

Troca de calor e massa no processamento de grãos¹

Por: Luís César da Silva

1. Introdução

O ar, didaticamente, é dividido em duas frações: vapor de água e ar seco. A fração vapor de água pode aumentar ou diminuir. Aumenta, por exemplo, na secagem de grãos, em que a água removida do produto é repassada ao ar. E diminui quando do reumedecimento de produtos ou da condensação de vapor de água sobre superfícies.

Em aplicações na área de armazenagem de grãos, a fração ar seco é considerada constante, sendo composta por nitrogênio (78,80%), oxigênio (21,00%), gases nobres (0,90%), gás carbônico (0,030%) e outros gases (0,01%).

Para caracterizar o ar são utilizadas propriedades psicrométricas, como: temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, umidade relativa, volume específico, razão de mistura e entalpia.

A temperatura de bulbo seco é a temperatura do ar medida por termômetros de mercúrio ou digitais. Enquanto a temperatura de bulbo úmido é medida por meio de um termômetro com o bulbo envolto por cadarço de algodão embebido em água. Esse artifício visa simular o processo de evaporação. Desse modo, a temperatura de bulbo úmido tende a ser menor que a temperatura de bulbo seco. E quanto maior é essa diferença, mais seco o ar estará, ou seja, o aporte de vapor de água no ar está em baixo nível. Esse nível é expresso em escala percentual, por meio da propriedade umidade relativa.

Abstract

Heat and Mass Transfer in Grain Handling

(Federal University of Espírito Santo - Food Engineering Department - Technical Bulletin: AG: 01/13 - 04/23/2013, Revised: 04/10/2015)

This extension bulletin aims to emphasize the importance of basic knowledge of psychometrics, and heat and mass transfer applied to operation such as: wet-bin aeration, drying, dry-aeration and aeration or cooling of stored products.

To nowadays, in which concepts such as process optimization, rational energy use, and physicochemical, nutritional and sanitary quality of foods are highly appreciated, require, that operators and managers of grain storage facilities continually ameliorate their knowledge about unit operations related to grain handling.

Dr. Luís César Silva – website: www.agais.com

¹ Artigo Publicado na Revista: Grãos Brasil: Da Semente ao Consumo, Ano X, nº 58, Jan/Fev. de 2013, p. 15 - 18.

Se a umidade relativa é zero significa que não há vapor de água no ar, enquanto 100% caracteriza o estado de saturação, ou seja, o ar está com o aporte máximo de vapor de água. Nessa condição, as temperaturas de bulbo seco e úmido são iguais.

O volume específico corresponde ao volume de ar que contem um quilograma de ar seco e mais uma quantidade variável de vapor de água. A variabilidade da quantidade de vapor é expressa pela propriedade - razão de mistura, que corresponde à razão entre quantidade de vapor e 1,0 kg de ar seco. Por exemplo, o ar com temperatura de 25 °C e umidade relativa de 60% tem a razão de mistura igual 0,0125 kg de vapor de água por 1,0 kg de ar seco.

Outra propriedade relacionada à quantidade de ar seco é a entalpia, que expressa o estado energético do ar. Quanto mais energia o ar possuir, maior é a agitação moléculas que o constitui. A entalpia é expressa pela relação entre a quantidade de energia (k Joule ou k caloria) e 1,0 kg de ar seco. Portanto, para temperatura de 25 °C e umidade relativa de 60% o valor da entalpia é 55 kJ por 1,0 kg de ar seco, ou 13,1 kcal por 1,0 kg de ar seco. Se o ar é aquecido, a entalpia aumenta, conseqüentemente, a temperatura também aumenta.

Os valores das propriedades do ar alteram mediante a mudança do ponto de estado, que é definido, por exemplo, pela temperatura e umidade relativa do ar. Desse modo, conhecendo a temperatura e umidade relativa, as demais propriedades do ar podem ser determinadas utilizando o gráfico psicrométrico, ou programas de computador que contenham equações matemáticas para o cálculo das propriedades. No site www.agais.com, seção aplicativos “on line” é disponibilizado um programa para o cálculo das propriedades psicrométricas.

2. Processo troca de calor

O processo de troca de calor ocorre quando o ar é aquecimento ou resfriado. O aquecimento do ar para fins de secagem pode ocorrer em fornalhas, resistores elétricos, ou pela radiação solar.

