



Ministério da Agricultura,  
Pecuária e Abastecimento

# Secagem de Grãos

José Antonio Portella  
Luiz Eichelberger

**Embrapa**

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento  
Município de Várzea Grande - Mato Grosso  
Ministro

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Conselho de Administração  
Márcio Forés de Almeida  
Presidente

Alberto Dupas Portugal  
Vice-Presidente

Dietrich Gerhard Gust  
José Honório Jacomini

# Secagem de Grãos

Diretor Executivo de Engenharia  
Alberto Dupas Portugal

Diretor Técnico  
Roniato Hideo Nishiyama

Diretor Daniel Giacomelli Scobian  
José Roberto Rodrigues Petes  
Diretores

Empresa Trigo  
Benami Sacalnik  
Chefe-geral

João Carlos Ignaczak  
Chefe Adjunto de Administração

João Francisco Sartori  
Chefe Adjunto de Comunicação e Negócios

José Elói Denardin  
Chefe Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento

**República Federativa do Brasil**  
*Fernando Henrique Cardoso*  
Presidente

**Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**  
*Marcus Vinícius Pratini de Moraes*  
Ministro

**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**  
**Conselho de Administração**  
*Márcio Fortes de Almeida*  
Presidente

*Alberto Duque Portugal*  
Vice-Presidente

*Dietrich Gerhard Quast*  
*José Honório Accarini*

*Sérgio Fausto*  
*Urbano Campos Ribeiral*  
Membros

**Diretoria Executiva da Embrapa**  
*Alberto Duque Portugal*  
Diretor-Presidente

*Bonifácio Hideyuki Nakazu*  
*Dante Daniel Giacomelli Scolari*  
*José Roberto Rodrigues Peres*  
Diretores

**Embrapa Trigo**

*Benami Bacaltchuk*  
Chefe-geral

*João Carlos Ignaczak*  
Chefe Adjunto de Administração

*João Francisco Sartori*  
Chefe Adjunto de Comunicação e Negócios

*José Eloir Denardin*  
Chefe Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento

**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**

**Embrapa Trigo**

**Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**



# Secagem de Grãos

**José Antonio Portella**

**Luiz Eichelberger**

**Embrapa Trigo**

**Passo Fundo, RS**

**2001**

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Trigo

Rodovia BR 285, km 174

Telefone: (54) 311-3444

Fax: (54) 311-3617

Caixa Postal 451

99001-970 Passo Fundo, RS

E-mail: biblioteca@cnpt.embrapa.br

### **Comitê de Publicações**

Rainoldo Alberto Kochhann - *Presidente*

*Membros:* Arcenio Sattler, Ariano Morais Prestes, Cantídio Nicolau Alves de Sousa, Delmar Pöttker, Gilberto Rocca da Cunha, João Carlos Haas, José Roberto Salvadori, Osmar Rodrigues

*Tratamento Editorial:* Fátima Maria De Marchi

*Capa:* Liciane Duda Bonatto

*Ficha Catalográfica:* Maria Regina Martins

Esta publicação foi produzida mediante convênio entre Embrapa Trigo, Emater-RS, Epagri, AgipLiquigás, Bergazzi Máquinas e Equipamentos Ltda. e Stecri.

**1ª edição**

**1ª impressão (2001): 1.000 exemplares**

**Todos os direitos reservados.**

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

---

Portella, José Antonio.

Secagem de grãos. / José Antonio Portella, Luiz Eichelberger -  
Passo Fundo : Embrapa Trigo, 2001.

194 p. ; 21 cm.

1. Grão - Secagem. 2. Grão - Manejo. 3. Grão - Beneficiamento. 4. Pós-colheita. I. Eichelberger, L. II. Título.

CDD: 631.56

---

© Embrapa Trigo - 2001

## **Autores**

### **José Antonio Portella**

Pesquisador, M.Sc.

Mecanização Agrícola

Embrapa Trigo

Caixa Postal, 451

99001-970 Passo Fundo, RS

E-mail: [portella@cnpt.embrapa.br](mailto:portella@cnpt.embrapa.br)

### **Luiz Eichelberger**

Engenheiro Agrônomo, Dr.

Bolsista CNPq/Estagiário da Embrapa Trigo

Tecnologia de Pós-colheita

Rua Duque de Caxias, 615

Bairro Cruzeiro

99070-210 Passo Fundo, RS

E-mail: [luizei@terra.com.br](mailto:luizei@terra.com.br)

# Apresentação

## Sumário

O processo produtivo em uma propriedade rural não termina quando a colheita se encerra. As operações de pós-colheita são fundamentais para garantia da preservação de um produto econômico valorizado e qualitativamente competitivo.

A necessidade de secar os grãos antes do armazenamento, para garantir a durabilidade do produto por mais tempo, é fundamental, principalmente quando esse processo será feito na própria propriedade. O desenvolvimento de tecnologias que otimizem essa prática é uma das atividades de pesquisa desenvolvidas pela equipe de pesquisadores da Embrapa Trigo.

O trabalho "Secagem de Grãos", que a Embrapa Trigo tem o prazer de disponibilizar para seus clientes, procura reunir conceitualização, princípios, sistemas, equipamentos e processos que são empregados pelos diferentes executores dessa tarefa nas propriedades ou nas empresas armazenadoras.

Esperamos que estas informações possam oferecer aos leitores conhecimentos que permitam uma maior eficácia no processo de armazenar e preservar a qualidade do grão armazenado.

**Benami Bacaltchuk**

**Chefe-geral da Embrapa Trigo**

## Sumário

INTRODUÇÃO .....	21
CONCEITO DE SECAGEM.....	27
A ÁGUA E OS GRÃOS .....	29
Disposição da água nos grãos .....	29
Umidade relativa do ar .....	30
Propriedades do ar .....	33
Equilíbrio higroscópico .....	38
PRINCÍPIOS DE SECAGEM .....	43
CURVA DE SECAGEM .....	46
QUANTIFICAÇÃO DO PROCESSO DE SECAGEM ....	49
Quantidade de água a evaporar .....	50
Velocidade de secagem .....	54
Retardamento do início da secagem.....	59
Tempo de secagem .....	60
Eficiência energética .....	61
Rendimento térmico.....	62
Temperatura de secagem e a qualidade dos grãos .....	68
SISTEMAS DE SECAGEM.....	73
Secagem natural .....	74

Secagem artificial .....	75
<i>Secagem artificial com ar natural forçado</i> .....	76
<i>Ar quente forçado</i> .....	81
<i>Secagem estacionária</i> .....	82
<i>Secagem contínua</i> .....	87
<i>Secagem intermitente</i> .....	92
Seca-aeração .....	102
COMPONENTES DO SISTEMA DE SECAGEM .....	105
Coluna de secagem .....	106
Difusores de ar .....	110
Grupo aerotérmico .....	110
<i>Fornalhas e combustíveis</i> .....	114
<i>Ventiladores</i> .....	119
<i>Fluxo cruzado</i> .....	121
<i>Fluxo concorrente</i> .....	123
<i>Fluxo contracorrente</i> .....	124
<i>Fluxo misto</i> .....	124
TIPOS DE SECADORES .....	125
Secadores estacionários ou de leito fixo .....	132
<i>Operação</i> .....	136
<i>Regulagens</i> .....	138
Secadores intermitentes .....	139
<i>Operação</i> .....	140
<i>Regulagens</i> .....	141
Secadores contínuos .....	142
<i>Operação</i> .....	144
<i>Regulagens</i> .....	146
Secadores contínuos usados como intermitentes .....	148
<i>Operação</i> .....	149
<i>Regulagens</i> .....	150
FLUXO DE SECAGEM .....	150

MANUTENÇÃO DE SECADORES .....	153
CUIDADOS PARA EVITAR ACIDENTES .....	154
ESTUDO DE CASO: uso de gás liquefeito de petróleo na secagem estacionária de milho em secador de leito fixo .....	157
<b>Introdução</b> .....	157
<b>Resultados</b> .....	162
<b>Conclusões</b> .....	179
CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	181
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	185

Fig. 2. Crático assintótico de equilíbrio .....	36
Fig. 3. Curva psicrométrica do ponto de equilíbrio higroscópico dos grãos em função da umidade relativa do ar .....	40
Fig. 4. Fluxos de massa e energia, considerando a movimentação de umidade a partir dos grãos .....	45
Fig. 5. Curva de processo de secagem .....	67
Fig. 6. Diagrama de determinação da perda de massa por efeito da secagem, em porcentagem de peso .....	84
Fig. 7. Construção de um manômetro em U .....	90
Fig. 8. Resistência de uma camada de grãos à passagem do ar. Adaptado de Sheud (1953) .....	99
Fig. 9. Silo-secador estacionário de fundo falso perforado .....	83
Fig. 10. Modelo comercial de secador contínuo .....	88
Fig. 11. Secador intermitente .....	96
Fig. 12. Esquema representativo do sistema de seca-estação .....	103

## Lista de Figuras

Fig. 1. Psicrômetro .....	32
Fig. 2. Gráfico psicrométrico .....	36
Fig. 3. Curva característica do ponto de equilíbrio higroscópico dos grãos em função da umidade relativa do ar .....	40
Fig. 4. O princípio da secagem, representando a movimentação do ar e da água a partir dos grãos .....	45
Fig. 5. Curva típica de secagem .....	47
Fig. 6. Diagrama de determinação da perda de massa por efeito da secagem, em percentagem de peso .....	54
Fig. 7. Construção de um manômetro em U .....	78
Fig. 8. Resistência de uma camada de grãos à passagem do ar. Adaptado de Shedd (1953) .....	79
Fig. 9. Silo secador estacionário de fundo falso perfurado .....	83
Fig. 10. Modelo comercial de secador contínuo .....	88
Fig. 11. Secador intermitente .....	96
Fig. 12. Esquema representativo do sistema de seca-aeração .....	103

Fig. 13. Esquema de um gerador de ar quente de fogo direto. ....	111
Fig. 14. Esquema de um gerador de ar quente de fogo indireto .....	112
Fig. 15. Tipos de ventiladores usados em sistemas de secagem .....	120
Fig. 16. Desenhos esquemáticos de quatro tipos fluxos de ar em secadores de elevada temperatura: a) fluxo cruzado, b) fluxo concorrentes, c) fluxo contracorrente e d) fluxo misto .....	122
Fig. 17. Vista geral de um secador de leito fixo .....	133
Fig. 18. Secador contínuo de fluxo misto .....	143
Fig. 19. Evolução da umidade de grãos de milho colhidos com três níveis de umidade média (35%, 25% e 18%), durante a secagem estacionária em secador de leito fixo com temperatura de 100 °C, 70 °C e 40 °C .....	164
Fig. 20. Comportamento da umidade de cada camada da massa de grãos de milho (◇: 5 cm, □: 19 cm, △: 32 cm e X: 45 cm do fundo da massa), colhida com três níveis de umidade (linhas), durante o processo de secagem estacionária em secador de leito fixo, usando-se três níveis de temperatura do ar de secagem (colunas). ....	167
Fig. 21. Evolução da temperatura de grãos de milho colhidos com três níveis de umidade média (35%, 25% e 18%), durante a secagem estacionária em secador de leito fixo com temperatura de 100 °C, 70 °C e 40 °C .....	170

**Fig. 22.** Comportamento da temperatura de cada camada da massa de grãos de milho ( $\diamond$ : 5 cm,  $\square$ : 9 cm,  $\triangle$ : 32 cm e X: 45 cm do fundo da massa), colhida com três níveis de umidade (linhas), durante o processo de secagem estacionária em secador de leito fixo, usando-se três níveis de temperatura do ar de secagem (colunas) ..... 172

**Fig. 23.** Eficiência do método de secagem estacionária de grãos de milho, em secador de leito fixo, com três níveis de temperatura do ar de secagem (100 °C, 70 °C e 40 °C) e três níveis de umidade de colheita (35%, 25% e 18%) ..... 175

Importância econômica da secagem estacionária de grãos de milho ..... 176

Tabela 2. Conteúdo máximo do vapor de água no ar, ao nível do mar, para vários temperaturas ..... 177

Tabela 3. Umidade de equilíbrio hipotético de grãos de milho em função da temperatura ambiental ..... 178

Tabela 4. Quantidade de água eliminada dos grãos para levá-los desde o grau de umidade de colheita até o grau de umidade para a comercialização (14%) ..... 179

Tabela 5. Limites máximos de temperatura na massa de grãos para a secagem de algumas espécies agrícolas ..... 180

Tabela 6. Tempo de armazenamento (dias) de grãos de milho em função da temperatura e da umidade, sem que ocorra deterioração ..... 181

Tabela 7. Efeito da temperatura de secagem no secador intermitente, sobre a germinação de sementes de trigo ..... 100

## Lista de Tabelas

- Tabela 1.** Grau de umidade no armazenamento para a conservação de grãos de algumas culturas de importância econômica ..... 28
- Tabela 2.** Conteúdo máximo de vapor de água do ar, ao nível do mar, para várias temperaturas ..... 33
- Tabela 3.** Umidade de equilíbrio higroscópico de grãos de milho em função da temperatura ambiental ..... 42
- Tabela 4.** Quantidade de água eliminada dos grãos para levá-los desde o grau de umidade na colheita até o grau de umidade para a comercialização (14%) ..... 53
- Tabela 5.** Limites máximos de temperatura na massa de grãos para a secagem de algumas espécies agrícolas ..... 70
- Tabela 6.** Tempo de armazenamento (dias) de grãos de milho em função da temperatura e da umidade, sem que ocorra deterioração ..... 81
- Tabela 7.** Efeito da temperatura de secagem no secador intermitente sobre a germinação de sementes de trigo ..... 100

<b>Tabela 8.</b> Poder calorífico inferior (PCI) de diversos combustíveis (1kcal = 4,19 kJ) .....	113
<b>Tabela 9.</b> Efeito do tipo de secador sobre o ar de secagem, máxima temperatura do grão, e suscetibilidade a quebras em milho .....	128
<b>Tabela 10.</b> Temperatura do grão, grau de umidade e suscetibilidade a quebra, após a secagem, em diferentes pontos da coluna de grãos em secador convencional de fluxo cruzado, sem resfriamento (umidade inicial 25,5% e umidade final 19,0%, com temperatura de secagem de 110 °C) .....	129
<b>Tabela 11.</b> Efeito do grau de umidade final sobre a suscetibilidade a quebra de milho com 25% de umidade em secador convencional de fluxo cruzado (temperatura de 110 °C) .....	130
<b>Tabela 12.</b> Umidade inicial e final, taxa de secagem e duração da secagem de grãos de milho colhidos com 35%, 25% e 18% de umidade e secados em secador de leito fixo, à temperatura de 100 °C, 70 °C e 40 °C) .....	165
<b>Tabela 13.</b> Umidade relativa do ar ambiental (UR) e temperatura média do ar em diferentes pontos de coleta na secagem estacionária de grãos de milho, colhidos na safra de 2001, em secador de leito fixo, para três níveis de umidade inicial (35%, 25% e 18%) e três níveis de temperatura de secagem (100 °C, 70 °C e 40 °C) .....	173
<b>Tabela 14.</b> Avaliação do consumo total, horário e unitário e do custo de gás na secagem estacionária de grãos de milho, em secador de leito fixo, para três níveis de umidade inicial (35%, 25% e 18%) e três níveis de temperatura de secagem (100 °C, 70 °C e 40 °C). .....	176

**Tabela 15.** Consumo e custo de energia elétrica, custo do combustível e custo energético total da secagem estacionária de grãos de milho em secador de leito fixo, para três níveis de umidade inicial (35%, 25% e 18%) e três níveis de temperatura de secagem (100 °C, 70 °C e 40 °C) ..... 178

## Introdução

Apesar de o Brasil ser um dos maiores produtores agrícolas, sua produção agrícola não é suficiente para atender suas necessidades. Como resultado, a população cresce 2,5% ao ano, tendo como consequência o aumento da demanda por alimentos. A necessidade de uma rede de armazenamento de grãos adequada para atender a essa demanda é fundamental para garantir a oferta de grãos nos períodos de entressafra e de eventuais interrupções de safra. Esse equilíbrio entre a demanda e a oferta tem como consequências a regulação do abastecimento e a estabilidade dos preços. Além disso, a exportação de grãos tem importante participação no equilíbrio da balança comercial brasileira. Em razão disso, o país necessita ampliar pesquisas na área de secagem e armazenamento de grãos para as condições brasileiras.

## Introdução

Apesar de o Brasil ser um país eminentemente agrícola, sua produção de grãos caracteriza-se por apresentar safras irregulares. Por outro lado, a população cresce 2,5% a 3,0% ao ano, tendo como consequência o aumento da demanda por alimentos. A necessidade de uma rede de armazenamento e de tecnologia adequada para atender a essa demanda é fundamental para equilibrar a oferta de grãos nos períodos de entressafra e de eventuais frustrações de safra. Esse equilíbrio entre a demanda e a oferta tem como consequências a regularidade do abastecimento e a estabilidade dos preços. Além disso, a exportação de grãos tem importante participação no equilíbrio da balança comercial brasileira. Em razão disso, o país necessita ampliar pesquisas na área de secagem e armazenamento de grãos para as condições brasileiras.

As estimativas mais otimistas indicam que as perdas totais de grãos no Brasil oscilam entre 25% e 30% da produção (Brasil, 1993). Essas perdas referem-se ao ponto de colheita inadequado, má regulagem e operação de máquinas, transporte deficiente e más condições de secagem e armazenamento. Incentivando-se a secagem e o armazenamento na propriedade agrícola, é possível reduzir substancialmente as perdas dos produtos.

Segundo Silva (2000), a capacidade estática brasileira de armazenamento situa-se em torno de 90 milhões de toneladas, o que atenderia a produção atual de grãos. No entanto, cerca de 50% dessa rede armazenadora é constituída de armazéns convencionais para o armazenamento de grãos ensacados, imprópria para o armazenamento a granel. Cerca de 55% das instalações adequadas ao armazenamento a granel fazem parte da rede oficial e 45% são de responsabilidade da iniciativa privada. Essa inadequação de parte da rede armazenadora é agravada pela sua má distribuição, mais concentrada na faixa litorânea do país e em grandes cidades. Além disso, apenas 5% da capacidade armazenadora localiza-se nas propriedades agrícolas. Caracteriza-se, assim, um quadro em que a quase totalidade da produção de grãos é armazenada por intermediários, cooperativas e governo (Silva & Pinto, 1993), limitando o controle da comercialização por parte do produtor.

Cerca de 80% da produção nacional de grãos é secada de maneira natural, permanecendo na lavoura até atingir o grau de umidade que permita o armazenamento. No entanto, a maioria dos produtos agrícolas (grãos, sementes e frutos) deveriam ser colhidos próximo do ponto de maturação fisiológica, quando apresentam seu máximo peso de matéria seca e qualidade. Isso significa dizer que os componentes nutricionais, como carboidratos, proteínas e lipídios (variáveis, segundo as espécies), apresentam seu máximo peso na matéria seca. Entretanto, na maturação fisiológica os grãos apresentam elevado teor de água (entre 30% e 40%, dependendo da espécie), acarretando problemas de colheita, como debulha deficiente, embuchamento de máquinas e danos mecânicos por amassamento. Assim, os grãos devem ser colhidos tão logo esses problemas deixem de existir. Esse é, por definição, o ponto de colheita e se situa na faixa de grau de umidade de 25% para milho, 18% para soja, 24% para arroz e 20% a 22% para trigo, cevada e aveia.

Quando se colhe com umidade elevada, a atividade metabólica de respiração dos grãos e dos microrganismos presentes na massa ocorre em elevadas taxas, levando ao aquecimento da massa, devido à liberação de energia calórica. Essa condição também é propícia ao desenvolvimento de fungos e de insetos, conduzindo à rápida deterioração. Através da remoção do excesso de água pela secagem, e com uma correta arma-

zenagem, torna-se possível a conservação de produtos agrícolas até a entressafra.

De maneira geral, nas propriedades familiares pequenas e médias, responsáveis por cerca de 75% da produção brasileira de grãos, não é realizada secagem. Na maioria dos casos, a colheita é atrasada até o grão atingir umidade adequada ao armazenamento. Este é feito em depósitos ou paióis, sujeitos ao ataque de insetos, de roedores e de pássaros e ao desenvolvimento de fungos (Oliveira, 1989; Martins & Oliveira, 1992). Além disso, em alguns casos, os grãos são armazenados com umidade inadequada.

Os estabelecimentos rurais com menos de 50 hectares são alvo de problemas crônicos ligados a recursos financeiros e tecnológicos e seus proprietários enfrentam inúmeras dificuldades para colocar os produtos no mercado. Dependem de intermediários, sujeitando-se às desvantajosas condições por eles impostas, reduzindo a rentabilidade econômica. Frequentemente, são obrigados a vender seus produtos na safra, quando, historicamente, preços são menores. O milho produzido na pequena propriedade constitui um exemplo clássico, pois é comercializado imediatamente após a colheita por causa das perdas elevadas causadas por secagem e armazenamento inadequados, mesmo sabendo que será readquirido a preços mais elevados. Deve ser considerado ainda que, nesse segmento, a capacidade de investimento para aquisição de equipamentos de seca-

gem é limitada. Apenas a partir dos anos 80 tem sido buscadas alternativas de equipamentos com preços mais acessíveis a produtores de escala familiar.

No Estado do Rio Grande do Sul essa realidade não é diferente. A maioria dos produtos destinados a consumo interno e mesmo aqueles voltados para a exportação são produzidos em pequenas e médias propriedades, com área abaixo de 50 hectares.

Secadores de grãos são equipamentos usados para a redução da umidade de grãos, condição essencial para que, uma vez colhidos no momento correto, possam ser conservados até o consumo ou industrialização. No Brasil, os secadores comercialmente mais usados são os do tipo cascata com capacidade de secagem variável, construídos com quantidades expressivas de componentes metálicos e de elevado custo (Silva & Pinto, 1993). Os secadores intermitentes, com fluxo de ar cruzado, do tipo Pampeiro, semelhantes aos modelos europeus e americanos, para faixas de capacidade inferiores a 10 t/hora, são muito usados na região arrozeira. Esses secadores são mais usados em indústrias, cooperativas, unidades coletoras oficiais e privadas e grandes produtores. Secadores estacionários de leito fixo são secadores de baixo custo, adequados para uso em pequenas e médias propriedades. Além disso, podem ser parcialmente construídos com materiais existentes na propriedade. Recentemente, têm se difundido o uso comunitário em regiões em que predominam pequenas

propriedades.

A partir de 1980, diversos trabalhos têm sido realizados no sentido de estudar e de adaptar os secadores de leito fixo, fluxo concorrente e fluxo contracorrente para as condições brasileiras. O foco principal desses estudos refere-se ao aumento da eficiência energética e à redução de custos de construção e operação, com o objetivo de tornar viável o uso do equipamento por produtores. Porém isso não basta. É importante, também, a tecnologia empregada na realização da secagem, devendo-se tomar uma série de cuidados para que a qualidade do produto não seja afetada negativamente (Biagi et al. 1992). Esses cuidados referem-se ao tempo de exposição, à temperatura e ao fluxo do ar de secagem, ou seja, alguns parâmetros que devem ser definidos para cada tipo de secador, em função do sistema de secagem usado, do tipo e do uso do grão. A quantidade deficiente de trabalhos de pesquisa associando os parâmetros de secagem à qualidade de grãos limita o estabelecimento de procedimentos com vistas à manutenção dessa qualidade para fins industriais, para a alimentação humana e animal e para a produção de sementes.

O principal objetivo desta publicação é fornecer subsídios e auxílio a profissionais e técnicos envolvidos com a secagem de grãos na melhoria do manejo e na operação dos equipamentos mais usados. Objetiva também proporcionar uma oportunidade de revisão dos concei-

tos básicos envolvidos no processo de secagem.

## Conceito de Secagem

Secagem é o processo de retirada da água dos grãos até o nível que permita o armazenamento por períodos mais ou menos longos.

O teor de água adequado para o armazenamento depende da espécie e do período que se pretende armazenar os grãos (Tabela 1). Além desses, existem outros fatores que também influem no nível de umidade adequado, como a temperatura, a umidade relativa do ar e o nível de danos mecânicos.

Segundo Harrington (1972), a umidade ideal para conservação de grãos em ambientes abertos situa-se na faixa de 10% a 13%. A partir de 14%, os grãos ainda respiram de forma ativa, processo que ocorre às expensas das reservas acumuladas, tendo como seqüências a liberação de calor, o desenvolvimento de microrganismos, principalmente fungos, e a deterioração quantitativa e qualitativa dos grãos. Acima de 18%, esse processo é bastante acelerado, podendo ocorrer fermentações e podridões bacterianas. Acima de 35%,

dependendo da espécie, pode ocorrer a germinação.

A partir de 14% de umidade dos no armazenamento

**Tabela 1.** Grau de umidade no armazenamento para a conservação de grãos de algumas culturas de importância econômica.

Espécie	Período de conservação	
	Até 1 ano	Mais de 1 ano
Milho	12-13	10-11
Arroz	13-14	11-12
Soja	11	9-10
Sorgo	12	10-11
Algodão	11	9-10
Feijão	12	10-11
Trigo	12-13	11
Aveia	13-14	12
Cevada	13	11
Amendoim	9	7-8
Girassol	9	8
Café	12	11
Canola	9	8

É importante distinguir a umidade de armazenamento para a conservação dos grãos da umidade de comercialização. No Brasil, a umidade padrão para a comercialização de grãos é de 14%. A venda e entrega de grãos com umidade inferior a 14% representa prejuízo para o produtor ou armazenista. As técnicas mo-

dernas de aeração e termometria de silos armazenadores permitem que se ajuste a umidade para esse nível no momento da comercialização.

## A Água e os Grãos

### Disposição da água nos grãos

A água acompanha a maioria dos processos biológicos. As reações químicas desses processos, em sua maioria, ocorrem em meio aquoso. Uma vez que os grãos são organismos vivos, a eliminação do excesso de água é fundamental para a viabilização do armazenamento e conservação dos grãos, causando a redução da atividade biológica.

As formas de retenção da água nos grãos são importantes no entendimento da secagem. Segundo Lasseran (1978), no interior dos grãos a água encontra-se retida em diferentes formas de acordo com as forças de atração:

- **água de constituição**, ou água monomolecular, é a água que se encontra combinada formando grupos químicos. É uma camada monomolecular, fortemente po-

larizada por pontes de hidrogênio com moléculas do material biológico. Umidade abaixo de 5%.

- **água absorvida**, ou água polimolecular, é a água fixada sobre a camada monomolecular através da atração molecular, formando uma camada polimolecular. Está fortemente ligada aos constituintes orgânicos por força eletromagnética. Umidade de 5 a 13%. Esses dois tipos de água não têm atividade biológica.

- **água solvente**, ou água intersticial, é a água com leve atração, retida apenas por pressão osmótica e capilaridade. Mantém as diversas substâncias dissolvidas nas células, como o amido, sais, açúcares e proteínas e tem atividade biológica, podendo permitir reações enzimáticas. Umidade de 13 a 27%.

- **água livre**, ou água de impregnação, é a água fracamente retida e ocupa os espaços intercelulares. Está retida mecanicamente, elevadamente móvel e de fácil evaporação. Umidade acima de 27%. Esses limites são válidos para grãos de milho e são variáveis em função da espécie. Por ser água biologicamente ativa, estes dois últimos tipos de água são o objetivo da secagem.

## **Umidade relativa do ar**

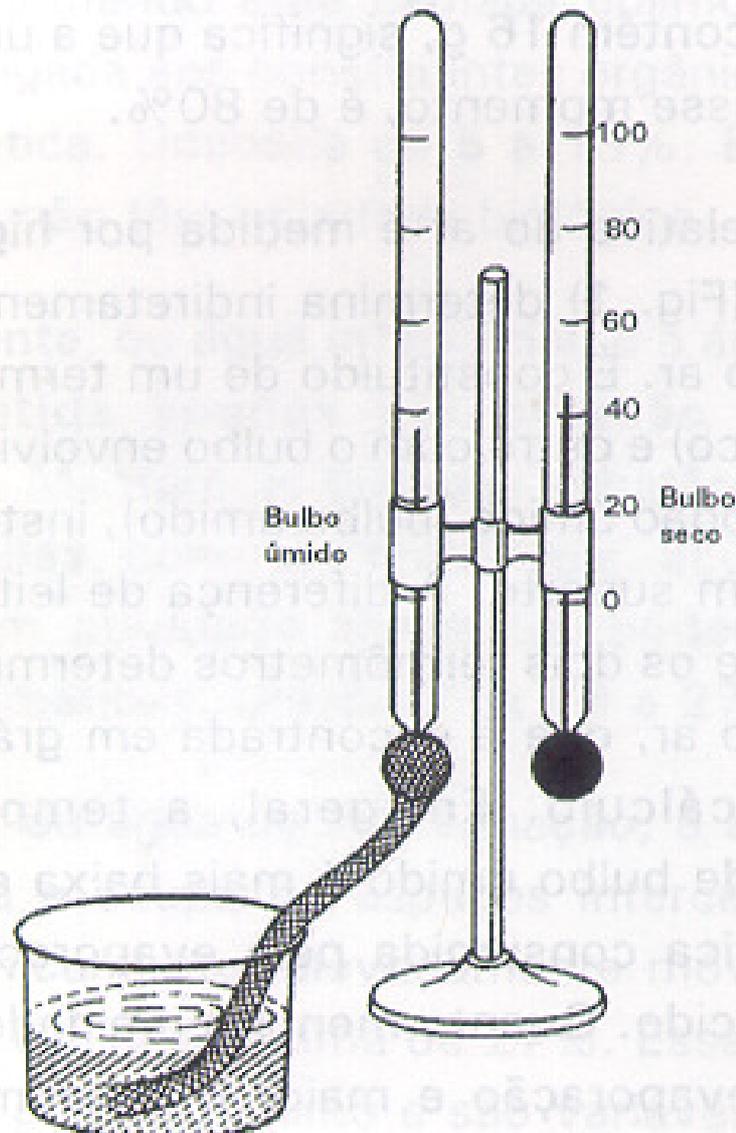
A umidade relativa do ar (UR) é a quantidade de água,

sob a forma de vapor de água, contida no ar em relação à quantidade máxima que este é capaz de conter, a uma determinada temperatura e pressão atmosférica. Por exemplo, se um determinado volume de ar é capaz de conter um máximo de 20 g de vapor de água, e, atualmente, contém 16 g, significa que a umidade relativa do ar, nesse momento, é de 80%.

A umidade relativa do ar é medida por **higrômetro**. O **psicrômetro** (Fig. 1) determina indiretamente a umidade relativa do ar. É constituído de um termômetro normal (bulbo seco) e outro com o bulbo envolvido por gaze, tecido ou algodão úmido (bulbo úmido), instalados paralelamente num suporte. A diferença de leitura da temperatura entre os dois termômetros determina a umidade relativa do ar, que é encontrada em gráficos, tabelas ou por cálculo. Em geral, a temperatura do termômetro de bulbo úmido é mais baixa em razão da energia calórica consumida pela evaporação da água contida no tecido. Quanto menor a umidade relativa do ar, maior a evaporação e maior o consumo de calor. Quanto maior a diferença entre as duas leituras, menor é a umidade relativa do ar.

A uma determinada pressão atmosférica, a quantidade de vapor de água que o ar é capaz de conter varia de acordo com a temperatura. A elevação da temperatura não diminui a massa (gramas) de vapor de água contida no ar em um determinado momento. O que aumenta é a capacidade do ar de conter mais água, conforme ilus-

tra a Tabela 2. Verifica-se, desse modo, que o aumento da temperatura causa a redução da umidade relativa do ar. Em outras palavras, o ar aumenta a sua capacidade de absorver água.



**Fig. 1. Psicrômetro.**

Fonte: Puzzi (1986).

Por exemplo, o ar saturado a  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  contém  $9,4\text{ g}$  de vapor de água. Aumentando-se a temperatura para  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , esse ar permanece com a mesma massa de vapor de água, porém aumenta sua capacidade para

17,0 g. Isso significa que a umidade relativa do ar passou para 55% e que cada metro cúbico de ar pode absorver mais 7,6 g de vapor de água.

**Tabela 2.** Conteúdo máximo de vapor de água do ar, ao nível do mar, para várias temperaturas.

Temperatura (°C)	Vapor de água (g/m <sup>3</sup> )
-10	2,16
0	4,8
5	6,8
10	9,4
12	11,0
15	13,0
20	17,0
40	51,0
100	600,0

## Propriedades do ar

O ar é constituído de vários gases, destacando-se o nitrogênio, o oxigênio e o vapor de água. Para efeito de secagem e aeração de grãos, pode-se considerar o ar atmosférico como dois gases: ar seco + vapor de água.

A concentração de vapor de água no ar atmosférico pode variar de zero a 4% em volume. Apesar dessa pequena concentração, o vapor de água desempenha

importante papel nas operações industriais em que o ar é utilizado, como é o caso da secagem e da aeração de grãos. A uma determinada umidade dos grãos, é a concentração de vapor de água que vai determinar a direção do movimento da água, se grão-ambiente, ambiente-grão ou nem uma nem outra.

O capítulo da Termodinâmica que estuda as propriedades, estados e transformações do ar e suas medidas denomina-se **Psicrometria**. A determinação de cada propriedade do ar pode ser feita por cálculo, tabelas ou gráficos. O método gráfico é o mais empregado e, para tal, usa-se o gráfico psicrométrico (Fig. 2).

As propriedades do ar de interesse em secagem e aeração e sua localização no gráfico da Fig. 2 são:

a) **Temperatura de bulbo seco:** é a temperatura, indicada por termômetro comum, expressa em graus Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ). Está indicada pelas linhas verticais a partir da escala no eixo das abcissas, na base da figura.

b) **Temperatura de bulbo úmido:** é a temperatura medida por termômetro comum que tem o bulbo envolvido por gaze, tecido ou algodão úmido (Fig. 1). A temperatura de bulbo úmido é identificada a partir da escala na linha curva, à esquerda no gráfico, pelas linhas inclinadas para a direita e para baixo (linhas mais próximas).

c) **Umidade relativa do ar:** representa a quantidade de

água existente no ar em relação à sua capacidade máxima, a determinada temperatura e pressão atmosférica. É expressa em porcentagem, sendo determinada, no gráfico, pela linha curva no encontro das linhas verticais da temperatura de bulbo seco com as linhas inclinadas da temperatura de bulbo úmido. Esse ponto é denominado **ponto de estado**.

d) **Ponto de orvalho**: é a temperatura na qual a umidade relativa do ar é 100%. Nesse ponto o ar está saturado, iniciando-se o processo de condensação, e os dois termômetros do psicrômetro marcam temperaturas iguais. O ponto de orvalho é marcado pelas linhas horizontais e sua leitura é feita na escala da temperatura de bulbo úmido, na linha curva à esquerda no gráfico psicrométrico.

e) **Razão de mistura**: é a massa de vapor de água do ar contida em um quilograma de ar seco. É expressa em unidades de massa, ou seja, gramas de vapor de água por quilograma de ar seco (g/kg de ar seco). No gráfico, é determinada pelas linhas horizontais (as mesmas do ponto de orvalho) a partir da escala localizada no eixo das ordenadas (à direita).

f) **Volume específico**: é o volume ocupado pelo ar seco em relação à unidade de massa de ar seco. É expresso em metros cúbicos por quilograma de ar seco ( $m^3/kg$  de ar seco). No gráfico, é determinado pelas linhas inclinadas mais espaçadas. A escala consta nas próprias linhas.

