

Introdução à Secagem



*Hinc
Patriam
Sustinet*

INSTITUTO
SUPERIOR DE
AGRONOMIA
Universidade de Lisboa

Secagem

Secagem: Remoção de pequenas quantidades de H_2O (ou de outro líquido) do material a processar, sob a forma de vapor arrastado por uma corrente de ar quente.

Evaporação \equiv remoção de grandes quantidades de água (ou de um líquido) na forma de vapor no ponto de ebulição

Secagem \equiv um dos métodos mais antigos de preservação de alimentos

Objectivos da secagem:

- Aumento da possibilidade de conservação
- Grande redução de massa (5 a 15 vezes menor)
- Redução dos custos de armazenagem e transporte
- Mas afecta principalmente as características do alimento

Fundamentos da eliminação de água

- Presença de água \Rightarrow deterioração do alimento
- A eliminação da água implica,
 - Alteração da qualidade nutricional e organoléptica
 - Perda de aromas
 - Consumo substancial de energia
 - Técnicas com menor consumo de energia \Rightarrow maior alteração da qualidade dos alimentos

Métodos de secagem

1. Descontínuo (“batch”)

Contínuo

2. Classificação segundo o modo de adição de calor e de remoção de H₂O

2.1 → contacto directo com ar quente à P = atmosférica

2.2 → secagem sob “vácuo” - transferência de calor por condução e, por vezes, por radiação

2.3 → Liofilização (“freeze drying”) – o vapor de água é sublimado da alimento congelado

Secagem

Controlo do processo:

(1) Transferência de calor (calor latente de vaporização)

(2) Transferência de massa interna e externa (movimento da H_2O ou do vapor de água através do alimento e remoção da H_2O à superfície do alimento)

Secagem

(1) Transferência de calor

- Convecção (e.g. secagem ao ar)

$$q = h_s A (T_{\text{ar}} - T_{\text{superfície}}) \quad (1)$$

- Condução (e.g. secador de tambor)

$$60 \leq U \leq 1800 \text{ J}/(\text{m}^2\text{K})$$

$$q = UA (T_{\text{sup.tambor}} - T_{\text{sup.alimento}}) \quad (2)$$

- Radiação (Temp. alimento > temp. ar)

Secadores

Equipamento de Secagem convencional

Podemos considerar um elevado número de tipos de secadores, mas existem alguns aspectos gerais que podemos considerar:

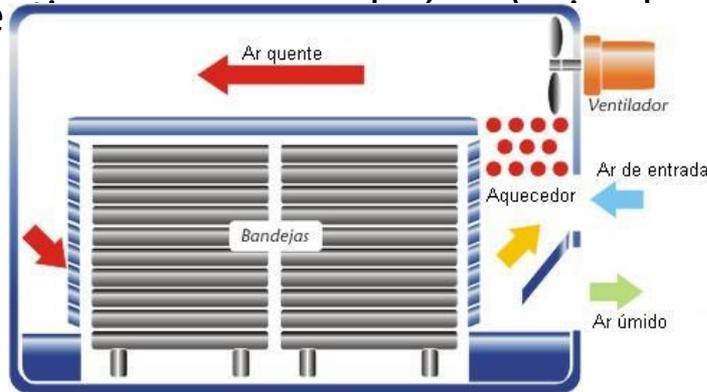
- Os secadores podem funcionar contínua ou descontínua;
- Utiliza-se ar (ou outro gás, por ex. azoto) quente com baixa humidade;
- Os secadores podem funcionar à pressão atmosférica ou sob pressão reduzida.

