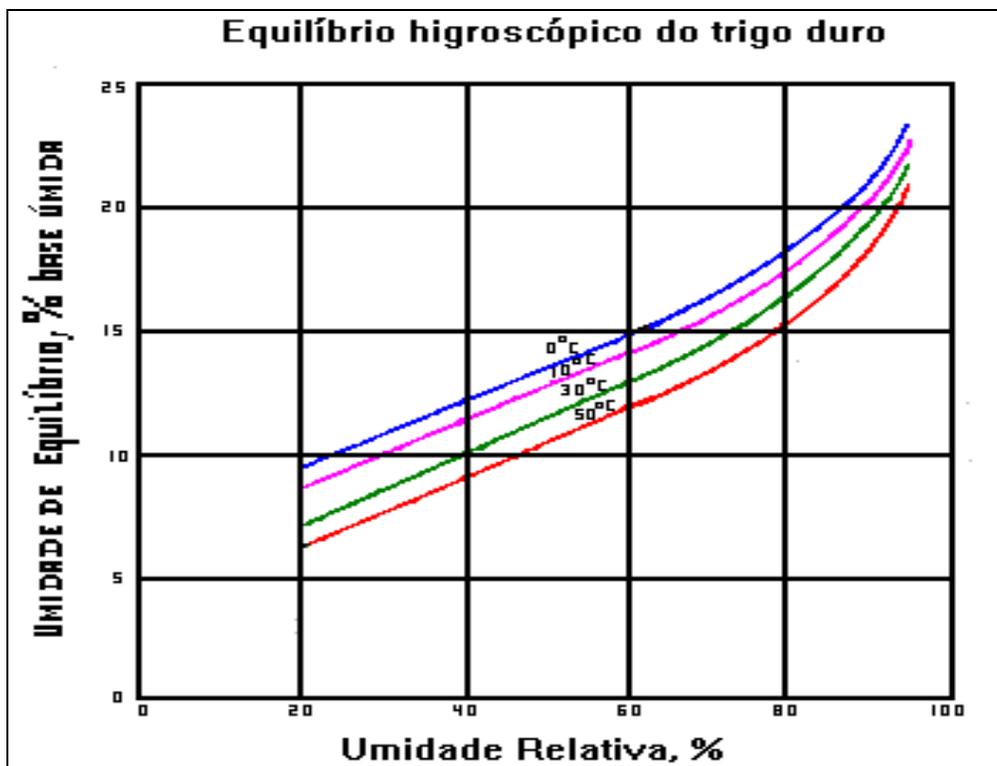


Figura 10 - Umidade de equilíbrio do trigo duro.

1.4 Processo de secagem

Dois processos básicos ocorrem simultaneamente durante o processo de secagem de grãos: a transferência de calor, que é a energia necessária para vaporizar os fluidos do produto a ser seco, e a transferência de massa nas formas de umidade interna e de vapor. A massa é considerada um fluido e; ou, vapor que é retirado na superfície do produto.

Tanto na evaporação da água do produto como na retirada do vapor d'água dos grãos, o ar é usualmente utilizado como meio para transmissão de calor.

Várias teorias têm sido descritas para explicar a secagem de grãos, mas a teoria de pressão de vapor pode ser utilizada para explicar a secagem de produtos agrícolas. De acordo com esta teoria, a pressão do vapor dentro do produto aumenta com o aumento de temperatura. O movimento da umidade ocorre dos pontos de alta para baixa pressão de vapor e é aproximadamente proporcional à diferença entre a pressão de vapor do produto e a pressão de vapor da atmosfera.

A taxa de secagem pode ser acelerada com o aumento de temperatura do ar de secagem e, ou, com aumento da quantidade do ar que passa pelo produto por unidade de tempo.

Quando o ar é forçado a passar entre os grãos, não haverá uma secagem simultânea e uniforme. A parte do grão que entra em contato com o ar em primeiro lugar perde umidade, a qual é ganha pelo ar. Em movimentos posteriores, o ar vai ganhando menos umidade, devido a este ar estar mais úmido por ter ganho umidade do produto, e, conseqüentemente, a sua temperatura diminuirá, já que parte dessa energia foi utilizada para evaporar a água deste produto. Aos poucos o ar fica tão úmido que não pode mais absorver umidade dos grãos, e passa através das camadas subseqüentes dos grãos sem fazer secagem, podendo inclusive haver um umedecimento dos grãos nas camadas superiores de uma secagem. Geralmente são encontradas três zonas durante o processo de secagem (Figura 11).

- 1) Zona seca.
- 2) Zona em processo de secagem.
- 3) Zona úmida.

A zona que está em processo de secagem move-se gradualmente na mesma direção que o ar.

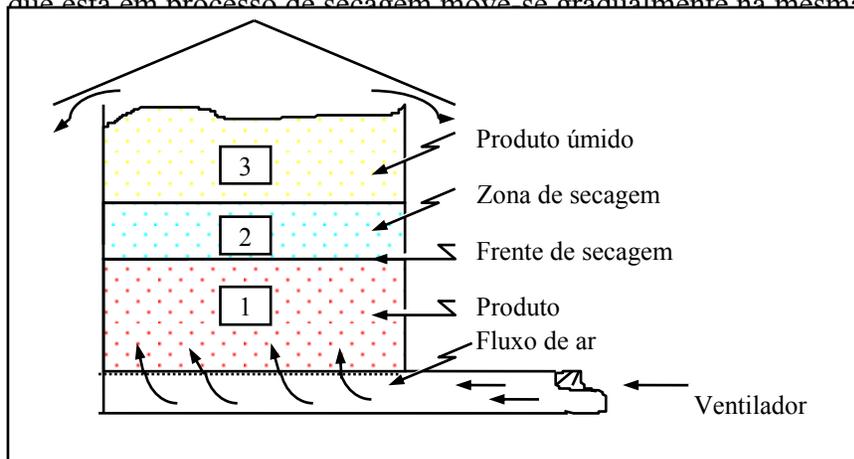


Figura 11 - Processo de secagem de grãos em camada espessa.

A profundidade e a velocidade do movimento da zona de secagem dependem do fluxo de ar, temperatura, taxa de umidificação do ar de secagem e umidade do produto.

A parte dos grãos com a qual o ar seco entrou em contato primeiro naturalmente perderá umidade até entrar em equilíbrio com o ar seco. Mesmo quando o ar não é aquecido, ele pode ser usado para a secagem de grãos, podendo esta ser feita até com teores de umidade abaixo da umidade desejada para armazenagem do produto. Contudo, se o ar é aquecido acima da temperatura de 40 °C, sempre existe o perigo da super secagem das camadas iniciais do secador, e este fato não deve ser negligenciado pelo agricultor. Neste caso, é desejável que a altura da camada do secador não ultrapasse 60 cm. Esse problema de super secagem das camadas inferiores pode ser também controlado com o aumento da velocidade do ar na entrada do secador.

Quando o ar é forçado através da massa de grãos, a evaporação começa nos grãos e a secagem é acompanhada por uma diminuição de temperatura do ar de secagem. Isto acontece porque o calor é requerido para evaporar a água do produto, sendo essa energia retirada do ar de secagem. Enquanto ocorrer a secagem e esta for avançando entre as camadas dos grãos, a temperatura do ar de secagem estará sempre diminuindo. A diferença de temperatura entre a entrada e a saída do ar serve para indicar o grau de secagem que está ocorrendo. Quando a temperatura do ar que sai da camada de grãos aproxima-se da temperatura do ar da entrada, pode-se considerar que a secagem está praticamente concluída. A temperatura do ar de secagem, à medida que se movimenta através dos grãos pode, também ser usada como uma indicação para determinar o progresso da frente de secagem em qualquer estágio.

1.5 Quantidade de ar e pressão estática

A quantidade de ar usada para secagem depende do tipo e da umidade inicial do produto colhido, da profundidade da camada de secagem, da taxa de secagem a ser empregada e das condições do ar de secagem.

Quanto mais rápido o ar é forçado a passar através da massa, maior será a resistência do movimento do ar.

Para conseguir uma determinada velocidade do ar, a resistência ao movimento do ar dependerá do tipo e da umidade do produto colhido. Teoricamente, qualquer taxa de fluxo de ar pode ser usada para qualquer altura da camada de grãos; no entanto, a potência a ser utilizada na prática apresentará limites. No sistema métrico a resistência oferecida ao movimento de ar, isto é, a pressão que deve ser desenvolvida pelo ventilador, é dada em milímetros d'água. Este termo significa a diferença entre as colunas de água de dois tubos na forma de U, medidos em milímetros, quando um dos tubos é conectado na tubulação que leva ar para o plenum, que é a câmara que está por baixo dos grãos, conforme Figura 12.

Quando um ventilador é adquirido com o propósito de secagem, é essencial que não somente a quantidade de ar por minuto seja especificada, mas também a pressão estática que o ventilador deve alcançar. Um ventilador que não possui esses requisitos é indubitavelmente a mais simples e mais comum das causas pela quais o sistema de secagem não funciona devidamente.

A Figura 13 dá detalhes particulares de como a resistência do ar varia com a velocidade do ar para diferentes produtos. Nota-se, por exemplo, que a resistência oferecida por uma camada de trigo à passagem do ar, numa velocidade específica, é três vezes para a mesma camada de milho. Conseqüentemente, se o mesmo ventilador e o mesmo motor forem usados para a secagem de ambos os produtos, considerando-se que a mesma velocidade do ar deverá passar pelos grãos, a camada do trigo que deverá ser colocada no secador será somente um terço da camada de milho.

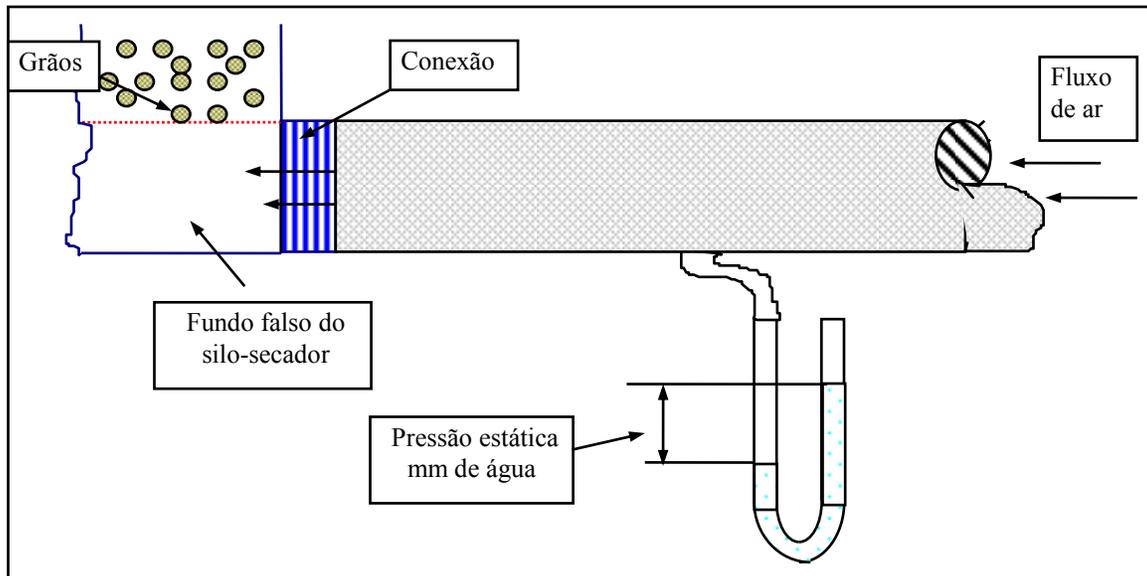


Figura 12 - Sistema de medição da pressão estática exercida por uma camada de grãos.

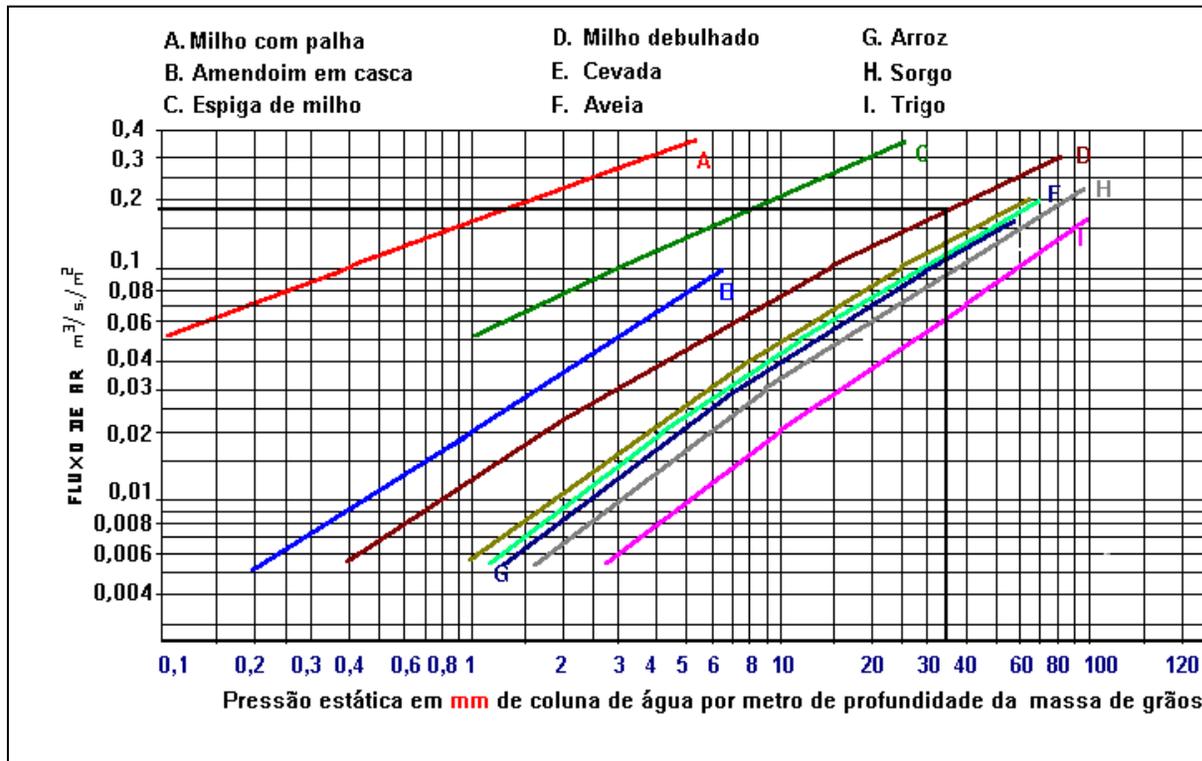


Figura 13 - Resistência dos produtos ao fluxo de ar.

O cálculo da resistência que os grãos oferecem à passagem do fluxo de ar mostrado na Figura 13 é dado pela seguinte equação:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{a.Q^2}{\ln(1 + b.Q)} \tag{13}$$

em que

ΔP = pressão estática, Pa

L = espessura da camada, m

a, b = constantes específicas para cada produto

Q = fluxo de ar, $m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$ de área do secador

Na Tabela 3 estão os valores dos coeficientes **a** e **b** para alguns produtos agrícolas. Observe que os valores obtidos são em Pascal (Pa) e, na Figura 13, os valores estão em mm de água. Para converter de Pascal para mm de água, basta dividir o resultado por 9,8. Para efeito prático, o resultado pode ser dividido por 10.

Tabela 3 - Valores dos coeficiente a e b da equação de resistência dos grãos ao fluxo de ar

Produto	a ($Pa \cdot s^2 \cdot m^{-3}$)	b ($m^2 \cdot s \cdot m^{-3}$)	Intervalo de Q ($m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$)
Arroz em casca	$2,57 \times 10^4$	13,2	0,0056 - 0,152

Amendoim	$3,80 \times 10^3$	111,0	0,030 - 0,304
Milho debulhado	$2,07 \times 10^4$	30,4	0,0056 - 0,304
Milho debulhado (baixo fluxo)	$2,07 \times 10^4$	30,4	0,00025 - 0,0203
Espiga de milho	$1,04 \times 10^4$	325,0	0,051 - 0,353
Sorgo	$2,12 \times 10^4$	8,06	0,0056 - 0,203
Soja	$1,02 \times 10^4$	16,0	0,0056 - 0,304
Trigo	$2,70 \times 10^4$	8,77	0,0056 - 0,203
Trigo (baixo fluxo)	$8,41 \times 10^3$	2,72	0,00025 - 0,0203

Fonte: ASAE - Standards (1993).

Se se quiser saber através da equação qual a resistência do milho debulhado para um fluxo de ar de $0,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ e uma espessura da camada de secagem de 0,5 metro, faz-se o seguinte cálculo:

$$\frac{\Delta P}{0,5} = \frac{2,07 \times 10^4 \cdot (0,3)^2}{\ln(1 + 30,4 \cdot (0,3))} = 805 \text{ Pa / metro de profundidade da massa de milho,}$$

(14)

Portanto, para uma camada de grãos de 0,5 m ter-se-á:

$$\Delta P = 0,5 \cdot (805) = 402,5 \text{ Pa ou } 40,25 \text{ mm de H}_2\text{O} \quad (15)$$

Os valores da Figura 13 são para o produto sem compactação, limpo e seco. Para o produto limpo, sem compactação e com alto teor de umidade, usa-se 80% da pressão estática encontrada.

No caso de se usar essa tabela 3 para determinar a resistência dos grãos ao fluxo de ar para um silo, há que levar-se em consideração o fator compactação; nesse procedimento os grãos podem oferecer uma resistência 50% maior do que a determinada. Outro fator a ser considerado é a limpeza do produto, pois, se este tiver impurezas menores que o tamanho do produto, estas se localizarão nos espaços intergranulares, oferecendo uma resistência adicional à passagem do fluxo de ar pelos grãos. Até o momento não existem trabalhos que possam recomendar um valor adicional em função do percentual de impurezas, pois essas partículas, quando incorporadas ao produto, apresentam tamanhos variáveis, não existindo uma frequência dessa incidência.

2. SISTEMAS DE SECAGEM

2.1 Princípios de secagem

A secagem de um produto, como grãos e sementes, é um processo simultâneo de transferência de calor e massa utilizado para evitar o desenvolvimento de fungos, microrganismos e insetos, que normalmente são as causas da deterioração desses produtos (Brooker *et alii*, 1974).

O calor é requerido para evaporar a umidade durante a secagem do produto. A água evaporada na superfície externa do produto é removida e transferida para o meio de secagem, que é normalmente o ar.

Diversos produtos biológicos, quando estão sendo secos individualmente ou em camada delgada, apresentam perda de umidade a uma taxa constante durante o período inicial de secagem, seguida por um período de secagem a uma taxa decrescente.

a) Período de secagem a taxa constante

A secagem a taxa constante pode ser observada nos produtos nos quais a resistência interna ao transporte de umidade é muito menor do que a resistência externa à remoção do vapor de água na superfície do produto para o meio ambiente. De acordo com Sabbah (1968), o período de secagem a taxa constante é considerado como aquele em que a umidade das sementes é suficiente para manter a água na superfície do produto, de maneira similar a uma área de água livre, constantemente exposta às mesmas condições do ambiente.

Segundo Hall (1971), o período de secagem à taxa constante de produtos agrícolas depende dos seguintes fatores: (1) área exposta; (2) temperatura do ar; (3) diferença entre a umidade do ar e a da superfície do produto; (4) coeficiente de transferência de massa; e (5) velocidade do ar de secagem.

As secagens de produtos agrícolas como grãos e sementes, geralmente, não ocorre, no período de secagem à taxa constante, a menos que eles sejam colhidos em um estágio muito imaturo ou que tenha havido condensação de umidade ou chovido sobre eles. Entretanto, muitos outros produtos biológicos, como batatas e beterrabas, apresentam comportamento de secagem com taxa constante quando são desidratados sob condições ambientes constantes. O comportamento de secagem de um produto biológico é mostrado na Figura 13.