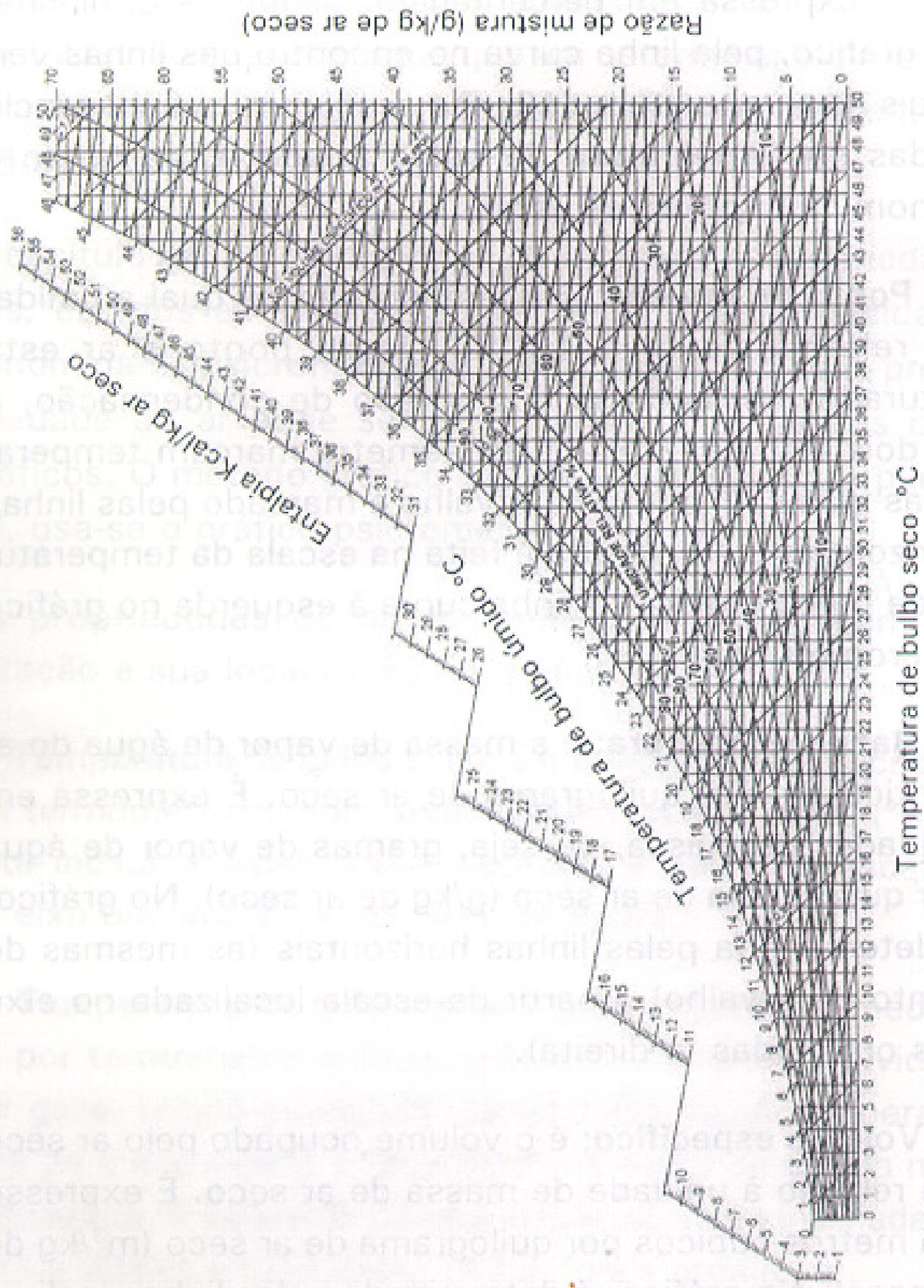


Fig. 2. Gráfico psicrométrico.

g) **Entalpia:** é a quantidade de energia que o ar possui por unidade de massa de ar seco. É determinada pelo prolongamento das linhas inclinadas mais próximas (as mesmas da temperatura de bulbo úmido) até a escala externa, à esquerda do gráfico. É expressa em kcal ou kJ/kg de ar seco.

Para estabelecer as propriedades de um determinado ar, é necessário conhecer duas delas. Por exemplo: conhecendo as temperaturas de bulbo seco e úmido pode-se determinar todas as outras propriedades do ar; conhecendo a umidade relativa do ar e a temperatura de bulbo seco, da mesma forma. No entanto, duas propriedades que são representadas pela mesma linha não permitem a determinação das outras. Por exemplo: o ponto de orvalho e a razão de mistura, ou a temperatura de bulbo úmido e a entalpia.

**Exercício** - com psicrômetro, estabelece-se que, em um determinado momento, a temperatura de bulbo seco foi de 28 °C, e a de bulbo úmido, de 20 °C. Determinar as seguintes propriedades:

**Umidade relativa do ar:** localizar no eixo das abcissas a temperatura de 28 °C (bulbo seco), e na escala da linha curva, à esquerda, a temperatura de 20 °C (bulbo úmido). A partir de 28 °C segue-se a linha vertical até seu encontro com a linha inclinada menos espaçada que parte de 20 °C (bulbo úmido). Esse ponto deve ser marcado e é o **ponto de estado**. A linha curva que passa por esse ponto indica a umidade relativa do ar. No presente exemplo, ela é de 50%.

**Ponto de orvalho:** a partir do ponto de estado marcado, segue-se para a esquerda, pela linha horizontal, até a linha curva mais a esquerda. Lê-se a temperatura do ponto de orvalho na escala de temperatura de bulbo úmido. No presente exemplo, é de 16,5 °C.

**Razão de mistura:** a partir do ponto de estado, segue-se a linha horizontal para a direita, até a escala do eixo das ordenadas. Faz-se a leitura na escala desse eixo. No presente exemplo, é de 12 g de vapor por quilograma de ar seco (12 g/kg de ar seco).

**Volume específico:** observa-se a localização do ponto de estado em relação à linha inclinada mais espaçada, que indica o volume específico. Como o ponto de estado não está localizado sobre a linha, faz-se a interpolação. No presente exemplo, é de 0,902 m<sup>3</sup>/kg de ar seco.

**Entalpia:** a partir do ponto de estado, segue-se a linha inclinada da temperatura de bulbo úmido, para a esquerda, até o cruzamento de seu prolongamento com a escala da entalpia. No presente exemplo, ela é de 14 kcal/kg de ar seco.

## Equilíbrio higroscópico

Os grãos apresentam três características básicas: (a) são maus condutores de calor; (b) são capazes de ab-

sorver ou perder água e (c) têm estrutura porosa. A capacidade de absorver ou perder água é resultante de um balanço de pressões.

A pressão atmosférica é a soma de pressão de gases que a compõem e pressão de vapor de água. Da pressão atmosférica de 760 mm de mercúrio (Hg), ao nível do mar, a pressão de vapor é responsável por apenas 30 a 40 mm de Hg. Entretanto, é a pressão de vapor do ar que vai definir se uma determinada massa de grãos vai absorver ou perder água. Parte da água contida no grão está sob a forma de vapor, o que resulta em uma pressão de vapor na superfície.

Quanto maior a umidade relativa do ar, a uma dada temperatura e limitada pela saturação do ar, maior será a pressão de vapor do ar. Da mesma forma, quanto maior a umidade do grão, maior será a pressão de vapor na sua superfície.

O que determina a direção do fluxo da água é a relação entre a pressão de vapor do ar ( $P_v$ ) e a da superfície do grão ( $P_s$ ). Assim, se:

$P_v > P_s$ : ocorre o umedecimento dos grãos. É o que se chama de **sorção**.

$P_v < P_s$ : ocorre a secagem, ou perda de água. É o que se chama de **dessorção**.

$P_v = P_s$ : o intercâmbio de água torna-se nulo. É o que se chama de **ponto de equilíbrio higroscópico**.

O ponto de equilíbrio higroscópico é o grau de umidade no qual os grãos não ganham nem perdem água para o ar ambiental que os cerca. Em outras palavras, não há umedecimento nem secagem de grãos.

O ponto de equilíbrio higroscópico depende de alguns fatores.

- **Umidade relativa do ar:** a partir de um determinado estado de equilíbrio higroscópico grãos/ar, a elevação da umidade relativa do ar eleva a umidade dos grãos até atingir o novo ponto de equilíbrio.

A curva característica de deslocamento da umidade de equilíbrio em função da umidade relativa do ar não é linear (Fig. 3).

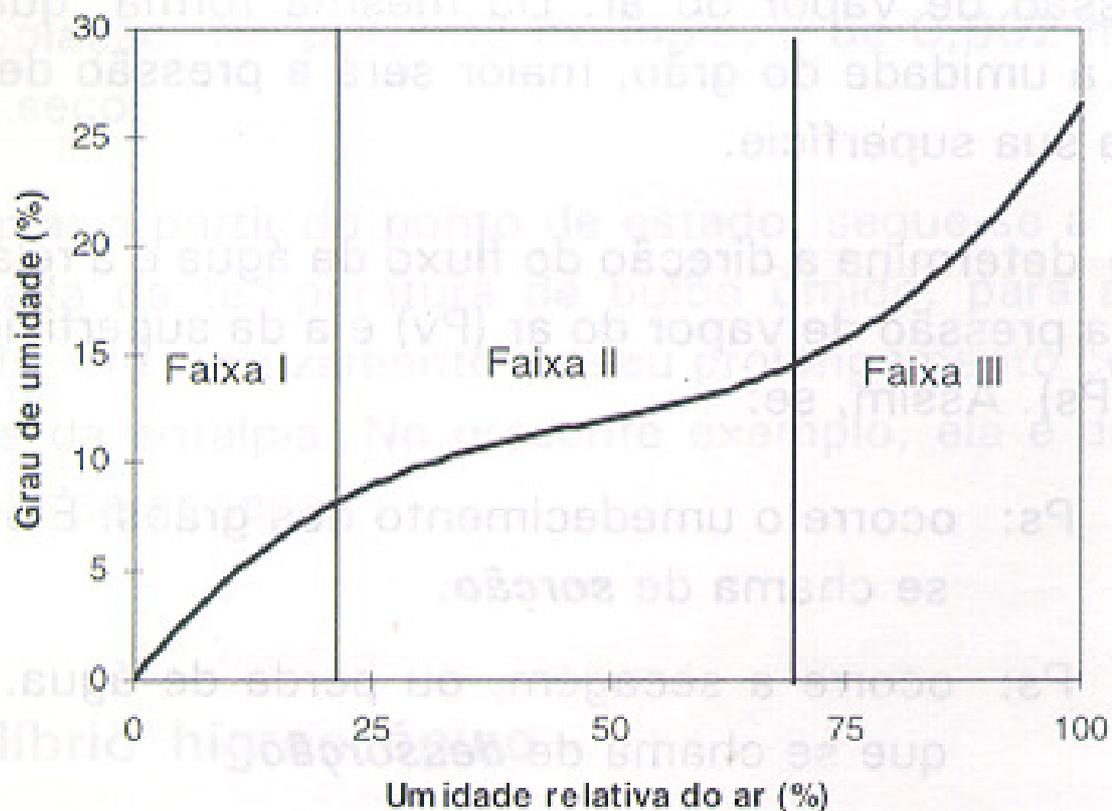


Fig. 3. Curva característica do ponto de equilíbrio higroscópico dos grãos em função da umidade relativa do ar.

A amplitude de variação desse comportamento é variável de acordo, entre outros fatores, com a espécie e a temperatura. A variação da velocidade de absorção de água em cada faixa ocorre em função dos tipos de água presentes nos grãos. Na faixa I, o comportamento da umidade dos grãos está relacionado com a água monomolecular (água de constituição). A faixa II refere-se à água polimolecular, e a faixa III, à água solvente e livre.

A velocidade de perda de água dos grãos para o ar (secagem) é maior que a velocidade de absorção (umedecimento). Com trigo, Pixton e Walburton, citados por Puzzi (1986), usando camada fina de grãos e em condições de laboratório, chegaram à conclusão de que a secagem foi aproximadamente 3 vezes mais rápida que o umedecimento.

- **Temperatura:** a temperatura é um dos principais fatores que influenciam o ponto de equilíbrio higroscópico. Quando aumenta a temperatura, a umidade de equilíbrio cai. O abaixamento da temperatura, ao contrário, leva a um aumento do ponto de equilíbrio higroscópico (Tabela 3).

- **Composição química dos grãos:** a natureza da composição química dos grãos varia de acordo com a espécie e, em menor escala, entre variedades. Em uma mesma condição ambiental, grãos amiláceos (trigo, milho, arroz) apresentam maior umidade de equilíbrio

higroscópico do que os grãos oleaginosos (soja, amendoim, girassol, canola etc.). Isso é definido fundamentalmente em função da presença de óleo, que não tem afinidade com a água. Carboidratos e proteínas têm elevada afinidade com a água pela presença de grupos polares de ligação com a água. Grãos protéicos, como o feijão, têm ponto de equilíbrio umidade elevada, semelhante aos amiláceos.

**Tabela 3.** Umidade de equilíbrio higroscópico de grãos de milho em função da temperatura ambiental.

Temperatura do ar (°C)	Umidade relativa do ar (%)						
	30	40	50	60	70	80	90
16	9,2	10,5	11,8	13,2	14,8	16,7	19,7
20	8,8	10,1	11,5	12,8	14,4	16,4	19,4
24	8,5	9,8	11,1	12,5	14,1	16,1	19,1
28	8,1	9,4	10,8	12,2	13,8	15,8	18,8
32	7,8	9,1	10,5	11,9	13,5	15,5	16,6

- **Histerese:** o equilíbrio higroscópico pode ser obtido por perda de água ou por ganho de água pelos grãos. A histerese é um fenômeno pelo qual os grãos em processo de perda de água (secagem) equilibram com umidade mais elevada que aqueles em processo de ganho de umidade. O efeito da histerese causa uma diferença máxima de 2% na umidade no ponto de equilíbrio.

- **Danos mecânicos:** o tegumento é um dos componen-

tes morfológicos dos grãos que tem, entre outras, as funções de proteção das estruturas internas (endosperma e embrião) e de regulação das trocas gasosas e de água dos grãos com o ambiente. Assim, grãos que têm a integridade do seu tegumento comprometida por amassamento, trincamento e ataque de insetos apresentam o ponto de equilíbrio higroscópico mais elevado. Além da proteção contra a troca de água com o ambiente, o tegumento também protege o grão da entrada de microrganismos.

## **Princípios de Secagem**

A secagem é uma operação crítica quando a colheita é antecipada e os grãos ainda têm elevada umidade. A secagem inadequada, ou sua ausência, é a principal causa da deterioração qualitativa dos grãos durante o armazenamento. Em virtude do trincamento durante a secagem, ocorre uma maior suscetibilidade à quebra de grãos em milho, em soja e em arroz, levando a menor rendimento de grãos inteiros. A secagem pode levar a decréscimo na qualidade de moagem em trigo. Afortunadamente, a secagem de trigo e de soja é requerida menos freqüentemente do que a secagem de milho e de arroz (Brooker et al., 1992).

Segundo Lasseran (1988), o resultado geral da secagem é a separação parcial entre a água (líquido) e a matriz sólida, processo equivalente a várias outras técnicas (filtração, centrifugação, prensagem, evaporação, liofilização etc.). No caso de grãos, a matriz sólida é um alimento contendo proporções variáveis de constituintes bioquímicos, como carboidratos, proteínas, lipídios, vitaminas e minerais. O vapor de água presente nos grãos ocupa todos os espaços intercelulares disponíveis, gerando pressão em todas as direções, até mesmo na superfície destes, denominada de pressão parcial de vapor na superfície do grão. Por outro lado, o vapor de água presente no ar intergranular exerce, também, uma pressão parcial, denominada pressão de vapor do ar.

O processo de secagem envolve a retirada parcial de água do grão por (1) transferência de calor do ar para o grão e, ao mesmo tempo, (2) por fluxo de vapor de água do grão para o ar. A particularidade da secagem, comparada com outras técnicas de separação, é que a remoção das moléculas de água é obtida por uma movimentação de vapor de água (fluxo de massa), em razão da diferença entre as pressões parciais de vapor da superfície do grão e do ar que o envolve.

A condição necessária e suficiente para que o produto seja submetido ao fenômeno de secagem (Fig. 4) é que a pressão parcial de vapor de água da superfície do grão seja maior que a pressão parcial de vapor do ar.

As condições externas e os mecanismos internos do movimento de umidade dos grãos durante a secagem são muito importantes. A retirada da água envolve duas fases, que ocorrem simultaneamente: (1) o transporte do vapor de água da superfície do grão para o ar e (2) o movimento da água do interior para a superfície do grão. O movimento de água do interior do material até a superfície é analisado pelos mecanismos de transferência de massa, que indicarão a dificuldade de secagem dos materiais. Durante a secagem, para que haja a evaporação para o ambiente, a água deve ser transportada do interior até a superfície do grão (Hall, 1980 e ; Park, 1991).

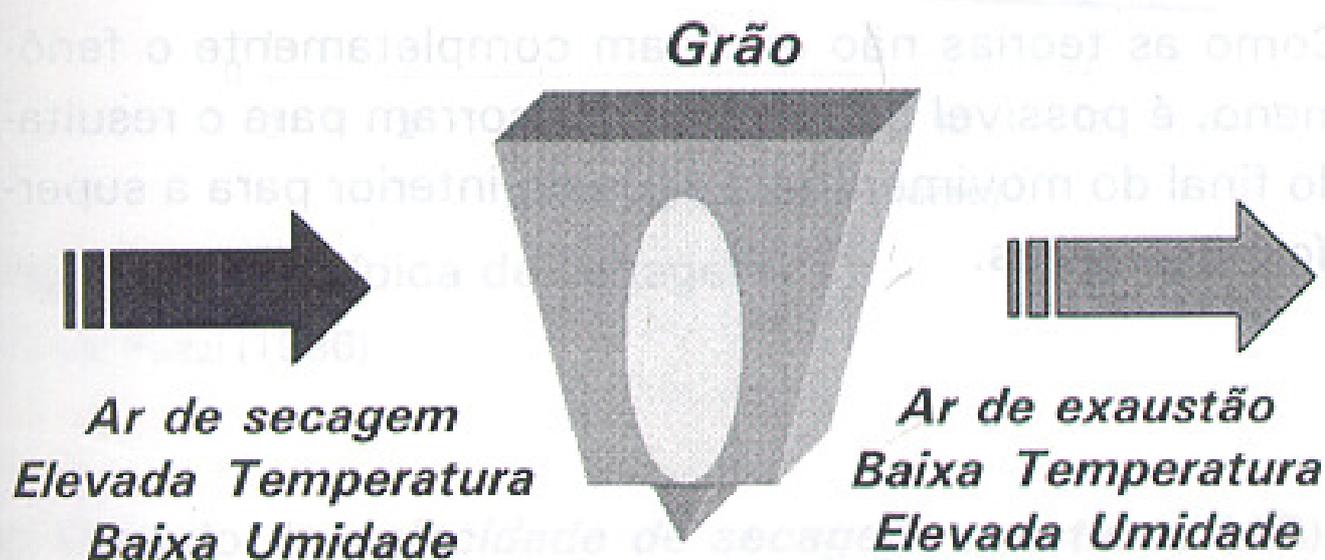


Fig. 4. O princípio da secagem, representando a movimentação do ar e da água a partir dos grãos.

Fonte: Lasseran (1988).

Os mecanismos mais importantes, apoiados em teorias que tentam explicar o movimento da água no interior dos grãos, são:

- 1) Difusão líquida (teoria da difusão líquida): ocorre devido ao gradiente de concentração de água de uma região mais úmida (maior concentração) para uma mais seca (menor concentração).
- 2) Difusão de vapor (teoria difusional): ocorre devido ao gradiente de pressão de vapor, causado pela diferença de temperatura entre dois pontos do grão.
- 3) Escoamento de líquido e vapor (teoria do fluxo hidrodinâmico): ocorre tanto por diferença de pressão total interna como por diferença de temperatura, de concentração, de contração e de capilaridade.

Como as teorias não explicam completamente o fenômeno, é possível que as três concorram para o resultado final do movimento da água do interior para a superfície dos grãos.

## **Curva de Secagem**

As características específicas de cada espécie, associadas às propriedades físicas do ar de secagem e ao meio de transferência de calor adotado, determinam diversas condições de secagem. Entretanto, a transferência de calor e de massa (vapor de água) entre o ar de secagem e o grão é fenômeno comum a qualquer

condição de secagem. Considerando-se temperatura e fluxo de ar constantes, o processo de secagem divide-se em duas fases (Fig. 5):

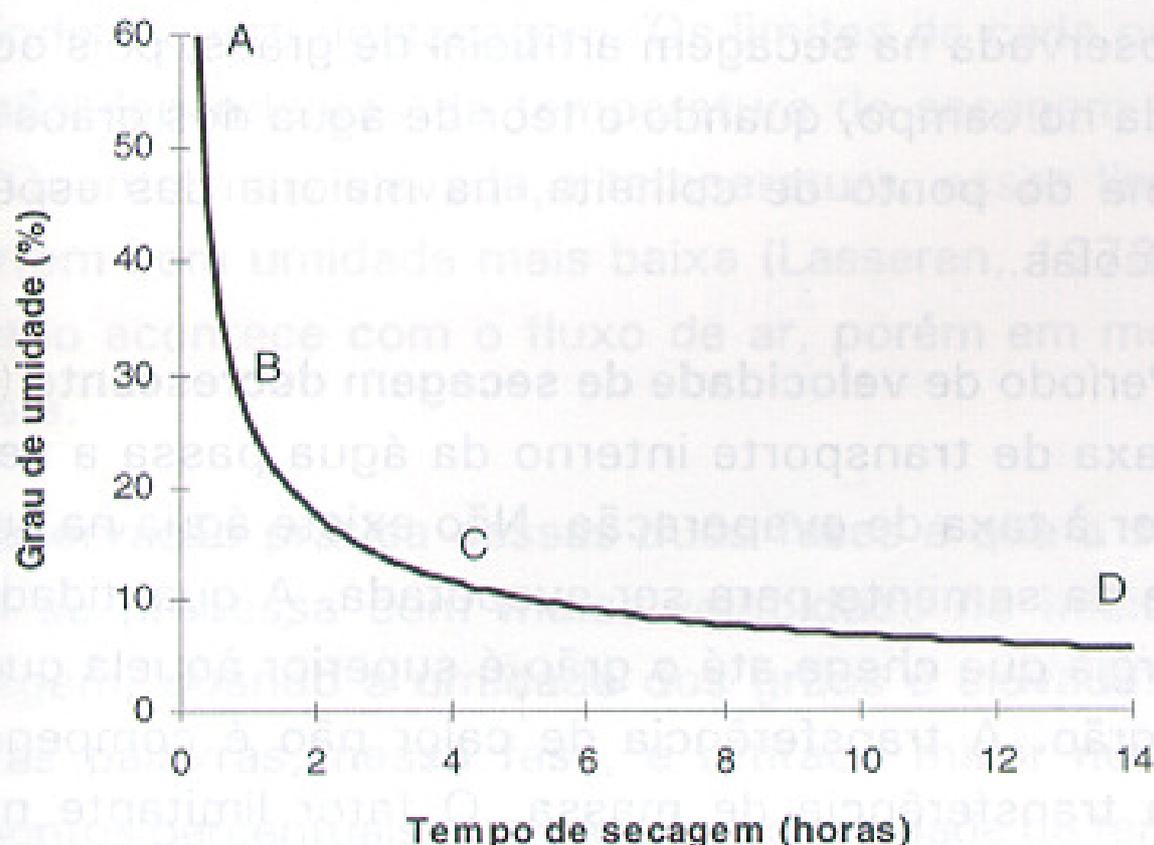


Fig. 5. Curva típica de secagem.

Fonte: Puzzi (1986).

a) Período de **velocidade de secagem constante** (AB): Nesse período, a taxa de transporte interno da água é no mínimo igual à taxa de evaporação. Como a evaporação é inferior ao transporte de água do interior para a superfície do grão, o processo é isentálpico. A quantidade de energia que chega até o grão é igual àquela que sai do grão. A temperatura do ar de secagem na saída do secador tende para a temperatura ambiente. A transferência de calor e massa é equivalente e, portanto, a velocidade de secagem é constante. Esse

período estende-se enquanto a taxa de migração de água do interior até a superfície do grão se mantém suficiente para acompanhar a perda por evaporação de água da superfície do grão. Essa fase, geralmente, não é observada na secagem artificial de grãos, pois ocorre ainda no campo, quando o teor de água dos grãos está acima do ponto de colheita, na maioria das espécies agrícolas.

b) Período de **velocidade de secagem decrescente (BD)**: A taxa de transporte interno da água passa a ser inferior à taxa de evaporação. Não existe água na superfície da semente para ser evaporada. A quantidade de energia que chega até o grão é superior àquela que sai do grão. A transferência de calor não é compensada pela transferência de massa. O fator limitante nessa fase é a taxa de migração de umidade do interior para a superfície do grão. A temperatura do grão aumenta, tendendo para a temperatura do ar de secagem. Quando a umidade do grão atinge o ponto de equilíbrio em relação à umidade relativa do ar de secagem, o processo é encerrado. Esse período pode ser dividido em dois outros. No período BC, a velocidade de secagem é **decrecente rápida**, ou seja, a perda de água por unidade de tempo ainda é elevada, apesar de a velocidade de deslocamento da água do interior do grãos ser inferior à taxa de evaporação. No período CD, a perda de água por unidade de tempo é baixa, por isso denominada de velocidade **decrecente lenta**. Nessa fase, a quantidade de energia que chega no grão é elevada em relação

à que deixa o grão por transferência de massa, resultando em baixo rendimento térmico. Isso é importante na decisão do término do processo de secagem com vistas a um maior rendimento térmico do secador, reduzindo o custo de secagem. Os limites de cada período são dependentes da temperatura de secagem usada. Quanto mais elevada a temperatura, esses limites ocorrem com umidade mais baixa (Lasseran, 1978). O mesmo acontece com o fluxo de ar, porém em menor escala.

A observação prática dessas duas fases é que a secagem se processa com maior velocidade no início da secagem, quando a umidade dos grãos é elevada. Em outras palavras, nessa fase, é retirado maior número de pontos percentuais de umidade, por unidade de tempo.

## **Quantificação do Processo de Secagem**

Os elementos que intervêm no processo de secagem e que quantificam a performance das instalações, incidindo sobre o resultado econômico da operação, são diversos.

## Quantidade de água a evaporar

É um elemento exclusivamente ligado ao produto que incide fortemente sobre o custo total da secagem, relativamente ao consumo de energia, e também sobre a duração do processo de secagem.

A quantidade de água a ser evaporada de uma quantidade conhecida de grãos pode ser calculada de duas maneiras.

A primeira maneira, calculando-se a percentagem de quebra decorrente da retirada da água presente, através da fórmula:

$$\text{Quebra (\%)} = 100 \times \frac{U_i - U_f}{100 - U_f},$$

onde:  $U_i$  = umidade inicial

$U_f$  = umidade final.

**Exemplo:** uma quantidade de 5.000 kg de grãos tem 28% de umidade e quer-se saber quanto vai apresentar de quebra após a secagem até umidade final de 14%.

$$\text{Quebra (\%)} = 100 \times \frac{28 - 14}{100 - 14}$$

$$\text{Quebra (\%)} = 16,28\%$$

A quantidade de água a evaporar, no presente exemplo, será de 16,28% sobre 5.000 kg, ou seja, 814 kg, restando 4.186 kg de grãos para o armazenamento, com umidade de 14%.

Na segunda maneira de cálculo, emprega-se a expressão:

$$P_f \times (100 - U_f) = P_i \times (100 - U_i),$$

onde,  $P_f$  = peso final

$P_i$  = peso inicial

$U_f$  = grau de umidade final

$U_i$  = grau de umidade inicial.

Por essa expressão, pode-se calcular a quantidade de água evaporada a partir de uma determinada quantidade de grãos úmidos ( $P_i$ ) ou secos ( $P_f$ ).

#### **Exemplos:**

Na situação mais comum, tem-se 5.000 kg de grãos ( $P_i$ ) com 28% de umidade ( $U_i$ ) e deseja-se saber o peso dos grãos após a secagem ( $P_f$ ) até 14% de umidade ( $U_f$ ) e a quantidade de água evaporada.

$$P_f \times (100 - U_f) = P_i \times (100 - U_i)$$

$$P_f = \frac{P_i \times (100 - U_i)}{(100 - U_f)} = \frac{5.000 \times (100 - 28)}{(100 - 14)} = 4.186 \text{ kg}$$

Conseqüentemente, a quantidade de água evaporada pelo processo de secagem foi de 814 kg (5.000 - 4.186).

De outra maneira, sabe-se que foram secados 4.186 kg de grãos ( $P_f$ ) até 14% de umidade ( $U_f$ ). Se a umidade de recebimento foi de 28% ( $U_i$ ), deseja-se saber o peso de grãos recebidos ( $P_i$ ) e qual a quantidade de água evaporada.

$$P_f \times (100 - U_f) = P_i \times (100 - U_i)$$

$$P_i = \frac{P_f \times (100 - U_f)}{(100 - U_i)} = \frac{4.186 \times (100 - 14)}{(100 - 28)} = 5.000 \text{ kg}$$

Conseqüentemente, a quantidade de água evaporada pelo processo de secagem foi de 814 kg (5.000 - 4.186).

A massa de água eliminada por tonelada de grãos úmidos, assim como aquela eliminada por tonelada de grãos secos, em função do teor de umidade do produto e da umidade usada como referência para a comercialização de grãos (14%), obtém-se, também, por tabelas ou diagramas, como na Tabela 4 e na Fig. 6.

**Tabela 4.** Quantidade de água eliminada dos grãos para levá-los desde o grau de umidade na colheita até o grau de umidade para a comercialização (14%).

Grau de Umidade (%)	Quantidade de água evaporada/tonelada	
	Grão úmido (kg/t)	Grão seco (kg/t)
35	244,19	323,08
34	232,56	303,03
33	220,93	283,58
32	209,30	264,71
31	197,67	246,38
30	186,05	228,57
29	174,42	211,27
28	162,79	194,44
27	151,16	178,08
26	139,53	162,16
25	127,91	146,67
24	116,28	131,58
23	104,65	116,88
22	93,02	102,56
21	81,40	88,61
20	69,77	75,00
19	58,14	61,73
18	46,51	48,78

Umidade  
final %

Umidade  
inicial %

% de perda  
de peso

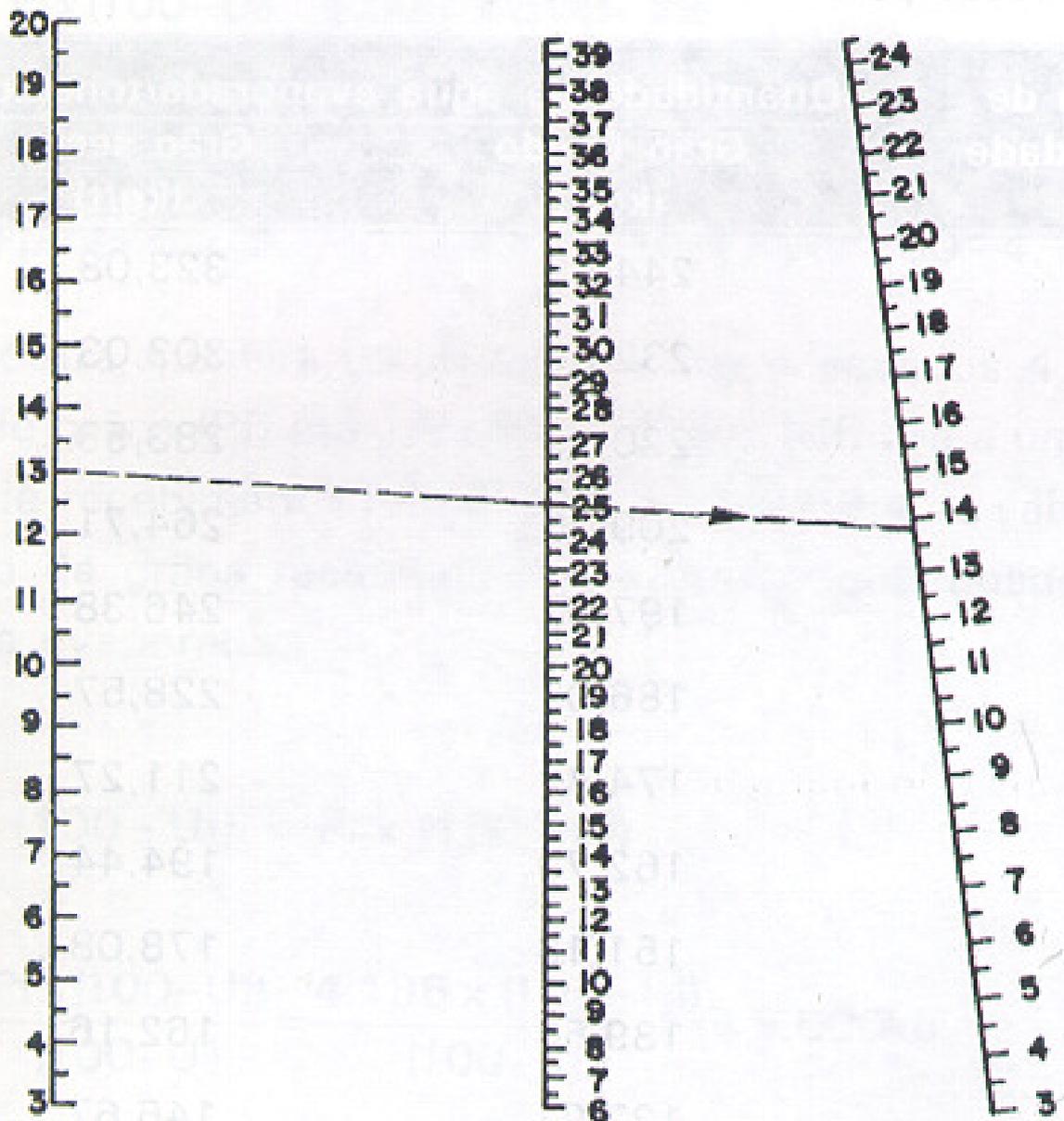


Fig. 6. Diagrama de determinação da perda de massa por efeito da secagem, em percentagem de peso.

Fonte: Weber (1998).

## Velocidade de secagem

A velocidade, ou taxa, ou capacidade de secagem refere-se à quantidade de água retirada dos grãos por uni-

dade de tempo. Pode ser expressa em gramas de água por hora (g/h) ou em pontos percentuais por hora (%/h). Por exemplo: observa-se na Tabela 4 que, para secar de 35% para 14% de grau de umidade, perdem-se 244,19 kg de água. Portanto, um ponto percentual corresponde a 11,628 kg de água (244,19/21 pontos percentuais). Se o tempo de secagem for de 7 horas, a velocidade ou taxa de secagem será de 34,88 g de água/t/h (244,19/7) ou 3 pontos percentuais por hora (21/7). No entanto, deve-se ressaltar que, conforme a Fig. 5, com a mesma temperatura e idêntico fluxo de ar, a velocidade de secagem não é constante durante o período em que se desenvolve o processo de secagem.

A velocidade de secagem é influenciada pelos seguintes parâmetros: umidade inicial dos grãos, temperatura, umidade relativa e fluxo de ar da secagem, fluxo do grão no secador, método de secagem empregado, espécie e cultivar e histórico dos grãos. Pelo grande número de variáveis influentes, torna-se difícil a predição da velocidade de secagem.

Mantendo-se as condições físicas do ar ambiente e da temperatura do ar de secagem constantes, a capacidade da câmara de secagem e o fluxo de ar do ventilador vão determinar a eficiência do poder absorvente do fluxo térmico. Essa eficiência está diretamente ligada à umidade absoluta do ar antes e depois da passagem pela massa de grãos úmidos. Sua determinação é feita de maneira gráfica usando-se o gráfico psicrométrico (Fig. 2), ou por meio da fórmula:

$$q = x_2 - x_1,$$

onde:

$q = g$  de água/kg de ar seco

$x_1 =$  massa de água contida no ar na entrada do secador

$x_2 =$  massa de água contida no ar na saída do secador.

A expressão acima representa a quantidade de água eliminada para cada quilo de ar seco, partindo de sua umidade absoluta antes e depois de ter passado pela massa de grãos. Quanto maior for a diferença de umidade absoluta entre o ar de entrada e o de saída do secador, maior será a quantidade de água evaporada do grão e absorvida pelo ar durante a sua passagem pela massa de grãos úmidos.

Um aumento de temperatura do ar de secagem, até um determinado nível, conduz a um incremento da capacidade de absorção de umidade do ar, pelo efeito da diminuição de sua umidade relativa. De maneira inversa, a diminuição da temperatura provocará o aumento da umidade relativa do ar ambiente, diminuindo sua capacidade de absorção.

Com o uso do gráfico psicrométrico, determinar-se-á, como exemplo, a quantidade de água removida a partir da medida das temperaturas do ar ambiente, da umidade relativa do ar, da temperatura de ar de secagem e

da saída do secador.

**Exemplo:** secagem de grãos de arroz:

Temperatura do ar ambiente = 16 °C;

Umidade relativa do ar 88% (ponto de estado A).