Principais tipos de secadores:

- Secadores de tabuleiros;
- Secadores de pulverização (*spray dryers*);
- Secadores rotativos;
- Secadores de leito fluidizado

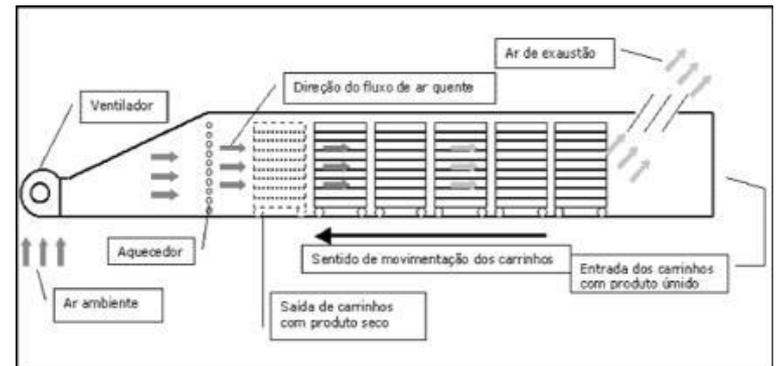
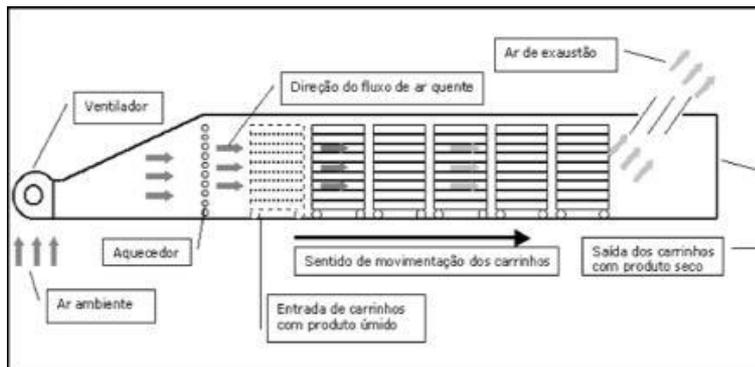
Secadores de Tabuleiros

Os **secadores de tabuleiros** ou de **prateleiras** usam-se para substâncias granuladas ou para peças separadas. O material a secar é colocado em tabuleiros (pode ser aquecido por serpente) e o ar quente sopra sobre o material.



Secadores de Túnel

O material a ser seco é colocado em bandejas e essas em carros que irão entrar dentro de um túnel onde ocorrerá o processo de secagem. Esta operação pode ocorrer com o ar de secagem em corrente paralela ou em contracorrente



Secadores Rotativos

É utilizado na secagem contínua de produtos em grande escala (várias toneladas por hora).



(rotação de 20 a 25 rpm)



Representação esquemática da vista transversal do secador rotativo

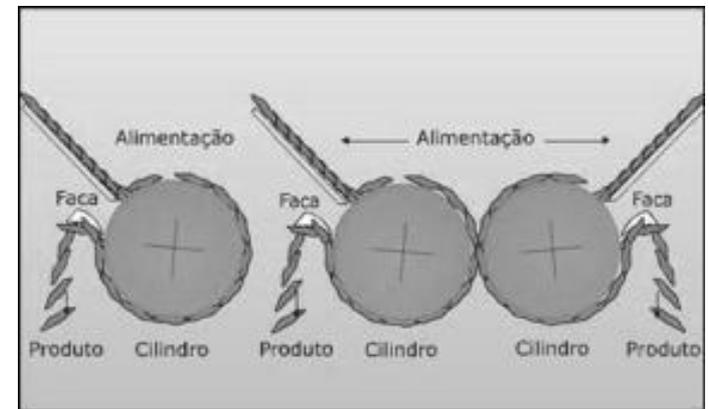
O secador está ligeiramente inclinado.

O material a secar desloca-se pela ação da gravidade.

Secadores de Rolos

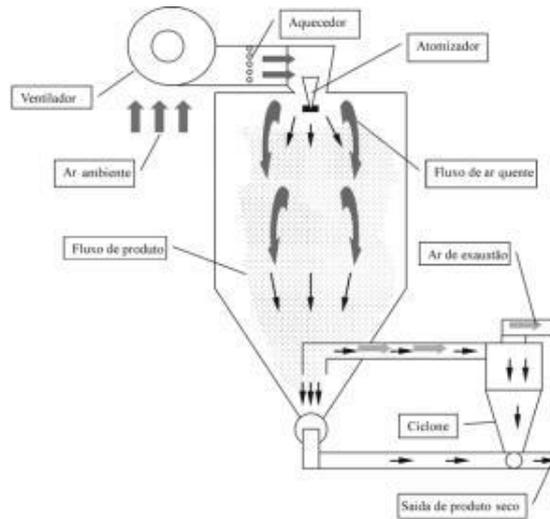
Neste tipo de secador o material a ser seco é aplicado sobre rolos giratórios aquecidos interiormente. A água evapora-se e forma-se uma película seca que é retirada por um raspador.