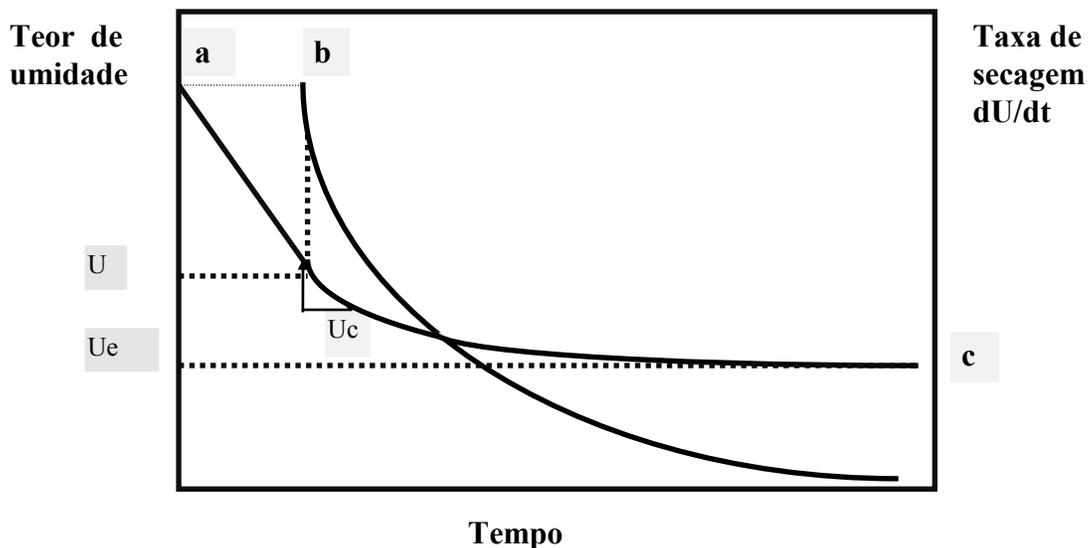


Figura 13 - Comportamento da secagem de um produto biológico (ab = período de secagem a taxa constante, bc = período de secagem a taxa decrescente).

b) Período de secagem a taxa decrescente

Durante o período de secagem à taxa decrescente, a superfície do produto não se encontra coberta por uma camada fina de água, como no caso anterior, porque a resistência interna ao transporte de água se torna maior do que a resistência externa. À medida que o teor de umidade vai decrescendo abaixo do teor de umidade crítico, o potencial motriz do processo de secagem ($P_{vs} - P_v$) decresce junto com a taxa de secagem. Aparece também um gradiente de umidade no interior do produto e sua temperatura se eleva acima da temperatura de bulbo úmido.

O ideal para manter a qualidade do produto seria que, após atingir seu ponto de maturação fisiológica, os processos de colheita, debulha e secagem fossem feitos sequencialmente; no entanto, tanto para a colheita quanto para a debulha existe um teor de umidade ideal no qual o produto não sofre injúrias mecânicas nestes processos; assim, o produto é colhido e debulhado com teores de umidade abaixo do ponto de maturação fisiológica. Portanto, a maioria dos grãos e sementes, quando vão para as unidades de secagem, apresentam teores de umidade em torno de 17 a 30 % base úmida. Dessa forma, geralmente, a secagem só é feita no período de taxa decrescente.

Curvas típicas da secagem de grãos e sementes são mostradas na Figura 14.

A previsão da taxa de secagem de um produto biológico durante o período de secagem à taxa decrescente é mais complexa do que durante taxa constante. Neste caso, não somente devem ser considerados os mecanismos de transferências externas (transferência de calor e massa por convecção), como também o mecanismo de transferência no interior do produto (difusão de calor e massa).

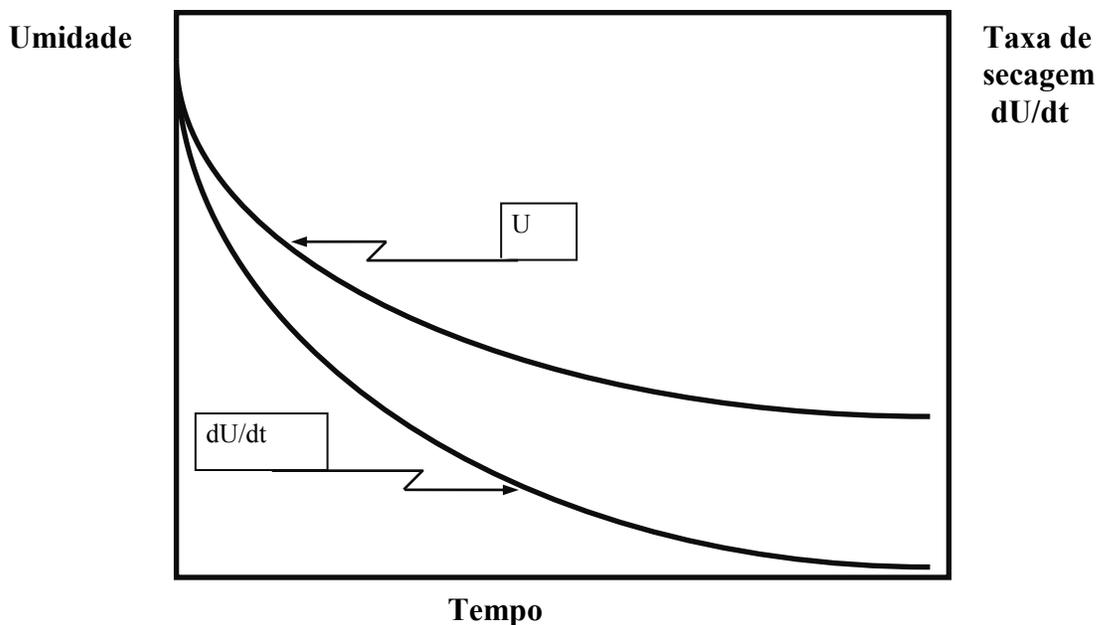


Figura 14 - Curvas típicas de secagem de grãos e sementes.

2.2 *Secagem com ventilação natural*

Secagem na planta

A secagem natural é entendida como aquela em que o ar que promove a secagem do produto provém da ação dos ventos e a energia utilizada nesta secagem emana da incidência direta da energia solar.

Esta secagem é a mais utilizada em países subdesenvolvidos ou em vias de desenvolvimento devido a pouca tecnologia a ser empregada e ao baixo custo para sua realização, além do fato de que nestes países, em determinados períodos do ano, as condições climáticas favorecem a secagem natural. No entanto, se se pensar, na eficiência do uso do solo, na incidência de pragas e na qualidade do produto, este procedimento de secagem é, sem dúvida alguma, o que mais compromete o produto.

O procedimento de secagem de milho na planta consiste em fazer a quebra da planta após os grãos terem atingido o ponto de maturação fisiológica para interromper o vínculo dos grãos com a planta-mãe. Este procedimento permite acelerar o processo de secagem, mas depende exclusivamente das condições ambientais.

Para outros produtos a secagem na própria planta é feita de forma que os grãos ou sementes fiquem na planta até atingir o teor de umidade desejado para a armazenagem. Este fato pode levar de 15 a 45 dias, o que permite o ataque de insetos, pássaros, roedores e a contaminação por microrganismos.

A secagem na própria planta é caracterizada pela demora do processo de secagem e só deve ser realizada em caráter excepcional onde as condições climáticas permitam a secagem e não haja condições para o desenvolvimento de microrganismos. Estas condições ideais são a baixas temperaturas (< de 20 °C) e umidades relativas do ar (< de 40%).

Como as condições anteriormente descritas dificilmente ocorrem no nosso país no período de colheita, os agricultores têm experimentado perdas significativas, o que tem permitido fazer com que eles reflitam sobre o emprego de novas e melhores tecnologias.

Secagem em terreiro

A secagem em terreiro consiste em fazer com que o produto seja distribuído em um piso, que pode ser de concreto, alvenaria ou terra batida, sendo a espessura da camada do produto não superior a 0,10 m.

Este processo de secagem é um pouco superior ao da secagem na planta, pois pode-se diminuir a incidência de pragas e microrganismo; contudo, esta secagem fica ainda sujeita as condições climáticas ambientais, sendo seu tempo de secagem inferior ao da secagem na planta, tendo em vista que a incidência energética nos grãos e sementes é direcionada para o produto, evitando as sombras e a diminuição de energia provocada pela planta-mãe.

Na secagem em terreiro, a camada que está sendo seca fica sujeita a revolvimentos periódicos, uma vez que neste processo de secagem as trocas de energia se dão na superfície da camada do produto. Nesta secagem não só a temperatura do ar e a umidade relativa do ar são importantes, como também a velocidade e a direção dos ventos contribuem para acelerar ou retardar o processo de secagem.

Em muitos produtos, como café, em que a secagem em terreiro é uma tradição cultural, tem-se observado que a espessura da camada é também um elemento contributivo para que a secagem possa ocorrer com sucesso, pois espessuras acima de 0,03 a 0,05m (depende das condições climáticas) contribuem para o desenvolvimento de fungos na massa de grãos, uma vez que a secagem do café ocorre quando este produto tem um teor de umidade inicial de 70 a 60 % base úmida (b.u.).

Um cálculo aproximado para dimensionamento da área necessária para a secagem em terreiros pode ser dado pela seguinte fórmula:

$$A = \frac{V \cdot t}{n \cdot (\text{esp})} \quad \text{e} \quad V = \frac{M}{\rho} \quad (16)$$

em que

A = área do terreiro, m

V = volume de produção, m³

t = tempo de secagem de cada lote, h

n = número de colheitas a serem feitas na área plantada

esp = espessura da camada de secagem, m

ρ = massa específica, kg.m⁻³

Secagem em barçaça

A secagem em barçaça não deixa de ser um aprimoramento do processo de secagem em terreiro. Este processo foi desenvolvido na Bahia e surgiu pela necessidade de evitar que o cacau já parcialmente seco recebesse chuva e voltasse a ficar umedecido. O motivo do desenvolvimento da barçaça está no fato de que na região produtora de cacau, no período de secagem, o clima se alterna muito durante o dia, entre períodos de sol, nublado e chuva, necessitando, portanto, que o produto seja protegido da chuva muito rapidamente.

A secagem em barçaça consiste em expor uma camada de amêndoas de cacau de espessura de 0,08 a 0,15m à energia solar direta em tablados de madeira, ou em lajes de cimento, removendo-se essa massa de tempo em tempo.

O tablado, em duas de suas extremidades laterais, contém trilhos onde corre uma cobertura (Figura 15), para proteger as amêndoas de cacau do umedecimento, durante o período em que dura a chuva. Esta chuva na região tem característica peculiar e é de curta duração seguindo-se de um sol intenso, até a formação de novas nuvens.

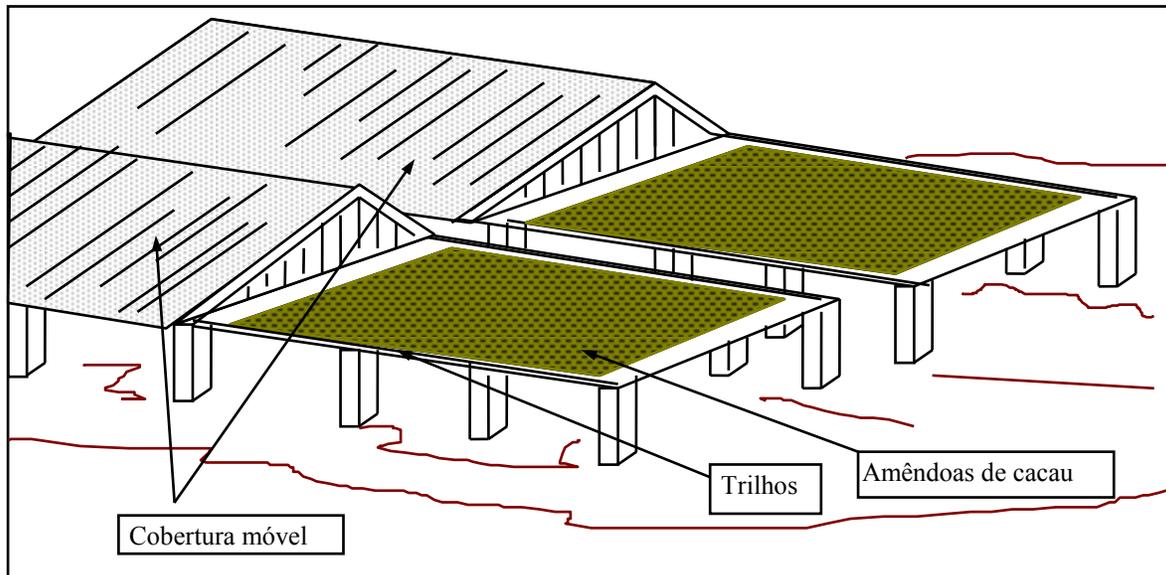


Figura 15 - Secagem de cacau em barcaça

Secagem em painel solar rotativo

O painel solar rotativo é uma melhoria do sistema de secagem em terreiro, uma vez que o material a ser seco fica isento da contaminação de microrganismos do solo, do ataque de roedores e de pássaros. Este secador é constituído de madeira no formato de uma caixa retangular de 1,2 m de largura por 1,2 m de altura e 0,17 m de espessura, sendo a frente e o fundo do secador de tela de arame de uma malha de 4 por 4 mm, conforme mostrado na Figura 16. A estrutura de madeira é dividida por uma barra também de madeira, fazendo com que o painel tenha dois compartimentos, cada um com uma capacidade aproximada de 60 kg de produto. No sentido transversal à espessura do secador passa um eixo de ferro galvanizado de $\frac{3}{4}$ de polegada (19,05 mm) onde estão acoplados três rolamentos (dois nas extremidades e um no sistema central), de modo a dar facilidade operacional ao secador, aliviando o peso de rotação. O eixo de ferro galvanizado, além de permitir a orientação do painel de modo que receba a energia solar no sentido perpendicular, permite também o revolvimento do produto durante a secagem, com a finalidade de homogeneizar a secagem e eliminar impurezas inferiores à malha da tela. É importante frisar que isso só é possível de ser feito pela introdução dos rolamentos no eixo de rotação, permitindo uma diminuição considerável do esforço rotacional do painel.

A inovação tecnológica neste tipo de secador está em se aproveitar melhor a energia solar incidente, já que se pode girar o sistema de tempo em tempo (Figura 17), para que sempre receba a energia solar no sentido perpendicular ao painel. Contudo, é importante ressaltar que a direção do vento não pode ser desconsiderada, e o ideal seria que este vento estivesse no sentido transversal ao painel. No entanto isso nem sempre é possível, uma vez que o eixo do secador deve ser orientado na direção Norte-Sul, para que este possa acompanhar o movimento do sol e ficar, com auxílio da rotação do painel, no sentido perpendicular à energia incidente.

A grande desvantagem do uso deste sistema de secagem continua sendo ainda a dependência das condições climáticas para sua viabilização.

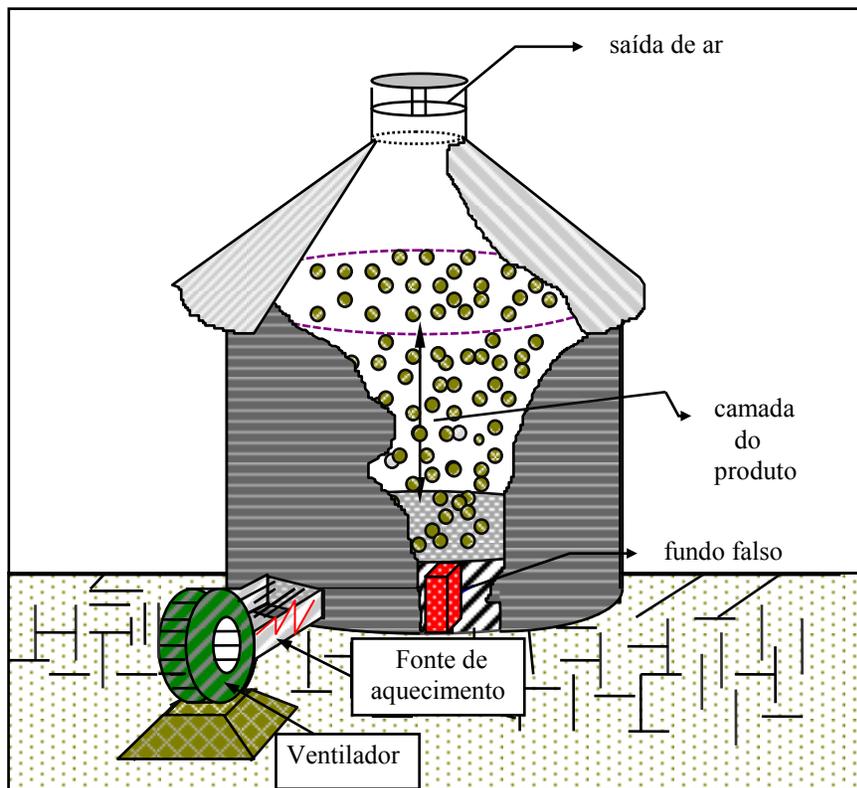


Figura 16 - Painel solar rotativo

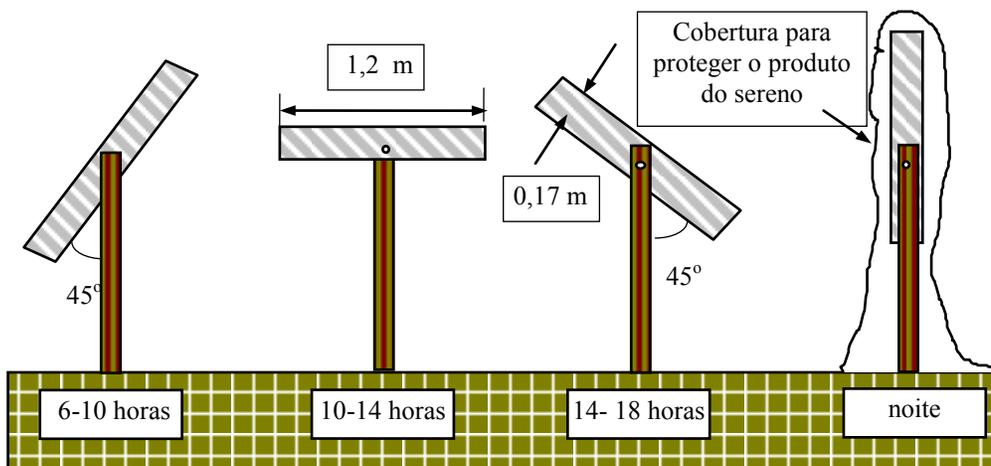


Figura 17 - Posicionamento dos painéis rotativos suspensos durante o dia

2.3 Secagem com ventilação forçada

Na utilização de qualquer sistema de secagem natural (secagem na planta, terreiro, barça ou painel solar rotativo), por mais que se melhore tecnologicamente, este sempre estará sujeito às condições climáticas favoráveis para sua viabilização. Portanto, a secagem nestes casos é incerta e pode, quando não houver outro meio de secagem na fazenda, provocar prejuízos significativos ao agricultor.

Como solução para este problema emprega-se a secagem com ventilação forçada, ou seja, uma certa quantidade de ar em condições de realizar secagem é forçada a passar pela massa de grãos ou sementes, utilizando para isso um ventilador acionado por um motor (Figura 18).