Nessa condição, conforme a Fig. 2, cada quilograma de ar seco contém 10 g de água ( $x_1$ ).

Com a elevação da temperatura do ar de secagem para 40 °C, o ponto de estado desloca-se para a direita, sobre a linha horizontal, resultando em ar com 19% de umidade relativa (ponto de estado B).

Com o procedimento da secagem, a medida da temperatura média na saída do secador foi de 30 °C.

Para obter o novo ponto de estado, segue-se sobre a linha inclinada da entalpia até o seu cruzamento com a linha vertical da temperatura de 30 °C. No caso, a umidade relativa do ar na saída do secador é de 50% (ponto de estado C). No ponto C, cada quilograma de ar seco contém 14,0 g de água ( $x_2$ ). Assim, a quantidade de água retirada por cada quilograma de ar seco é de

$$q = x_2 - x_1,$$

assim,

$$q = 14,0 - 10 = 4,0 \text{ g de água/kg de ar seco.}$$

No exemplo do item anterior, em 5.000 kg de grãos necessita-se retirar 814 kg de água, ou seja, 814.000 g. Como cada quilograma de ar retira 4,0 g de água, são necessários  $814.000/4,0 = 203.500$  kg de ar. Na condição do exemplo, o volume específico do ar é de 0,89 m<sup>3</sup>/kg.

Assim,

$$203.500 \text{ kg} \times 0,89 \text{ m}^3/\text{kg} = 181.115 \text{ m}^3 \text{ de ar}$$

Um ventilador capaz de fornecer 200 m<sup>3</sup>/minuto de ar levaria 906 minutos ou 15 horas e 6 minutos para secar os 5.000 kg de grãos até 14%, nas condições do exemplo.

A velocidade de secagem muito rápida, em decorrência do uso de elevadas temperaturas e fluxos de ar, resulta num gradiente de umidade muito acentuado entre a superfície do grão e o interior deste, gerando tensões internas. Essas tensões causam o trincamento e posterior quebra de grãos, com reflexos marcantes sobre a qualidade dos grãos e problemas durante o armazenamento. Esse fato é particularmente importante em grãos de arroz e de milho e em sementes em geral.

A velocidade de secagem é um fator de ordem econômica muito importante, pois é inversamente proporcional à duração da secagem. Em outras palavras, quanto maior a velocidade de secagem menor será o

período de permanência dos grãos no secador, potencializando a sua utilização.

## Retardamento do início da secagem

O retardamento da secagem refere-se ao período decorrido entre a colheita propriamente dita e o início da secagem dos grãos. A secagem deve ser iniciada o quanto antes possível. O elevado grau de umidade acelera o processo respiratório dos grãos, gerando quebra física, elevação da temperatura da massa de grãos, desenvolvimento de microrganismos e de insetos, tendo como consequência a deterioração dos grãos.

Em grãos, o principal dano causado pela demora na secagem é o desenvolvimento de fungos. Os principais fungos que atacam grãos armazenados são dos gêneros *Fusarium*, *Aspergillus* e *Penicillium*. Esses fungos reproduzem-se por esporos, que são formas de resistência, e germinam quando as condições são favoráveis. As principais condições favoráveis são a umidade relativa do ar acima de 65%, grãos com umidade acima de 14% e temperatura na faixa ótima de 24 °C a 40 °C para *Aspergillus* e 23 °C a 31 °C para *Penicillium*, dependendo da espécie (Ayerst, 1965). *Fusarium* requer alternância de temperaturas, quentes durante o dia (20-25 °C) e frias durante a noite (8-10 °C). Esses

microrganismos, além de causarem quebras físicas pelo consumo das reservas nutritivas e depreciarem o aspecto externo dos grãos, são responsáveis pela produção de micotoxinas, entre as quais se destaca a aflatoxina, produzida pelo fungo *Aspergillus flavus*. Essa toxina é elevadamente tóxica para animais, afetando irreversivelmente o fígado e, para pessoas, é carcinogênica, mesmo quando consumida em doses mínimas. Rações contaminadas causam a queda da produção animal, e a aflatoxina pode estar presente nos produtos, como leite, carne e ovos, acumulando-se no organismo humano pelo consumo continuado.

Não existe tratamento para a eliminação da aflatoxina em grãos contaminados. O limite máximo permitido pela Organização Mundial de Saúde é de 30 partes por bilhão (ppb), porém o Mercado Comum Europeu admite somente 0,05 ppb, e no Brasil o mercado trabalha com um máximo de 20 ppb. Outras micotoxinas produzidas por fungos em grãos armazenados são: zearalenona, fumonisina, vomitoxina, toxina T-2, ocratoxina A etc.

### **Tempo de secagem**

O tempo de secagem depende da capacidade de evaporação da instalação e do tipo e umidade inicial do produto. Deve-se ter presente que a relação da evaporação de água com o tempo não é linear, sendo rápida

quando o teor de umidade é elevado e mais lenta quando se aproxima do limite de armazenagem (13 ou 14%). Em trigo, por exemplo, o grão perde de 3 a 4 pontos de umidade por hora no começo de uma secagem com 18-20% de umidade, perdendo apenas 1 ponto por hora ao se aproximar dos 13%. O tempo de secagem também está intimamente ligado às condições do ar ambiente.

## **Eficiência energética**

A eficiência energética pode ser definida como a razão entre a energia requerida para evaporar a água do produto e a quantidade de energia fornecida ao sistema de secagem. A quantidade de energia fornecida ao processo de secagem inclui a energia para o aquecimento do ar e a potência elétrica usada no sistema. Considerando-se que, em secagem com temperaturas elevadas, o consumo de energia pode chegar a 60%, ou mais, do total energético gasto com a produção e o processamento dos produtos agrícolas, deve-se procurar soluções que aumentem a eficiência energética dos secadores (Silva et al. 1992a).

A quantidade de energia requerida para evaporar uma determinada quantidade de água (no Sistema Internacional usa-se MJ/kg de água evaporada -  $1\text{Mcal} = 4,19\text{ MJ}$ ) é denominada de **consumo específico de calor** ou,

se o consumo de energia elétrica é incluído, chama-se de **consumo específico de energia**. A quantidade de energia necessária para evaporar um quilograma de água é denominada de **calor latente de vaporização** (consumo específico de calor) e, para a água, é de 2,45 MJ/kg (585 kcal/kg). O consumo específico de energia para secadores de grãos situa-se na faixa de 3,5 a 10,0 MJ/kg (836 a 2.388 kcal/kg). Em geral, o consumo específico de energia na secagem de grãos diminui com o aumento da temperatura do ar de secagem e com o aumento da umidade relativa do ar de exaustão (Brooker et al. 1992). Para grãos com umidade superior a 17% existe apenas uma pequena diferença entre o calor de vaporização da água contida nos grãos e o da água livre (Cenkowski et al. 1992).

## **Rendimento térmico**

O rendimento térmico de um sistema de secagem determina o consumo de energia, sendo fundamental na composição do custo da operação. O rendimento térmico caracteriza o funcionamento de um secador, na dependência das condições ambientais (o consumo é menor com ar ambiente mais quente e umidade relativa baixa), do grau de saturação do ar na saída do secador e da umidade inicial do produto. Com relação à umidade inicial, quanto mais baixa for a umidade dos grãos,

há tendência de aumento do gasto térmico por ponto de umidade retirado, uma vez que é muito mais difícil extrair água do grão quando a umidade está próxima do adequado para armazenagem.

O consumo térmico específico ( $W_s$ ), ou seja, o calor consumido para evaporar um quilograma de água, pode ser obtido pela seguinte fórmula:

$$W_s = W_h / Q_a,$$

onde,

$W_s$  = kJ/kg de água ou kcal/kg de água

$W_h$  = quantidade de calor liberada pela combustão do combustível (kJ)

$Q_a$  = quantidade de água a ser evaporada.

**Exemplo:** se, para evaporar 676 kg de água de 9.180 kg de arroz, gasta-se 415 kg de lenha, que libera 8.958 kJ/kg, o rendimento térmico específico ( $W_s$ ) dessa operação será:

$$W_h = 415 \text{ kg} \times 8.958 \text{ kJ/kg} = 3.717.570 \text{ kJ}$$

$$Q_a = 676 \text{ kg}$$

Então:

$$W_s = 3.717.570 \text{ kJ} / 676 \text{ kg} = 5.499 \text{ kJ/kg de água}$$

evaporada.

Com esse consumo, pode-se determinar o rendimento térmico total do secador ( $\eta_t$ ):

$$\eta_t = W_e / W_s ,$$

entendido como a relação entre a quantidade de calor necessária para evaporar um quilograma de água em estado livre ( $W_e = 2.450 \text{ kJ}$ ) e a quantidade efetivamente empregada ( $W_s$ ) para extraí-la.

$$\eta_t = 5.499 \text{ kJ} / 2.450 \text{ kJ} = 1,836$$

Se se incluir o consumo de energia elétrica na equação anterior, ter-se-á o consumo específico de energia (CEE). Assim,

$$\text{CEE} = \frac{W_w + W_h}{Q_a} ,$$

onde

$W_w$  representa o consumo de energia elétrica em kJ;

$W_h$  representa a quantidade de calor liberada pela combustão de combustível (kJ/kg);

$Q_a$  é a quantidade de água a ser evaporada.

**Exemplo:** Se, para evaporar 676 kg de água de 9.180 kg de arroz, gasta-se 415 kg de lenha, que libera 8.958

kJ/kg, e 56,6 kWh ou 203.760 kJ, o rendimento energético específico (CEE) dessa operação será:

$$CEE = \frac{W_w + W_h}{Q_a} = \frac{203.760 \text{ kJ} + (415 \text{ kg} \times 8.958 \text{ kJ/kg})}{676 \text{ kg}} = 5.800 \text{ kJ/kg de água evaporada}$$

A eficiência energética do sistema de secagem é, então:

$$\eta = \frac{W_a}{W_w + W_h} \times 100 = \frac{676 \text{ kg de água} \times 2.450 \text{ kJ/kg de água}}{203.760 + (415 \text{ kg} \times 8.958 \text{ kJ/kg})} \times 100 = 42\%$$

O arroz e o milho são os produtos agrícolas que apresentam maior dificuldade de extração de água, tendo-se assim maior consumo térmico e menor rendimento, com valores geralmente compreendidos entre 45% e 55%, que correspondem aproximadamente a 1.000 a 1.300 kcal/kg ou 5.447 kJ/kg de água evaporada.

Os secadores convencionais de fluxo cruzado usam entre 5.000 e 9.000 kJ de energia calórica por quilograma de água evaporada. Esse mesmo equipamento, funcionando com parte do ar de exaustão em recirculação, usa 42% menos energia que o modelo convencional (Stevens & Thompson, 1976).

Bakker-Arkema & Fontana (1983) realizaram estudo comparando métodos de secagem para arroz (secagem em camada fixa em silos, em secadores de fluxo cruzado e concorrentes). A conclusão do estudo aponta que a secagem em camada fixa em silos é um sistema de

baixa capacidade física e elevada eficiência energética (3.000 kJ/kg de água evaporada). Secadores de fluxo cruzado de passagens múltiplas apresentam elevada capacidade de secagem e requerem maior gasto de energia que os secadores de camada fixa (aproximadamente 5.000 kJ/kg de água removida). Os secadores de fluxo concorrente podem operar com elevadas temperaturas do ar de secagem (100 °C a 180 °C), diferentemente dos de fluxo cruzado (abaixo de 80 °C), resultando com isso em maior eficiência energética (3.500 a 4.500 kJ/kg de água removida).

Otten et al. (1980) estudaram um secador contínuo comercial de fluxo cruzado, composto por quatro colunas de 19,8 m de altura (sendo 15,9 m de altura na câmara de secagem e 3,9 m na câmara de resfriamento); 5,6 m de comprimento e 0,30 m de espessura. O fluxo de ar na câmara de secagem foi de 1.280 m<sup>3</sup>/h/m<sup>2</sup> (98 m<sup>3</sup>/min/t) e na de resfriamento foi de 1.600 m<sup>3</sup>/h/m<sup>2</sup>. Todas as quatro colunas possuíam a 6,5 m de altura do topo do secador um dispositivo para inverter o fluxo de grãos. Foram realizados 8 testes de secagem de milho, com umidade média inicial e final de 26% e 14,6%, respectivamente, sendo o consumo específico de energia médio de 5.801 kJ/kg de água removida. Resultado semelhante foi obtido por Silva et al. (1992b) com secador intermitente de fluxo cruzado.

Segundo Loewer et al. (1994), as despesas da secagem incluem o custo de mão-de-obra, eletricidade, combustível e equipamento. Desses itens, a mão-de-

obra é o menor custo na maioria dos sistemas de secagem, e o combustível, o maior. No entanto, Silva et al. (1992b), avaliando o desempenho de um secador de fluxos cruzados, intermitente e com reversão do fluxo de ar na secagem de milho, verificaram que as maiores parcelas para o custo de secagem foram devidas à mão-de-obra e aos custos fixos (90% do total).

Puzzi (1986) apresenta um método muito simples, e de fácil aplicação em secadores comerciais, para determinar a eficiência do equipamento quando se desconhece o consumo energético. O princípio é baseado em que, após ter permanecido em contato com o produto, o ar sai do secador com temperatura mais baixa e umidade relativa mais elevada, em virtude de ter absorvido água dos grãos. O ideal seria que o ar saísse saturado do secador, entretanto, esta condição não é verificada durante todo o tempo de secagem. Para se obter elevado índice de eficiência, o secador deve propiciar perfeito contato do ar quente com o produto, pelo tempo suficiente para a absorção do máximo de água.

Nessas condições, o rendimento de um secador pode ser estimado pela seguinte fórmula:

$$\text{Rendimento (\%)} = \frac{T_e - T_s}{T_e - T_a} \times 100,$$

onde:

$T_a$  = Temperatura de ar ambiente;

$T_e$  = Temperatura do ar quente na entrada da câmara de secagem;

$T_s$  = Temperatura do ar na saída do secador.

**Exemplo - Se:**

$T_a = 16 \text{ }^\circ\text{C}$

$T_e = 40 \text{ }^\circ\text{C}$

$T_s = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

Então,

$$\text{Rendimento (\%)} = \frac{40 - 30}{40 - 16} \times 100 = 42\%,$$

Fica evidenciado que o ar de secagem deve sair do secador com o máximo de umidade e a temperatura de saída ( $T_s$ ) deve ser mínima, para elevado rendimento. Quanto menor a umidade dos grãos, dentro do secador, maior será a temperatura de saída e, conseqüentemente, menor rendimento térmico da secagem.

## **Temperatura de secagem e a qualidade dos grãos**

A temperatura de secagem é fundamental no processo

de secagem, pois, juntamente com o fluxo de ar, é o principal determinante da velocidade de secagem. O que limita o uso de temperatura elevada é sua consequência sobre a qualidade dos grãos. A temperatura muito elevada leva a elevada taxa de evaporação da água na superfície dos grãos, aumentando o gradiente de umidade no interior destes. Isso gera tensões internas que provocam danos mecânicos por trincamento e aumentam a suscetibilidade à quebra dos grãos. Além disso, a elevada temperatura causa alterações nos constituintes nutritivos dos grãos, como carboidratos, proteínas e lipídios.

Nesse contexto, a temperatura do ar de secagem tem maior influência na velocidade de secagem, porque quanto mais quente o ar maior é seu poder secante, ou seja, maior é a capacidade de evaporar e absorver água. Por outro lado, do ponto de vista da alteração dos constituintes nutritivos, atenção maior deve ser dada à temperatura efetiva da massa de grãos dentro da câmara de secagem do secador.

A determinação do nível da temperatura do ar de secagem e da massa de grãos está relacionada a alguns fatores, tais como sistema de secagem, tipo de secador, fluxo de ar, umidade inicial do produto e destino final do grão que está sendo secado. A Tabela 5 apresenta a temperatura da massa de grãos durante a secagem para alguns produtos agrícolas, segundo Muckle e Stirling (1971).

**Tabela 5.** Limites máximos de temperatura na massa de grãos para a secagem de algumas espécies agrícolas.

Produto		Temperatura (°C)
Milho	Sementes	44
	Amido	55
	Alimentação animal	82
Arroz	Até 20% de umidade	44
	Mais de 20% de umidade	40
Sorgo	Sementes	44
	Amido	60
	Alimentação animal	82
Trigo	Sementes	44
	Moagem	66
Feijão	Sementes	38
	Alimentação	45
Soja	Sementes	38
	Agroindústria	48
Amendoim	Sementes	37

Fonte: Muckle & Stirling (1971).

Se os grãos apresentarem umidade inicial muito elevada, a temperatura de início de secagem deve ser menor. Por exemplo, no caso de milho para uso alimentar, a temperatura não deve exceder os 55-60 °C para níveis iniciais de umidade ao redor de 28-30%, podendo chegar gradativamente até 80 °C quando a umidade aproxima-se de 14%. Assim reduz-se a possibilidade de alterações químicas que podem provocar um de-

créscimo na qualidade dos grãos. Para sementes, usa-se 30 °C se o produto está muito úmido, podendo alcançar até 45 °C à medida que o processo de secagem avança.

Para arroz, tanto para uso alimentar quanto para semente, a temperatura máxima é da ordem de 40 °C. Em tais condições, não se alteram nem as características organolépticas nem as germinativas.

Se o trigo for considerado como exemplo, observa-se que, ao mesmo tempo que a secagem incorreta está retirando água do grão, também está deteriorando a qualidade para panificação, ao alterar a estrutura molecular das proteínas que formam o glúten e as enzimas. Segundo Marsans (1987), temperatura de secagem que leve o grão a mais de 55 °C produz desnaturação de proteínas; temperaturas ao redor de 70 °C desnaturam a amilase, enzima responsável pela transformação do amido em açúcares solúveis, os quais servem de substrato às bactérias da levedura durante a panificação.

A faixa crítica de temperatura do ar de secagem para grãos de trigo com umidade entre 16-19% está entre 70 °C e 80 °C. Com umidade acima desses limites, a temperatura crítica fica abaixo de 70 °C; e teores de água abaixo de 16%, acima de 80 °C.

A armazenagem de sementes de soja secada com ar aquecido não tem muitos resultados experimentais. As

sementes, que sofreram processo de aquecimento na faixa de 24-74 °C, foram armazenadas com dois graus de umidade (12% e 17%) e com três temperaturas (10 °C, 21 °C e 32 °C). A percentagem de sementes com casca rompida foi ao redor de 30%, com temperaturas de secagem de 24 °C contra 84% quando secas a 74 °C. Observou-se o desenvolvimento de fungos muito mais rapidamente nas sementes estocadas com elevada umidade e que haviam sido secadas com temperaturas mais elevadas. Isso pode ser explicado pelo aumento do número de sementes com casca rompida, bem como pelos cotilédones partidos em decorrência das elevadas temperaturas. A temperatura elevada na secagem não somente reduz o nível de germinação das sementes logo após a secagem, como as afeta também ao longo do armazenamento (efeito latente), se comparadas com as sementes secadas com temperatura mais baixa. A percentagem de ácidos graxos livres tende a aumentar durante o armazenamento em razão da umidade, da temperatura e do tempo de armazenamento do produto. O aumento da quantidade de grãos trincados e partidos, em virtude da elevada temperatura de secagem, causa maior desenvolvimento de fungos. Seu metabolismo eleva a umidade e a temperatura dos grãos, o que geralmente corresponde a um aumento nos ácidos graxos livres nos grãos.

Outro aspecto relacionado à temperatura e à qualidade é o choque térmico por ocasião do resfriamento dos grãos ao fim do período de secagem. A súbita passa-

gem dos grãos da câmara de secagem para a de resfriamento, ou a interrupção do fornecimento de calor, causa trincamento de grãos de espécies como milho e arroz e é tanto mais grave quanto mais elevada for a temperatura dos grãos na câmara de secagem. Esse problema é particularmente grave em sistemas de secagem que, além de elevada temperatura, usam elevados fluxos de ar e pequena espessura de camada de secagem, como é o caso dos secadores contínuos de fluxo cruzado e mistos. Em secadores estacionários, como os de leito fixo, nos quais se usam camadas mais espessas e menores fluxos de ar, o problema é minimizado pelo aquecimento do ar ao entrar em contato com as primeiras camadas de grãos. Ainda assim, é recomendada a redução gradual da temperatura ao término da secagem.

## **Sistemas de Secagem**

A secagem, como visto anteriormente, envolve a retirada parcial da água dos grãos por (1) transferência de calor (energia) do ar para o grão e, ao mesmo tempo, (2) por fluxo de vapor de água (massa) do grão para o ar. Os procedimentos para o atendimento desses dois princípios da secagem, usando o ar como veículo uni-

versal, são:

a) aquecimento do ar de secagem, elevando o seu poder secante;

b) movimentação do ar com o objetivo de, primeiramente, carregar a energia calórica até a massa de grãos, elevando a sua temperatura e, conseqüentemente, a taxa de evaporação da água presente nos grãos. Em um segundo momento, esse mesmo ar tem a função de carregar para fora da câmara de secagem o vapor de água transferido dos grãos para o ar intergranular.

Uma primeira classificação, que usa como critério os procedimentos para a modificação do ar de secagem, divide os sistemas de secagem em: **secagem natural** e **secagem artificial**.

## **Secagem natural**

Secagem natural é o processo de secagem que utiliza as condições naturais de sol e vento, o primeiro para aquecer o ar e o segundo para movimentar o ar. Esse tipo de secagem pode ser realizado na própria planta, ou serem usados recursos como terreiros (eiras), tabuleiros telados, lonas, pisos, etc., nos quais os grãos são espalhados em camada fina ( $\pm 10$  cm) e revolvidos freqüentemente. A superfície de grãos deve ser ondu-

lada para permitir maior superfície de exposição. É adotada em pequenas quantidades de grãos e em casos de sementes leves e de pequeno tamanho, como forrageiras e hortaliças.

A secagem natural, apesar de ser de menor custo, não expor os grãos a temperaturas muito elevadas e não causar danos mecânicos aos grãos, é limitada pelas condições psicrométricas do ar. Em regiões ou épocas de baixa temperatura e/ou elevada umidade relativa do ar, o processo é muito lento e os grãos permanecem muito tempo (às vezes semanas) com umidade muito elevada, levando a quebras, pela continuidade do processo respiratório, comprometendo a qualidade dos grãos, em virtude do ataque de fungos. Além disso, o processo exige muita mão-de-obra e é sujeito a perdas por pássaros e roedores.

## **Secagem artificial**

Os sistemas de secagem artificial caracterizam-se pelo controle dos procedimentos de alteração das características do ar de secagem - temperatura e movimentação de ar - ambos ou apenas um. Através de estruturas projetadas para tal - os secadores, a secagem artificial possibilita a secagem de grande volume de grãos e a redução do tempo de secagem, sendo relativamente independente das condições climáticas.

## ***Secagem artificial com ar natural forçado***

A secagem artificial com ar natural forçado é o sistema de secagem que altera apenas uma das características do ar, o fluxo. É dependente das características climáticas da região ou da época em que é praticada. É empregada quando as condições psicrométricas do ar são favoráveis, ou seja, quando a umidade relativa do ar encontra-se abaixo do ponto de equilíbrio higroscópico com a umidade dos grãos. É, por isso, também denominada de aeração secante.

Para usar o sistema de secagem com ar natural forçado em grãos é necessário o conhecimento de alguns termos a serem empregados.

**Vazão de ar** é o volume de ar insuflado para dentro de um secador por unidade de tempo. Esse ar é gerado por ventilador corretamente dimensionado. A vazão é, normalmente, medida em m<sup>3</sup>/hora, kg/hora ou litros/hora. Pode ser calculada pela fórmula:

$$Q = A \times v,$$

onde:

A = área da seção em m<sup>2</sup> =  $\pi D^2/4$  (D = diâmetro em metros);

v = velocidade em metros por hora (medida com o anemômetro);

$Q$  = vazão de ar em  $m^3/h$

**Vazão específica de ar**, ou fluxo específico de ar, ou simplesmente fluxo de ar, é o volume de ar fornecido pelo ventilador, por unidade de tempo, em relação a determinada massa de grãos. É definido em  $m^3/hora/t$ , ou  $m^3/hora/m^3$  de grãos, ou ainda em litros/hora/ $m^3$  de grãos. Pode ser calculada pela fórmula:

$$Q_e = Q/P,$$

onde:

$Q_e$  = vazão específica do ar em  $m^3/hora/t$ ;

$Q$  = vazão ou fluxo de ar em  $m^3/h$ ;

$P$  = peso da massa de grãos em toneladas.

Como unidade de tempo, podem ser usadas as frações da hora (minutos e segundos).

A vazão específica determina a capacidade secante, de resfriamento ou de conservação de um silo ou secador a uma determinada temperatura.

**Pressão estática** é a medida da resistência que uma massa de grãos oferece à passagem do ar, através de pressão exercida por ventilador sobre as paredes da canalização de saída do ar do ventilador, que leva o ar até a massa de grãos. Essa resistência depende da espécie (tamanho, forma, rugosidade do tegumento dos grãos), da umidade, da pureza, da altura da camada e

da arrumação dos grãos no interior do secador. O aparelho que mede a pressão estática é o manômetro de tubo em U (Fig. 7). É constituído de um tubo de plástico transparente de 0,3 cm a 0,6 cm de diâmetro parcialmente cheio de água, que é fixado sobre uma folha de papel milimetrado ou com escala em milímetros. Introduce-se o tubo na canalização de saída do ar do ventilador por um furo de diâmetro igual ao do tubo, em uma profundidade igual à da espessura da chapa do duto. Com o silo carregado e o ventilador ligado, observa-se uma diferença no nível da água dentro do tubo plástico, a qual é medida ou lida no papel milimetrado. Essa diferença expressa a pressão estática desenvolvida pelo ventilador para vencer as perdas de carga do sistema. Geralmente é medida em polegadas ou milímetros de coluna de água (mmca).

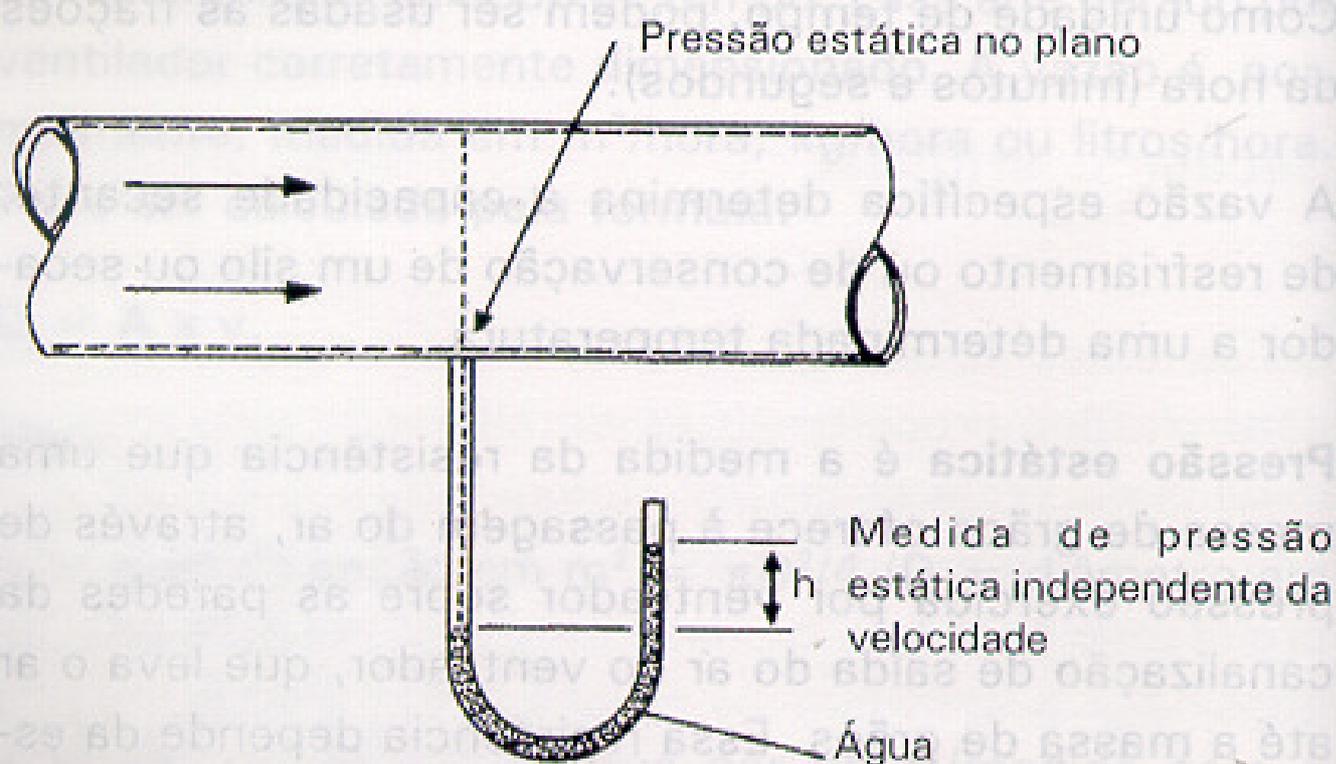
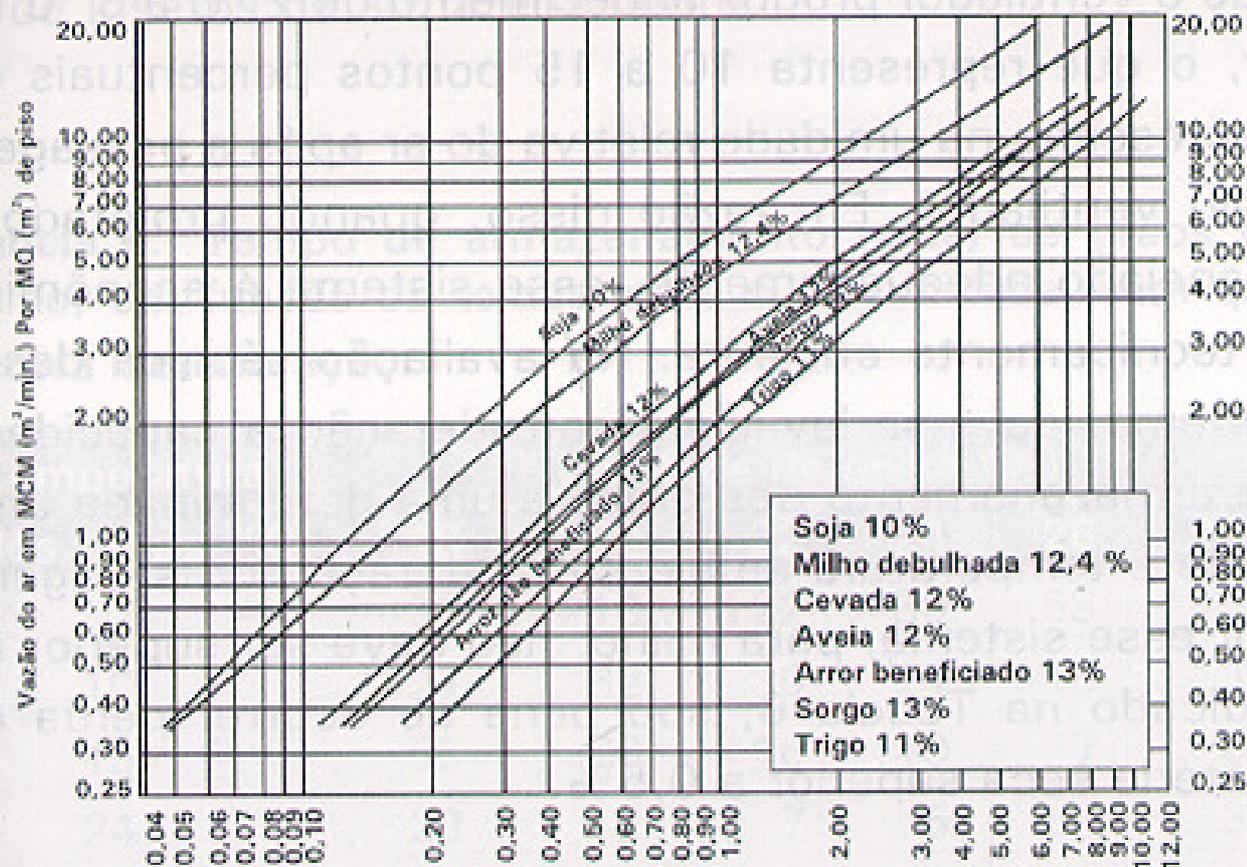


Fig. 7. Construção de um manômetro em U.

A partir da medida da pressão estática, pode-se determinar o fluxo de ar. A leitura obtida no manômetro é transformada em milímetros ou centímetros de coluna da água por metro de espessura de camada (cmca/m). Esse dado é transportado para tabelas ou para o Gráfico de Shedd (Fig. 8), encontrando-se o fluxo de ar do ventilador.



**Fig. 8.** Resistência de uma camada de grãos à passagem do ar. Adaptado de Shedd (1953).

Fonte: Carvalho (1994).

Para o sistema de secagem com ar natural forçado, o fluxo de ar deve variar de 0,1 a 2,0 m<sup>3</sup>/min/t, dependendo da umidade inicial dos grãos. Quanto mais eleva-

do a umidade, maior o fluxo de ar. Para grãos com umidade acima de 20%, o sistema não é recomendado, pela lentidão da secagem. Nesse caso, o sistema é usado apenas por curtos períodos para manter baixa a temperatura da massa de grãos.

Nesse sistema de secagem, o poder secante do ar que entra no silo é superior àquele do ar ambiente, uma vez que o ventilador produz aquecimento de 2 °C a 3 °C no ar, o que representa 10 a 15 pontos percentuais de decréscimo na umidade relativa do ar após a passagem pelo ventilador. Em razão disso, quando projetado e manejado adequadamente, esse sistema é econômico e tecnicamente eficiente. Na avaliação técnica desse sistema, deve-se levar em consideração a capacidade de armazenamento dos grãos a uma determinada umidade e temperatura ambiente. A duração da secagem, por esse sistema, para milho, não deve ser superior ao indicado na Tabela 6, sob pena de ocorrer perda de matéria seca superior a 0,5%.

A secagem inicia-se na parte inferior do silo, deslocando-se na mesma direção do fluxo de ar. Durante o processo de secagem, formam-se três camadas: grãos secos (em equilíbrio com o ar), zona de secagem (em processo de transferência de água dos grãos para o ar) e grãos úmidos (próximos ao teor inicial). A velocidade de deslocamento da zona de secagem é tanto maior quanto maior o fluxo de ar. Quando a zona de secagem atingir a superfície da massa de grãos, o processo é

encerrado e inicia-se o processo de aeração de manutenção, cujo objetivo é a conservação dos grãos. A aeração de manutenção objetiva a manutenção da umidade dos grãos, injetando ar ambiente com umidade relativa na faixa de equilíbrio higroscópico com a umidade dos grãos. Ao mesmo tempo, a temperatura desse ar deve ser tão baixa quanto possível, visando à diminuição da taxa de respiração dos grãos e o controle de insetos de armazenamento.

**Tabela 6.** Tempo de armazenamento (dias) de grãos de milho, em função da temperatura e da umidade, sem que ocorra deterioração.

Temperatura dos grãos (°C)	Umidade de milho (%)					
	18	20	22	24	26	28
2	430	210	122	80	58	45
10	127	62	36	24	16	13
16	55	26	16	10	7	6
24	23	12	7	5	4	3
27	15	7	4	3	2	1

Fonte: adaptado de Puzzi (1986).

### **Ar quente forçado**

A secagem com ar quente forçado objetiva a redução da umidade relativa do ar, elevando a sua capacidade de absorção de água e o aquecimento da massa de

grãos para aumentar a taxa de evaporação da água dos grãos. Com isso produz-se um gradiente de pressão parcial de vapor de água entre a superfície do grão e o ar de secagem. O aquecimento do ar baixa a pressão parcial de vapor do ar e o aquecimento dos grãos aumenta a pressão parcial de vapor na superfície do grão.

De acordo com o fluxo dos grãos e sua exposição ao ar aquecido durante o processo, a secagem artificial pode ser dividida em **secagem estacionária**, **secagem contínua** e **secagem intermitente**.