É utilizado na fabricação de leite em pó.



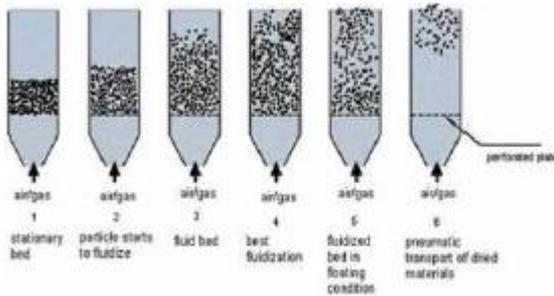
Secadores de pulverização (Spray Dryer)

Atomizador

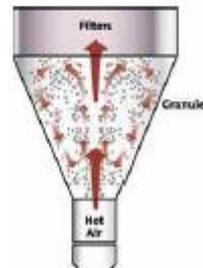


A atomização em pequenas gotas resulta na secagem da substância em poucos segundos com temperatura de entrada do ar de aproximadamente 200 °C.

Secadores de Leito Fluidizado



Várias etapas na secagem em leito fluidizado



As condições de secagem devem ser escolhidas tendo em vista os efeitos que podem ter sobre a qualidade do produto, para além de outros factores fundamentais como a economia do processo ou a comodidade da operação.

A secagem está intimamente relacionada com as características do **ar ambiente**, isto é, da atmosfera envolvente, e depende:

- da temperatura do ar
- do estado higrométrico do ar
- da velocidade de circulação do ar

No conjunto, estas características do ar, irão determinar a circulação da água na estrutura porosa do sólido, a sua evaporação à superfície (secagem propriamente dita) e a sua difusão no ar ambiente.

Caracterização do sistema ar/vapor de água

O ar atmosférico é composto por uma série de gases, como o **oxigénio**, o **azoto**, o **hidrogénio**, o **dióxido de carbono**, etc., que entram na sua composição em percentagens mais ou menos fixas, e pelo **vapor de água**, cuja quantidade no ar é bastante variável.

A higrometria divide o ar atmosférico em 2 únicos componentes:

- **Ar seco (AS)** (constituído por todos os gases, excepto vapor de água) e
- **Vapor de água**

A mistura **Ar seco-vapor de água** designa-se por **Ar húmido**.

Composição padrão para o ar seco

Constituinte	Massa molecular (M_i) [kg/kmol]	Fracção molar (X_i) (%)
Oxigénio - O_2	32,000	20,95
Azoto - N_2	28,016	78,09
Árgon - Ar	39,944	0,93
Dióxido de Carbono - CO_2	44,010	0,03

O ar padrão seco tem uma Massa molecular M_{AS}

$$M_{AS} = \sum_{i=1}^4 M_i X_i \quad M_{AS} = 28.96 \text{ kg/kmol}$$

Massa molecular do vapor de água M_W

$$M_W = 18.02 \text{ kg/kmol}$$

Nas pressões e temperaturas normalmente usadas, o **ar seco contendo vapor de água comporta-se praticamente como um gás ideal** e, portanto segue a equação

$$PV = n \times R \times T$$

onde: **P** é a pressão total da mistura (Pa), **V** é o volume (**m³**) do recipiente que contém a mistura e **n** é o número de moles da mistura, **R** = constante universal dos gases (8,314 kJ/kmol .K; m³ Pa/kg K) e **T** = temperatura absoluta (K)

Se uma mistura de gases ideais ocupa um volume conhecido à temperatura de referência, **a pressão total exercida pela mistura** corresponde à soma das pressões dos constituintes, as quais são chamadas **pressões parciais**

$$P_{total} = P_{AS} + P_W$$

Cada pressão parcial resulta da concentração molecular do constituinte e a pressão exercida é a que corresponde ao número de moles presente ao volume total do sistema.