Figura 18 - Secagem em silo-secador de camada estacionária

Nesse contexto a secagem com ventilação de ar forçada utilizando a energia do ar ou aquela em que se adiciona energia suplementar a este ar têm sido os dois métodos mais empregados atualmente, tanto em países desenvolvidos como em países em desenvolvimento, onde não se admite tanto esforço de produção com perdas significativas durante o período de pós-colheita por falta de opção tecnológica.

No sistema de produção, os grãos e as sementes atingem seu máximo de qualidade fisiológica quando estão com o máximo de peso seco. A rigor, neste instante, o produto deveria ser colhido e percorrer todos os caminhos dos processos de pós-colheita. No entanto, no máximo de maturação fisiológica, o produto, segundo Popinigis (1977) e Toledo e Marcos Filho (1977), tem um teor de umidade em torno de 35 a 40% base úmida, que não condiz com a rigidez mecânica empregada pelas máquinas colheitadeiras, nem tampouco com o processo de desgrana do material; conseqüentemente este teor de umidade é impróprio para seu beneficiamento e sua armazenagem. Dessa forma, o produto é deixado no campo até que o teor de umidade seja o adequado para a colheita (25-20% b.u. para milho) e debulha (18-20% b.u.).

Na prática, o processo anteriormente descrito é aquele que a grande maioria das fazendas de nosso país adota, mesmo quando estas dispõem de tecnologia e têm, nelas próprias uma unidade de secagem. Na realidade, o que se faz é a prática de uma combinação de secagem na planta com secagem mecânica. O processo ideal, quando se quer obter um produto de qualida-

de, seria colher o material após a maturação fisiológica, fazer uma pré-secagem deste material até o teor de umidade ideal de debulha ou desgrana e, em seguida, realizar a secagem do produto.

Se se analisar o processo considerado ideal para obter produtos de qualidade e o que é atualmente realizado, parece-nos que apenas uma etapa da linha de processos não é realizada, a da pré-secagem; portanto, é preciso estar atento para esse fato, se se quiser avançar futuramente na qualidade de nossos produtos.

Secagem com ar natural

Dos processos de secagem com ventilação forçada, a secagem utilizando o ar natural é a mais barata; no entanto, é a mais demorada, levando de um a três semanas para sua realização.

Este processo é totalmente dependente dos fatores do meio ambiente, como umidade e temperatura do ar ambiente, por isso devem ser observado os potenciais de secagem de cada região durante o período de colheita e secagem do produto. Mesmo quando o potencial de secagem não é o adequado em termos de médias diárias de temperatura e umidade relativa do ar ambiente, podem-se usar alguns artifícios de modo a promover a secagem de um produto. Estes artifícios são: a) secar durante as horas mais quentes do dia, como das 9 da manhã às 5 da tarde, em que a umidade relativa do ar é mais baixa e b) utilizar o aquecimento gerado pelo atrito do motor e ventilador.

Este segundo artifício pode fornecer um aumento de temperatura ao ar ambiente de 1 a 3°C, que em muitos casos é a energia necessária para secar o produto até o teor de umidade ideal de armazenagem. Neste caso, mais uma vez é importante o conhecimento das curvas de umidade de equilíbrio higroscópico do produto. A seguir é exemplificada esta importância.

Suponha que se queira secar feijão em um silo-secador (Figura 18) onde as condições ambientais sejam de uma temperatura de 20 °C e a umidade relativa de 70%. Pela Figura 6, o teor de umidade de equilíbrio do feijão será de aproximadamente 14,5% base úmida. No entanto, se este ar for aquecido de 3 °C, proveniente do atrito do motor e do ventilador, segundo a Figura 2, ele passará a ter uma umidade relativa de 57%. Nestas novas condições, a umidade de equilíbrio do feijão será de aproximadamente 12 % base úmida, que é um teor de umidade ideal para a armazenagem de feijão.

Portanto, as condições atmosféricas do ar de secagem devem ser cuidadosamente observadas e correlacionadas com o teor de umidade de equilíbrio do produto que está sendo seco. Se esta precaução não for usada, ocorrerá pouca secagem ou, então, umedecimento dos grãos. É da maior importância, por conseguinte, que os dados das Figuras de 5 a 10 sejam levados cuidadosamente em consideração com este método de secagem.

Alguns agricultores já têm optado pela secagem a baixas temperaturas em razão da qualidade final do produto. Neste tipo secagem, devido ao fato de a perda de umidade ser lenta e o produto não sofrer choques térmicos, é reduzida a ocorrência de tensões internas de grãos e sementes e o seu resultado pode ser melhor do que os obtidos em secadores que utilizam temperaturas elevadas.

Uma das maiores limitações da secagem a baixas temperaturas em silos-secadores reside no fato de que, nas camadas superiores do silo, o produto não pode permanecer determina-

do tempo com um teor de umidade inicial alto, conforme mostrado na Figura 11, pois, neste caso, sua deterioração é acelerada e a qualidade do produto diminuída substancialmente. Assim, este procedimento requer muita perícia e bom senso do agricultor. Em razão disso, a secagem a baixas temperaturas tem sido mais empregada na secagem de grãos do que na de sementes.

Secagem com ar aquecido

a) Secagem a baixas temperaturas

A secagem a baixas temperaturas é definida, neste capítulo, como sendo a secagem realizada com valores de temperatura entre 1°C acima do ar ambiente e 40°C , sendo necessário para este fim, o uso de uma fonte de calor.

Portanto, a secagem a baixas temperaturas utilizando ar aquecido consiste em fazer com que o ar ambiente seja aquecido através de uma fonte de calor (fornalha), de modo a fazer com que o ar saia da condição de estado 1, no gráfico psicrométrico, e vá para uma condição de estado 2, como mostrado na Figura 19, criando o ar, desta forma, capacidade de secagem. Como se pode observar nesta figura, o aquecimento serve para que o ar se expanda diminuindo a sua umidade relativa e criando capacidade para absorver água dos grãos ou das sementes.

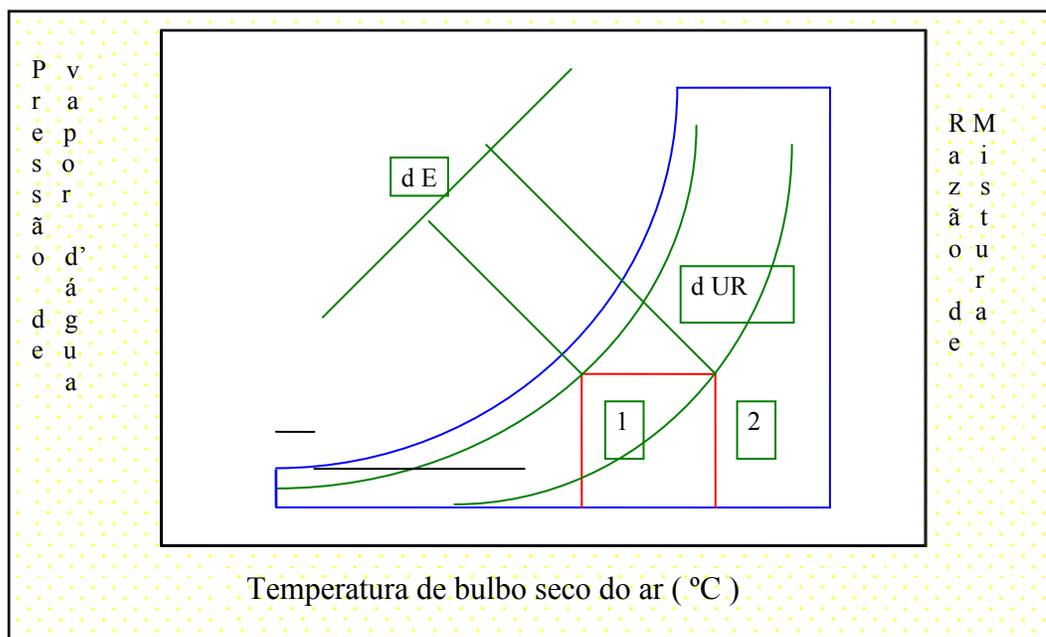
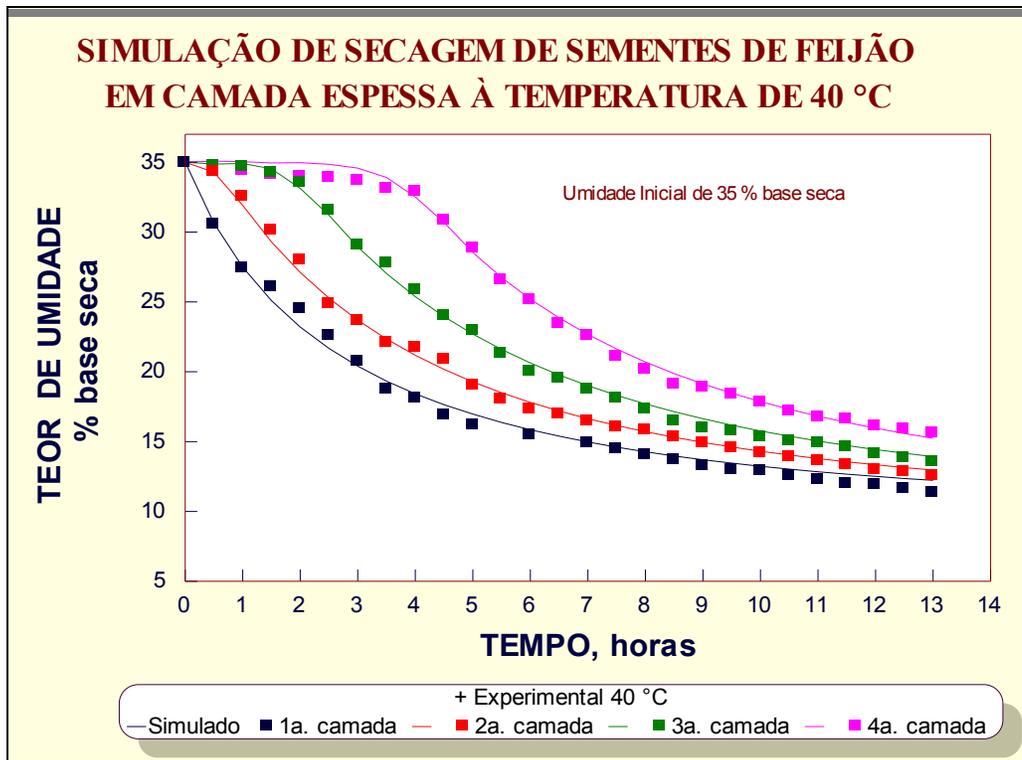


Figura 19 - Gráfico psicrométrico mostrando o processo de aquecimento do ar ambiente.

Quando a secagem é realizada em um silo-secador, o comportamento dela é equivalente ao da secagem de múltiplas camadas finas, e o sucesso da operação de secagem reside em fazer com que a frente de secagem chegue às últimas camadas do produto num tempo inferior ao tempo crítico de deterioração. Na Figura 20 está uma exemplificação de uma secagem de sementes de feijão em secador de camada estacionária, para altura da camada de secagem de 50 cm, teor de umidade inicial do produto de 35 % base seca e velocidade do ar de secagem de $0,5 \text{ m.s}^{-1}$. Observa-se nesta figura que as sementes de feijão ficam sem secar na camada superior por aproximadamente quatro horas. Este fato, para sementes, pode acarretar a diminuição

da sua qualidade fisiológica, embora possa não comprometer determinados padrões para venda do produto no mercado; mas, com certeza, a semente será de qualidade inferior à que foi seca sem que houvesse este tempo de deterioração nas camadas superiores.



Fonte: Cavalcanti Mata (1996)

Figura 20 - Dados experimentais e simulados da secagem em camada espessa das sementes de feijão, para temperatura de 40 °C e teor de umidade inicial de 35% b.s.

A secagem é função do gradiente de pressão dos vapores entre a superfície do produto e o ar que o circunda. Assim, quanto mais úmida a superfície do produto e mais seco o ar com o qual está em contato, mais rápido é o movimento da umidade da superfície do produto para o ar. Segundo Toledo e Marcos Filho (1977), o emprego de ar aquecido também auxilia a secagem, porque o aquecimento estimula a difusão de umidade do interior para a superfície do produto e provoca aumento da pressão de vapor, estimulando a evaporação. O emprego de ar seco é muito útil, principalmente quando o produto é submetido à secagem até atingir teores de umidade muito baixos, portanto, para que o ar em contato com o produto retire umidade do mesmo, deve ser aquecido ou apresentar baixa umidade relativa, caso contrário o processo de secagem não tem continuidade.

Para alguns produtos, quando a secagem é rápida existe um encolhimento do tegumento provocando um endurecimento deste, tornando a casca impermeável à umidade. Como consequência deste fenômeno, a secagem é interrompida. Outra possibilidade de ocorrência da secagem rápida é o trincamento do tegumento, causando a exposição da parte interior das sementes ao ambiente, permitindo a entrada de microrganismos patogênicos e alterando seu aspecto e odor.

b) Secagem a altas temperaturas

A secagem a altas temperaturas é considerada o processo mais seguro e mais rápido de remover parte da umidade indesejável do produto.

O entendimento do termo secagem a alta temperatura depende muito do material a que se destina, por exemplo: se se está secando sementes de milho, a secagem realizada acima de 45 °C é tida como uma secagem a alta temperatura, pois acima deste valor a qualidade fisiológica das sementes é afetada. Se o milho é destinado ao consumo, a temperatura acima de 60°C é considerada alta, no entanto, se o milho é destinado à indústria de processos, onde são utilizadas temperaturas de 120 °C, só a temperatura acima de 80 °C é considerada alta.

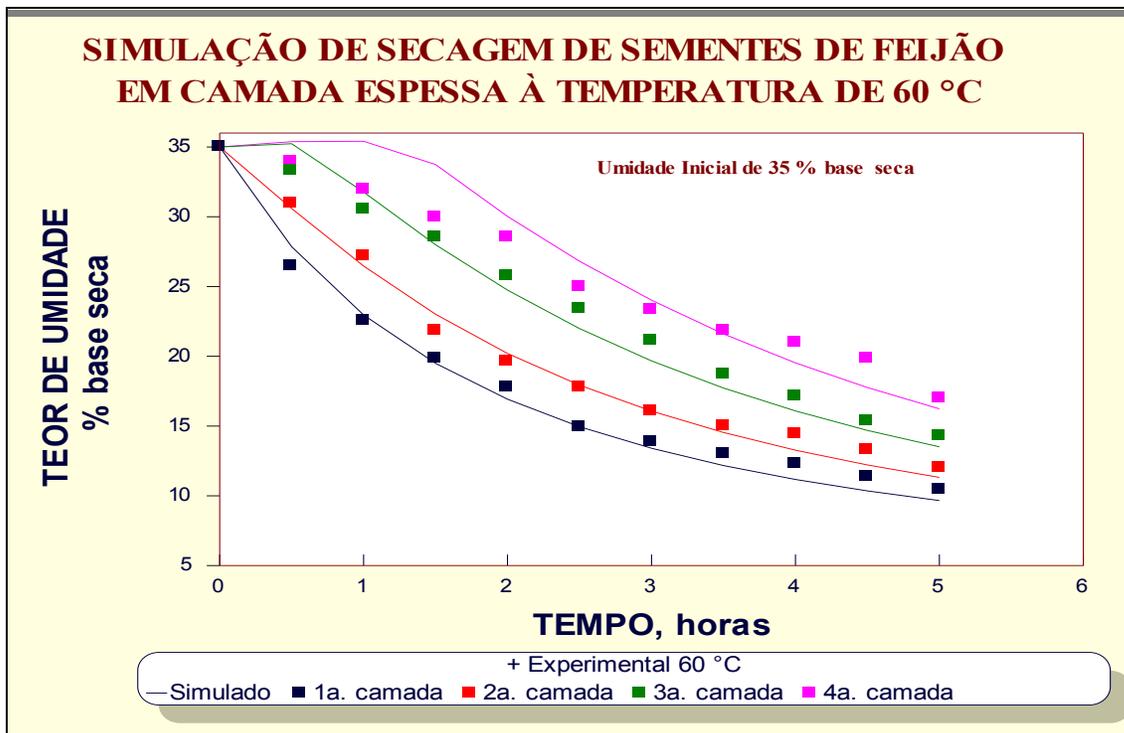
Neste processo de secagem, devido ao aumento de temperatura, a massa de ar tem um maior potencial de retenção de água e, conseqüentemente, maior potencial de secagem. Portanto, uma especial atenção deve ser dada ao risco da supersecagem nas camadas iniciais do secador. Na secagem a altas temperaturas, geralmente as camadas são menores que 0,30 a 0,60 m e as velocidades do ar variam de 0,2 a 1,2 m.s⁻¹.

Outro fator a ser considerado na secagem a alta temperatura é que, logo após o término da secagem, o produto fica quente não podendo ser armazenado a esta temperatura, necessitando, assim, de revolvimento da sua massa, para sua equalização, e de posterior resfriamento, até que sua temperatura esteja próxima à temperatura ambiente.

Esse tipo de secador usualmente tem alto rendimento e é especialmente conveniente para o grande produtor, que deve secar uma quantidade mínima de grãos a cada dia.

Na Figura 21 estão os valores experimentais e simulados de uma secagem de sementes de feijão a uma altura da camada de 0,5 m, a uma velocidade do ar de secagem de 0,5 m.s⁻¹ e a um teor de umidade inicial das sementes de 35 % base seca. Verifica-se neste experimento que, ao ser concluída a secagem com um teor de umidade médio das sementes de 13,5 % base seca, existe na camada superior do secador um teor de umidade de 17 % b.s., que é indesejável para a armazenagem das sementes; no entanto, na camada inferior do secador, as sementes apresentam um teor de umidade de 10 % b.s., caracterizando a supersecagem. Uma das maneiras de resolver este problema é diminuindo a espessura da camada a ser seca ou aumentando o fluxo de ar. Esta é uma das razões pelas quais o fluxo de ar é mais elevado quando os produtos são secos a alta temperatura.

Um dimensionamento adequado de um secador é muito importante para o sucesso do agricultor no processo de secagem. A utilização de programas simples que permitam o agricultor realizar uma série de simulações de secagem até que este encontre as melhores soluções para seu problema específico se constitui numa ferramenta poderosa e deve ser desmistificada como um recurso só utilizável por pessoas bem dotadas.



Fonte: Cavalcanti Mata (1996)

Figura 21 - Dados experimentais e simulados da secagem em camada espessa das sementes de feijão para temperatura de 60 °C e teor de umidade inicial de 35% b.s.

Seca-aeração

O processo de seca-aeração foi empregado inicialmente nas fazendas americanas e no Brasil; poucos são os agricultores que têm empregado este método. O objetivo principal deste processo é secar o produto a alta temperatura por um período curto, de modo a fazer com que a água que está na periferia do produto a ser seco seja eliminada rapidamente. Logo após, o produto é deixado em um silo, para que haja tempo de uma redistribuição de umidade no interior do produto, e, após este tempo, faz-se a secagem complementar usando-se um fluxo de ar baixo conjugado com a energia deixada no produto na primeira fase de secagem (secagem a alta temperatura), pois o produto está levemente aquecido e o ar ambiente utiliza desta energia para promover o restante da secagem do produto. Neste processo de secagem, o gasto com o consumo de energia é menor e a qualidade do produto é maior, pois a sua temperatura não chega a atingir a temperatura do ar de secagem, já que parte desta energia é utilizada para evaporar a água na superfície do produto. Este processo tem sido empregado com sucesso para secagem de milho e soja. No caso do milho, o tempo de secagem a alta temperatura é de 1 hora a 90 °C, e o tempo que o produto permanece no silo é de 4 a 10 horas seguido de uma aeração utilizando o ar ambiente a um fluxo de ar 0,4 a 0,8 metros cúbicos por minuto por metros cúbicos de grãos ($m^3 \cdot min^{-1} \cdot m^{-3}$).