### *Secagem estacionária*

A secagem estacionária tem sido usada mais na propriedade rural, quando a finalidade é a produção de grãos. Entretanto, para a produção de sementes em escala comercial, seu emprego tem aumentado em decorrência de dificuldades circunstanciais encontradas para enquadrar o processo produtivo nas técnicas de operação de secadores do modo contínuo ou do modo intermitente (Carvalho, 1994).

O sistema de secagem estacionário consiste basicamente em se forçar o ar aquecido através da massa de grãos, que permanece sem ser movimentada (Fig. 9). O material é colocado em um reservatório (câmara de secagem), no qual o ar atravessa a massa de grãos, por intermédio de dutos, ou por meio de um fundo falso,

formado por uma chapa perfurada com no mínimo 15% de área perfurada. Esse sistema é simples, relativamente barato e compatível com o nível de investimento de grande parcela de produtores (Silva & Lacerda Filho, 1984). Os secadores que têm esse sistema de secagem são os de leito fixo ou de fundo falso perfurado, de tubo central perfurado, de bandeja e de sacos.

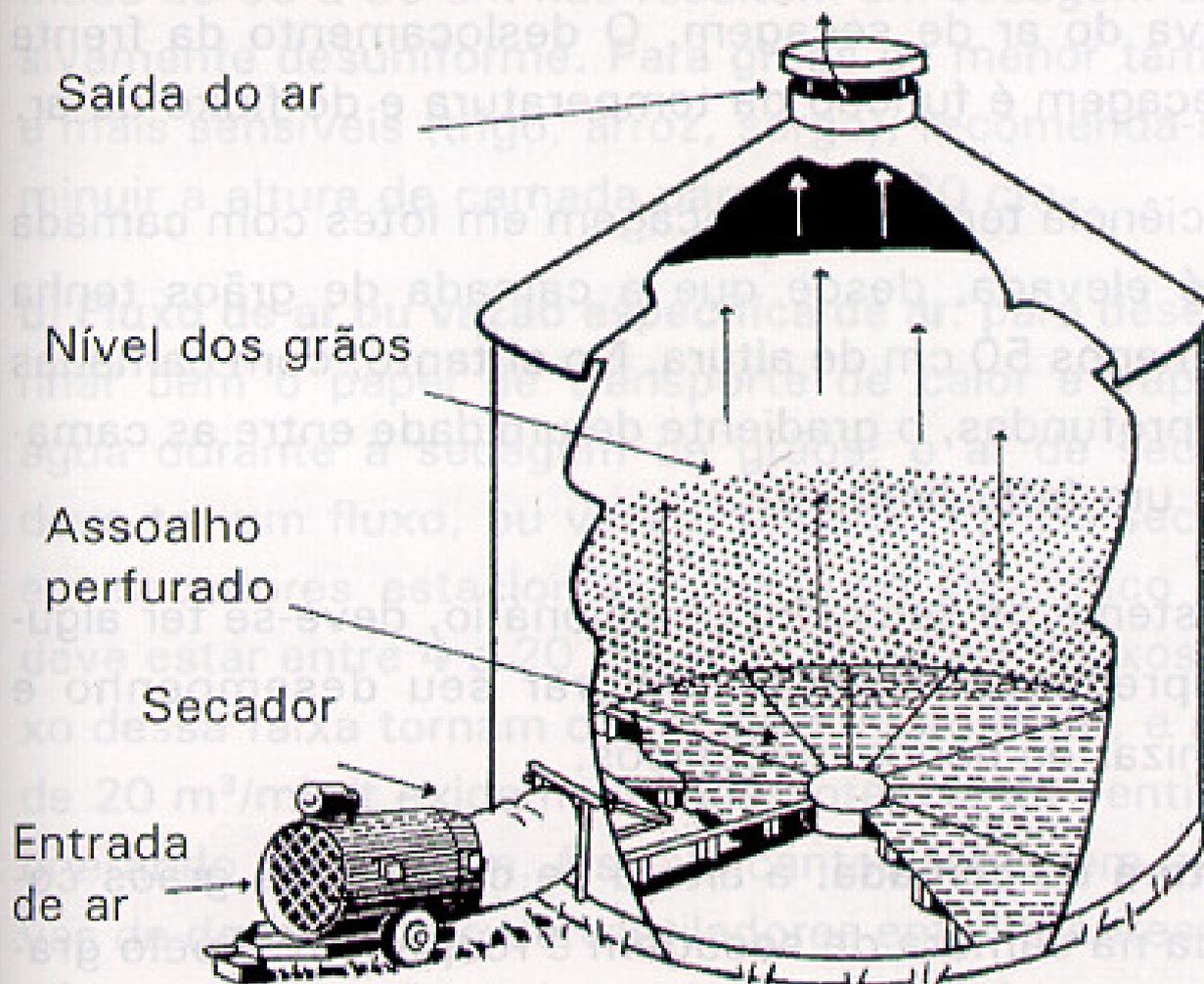


Fig. 9. Silo secador estacionário de fundo falso perfurado.

Fonte: Puzzi (1986).

Na secagem estacionária, a perda de água dos grãos ocorre em camadas. As camadas mais próximas da entrada do ar aquecido secam antes de continuar com as seguintes. Assim, forma-se uma zona de secagem, ou seja, uma camada em que os grãos estão em processo de perda de água, cuja parte superior é denominada de **frente de secagem**. Abaixo dessa camada os grãos estão secos, e acima, úmidos. A secagem, em cada camada, prossegue até a umidade dos grãos atingir o ponto de equilíbrio higroscópico com a umidade relativa do ar de secagem. O deslocamento da frente de secagem é função da temperatura e do fluxo de ar.

A eficiência térmica da secagem em lotes com camada fixa é elevada, desde que a camada de grãos tenha pelo menos 50 cm de altura. No entanto, com camadas mais profundas, o gradiente de umidade entre as camadas é um fator limitante.

No sistema de secagem estacionário, deve-se ter algumas precauções para melhorar seu desempenho e minimizar os danos mecânicos.

**a) Altura de camada:** a altura da camada de grãos colocada na câmara de secagem é responsável pelo gradiente de umidade entre as camadas. Quanto mais profunda a camada, maior o gradiente, porque as camadas inferiores, expostas ao ar aquecido na entrada, continuam a perder água até entrarem em equilíbrio com a umidade relativa do ar. Com isso, nessas camadas, ocor-

re supersecagem.

Quando se aumenta a camada de grãos, para diminuir o gradiente de umidade, deve-se reduzir a temperatura, o que diminui o poder secante do ar e, conseqüentemente, a velocidade de secagem, ou aumentar o fluxo de ar, o que aumenta a velocidade de avanço da frente de secagem.

Para grãos maiores (milho, soja, feijão), alturas de camada de 50 a 80 cm não resultam em secagem excessivamente desuniforme. Para grãos de menor tamanho e mais sensíveis (trigo, arroz, sorgo), recomenda-se diminuir a altura de camada para 25 a 30 cm.

**b) Fluxo de ar ou vazão específica de ar:** para desempenhar bem o papel de transporte de calor e vapor de água durante a secagem de grãos, o ar de secagem deve ter um fluxo, ou vazão, mínimo. Para a secagem em secadores estacionários, o fluxo específico de ar deve estar entre 4 e 20 m<sup>3</sup>/min/t de grãos. Fluxos abaixo dessa faixa tornam o processo muito lento, e acima de 20 m<sup>3</sup>/min/t exigem elevada potência do ventilador, onerando a secagem. Os fabricantes fornecem as curvas de desempenho de ventiladores em diferentes pressões estáticas. Para determinar o fluxo de ar que está passando por uma determinada massa de grãos, deve-se medir a pressão estática ou medir a velocidade do ar com anemômetro.

O fluxo específico de ar, em determinado secador, pode

ser aumentado reduzindo-se a quantidade de grãos. Por exemplo, se a câmara de secagem com capacidade de 1.000 kg apresentar fluxo específico de ar de  $8 \text{ m}^3/\text{min}/\text{t}$  e se a quantidade de grãos for reduzida para 500 kg, o fluxo de ar passará a ser  $16 \text{ m}^3/\text{min}/\text{t}$ . O aumento do fluxo de ar não altera seu poder secante, porque a capacidade de absorver água continua a mesma (g de vapor/kg de ar seco), entretanto, o maior fluxo de ar avançará mais rapidamente a frente de secagem, diminuindo a diferença do grau de umidade entre as camadas de grãos.

**c) Umidade relativa do ar:** como visto, a umidade relativa do ar de secagem é função da temperatura. O aquecimento do ar diminui a umidade relativa e, por consequência, aumenta a capacidade de conter vapor de água. A umidade dos grãos, durante a secagem, diminui até atingir o ponto de equilíbrio higroscópico. Quanto mais baixa a umidade relativa do ar de secagem, menor ponto de equilíbrio e, portanto, maior gradiente de umidade entre as camadas de grãos.

Quando ocorre muito rapidamente e em excesso, a secagem predispõe os grãos a danos mecânicos, diminuindo a qualidade do produto.

**d) Temperatura do ar de secagem:** Nesse sistema de secagem não se pode usar temperatura muito elevada, em razão de os grãos permanecerem em contato direto com o ar aquecido, por longo período de tempo. Com

isso, a temperatura dos grãos tende a se aproximar da do ar de secagem. Esse fato é mais marcante nas camadas próximas à entrada do ar quente, sujeitando os grãos dessas camadas a danos em qualidade.

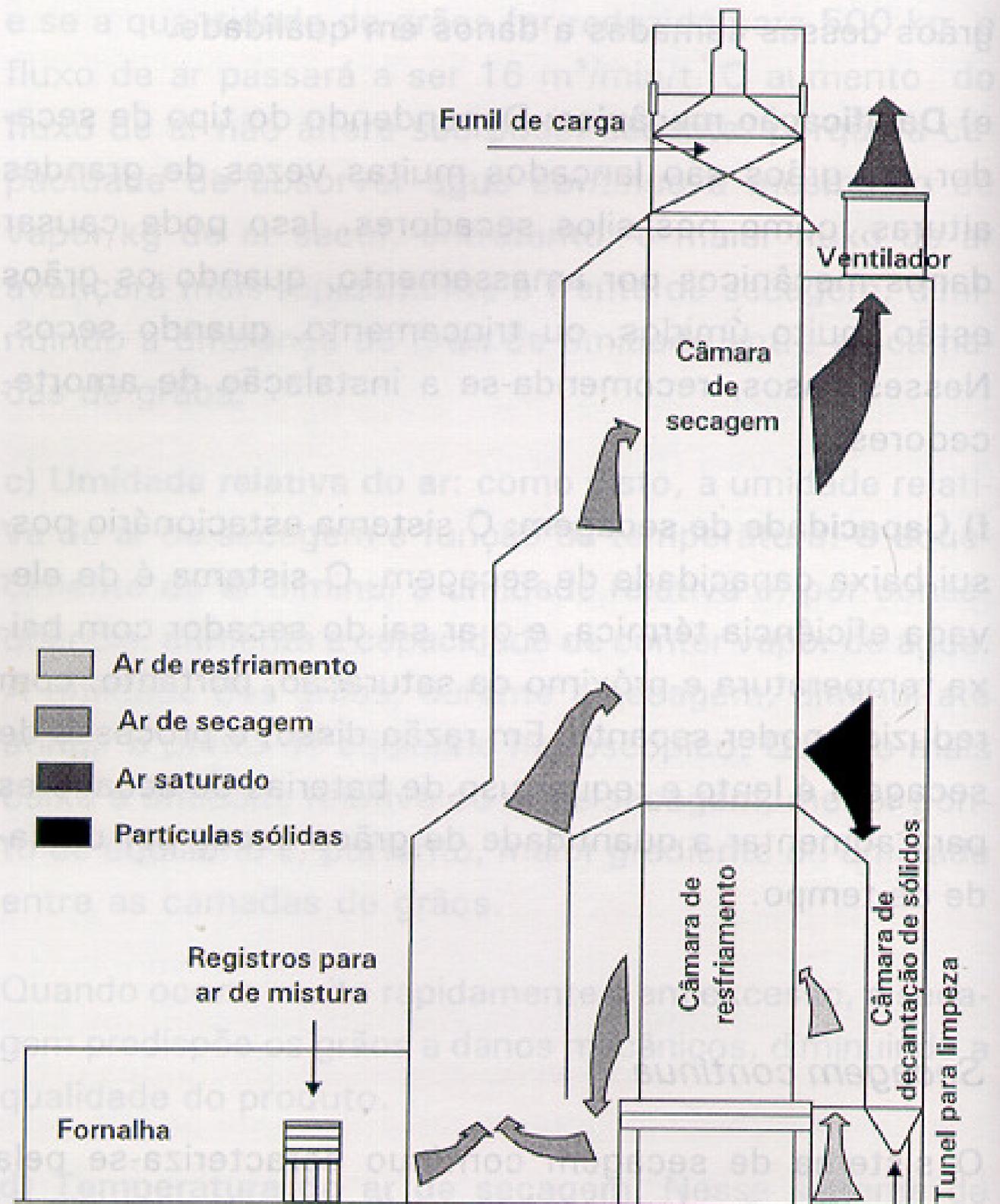
e) **Danificação mecânica:** Dependendo do tipo de secador, os grãos são lançados muitas vezes de grandes alturas, como nos silos secadores. Isso pode causar danos mecânicos por amassamento, quando os grãos estão muito úmidos, ou trincamento, quando secos. Nesses casos, recomenda-se a instalação de amortecedores.

f) **Capacidade de secagem:** O sistema estacionário possui baixa capacidade de secagem. O sistema é de elevada eficiência térmica, e o ar sai do secador com baixa temperatura e próximo da saturação, portanto, com reduzido poder secante. Em razão disso, o processo de secagem é lento e requer uso de baterias de secadores para aumentar a quantidade de grãos secos por unidade de tempo.

### *Secagem contínua*

O sistema de secagem contínuo caracteriza-se pela movimentação dos grãos, que ficam sob ação do ar durante todo o período de secagem. A secagem contínua é aquela em que há um fluxo permanente e contínuo de produto entrando e saindo do secador, de tal

forma que o produto que entra com certa umidade média sai com umidade média mais baixa (Fig. 10).



**Fig. 10.** Modelo comercial de secador contínuo.

Fonte: Modificado de Kepler Weber (1997).

Em geral, o sistema consiste em se fazer passar os grãos pela câmara de secagem, de modo que estejam secos na saída do secador ou com a umidade desejada. Para isso, é necessário que se eleve a temperatura do ar de secagem ou se retarde o fluxo de grãos dentro do secador. No entanto, com o aumento da temperatura ou do tempo de exposição, corre-se risco de danos térmicos nos grãos. Para que isso não ocorra, devem-se observar os limites de temperatura máxima na massa de grãos. Quanto maior o tempo de permanência na câmara de secagem, mais a temperatura da massa de grãos tende a se igualar à temperatura do ar de secagem. A velocidade da secagem contínua, geralmente, é limitada pelo gradiente de umidade entre a superfície do grão e o interior deste.

A secagem contínua, em função do grau de umidade inicial dos grãos, da temperatura do ar de secagem usada e do tempo de permanência na câmara de secagem, pode ser desenvolvida de três maneiras:

#### **a) Com resfriamento**

Os grãos entram úmidos no secador e saem secos e resfriados para armazenamento. O sistema é usado quando a umidade dos grãos está próxima à da umidade de armazenamento. Dependendo da espécie e do nível de qualidade dos grãos que se deseja alcançar ao fim da secagem, geralmente é possível realizar secagem contínua com resfriamento em grãos com umidade inferior

a 18%. A parte inferior da coluna de ar do secador é destinada ao resfriamento dos grãos com ar à temperatura ambiente.

A uma mesma temperatura de secagem, grãos com umidade mais elevada obrigam a que se diminua a velocidade de passagem pelo secador. Com isso, os grãos permanecem durante mais tempo na câmara de secagem, fazendo passar maior quantidade de ar seco e quente pela massa. Nesse caso, poderão surgir dificuldades para o resfriamento da massa de grãos. Quando o produto passar pela câmara de resfriamento do secador, como já não tem excesso de vapor d'água, estará com temperatura mais elevada, provocando choque térmico. Além disso, perderá calor mais dificilmente, fazendo com que os grãos passem para o armazenamento com temperatura muito elevada.

Na maioria dos secadores contínuos, o estágio de resfriamento corresponde a aproximadamente um terço da altura da coluna do secador, o que poderá não ser suficiente para resfriar um produto elevadamente aquecido. É prática recomendada observar-se que o produto na saída do secador tenha temperatura de, no máximo, 6 °C a 8 °C acima da temperatura ambiente.

#### **b) Corpo inteiro**

Muitas instalações de secagem e armazenamento possuem silos aerados para armazenamento de grãos. Nesse caso, os grãos não necessitam de resfriamento no

secador, pois esse processo é feito pela aeração. Assim, toda a coluna de ar do secador pode ser usada como câmara de secagem. Em outras palavras, a câmara de resfriamento é transformada em uma segunda câmara de secagem. Desse modo, os grãos, que entram úmidos no secador, saem do equipamento secos e quentes.

Esse sistema de secagem é capaz de aumentar o rendimento do secador em quantidade de grãos secos por hora, em virtude do maior tempo de exposição ao ar quente. No entanto, causa aumento do gradiente de umidade entre a superfície do grão e o interior deste. O deslocamento da umidade do interior para a superfície do grão limita a velocidade de secagem, tendo, como conseqüência, diminuição da eficiência energética do sistema e aumento dos danos mecânicos (trincamento).

Para o correto manejo de grãos durante o armazenamento, recomenda-se que todos os silos sejam equipados com aeração e termometria corretamente projetadas, o que elimina por completo a necessidade de resfriamento dos grãos no secador.

### **c) Corpo inteiro com retorno**

Sempre que a umidade dos grãos for elevada a ponto de não permitir a secagem até o nível de armazenamento em uma única passagem pelo secador, estes devem retornar para a entrada do secador. A recirculação dos grãos é feita tantas vezes quantas forem necessárias

até se atingir a umidade desejada para armazenamento. Nesse sistema, a secagem deve ser de corpo inteiro, na qual a câmara de resfriamento é transformada em câmara de secagem. Os grãos perdem contato com o ar aquecido somente pelo breve período em que circulam pelo elevador e pelas tubulações. Apesar de os grãos perderem calor durante esse breve período, na prática pode-se considerar o sistema como contínuo de corpo inteiro. Quando os grãos estiverem secos, são descarregados para o silo de resfriamento.

Alternativamente, pode-se fazer resfriamento dos grãos na última recirculação. Nesse caso, estar-se-á usando os dois sistemas: contínuo com resfriamento na última passagem pelo secador e de corpo inteiro nas demais passagens anteriores.

### *Secagem intermitente*

O sistema de secagem intermitente caracteriza-se pelo fato de o grão ser submetido à ação do ar aquecido na câmara de secagem a intervalos regulares de tempo, intercalados com períodos em que não há circulação de ar, quando o grão permanece na câmara de repouso ou equalização. Durante este último período, ocorre homogeneização da umidade, pela migração de água do interior para a superfície do grão. Assim a água é facilmente evaporada e transferida para o ar de seca-

gem no momento da próxima passagem pela câmara de secagem. Essa migração interna da água, juntamente com a passagem por elevadores e tubulações, causa resfriamento dos grãos, que permite o uso de temperatura mais elevada no ar de secagem.

Durante o período de repouso, a reidratação das camadas superficiais dos grãos diminui o gradiente interno de umidade, liberando gradativamente as tensões internas geradas por esse gradiente. Isso resulta em menos danos por trincamento, melhor rendimento em grãos inteiros e maior qualidade final do produto.

O uso de uma série de curtos períodos sob a ação do ar aquecido, intercalados por períodos sem aquecimento, aumenta a quantidade de água removida por unidade de tempo de exposição ao ar aquecido em relação à secagem contínua. Isso ocorre porque a secagem não é mais limitada pela velocidade de migração interna da umidade, uma vez que esta ocorre durante o período de repouso. Isso leva a uma melhor eficiência energética da secagem (Villela, 1991).

A relação entre tempo de exposição ao ar aquecido e tempo de equalização é denominada de **relação de intermitência**. Por exemplo, se os grãos permanecerem por 5 minutos na câmara de secagem e 30 minutos na câmara de repouso, tem-se no fim 35 minutos de permanência no secador. A relação de intermitência é calculada dividindo-se o tempo de repouso pelo tempo de

secagem ( $30 / 5 = 6$ ). Nesse caso, a relação de intermitência é 1 : 6. Em outras palavras, para cada tempo de permanência na câmara de secagem, os grãos permanecem 6 tempos em repouso. Essa relação pode ser calculada, também, pelo mesmo processo, sabendo-se a capacidade de cada câmara.

De acordo com a relação de intermitência usada, o sistema pode ser dividido em:

#### **a) Intermitente rápido**

Esse sistema é assim denominado porque os grãos passam rapidamente através do ar aquecido, ou seja, por intervalos regulares e mais freqüentes. A relação de intermitência varia, conforme o modelo do secador, a partir de 1 : 4, podendo chegar até 1 : 15. Existem modelos em que os grãos permanecem em contato com ar aquecido por somente 2 a 3 minutos e em repouso por 18 a 27 minutos. Esses secadores são usados em secagem de arroz, sementes em geral e, mais recentemente, milho e outros grãos em que se deseja elevado rendimento em grãos inteiros.

Em virtude do menor período de exposição ao ar aquecido, esse sistema permite o uso de temperatura mais elevada do ar de secagem. Na saída da câmara de repouso, a umidade encontra-se na superfície do grão, sendo rapidamente evaporada pela elevada temperatura do ar. Nesses secadores, bem como em todos os

outros, é de fundamental importância o controle da temperatura na massa de grãos.

### **b) Intermitente lento**

O sistema intermitente lento trabalha com relações de intermitência da ordem de 1 : 1 a 1 : 3, dependendo do modelo do secador. Esse sistema é adaptado de secadores contínuos, em que a câmara de resfriamento é usada como câmara de secagem e a câmara de secagem é usada como de repouso.

### **c) Contínuo adaptado para intermitente**

Esse sistema baseia-se no uso do secador contínuo como intermitente quando os grãos não atingem a umidade desejada em uma única passagem. Nesse caso, a câmara de resfriamento é usada como câmara de repouso, com os grãos retornando à câmara de secagem tantas vezes quantas forem necessárias para atingirem a umidade desejada.

A relação de intermitência, nesse sistema, é variável, de acordo com o modelo do secador contínuo e com o tamanho da câmara de resfriamento (em geral de 1 : 0,3 a 1 : 1). A passagem de grãos pelo elevador e pela canalização, igualmente, tem função de repouso.

Secadores intermitentes são muito difundidos no Brasil, por possuírem capacidade ampla, desde 25 até 1.000 sacos, ou mais, por carga, principalmente na secagem

de grãos de arroz e de milho e de sementes de trigo, de feijão e de soja.

Na Fig. 11, pode-se observar um exemplo de secador intermitente largamente usado no Brasil, principalmente para a cultura de arroz.

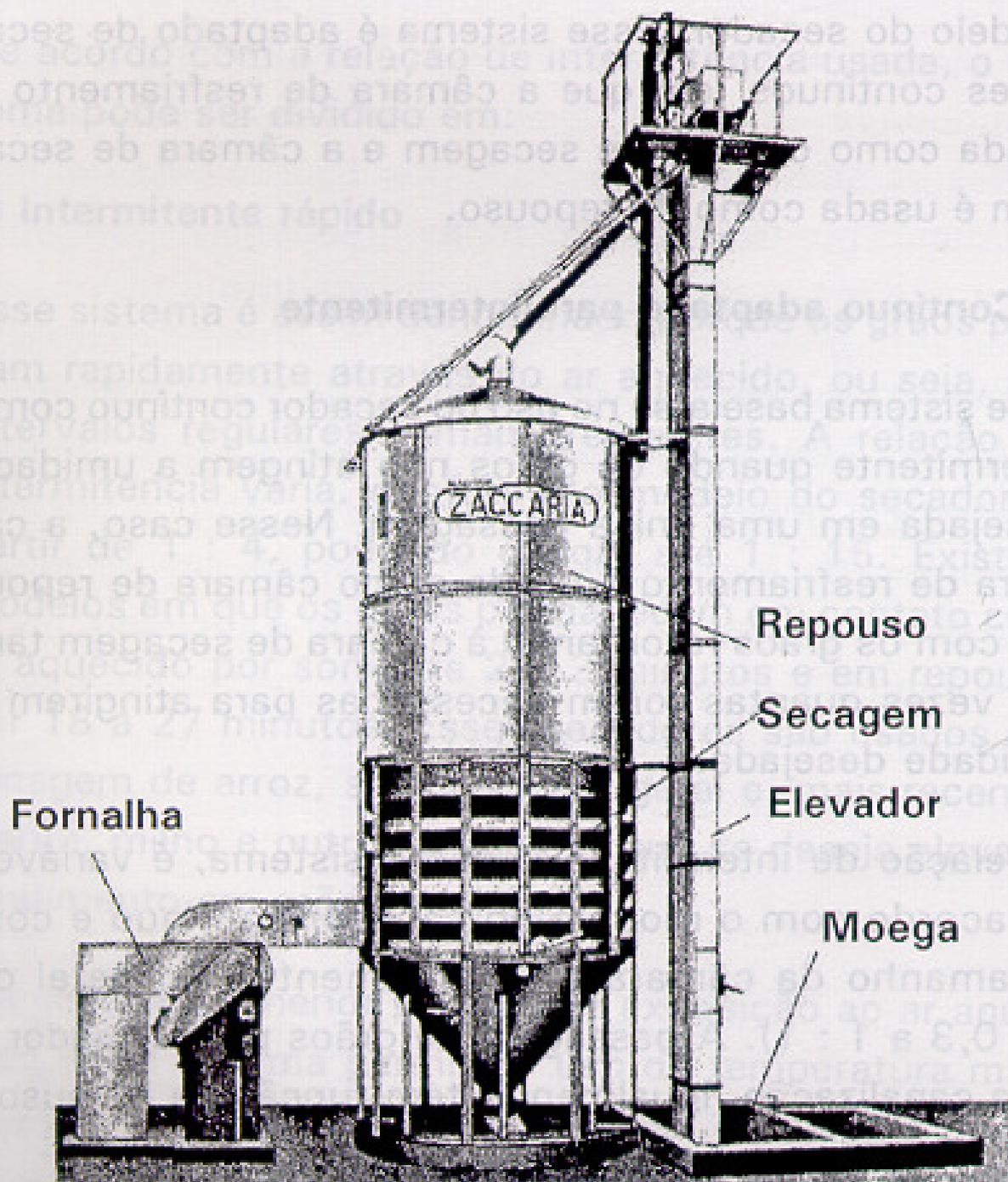


Fig. 11. Secador intermitente.

Fonte: Silva (2000).

A reduzida quantidade de trabalhos com milho e com trigo, em que se emprega esse sistema de secagem, pode ser explicada pelos seguintes pontos:

(1) o milho é usado largamente como fonte energética para rações (suínos e aves principalmente). Sendo assim, o produto, teoricamente, pode receber um tratamento no pré-processamento menos cuidadoso do que aquele que se destina à indústria alimentícia (por exemplo, para extração de amido). No entanto, tem-se observado que a indústria de rações está exigindo, cada vez mais, elevada qualidade na aquisição de grãos de milho.

(2) a utilização, em larga escala, de trigo importado, tido como de elevada qualidade, que prevalece até os dias de hoje, conduz a um baixo nível de exigência de trigo nacional quanto à qualidade junto aos moinhos e, conseqüentemente, aos consumidores finais (donas-de-casa, padarias, indústria de massas etc.).

Rosa (1966), trabalhando com trigo, usou um secador intermitente marca Pampeiro (modelo 90), com capacidade de carga de 4.500 kg. Esse secador caracteriza-se por possuir uma pequena câmara de secagem e uma contínua circulação do produto. Nessa circulação, os grãos sofrem ação do calor por pequenos espaços de tempo (1 minuto), enquanto passam na câmara de secagem. Esses períodos são intercalados com grandes espaços de tempo (10 minutos), em que os grãos estão

apenas circulando dentro do secador, até passarem novamente na câmara de secagem (relação de intermitência de 1 : 10). Na Tabela 7, é apresentado o efeito da secagem de trigo, em função da temperatura e do tempo de exposição sobre a germinação. Pode-se observar que não houve perda imediata de germinação quando foram usadas temperaturas de 40 °C a 90 °C. A 100 °C houve acentuada e progressiva perda do poder germinativo.

Embora avalie o trigo somente como semente, este trabalho é de grande utilidade, pois, segundo alguns autores, como Kreyger (1972) e Staudt & Ziegler (1973), é possível relacionar os danos causados por excesso de temperatura na germinação da semente de trigo com a qualidade do grão destinado à moagem. Enquanto for aumentando a temperatura de secagem e a umidade do grão, a relação entre a perda de germinação da semente de trigo e as perdas de qualidade do produto destinado à moagem torna-se mais estreita.

O secador intermitente não tem câmara para resfriamento de grãos (Fig. 11). Trabalha com temperaturas elevadas e oferece produto com elevado rendimento de grãos inteiros, em decorrência de sua relação de intermitência rápida. Esse secador permite que se trabalhe com relação de intermitência mais lenta, bastando, para isso, que não se encha completamente o secador. O resfriamento dos grãos ao fim da secagem deve ser feito em silos apropriados ou fazendo-os circular pelo

secador com a fonte de calor desligada. Para arroz, recomenda-se diminuir a temperatura gradativamente, quando a umidade dos grãos se aproxima da apropriada para armazenamento. Além de arroz, pode secar outros produtos, o que o torna versátil e de grande utilidade para produtores de grande e médio porte, ou mesmo para pequenos produtores, se operados de forma comunitária. Esse secador, como todos os demais, tem no controle da temperatura da massa de grãos o ponto forte, a descarga permite aumentar ou diminuir a velocidade de descida dos grãos, de tal forma que a temperatura da massa atinja, para o caso de arroz, não mais de 40 °C, condição para se obter o máximo rendimento de grãos inteiros (Weber, 1998).

Segundo Dusi et al. (1998), podem ser apontadas as seguintes vantagens dos secadores intermitentes em relação aos estacionários:

- a) carga e descarga mecanizadas;
- b) revolvimento mecânico; e
- c) alternância de secagem com descanso.

Como desvantagens, os mesmos autores citam:

- a) custo mais elevado do equipamento;
- b) só seca produtos debulhados; e
- c) só funciona bem com carga completa.

Tabela 7. Efeito da temperatura de secagem no secador intermitente sobre a germinação de sementes de trigo.

Temperatura de secagem (°C)	Germinação inicial (%)	Germinação após o período de secagem (h)								
		0:30	1:00	1:30	1:45	2:00	2:15	2:30	3:00	3:30
40	91	91	93	94	-	91	-	93	91	91
50	91	88	89	91	-	92	-	90	92	-
60	89	87	89	89	-	85	-	-	-	-
70	97	93	92	92	-	91	-	90	-	-
80	91	93	92	94	-	91	-	93	-	-
90	93	94	89	89	-	88	88	-	-	-
100	91	84	71	68	59	-	-	-	-	-

Fonte: Rosa (1966).

No sistema de secagem intermitente, devem-se observar cuidados com os danos mecânicos causados pelos elevadores. A secagem intermitente é caracterizada pela passagem de grãos pelo secador por diversas vezes, podendo chegar a um número elevado, dependendo da umidade inicial do produto e da temperatura de secagem empregada. Em cada nova passagem, os grãos devem passar pelo elevador de carga. Os elevadores, em unidades armazenadoras, são pontos críticos quanto a causarem danos mecânicos a grãos. A capacidade do elevador é determinada mediante três variáveis: (1) velocidade de correia plana das canecas, (2) capacidade de carga de cada caneca e (3) número de canecas por metro linear de correia plana. A velocidade da correia plana determina o modo de descarregamento das canecas na parte superior do elevador. Quando a velocidade é elevada, a descarga se dá pela força centrífuga, projetando os grãos contra a parede do elevador, o que é causa de ocorrência de danos mecânicos. Quando a velocidade é baixa, os grãos são descarregados das canecas por gravidade, nas costas da caneca anterior, dirigindo o fluxo de grãos para a canalização de descarga. São considerados elevadores de baixa velocidade aqueles que apresentam velocidade da correia plana inferior a 1,5 m/s.

Além da velocidade, o elevador tem outros fatores de danos mecânicos. Assim, algumas recomendações se fazem necessárias:

- a) no momento da instalação, colocar o elevador mais próximo possível do secador;
- b) usar elevadores com velocidade da correia plana inferior a 1,5 m/s;
- c) incrementar a capacidade, aumentando o tamanho das canecas e/ou o número de canecas por metro linear;
- d) quando a velocidade da correia for elevada, alimentar o elevador no lado descendente das canecas, com o ponto de descarga abaixo da linha do eixo da polia inferior. Em elevadores de baixa velocidade, a alimentação pode ser feita, também, pelo lado ascendente, em ponto acima da linha do eixo da polia inferior;
- e) revestir o lado interno da tampa da cabeça do elevador, no lado da descarga, com lona ou borracha antidesgastante; e
- f) na saída da canalização de descarga do elevador, instalar um amortecedor de velocidade. Quando a canalização for muito longa, recomenda-se a instalação de redutor de velocidade em posição intermediária.

### ***Seca-aeração***

Seca-aeração é um sistema de secagem em que os grãos são removidos quentes do secador e com umidade de aproximadamente dois pontos percentuais acima da

desejada para o armazenamento (Fig. 12). Os grãos são, então, colocados em um silo equalizador, onde permanecem em repouso, sem fluxo de ar, por quatro a seis horas, para a homogeneização da umidade. Quando a temperatura dos grãos estiver acima de 50 °C, deixar repousar por seis a oito horas. Após, no mesmo silo, ou em outro, os grãos são resfriados com fluxos de ar na ordem de 0,5 a 1,0 m<sup>3</sup>/min/t. Após o resfriamento, os grãos terão perdido aproximadamente dois pontos percentuais da umidade, em relação ao que foi retirado do secador. Os resultados desse sistema de secagem são aumento da capacidade dos secadores, diminuição do consumo de energia e a redução das perdas de qualidade dos produtos.

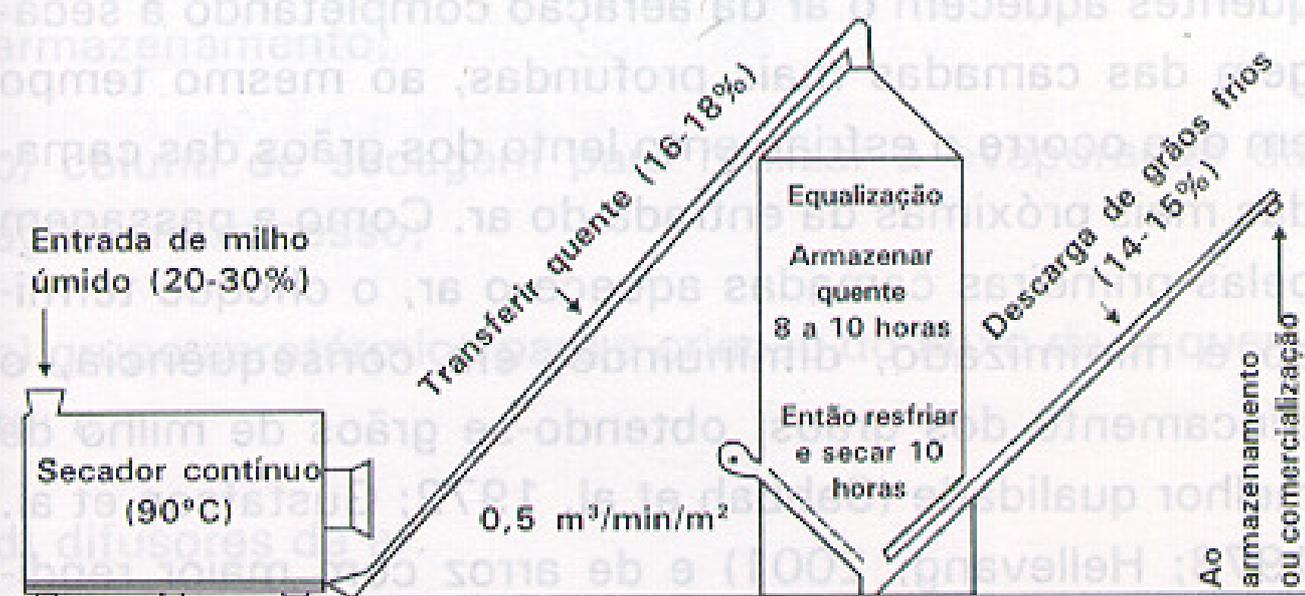


Fig. 12. Esquema representativo do sistema de seca-aeração.