(P = 101,325 kPa, 1 atm abs, 760 mm Hg, 101,325 kN/m²)

Pressão de Saturação do Vapor de Água

O vapor de água, existente por unidade de volume ou de massa de ar, exerce uma determinada pressão, que se designa por **pressão parcial P_w** (Pa), a qual será tanto maior quanto mais vapor de água existir .

Mas a quantidade de vapor de água que a unidade de ar pode conter é finita, o que significa que acima desse valor o ar já não tem mais capacidade para absorver vapor de água, condensando as quantidades em excesso.

A este valor limite da humidade absoluta atribui-se a designação de ponto de saturação ao qual corresponde uma pressão limite designada por **pressão de saturação P_{wsat}** .

A quantidade de vapor de água que o ar pode conter aumenta à medida que aumenta a temperatura.

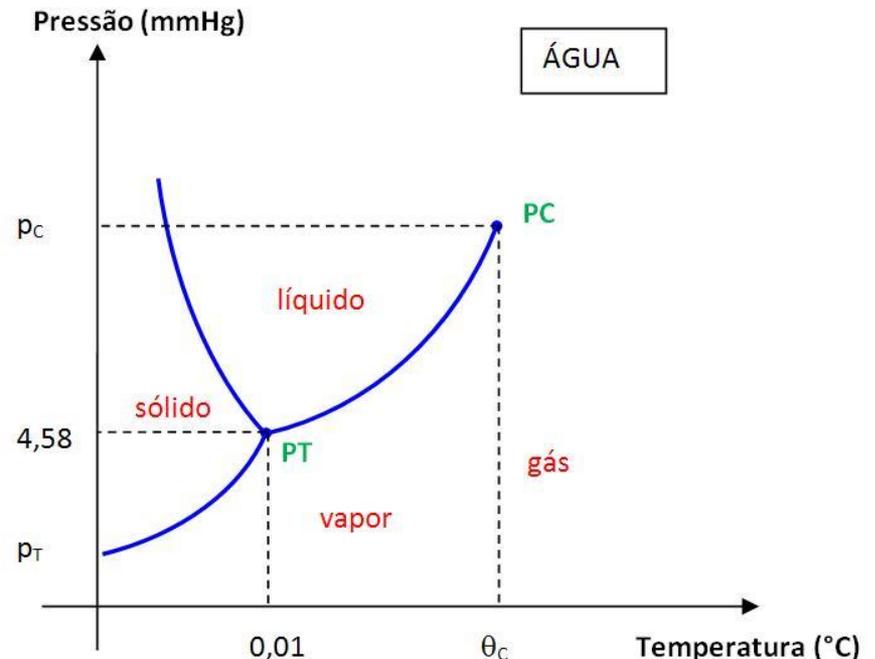
Pressão de Saturação do Vapor de Água

O comportamento do ar húmido depende da temperatura e da quantidade de vapor de água que contem.

A água é uma substância que pode mudar de estado em condições de temperatura e de pressão.

Para um determinado valor de pressão e temperatura, uma partícula de água em equilíbrio termodinâmico encontra-se numa fase bem determinada.

O **diagrama de fases da água indica** a fase em que esta se encontra em função da pressão e da temperatura (P,T). Indica ainda a localização dos pontos de transição de fase (linha). O **ponto triplo da água** corresponde ao único par (P, T) no qual coexiste água nas três fases ($T \approx 0,0098 \text{ } ^\circ\text{C}$; $P = 0,64 \text{ kPa} = 4,8 \text{ mm Hg}$).