No caso das fornalhas a lenha, cada quilograma de lenha queimada libera cerca de 3.500 kcal. No entanto, normalmente apenas 40% dessa energia é transferida ao ar, em razão da baixa eficiência térmica das fornalhas.

Ao receber calor, a entalpia do ar aumentada, a temperatura eleva e a umidade relativa reduz, pois quanto maior o aporte de calor do ar, maior será a capacidade em

conter água na forma de vapor. É por isso que na maioria dos secadores, o ar de secagem é aquecido.

No caso do resfriamento do ar empregam-se geradores de frio para remover calor. Com isso, a temperatura do ar diminui e a umidade relativa aumenta, pois o ar perde capacidade de reter água na forma de vapor. E se a quantidade de calor removida for demasiada, parte do vapor de água condensa e, ou congela.

3. Processo de troca de massa - vapor de água

Os grãos são higroscópicos, ou seja, possuem a capacidade de ceder ou receber água na forma de vapor do ar circunvizinho. O sentido da troca é estabelecido, por exemplo, pela diferença da umidade relativa da finíssima camada de ar sobre os grãos, chamada de microclima, e a umidade relativa do ar circunvizinho. O fluxo de vapor será estabelecido do ambiente como maior umidade relativa para o de menor valor. Isso ocorre até que seja atingida a condição de equilíbrio higroscópico, quando o fluxo de vapor cessa, pois os valores de umidade relativa tornam iguais.

Na secagem, os grãos devem dispor de aporte calórico para evaporar a água contida nos tecidos internos e promover migração do vapor para superfície. O que faz a umidade relativa nas superfícies dos grãos tornar maior que a umidade relativa do ar circunvizinho. Sendo assim, o fluxo de vapor de água ocorrerá das superfícies dos grãos para o ar. Recebendo esse aporte de vapor, a temperatura do ar reduz, pois parte do calor do ar será utilizada para manter a massa de vapor em suspensão. Além disso, aumentam os valores da razão de mistura e da umidade relativa.

O reumedecimento da massa de grãos deve-se ao fato do ar circunvizinho apresentar umidade relativa maior que a umidade relativa sobre a superfície dos grãos. Nesse caso, o fluxo de vapor será do ar para superfícies dos grãos, podendo ocorrer condensação. A massa de grãos poderá absorver parte da água condensada, aumentando o seu teor de água em poucos pontos percentuais. No entanto, a maior quantidade de vapor condensada sobre as superfícies dos grãos, faz aumentar a atividade de água no espaço intergranular, propiciando o desenvolvimento de fungos e, ou bactérias.

Outro fato que leva o ar a perder vapor de água, é quando em contato com superfícies frias. Assim, à medida que o ar cede calor, diminui sua capacidade de

manter a massa vapor em suspensão, ocorrendo condensação. Essas superfícies podem ser paredes ou tetos de silos ou de graneleiros, ou as superfícies dos grãos.

4. Processos de troca de calor e massa nas operações unitárias

Conhecendo os princípios da troca de calor e massa envolvendo as massas de grãos e ar é possível compreender como ocorrem às operações unitárias: aeração em silo-pulmão, secagem, seca-aeração, aeração durante a armazenagem e refrigeração da massa de grãos.

a) Uso do ar em silos-pulmão

Os silos-pulmão no fluxograma operacional são instalados entre as máquinas de pré-limpeza e os secadores com a finalidade de acondicionar produto úmido que aguarda a secagem. Normalmente, esses produtos apresentam teores de água superior a 18%, o que favorece a proliferação de fungos do gênero *Fusarium*. Portanto, para reduzir a proliferação desses microrganismos é recomendado remover calor da massa de grãos. Esse calor é gerado, principalmente, pela respiração dos grãos e o metabolismo de fungos e bactérias. Desse modo, com a passagem do fluxo de ar ambiente, Figura 1, pelos grãos, remove-se calor o que leva a redução da temperatura do produto e pode ocorrer uma pequena redução do teor de água do produto entre 0,5 a 1,0 pontos percentuais. Isso dependerá das condições psicrométricas do ar ambiente e o tempo de execução da operação. O fluxo de ar empregado deve estar entre 300 a 600 litros de ar/minuto/metro cúbico de produto.