Fonte: Modificado de Weber (1998).

A temperatura mais elevada proporciona a retirada de mais umidade dos grãos, que permite o descarregamento do secador com umidade mais elevada. Segundo Hellevang (2001), para cada 5,5 °C de redução da temperatura dos grãos, são removidos 0,25 pontos percentuais de água durante o resfriamento. Assim, em grãos que saírem do secador com 45 °C e forem resfriados para 22 °C, espera-se a redução de um ponto percentual na umidade, durante esse período de resfriamento.

O princípio do sistema baseia-se no aproveitamento da energia contida nos grãos quentes ao saírem do secador. Durante o período de repouso, a energia interna dos grãos é elevada, favorecendo o transporte da umidade do interior dos grãos para a superfície. Os grãos quentes aquecem o ar da aeração completando a secagem das camadas mais profundas, ao mesmo tempo em que ocorre o esfriamento lento dos grãos das camadas mais próximas da entrada do ar. Como a passagem pelas primeiras camadas aquece o ar, o choque térmico é minimizado, diminuindo, em consequência, o trincamento dos grãos, obtendo-se grãos de milho de melhor qualidade (Sabbah et al. 1972; Gustafson et al. 1978; Hellevang, 2001) e de arroz com maior rendimento de grãos inteiros (Steffe et al. 1979).

Esse processo pode aumentar em até 60% a capacidade de secagem do secador, acompanhado de uma redução de consumo de combustível de até 30%.

O sistema pode ser adotado em todos os grãos, inclusive para sementes, tendo-se cuidado com a temperatura usada no secador, que deve ser mais baixa para sementes.

## **Componentes do Sistema de Secagem**

Independentemente do sistema de secagem artificial utilizado, os secadores apresentam alguns aspectos construtivos comuns. As instalações de secagem estão constituídas essencialmente por:

- a) equipamentos para pré-limpeza, limpeza e armazenamento;
- b) coluna de secagem para realizar a evaporação da água em excesso;
- c) grupo aerotérmico para a criação do fluxo de ar quente; e
- d) difusores de ar.

Os equipamentos para pré-limpeza, limpeza e armazenamento não fazem parte dos objetivos deste trabalho, portanto, não serão detalhados. No entanto, é importante salientar a importância da pré-limpeza nos

processos de secagem e de armazenamento. Impurezas são todos os materiais diferentes de grãos, até mesmo pequenas partículas de grãos (quirela) resultantes de danos mecânicos. No secador, impurezas leves e maiores tendem a se acumular nas laterais, obstruindo as canaletas e dificultando a descida dos grãos. Assim, são focos potenciais de incêndios no secador. Em silos armazenadores e secadores estacionários, impurezas de pequeno tamanho tendem a se acumular no centro dos silos, na operação de enchimento. Por outro lado, impurezas maiores tendem a se acumular nas laterais do silo. Isso causa diferentes pressões estáticas na massa de grãos, desuniformizando-a e, por vezes, impedindo a circulação do ar em certos pontos. Impurezas pequenas ocupam espaço entre os grãos dificultando a passagem do ar na secagem e na aeração. As impurezas podem ser focos de umidade, que se transferem para os grãos, resultando em bolsas de calor na massa. Podem, também, se constituir em focos de ataque de insetos e de fungos.

## **Coluna de secagem**

Coluna de secagem é o elemento da instalação que abriga a massa de grãos, objeto da secagem. Dependendo do sistema de secagem adotado e do tipo de secador usado, a coluna de secagem pode ser constituída de três câmaras distintas:

a) **Câmara de secagem:** é a parte da coluna de secagem na qual grãos, em movimento ou não, ficam expostos à ação do ar aquecido. É nessa câmara que ocorre a troca da energia contida no ar (calor) pelo vapor de água (massa) evaporada dos grãos úmidos.

b) **Câmara de repouso:** é o segmento da coluna de secagem no qual os grãos permanecem em repouso, sem qualquer circulação de ar. Essa câmara tem a função de permitir a redistribuição da umidade do interior para a superfície dos grãos. É o que se denomina de equalização e é característica da secagem intermitente. A principal consequência da passagem dos grãos por essa câmara é que a redistribuição da umidade alivia as tensões internas, evitando que os grãos apresentem trincamentos e rachaduras. A presença dessa câmara é fundamental na secagem de arroz e de milho para a obtenção de elevada qualidade de grãos.

c) **Câmara de resfriamento:** nessa parte da coluna de secagem, grãos são resfriados ao fim do processo de secagem. Geralmente é a última câmara antes da saída dos grãos do secador. O resfriamento brusco provoca choque térmico, que tem como consequência trincamento de grãos.

A maioria dos secadores não têm as três câmaras ao mesmo tempo em sua estrutura, porém, por determinado tempo durante o processo de secagem, podem exercer a função de secagem, repouso ou resfriamento. Na maioria dos secadores contínuos, as câmaras de

resfriamento e de repouso formam uma câmara única, a qual exerce a função de uma ou outra, dependendo do sistema de secagem adotado. Na secagem de corpo inteiro, a câmara de secagem e a de resfriamento atuam, conjuntamente, como câmara de secagem única. Nos secadores estacionários, uma única câmara pode exercer, em seqüência, as funções de secagem, repouso e resfriamento. Em alguns secadores contínuos usados como intermitentes, pode-se inverter as câmaras de secagem e de repouso, tornando a intermitência mais rápida.

Ainda fazem parte da coluna de secagem de secadores contínuos e intermitentes, os segmentos elevador de carga, funil de carregamento, mesa de descarga e funil de descarga. A mesa de descarga é um mecanismo importante, por ser responsável pela velocidade de passagem de grãos pelo secador. Essa velocidade é controlada por um mecanismo vibratório, por eclusas ou por sistema de *timer* pneumático.

A coluna de secagem pode ser classificada de acordo com vários critérios:

a) Em relação ao modo de carga e descarga:

- **contínuas** – quando o grão flui com continuidade ou em breves intervalos de tempo;
- **descontínuas** – quando a coluna de secagem é esvaziada ao fim da secagem e novamente enchida com grãos úmidos, também conhecida como secagem em

lotes ou cargas.

b) Em relação à forma de avanço do grão na câmara de secagem:

- **fluxo contínuo** – quando o grão avança continuamente dentro da câmara;
- **fluxo descontínuo** – quando há interrupções no fluxo de grãos dentro da coluna de secagem.

c) Em relação ao sistema de esvaziamento do secador:

- **gravidade** – quando o grão desce espontaneamente ao longo de todas as seções da coluna de secagem;
- **mecânico** – quando o grão avança pela ação de sistemas mecânicos;
- **misto** – no caso de combinações dos dois sistemas anteriores.

d) Em relação ao processo de secagem:

- **com recuperação** – quando o grão permanece na coluna de secagem à espera da difusão de água, para então recomeçar o processo de evaporação;
- **sem recuperação** – no caso contrário.

Ainda que de menor importância, outras classificações poderiam ser feitas com base em outros parâmetros, como, por exemplo, tipo de instalação (fixa ou móvel),

tipo de combustível empregado, sistema de aquecimento de ar etc.

## **Difusores de ar**

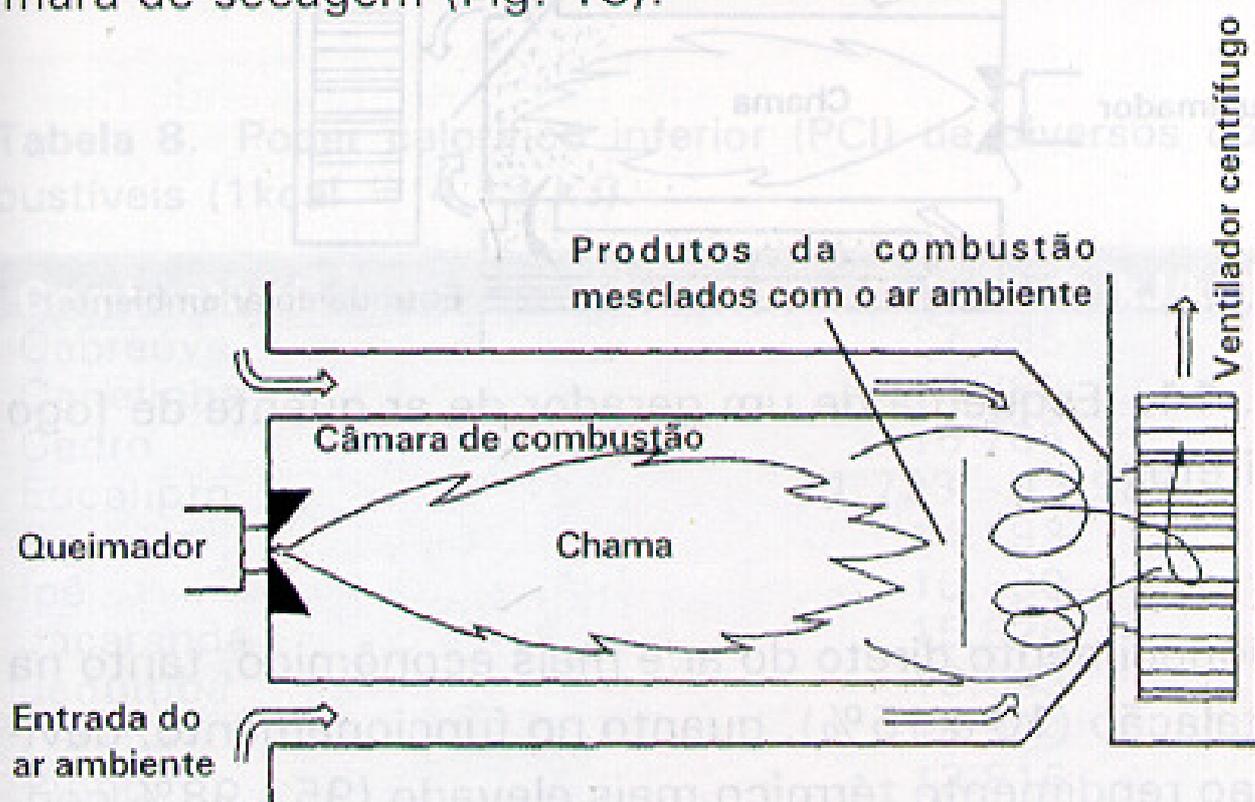
Fazem parte, também, da estrutura dos secadores os chamados difusores de ar, que fazem ligação entre o grupo aerotérmico e a coluna de secagem. Pelos difusores, ar é conduzido da fornalha ou queimador até a coluna de secagem, e desta para o ambiente exterior. Os difusores devem ser construídos de maneira a proporcionarem mínima perda de carga, evitando ao máximo curvas e ângulos. A distância da fonte de calor até a massa de grãos deve ser menor possível, respeitando-se as características técnicas do equipamento, para evitar perdas de calor.

## **Grupo aerotérmico**

Grupo aerotérmico compreende a fonte de calor (queimador ou fornalha) e a fonte de ar sob pressão (ventilador), responsáveis pelos procedimentos mecânicos dos sistemas de secagem: (a) aquecimento do ar de secagem, elevando o poder secante; (b) movimentação do ar, com o objetivo de, primeiramente, carregar a energia calórica até a massa de grãos, elevando a

temperatura e a taxa de evaporação da água neles contidos. Num segundo momento, esse ar tem função de carregar para fora da câmara de secagem o vapor de água transferido dos grãos para o ar intergranular.

Nas fornalhas ou queimadores, o aquecimento do ar de secagem pode ser feito de forma **direta** ou **indireta**. No primeiro caso, os produtos da combustão são misturados com ar ambiente, aspirados pelo ventilador e direcionado através do produto que se encontra na câmara de secagem (Fig. 13).



**Fig. 13.** Esquema de um gerador de ar quente de fogo direto.

No segundo caso (Fig. 14), ar ambiente passa através de um trocador de calor de eixos tubulares, sem se misturar com os resíduos da combustão, que são elimi-

nados através da chaminé. A superfície de intercâmbio de calor deve ser da ordem de  $1 \text{ m}^2$  para cada  $42.000 \text{ kJ/h}$  ( $10.000 \text{ kcal/h}$ ) e seu uso requer elevado custo de manutenção com objetivo de limitar perdas de calor.

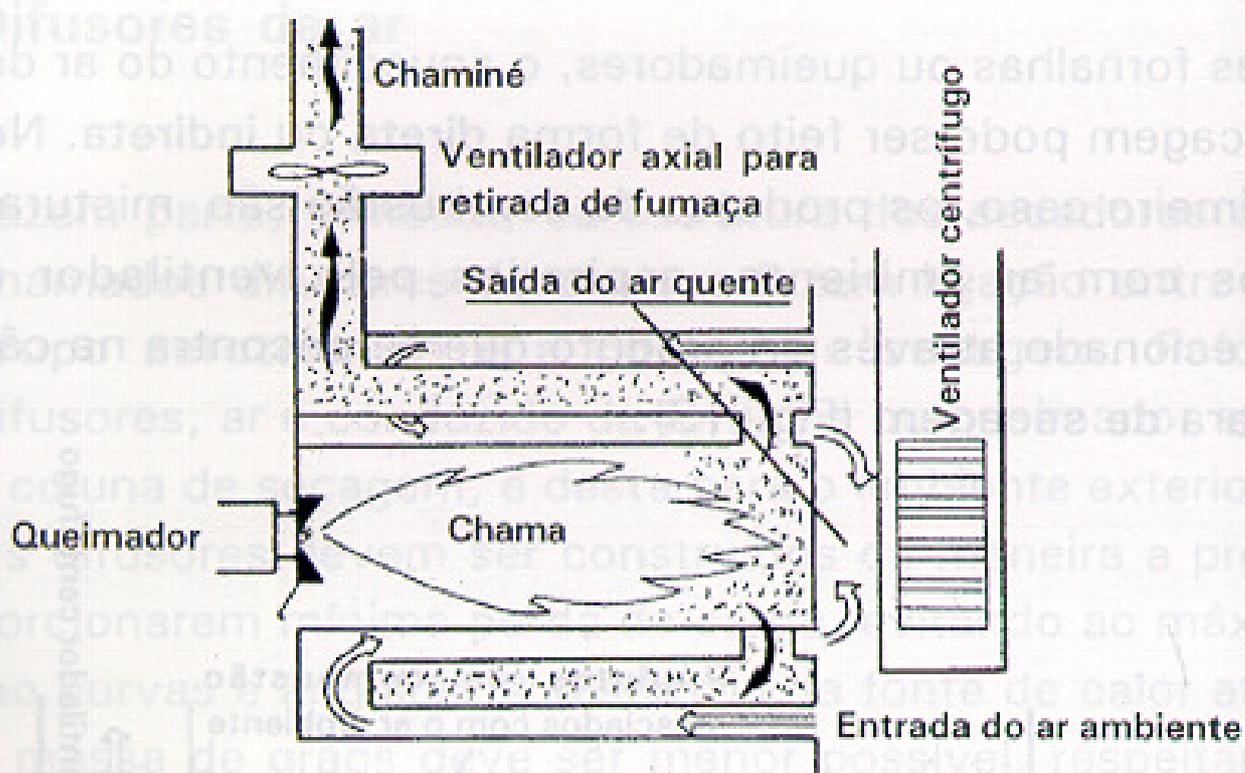


Fig. 14. Esquema de um gerador de ar quente de fogo indireto.

O aquecimento direto do ar é mais econômico, tanto na instalação (10 a 15%), quanto no funcionamento, devido ao rendimento térmico mais elevado (95 - 98% contra 85 - 90% do aquecimento indireto).

Além de lenha, carvão e outros resíduos orgânicos sólidos, usados nas fornalhas, os queimadores utilizam como combustível *fuel oil*, óleo diesel, gás liquefeito de petróleo (GLP) e gás natural (GN). O *fuel oil*, apesar de menor custo, apresenta irregularidade de funcionamen-

to e é exigente em manutenção em razão de depósitos e incrustações de resíduos não queimados. O uso de GLP tem ganhado espaço em muitas instalações de secagem pela simplificação do equipamento de combustão (queimador), pela ausência de resíduos sólidos e pela simplicidade operacional, através de controladores eletrônicos. O gás natural, de menor custo que o GLP, apresenta perspectivas de utilização em secagem de produtos agrícolas, especialmente em regiões abrangidas por gasodutos. Entretanto, o GN apresenta menor poder calorífico que o GLP (Tabela 8).

**Tabela 8.** Poder calorífico inferior (PCI) de diversos combustíveis (1kcal = 4,19 kJ).

<b>Combustível</b>	<b>Poder Calorífico (kJ/kg)</b>
Cabreúva	17.396
Canelinha	16.789
Cedro	16.705
Eucalipto	11.723 – 13.983
Figueira	14.193
Ipê	16.830
Jacarandá	15.826
Jequitibá	16.663
Peroba	15.574
Pinho	13.816
Bagaço de cana	9.210
Serragem de pinho	10.467
Casca de arroz	13.816
Casca de tanino úmido	3.349
Palha de trigo	13.397
Palha de amendoim	12.979
Gás - GLP	46.054
Gás natural	37.262 – 74.525
<i>Fuel oil</i>	40.193
Carvão	18.421

Fonte: Weber (1998).

Os ventiladores têm a função de criar um gradiente energético, que promove o movimento do ar através do secador e dos grãos nele contidos. Durante a passagem pelos grãos, ocorre a troca de energia (calor) por massa (vapor de água). O correto dimensionamento do ventilador é de fundamental importância na velocidade de secagem e no rendimento energético do secador.

### ***Fornalhas e combustíveis***

Nos anos 50 e 60, no Brasil, usava-se na grande maioria dos secadores agrícolas fornalhas a lenha e outros resíduos orgânicos, como casca de arroz. Para manter esses equipamentos em funcionamento, os grandes produtores de grãos, especialmente cooperativas, implantaram grandes áreas de reflorestamento. Nos anos 60 e 70, passou-se a usar em larga escala as fornalhas a óleo, tipo *fuel oil*, que apresentavam vantagens sobre a lenha, especialmente no que diz respeito a manuseio, regulagem e estabilização da temperatura, estocagem do combustível e preservação das, já poucas, reservas florestais brasileiras. Entretanto, com a crise mundial de petróleo, no ano de 1981 proibiu-se o uso de derivados de petróleo na secagem agrícola. Voltaram, então, as fornalhas a lenha, que permanecem, na sua grande maioria, até os dias de hoje. Recentemente o óleo voltou a ser liberado, oportunidade em que muitas unidades armazenadoras, e especialmente indústrias, volta-

ram a usá-lo, adaptando a própria fornalha, antes a lenha, em câmara de combustão e diminuindo sensivelmente o custo de instalação (Weber, 1998).

A operação de fornalhas a lenha é realizada manualmente, pois há necessidade de constante abastecimento, monitoramento das entradas de ar secundário para manter uniformidade da temperatura, limpeza e manutenção. Em razão disso, a mão-de-obra assume papel importante no custo da secagem. Nas fornalhas a lenha, a temperatura na câmara de combustão deve estar acima de 500 °C, para evitar formação de fagulhas, que podem resultar em incêndios, e contaminação com fumaça, resultante da queima incompleta do combustível. Infelizmente existem poucos estudos de fornalhas usadas em secadores comerciais no país.

Atualmente, encontra-se liberado o uso de GLP e de GN, para secagem de produtos agrícolas. Segundo Weber (1998), os combustíveis gasosos podem tornar-se opção interessante, pois oferecem simplicidade no sistema, fácil operação e excelente controle da temperatura, favorecendo muito a automação da secagem. GLP apresenta restrições de uso pelo preço elevado; por outro lado, GN apresenta menor custo. Em virtude de disporem de gás natural, países como Bolívia, Argentina e E.U.A., bem como em vários locais da Europa, esses queimadores já são, ou podem vir a ser, largamente empregados. No Brasil, tão logo se conclua a ligação, por gasoduto, com países produtores, como

Bolívia e Argentina, o gás natural poderá vir a ser alternativa econômica como combustível para secagem de produtos agrícolas, especialmente em áreas ao longo do gasoduto.

Outra questão muito importante é qualidade da combustão. A lenha, dependendo de tipo, umidade e conservação, é um combustível sólido de combustão relativamente incompleta, liberando grande quantidade de produtos químicos, alguns comprovadamente nocivos à saúde humana. Ao se usar fornalhas de fogo direto na secagem, esses produtos químicos, entre os quais se encontra o grupo de compostos aromáticos polinucleados (APN), podem contaminar os grãos. Os APNs são substâncias comprovadamente mutagênicas e carcinogênicas. Outros componentes conferem cor e cheiro aos produtos, numa segura indicação de contaminação química. Com o uso desse tipo de fornalha, quando o combustível é lenha, é quase impossível evitar a contaminação dos produtos com fuligem e cinzas. Soma-se a isso o fato de gerarem fagulhas incandescentes que podem causar incêndios nos secadores.

Combustíveis gasosos de cadeia curta produzem menos APN do que os óleos ou combustíveis sólidos. A fuligem, composta de partículas de carbono com superfície ativa, absorve grande quantidade de outros produtos da combustão, incluindo os APNs (Winkler, citado por Hutt et al., 1978). Segundo Hutt et al. (1978), que estudaram contaminação dos grãos durante a secagem

em que se usou aquecimento direto, não ocorreu aumento importante na contaminação dos produtos com APN, quando empregaram combustíveis gasosos (propano e gás industrial); o mesmo ocorreu com queimadores de *fuel oil* de chama azul. Já queimadores de *fuel oil* de chama amarela causaram aumentos significativos de APN nos produtos, principalmente quando houve aumento significativo de contaminações por fuligem nos grãos.

Observa-se, freqüentemente, em secadores comerciais fabricados no país, a construção de fornalhas a lenha sem se observar projeto específico do equipamento, levando ao incorreto dimensionamento, principalmente no que se refere a tamanho da câmara de combustão, área de grelha e abertura do ar primário. Essas três características determinam a obtenção de oxigênio suficiente, bem como possibilitam a mistura eficiente do ar com o combustível para máximo aproveitamento deste último, com mínimo de produção de fumaça. Mesmo quando corretamente dimensionadas, observa-se também operação inadequada das fornalhas, principalmente no que se refere, entre outros, a uso de lenha verde ou úmida, irregularidade no abastecimento da câmara de combustão, abertura do ar primário, abertura da porta de abastecimento e obstrução de grelha e de cinzeiros por excesso de cinzas. Tem-se observado que esses fatores vêm acompanhados de elevadas contaminações de grãos com fumaça, que pode levar à rejeição do produto para fabricação de rações. Esses fatos tendem a ser

agravados no caso de colheita antecipada de grãos com elevada umidade.

Outra questão importante é que, com a combustão imperfeita das fomalhas a lenha, há produção de gases ácidos, que são corrosivos, ocasionando diminuição da vida útil do secador.

Tanto secadores de fogo direto quanto de fogo indireto podem ter como fonte calorífica os mais diversos combustíveis, tais como lenha, casca de arroz, briquetes compactados de polpa de madeira ou de resíduos agrícolas, carvão e outros (sólidos), óleo diesel, óleo BPF (baixo ponto de fusão), óleo APF (elevado ponto de fusão), óleo OC4 (óleo combustível tipo 4) (líquidos), gás GLP e gás natural (gasosos). Os combustíveis têm diferentes poderes caloríficos, como pode ser observado na Tabela 8, cujo conhecimento é de fundamental importância na avaliação econômica no momento da escolha do sistema de aquecimento do ar de secagem a ser instalado. A massa específica da lenha varia entre 250 a 450 kg/m<sup>3</sup>, dependendo de espécie, espessura e conservação.

Há, ainda, secadores contínuos, cuja fonte calorífica é energia elétrica, nos quais ar é aquecido por meio de resistências e que são usados em situações especiais em locais onde há sobra de energia de muito baixo custo. Nesse caso não ocorre contaminação dos produtos, semelhante à que ocorre em secadores com vapor ou

água quente e mesmo em trocadores de calor. A energia solar também é alternativa, principalmente para secagem com baixas temperaturas e para secagem na propriedade.

## **Ventiladores**

Ventiladores são equipamentos que, por meio da rotação de um rotor equipado com pás convenientemente distribuídas e acionado por motor, transformam energia mecânica em energia potencial de pressão e em energia cinética. Essas energias tornam o ar capaz de se deslocar, vencendo distâncias e resistências oferecidas pelo sistema de distribuição e pela massa de grãos.

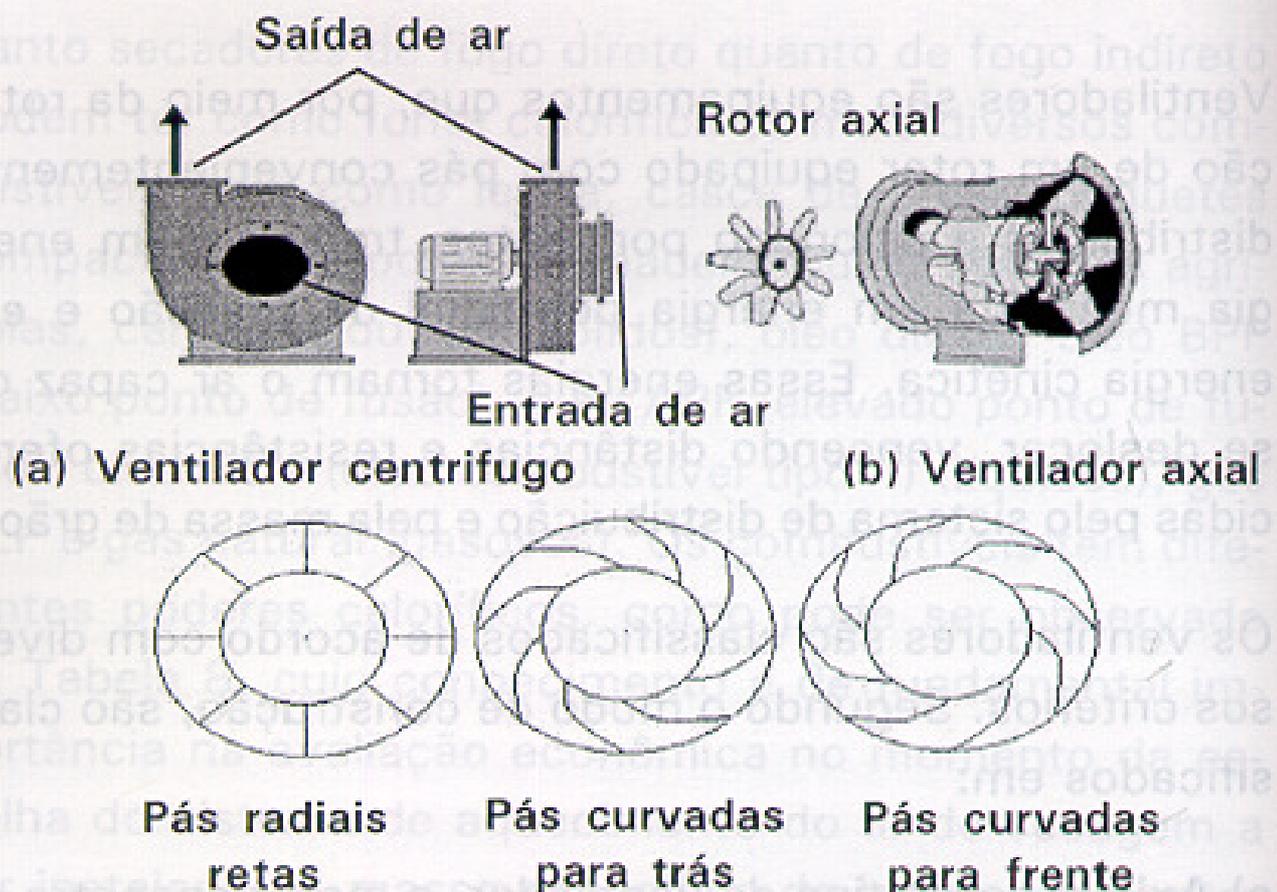
Os ventiladores são classificados de acordo com diversos critérios. Segundo o modo de construção, são classificados em:

**a) Axiais:** nesse tipo de ventilador, o motor encontra-se embutido na armação do mesmo, ou seja, dentro do tubo do ventilador, com o rotor montado diretamente no eixo do motor, semelhante a uma hélice (Fig. 15). O ar entra e sai paralelamente ao eixo do ventilador. São indicados para situações de elevada vazão e baixas pressões (até 140 mmca), não suportando sobrecarga.

**b) Centrífugos com as pás para trás:** ar entra no motor paralelamente ao eixo do mesmo e é descarregado, por

força centrífuga, perpendicularmente ao eixo de entrada. De construção robusta, trabalha com elevadas pressões, e é de custo elevado.

c) **Centrífugos com as pás para frente:** trabalha com pressões moderadas, não suportando sobrecarga.



**Fig. 15.** Tipos de ventiladores usados em sistemas de secagem.

Fonte: Silva (2000).

A definição e seleção do ventilador exigem conhecimento de dois elementos: (a) vazão total e (b) pressão estática. Esses dois elementos são definidos no projeto

dos equipamentos e refletem atividades que o sistema de secagem irá executar, tais como tipo de produto, quantidade, umidade inicial e final do produto, entre outras.

Como componente do grupo aerotérmico, os ventiladores são responsáveis pela movimentação do ar no interior do secador. De acordo com a direção do fluxo de ar em relação à massa de grãos, o fluxo de ar dos secadores pode ser classificado em fluxo cruzado, fluxo concorrente, fluxo contracorrente e fluxo misto.

### *Fluxo cruzado*

Esse tipo de fluxo de ar é característico da secagem estacionária, na qual os grãos permanecem parados na câmara de secagem e o ar atravessa a massa (Fig. 16a).

Em secadores contínuos ou intermitentes, em que se usa fluxo cruzado, produto úmido é colocado em uma moega superior e, por gravidade, vai descendo pelo secador, no qual é secado até atingir determinada umidade, resfriado e descarregado na parte inferior. A secagem e o resfriamento são realizados por meio de fluxo de ar perpendicular ao fluxo de grãos. O secador possui um *plenum* envolvido por colunas de grãos de 30 a 40 cm de espessura e é conhecido como secador de lote ou de coluna. O fluxo de grãos é regulado por um mecanismo localizado no fim da coluna de secagem. Secadores

de fluxo cruzado não secam grãos uniformemente. Esses equipamentos proporcionam gradientes de umidade no sentido transversal na coluna de grãos, que é tanto maior quanto mais elevadas forem temperatura do ar de secagem e espessura da camada de grãos. Isto pode levar a trincamento e a super secagem dos grãos que se encontram próximos à entrada do ar aquecido.

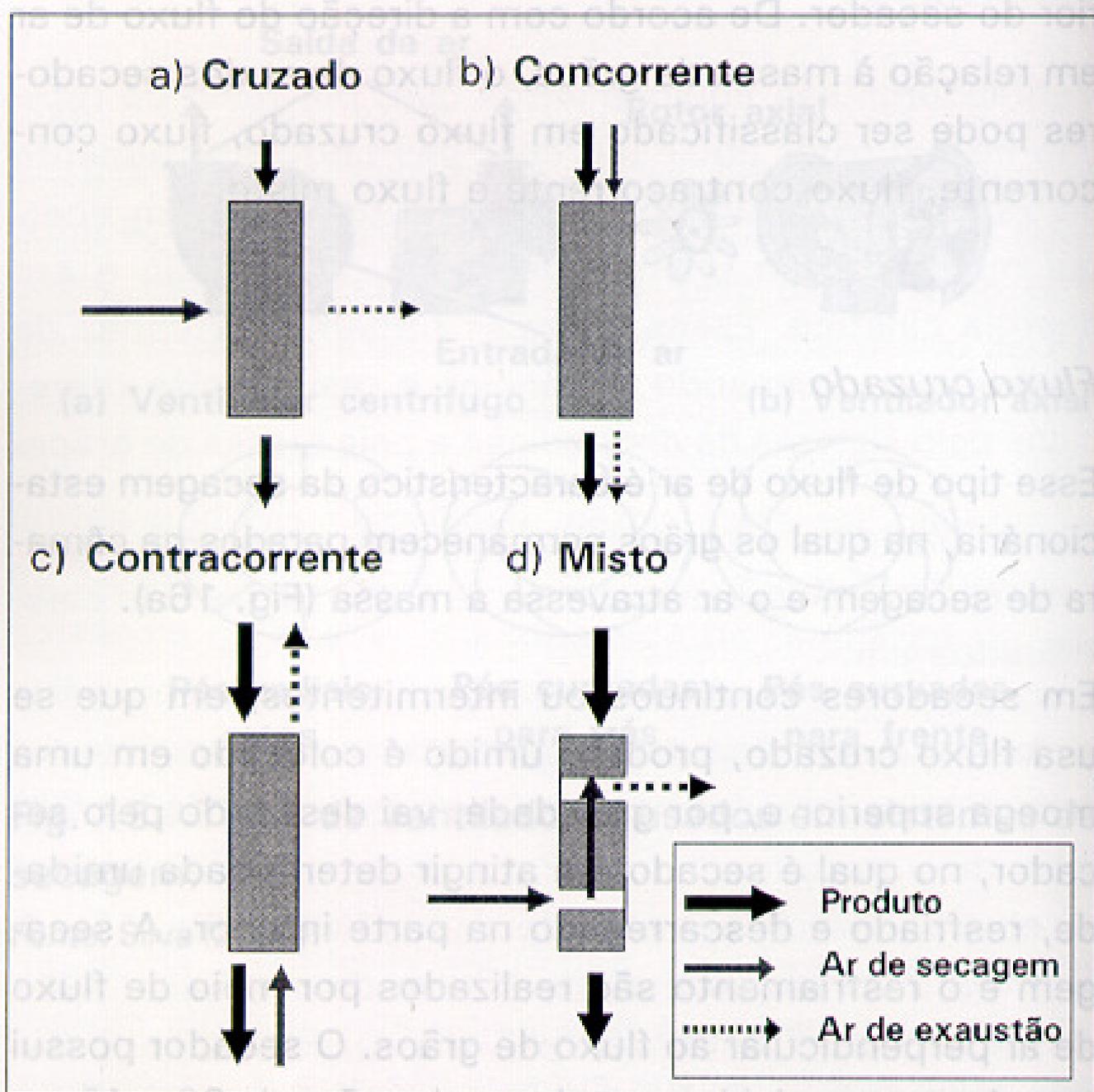


Fig. 16. Desenhos esquemáticos de quatro tipos fluxos de ar em secadores de elevada temperatura: a) fluxo cruzado, b) fluxo concorrente, c) fluxo contracorrente, e d) fluxo misto.

A desuniformidade de secagem pode ser minimizada pelo revolvimento manual dos grãos em secadores estacionários ou mediante instalação de mecanismos de revolvimento dos grãos em secadores contínuos ou intermitentes.

Secadores que usam fluxo cruzado têm as vantagens da elevada capacidade de secagem, facilidade de manuseio e operação e baixo custo inicial. Entretanto, têm como desvantagens superaquecimento dos grãos, elevado consumo de energia, desuniformidade de secagem, tanto em camada fixa como contínua, e baixa eficiência de secagem.

### *Fluxo concorrente*

Nos secadores que usam fluxo de ar concorrente, ar e grãos seguem a mesma direção e sentido (Fig. 16b). Ar mais quente encontra os grãos mais úmidos, e a elevada taxa de evaporação causa rápido resfriamento desse ar. Isso possibilita o uso de temperaturas mais elevadas que as empregadas em secadores de fluxo cruzado. O produto final é homogêneo quanto a temperatura e umidade. Secadores que usam fluxo concorrente de ar são elevadamente eficientes energeticamente e grande capacidade de secagem, a qual resulta em produto de elevada qualidade. As desvantagens são o elevado custo de construção e maior risco de incêndios por causa da elevada temperatura.

### *Fluxo contracorrente*

Nos secadores que usam fluxo de ar contracorrente, contrariamente ao anterior, ar aquecido é forçado a passar pela massa de grãos em sentido contrário ao fluxo de grãos (Fig. 16c). Nesse tipo de secador, à medida que o produto vai descendo pela coluna de secagem, temperatura vai sendo aumentada gradualmente, atingindo valor máximo no fim da coluna de secagem, que coincide com o ponto de entrada do ar aquecido. Os secadores que usam esse tipo de fluxo de ar são recomendados para o sistema de seca-aeração, pois o grão apresenta elevada quantidade de energia armazenada na forma de calor sensível ao ser transferido para o silo de equalização e resfriamento. Usa-se também em silos secadores, como variante da secagem estacionária, em que, conforme o produto vai secando nas camadas inferiores, uma rosca varredora descarrega toda a seção transversal do silo, para resfriamento e armazenamento.