3. TIPOS DE SECADORES

No Brasil, os tipos de secadores empregando os diversos sistemas de ventilação forçada que vêm ganhando preferência entre os agricultores são o de camada estacionária e o de fluxo cruzado, embora existam sistemas de secagem mais eficientes; no entanto, entende-se que a agricultura brasileira necessite passar pelos métodos mais simples para um aprendizado do agricultor. Evidentemente, todos gostariam que nossos agricultores andassem a passos mais largos, mas também é compreensível que estes não se animem muito em investir na agricultura quando se sabe que a política agrícola no nosso país inexistente. Portanto, embora os nossos fabricantes de equipamento disponham no mercado de uma gama razoável de tipos de secadores com tecnologia variável, os custos para os agricultores ainda são caros e poucos animadores. Diante desses fatos, alguns órgãos de pesquisa, como a Universidade Federal de Viçosa - **UFV**, o Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem - **CENTREINAR**, a Universidade Federal da Paraíba - **UFPB**, o Núcleo de Tecnologia em Armazenagem - **NTA** - PB, a Universidade Estadual de Campinas - **UNICAMP** e a Universidade Federal do Mato Grosso - **UFMS**, vêm desenvolvendo unidades de secagem a nível de fazenda a custo mais baixos e ensinando os agricultores a confeccionar seus próprios secadores.

Assim, os secadores descritos a seguir são equipamentos que já foram desenvolvidos nas instituições mencionadas anteriormente e podem servir para que novos agricultores se espelem nestas experiências.

3.1 Secador de camada estacionária

A denominação secador de camada estacionária é dada quando não existe movimentação dos grãos durante a secagem. Existem outros termos dados a este tipo de secagem, como secagem em leito fixo ou secagem em lote. A denominação dos vários tipos de secadores é dada pela variação de como o fluxo de ar é conduzido a passar pelas camadas do produto a ser seco.

Convecção natural

A denominação original deste tipo de secador por convecção natural foi de secador SAMOA, desenvolvido em 1961, na África, para secagem de amendoim; posteriormente, após passar por melhorias, recebeu a denominação de secador tipo BROOK. Na Bahia, ao ser adaptado para secagem de amêndoas de cacau, foi denominado burareiro.

Tipo burareiro

O secador burareiro é um secador desenvolvido pela Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira - **CEPLAC** para secagem do cacau. Basicamente, é um secador que utiliza, abaixo de sua estrutura de tela perfurada, uma fornalha que irradia calor por convecção natural. A espessura da camada do produto não deve ultrapassar 20 cm, pois, como o cacau tem no início da secagem uma mucilagem, a resistência das amêndoas à passagem do ar por convecção natural é bastante grande. No caso específico de secagem do cacau, o revolvimento da camada de tempo em tempo é de fundamental importância para evitar o desenvolvimento de fungos, já que o teor de umidade inicial das amêndoas é de aproximadamente 55 % base úmida.

O grande segredo deste tipo de secador é a distância entre a fornalha e a plataforma perfurada onde estão as amêndoas, a área do trocador de calor em relação à área do secador e

as comportas que permitem a entrada do ar ambiente para a câmara de aquecimento do ar, pois um dimensionamento inadequado provocaria uma distribuição desuniforme de calor e, conseqüentemente uma secagem desuniforme e problemática. Portanto, é conveniente que neste tipo de secador os parâmetros técnicos sejam observados para cada produto (Figura 22).

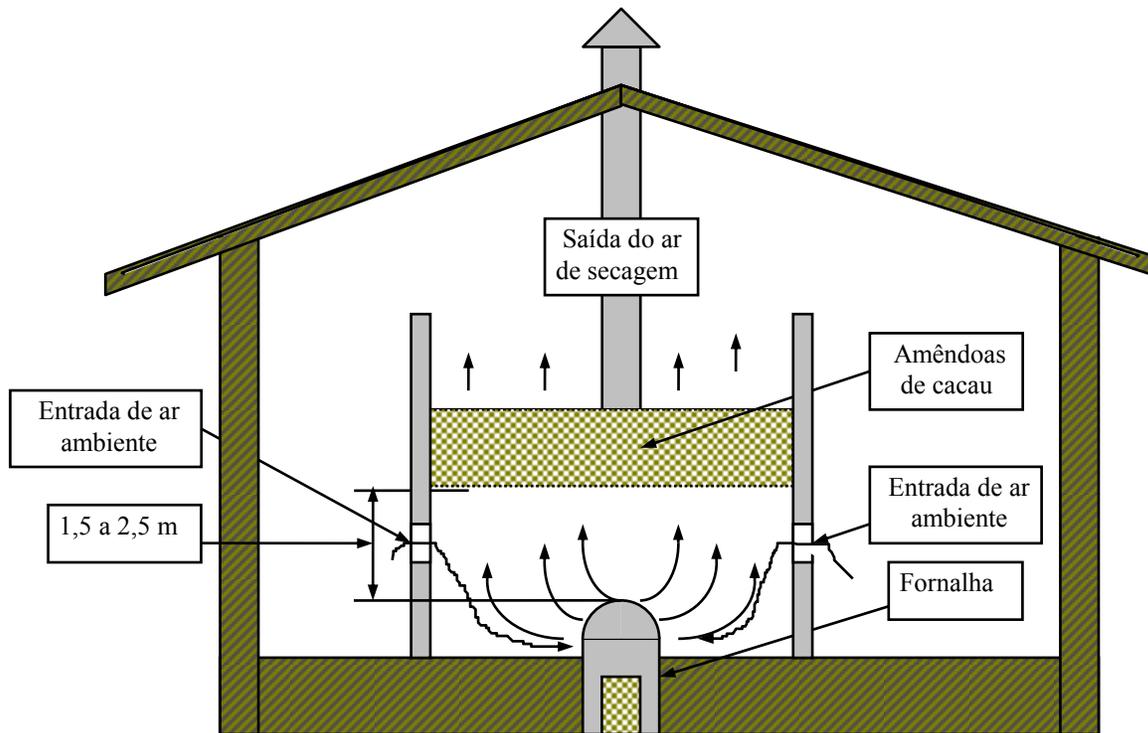


Figura 22 - Secador tipo burareiro

O secador em que o ar se movimenta por convecção natural foi estudado na Universidade Federal de Viçosa, por Bernal (1982); no Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem - CENTREINAR, por Ferreira *et alii* (1985); e no Núcleo de Tecnologia em Armazenagem- NTA-PB, por Cavalcanti Mata (1981) e Aragão *et alii* (1991), onde algumas mudanças foram apresentadas e alguns parâmetros importantes foram determinados.

O secador construído por Bernal (1982) apresenta uma adição de dois trocadores de calor, de modo a dar maior uniformidade de secagem. O autor utilizou, para confecção do trocador de calor principal, tambores de 200 litros de chapa metálica (0,58 m de diâmetro por 0,82 de comprimento), obtidos como resíduo de empresas, e, como trocadores adicionais, usou tambores de 0,26 m de diâmetro por 0,35 m de comprimento, conforme mostra a Figura 23.

Pereira *et alii* (1985) confeccionaram um secador de convecção natural melhorando o desenvolvido por Bernal. Basicamente, a melhoria está na localização da entrada do ar. Na maioria dos secadores a entrada do ar se localiza na parte frontal do secador (ao lado do queimador), e, neste secador, a entrada de ar localiza-se na parte lateral inferior do secador, ficando abaixo do nível inferior dos trocadores, como mostra a Figura 24.

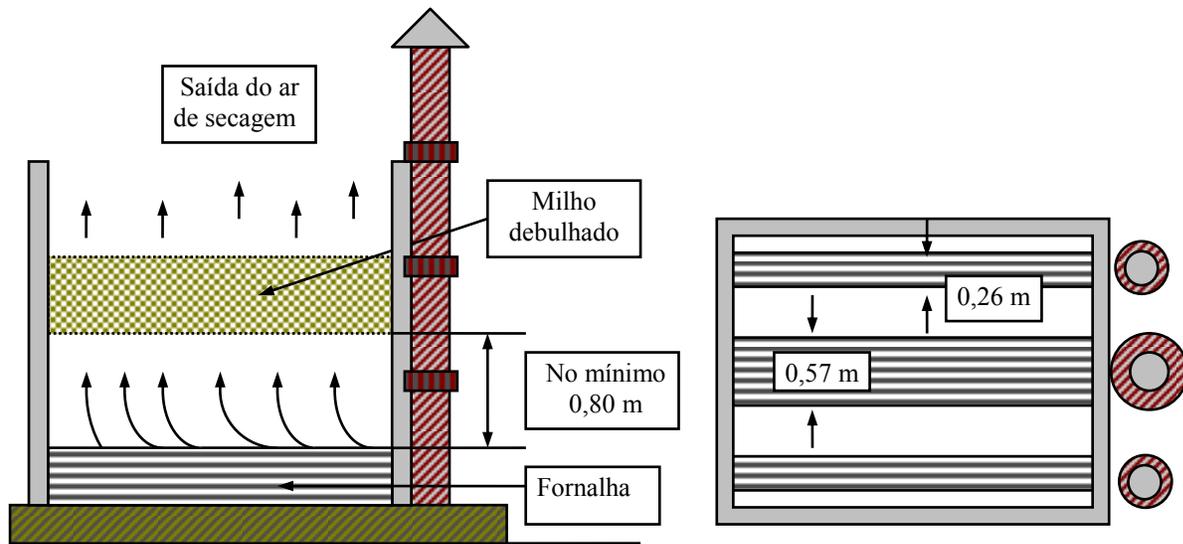


Figura 23 - Esquema de um secador onde o ar se movimenta por convecção natural (BERNAL, 1982).

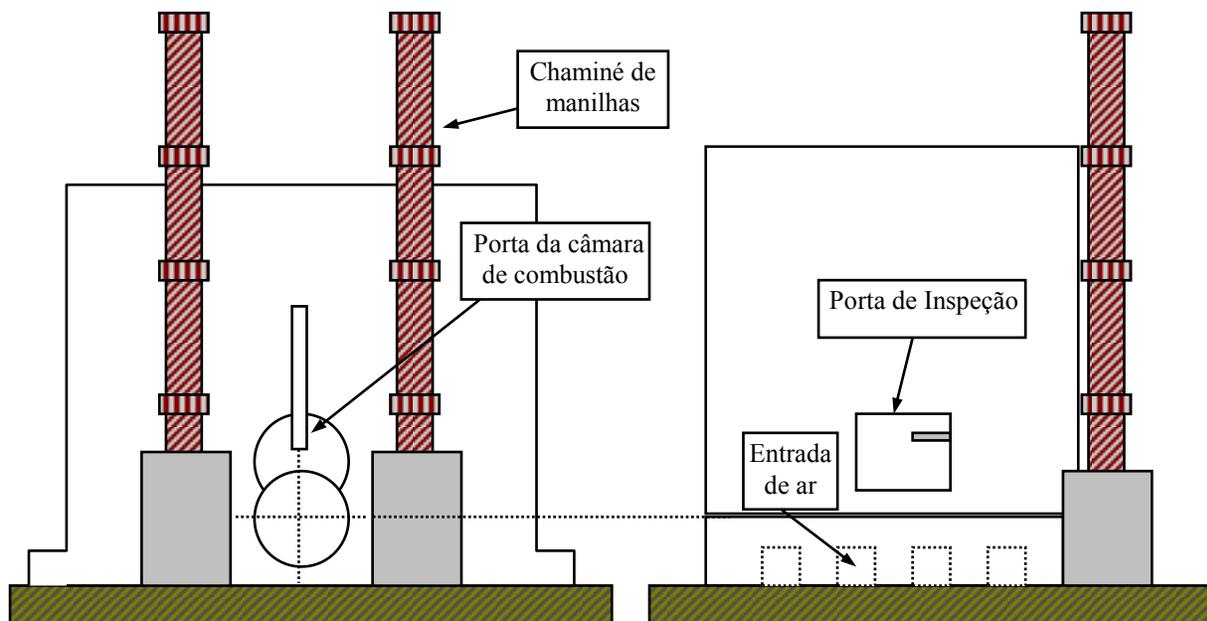


Figura 24 - Esquema de um secador onde o ar se movimenta por convecção natural (Pereira *et alii*, 1985).

O secador utilizando a movimentação do ar por convecção natural também foi desenvolvido por Cavalcanti Mata (1981) para atender a secagem de feijão em rama na região Nordeste. Posteriormente, este tipo de secador foi melhorado por Aragão *et alii* (1991) no seu sistema de fornalha. Também foram conduzidos trabalhos utilizando como fonte de energia, para a secagem de milho, o sabugo do próprio milho. Alguns agricultores da região Nordeste, com base nestas experiências, atualmente utilizam este tipo de secador para secagem de algaroba e posterior fabricação de ração animal. O sucesso deste trabalho evoluiu para a secagem com ventilação forçada acionada por motor elétrico, que será descrita em item posterior.

Nestes trabalhos com secagem usando a ventilação por convecção natural foi possível observar alguns dados técnicos, que devem ser repassados, para que se tenha sucesso na secagem de produtos agrícolas, como:

- A chaminé não deve ser superior a 2,5 metros
- A distância entre a fornalha e a plataforma de secagem deve estar entre 0,8 e, no máximo, 2,0 metros e deve permitir a regulagem da altura.
- Para que haja uniformidade de secagem, a largura do secador não deverá ser superior a três vezes a largura do trocador de calor, conforme Figura 25.
- A velocidade do ar ambiente na entrada da câmara de aquecimento não deve exceder a $15 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ e faz-se necessária a existência de um sistema que controle esta velocidade de ar.
- O revolvimento periódico da massa do produto que está sendo seco melhora sensivelmente a eficiência da secagem.
- O controle da fornalha de modo a manter a temperatura de secagem praticamente constante é um dos fatores que mais contribui para que o produto não perca qualidade.

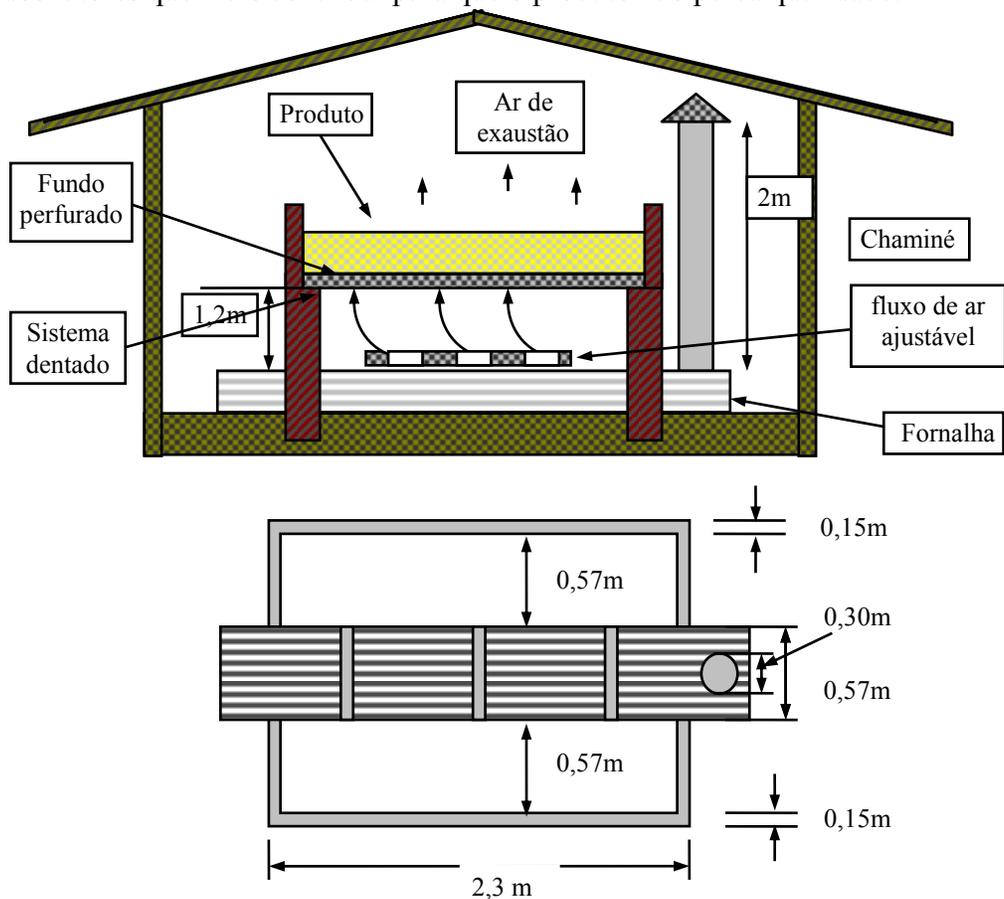


Figura 25 - Esquema de um secador onde o ar se movimenta por convecção natural (Cavalcanti Mata, 1981; Aragão *et alii*, 1991).

O secador desenvolvido por esses pesquisadores é mostrado na Figura 25. A diferença básica entre os secadores empregados por Cavalcanti Mata (1981) e Aragão *et alii* (1991) reside

no fato de que, no primeiro secador, a fornalha é constituída inteiramente de tonéis de ferro de 200 litros em que parte é enterrada no solo, e, no trabalho desenvolvido por Aragão *et alii* (1991), a fornalha é construída de alvenaria e só a cúpula de cima da fornalha é de ferro. Isto evita que a parte que está enterrada no solo libere energia para este solo; assim, obtém-se ganho de energia e, conseqüentemente, aumento na eficiência térmica do secador.

Outro adendo tecnológico foi a introdução de um mecanismo de controle na entrada de fluxo de ar e do sistema dentado, que permite regular a distância entre a fornalha e a câmara de secagem, através da inserção no sistema dentado de um elemento elevatório.

Na Tabela 4 estão mostrados os resultados de algumas secagens conduzidas com secadores que utilizam a movimentação do ar por convecção natural.

Tabela 4 - Resultados de secagens utilizando secadores onde o ar se movimenta através de convecção natural

Produto	Espessura da camada	Temperatura do ar de secagem	Unidade Inicial	Umidade Final	Tempo de secagem	Intervalo de revolvimento	Fonte de Dados
	metros	°C	% b.u.	% b.u.	horas	horas	
Amendoim	0,205	60	32,1	10,9	23,0	-	Brook (1964)
Amendoim	0,205	60	27,0	5,5	26,5	-	Brook (1964)
Amendoim	0,205	60	23,5	4,5	32	-	Brook (1964)
Arroz	0,06	50	17,1	11,6	5,5	1,0	Pereira <i>et alii</i> (1985)
Feijão	0,09	50	15,5	12,5	6,5	1,0	Pereira <i>et alii</i> (1985)
Feijão em rama	0,5	60	45	13	12	1,0	Cava:Canti Mata (1981)
Milho debulhado	0,15	60	25,6	13,7	10	2,0	Aragão <i>et alii</i> (1991)
Milho debulhado	0,05	60	19,9	7,2	6	2,0	Aragão <i>et alii</i> (1991)
Milho debulhado	0,10	37	20,5	13,0	22,5	4,0	Adeyemo (1979)
Milho debulhado	0,10	37	20,6	13,0	21,0	6,0	Adeyemo (1979)
Milho debulhado	0,10	35	20,3	13,0	13,5	4,0	Adeyemo (1979)
Milho debulhado	0,10	35	19,4	13,0	12,0	6,0	Adeyemo (1979)
Milho debulhado	0,125	63	23,4	12,8	9,5	3,5	Bernal (1982)
Milho debulhado	0,169	63	23,6	13,7	14,0	3,5	Bernal (1982)

É importante ressaltar que este tipo de secador tem baixo rendimento térmico e é mais usado em fazendas onde a energia elétrica não existe ou em regiões onde, para geração de energia elétrica, se utiliza combustível derivado de petróleo.