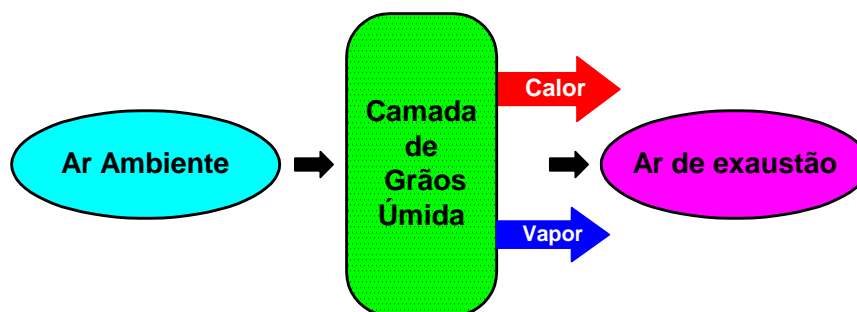


Figura 1 – Uso do ar em silos-pulmão.

b) Uso do ar na secagem de grãos

Nos secadores de grãos tipo fluxos mistos (secador cascata ou de cavaletes) com reaproveitamento do ar da seção de resfriamento, Figura 2, o ar ambiente ao passar pela fornalha recebe aporte de calor, fazendo com que a temperatura do ar superaquecido varie entre 350 a 450 °C. Esse quantitativo de ar representa de 10 a 15% do fluxo do ar de secagem.

O ar superaquecido segue para o misturador tangencial, popularmente, denominado ciclone ou quebra chamas, onde é misturado ao ar ambiente tornando a temperatura do ar entre 80 a 100 °C. O quantitativo de ar que entra pelas aberturas do misturador tangencial corresponde entre 35 a 40% do fluxo do ar de secagem.

A massa de grãos com teor de água próximo a 13% e temperatura de 55 °C ao sair da câmara de secagem dos secadores de fluxos mistos seguem para seção de resfriamento, onde o ar ambiente é utilizado para remover calor (Figura 2). Desse modo, a temperatura da massa de grãos toma valores próximos de 35 °C. O ar que sai da seção de resfriamento possui considerável aporte de calor, sendo assim, misturado ao ar proveniente do misturador tangencial com o objetivo de aumentar ainda mais o potencial de secagem. O quantitativo de ar que entra pelas venezianas da seção de resfriamento dos secadores de fluxos misto representa entre 45 a 50% do fluxo do ar de secagem.

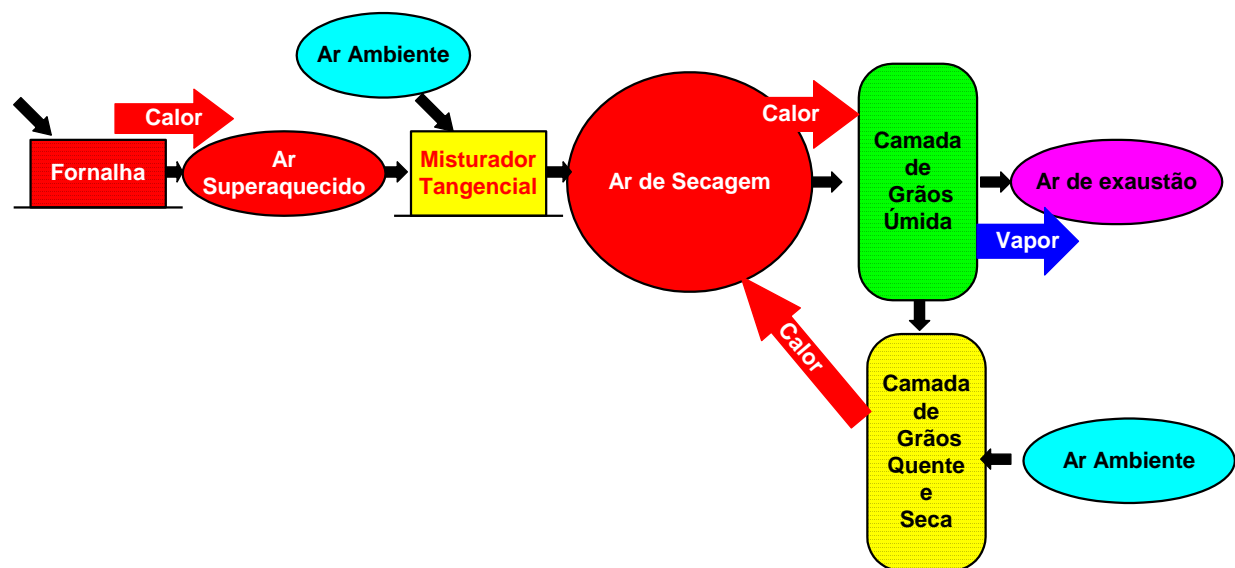


Figura 2 – Uso do ar em secadores de fluxos mistos (secador de cavaletes).