Secadores que usam esse fluxo têm vantagem de ser elevadamente eficientes energeticamente, os grãos ficam expostos à temperatura elevada por menos tempo e têm menor suscetibilidade aos danos mecânicos.

### *Fluxo misto*

Fluxo misto é caracterizado pelo secador utilizar, ao mesmo tempo, mais de um dos três tipos de fluxo (cru-

zado, concorrente e contracorrente) (Fig. 16d). São os conhecidos secadores tipo cascata, que, no Brasil, são amplamente usados em unidades armazenadoras de grande porte, em virtude da elevada capacidade de secagem (10 a 250 t/h para redução do teor de umidade de grãos de 18% para 13%) e eficiência energética. As câmaras de secagem e resfriamento são constituídas por uma série de calhas em forma de "V" invertido, dispostas em linhas alternadas ou cruzadas dentro do corpo do secador. Os grãos movem-se para baixo, sob ação da gravidade, e entre calhas invertidas. O ar de secagem entra por uma linha de calhas e sai nas outras imediatamente adjacentes (superior ou inferior). Os secadores de fluxo misto têm elevado custo. Por isso, sua fabricação vem sendo reduzida na América do Norte. No Leste Europeu, ao contrário, esses secadores continuam a predominar entre secadores de fluxo contínuo.

## Tipos de Secadores

Atualmente, existe a tendência mundial em reduzir custos de fabricação de equipamentos e preço dos serviços prestados. No entanto, deve ser priorizada a constante busca pela melhoria da qualidade do produto processado.

Segundo Bakker-Arkema (1984), o objetivo final no pré-

processamento de pós-colheita é manter inalteradas as características do produto, as quais dependem do uso final a que se destina. Para trigo, a qualidade na panificação é essencial; para soja, a elevada extração de óleo; no caso de arroz, o elevado rendimento de grãos inteiros; para milho, a extração de amido e o rendimento do animal ao consumir ração. Vários critérios de qualidade vêm sendo adotados para avaliar produtos:

- a) na determinação de danos térmicos na secagem de trigo empregam-se microtestes de cozimento com relação ao volume do pão e à viabilidade de sementes;
- b) conteúdo de ácidos graxos livres e rendimento de óleo identificam se a secagem de soja foi feita em elevada temperatura; e
- c) conteúdo de lisina, coloração e suscetibilidade a quebras na avaliação de milho secado com elevada temperatura.

Em escala de fazenda, nos Estados Unidos, segundo Loewer et al. (1994) e Bakker-Arkema & Ballinger (1983), os secadores de elevada temperatura mais usados são os de fluxo cruzado, podendo ser de dois tipos: secadores de lote ou carga e secadores contínuos.

O princípio básico em ambos tipos de secadores é que operam com elevadas vazões de ar  $0,66$  a  $1,67 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^3$  (50 a 125 cubic feet per minute/bushel - cfm/bu) através de colunas, pouco espessas, de  $0,30$  m a  $0,35$  m,

obtendo-se com isso taxas de secagem relativamente elevadas. O secador de lote e o contínuo são muito similares em aparência e performance. Os secadores de lote têm funcionamento semelhante aos de leito estacionário. A massa de grãos não se move durante o processo de secagem e o ar de secagem é insuflado através da coluna de grãos. A temperatura do ar de secagem nos secadores de lote está na faixa de 71 °C a 93 °C, dependendo do tipo de grão.

Segundo Bakker-Arkema & Fontana (1983), os secadores de fluxo cruzado usados nos Estados Unidos para a secagem de arroz apresentam as seguintes características:

- a) espessura das colunas de secagem entre 0,2 m e 0,4 m;
- b) fluxo de ar entre 10 a 25 m<sup>3</sup>/min/m<sup>2</sup>;
- c) temperatura de secagem entre 45 °C a 80 °C.

Os grãos de arroz permanecem em contato com ar de secagem por períodos de 10-20 min em cada passagem no secador. São removidos, por passagem no secador, entre 1,0 a 3,0 pontos percentuais de umidade. Grãos de arroz com 22% de umidade requerem pelo menos 5 passagens pelo secador para secar até 13-14%. Após a secagem, em virtude da aeração, estabiliza-se com 12 a 13 % de umidade.

Bakker-Arkema (1994) fez uma comparação entre secadores de fluxo cruzado, concorrente e misto (Tabela 9). Secou grãos de milho, retirando 10 pontos percentuais de umidade dos grãos, tendo avaliado a temperatura do ar de secagem, a máxima temperatura alcançada pelos grãos e a suscetibilidade a quebra durante a secagem. Segundo esse autor, o secador de fluxo concorrente foi que consumiu menos energia no processo, porém foi o equipamento de maior preço.

Tabela 9. Efeito do tipo de secador sobre o ar de secagem, máxima temperatura do grão, e suscetibilidade a quebras em milho.

<b>Tipo de secador</b>	<b>Temperatura do ar de secagem (°C)</b>	<b>Temperatura máxima do grão (°C)</b>	<b>Suscetibilidade a quebra (%)</b>
Fluxo Cruzado	80 – 110	80 - 100	20
Fluxo Misto	100 – 130	70 - 100	10
Fluxo Concorrente	175 – 285	60 - 80	5

Fonte: Bakker-Arkema (1994).

Como se pode observar na Tabela 9, o secador de fluxo cruzado foi que apresentou a maior temperatura dos grãos em função da temperatura do ar de secagem empregada, que levou a maior suscetibilidade a quebra (20%) de grãos de milho.

Segundo Brooker et al. (1992), em decorrência do gradiente na percentagem de umidade dos grãos ao longo

da coluna de secagem nos secadores de fluxo cruzado, a qualidade dos grãos varia, como se pode observar na Tabela 10. Os grãos próximos à entrada do ar de secagem sofreram supersecagem e apresentaram grande aumento na suscetibilidade a quebra, se comparados com aqueles mais afastados da entrada de ar. Na Tabela 11, observam-se danos causados pela secagem em milho.

**Tabela 10.** Temperatura do grão, umidade e suscetibilidade a quebra, após a secagem, em diferentes pontos da coluna de grãos em secador convencional de fluxo cruzado, sem resfriamento (umidade inicial 25,5% e umidade final 19,0%, com temperatura de secagem de 110 °C).

<b>Distância do ar de entrada (cm)</b>	<b>Temperatura do grão (°C)</b>	<b>Umidade (%)</b>	<b>Suscetibilidade a quebra (%)</b>
1,25	102	10	48
7,50	78	20	11
13,75	51	24	10

Fonte: Brooker et al. (1992).

Gustafson & Morey (1981) realizaram vários testes com secador automático de carga. O secador caracterizava-se por ter colunas de 0,3 m de espessura e fluxo de ar de 0,93 m<sup>3</sup>/s/m<sup>3</sup> (70 cfm/bu), aproximadamente. O produto usado foi milho, e foram analisados umidade, suscetibilidade a quebra e percentagem de germinação. Com uso de temperatura de 93 °C e 116 °C na secagem, a germinação foi reduzida a valores próximos a

zero. A suscetibilidade a quebra foi maior quando os grãos foram colhidos com umidade de 30,5% e 31,0%, comparado com a colheita com 27,0%. A repetição do experimento no ano seguinte não confirmou essa diferença; no entanto, em geral, praticamente duplicou a suscetibilidade a quebra, evidenciando que fatores durante a fase de produção podem influenciar a suscetibilidade a quebra no pós-colheita, uma vez que a densidade aparente no segundo ano foi menor que do ano anterior.

**Tabela 11.** Efeito da umidade final sobre a suscetibilidade a quebra de milho com 25% de umidade em secador convencional de fluxo cruzado (temperatura de 110 °C).

<b>Teor médio de umidade final (%)</b>	<b>Suscetibilidade a quebra (%)</b>
18	11
15	18
13	27
11	39

Fonte: Brooker et al. (1992).

Os estudos realizados por Bakker-Arkema (1994), por Gustafson & Morey (1981) e por Brooker et al. (1992), descritos neste item, são ilustrativos dos problemas que apresentam esses tipos de secadores, quando é usada elevada temperatura de secagem, sem reversão do flu-

xo de ar ou dos grãos na coluna.

Embora esse tipo de equipamento seja pouco usado no Brasil, as condições de secagem são semelhantes às dos secadores de camada fixa (Oliveira & Martins, 1992) e intermitentes (Lacerda Filho et al. 1982), usados principalmente nos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina.

De acordo com diversos autores (Woodforde & Lawton, 1965; Chien et al. 1971; Bakker-Arkema & Fontana, 1983; Dalbello, 1995), que avaliaram, entre outras variáveis, a temperatura de secagem, o gradiente de umidade nas camadas, a frente de secagem e a qualidade do produto, os secadores de fluxo cruzado em lotes e contínuos e os secadores de camada fixa e silos secadores, de um modo geral, apresentaram os seguintes comportamentos:

- 1) o tempo de secagem diminuiu quando se aumentaram a temperatura e o fluxo de ar de secagem;
- 2) a eficiência da secagem diminuiu quando se elevou o fluxo de ar, porém, geralmente, aumentou com a temperatura do ar de secagem;
- 3) a taxa de secagem aumentou com a elevação da temperatura e do fluxo de ar;
- 4) o gradiente de umidade na coluna aumentou com a elevação da temperatura e da espessura da camada de

grãos, mas decresceu com o aumento do fluxo de ar;

5) o consumo de combustível por ponto percentual de água retirada aumentou com o fluxo de ar e, geralmente, decresceu com a temperatura do ar de secagem; e

6) os grãos próximos à entrada do ar aquecido no secador estiveram sujeitos a maior aumento da temperatura e, por isso, secaram mais rapidamente, porém, em contrapartida, sofreram maiores danos em qualidade final.

No Estado do Rio Grande do Sul, usam-se basicamente três tipos de secadores na secagem de grãos e sementes:

- a) ***Secadores estacionários*** ou de leito fixo, que usam fluxo de ar cruzado, permanecendo o produto estático;
- b) ***Secadores intermitentes***, que usam fluxo de ar cruzado, com o produto em movimento (dinâmico);
- c) ***Secadores contínuos***, os quais se usam fluxo misto, geralmente os fluxos concorrente e contracorrente.

## **Secadores estacionários ou de leito fixo**

O secador consiste, basicamente, em uma coluna de secagem, para acomodar o produto durante a secagem,

a qual pode ser construída de chapas metálicas, de madeira ou de alvenaria. Recomenda-se construir, preferencialmente, de alvenaria, para evitar perda excessiva de calor, e conferir maior durabilidade ao equipamento e por, freqüentemente, esses materiais estarem disponíveis na propriedade. Além da coluna de secagem, uma fornalha e um ventilador, para forçar o ar quente a atravessar a massa de grãos, completam o equipamento. Na Fig. 17, pode-se observar o secador estacionário, em forma de silo secador, que pode ser também utilizado para armazenamento.

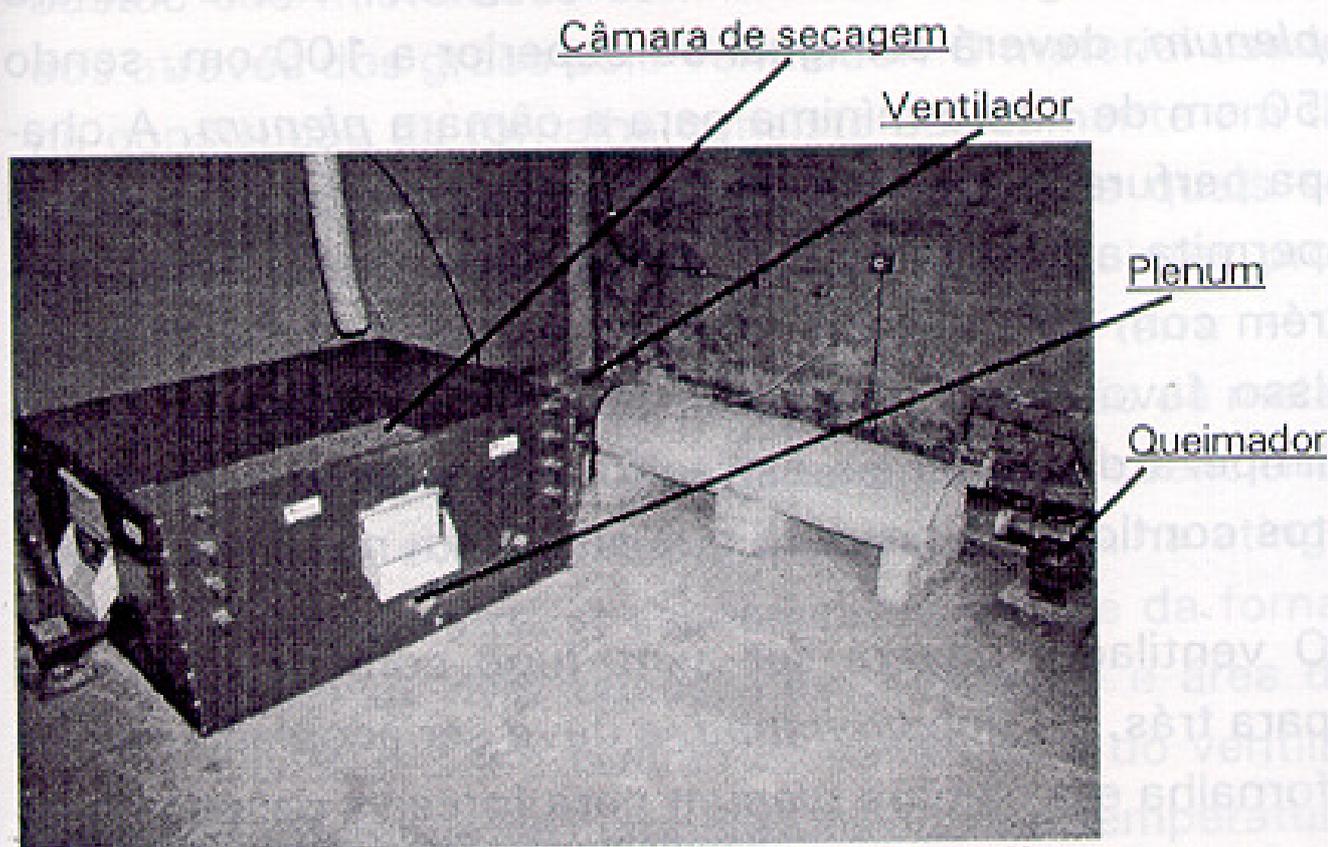


Foto: Paulo Kurtz

Fig. 17. Vista geral de um secador de leito fixo.

Segundo Silva & Lacerda Filho (1984), a forma geométrica da coluna de secagem poderá ser a mais variada

possível. Entretanto, a forma circular apresenta melhor uniformidade de distribuição de ar e, conseqüentemente, secagem mais uniforme.

A coluna de secagem é constituída basicamente de duas partes: **câmara de secagem**, que acomoda grãos úmidos e tem, no fundo, uma chapa perfurada para passagem do ar de secagem, e **câmara *plenum***, que é o espaço entre o piso e a chapa perfurada, para passagem e distribuição da pressão do ar de secagem.

A altura total da câmara de secagem, mais a câmara *plenum*, deverá ser igual ou superior a 100 cm, sendo 50 cm de altura mínima para a câmara *plenum*. A chapa perfurada deve ter os furos de tamanho tal que não permita a passagem dos grãos que se quer secar, porém com área vazada superior a 15% do total do piso. Isso favorece a passagem do ar e também facilita a limpeza de materiais estranhos, impurezas e fragmentos contidos no produto que se alojam nas aberturas.

O ventilador deverá ser centrífugo com pás voltadas para trás, do tipo *limit load*, e deve ser acoplado entre a fornalha e a câmara *plenum* para forçar a passagem do ar quente através da massa de grãos ou do produto que se quer secar. Recomenda-se a vazão mínima de  $10 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}^2$  de área do secador, independentemente do tipo de produto a secar.

Com a finalidade de melhorar a distribuição do ar atra-

vés da massa de produto, o ventilador deve ser acoplado ao *plenum* por intermédio de um elemento de transição (difusor). A abertura do difusor deve ser tal que o ângulo formado com o eixo de simetria do secador seja superior a  $15^\circ$  e inferior a  $45^\circ$ . Assim, o comprimento da transição dependerá do ângulo adotado e, mais diretamente, da disponibilidade de espaço coberto para construção do secador.

O aquecimento do ar comumente é realizado por fornalha a lenha do tipo fogo direto, isto é, os gases de combustão são misturados com o ar de secagem e forçados através dos grãos pelo ventilador. O material usado na construção da fornalha consiste basicamente em tijolos comuns, areia de barranco e terra, às quais se adiciona melaço de cana ou açúcar nas seguintes proporções: 18 litros de areia + 18 litros de terra + 2 litros de melaço ou 3 litros de açúcar. A adição de melaço ou açúcar tem como finalidade diminuir o coeficiente de dilatação e evitar trincas, quando a fornalha atingir elevada temperatura. A espessura da parede da fornalha deve ser de dois tijolos, com o volume e área de grelha calculadas em função da vazão total do ventilador e da diferença de temperatura entre a temperatura média regional do ar ambiente e a temperatura desejada no ar de secagem.

Para impedir a injeção de partículas (cinzas e fagulhas) na câmara de secagem e evitar riscos de incêndio, um ciclone cilíndrico é colocado entre a fornalha e o duto

de conexão com o ventilador. O ciclone deve ser construído com a mesma argamassa da fornalha (Silva & Lacerda Filho, 1984).

### **Operação**

Algumas regras básicas devem ser seguidas na operação dos secadores de leito fixo:

- 1) proceder à limpeza das chapas perfuradas e da câmara *plenum* antes de colocar grãos no secador. Essa providência é necessária para desobstruir a chapa perfurada, melhorando a circulação de ar na câmara de secagem e evitando riscos de incêndio no secador;
- 2) a massa de grãos deve estar nivelada no secador, o que elimina a formação de caminhos preferenciais do ar na câmara de secagem, em razão da diferença de pressão estática, proporcionando maior uniformidade na umidade final do produto;
- 3) os grãos devem ser colocados no secador somente após se verificar o perfeito aquecimento da fornalha. Este procedimento evita contaminação dos grãos com fumaça, principalmente, quando se trata de secagem de produto com elevada umidade inicial. Fornalhas com chaminé não apresentam esse problema;
- 4) antes de descarregar o produto, ao fim da secagem, deve-se resfriar a massa de grãos, fechando a entrada

do ar quente da fornalha e abrindo as entradas do ar ambiente. Para evitar choque térmico no produto, diminuindo o trincamento de grãos, recomenda-se a redução gradual da temperatura ao fim da secagem. Na prática, quando os grãos estiverem com a umidade desejada, cessa-se o abastecimento da fornalha com lenha, fazendo com que a temperatura do ar insuflado baixe lentamente. Com isso, aproveita-se o calor restante da fornalha, além de aproveitar o calor sensível contido nos grãos para retirada de umidade adicional; e

5) a umidade deve ser monitorada em pelo menos três níveis da massa de grãos: em camada mais profunda, intermediária e superficial, usando-se o determinador de umidade. A umidade final do produto é representada pela média das três camadas. A secagem deve ser encerrada quando o produto estiver com a umidade desejada.

Segundo Dusi et al. (1998), os secadores de camada fixa apresentam as seguintes vantagens:

- a) são menos onerosos do que outros tipos de secadores;
- b) secam qualquer tipo de produto, mesmo não debulhado;
- c) funcionam com carga incompleta; e
- d) são de manutenção simples.

Como desvantagens, os mesmos autores citam:

- a) revolvimento manual, que, quando a secagem for adequadamente manejada, é desnecessário; e
- b) carga e descarga manuais.

### ***Regulagens***

A principal regulagem desse secador é o **controle da temperatura** através dos registros da fornalha. Não se deve usar temperatura muito elevada, uma vez que os grãos tendem a se equiparar com a temperatura do ar na entrada do secador e umidade relativa do ar muito baixa causa supersecagem das camadas inferiores.

A outra regulagem é o **término da secagem**, que necessita de cuidado especial, uma vez que a secagem dá-se por camadas com formação de uma frente de secagem, que se desloca de baixo para cima. As camadas inferiores estarão mais secas durante o processo de secagem. O calor pode ser cortado quando a camada superior ainda estiver com umidade (15-16%), pois o resfriamento e a mistura com grãos mais secos das camadas inferiores (9-10%) uniformizam a umidade final média desejada (12-13%). Quando não se dispõe de determinador de umidade, a secagem pode ser encerrada quando a camada superficial estiver com temperatura próxima àquela da camada intermediária da mas-

sa de grãos.

## **Secadores intermitentes**

A secagem intermitente caracteriza-se por um processo em que o produto é submetido a períodos, nos quais recebe fluxo de ar aquecido, intercalados por períodos de repouso ou de equalização. Para que isso seja possível, o produto deverá passar por aquecimento e, logo após, por um período de repouso ou equalização e, novamente, retornar ao ar aquecido e, assim, tantas vezes quantas forem necessárias, até que o produto esteja com a umidade desejada. Completada a secagem, o produto deverá ser resfriado, o que pode ser feito por mais uma passagem pelo secador, causando resfriamento rápido, ou em silo apropriado para resfriamento lento, mais recomendado para grãos de arroz e de milho.

Esses secadores têm estrutura diferente daquela dos contínuos ou mistos. Não possuem torre de secagem. A coluna de secagem é composta por um depósito na parte superior, que funciona como câmara de repouso, e uma câmara de secagem inferior, na qual grãos recebem ar aquecido. Não possui câmara de resfriamento. Os secadores intermitentes são mais usados para grãos de arroz, porém podem ser usados para todas as cultu-

ras, sendo muito versáteis. Produzem excelentes resultados na secagem de sementes.

Como os grãos passam várias vezes pelo secador, deve-se atentar para pontos de impacto dos grãos e eliminá-los para diminuir danos mecânicos. Usar altura de queda mínima possível, amortecedores e elevadores de baixa velocidade.

Os componentes do secador são semelhantes aos do secador contínuo, ou seja, o equipamento possui fornalha, difusor de ar de entrada, funil de carga, difusor de saída do ar, mesa reguladora de fluxo, funil de descarga, ventilador, câmara de repouso e câmara de secagem em forma de bandejas em cascata.

### **Operação**

- a) proceder ao enchimento do secador com o equipamento desligado. Durante o enchimento, acender o fogo com o registro da chaminé da fornalha aberto;
- b) ligar o elevador de retorno, o ventilador e o sistema de descarga. Abrir registros de entrada e saída de ar da câmara de secagem de modo que o ar aquecido atravessasse a massa de grãos. Fechar o registro da chaminé e abrir registros de entrada de ar na fornalha. Manter a porta de abastecimento de lenha da fornalha fechada. Manter lenha e fogo em toda a extensão da grelha. Não amontoar lenha no centro da grelha. Alimentar o fogo

regularmente com pequena quantidade de lenha;

c) fazer a secagem em rodízios, em número suficiente para secagem até a umidade desejada;

d) uma vez atingida a umidade desejada, fazer o descarregamento do secador em silo aerado para resfriamento dos grãos ou fazer rodízios de resfriamento no próprio secador. Para tanto, baixar a temperatura do ar gradativamente até cortar a fonte de calor; e

e) para ganhar tempo, enquanto o secador está descarregando, pode-se proceder ao carregamento da próxima carga. No entanto, é fundamental observar se a descida da massa de grãos dá-se de forma nivelada na parte superior. Deve-se ter cuidado de acompanhar a descida dos grãos da carga seca para, quando aparecerem os primeiros grãos úmidos, encerrar o descarregamento e fazer o retorno dos grãos, iniciando novo ciclo de secagem.

### ***Regulagens***

As regulagens de alimentação, nível de grãos no secador, fluxo de grãos e direcionamento do ar são semelhantes às dos secadores contínuos.

A temperatura de secagem é controlada por termômetro colocado na massa de grãos próximo à descarga. Possui também termômetros na entrada e saída do ar aque-

cido do secador. A colocação do termômetro na massa de grãos é uma das vantagens do sistema, pois permite controlar mais efetivamente a temperatura.

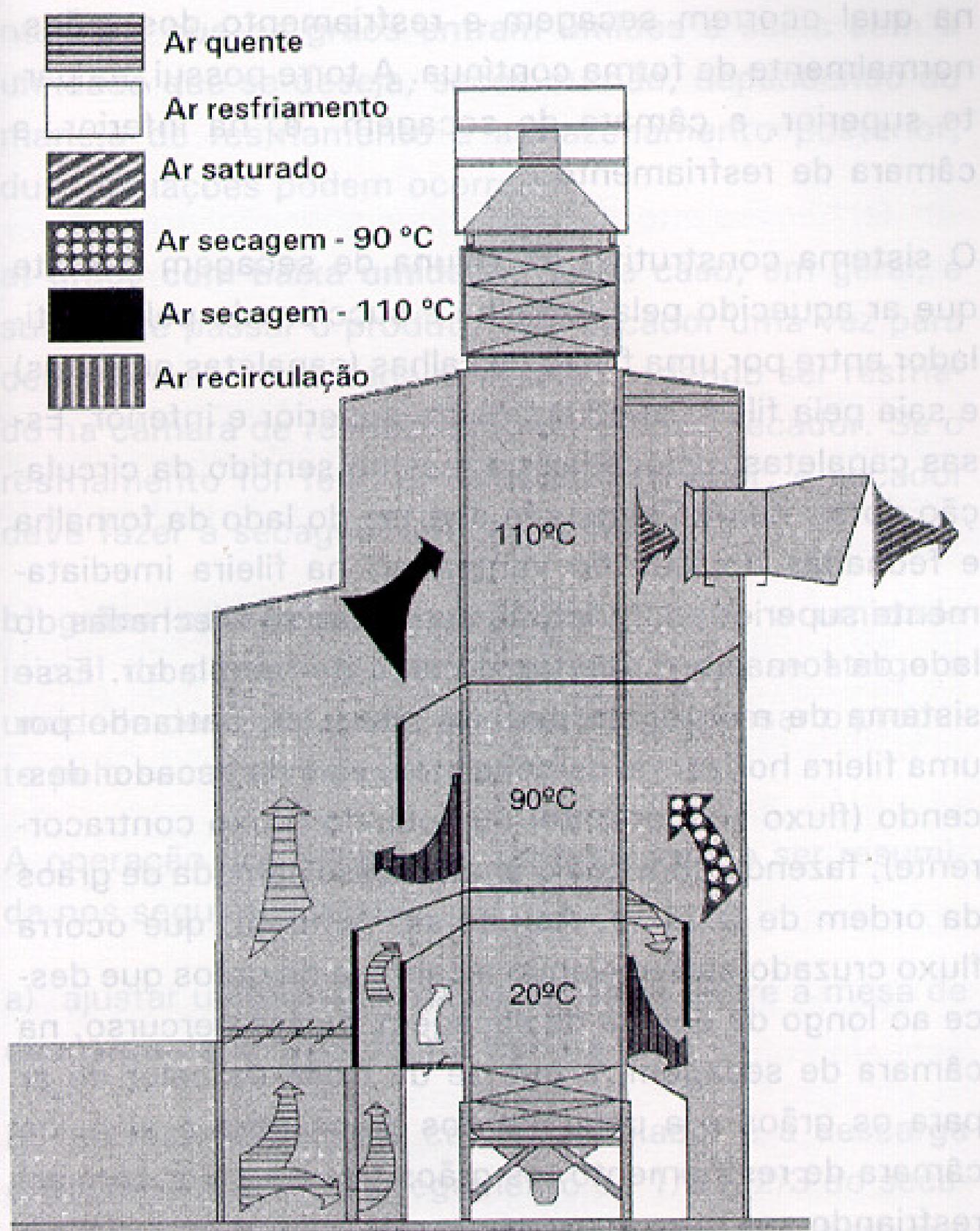
Quando os termômetros de entrada e saída do ar mostrarem valores de temperatura semelhantes e elevado é um indicador de que a carga está seca.

## **Secadores contínuos**

Secadores contínuos, com fluxo misto de ar, são máquinas de elevado rendimento, se comparados com outros tipos de secadores. Esses equipamentos são mais eficientes e usam cerca de 40% menos ar do que os de fluxo cruzado; além disso, sendo a camada de grãos menos espessa, necessitam de ventiladores com menor pressão estática, que permite a opção de operar com ventiladores do tipo axial.

Na Fig. 18, tem-se uma visão geral de um secador contínuo de fluxo misto, no qual se observa:

- 1) ventilador do tipo axial;
- 2) difusores de ar;
- 3) sistema de descarga.



**Fig. 18.** Secador contínuo de fluxo misto.

Fonte: Modificado de Kepler Weber (1999).

O equipamento é dotado de uma coluna de secagem,

na qual ocorrem secagem e resfriamento dos grãos, normalmente de forma contínua. A torre possui, na parte superior, a câmara de secagem e, na inferior, a câmara de resfriamento.

O sistema construtivo da coluna de secagem permite que ar aquecido pela fornalha e succionado pelo ventilador entre por uma fileira de calhas (canaletas ou dutos) e saia pela fileira imediatamente superior e inferior. Essas canaletas, colocadas no mesmo sentido da circulação do ar, numa fileira, são abertas do lado da fornalha e fechadas do lado do ventilador; na fileira imediatamente superior e inferior, as canaletas são fechadas do lado da fornalha e abertas do lado do ventilador. Esse sistema de montagem permite que o ar, entrando por uma fileira horizontal de canaletas, saia do secador descendo (fluxo concorrente) ou subindo (fluxo contracorrente), fazendo com que o ar atravessasse camada de grãos da ordem de 0,21 m. Admite-se, também, que ocorra fluxo cruzado atravessando a camada de grãos que desce ao longo da coluna de secagem. Nesse percurso, na câmara de secagem, é que se dá troca de calor do ar para os grãos e a umidade dos grãos para o ar e, na câmara de resfriamento, os grãos trocam calor com ar, resfriando-se.

### **Operação**

Como nesses secadores a secagem é um processo contí-

nuo, em que os grãos entram úmidos e saem com a umidade que se deseja, secos ou não, dependendo do manejo de resfriamento e armazenamento posterior, duas situações podem ocorrer:

a) **grãos com baixa umidade:** nesse caso, em geral, é suficiente passar o produto pelo secador uma vez para deixá-lo com a umidade desejada, podendo ser resfriado na câmara de resfriamento do próprio secador. Se o resfriamento for feito em silo armazenador, o secador deve fazer a secagem em corpo inteiro; e

b) **grãos com elevada umidade:** quando a umidade inicial do produto é muito elevada e não se atinge a umidade desejada, pode ser necessário passar o produto pelo secador mais de uma vez.

A operação dos secadores contínuos pode ser resumida nos seguintes passos:

a) ajustar uniformemente os registros sobre a mesa de descarga de acordo com o tipo de grão;

b) carregar o secador com o ventilador e a descarga desligados. Com o carregamento de  $1/3$  e  $2/3$  do secador, ligar somente a descarga, por 5 minutos, para que os grãos se acomodem melhor;

c) durante o carregamento do secador, acender o fogo com o ventilador desligado e com o registro da chaminé aberto;

- d) ajustar registros de direcionamento do ar. Direcionar o ar quente para a câmara de secagem. Manter fechado registro de entrada do ar na câmara de resfriamento;
- e) fechar registro da chaminé e abrir registros de entrada de ar da fornalha. Ligar o elevador de retorno, o ventilador e o sistema de descarga;
- f) secar com grãos em movimento, fazendo o retorno até que os grãos estejam secos na saída da câmara de secagem. Nessa fase, deixar a câmara de resfriamento sem ar;
- g) abrir registros de passagem do ar frio pela câmara de resfriamento. Passar os grãos secos e frios para o elevador de descarga;
- h) quando iniciar o descarregamento dos grãos secos e frios, reiniciar o carregamento do secador de acordo com fluxo de saída;
- i) ajustar o fluxo de secagem de modo que os grãos estejam com a umidade final desejada; e
- j) monitorar, com certa freqüência, a umidade de entrada e saída dos grãos do secador. Manter planilhas para registros.

### ***Regulagens***

As seguintes regulagens do secador devem ser cons-

tantemente monitoradas pelo operador em função da umidade de entrada e saída dos grãos e da qualidade final desejada.

a) **Alimentação:** é regulada por registro próprio na saída da moega ou na entrada do elevador de carregamento.

b) **Uniformidade de vazão:** é regulada pelos registros sobre a mesa de descarga. Esses registros devem ter uma abertura uniforme em toda a extensão do secador.

c) **Velocidade do fluxo de grãos:** é regulada de duas maneiras. Pela abertura da mesa de descarga por alavanca própria ou pelo movimento oscilatório da mesa. Quanto mais rápido o movimento, maior a descarga do secador. Secadores mais modernos têm um temporizador que controla a abertura e o fechamento através de um sistema pneumático ou de eclusas.

d) **Direcionamento do ar:** é regulado por registros nos difusores de entrada e saída do ar no secador. O ar pode ser direcionado para as câmaras de secagem e de resfriamento, independentemente. Quando o resfriamento é feito em silos aerados, pode-se usar ar aquecido em toda a extensão da coluna de secagem. Sempre que os grãos retornam para nova passagem pelo secador, não se deve fazer resfriamento. Usar ar quente na câmara de resfriamento ou mantê-la sem passagem de ar.

e) **Temperatura de secagem:** é regulada pela quantidade de fogo na fornalha e por registros de entrada de ar frio localizados após a fornalha. Esses registros permitem a mistura de ar para obtenção da temperatura desejada. Os termômetros estão colocados na entrada e saída do secador. Deve-se fazer controle da temperatura preferentemente na massa de grãos. O ar na entrada do secador apresenta temperatura mais elevada que a da massa de grãos. Manter fogo acima da necessidade de calor e regular a temperatura pela mistura de ar frio.

f) **Controle do nível de grãos:** o nível baixo de grãos no secador causa fuga de ar de secagem, que compromete todo o funcionamento do secador. O nível de grãos no secador é controlado por um "ladrão" ou por um controlador automático de nível, que liga e desliga o sistema de carga do secador. A elevação da temperatura do termômetro da saída do secador pode ser indicador de nível baixo de grãos.

## **Secadores contínuos usados como intermitentes**

Secadores contínuos podem ser usados como intermitentes, porém devem ser convenientemente manejados para possibilitar que se realize esse processo.

Como a maioria dos secadores contínuos possui um único ventilador, que aspira simultaneamente ar da câmara de secagem e de resfriamento, deve-se suprimir o fluxo de ar na câmara de resfriamento, passando a funcionar como câmara de equalização. Essa prática fará com que haja maior fluxo de ar na câmara de secagem e aumentará o rendimento do secador. Nesse caso, deve-se atentar para a temperatura dos grãos, pois, com o aumento do fluxo de ar, poderá haver aquecimento excessivo da massa de grãos.

### **Operação**

De modo geral, a operação desse tipo de secador é semelhante à do tipo contínuo. O ar aquecido é direcionado para a câmara de secagem. A câmara de resfriamento do secador é transformada em câmara de repouso através de fechamento do registro de ar frio. Quando os grãos atingirem a umidade desejada, abre-se o registro do ar frio e os grãos são resfriados antes de seguirem para armazenamento.

Em determinadas situações em que o período de repouso desejado deve ser maior que de secagem, é possível inverter as câmaras. Direciona-se o ar aquecido para a câmara inferior na qual, na secagem contínua, é feito o resfriamento. A câmara de repouso, então, será a câmara superior.

## **Regulagens**

Como os componentes e a operação do secador são semelhantes aos do tipo contínuo, as regulagens também o são. Nesse sistema de secagem, tem-se possibilidade de trabalhar com temperatura do ar de entrada mais elevada sem aumentar em demasia a temperatura da massa de grãos, porque, durante o período de repouso, a temperatura dos grãos tem pequeno declínio, resultante da redistribuição de umidade.

Quanto mais tempo os grãos permanecerem em repouso em relação ao período de secagem (intermitência rápida), mais elevada poderá ser a temperatura do ar de secagem. O importante é o controle da temperatura da massa de grãos.