Secador com convecção forçada

O secador onde se utiliza a convecção de ar forçada consiste na passagem do ar aquecido através da massa de grãos, onde este é acionado por um ventilador elétrico. O aquecimento do ar pode ser dado por energia elétrica, óleo combustível, gás e, ou, fornalha usando-se resíduos agrícolas ou lenha. O secador confeccionado pela indústria é o apresentado na Figura 18; como já mencionado anteriormente, seu custo para o agricultor é elevado e as instituições universitárias e de pesquisa têm melhorado este secador tecnologicamente e confeccionado com materiais mais baratos, como alvenaria, solo-cimento ou argamassa armada. O esquema de um secador destes, desenvolvido pela UFV, é mostrado na Figura 26, onde se utiliza uma fornalha como fonte de energia para aquecimento do ar de secagem; e na Figura 27 é apresentado o esquema do secador desenvolvido pelo Núcleo de Tecnologia em Armazenagem da UFPB. Basicamente, os secadores se equivalem, a diferença está na fornalha. No secador desenvolvido pela UFV, o ventilador, quando succiona o ar, faz com que este passe pela fornalha e já venha aquecido quando entra no plenum; no desenvolvido pelo NTA, o ar ambiente é insuflado para dentro do plenum, sem aquecimento. O ar ambiente, ao entrar no plenum, é aquecido pelo calor irradiado da fornalha, onde se homogeneiza antes de passar para a câmara de secagem.

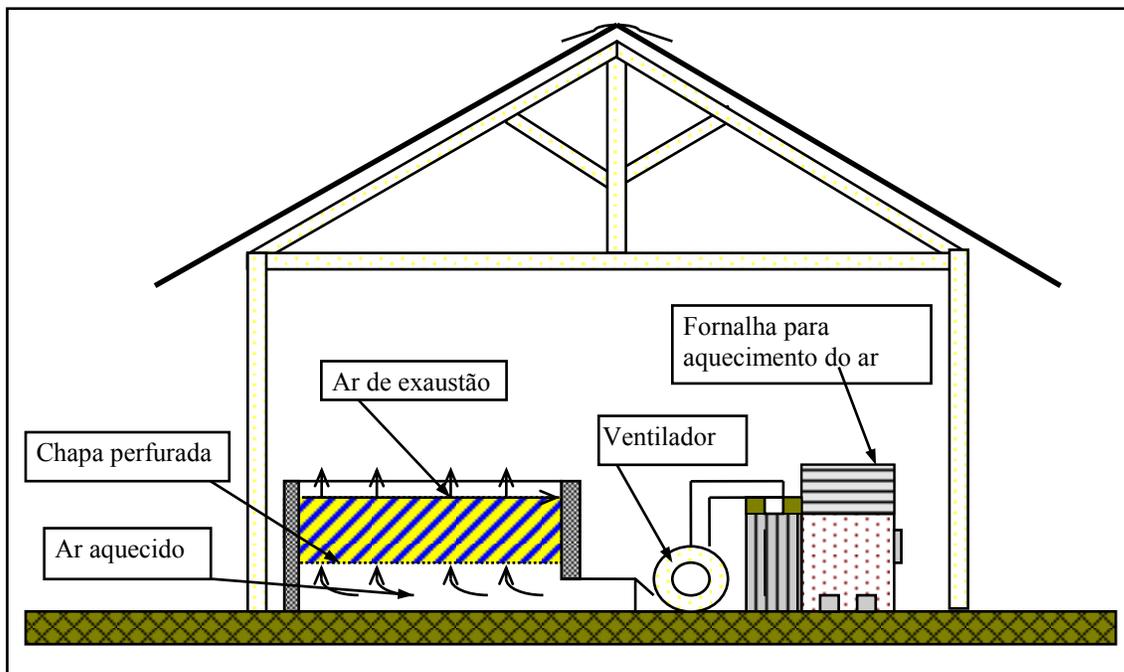


Figura 26 - Esquema de secador de camada estacionária a nível de fazenda desenvolvido pela Universidade Federal de Viçosa

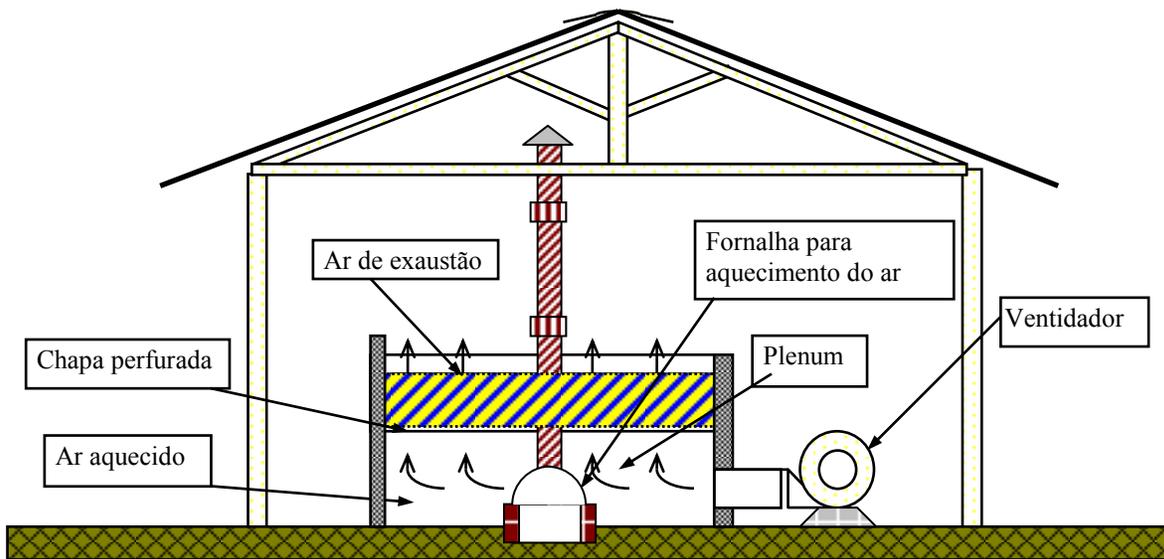


Figura 27 - Esquema de secador de camada estacionária a nível de fazenda desenvolvido pelo Núcleo de Tecnologia em Armazenagem da Universidade Federal da Paraíba.

Com fundo falso

Quando o dimensionamento do secador é para pequenas proporções, pode-se pensar em câmaras de secagem, onde o seu fundo é falso e a carga a ser colocada por período de tempo não exceda aos limites de resistência dos materiais, pois a tela que compõe o fundo falso deve ter uma área perfurada de no mínimo 10 %, para que esta tela não ofereça resistência à passagem do ar. Portanto, é necessário um dimensionamento eficaz do sistema, para evitar de ter que secar um produto que está colocado em um secador onde o seu peso excede a capacidade de resistência do material.

A Figura 28 mostra alguns detalhes da construção de um secador de alvenaria com fundo falso circular e retangular, onde a distância entre o piso e a tela ou chapa perfurada deve ser de 0,40 a 0,60 m. Este espaço é denominado câmara de homogeneização do fluxo de ar ou “plenum”

Nestes tipos de secadores a altura da camada de secagem é limitada a 0,6 metro. Portanto, se se quiser secar uma quantidade maior, o secador deve crescer em área e não em altura. No caso específico de secagem com ar natural, recomenda-se que a altura da camada do silo-secador não deva ultrapassar 4 metros.

Na secagem a altas temperaturas em que se limita a altura, a estrutura de fundo falso não apresenta problema. Se se quiser aumentar o secador, basta crescer a sua área, no entanto, ele não deve crescer indefinidamente, pois ficaria antioperacional; assim fica mais conveniente a construção de dois secadores. Não existe um valor a ser recomendado, pois, a rigor, pode-se confeccionar um secador de qualquer tamanho. Neste caso, vale o bom senso. Um valor a ser dado, por experiência pratica, é não ultrapassar 10 m.

Como a estrutura de fundo falso é limitada em função do peso a ser colocado, algumas alternativas foram apresentadas, tanto para a secagem como para a aeração.

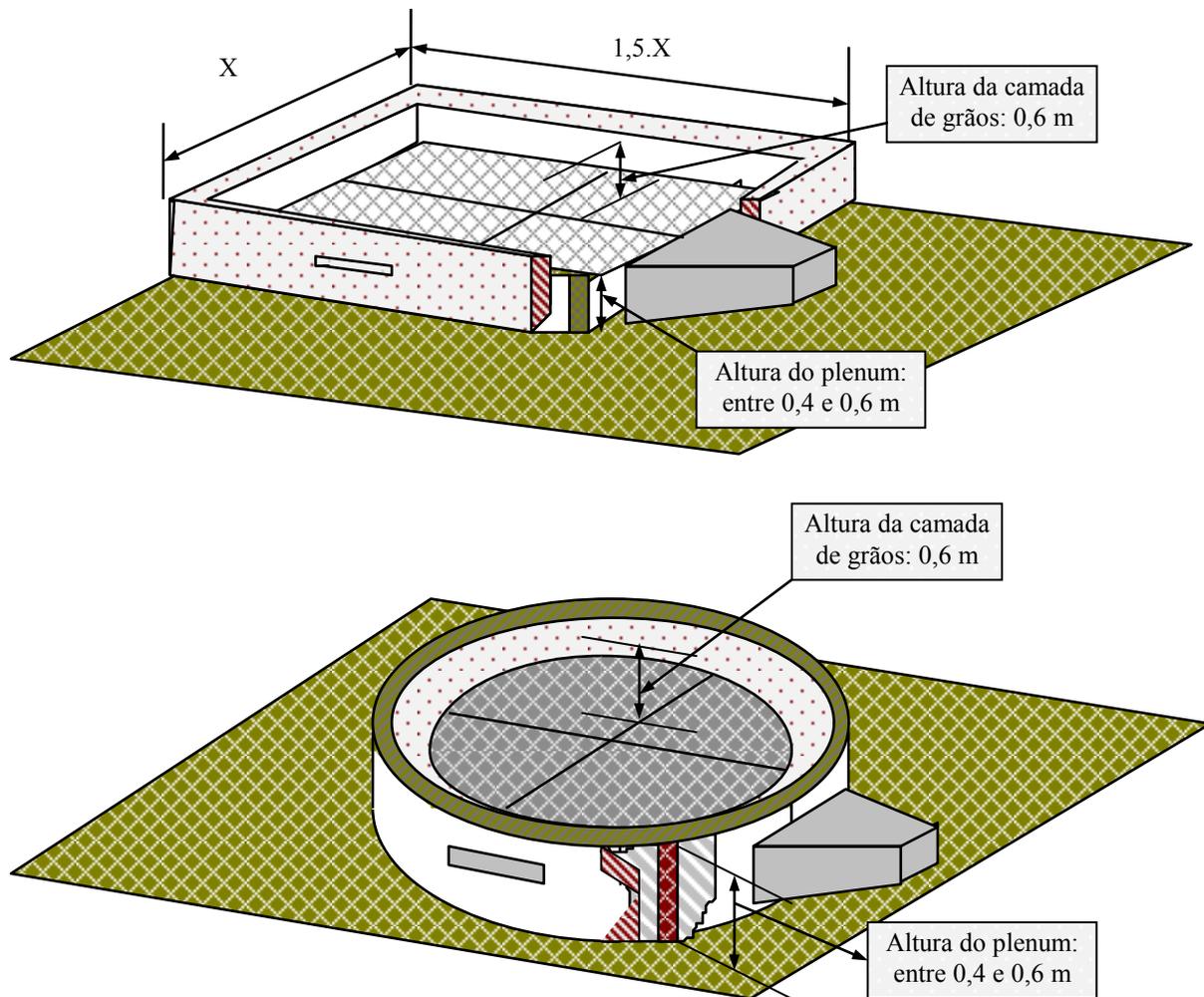


Figura 28 - Secador de alvenaria com fundo falso retangular e circular

Com dutos perfurados

No piso

Como existe a limitação de que toda a área seja perfurada, pode-se confeccionar um secador onde parte dessa área seja perfurada. A desvantagem desse tipo de secador é a desuniformidade da secagem, pois existem áreas localizadas na saída dos dutos que receberão uma distribuição de fluxo de ar desuniforme.

A maneira como esses dutos perfurados podem ser confeccionados no secador são: a) acima do solo e b) abaixo do solo, na forma de canaletas.

a) A canaleta confeccionada acima do solo é, de maneira geral empregada quando já existe um galpão disponível e este é adaptado para secagem (Figura 29). As várias configurações de canaleta são apresentadas na Figura 30. A canaleta menos recomendada é a retangular, pois podem permanecer resíduos do produto em cima da canaleta após a descarga dos grãos.

No caso das canaletas semicirculares ou triangulares este fato não ocorre, pois não existem condições de estabilidade dos grãos quando estes estão localizados acima dessas superfícies.

É importante mencionar que, por ocasião da descarga do produto, após a secagem, deve ser feita uma severa limpeza, principalmente nos cantos das canaletas, onde o material é mais difícil de ser removido. Este procedimento é de suma importância para as secagens posteriores e evita a contaminação dos novos produtos que serão colocados no secador.

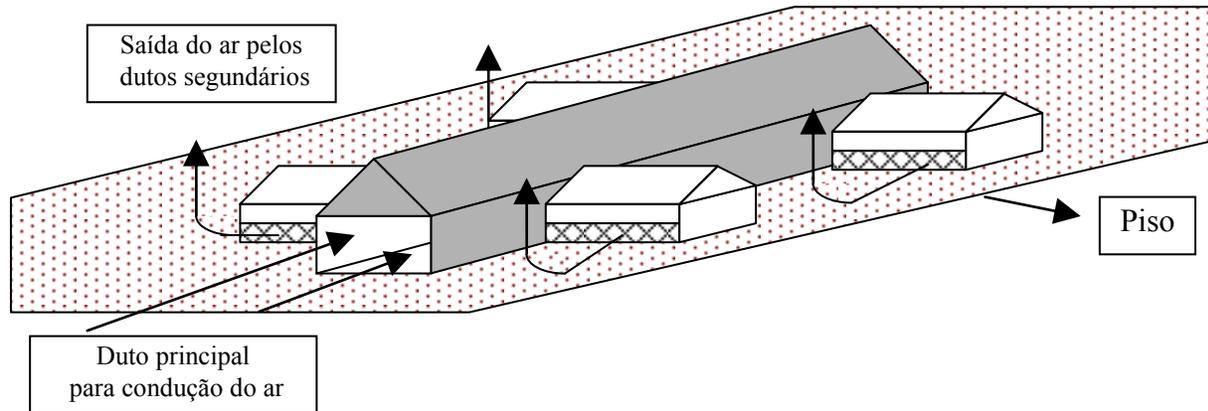


Figura 29 - Esquema de um duto para secagem de grãos aproveitando um galpão.

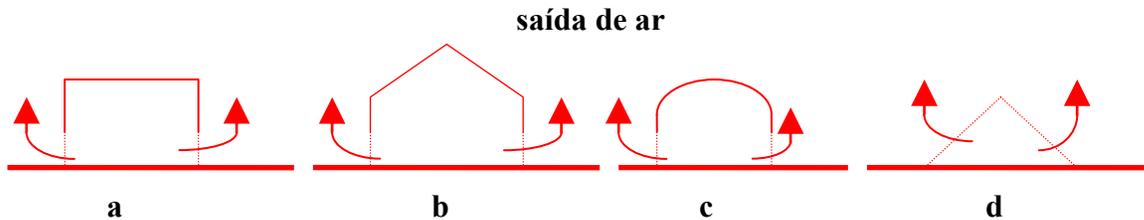


Figura 30 - Esquema dos tipos de canaleta para condução do ar, quando se aproveita um galpão para secagem

b) A canaleta confeccionada abaixo do solo é mais operacional quanto à limpeza e deve ser feita sempre que possível. A Figura 31a ilustra este tipo de condução do ar em um secador de seção retangular. Quando o secador é de porte grande, ou seja, superior a 6 metros, torna-se necessária a existência de um duto principal de condução e distribuição do ar para dutos secundários de superfície perfurada (Figura 31b). A definição do tamanho do secador, de 6 metros, não é rígida, mas operacional.

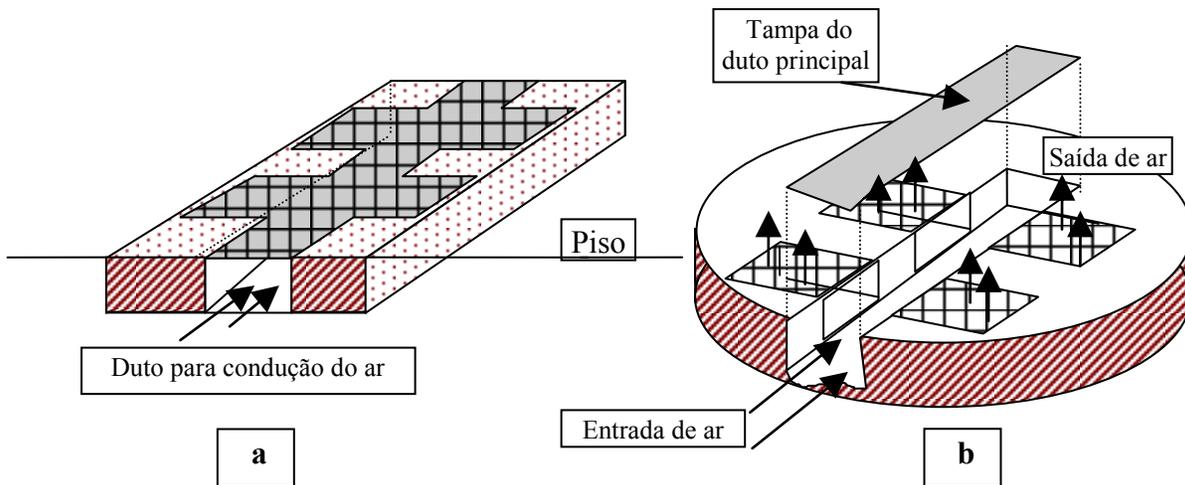


Figura 31 - Tipos de canaletas feitas abaixo do nível do solo, para condução do ar de secagem.

No tubo central

Quando não se pode crescer a base de um secador por limitação de área, pode-se confeccionar um secador com um duto central perfurado, sendo o ar de secagem distribuído radialmente (Figura 32). Neste caso, para secagens superiores a 40 °C, a espessura da camada a ser delimitada é o raio do secador, que não deve ultrapassar 0,60 m. Caso se pretenda fazer secadores maiores, estes deverão crescer em altura.