Na câmara de secagem, o ar cederá calor à massa de grãos e receberá água na forma de vapor. Assim, o ar de exaustão apresentará temperatura entre 35 a 45 °C e umidade relativa entre 70 a 80%. O ideal seria valores próximos a 100%, o que implicaria no máximo aproveitamento da energia calorífica do ar.

c) Uso do ar na seca-aeração

Na operação de seca-aeração (Figura 3), o produto quente, com temperatura próxima a 50 °C e teor de água de 16%, ao sair do secador é encaminhado a um silo onde permanece em descanso por 4 a 8 horas. Decorrido esse tempo, aplica-se um fluxo de ar ambiente com a finalidade de remover calor e o excesso de vapor do ar intergranular e, ou água condensada sobre as superfícies dos grãos.

Por meio da operação de seca-aeração otimiza o uso dos secadores, reduz o consumo de lenha e energia elétrica e diminui danos mecânicos e térmicos aos grãos. É recomendado fluxo de ar ambiente entre 500 a 1.000 litros de ar/minuto/metro cúbico de produto.

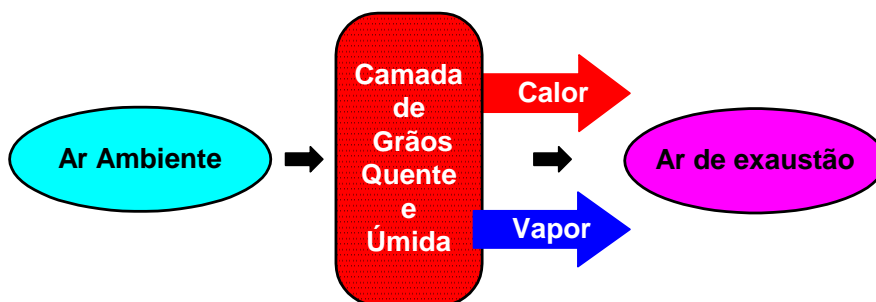


Figura 3 – Uso do ar na seca-aeração.

d) Uso do ar na aeração de grãos armazenados

A aeração de grãos armazenados é realizada com as seguintes finalidades: (a) homogeneizar a temperatura e teor de água da massa de grãos, (b) minimizar os efeitos da migração de umidade e (c) renovar a massa de ar intergranular. Permitindo assim, a manutenção da qualidade do produto. Infelizmente, há uma concepção errônea que a aeração deve ser utilizada exclusivamente para remover, corretivamente, bolsões de calor gerados, principalmente, pela ação de fungos e, ou bactérias. O ideal é que a

aeração seja conduzida com frequência, sempre que as condições psicrométricas do ar ambiente sejam favoráveis.

Conforme representado na Figura 4, na aeração de grãos armazenados, o ar ambiente é forçado a passar pela camada de grãos, podendo carrear pequenas quantidade de calor e, ou vapor de água.

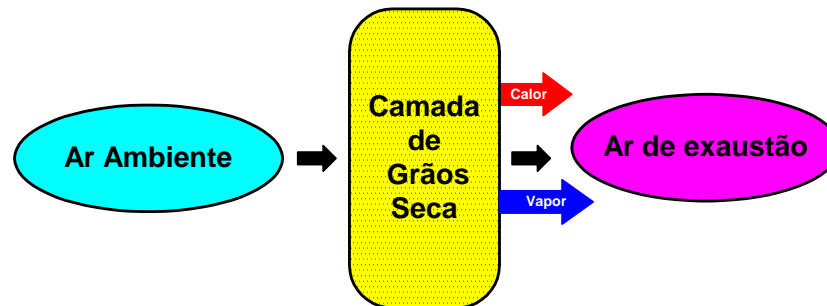


Figura 4 – Uso do ar na aeração de grãos armazenados.

As condições psicrométricas do ar ambiente devem ser rigorosamente observadas, para que não ocorra a supersecagem ou o umedecimento da massa de grãos. Portanto, o ar ambiente deve estar na condição de equilíbrio higroscópico com o produto armazenado. Desse modo, o operador deve determinar as condições psicrométricas do ar e consultar as tabelas de equilíbrio higroscópico que são específicas para cada produto.