## **Fluxo de Secagem**

Nas unidades armazenadoras que recebem produtos diretamente das lavouras ocorre aumento da demanda de serviços, principalmente alguns dias após o início da colheita, porque nesse período os grãos apresentam umidade mais elevada.

Visando a contornar o problema, algumas unidades li-

mitam o recebimento a determinado nível de umidade. Mesmo com essa limitação, ainda haverá ocasiões em que a quantidade de produto úmido a receber será maior do que a capacidade de secagem.

Para aumentar a capacidade de recebimento e secagem, deve-se planejar com acuidade o projeto de construção da unidade armazenadora, a ampliação de estruturas já existentes e a utilização racional e eficiente das instalações existentes. Nesse sentido, algumas alternativas devem ser consideradas:

a) a construção de moegas em número e tamanho suficientes para permitir recebimento dos mais variados grãos, sem misturá-los. Além da separação por espécie, recomenda-se a separação, no recebimento dos grãos, por diferencial de qualidade, para algumas espécies, como trigo e milho, e por faixas de umidade. Esta última aumenta a eficiência do processo de secagem, enquanto aquela traz evidentes vantagens por ocasião da comercialização dos grãos;

b) silos-pulmão para receber grãos úmidos são elevadamente recomendáveis, uma vez que permitem recebimento de grãos sem limitação da capacidade de secagem. Esses grãos devem receber rigorosa pré-limpeza. Os silos-pulmão devem ser adequadamente projetados, com aeração para manutenção da qualidade dos grãos úmidos. Esses grãos aguardam para ser secados nos momentos de ociosidade do secador, como

em dias de chuva ou após o término da colheita. Na entressafra, os silos-pulmão são utilizados para aumentar a capacidade de armazenamento da unidade. Em instalações existentes, pode-se destinar, para esse fim, silos armazenadores, dependendo de sua localização. Nesse caso, deve-se verificar o fluxo de ar de aeração, o qual deve ser tanto maior quanto mais úmidos estiverem os grãos;

c) se a capacidade de secagem instalada for insuficiente, é conveniente secar os grãos recebidos no início da safra, enquanto a demanda ainda é pequena, até a umidade ideal para armazenamento. Já, quando a demanda aumenta muito acima da capacidade diária de secagem, pode-se secar parcialmente maior quantidade possível de grãos, estocando-os e fazendo-os retornar ao secador posteriormente. Esse método tem a desvantagem do custo adicional de movimentação dupla da produção; e

d) o uso da seca-aeração e da aeração secante nos silos armazenadores permite o aumento da capacidade de recebimento e secagem, uma vez que os grãos não necessitam ser secados até a umidade final de armazenamento. A secagem é concluída durante o armazenamento através do correto manejo da aeração. Volta-se a lembrar que, para isso, a aeração deve ser adequadamente projetada.

## Manutenção de Secadores

Secadores são equipamentos de custo elevado, e medidas de manutenção devem ser tomadas para prolongar a vida útil.

a) Realize os procedimentos de manutenção previstos no manual de operação do equipamento. Exija do fabricante o manual do operador e de manutenção.

b) Na entressafra, uma vez por mês, faça o secador funcionar vazio e com registros de ar totalmente abertos. Isso faz com que partes do equipamento fiquem secas, evitando oxidação.

c) Diariamente limpe o secador, retirando todas as impurezas acumuladas, pois o acúmulo de sujeira dificulta a operação de secagem e é local de início de incêndios.

d) Observe constantemente a pintura para prevenir a ferrugem.

e) Observe sempre a regulagem das correias. Se necessário, estique-as, segundo manual de manutenção.

f) Nunca deixe de verificar os termômetros e termostatos. São equipamentos que exigem cuidados especiais. Retire e guarde-os na entressafra.

- g) Verifique o nível de óleo nas caixas de redução.
- h) Proceda ao engraxamento de mancais e rolamentos.

## **Cuidados para Evitar Acidentes**

- a) Use Equipamentos de Proteção Individual (EPIs), como capacete, macacão, luvas de couro, máscara, protetor auricular, óculos etc. conforme normas do Ministério do Trabalho.
- b) Ao subir em equipamentos, use cintos de segurança.
- c) Andaimos e escadas devem ter protetores de segurança.
- d) Polias e correias devem ter protetores de segurança.
- e) Revise as instalações elétricas para evitar curto-circuitos. A fiação deve ser colocada dentro de conduítes.
- f) Mantenha à mão, em local próximo ao secador, extintores do tipo pó químico e espuma. Promova treina-

mentos para operadores.

g) Mantenha o secador, o interior deste e as proximidades, livre de impurezas, principalmente as de material carburante. Mantenha o ambiente organizado.

h) Fique constantemente atento para sinais de princípio de incêndios, o que torna o combate mais fácil.

i) Em caso de incêndio no secador, proceda ao abafamento, desligando antes o ventilador. Abra o registro da chaminé e a porta de abastecimento da fornalha. Mantenha todos os registros de entrada de ar do secador fechados. Interrompa o carregamento e inicie o descarregamento dos grãos.

j) Atente para locais com riscos de explosão. Túneis e poços de elevador podem acumular gases liberados por grãos úmidos acumulados. A suspensão de pó de cevada e malte na ordem 30 a 60 g/m<sup>3</sup> pode causar explosão. Com concentração de pó de 20 g/m<sup>3</sup>, a visibilidade é de somente um metro. Pó de grãos elevadamente energéticos, como milho, trigo, cevada e arroz, é potencialmente explosivo. O aquecimento provocado por motor, lâmpada ou faísca pode causar explosão.

k) Locais fechados como túneis, poços de elevador e área acima dos grãos em silos devem ser bem ventilados.

l) Evite pó acumulado sobre superfícies, como pisos,

máquinas, motores e lâmpadas. Na remoção de camadas de pó, não provoque suspensão de pó. De preferência, faça a aspiração do pó acumulado.

m) Promova o controle da formação de pó nas diversas fases de movimentação de grãos na unidade através de vedação dos equipamentos e de instalação de sistemas de aspiração.

n) Em locais fechados, instale equipamentos de aspiração do pó formado e dos gases formados por eventuais fermentações, evitando que se acumulem.

o) Não trabalhe em silos sobre grande quantidade de grãos que estejam sendo movimentados, ou não permita que ali permaneçam trabalhadores. O trabalhador pode ser arrastado pelo fluxo de grãos, sendo sufocado em menos de 30 segundos.

p) Não permita a presença de trabalhadores sobre a massa de grãos quando forem abertos registros de descarga, pois a camada superior dos grãos pode estar adensada, causando vazios com a descida dos grãos. Em um segundo momento, essa camada se rompe, provocando a queda e o soterramento do trabalhador.

q) Mantenha à mão o número do telefone do Corpo de Bombeiros.

# Estudo de Caso: uso de gás liquefeito de petróleo na secagem estacionária de grãos de milho em secador de leito fixo

## Introdução

Em virtude da carência de dados de pesquisa referentes ao consumo, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o desempenho de um secador estacionário de leito fixo, usando-se gás liquefeito de petróleo (GLP) como fonte energética, e estabelecer parâmetros econômicos de consumo e custo final.

A secagem estacionária, na qual o produto não se desloca e o ar aquecido é forçado através da massa de grãos, tem sido mais usada em pequenas e médias propriedades rurais quando a finalidade é produção de grãos (Carvalho, 1994). O secador de leito fixo é constituído de câmara de secagem com fundo formado por chapa perfurada que recebe os grãos úmidos. Esse sistema é simples, relativamente barato e compatível com a capacidade de investimento de elevado número de produtores.

O ar de secagem pode ser aquecido por fornalhas ou queimadores, de maneira direta ou indireta, usando combustíveis como óleo diesel, *fuel oil*, resíduos orgânicos

e, mais recentemente, gás liquefeito de petróleo (GLP) e gás natural (GN). Segundo Weber (1998), os sistemas que empregam combustíveis gasosos oferecem vantagens, como simplicidade de operação e excelente controle de temperatura, favorecendo a automação da secagem. O GLP, cujo poder calorífico varia de 24.000 a 32.000 kcal/m<sup>3</sup>, e o GN, com poder calorífico de 10.900 kcal/m<sup>3</sup> (Conpet, 2001), apresentam custos superiores ao da lenha, atualmente a fonte de energia mais usada em secagem de grãos.

A lenha é de combustão relativamente difícil e incompleta, liberando grande quantidade de fuligem, fumaça e produtos químicos, como os compostos aromáticos polinucleados (APN), alguns comprovadamente nocivos à saúde humana, destacadamente alcatrão. A fuligem e a fumaça conferem odor e cor aos grãos, depreciando a qualidade comercial. Segundo Winkler citado por Hutt et al. (1978), a fuligem é composta por partículas de carbono com superfície ativa, que absorvem os produtos químicos resultantes da combustão. Por outro lado, combustíveis gasosos não aumentam de maneira expressiva a contaminação dos grãos com APNs carcinogênicos (Hutt et al. 1978) nem transmitem odor e cor aos grãos durante o processo de secagem.

Lotes de milho híbrido triplo BRS 3133 provenientes dos campos experimentais da Embrapa Trigo, Passo Fundo, RS, foram colhidos com três níveis médios de umidade (aproximadamente 35%, 25% e 18%), secados

em secador experimental de leito fixo, com três níveis de temperatura do ar de secagem (40 °C, 70 °C e 100 °C).

O secador experimental, fabricado por Bergazzi Máquinas e Equipamentos Ltda., consistiu em uma câmara de secagem de 1,5 m de largura, 2,0 m de comprimento e 0,5 m de altura, e câmara *plenum* com altura de 0,5 m, situada na parte inferior, pela qual insuflou-se ar de secagem. Acima dessa câmara, colocou-se, como fundo da câmara de secagem, uma chapa perfurada com orifícios redondos de 3 mm de diâmetro, totalizando área perfurada de 15%, sobre a qual foram depositados os grãos.

O ar de secagem foi aquecido por um queimador de gás da marca Stecri, modelo ST-1-1, com capacidade de 2 a 10 kg/hora, abastecido por linha de distribuição ligada a uma bateria de reservatórios (três unidades P-190) de GLP AgipLiquigás, instalada próxima do secador.

A temperatura do ar ambiente, do ar de secagem no *plenum* e na massa de grãos (a 15 cm e 32 cm do fundo da massa) e a temperatura de exaustão (superficial) foram monitoradas por meio de termopares ligados a um registrador de temperatura de 10 canais, com display digital, marca S&E, modelo CSR-10, com precisão de leitura de  $\pm 0,5$  °C.

Em cada tratamento de secagem, após determinação da umidade inicial, a câmara de secagem (com capacidade volumétrica de  $1,5 \text{ m}^3$ ) foi abastecida com 1.200 kg de grãos e o motor do ventilador foi acionado, obtendo-se um fluxo médio de ar de  $15 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}^2$ . A secagem foi processada até os grãos atingirem umidade de aproximadamente 13%.

Ao longo do período de secagem, usando-se calador de 80,0 cm de comprimento e 2,8 cm de diâmetro, com 6 aberturas de 25 mm x 90 mm, marca "Seedburo", foram coletadas amostras em oito pontos do secador, através de uma abertura lateral na câmara de secagem, representando quatro camadas na posição anterior do secador e quatro camadas na posição posterior do secador, a altura de 5, 19, 32 e 45 cm do fundo da câmara de secagem. A umidade, expressa em base úmida, foi determinada por aparelho dielétrico da marca Multi-Grain, da Dickey-John Corporation, previamente aferido por método direto de determinação de umidade em estufa a  $105 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$  por 24 horas.

A temperatura da massa de grãos foi determinada usando-se termômetro de bulbo de mercúrio, com os grãos colocados em recipiente de poliestireno, após três minutos.

A temperatura (ambiente, grãos e ar de secagem) e a umidade dos grãos foram medidos em intervalos de 1 hora.

A partir das medições realizadas, foram calculados os seguintes parâmetros:

a) taxa de secagem (%/hora): representada pela unidade percentual de retirada de água por hora de secagem, é calculada dividindo-se a unidade percentual de água retirada pelo número de horas de secagem.

b) consumo total de GLP (kg/t seca): o consumo total foi obtido dividindo-se consumo efetivo pelo peso dos grãos após secagem. O consumo efetivo de GLP foi determinado por medidor de vazão apropriado, com leituras feitas no início e no fim de cada secagem.

c) consumo horário de GLP (kg/hora): obtido mediante a divisão do consumo total efetivo pelo número efetivo de horas de duração de secagem.

d) consumo unitário de GLP (kg/%/t seca): obtido dividindo-se o consumo total pelo percentual de água retirado e pelo peso final de grãos de milho secos.

e) custo unitário do GLP (R\$/saco de 60 kg): obtido a partir do consumo total de GLP (kg/t seca), ao preço de R\$ 0,88/kg.

f) eficiência de secagem (%): calculada em função de temperatura do ar de entrada ( $T_e$ ), da temperatura do ar de saída ( $T_s$ ) do secador e da temperatura ambiente ( $T_a$ ), de acordo com a fórmula proposta por Puzzi (1986):

Rendimento do secador (%) =  $(T_e - T_s) / (T_e - T_a) \times 100$

h) consumo de eletricidade (kwh): calculado a partir do consumo de 1,492 kwh, referente a um motor trifásico de 2 CV, multiplicado pelo tempo de secagem.

i) custo de eletricidade (R\$/saco de 60 kg): obtido a partir do consumo de energia elétrica, considerando-se o preço de R\$ 0,2206, em abril de 2001.

j) custo total (R\$/saco de 60 kg): obtido pela soma do custo unitário do GLP e custo de eletricidade.

## Resultados

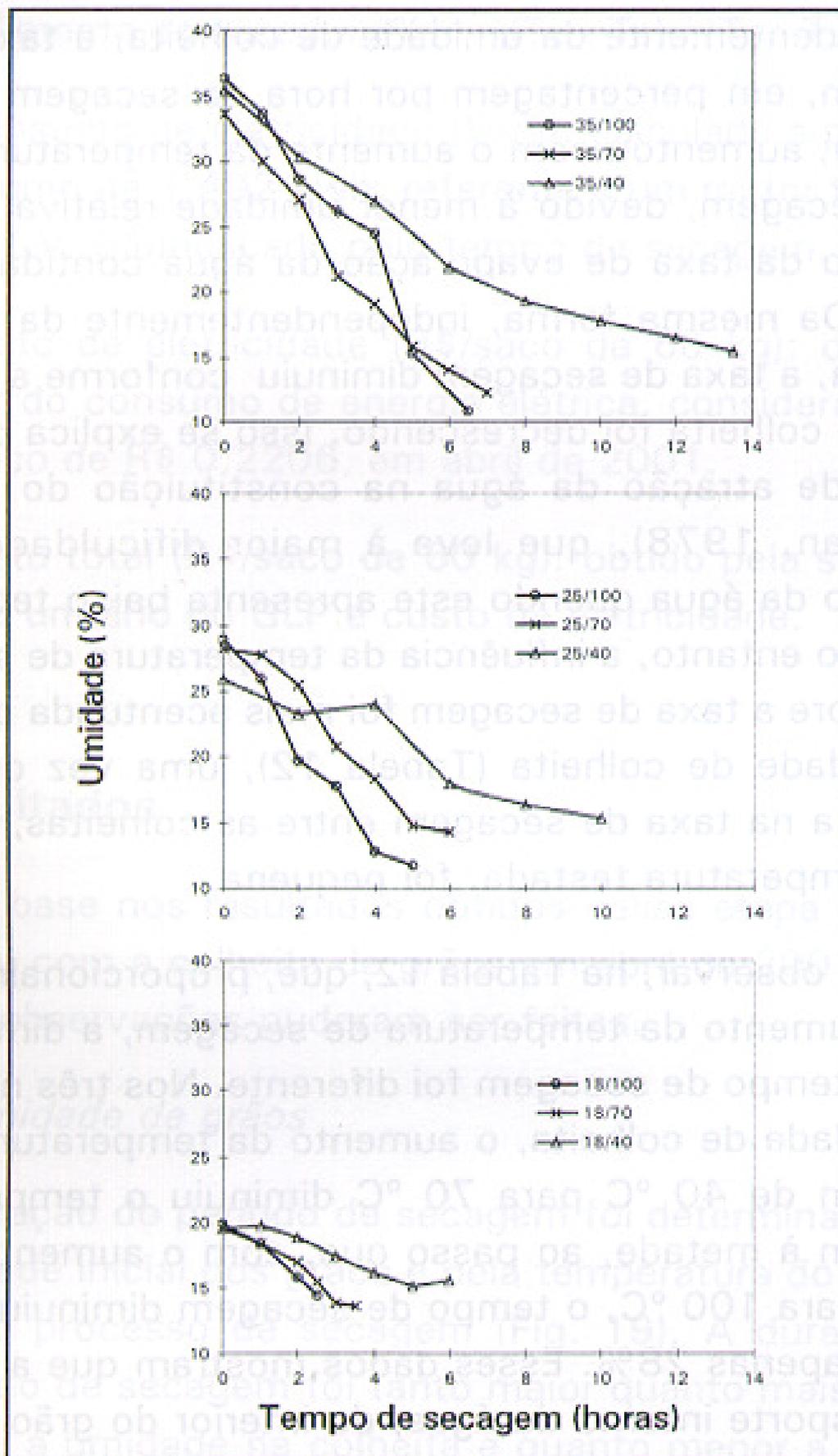
Com base nos resultados obtidos nessa etapa da pesquisa, com a colheita de grãos em abril de 2001, algumas observações puderam ser feitas.

### a) *Umidade de grãos*

A duração do período de secagem foi determinada pela umidade inicial dos grãos e pela temperatura do ar usada no processo de secagem (Fig. 19). A duração do período de secagem foi tanto maior quanto mais elevado foi a umidade na colheita e quanto menor a temperatura do ar de secagem, estando de acordo com observações feitas por Brooker et al. (1992) e por Cavariani et al. (1999).

Independentemente da umidade de colheita, a taxa de secagem, em percentagem por hora de secagem (Tabela 12), aumentou com o aumento da temperatura do ar de secagem, devido à menor umidade relativa e ao aumento da taxa de evaporação da água contida nos grãos. Da mesma forma, independentemente da temperatura, a taxa de secagem diminuiu conforme a umidade de colheita foi decrescendo. Isso se explica pelas forças de atração da água na constituição do grão (Lasseran, 1978), que leva à maior dificuldade de extração da água quando este apresenta baixo teor de água. No entanto, a influência da temperatura de secagem sobre a taxa de secagem foi mais acentuada que a da umidade de colheita (Tabela 12), uma vez que a diferença na taxa de secagem entre as colheitas, para cada temperatura testada, foi pequena.

Pode-se observar, na Tabela 12, que, proporcionalmente ao aumento da temperatura de secagem, a diminuição do tempo de secagem foi diferente. Nos três níveis de umidade de colheita, o aumento da temperatura de secagem de 40 °C para 70 °C diminuiu o tempo de secagem à metade, ao passo que, com o aumento de 70 °C para 100 °C, o tempo de secagem diminuiu, em média, apenas 28%. Esses dados mostram que a taxa de transporte interno da água, do interior do grão para a superfície, onde ocorre troca com o ar (Brooker et al. 1981), é limitante do processo de secagem, e o aumento de temperatura do ar de secagem não resultou em aumento proporcional na velocidade de secagem.



**Fig. 19.** Evolução da umidade de grãos de milho colhidos com três níveis de umidade média (35%, 25% e 18%), durante a secagem estacionária em secador de leito fixo com temperatura de 100 °C, 70 °C e 40 °C.

**Tabela 12.** Umidade inicial e final, taxa de secagem e duração da secagem de grãos de milho colhidos com 35%, 25% e 18% de umidade e secados em secador de leito fixo, à temperatura de 100 °C, 70 °C e 40 °C.

Tratamento de secagem	Umidade		Taxa de secagem (%/hora)	Duração da secagem (horas) <sup>1</sup>
	Inicial (%)	Final (%)		
35/100	36,30	10,78	3,92	5,61
35/70	33,70	12,28	3,06	7,20
35/40	35,50	15,38	1,49	14,78
25/100	28,90	11,75	3,60	3,33
25/70	28,20	14,25	2,32	5,18
25/40	25,90	15,35	1,05	11,43
18/100	19,90	14,37	2,20	2,27
18/70	19,50	13,58	1,69	2,97
18/40	19,50	15,62	0,65	7,69

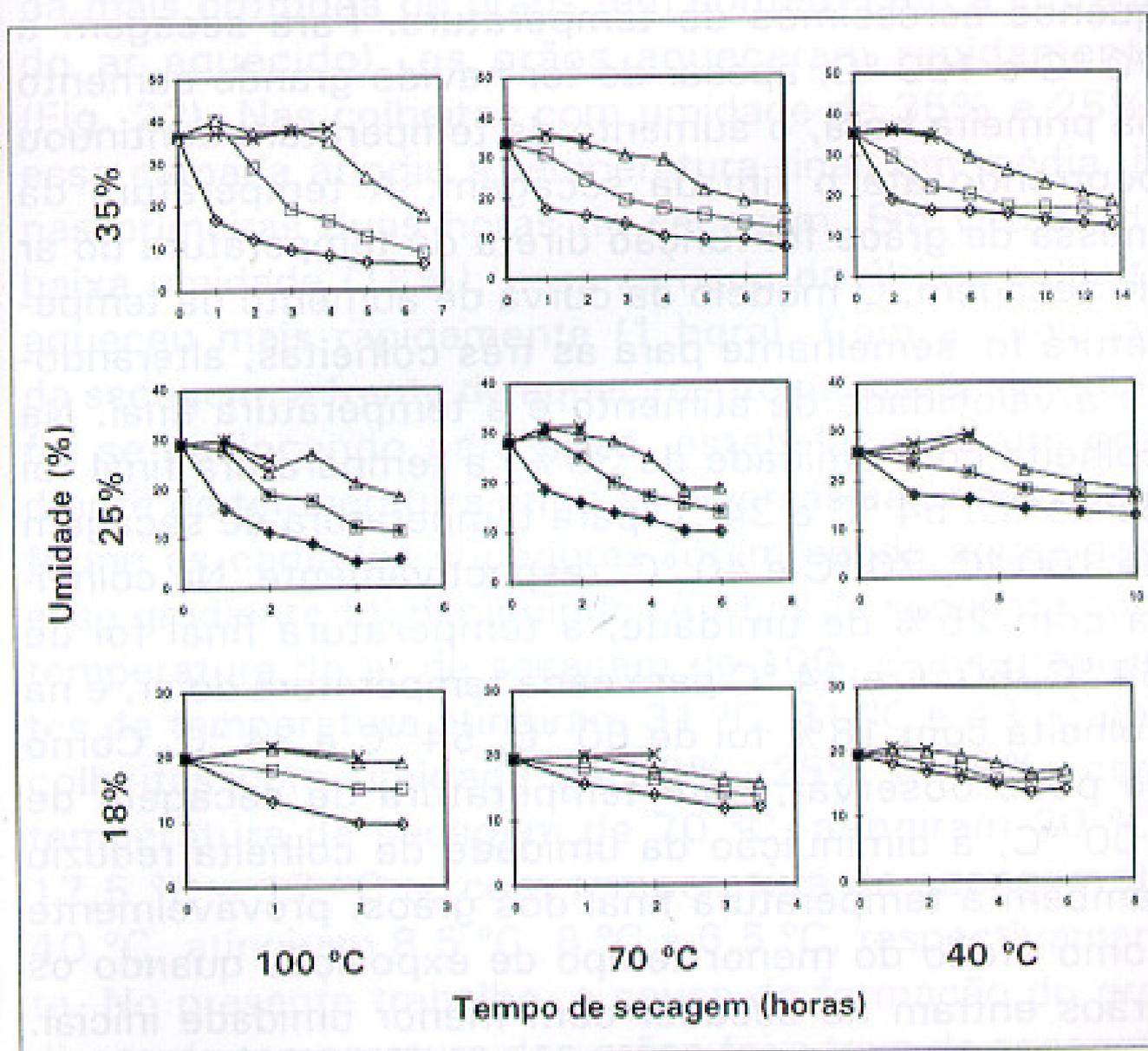
<sup>1</sup> A duração da secagem foi ajustada tendo como umidade inicial 35%, 25% e 18%, respectivamente, para cada colheita, e umidade final de 13%.

Com o decorrer do processo, observou-se a secagem mais rápida da camada mais profunda da massa de grãos (Fig. 20). O sentido de deslocamento do ar de secagem causou avanço da frente de secagem de baixo para cima, gerando gradiente de umidade entre as camadas inferiores e superiores, o que concorda com observações feitas por McLean (1980), por Corrêa (1981), por Pasin (1991), por Rodriguez (1993) e por Cavariani et al. (1999). Observou-se redução de volume da massa de grãos durante a secagem, que fez com que o nível da massa de grãos se apresentasse abaixo do nível do ponto de coleta de 45 cm do fundo da massa, já nas

primeiras horas de secagem. Essa redução pode ser atribuída à eliminação da água (Afonso Júnior & Corrêa, 2000) e à acomodação dos grãos (Silva, 2000). Independentemente da umidade de colheita e da temperatura usadas, a umidade das duas camadas superiores da massa de grãos (45 cm e 32 cm) tendeu a aumentar nas primeiras horas da secagem, devido à condensação da umidade contida no ar, que, retirada das camadas inferiores, foi condensada nos grãos mais frios das camadas superiores (Brooker et al. 1981).

Ao se observar isoladamente cada fator (Fig. 20), verifica-se que os resultados mostram que o gradiente em umidade formado na massa de grãos pela frente de secagem tendeu a diminuir de acordo com a diminuição da temperatura de secagem e da umidade da colheita. Esse gradiente no fim da secagem, para a colheita com grau de umidade de 35 %, foi de 11,5%, 9,6% e 5,9%, para a temperatura de secagem de 100 °C, 70 °C e 40 °C, respectivamente. Para a colheita com 25%, o gradiente foi de 12,6%, 8,8% e 5,0%, e, com 18%, de 9,5%, 3,6% e 2,9%, para cada temperatura de secagem. Isso evidenciou que tanto a temperatura de secagem como o tempo de exposição a essa temperatura tiveram efeito na formação do gradiente na massa de grãos no fim da secagem estacionária. Em secagem estacionária com secador de distribuição radial do fluxo de ar, Cavariani et al. (1999), secando sementes de milho com fluxo de ar e altura de camada semelhantes às do presente trabalho, observaram gradiente final de umidade de 2,8%, quando empregaram temperatura do

ar de secagem de 40 °C, semelhante ao obtido no presente trabalho (2,9%). Observou-se que, inicialmente, o gradiente de umidade aumentou com a evolução da secagem. A partir do momento em que a frente de secagem atingiu a camada superior de grãos, este gradiente começou a diminuir até o fim da secagem.



**Fig. 20.** Comportamento da umidade de cada camada da massa de grãos de milho ( $\diamond$ : 5 cm,  $\square$ : 19 cm,  $\triangle$ : 32 cm e X: 45 cm do fundo da massa), colhida com três níveis de umidade (linhas), durante o processo de secagem estacionária em secador de leito fixo, usando-se três níveis de temperatura do ar de secagem (colunas).

## b) *Temperatura dos grãos*

Para secagem a 40 °C, o processo de aquecimento da massa de grãos foi lento, como se pode observar na Fig. 21. O incremento de temperatura deu-se nas primeiras duas horas de secagem, e, posteriormente, à medida que a água foi sendo retirada, ocorreram pequenos acréscimos de temperatura. Para secagem a 70 °C e 100 °C, apesar de ter havido grande aumento na primeira hora, o aumento da temperatura continuou ocorrendo até o fim da secagem. A temperatura da massa de grãos foi função direta da temperatura do ar de secagem. O modelo da curva de aumento da temperatura foi semelhante para as três colheitas, alterando-se a velocidade de aumento e a temperatura final. Na colheita com umidade de 35%, a temperatura final foi de 74 °C, 54 °C e 34 °C para temperatura de secagem de 100 °C, 70 °C e 40 °C, respectivamente. Na colheita com 25% de umidade, a temperatura final foi de 64 °C, 50 °C e 34 °C para cada temperatura do ar, e na colheita com 18% foi de 60 °C, 54 °C e 34 °C. Como se pode observar, com temperatura de secagem de 100 °C, a diminuição da umidade de colheita reduziu também a temperatura final dos grãos, provavelmente como efeito do menor tempo de exposição quando os grãos entram no secador com menor umidade inicial. Para os níveis de temperatura de secagem de 70 °C e 40 °C, as diferenças de temperatura de grãos entre colheitas foi pequena, possivelmente por terem ficado mais tempo expostos a essas temperaturas. Esses resultados evidenciam a relação do aumento da temperatura dos grãos com a diminuição da umidade. Ao contato

do ar aquecido com os grãos úmidos, ocorre troca de energia calorífica por massa de vapor de água (Brooker et al. 1981), o que resfria o ar e impede o aquecimento dos grãos localizados acima da frente de secagem, pois é nessa frente de secagem que essa troca se processa.

Independentemente da umidade de colheita, na camada mais profunda de grãos (em contato com a entrada do ar aquecido), os grãos aqueceram rapidamente (Fig. 22). Nas colheitas com umidade de 35% e 25%, essa camada atingiu a temperatura final, em média, já nas primeiras duas horas de secagem. Em virtude da baixa umidade (18%), essa camada da última colheita aqueceu mais rapidamente (1 hora). Com a evolução da secagem, a frente de aquecimento na massa de grãos foi se deslocando para cima, estabelecendo um gradiente de temperatura entre as diversas camadas. Conforme as camadas superiores foram sendo aquecidas, esse gradiente foi diminuindo. Ao fim da secagem com temperatura do ar de secagem de 100 °C, os gradientes de temperatura atingiram 31 °C, 31 °C e 43 °C nas colheitas com umidade de 35%, 25% e 18%; com temperatura de secagem de 70 °C, atingiram 20 °C, 17,5 °C e 17 °C e, com temperatura de secagem de 40 °C, atingiram 8,5 °C, 8 °C e 6,5 °C, respectivamente. No presente trabalho, a causa da formação do gradiente de temperatura dos grãos foi a taxa de secagem em função da temperatura do ar de secagem e do tempo de exposição. Não havendo a variação do fluxo de ar e da altura da camada, a umidade inicial mostrou pouco efeito sobre o gradiente final da temperatura na massa de grãos.

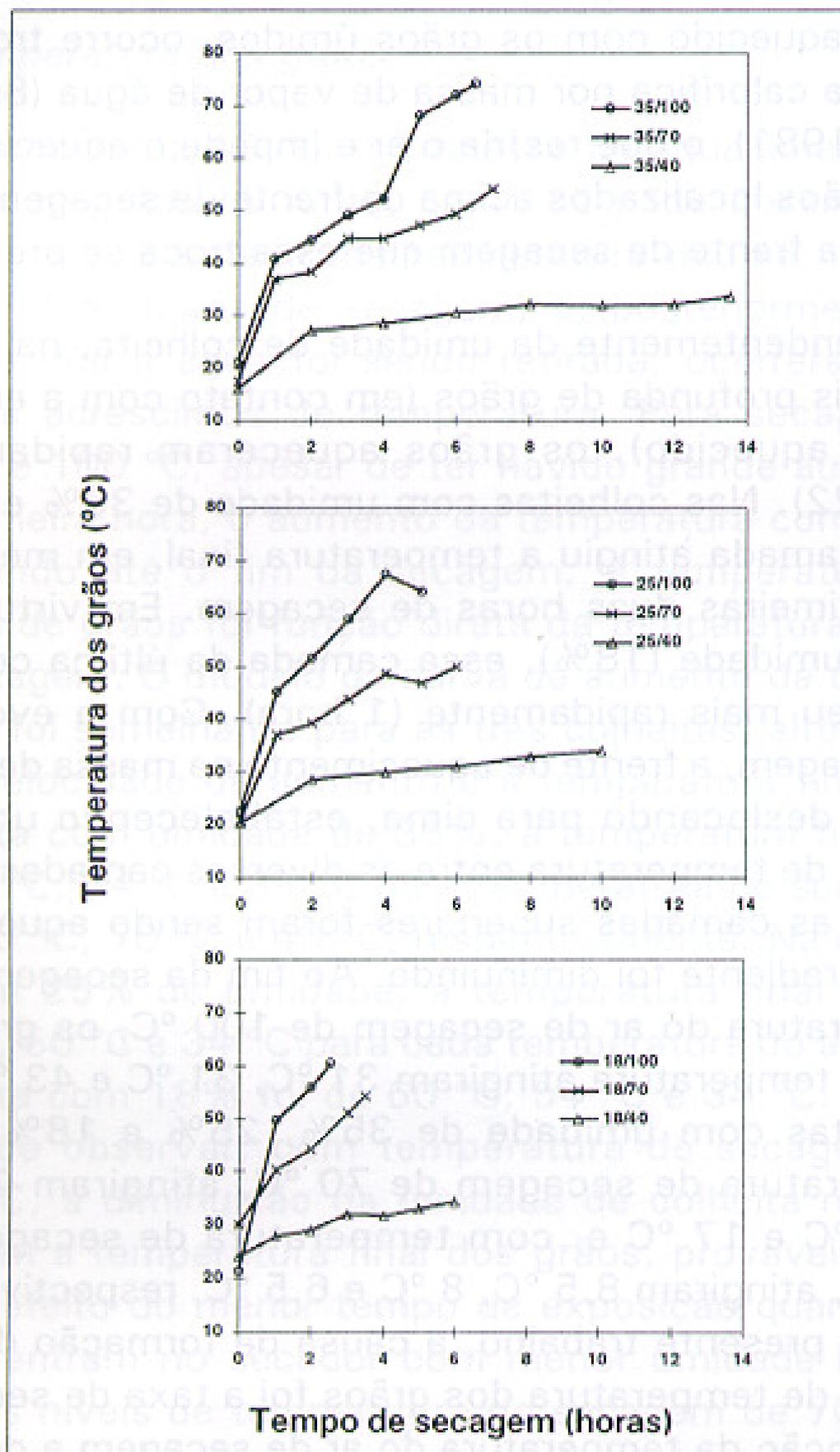


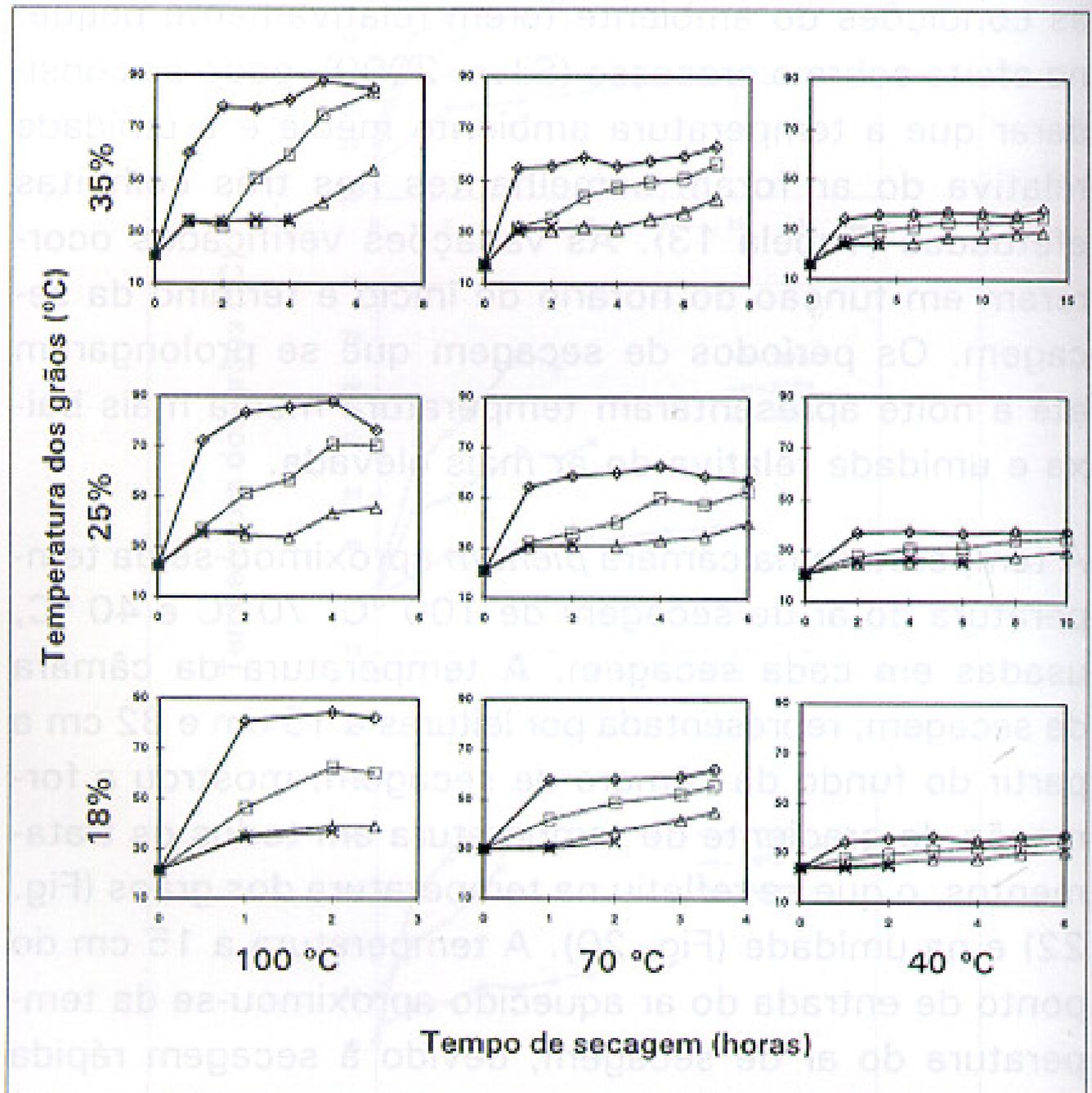
Fig. 21. Evolução da temperatura de grãos de milho colhidos com três níveis de umidade média (35%, 25% e 18%), durante a secagem estacionária em secador de leito fixo com temperatura de 100 °C, 70 °C e 40 °C.