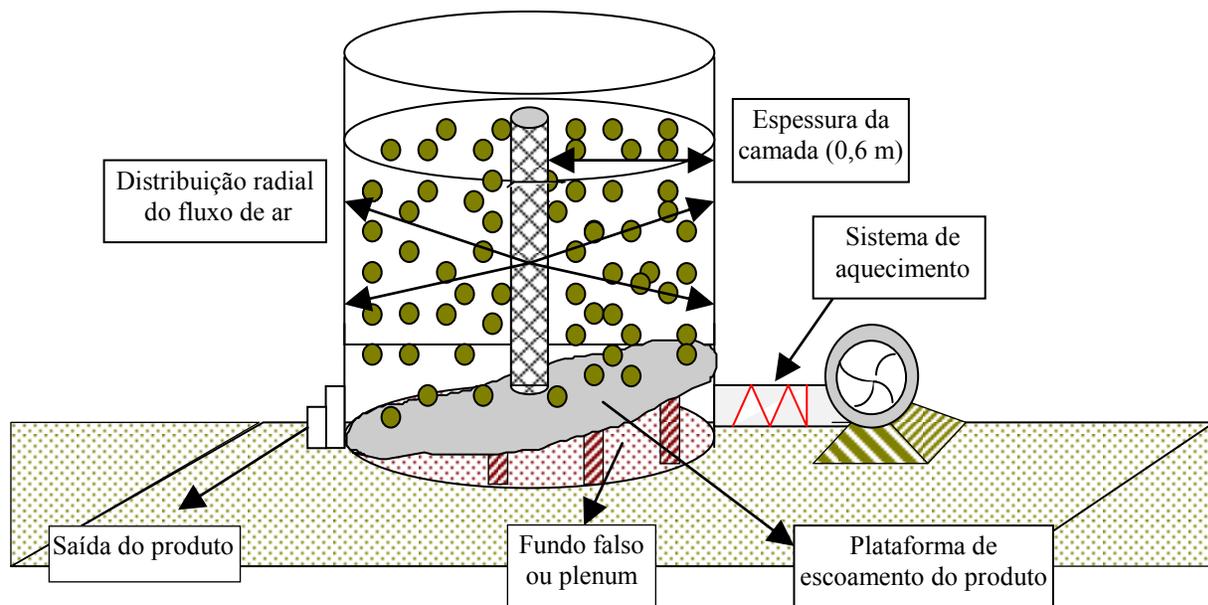


Figura 32 - Esquema de um secador de distribuição radial do ar de secagem.

A altura de um secador de duto central perfurado não deve crescer indefinidamente, pois a estabilidade do secador estará em jogo. Se o secador está delimitado no seu diâmetro, e esta delimitação é de 1,5 metro (1,2 m da camada e 0,30 do duto central), a altura não deve exceder a 6 vezes o seu diâmetro, ou seja, 9,0 m. Mais uma vez, este limite não é rígido, mas operacional.

Com recirculação do produto

Na secagem em camada estacionária existe a formação de um gradiente de umidade ao longo da camada. Essa desuniformidade de umidade ao final da secagem pode comprometer a sua armazenagem, já que pode existir a formação de focos de desenvolvimento de microrganismo. Para que este fato seja evitado existe a necessidade do revolvimento do material de tempo em tempo, fazendo com que a camada de baixo, que está mais seca, passe para cima, e a de cima, que está mais úmida, para baixo. Um secador que permite o revolvimento do material é mostrado na Figura 33, onde a plataforma perfurada, na qual os grãos são secos, é inclinada, permitindo o escoamento dos grãos por gravidade. O material é recolhido em uma moega, e abaixo desta está um sistema transportador (rosca sem fim) que conduz o material até um elevador, o qual coloca o produto por cima do secador. Este procedimento revolve o material e permite maior uniformidade do processo de secagem.

Outros sistemas podem ser feitos de modo a propiciar este revolvimento; o mostrado na Figura 33 permite uma operação a menos, pois a retirada do material se dá por gravidade, no entanto, se a plataforma de secagem não for inclinada, como é o caso da maioria dos secadores, esta operação é feita retirando-se o material de dentro do secador por uma rosca sem fim. Neste caso, teríamos a necessidade de mais um equipamento.

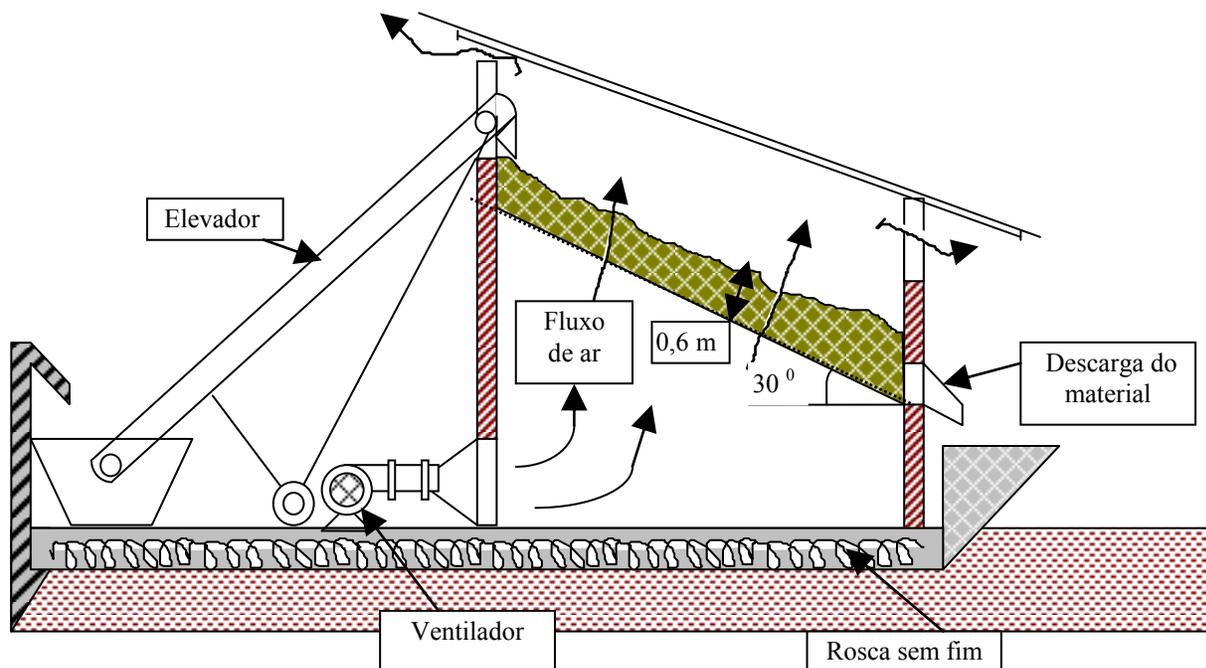


Figura 33 - Esquema de um secador de camada estacionária que permite o revolvimento do produto em determinados períodos de tempo

A seguir serão exemplificados os cálculos necessários ao dimensionamento de um secador para um agricultor que produz 50 ha de milho por ano.

Algumas condições deste produtor precisam ser conhecidas e consideradas, no entanto, para exercitar, supõe-se que:

1. A produtividade é de 1,5 tonelada por hectare
2. A colheita e a secagem desta produção se realiza em 15 dias
3. O tempo de operação da secagem diária é de 10 horas
4. A temperatura média ambiente de 25 °C
5. A umidade relativa média de 80%
6. A temperatura do ar de secagem de 50 °C
7. O teor de umidade do milho na colheita é de 25 % base seca

Cálculo da quantidade de produto a ser seco por dia - *QPS*

$$QPS = \frac{50 \text{ ha} \cdot 1,5 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}}{15 \text{ dias}} = 5 \text{ ton/dia ou } 5000 \text{ kg} \quad (17)$$

Cálculo da quantidade de água que deve ser evaporada na secagem - *QAE*

$$QAE = \frac{5000 \text{ kg} \cdot (25 - 13)}{(100 - 13)} = 689,65 \text{ kg de água evaporada} \quad (18)$$

Cálculo da capacidade de secagem do ar

Para se calcular a capacidade de secagem do ar é necessário recorrer ao gráfico psicrométrico ou às fórmulas que o confeccionaram.

Usando o gráfico ter-se-ão os seguintes dados, ilustrados pela Figura 33

Entalpia do ar à temperatura de 25 °C e umidade relativa de 80% = 20 kg/kg de ar seco

O ar sendo aquecido para 50 °C, a umidade relativa será de 21%, e a

Entalpia do ar à temperatura de 50 °C e umidade relativa de 21% = 27 kg/kg de ar seco

A diferença de entalpia é (27-20) = 7 kg/kg de ar seco

Volume Específico (*VE*) = 0,937 m³ de ar /kg de ar seco

Supondo que o ar que sai do secador esteja a uma umidade relativa de 80% e 32 °C, e a capacidade de secagem do ar (*CSA*) será a diferença de razão de mistura, que é:

$$CSA = (24,5 - 16) = 8,5 \text{ g de vapor de água/kg de ar seco} \quad (19)$$

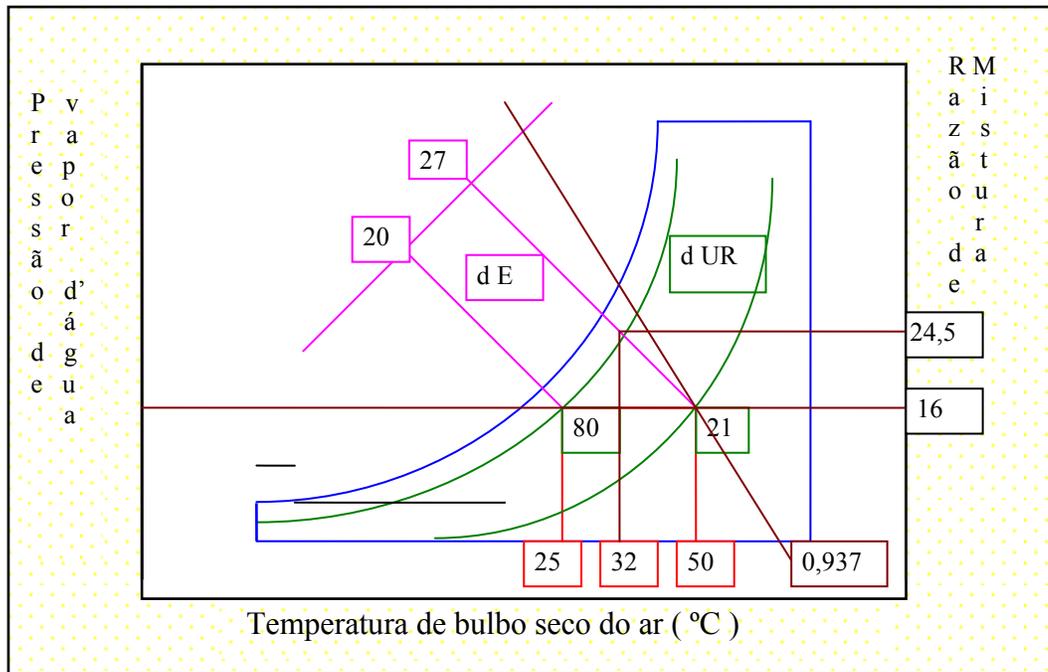


Figura 33 - Gráfico psicrométrico mostrando como ocorre o processo de secagem e seus valores.

Cálculo da quantidade de ar necessária ao processo de secagem (Q_{APS})

$$Q_{APS} = \frac{Q_{AE} \cdot (VE) \cdot 1000}{CSA} = \frac{689,65 \text{ kg} \cdot (0,937 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}) \cdot 1000}{8,5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}} = 76023,77 \text{ m}^3 \text{ de ar seco} \quad (20)$$

Cálculo da vazão de ar necessária por minuto (VN)

$$VN = \frac{Q_{APS}}{TSD} = \frac{76023,77 \text{ m}^3}{10 \text{ h} \cdot (60 \text{ min} \cdot \text{h}^{-1})} = 126,7 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \quad (21)$$

Cálculo das dimensões do secador

Se a limitação da altura da camada de secagem é de 0,6 m e a massa específica do milho é de $700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, a área (A) do secador de seção circular para a secagem de 5.000 kg é calculada da seguinte maneira:

$$VS = \frac{QPS}{ME} = \frac{5000 \text{ kg}}{700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}} = 7,14 \text{ m}^3 \quad (22)$$

em que

VS = volume do secador, m^3

ME = massa específica do produto, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Se o volume do secador é $VS = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H$ e a altura (H) é de 0,6 m, o diâmetro (D) e a área do secador são:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot VS}{0,6 \cdot \pi}} = 3,89 \cong 3,9m \text{ e } A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{3,1416 \cdot (3,9)^2}{4} = 11,95m^2 \quad (23)$$

Cálculo da pressão estática (ΔP)

Para que não haja pressão sobre a plataforma perfurada, esta deve ter pelo menos 10% de sua área perfurada, ou seja, $1,2 m^2$. Assim, utilizando-se a Figura 13 tem-se:

$$FAS = \frac{VN}{A} = \frac{126,7 m^3 \cdot min^{-1}}{11,95 m^2} = 10,6 m^3 \cdot min^{-1} \cdot m^{-2} \quad (24)$$

em que

FAS = fluxo do ar de secagem, $m^3 \cdot min^{-1} \cdot m^{-2}$

Se dividirmos por 60, para se obter em segundo, ter-se-á:

$$FAS = \frac{10,6 m^3 \cdot min^{-1} \cdot m^{-2}}{60 s \cdot min^{-1}} = 0,177 m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-2} \quad (25)$$

Na Figura 13 este valor corresponde a 35 mm de H_2O por metro da camada de grãos de milho.

Se se quiser ΔP em 0,6 m:

$$\Delta P = 35 mmH_2O \cdot (0,6) \cdot \eta = 35 mmH_2O \cdot (0,6) \cdot 1,2 = 25,2 mmH_2O \quad (26)$$

em que $\eta=1,2$ considerando 20% de perda de pressão nos dutos

Cálculo da potência do ventilador

$$Pot(CV) = \frac{VN \cdot \Delta P}{450 \cdot \eta'} = \frac{126,7 m^3 \cdot min^{-1} \cdot 25,2 mmH_2O}{450 \cdot (0,8)} = 8,87 \cong 9 CV \quad (27)$$

em que

η' = rendimento do ventilador

Cálculo da energia gasta no processo de secagem

Consumo de energia do motor - CEM

$$CEM = \frac{CV}{N} \cdot t \cdot (632 kcal \cdot CV^{-1} \cdot h^{-1}) \quad (28)$$

em que

N = rendimento do motor = 0,9

t = tempo de secagem diária

$$CEM = \frac{9}{0,9} \cdot 10 h \cdot dia^{-1} \cdot (632 kcal \cdot CV^{-1} \cdot h^{-1}) = 63.200,0 kcal \cdot dia^{-1} \quad (29)$$

Consumo de energia da fornalha - CEF

$$CEF = \frac{QAE \cdot \Delta E}{\Delta RM \cdot N \cdot 3200000 \text{ kcal} \cdot \text{ton}^{-1}} \quad (30)$$

em que

N = rendimento da fornalha = 0,80

ΔE = diferença de entalpia (27 - 20) = 7 kcal.kg⁻¹ de ar seco

ΔRM = diferença da razão de mistura do ar (24,5 - 16,0) = 8,5 g de H₂O. kg⁻¹ de ar seco

$$CEF = \frac{689,65 \text{ kg} \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot (7 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ ar}) \cdot 1000 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}}{8,5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ ar} \cdot (0,8) \cdot 3200000 \text{ kcal} \cdot \text{ton}^{-1}} = 0,22 \text{ ton} \cdot \text{dia}^{-1} \quad (31)$$

Cálculo da eficiência de secagem - ES

$$ES = \frac{\text{kcal}(\text{Energia Elé trica}) + \text{kcal}(\text{Energia da fornalha})}{QAE} \quad (32)$$

$$ES = \frac{63.200 \text{ kcal} + 567947,05 \text{ kcal}}{689,65 \text{ kg H}_2\text{O}} = 915,17 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O evaporada} \quad (33)$$

Secador para o processo de seca-aeração

O processo consiste em secar o produto a alta temperatura (90 °C) por um curto período de tempo (1 hora), deixando o produto por um determinado tempo em repouso (de 4 a 10 horas), de modo a permitir que haja uma redistribuição da umidade no interior do produto, e em seguida, realizar o processo complementar de secagem com aeração usando o ar ambiente com um fluxo de 0,4 a 0,8 metros cúbicos de ar por minuto por metro cúbico de grãos (m³.min⁻¹.m⁻³). A Figura 34 ilustra este processo de seca-aeração.

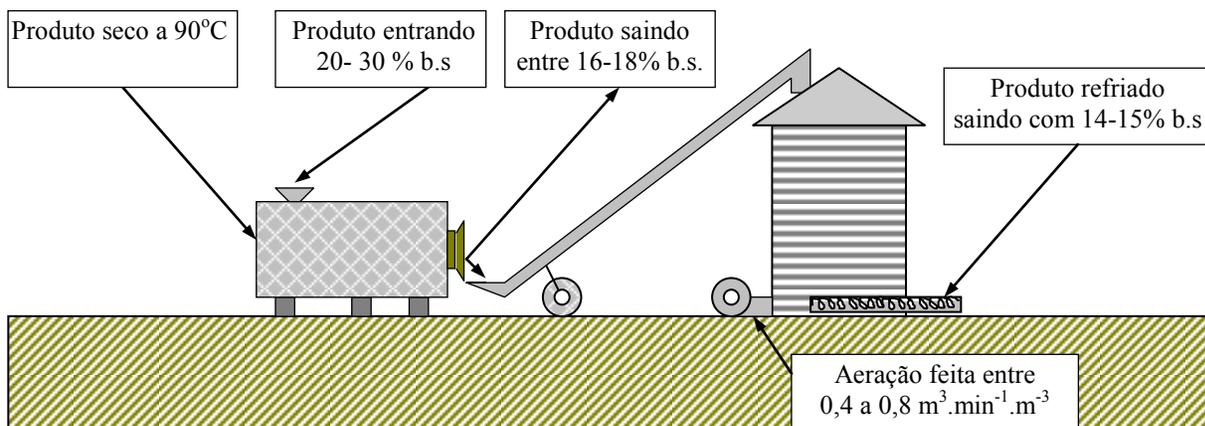


Figura 34 - Esquema de um sistema de seca-aeração.

Para que se possa realizar o processo de seca-aeração, o sistema deve ser bem dimensionado, pois o secador trabalha mais velozmente que o processo de repouso e o de aeração. Portanto, deve ser de menor capacidade que os silos de repouso e armazenamento. A maioria dos agricultores tem preferido eliminar o tempo de repouso em um silo chamado de espera e

tem conduzido o produto imediatamente para a unidade de armazenamento onde é feita a aeração. Assim, a unidade de armazenagem deve ser dimensionada para o sistema de aeração, que é de 0,4 a 0,8 ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$).

3.2 Fluxo cruzado

O secador de fluxo cruzado caracteriza-se por fazer com que o ar passe perpendicularmente à camada de grãos, entre duas chapas perfuradas, conforme mostrado na Figura 35. Esses secadores são utilizados tanto em nível de fazenda como em secadores industriais. A diferença do secador de fluxo cruzado com os secadores anteriormente descritos é que a massa de grãos está em movimento. As vantagens atribuídas a este tipo de secador são: a) alta capacidade de secagem, b) facilidade de manuseio e operação e c) baixo custo inicial. As desvantagens são: maior risco de superaquecimento do produto, b) alto consumo de energia e c) desuniformidade de secagem.

Secador móvel

O secador de fluxo cruzado pode ser também construído de materiais alternativos, à semelhança dos secadores de camada estacionária, no entanto, existem no mercado secadores de fluxo cruzado (Figura 35) que podem ser deslocados até as áreas de colheita. Este tipo de secador pode ser acionado acoplando-se a um trator.