Para condução da operação de aeração recomenda-se, no caso de silos, o fluxo de ar entre 30 a 100 litros de ar/minuto/metro cúbico de produto, e no caso de graneleiros entre 100 a 200. Os maiores valores para graneleiros deve-se a maior dificuldade na distribuição do ar pela massa do produto.

e) Uso do ar na refrigeração de grãos

A refrigeração é um tratamento térmico aplicado à massa de grãos armazenada, em que, por meio da redução da temperatura da massa de grãos é promovida a redução das atividades metabólicas dos grãos, fungos, bactérias e insetos. Fatos que contribuem para preservação da qualidade do produto.

Para redução da temperatura do produto, este necessita ceder calor ao ar resfriado que possui baixa entalpia. Portanto, conforme representado na Figura 5, o ar ambiente deve passar pelo gerador de frio, onde tem removido calor e, posteriormente, é recondicionado para então ser insuflado na massa de grãos.

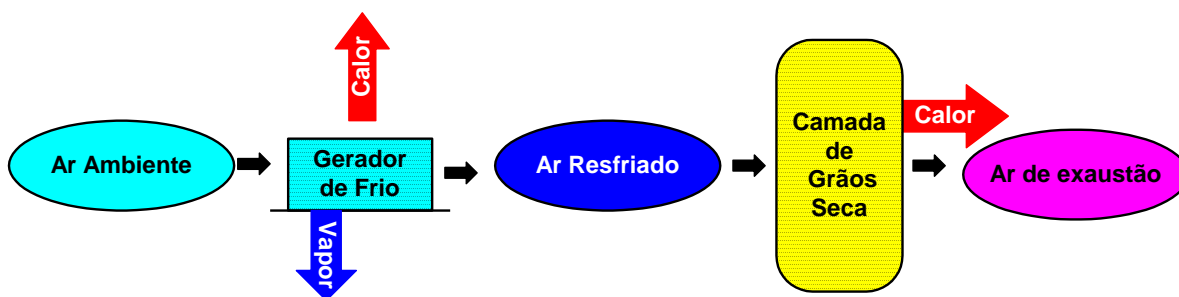


Figura 5 – Usos do ar em sistemas de refrigeração de grãos armazenados.

Na remoção de calor, parte da água presente no ar é condensada, situação em que a temperatura do ar atinge valores próximos de 10 °C e umidade relativa 100%, o que inviabiliza o uso desse ar para resfriar os grãos. Portanto, para adequar a condição psicrométrica do ar é feito o condicionamento, que consiste em empregar resistores elétricos, deixando o ar, por exemplo, com temperatura de 15 °C e umidade relativa de 65%, o que implica no equilíbrio higroscópico para milho armazenado com teor de água de 14,1%. Desse modo, o ar resfriado removerá calor do produto sem, acidentalmente, promover a secagem ou reumedecimento.

Tecnicamente, é recomendado, que o fluxo de ar resfriado seja superior a 120 litros de ar/minuto/metro cúbico de produto, para que o tempo de operação transcorra entre 100 a 150 horas.

5. Ponderações Finais

Este artigo foi redigido como intuito de despertar em operadores e gerentes operacionais de unidades armazenadoras a importância dos conhecimentos básicos de transferência de calor e massa, e de psicrometria na condução das operações de aeração em silo-pulmão, secagem, seca-aeração e da aeração ou refrigeração durante a armazenagem.

Para os tempos atuais, em que, são ressaltadas adoções de conceitos como otimização de processos, uso racional de energia e qualidades físico-química, nutricional e sanitária dos grãos; faz-se necessário que operadores e gerentes operacionais aprimorem conhecimentos quanto à forma de condução das operações unitárias do ambiente - unidade armazenadora de grãos.

6. Referências

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

DARBY, J. **Aeration increases marketing choices**. Farming Ahead, nº 144, p. 26-28, 2004.

SILVA, J. S. [editor], **Pré-processamento de produtos agrícolas**. Juiz de Fora: Instituto Maria, 1995. 509 p.

SILVA, L. C., **Micotoxinas em grãos e derivados**. Revista Grãos Brasil, Ano VIII, n. 39, Novembro/Dezembro de 2009, p. 13-16.

WEBER, E. A., **Armazenagem Agrícola**. Editora. Livraria e Editora Agropecuária, Guaíba: RS. 2001. 396 p.

TOWNE, H. L. **Aeration strategies**. World Grain, July 2001, p. 52-56