### c) *Temperatura do ar na câmara de secagem e eficiência da secagem*

Em razão de, em secagem com temperatura elevada, as condições do ambiente terem relativamente pequeno efeito sobre o processo (Silva, 2000), pode-se considerar que a temperatura ambiente média e a umidade relativa do ar foram semelhantes nas três colheitas efetuadas (Tabela 13). As variações verificadas ocorreram em função do horário de início e término da secagem. Os períodos de secagem que se prolongaram até à noite apresentaram temperatura média mais baixa e umidade relativa do ar mais elevada.

A temperatura na câmara *plenum* aproximou-se da temperatura do ar de secagem de 100 °C, 70 °C e 40 °C, usadas em cada secagem. A temperatura da câmara de secagem, representada por leituras a 15 cm e 32 cm a partir do fundo da câmara de secagem, mostrou a formação de gradiente de temperatura em todos os tratamentos, o que se refletiu na temperatura dos grãos (Fig. 22) e na umidade (Fig. 20). A temperatura a 15 cm do ponto de entrada do ar aquecido aproximou-se da temperatura do ar de secagem, devido à secagem rápida dos grãos localizados nas camadas mais profundas da massa. A troca de calor por vapor de água ocorre na zona de secagem, levando ao aquecimento dos grãos e ao resfriamento do ar. O fluxo de ar faz com que essa zona se desloque de baixo para cima. À medida que a umidade dos grãos foi diminuindo, a troca decresceu e, conseqüentemente, a temperatura dos grãos aumen-

tuou, tendendo a se equiparar com a do ar de secagem (Aguirre & Peske, 1988).



**Fig. 22.** Comportamento da temperatura de cada camada da massa de grãos de milho ( $\diamond$ : 5 cm,  $\square$ : 19 cm,  $\triangle$ : 32 cm e X: 45 cm do fundo da massa), colhida com três níveis de umidade (linhas), durante o processo de secagem estacionária em secador de leito fixo, usando-se três níveis de temperatura do ar de secagem (colunas).

**Tabela 13.** Umidade relativa do ar ambiente (UR) e temperatura média do ar em diferentes pontos de coleta na secagem estacionária de grãos de milho, colhidos na safra de 2001, em secador de leito fixo, para três níveis de umidade inicial (35%, 25% e 18%) e três níveis de temperatura de secagem (100 °C, 70 °C e 40 °C).

Pontos	35%			25%			18%		
	100 °C	70 °C	40 °C	100 °C	70 °C	40 °C	100 °C	70 °C	40 °C
UR (%)	62,27	69,26	73,28	69,00	66,38	73,90	66,82	70,11	69,04
1	28,32	26,84	24,21	29,62	30,92	27,06	33,50	30,68	28,08
2	99,58	70,29	40,39	100,96	70,93	40,56	102,13	70,40	40,47
3	84,25	62,49	37,03	83,64	60,00	37,76	84,27	62,23	36,97
4	52,02	45,33	30,03	55,52	42,72	31,26	49,70	47,20	31,50
5	36,42	33,29	25,90	36,82	32,97	27,18	36,63	34,70	27,53

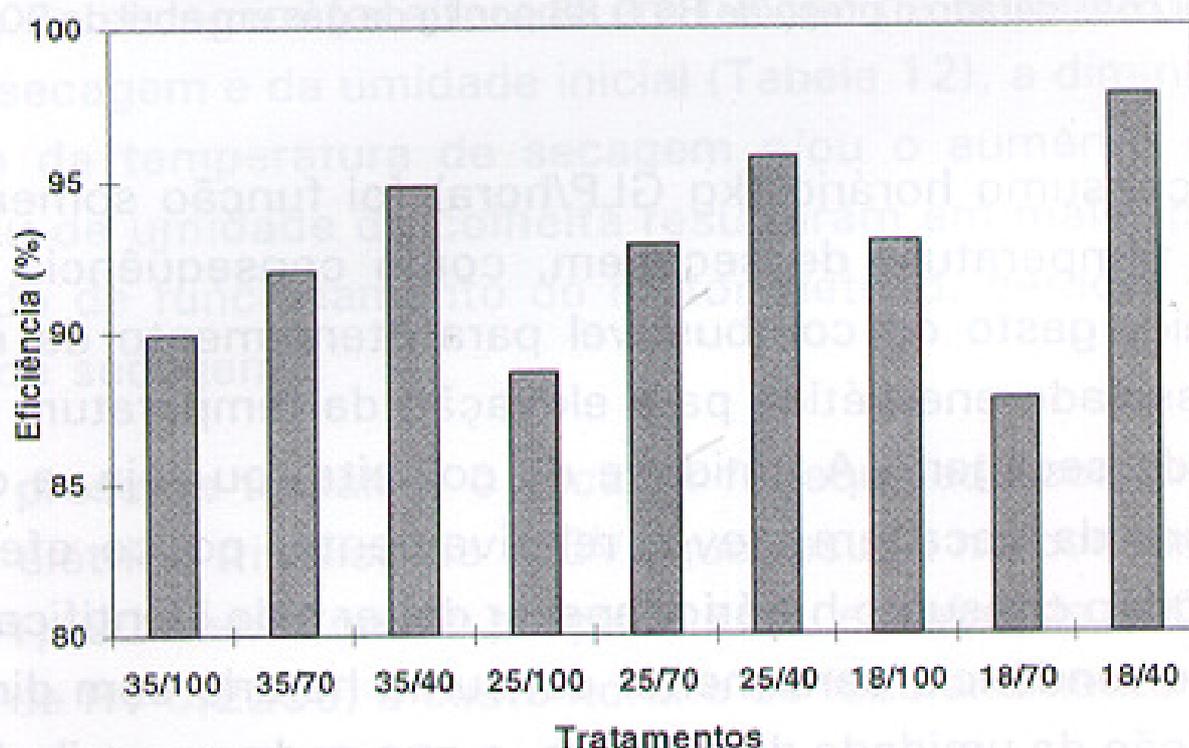
1- Temperatura ambiente (°C); 2- Temperatura no "plenum" (°C); 3- Temperatura a 15 cm do fundo da massa de grãos (°C); 4- Temperatura a 32 cm do fundo da massa de grãos (°C); 5- Temperatura de exaustão (°C).

Segundo Silva (2000), a temperatura de exaustão é indicativo da eficiência do processo de secagem. Quanto mais essa temperatura se aproximar da temperatura ambiente, maior será a eficiência do processo, ou seja, o ar estará mais saturado de vapor de água. A média geral de eficiência no presente trabalho foi de 92,48%. Não houve diferença entre as médias das colheitas com diferentes níveis de umidade (92%, 92% e 93%, para colheitas com umidade de 35%, 25% e 18%, respectivamente) (Fig. 23). Entre os níveis de temperatura de secagem, houve aumento de eficiência com a diminuição da temperatura de secagem em todas as colheitas, com exceção da colheita com 18% e secagem à temperatura de 70 °C. Esse comportamento está relacionado com a movimentação de água no interior do grão. A elevação da temperatura possibilitou o aumento da taxa de evaporação da água. Porém, como o transporte da água do interior para a superfície do grão é limitado (Lasseran, 1978), possivelmente o aumento da temperatura do ar fez com que este encontrasse os grãos com superfície seca. Em outras palavras, o aumento da temperatura não respondeu em aumento de absorção de vapor de água pelo ar de secagem.

#### d) *Consumo energético*

O consumo de GLP foi menor na colheita com umidade menor, nos três níveis de temperatura de secagem (Ta-

bela 14), em virtude da necessidade de um período menor de tempo para que se completasse a secagem (Tabela 12). Ao se considerar o peso dos grãos secos resultante do processo de secagem, os resultados mostraram que houve tendência de aumento de consumo de GLP com a diminuição da temperatura do ar de secagem (Tabela 14). Apesar de ser energeticamente mais eficiente (Fig. 23), a maior demora da secagem, quando se emprega temperatura de secagem mais baixa, causou maior consumo de GLP.



**Fig. 23.** Eficiência do método de secagem estacionária de grãos de milho, em secador de leito fixo, com três níveis de temperatura do ar de secagem (100 °C, 70 °C e 40 °C) e três níveis de umidade de colheita (35%, 25% e 18%).

**Tabela 14.** Avaliação do consumo total, horário e unitário e do custo de gás na secagem estacionária de grãos de milho, em secador de leito fixo, para três níveis de umidade inicial (35%, 25% e 18%) e três níveis de temperatura de secagem (100 °C, 70 °C e 40 °C).

Tratamento de secagem	Consumo de GLP			Custo unitário <sup>1</sup> (R\$/saco 60 kg)
	Total (kg/t seca)	Horário (kg/hora)	Unitário (kg/%/t seca)	
35/100	11,33	2,11	0,52	0,60
35/70	11,87	1,73	0,54	0,63
35/40	13,16	0,93	0,60	0,69
25/100	5,82	2,11	0,49	0,31
25/70	7,34	1,71	0,61	0,39
25/40	8,32	0,88	0,69	0,44
18/100	3,50	2,03	0,70	0,18
18/70	3,68	1,64	0,74	0,19
18/40	4,28	0,73	0,86	0,23

<sup>1</sup> Foi considerado o preço de R\$ 0,88 por kg de gás em abril de 2001.

O consumo horário (kg GLP/hora) foi função somente da temperatura de secagem, como consequência de maior gasto de combustível para atendimento da necessidade energética para elevação da temperatura do ar de secagem. A umidade de colheita, ou seja, a demora da secagem, teve, relativamente, pouco efeito sobre o consumo horário, apesar de ter sido identificada leve tendência para menor consumo horário com diminuição da umidade de colheita, o que pode ser atribuído à temperatura ambiente (Tabela 13), que, em cada temperatura de secagem, foi sempre mais elevada, conforme a colheita foi sendo retardada. Isso indica que essas condições afetaram o consumo de combustível, uma vez que mais energia foi necessária para que se atin-

gisse a temperatura desejada.

Os dados referentes ao consumo unitário (kg GLP/%/t seca) e ao custo unitário (R\$/saco de 60 kg) são úteis para o cálculo da previsão de consumo e custo de combustível no processo de secagem da produção a partir do conhecimento da umidade média na colheita e da massa de grãos secos a serem colhidos na propriedade ou a serem recebidos pela empresa coletora, de acordo com a capacidade desta.

No balanço do consumo e do custo energético, deve-se ainda incluir o custo da energia elétrica. Como a duração da secagem foi alterada em função da temperatura de secagem e da umidade inicial (Tabela 12), a diminuição da temperatura de secagem e/ou o aumento do grau de umidade de colheita resultaram em maior período de funcionamento do motor elétrico, gerador do ar de secagem.

No presente trabalho, o secador foi equipado com motor elétrico trifásico de 2 CV, que resulta no consumo de 1,492 kwh. Como o preço do kwh, em abril de 2001, foi de R\$ 0,2206, o custo horário de funcionamento do motor foi de R\$ 0,33.

Observa-se, na Tabela 15, que o custo referente à energia elétrica é expressivo no balanço final do custo energético. Esse custo foi influenciado pela duração da secagem. Como a duração da secagem aumenta com a

diminuição da temperatura e com o aumento da umidade inicial, o custo da energia elétrica também se eleva.

**Tabela 15.** Consumo e custo de energia elétrica, custo de combustível e custo energético total da secagem estacionária de grãos de milho em secador de leito fixo, para três níveis de umidade inicial (35%, 25% e 18%) e três níveis de temperatura de secagem (100 °C, 70 °C e 40 °C).

Tratamento de secagem	Consumo de eletricidade (kwh)	Custo (R\$/saco de 60 kg)		
		Eletricidade <sup>1</sup>	Combustível	Total
35/100	8,37	0,11	0,60	0,71
35/70	10,74	0,14	0,63	0,77
35/40	22,05	0,28	0,69	0,97
25/100	4,97	0,05	0,31	0,36
25/70	7,73	0,08	0,39	0,47
25/40	17,05	0,19	0,44	0,63
18/100	3,39	0,03	0,18	0,21
18/70	4,43	0,04	0,19	0,23
18/40	11,48	0,12	0,23	0,35

<sup>1</sup> Foi considerado o preço de R\$ 0,2206 por kwh de energia elétrica, em abril de 2001.

A participação do custo da energia elétrica no custo energético total aumentou com a diminuição da temperatura de secagem, independentemente da umidade inicial. Com a secagem a 100 °C, a participação do custo da energia elétrica, em média, foi de 15% do custo total, enquanto com 70 °C e 40 °C essa participação aumentou para 18% e 30%, respectivamente. Pode-se observar que, quando se empregou temperatura de se-

cagem de 40 °C, o custo da energia elétrica teve elevada participação no custo energético total da secagem. Na colheita com umidade de 35%, quando se aumentou a temperatura de secagem de 40 °C para 70 °C, o custo energético total baixou 20%, ao passo que, quando se aumentou de 70 °C para 100 °C, o custo baixou mais 8%. Essa relação se manteve na colheita com umidade de 25%, quando o custo baixou 25% e 23%, respectivamente, e na colheita com 18%, quando o custo baixou 25% e 9%, respectivamente. Observou-se, desse modo, que o aumento da temperatura de secagem, independentemente da umidade inicial, diminuiu o custo da energia usada durante o processo de secagem. Na média das três colheitas com diferentes níveis de umidade, o custo energético total foi 23% menor quando se aumentou a temperatura de secagem de 40 °C para 70 °C e 13% menor quando esse aumento foi de 70 °C para 100 °C. A redução no custo energético total, considerando-se a elevação da temperatura de 40 °C para 100 °C, foi de 36%. Entretanto, cabe salientar que devem ser considerados os aspectos qualitativos desejados para os grãos, pois a temperatura elevada e o apressamento da secagem têm importante influência na qualidade final do produto.

## **Conclusões**

Para as condições do presente trabalho, pode-se con-

cluír que:

- a taxa de retirada de água dos grãos de milho durante a secagem estacionária em secador de leito fixo foi tanto mais elevada quanto mais elevados foram a temperatura do ar de secagem e a umidade inicial;
- houve desproporcionalidade entre o aumento da temperatura do ar de secagem e a diminuição do tempo de secagem;
- o processo de aquecimento e de secagem dos grãos deu-se no sentido das camadas mais profundas da massa de grãos para as superficiais, gerando gradientes, que foram tanto maiores quanto mais elevada a temperatura do ar de secagem e maior a umidade;
- a eficiência térmica do secador aumentou com a diminuição da temperatura do ar de secagem;
- o consumo horário médio de GLP aumentou somente em função da temperatura de secagem;
- independente da umidade inicial, o custo do combustível por percentagem de umidade retirada foi menor quando se aumentou a temperatura do ar de secagem;
- o custo energético total foi 23% menor quando se aumentou a temperatura de secagem de 40 °C para 70 °C e 13% menor quando este aumento foi de 70 °C para 100°C.

## Considerações Finais

Segundo Moechnig (1994), o propósito primordial da secagem é reduzir o conteúdo de água do grão para que não se venha a perdê-lo antes de sua utilização. O tempo necessário varia de maneira inversa à temperatura empregada. A escolha da temperatura a ser usada dependerá de quanto o grão deverá ser secado, do tipo de secador, da umidade do grão e do uso final do grão.

Os fatores que exercem grande influência na operação de secagem de grãos são a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem, o fluxo de ar, a umidade do grão, a temperatura do grão, a velocidade de circulação do grão no secador, o tipo de grão e o destino final (semente, consumo humano, consumo animal etc.). A temperatura e a umidade relativa do ar ambiente têm efeito pequeno sobre o processo quando se usa temperatura elevada. Com temperatura de secagem superior a 43-48 °C, a umidade relativa do ar ambiente tem pouco efeito na secagem. Nesse caso, o efeito maior está no consumo de combustível. Por isso, não existem problemas com a operação de secadores de elevada temperatura durante os dias de chuva ou neblina.

A temperatura e a umidade relativa do ar de secagem afetam a temperatura do produto no secador e o transporte do vapor de água para fora do secador, respecti-

vamente. A capacidade de retirar e transportar água aumenta conforme aumenta a temperatura e/ou diminui a umidade relativa do ar.

Os queimadores devem ter capacidade suficiente para aquecer o ar ambiente até a temperatura desejada para o ar de secagem, tendo como base o clima mais frio esperado durante a estação de secagem. De modo ideal, para maior rendimento térmico do secador, dever-se-ia usar temperatura mais elevada com os grãos mais frios e úmidos, o que normalmente não é possível em virtude da necessidade da manutenção da qualidade do produto. Conforme diminui a umidade, a temperatura dos grãos aumenta. Nessa fase os grãos suportam temperatura mais elevada, sem afetar a qualidade final; no entanto, deve haver cuidados para que a temperatura dos grãos não exceda os níveis desejados.

De modo geral, o fluxo de ar mais usado situa-se entre 0,4 e 1,7 m<sup>3</sup>/s/m<sup>3</sup> para os secadores de fluxo contínuo. Fluxo maior elimina a umidade com maior rapidez, porém a quantidade de vapor de água que se retira por unidade de volume de ar é menor que a quantidade extraída com menor fluxo. O fluxo de ar mais elevado pode causar maior contaminação do ambiente, em virtude de que o ar recolhe mais partículas, conforme se move através da massa de grãos. Também ocorre aumento da pressão estática através da coluna de secagem com maior fluxo de ar.

A umidade inicial do grão afeta a taxa de secagem; quanto mais elevada, a água evaporará com maior facilidade e a secagem será mais rápida. Com umidade menor, a água contida no grão deverá migrar do centro para a superfície para que, então, seja evaporada, que resulta em menor taxa de secagem, em virtude de esta ser dependente da velocidade de difusão da água no grão. O apressamento da secagem de grãos causa trincamento, o que resulta em aumento na suscetibilidade à quebra de grãos.

A temperatura do grão deve ser a variável principal de observação durante a operação de secagem. Para a maior parte dos grãos, a temperatura não deve ser superior a 40 °C quando destinados a sementes; 60 °C para os grãos utilizados em moinhos; e 80 °C para os grãos destinados a consumo animal. A temperatura máxima possível nos grãos depende da espécie e da umidade inicial. O trigo é mais tolerante a temperatura mais elevada na secagem que aveia, milho e centeio, nesta ordem. Durante o processo de secagem, a temperatura dos grãos é consideravelmente mais baixa que a temperatura do ar de secagem, até que o grão esteja quase seco.

O fluxo de ar no secador afeta o tempo em que o grão fica exposto ao ar de secagem. A temperatura usada nos secadores de elevada temperatura poderiam secar o grão até 1 a 2% de umidade, se estes ficarem expostos por tempo suficiente. A dificuldade para a secagem

é dependente da integridade e do tamanho do grão. Por exemplo, milho requer 60% de tempo adicional para secar em relação a trigo.

Brooker et al. citados por Cavariani (1996), enfatizam que temperatura de secagem deve ter, como referência, a da massa de sementes; assim, valores situados entre 40,5 °C e 43,3 °C são considerados como máximos, acima dos quais danos físicos ou químicos podem ser ocasionados. No entanto, em virtude da diferença da temperatura do ar insuflado e a da massa de sementes depender do tipo de secador, da espécie considerada e da resistência ao movimento do ar, torna-se necessário estabelecer o padrão de temperatura para cada tipo de secador e para cada espécie de grão.

Pelo exposto nesta publicação, verifica-se que a eficiência térmica dos secadores que operam com elevadas temperaturas contrapõe-se aos conceitos mais modernos de qualidade exigidos pelo mercado de produtos agrícolas e, portanto, recomenda-se muita cautela na determinação da temperatura a ser atingida pela massa de grãos. Existe urgente necessidade de se estudar melhor as diferentes variáveis que interferem na secagem ao se usar os secadores comerciais nacionais, uma vez que esses equipamentos são diversos daqueles em uso em outros países e, nesses casos, as conclusões oriundas de trabalhos de pesquisa estrangeiros podem ter duvidosa aplicabilidade às condições brasileiras, principalmente quando se visa à manutenção da qualidade

de produtos colhidos.

## Referências Bibliográficas

AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORRÊA, P. C. Cinética da contração volumétrica dos grãos de duas cultivares de milho-pipoca durante o processo de secagem. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 2, n. 1, p. 61-65, 2000.

AGUIRRE, R.; PESKE, S. T. **Manual para el beneficio de semillas**. Cali, Colombia: CIAT, 1988. 167 p.

AYERST, G. J. The effects of moisture and temperature on growth and spore germination in some fungi. **Journal of Stored Products Research**, Oxford, v. 5, n. 3, p. 127-141, 1965.

BAKKER-ARKEMA, F. W. High-temperature grain drying. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE GRÃOS, 1993, Canela. **Anais...** Canela: CESA / FAO, 1994. p. 63-176.

BAKKER-ARKEMA, F. W. Selected aspects of crop processing and storage: a review. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 30, p. 1-22, 1984.

BAKKER-ARKEMA, F. W.; BALLINGER, M. **Stack-type crossflow grain dryer**. St. Joseph: ASAE, 1983. 7 p. (ASAE. Paper n.83-3015).

BAKKER-ARKEMA, F. W.; FONTANA, C. **Comparison of rice drying systems**. Chicago: ASAE, 1983. 14 p. (ASAE. Paper n.83-3532).

BIAGI, J. D.; VALENTINI, S. R. T.; QUEIROZ, D. M. Secagem de produtos agrícolas. In: CORTEZ, L. A. B.; MAGALHÃES, P. S. G. (Coord.). **Introdução à engenharia agrícola**. Campinas: UNICAMP, 1992. p. 245-266.

BRASIL. Ministério da Agricultura, do Abastecimento e da Reforma Agrária. Comissão Técnica para a Redução das Perdas na Agropecuária (Brasília, DF). **Perdas na agropecuária brasileira: relatório preliminar**. Brasília, 1993. v. 1.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: Van Nostrand Reinold, 1992. 450 p.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying cereal grains**. 3. ed. Westport: AVI Publishing, 1981. 265 p.

CARVALHO, N. M. **A secagem de sementes**. Jaboticabal: FUNEP, 1994. 165 p.

CAVARIANI, C. **Secagem estacionária de sementes de milho com distribuição radial do fluxo de ar**. 1996. 85 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

CAVARIANI, C.; SILVA, R. S., MIRANDA, L. C.; NAKAGAVA, J.; BELGIORNO, D. C. Secagem estacionária de sementes de milho com distribuição radial do fluxo de ar. II - Andamento físico. **Revista Brasileira de Sementes**. Campinas, v. 21, n. 1, p. 7-17, 1999.

CENKOWSKI, S.; JAYAS, D. S.; HAO, D. Latent heat of vaporization for selected foods and crops. **Canadian Agricultural Engineering**, v. 34, n. 3, p. 281-286, July/Sep. 1992.

CHIEN, K. S.; MATTHES, R. K.; VERMA, B. P. Dimensional analysis of seed-moisture movement in deep-bed drying. **Transactions of the ASAE**, v. 14, p. 277-281, 1971.

CONPET. Programa Nacional da Racionalização do Uso de Derivados de Petróleo e do Gás Natural. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/conpet/Glpiotec.htm>>. Acesso em: 24 mar. 2001.

CORRÊA, C. F. **Secagem de sementes de arroz (*Oryza sativa* L.) em silo secador com distribuição radial de ar**. 1981. 85 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

DALBELLO, O. **Eficiência do processo de secagem do amendoim (*Arachis hypogaea* L.) e milho pipoca (*Zea mays* L.)**. 1995. 112 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

DUSI, D. A.; SIMINSKI, E.; DALBELLO, O.; FLAMIA, R. **Armazenagem na propriedade: curso** profissionalizante de armazenagem; informações técnicas. Florianópolis: EPAGRI / GTZ, 1998. 95 p. (EPAGRI. Boletim Didático, 23).

GUSTAFSON, R. J.; MOREY, R. V. Moisture and quality variations across the column of a crossflow grain dryer. **Transactions of the ASAE**, v. 24, n. 2, p. 1621-1625, 1981.

GUSTAFSON, R. J.; MOREY, R. V.; CHRISTENSEN, C. M.; MERONUCK, R. A. Quality changes during high-low temperature drying. **Transactions of the ASAE**, v. 21, p. 162-168, 1978.

HALL, C. W. **Drying and storage of agricultural crops**. Westport: Avi Publishing Company, 1980. 381 p.

HARRINGTON, J. F. Seed storage and longevity. In: KOZLOWSKI, T. T. (Ed.). **Seed biology**. New York: Academic Press, 1972. v. 3, p. 145-245.

HELLEVANG, J. K. Crop dryeration and in-storage cooling. Disponível em: <<http://www.smallgrains.org/TECHFILE/storage2.htm>>. Acesso em: 15 mar. 2001.

HUTT, W.; MEIERING, A.; OELSCHLAGER, W. Grain contamination in drying with direct heating. **Canadian Agricultural Engineering**, v. 20, n. 2, p. 103-107, Dec. 1978.

KEPLER WEBER (Panambi, RS). **Secador contínuo de fluxo misto KW 110 R - KW 115 R - KW 125 R - KW 215 R - KW 315 R - KW 325 R e KW 330 R.**

Panambi, 1997. 4 p. 1 folder.

KEPLER WEBER (Panambi, RS). **Secador contínuo de fluxo misto KW-DRM Modelos com capacidade de secagem de 10 a 250 t/h.** Panambi, 1999. 4 p. 1 folder.

KREYGER, J. **Drying and storing grains, seeds and pulses in temperate climates.** Wageningen: Institute for Storage and Processing of Agricultural Products-IBVL, 1972. 333 p.

LACERDA FILHO, A. F.; QUEIROZ, D. M.; ROA, G. **Avaliação experimental de secador comercial intermitente de arroz.** *Revista Brasileira de Armazenamento*, Viçosa, v. 7, p. 39-49, 1982.

LASSERAN, J. C. **The drying of grains - principles, equipment, energy savings and fire safety.** In: MULTON, J. L. (Ed.). **Preservation and storage of grains, seeds and their by-products.** Paris: Tec & Doc-Lavoisier, 1988. p. 606-663.

LASSERAN, J. C. **Princípios gerais de secagem.** *Revista Brasileira de Armazenamento*, v. 3, n. 3, p. 17-46. 1978.

LOEWER, O. J.; BRIDGES, T. C.; BUCKLIN, R. A. **On-farm drying and storage systems**. [S.l.]: American Society of Agricultural Engineers, 1994. 650 p.

MARSANS, G. J. **Manejo y conservación de granos**. Buenos Aires: Hemisferio Sur, 1987. 266 p.

MARTINS, R. R.; OLIVEIRA, P. A. V. de. **Secagem comunitária de milho: uma solução para pequenas propriedades**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 20., 1991, Londrina. **Anais...** Londrina: SBEA, 1992. p. 1622-1632.

McLEAN, K. A. **Drying and combinable crops**. Ipswich: Farming, 1980. 280 p.

MOECHNIG, B. **Secado y ventilación del grano**. In: MCELLHINEY, R. R. (Ed.). **Tecnología para la fabricación de alimentos balanceados**. Arlington: AFIA, 1994. p. 532-537.

MUCKLE, T. B.; STIRLING, H. G. **Review of the drying of cereals and legumes in the tropics**. **Tropical Stored Products**, v. 22, p. 11-30, 1971.

OLIVEIRA, P. A. V. de. **Sistemas de armazenagem de milho para pequenas propriedades produtoras de suínos**. 1989. 107 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

OLIVEIRA, P. A. V. de; MARTINS, R. R. **Secador de grãos pré-fabricado em cimento para pequenas propriedades**. Concórdia: EMBRAPA-CNPSA, 1992. 5 p. (EMBRAPA-CNPSA. Comunicado Técnico, 193).

OTTEN, L.; BROWN, R.; ANDERSON, K. A study of commercial crossflow grain dryer. **Canadian Agricultural Engineering**, v. 22, n. 2, p. 164-170, Dec. 1980.

PARK, K. J. **Secagem de produtos agrícolas**. Campinas: FEAGRI / UNICAMP, 1991. 167 p. Não publicado.

PASIN, N. H. Secagem estática de sementes de soja. **Informativo Abrates**, Londrina, v. 2, n. 1, p. 33-39, 1991.

PUZZI, D. **Abastecimento e armazenamento de grãos**. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1986. 603 p.

RODRIGUEZ, J. C. Evaluación de un sistema de secado de granos com aire natural. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE GRÃOS, 1993, Canela. **Anais...** Canela: CESA / FAO, 1993. p. 215-234.

ROSA, O. S. Temperaturas recomendadas para a secagem de sementes de trigo e arroz utilizando o método intermitente. In: SEMINÁRIO PANAMERICANO DE SEMILLAS, 5., 1966, Maracay. **Anais...** Maracay: [s.n.], 1966. 27 p.

SABBAH, M. A.; FOSTER, G. H.; HAUGH, C. G. Effect of tempering after drying on cooling shelled corn. **Transactions of the ASAE**, v. 15, p. 763-765, 1972.

SILVA, J. S. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. 1. ed. Viçosa: Aprenda Fácil, 2000. 502 p.

SILVA, J. S.; AFONSO, A. D. L.; GUIMARÃES, A. C. Análise do sistema de secagem. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 2, n. 5, p. 1-31, 1992a.

SILVA, J. S.; LACERDA FILHO, A. F. **Construção de um secador para produtos agrícolas**. Viçosa: UFV, 1984. 17 p. (UFV. Informe Técnico, 41).

SILVA, J. S.; PINTO, F. de A. de C. Secagem e armazenagem de grãos no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 22., 1993, Ilhéus. **Anais...** Ilhéus: SBEA / CEPLAC, 1993. p. 1141-1157.

SILVA, J. S.; SABIONI, P. M.; AFONSO, A. D. L. Avaliação de secadores e custo de secagem de produtos agrícolas. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 2, n. 2., p. 1-19, 1992b.

STAUDT, E.; ZIEGLER, E. **Flour chemistry**. Switzerland: Buhler Brothers, 1973. 200 p.

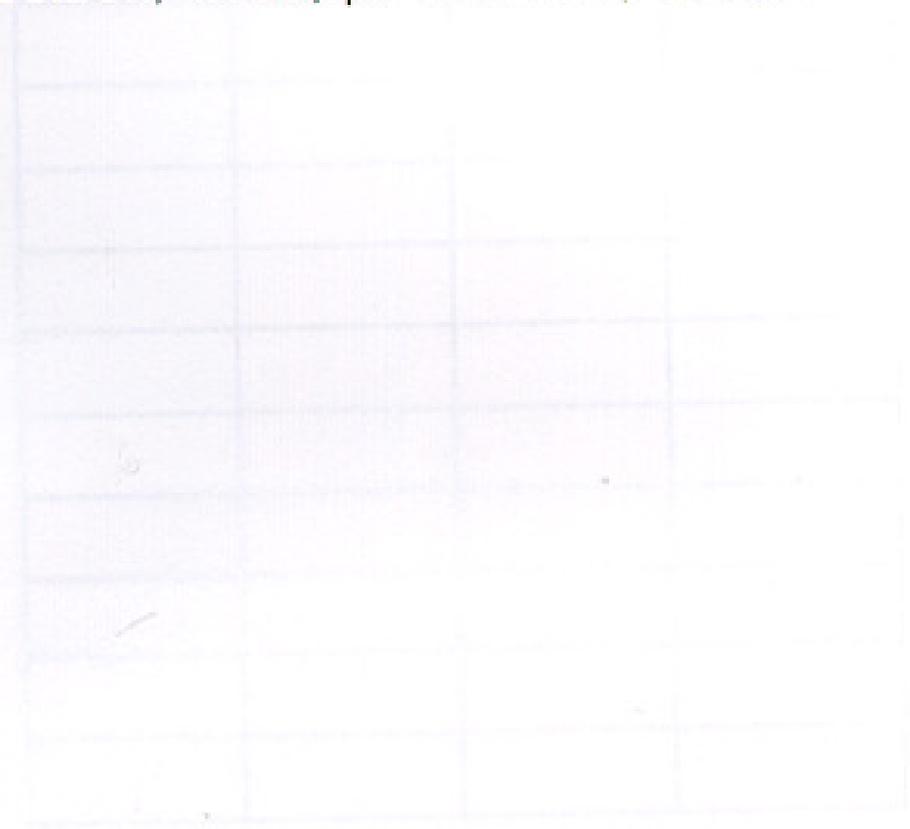
STEFFE, J. F.; SINGH, R. P.; BAKSHI, A. S. Influence of tempering time and cooling on rice milling yields and moisture removal. **Transactions of the ASAE**, v. 22, p. 1214-1218, 1224, 1979.

STEVENS, G. R.; THOMPSON, T. L. Improving crossflow grain dryer design using simulation. **Transactions of the ASAE**, v. 19, n. 4, p. 778-781, 1976.

VILLELA, F. A. Efeitos da secagem intermitente sobre a qualidade de sementes de milho. 1991. 104 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

WEBER, E. A. Armazenagem agrícola. 2. ed. Porto Alegre: Kepler Weber, 1998. 400 p.

WOODFORDE, J.; LAWTON, P. J. Drying cereal grains in beds six inches deep. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 30, p. 146-171, 1965.



MILLER, F. A. Efeitos de seagem intermitente sobre a qualidade de centeiras de milho. 1994. 104 f. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

SILVA, J. S. M. *et al.* Qualidade de milho para suínos. In: *Atas do 1º Congresso Brasileiro de Melhoramento de Espécies Agrícolas*. Porto Alegre: Kapel Verlag, 1998. 400 p.

WOODRORDE, J. S. LAWTON, P. J. Diving cereal grains in basins: a review. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v. 30, p. 149-153, 1981.

SILVA, J. S. M. *et al.* Qualidade de milho para suínos. In: *Atas do 1º Congresso Brasileiro de Melhoramento de Espécies Agrícolas*. Porto Alegre: Kapel Verlag, 1998. 400 p.

STAUDT, R. *et al.* Flour chemistry. Switzerland: Birkhuser, 1993. 200 p.

STEFFE, J. E.; SINGH, R. P.; DASARI, A. S. Influence of tempering and cooling on rice milling yields and moisture removal. *Transactions of the ASAE*, v. 22, p. 1214-1218, 1979.

STEVENS, G. R. *et al.* Improving crossflow grain simulation. *Transactions of the ASAE*, v. 4, p. 778-781, 1978.



Tel./Fax: (54) 313.6466 / 317.1504  
General Canabarro, 759 - Centro  
99010-190 - Passo Fundo - RS  
E-mail: graficadanielli@uol.com.br  
CNPJ 91.801.803/0001-09 - Inscr. Est. 091/0111294

**Embrapa**  

---

**Trigo**

**MINISTÉRIO DA AGRICULTURA,  
PECUÁRIA E DO ABASTECIMENTO**

**GOVERNO  
FEDERAL**  
Trabalhando em todo o Brasil