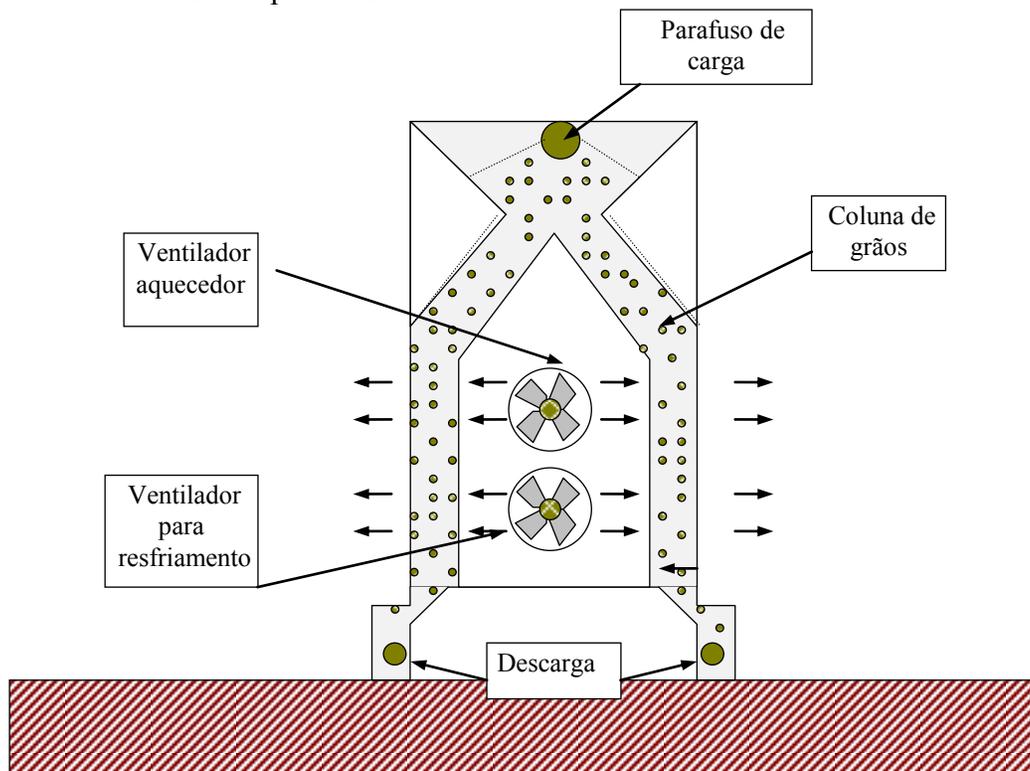


Figura 35 - Esquema de um secador de fluxo cruzado

A grande vantagem desse equipamento é a possibilidade de seu deslocamento para locais distantes, o que permite seu compartilhamento com diversos agricultores. Este tipo de

secador pode ser empregado muito bem por cooperativas ou associações de agricultores, ou mesmo em sistema de arrendamento.

4. VENTILADORES

Alguns princípios básicos de movimentação do ar se aplicam a todos os produtos colhidos e a todos os tipos de secadores, mesmo os que utilizam o ar natural ou os que empregam as baixas e as altas temperaturas.

Existem duas maneiras de acelerar um processo de secagem. A primeira é aumentando a temperatura do ar de secagem. Neste caso a temperatura do ar, ao ser elevada, aumenta sua capacidade de absorver água do produto e, conseqüentemente, aumenta o potencial de secagem. A segunda maneira é aumentando o fluxo de ar que passa através dos grãos, dentro de determinados limites. No primeiro procedimento o custo é maior e existe o risco da supersecagem, diminuindo a qualidade do produto; já no segundo esses dois fatos não ocorrem, mas a secagem deve acontecer em um tempo no qual não exista a possibilidade de deterioração do produto, principalmente nas camadas superiores do secador.

Assim, a escolha do ventilador certo para um sistema de secagem é muito importante, pois esta escolha determinará se o sistema funciona eficientemente ou não.

Um sistema de secagem é composto de um ventilador, um conduto central de ar, condutos laterais perfurados e, ou, piso perfurado. As quantidades do ar de secagem, a pressão estática e a profundidade do produto sobre o sistema de distribuição do ar são os principais fatores que contribuem para uma secagem eficiente.

4.1 Ventiladores

Os ventiladores são máquinas que, por meio da rotação de um rotor provido de pás adequadas e acionado por um motor, permitem transformar a energia mecânica do rotor em formas de energia potencial de pressão e energia cinética. Graças à energia adquirida, o ar torna-se capaz de atravessar a camada do produto e processar a secagem ou o resfriamento, vencendo as resistências que este e o sistema de distribuição oferecem à passagem desse ar. (SILVA, 1995).

Os ventiladores podem ser usados para mover um pequeno volume de ar contra alta resistência ou um grande volume de ar contra uma pequena resistência. A Tabela 5 ilustra as várias pressões, segundo seu nível energético

Tabela 5 - Classificação dos ventiladores segundo seu nível energético

Nível energético	Nível energético	Classificação
Até 200 mm de H ₂ O	< 2000 Pa	baixa pressão
201 - 800 mm de H ₂ O	2001 - 8000 Pa	média pressão
801 - 2500 mm de H ₂ O	8001 - 25000 Pa	alta pressão
Acima de 2500 mm de H ₂ O	> 25000 Pa	turbo-compressor

Basicamente dois tipos de ventiladores são usados para a secagem mecânica dos produtos agrícolas: a) ventilador axial e b) ventilador centrífugo.

Ventilador axial

O ventilador axial mostrado na Figura 36 caracteriza-se por fazer com que o ar entre e saia do ventilador paralelamente ao eixo.

Normalmente o ventilador axial não consegue vencer altas resistências, por isso é empregado para fins específicos no setor de pré-processamento, como o secador móvel de fluxo cruzado mostrado na Figura 35.

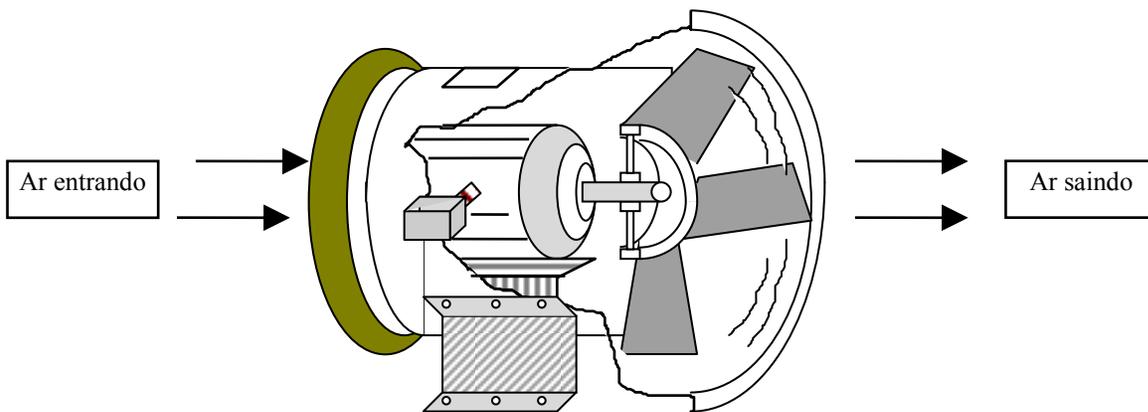
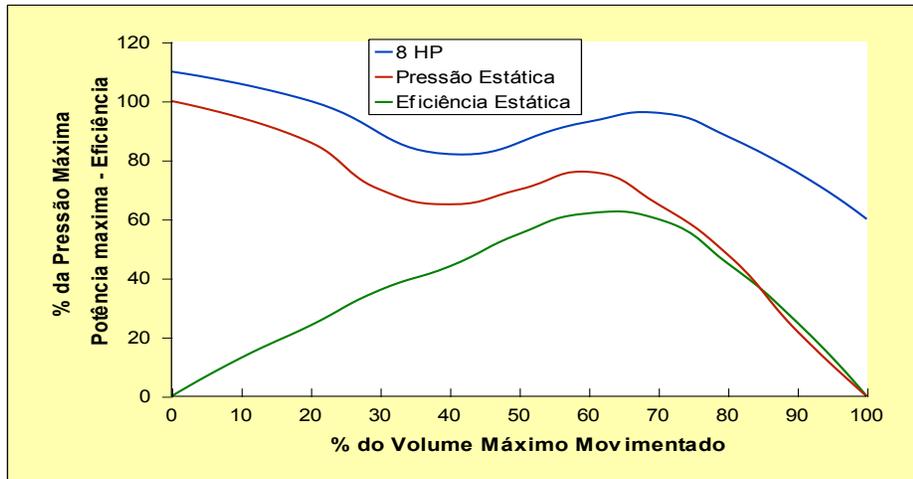


Figura 36 - Ventilador axial

Na Figura 37 está representada uma curva característica de um ventilador de fluxo axial, podendo-se observar que o máximo de eficiência está entre 55 e 70% de Q máximo e que nesta eficiência a pressão estática é de 65 a 75% da pressão máxima. A melhoria do desempenho deste ventilador está no posicionamento das pás. Normalmente, no mercado, estes ventiladores são confeccionados com pás retas perpendiculares ao eixo do rotor ou pás retas inclinadas em relação ao eixo do rotor (Figura 36).



FONTES ASHRAE (1969)

Figura 37 - Curvas características de um ventilador axial.

Ventilador centrífugo

Os ventiladores centrífugos, devido a sua característica de vencerem altas pressões, são os mais utilizados tanto na secagem com na aeração de produtos. Estes ventiladores funcionam utilizando a força centrífuga, com o ar movendo-se do centro de propulsão para sair radialmente, isto é, perpendicularmente às pás, como indicado na Figura 38.

Os ventiladores centrífugos também são confeccionados com tipos diferentes de pás do rotor, de modo a atuar diferentemente para cada finalidade. Na Figura 39 estão as diferentes formas de pás que são empregadas nos ventiladores centrífugos: a) pás radiais retas, b) pás curvadas para trás e c) pás curvadas para frente.

As pás radiais retas são mais usadas em trabalhos pesados, para movimentar grandes cargas de partículas, e apresentam rendimento baixo. Os ventiladores centrífugos que utilizam as pás curvadas para trás são empregados na condução de gases limpos e agüentam alta pressão, apresentando bom rendimento, no entanto sua potência é autodelimitada; e os ventiladores centrífugos que apresentam as pás curvadas para frente tem bom rendimento e suportam alta pressão.

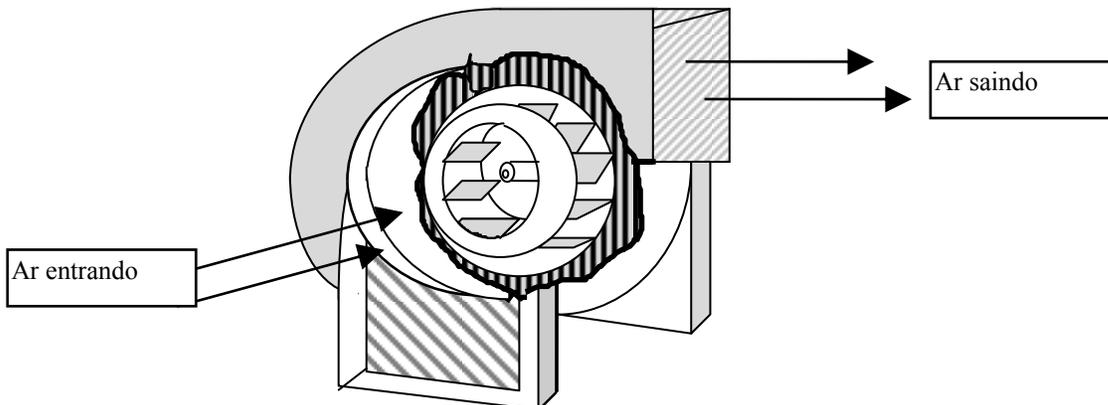


Figura 38 - Ventilador centrífugo.

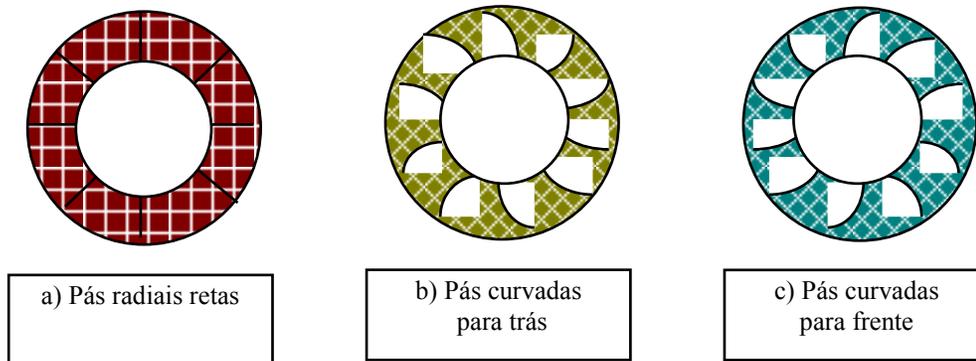
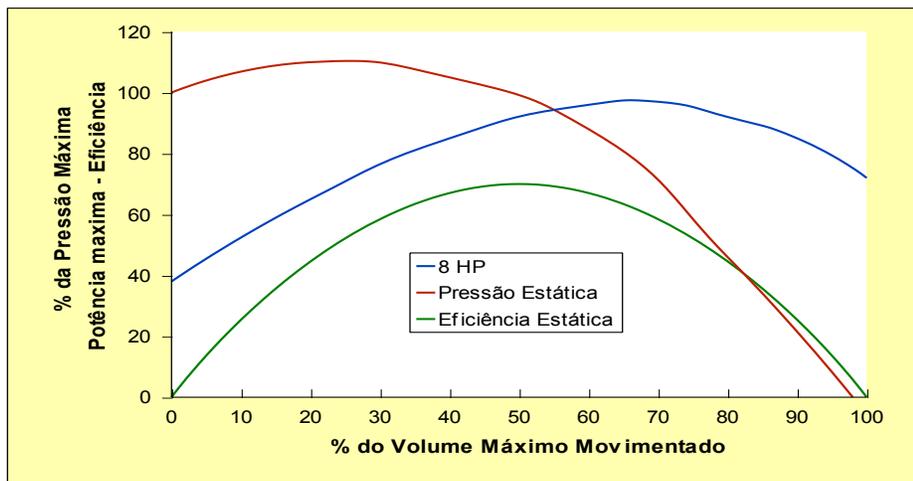


Figura 39 - Tipos de pás dos ventiladores centrífugos.

Na Figura 40 estão as curvas características de um ventilador centrífugo de pás curvadas para trás. Nesta figura estão a percentagem da variação da pressão estática (P_e), potência máxima (P_m) e eficiência estática (E_e) em função da vazão de ar (Q). Estas curvas indicam que a região onde a operação é mais eficiente encontra-se entre 50 e 60 % de Q máximo e que a potência nesta faixa varia pouco, mostrando que este ventilador não apresentará problemas de sobrecarga quando for mais exigido.



Fonte ASHRAE (1969)

Figura 40 - Curvas características de um ventilador de pás curvadas para trás.

5. AERAÇÃO

O produto após a secagem está preparado para a armazenagem; no entanto, a este produto estão associados microrganismos. O desenvolvimento desses microrganismos depende das condições de temperatura e umidade do ar ou dos grãos. Os principais microrganismos em uma massa de grãos ou sementes de produtos armazenados são os fungos e insetos. Portanto,

faz-se necessária, após a secagem, a aplicação de fungicidas, para controle dos fungos, e de inseticidas, para controle dos insetos.

O produto, ao ser armazenado sob essas condições, pode ser conservado por um período de tempo que varia de 6 a 12 meses. Este período de armazenamento satisfatório vai depender ainda das condições climáticas internas e externas ao longo deste mesmo período, pois a atuação dos fungicidas e inseticidas não é duradoura e perdendo seu efeito em 3 a 4 meses, necessitando, após esse período, de uma nova aplicação desses produtos. Assim, existe necessidade periódica de inspeção no armazém, para que a conservação do produto seja mantida.

A armazenagem de produtos agrícolas consiste em preservar ao máximo suas qualidades quer seja no aspecto quantitativo ou qualitativo. Contudo, os grãos e as sementes, por serem produtos biológicos, respiram consumindo suas reservas e liberando gás carbônico, água e energia. Ao fazer isso, o produto, ao longo do período em que permanece armazenado exala odores, aquece a sua massa através da liberação da energia de respiração e tende a absorver água decorrente do produto da respiração.

Além desses fatores biológicos, a conservação dos produtos está sujeita a fatores físicos, como condesação de umidade e migração de umidade.

Como uma solução para esses problemas, surgiu a técnica de aeração, que consiste na passagem do ar através da massa do produto armazenado.

Nas décadas passadas usava-se da seguinte maneira: em vez de fazer com que o ar passasse pelo produto, o produto é que era movimentado através do ar ambiente. Essa operação consistia em retirar o material do silo pela parte inferior e recolocá-lo por cima, ou colocá-lo em outro silo. Esta operação denomina-se transilagem. O inconveniente desta operação e as razões pelas quais praticamente ela foi abandonada são: a) o elevado dano mecânico causado ao produto, b) o custo elevado da operação e c) a dificuldade de manuseio.

Portanto, a partir das décadas de 70 e 80, o sistema de aeração passou a ser uma exigência do sistema operacional de armazenagem, descartando-se praticamente o processo de transilagem.

A aeração é atualmente considerada um instrumento eficaz na conservação dos produtos agrícolas, principalmente os que são conservados a granel e em grande volume, como milho, trigo, arroz e soja .

As técnicas de aeração podem atender os seguintes objetivos:

- a) inibe as atividades de desenvolvimento de microrganismos (fungos e insetos);
- b) permite resfriar e uniformizar a temperatura da massa de grãos;
- c) promove a secagem do produto dentro de certos limites;
- d) permite remover odores; e
- e) permite minimizar as perdas dos componentes qualitativos e quantitativos existentes no produto

5.1 Componentes do sistema de aeração

O sistema de aeração consiste de: a) um ventilador com motor, que fornece a quantidade de ar necessária à aeração, b) dutos, que permitem conduzir o ar através da massa de grãos e c) silo, onde é armazenada a massa de grãos.

Ventilador

Os ventiladores centrífugos do tipo de hélice de pás curvas são preferíveis. Estes ventiladores fazem pouco barulho e o motor não fica sobrecarregado quando a pressão do ar desce. Contudo, o ventilador deve ser especificado de acordo com a quantidade total de ar e a pressão estática que deve ser solicitada pelo sistema de aeração.

Quantidade de ar

A especificação correta da pressão estática e da quantidade de ar a ser empregada no sistema de aeração é o principal fator que determina o sucesso do dimensionamento do sistema e da operação de aeração.

Na Tabela 6 estão as recomendações de alguns fluxos de ar utilizados na aeração de grãos e sementes, segundo as diferentes finalidades dos armazéns e das regiões climáticas.

Tabela 6 - Fluxos de ar empregados nos diversos sistemas de aeração

Tipos de Armazéns	Fluxo de ar (m.min ⁻¹ .ton ⁻¹ de grãos)	
	Região Fria	Região Quente
Horizontais	0,050 a 0,10	0,10 a 0,20
Verticais	0,025 a 0,05	0,03 a 0,10
Seca-aeração	0,500 a 1,00	0,50 a 1,00

Duto principal

O duto principal deve ser suficientemente largo para oferecer pouco resistência ao movimento do ar. As dimensões devem ser tais que o ar em movimento através do duto não seja maior que 600 m.min⁻¹. (10 m.s⁻¹) (Figura 41).

Duto lateral

O total da seção da área do duto lateral deve ser pelo menos igual ao do canal principal. Os dutos laterais devem ser colocados de tal forma que a distância entre eles não seja maior que a metade da profundidade dos grãos. De acordo com Wragge (1967), citado por Beer (1972), a largura de cada lateral deve ser ao menos o dobro da largura do conduto. A altura dos dutos laterais deve ser de 150, 200 ou 250 mm, para um espaço de 1, 1,5 ou 2,0 m, respectivamente. A velocidade no aeroduto deve ser de no máximo 240 m.min⁻¹ (4 m.s⁻¹) (Figura 41).

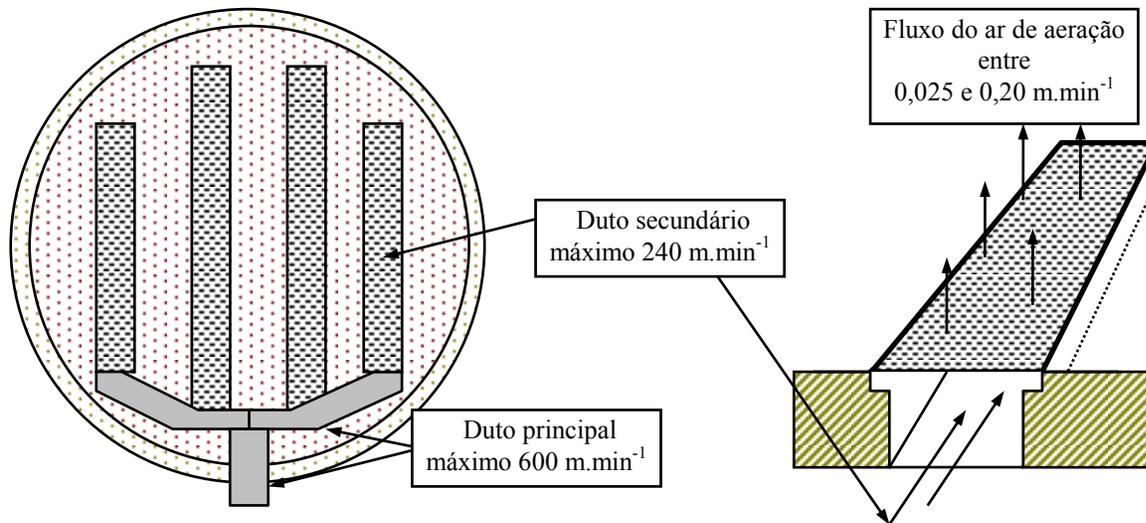


Figura 41 - Velocidades do ar nas canaletas de aeração

5.2 Dimensionamento de um sistema de aeração

O sistema descrito a seguir é um exercício de cálculo para que se possa exemplificar uma situação em que é possível dimensionar o sistema de aeração.

Supondo que o silo armazenador seja de uma altura de 8 metros de diâmetro e 12 metros de altura, carregado de milho até a altura de 11 metros. A necessidade de aeração é para uma região quente, ou seja, de $0,10 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \text{ ton}^{-1}$ de grãos (Tabela 6).

Cálculo do volume do silo - VS

$$VS = A_b \cdot H \quad (34)$$

$$A_b = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{3,1416 \cdot (8)^2}{4} = 50,26 \text{ m}^2 \quad (35)$$

em que

A_b = área do silo, m

H = altura do silo, m

D = diâmetro do silo, m

$$VS = 50,26 \cdot (11) = 552,92 \text{ m}^3 \quad (36)$$

Cálculo da massa do milho - Mm

$$Mm = VS \cdot (\rho) \quad (37)$$

em que

ρ = massa específica do milho

$\rho = 700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ou $0,7 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$

$$Mm = 552,92 \cdot (0,7) = 387,04 \text{ toneladas} \quad (38)$$

Cálculo da vazão total de ar - Qt

$$Qt = q_e \cdot (Mm) \quad (39)$$

$$Qt = 0,10 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \text{ ton}^{-1} \text{ de grãos} \cdot (384,04 \text{ t.}) = 38,4 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \quad (40)$$

em que

q_e = vazão especificada para aeração = $0,10 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \text{ ton}^{-1}$ de grãos

Cálculo da pressão estática - Pe

$$Q' = Qt / A_b = 38,4 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} / 50,26 \text{ m}^2 = 0,764 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ ou} \quad (41)$$

$$Q' = 0,0127 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{ m}^{-2} \quad (42)$$

em que

Q' = vazão do ar por m^2 de piso

Utilizando o gráfico para milho na Figura 13 e entrando com o valor de $0,0127 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{ m}^{-2}$, tem-se:

$Pe' = 1,0$ mm de coluna de água por metro de altura de profundidade da massa de grãos

Como a altura da camada de milho é de 11 metros

$$Pe = 1,0 \cdot (11) = 11 \text{ mm ca} \text{ ou } 11 / 25,4 = 0,433 \text{ polegadas de coluna de água} \quad (43)$$

Considerando 20 % de perda nos dutos, tem-se: $0,433 \cdot (1,2) = 0,52''$ de coluna de água e rendimento de 60%, devido à impureza de materiais, tem-se a pressão estática final de:

$$Pe = 0,52 / 0,6 = 0,87'' \text{ de coluna de água} \quad (44)$$

Cálculo da potência do motor - Pot_m

Utilizando o gráfico para milho na Figura 42, tem-se:

Para 11 metros e $Pe = 0,87''$ c.a. \longrightarrow 0,02 HP para cada 26 toneladas

$$Pot_m = 0,02 \text{ HP} \cdot (387,04 \text{ t.}) / 26 \text{ t.} = 0,3 \text{ HP} \quad (45)$$

Portanto, a potência efetiva (Pot_{eft}) é de:

$$Pot_{eft} = Pot_m / \eta \cdot \gamma \quad (46)$$

em que

η = rendimento mecânico do ventilador = 0,7

γ = rendimento elétrico do motor = 0,9

$$Pot_{eff} = 0,3 / 0,7 \cdot 0,9 = 0,476 \text{ HP} = 0,5 \text{ HP} \quad (47)$$

Figura 42 - Pressão estática e potência do motor a várias alturas da camada de grãos e fluxos de ar para o sistema de aeração do milho.

Figura 43 - Pressão estática e potência do motor a várias alturas da camada de grãos e fluxos de ar para o sistema de aeração do trigo.

Figura 44 - Pressão estática e potência do motor a várias alturas da camada de grãos e fluxos de ar para o sistema de aeração da soja.

Dimensionamento dos dutos

Duto principal

A vazão total do sistema de aeração é de $38,4 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. Portanto, este fluxo de ar deve passar em uma área que não exceda a velocidade de $600 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Dessa forma, a área mínima (A_{min}) deve ser de:

$$A_{\min} = 38,4 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} / 600 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1} = 0,064 \text{ m}^2, \text{ ou} \quad (48)$$

$$A_{\min} = 0,3 \text{ m de largura} \times 0,213 \text{ m de altura} \quad (49)$$

Se esta área é a mínima, uma dimensão razoável para o duto principal seria de:

0,3 m de largura por 0,25 m de altura, conforme a Figura 45, a seguir.

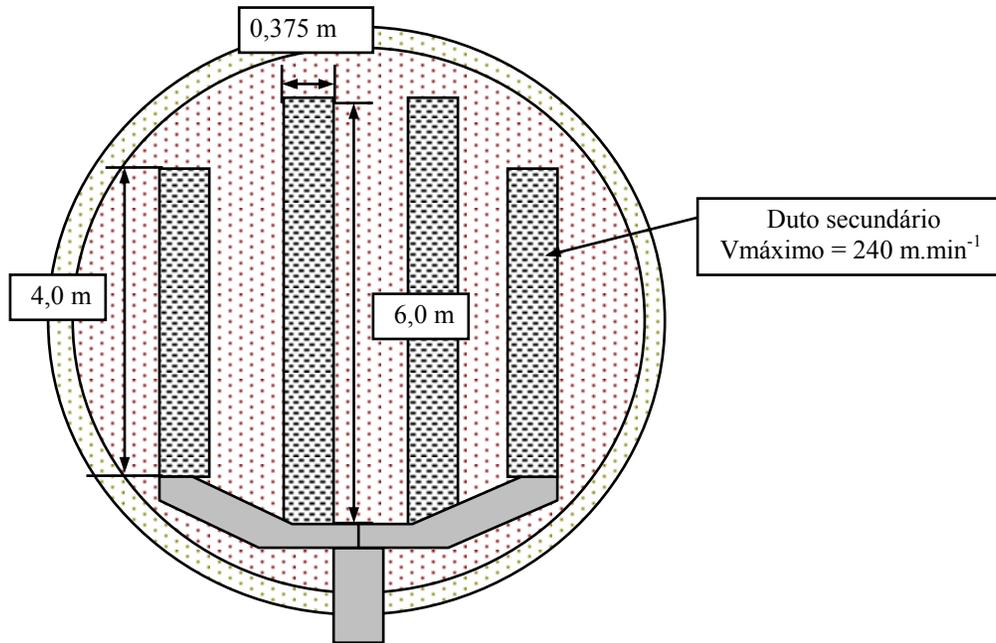


Figura 45 - Dimensões da área da seção transversal do duto principal

Dutos secundários

A área da base do silo é de 50,26 m², e, para que não ocorra resistência da chapa perfurada à passagem do ar, esta deve ter mais que 10% de área perfurada. Então, a área perfurada deve ser superior a 5,03 m². Se considerarmos uma área perfurada (A_p) de 15 %, este valor será de 7,5 m². Outro valor a ser considerado nestes dutos secundários é a velocidade do ar de saída pelas chapas perfuradas, que não deve ultrapassar 9,1 m.min⁻¹.

Se no silo de 8 metros de diâmetro os dutos secundários forem divididos em quatro, sendo dois de 6 metros de comprimento e dois de 4 metros (Figura 46), terem-se-ão um total de 20 metros de comprimento de dutos secundários, e a largura (L_d) da área perfurada destes dutos será de:

$$L_d = \frac{A_p}{\text{Comp.}} = \frac{7,5 \text{ m}^2}{20 \text{ m}} = 0,375 \text{ m de largura} \quad (50)$$

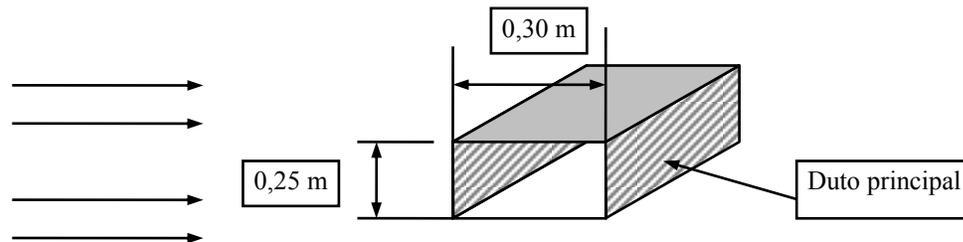


Figura 46 - Dutos secundários de distribuição do ar de aeração.

Distribuição de ar nos dutos secundários

$$\text{Área do duto maior} = 6 \text{ m} \cdot (0,375 \text{ m}) = 2,25 \text{ m}^2 \tag{51}$$

$$\text{Área do duto menor} = 4 \text{ m} \cdot (0,375 \text{ m}) = 1,5 \text{ m}^2 \tag{52}$$

$$\text{Vazão total} = 38,4 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \tag{53}$$

Como são dois dutos, a vazão que passará por cada um dos dutos será a metade ou seja :

$$\text{Vazão parcial } Q_p = 19,2 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \tag{54}$$

$$\text{Área total dos dois dutos} = 2,25 + 1,5 = 3,75 \text{ m}^2 \tag{55}$$

A vazão de ar que irá passar por cada duto secundário é proporcional à sua área perfurada. Portanto,

$$\begin{matrix} 19,2 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} & 3,75 \text{ m}^2 \\ Q_1 & 2,25 \text{ m}^2 \end{matrix} \quad Q_1 = 11,52 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \tag{56}$$

$$\begin{matrix} 19,2 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} & 3,75 \text{ m}^2 \\ Q_2 & 1,5 \text{ m}^2 \end{matrix} \quad Q_2 = 7,68 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \tag{57}$$

Determinação da área da seção transversal dos dutos secundários - A_{ds}

$$A_{ds1} = Q_1 / V_{\text{max}} \tag{58}$$

$$A_{ds2} = Q_2 / V_{\text{max}} \tag{59}$$

em que

V_{max} = velocidade máxima nos dutos secundários = $240 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

$$A_{ds1} = 11,52 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} / 240 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1} = 0,048 \text{ m}^2 \quad (60)$$

$$A_{ds2} = 7,68 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} / 240 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1} = 0,032 \text{ m}^2 \quad (61)$$

Como a largura do duto já foi determinada e é de $0,375 \text{ m}$, a altura da seção transversal dos dutos secundários é determinada dividindo-se as áreas mínimas por $0,375 \text{ m}$.

$$H_{st1} = 0,048 \text{ m}^2 / 0,375 \text{ m} = 0,128 \text{ m} \quad (62)$$

$$H_{st2} = 0,032 \text{ m}^2 / 0,375 \text{ m} = 0,085 \text{ m} \quad (63)$$

Como essas seções transversais são as mínimas, pode-se então confeccionar a seção transversal dos dutos secundários como $0,375 \text{ m}$ de largura x $0,15 \text{ m}$ de altura.

Para determinar se a velocidade do ar que sai dos dutos laterais é inferior a $9,1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, procede-se da seguinte forma:

$$V_1 = 11,52 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} / 2,25 \text{ m}^2 = 5,12 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1} \quad \text{ou} \quad (64)$$

$$V_2 = 7,68 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} / 1,5 \text{ m}^2 = 5,12 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1} \quad (65)$$

A velocidade do ar de saída nos dutos secundários é inferior a $9,1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Portanto, podem-se utilizar essas medidas na confecção dos dutos secundários. Na Figura 47 está uma visualização do dimensionamento efetuado para os dutos secundários.

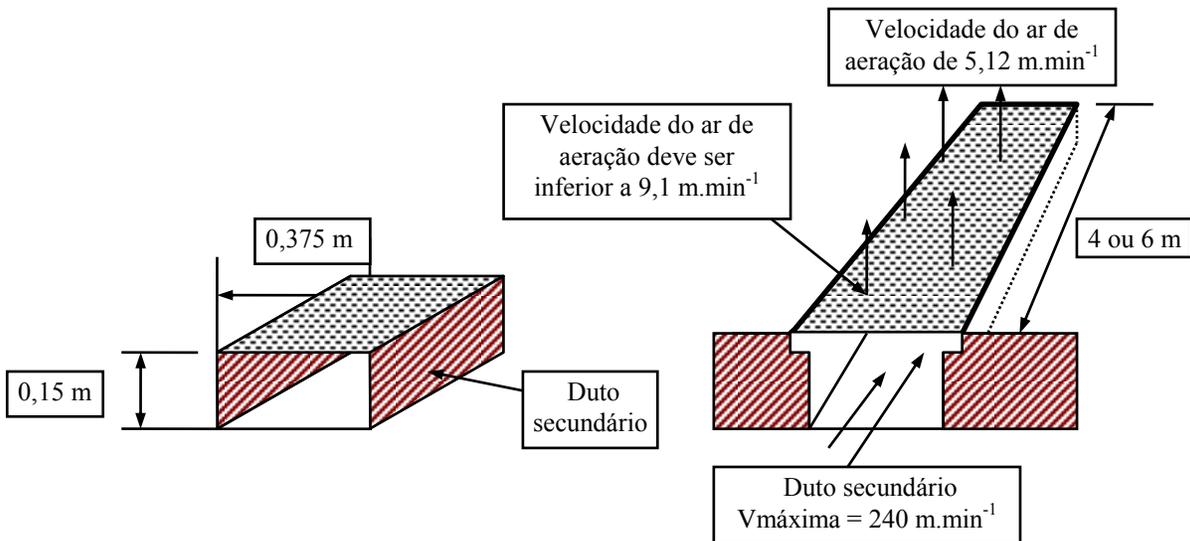


Figura 47 - Visualização do dimensionamento dos dutos secundários para aeração de grãos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADEYMO, T.L. **Development of a natural convection dryer for use in developing countries**. Manhattan, Kansas State University, 1979. 68 p. (M.S. Thesis).
- ARAGÃO, R. F.; CAVALCANTI MATA, M.E.R.M.; MARTINS, J.H. Secagem de milho em secador de convecção natural utilizando resíduo da própria cultura In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 20, **Anais**. Londrina - PR v. 2 p. 1516-1540, Junho de 1991.
- ASAE-STANDARDS. **Standards Engineering Practices Data**. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, Michigan, 1983. 534 p.
- ASHARE-HANDBOOK. **Fundamental Volume**. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, New York, 1969. 1874 p.
- BEER, A.G. Drying and storing agricultural produce on the farm. **Farming in S.A.**, p. 31-70, 1972.
- BERNAL, H.R.G. **Construção e avaliação de um secador de grãos com ar movimentado por convecção natural**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1982. 59p. (Tese Mestrado).
- BRAGA, M.E.D.; CAVALCANTI MATA, M.E.R.M. Curvas de dessecção do milho BR-451. Núcleo de Tecnologia em Armazenagem, Campina Grande, PB **Boletim Técnico No. 6**, 1992. 21 p.
- BROOK, J.A. A cheap crop dryer for the farmer: results and recommended design. **Trop. Stored Prod. Int.**, n. 8, p. 301-307, 1964.
- BROOKER, D.B.; ARKEMA, F.W.B.; HALL, C.W. **Drying cereal grains**. Connecticut, the AVI publishing company, inc. 1974, 265 p.
- CAVALCANTI MATA, M.E.R.M. **Pesquisas sobre secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Campina Grande-PB, Núcleo de Tecnologia em Armazenagem, Universidade Federal da Paraíba., 1981. 145 p. (Relatório de Pesquisa).
- CAVALCANTI MATA, M.E.R.M. Simulation for the drying of beans in a stationary layer drier. In: I Congreso Ibero-Americano de Ingenieria de Alimentos, **Anales**. Valencia, España, Tomo III, Capítulo III, p. 227-243, dez. 1996.
- CAVALCANTI MATA, M.E.R.M. **Efeitos da secagem em altas temperaturas por curtos períodos de tempo, em camada estacionária, sobre a armazenabilidade de sementes de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), variedade “carioca”: Avaliação experimental, modelagem e simulação**. Campinas-SP, Universidade Estadual de Campinas, 1997. 344 p. (Tese de Doutorado em Engenharia de Alimentos).
- HALL, C.W. **Drying farm crops**. Ann Arbor, Eduards Brothers, Michigan, 1971, 336p.
- KOSOSKI, A.R. Dois métodos comparando a obtenção do equilíbrio higroscópico dos grãos. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa-MG, v. 2, n. 2, p. 31-43, 1977.
- PEREIRA, J.A.M.; QUEIROZ, D.M.; RIBEIRO, A.L. Secador de granos com aire movimentado por conveccion natural. **Post-cosecha**, Viçosa-MG, no 5, Marzo/Junio, 1985.
- POPINIGIS, F. **Fisiologia da semente**. Brasília, Agricultura, AGIPLAN, 1977. 289 p.

- SABAAH, M.A. **Prediction of batch drying performance with natural air**. Purdue University, 1968, 120 p. (Tese Ph.D.).
- SILVA, J.N.; PINHEIRO FILHO, J.B.; SEDIYAMA, G.C.; CONDÉ, A.R. Curvas de equilíbrio higroscópico do cacau. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa-MG, v. 4, n. 2, p. 31-38, 1979.
- SILVA, J.S. Estado da arte da secagem e armazenagem de grãos no Brasil. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa-MG, v. 3, n. 1, p. 1-17, 1993.
- SILVA, J. S. **Pré-processamento de produtos agrícolas**. Juiz de Fora, MG. Instituto Maria, 1995. 500p.
- TOLEDO, F.F.; MARCOS FILHO, J. **Manual das sementes: Tecnologia da produção**. São Paulo, Ed. Agronômica Ceres, 1977. 224 p.
- WHILHELM, L.R. Numerical calculation of psychrometric properties. In: SI units. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Michigan, v. 19, n. 2, p. 318-325, 1976.