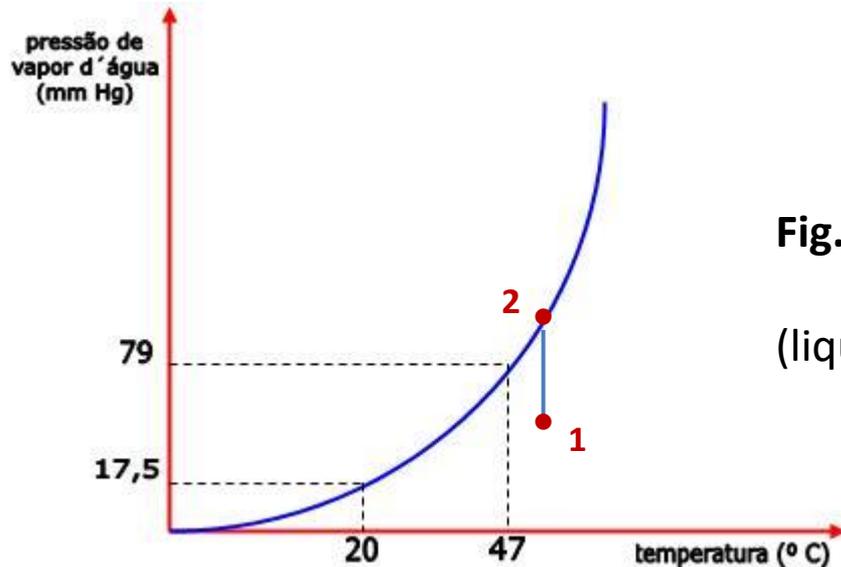


Fig. 2. → extensão da curva **PT-PC** da Fig.1
(líquido e vapor coexistem em equilíbrio)

Para uma determinada temperatura, a pressão de equilíbrio de uma substância pura na fase de vapor (gás) (ponto 1) não pode ser maior que a pressão de saturação (ponto 2); qualquer aumento de pressão acima da pressão de saturação ocorre a condensação do vapor (líquido).

Isto também é válido se a substância é um componente de uma mistura gasosa. Ou seja, a pressão parcial de um componente não pode ser maior do que a pressão de saturação da mistura. Se aumentar a pressão parcial deste componente acima da saturação, ocorrerá a condensação desse componente

A ebulição ocorre quando a pressão de vapor da água iguala a pressão total à superfície da água

Dependendo da **pressão (P)**, **temperatura (T)** e **composição (y)**,
qualquer sistema gás/vapor de água pode encontrar-se :

Saturado ou

Não saturado.

Medidas de Concentração do Vapor de Água no Ar Seco

1. Humidade absoluta (W)

Razão entre a massa de vapor de água (m_W) e a massa de ar seco (m_{AS})

$$W = \frac{m_W}{m_{AS}}$$

A humidade absoluta (W) de uma amostra de ar húmido é o teor de vapor de água existente, ou seja, massa de vapor de água associada com a unidade de massa de gás seco

A humidade depende da pressão parcial de vapor de água no ar P_W e da pressão total P

$$W = \frac{P_W}{P - P_W} \times \frac{M_W}{M_{AS}}$$

P_W – pressão parcial de vapor de água

P – pressão total

M_{AS} – massa molecular do ar seco

M_W – massa molecular do vapor de água

$$W = \frac{P_W}{P - P_W} \times \frac{18}{29}$$

2. Humidade do ar saturado

$$W_{sat} = \frac{P_{WS}}{P - P_{WS}} \times \frac{M_W}{M_{AS}}$$

P_{wS} – pressão de vapor saturado à temperatura T

P_w – pressão parcial de vapor de água à temperatura T

3. Humidade relativa (W_R)

Humidade relativa (W_R) é uma medida de valor percentual da saturação do ar, podendo ser definida por duas maneiras:

1. pela relação entre a massa de vapor de água por unidade de volume do ar (W) a uma dada temperatura, e a massa que teríamos no estado de saturação à mesma temperatura (W_{sat})

$$W_R = \frac{W}{W_{sat}} \times 100$$

2. pela relação entre a **pressão parcial do vapor de água**, a uma dada temperatura, e a **pressão do vapor saturado** à mesma temperatura, expressa em percentagem

$$W_R = \frac{P_w}{P_{WS}} \times 100$$

4. Entalpia

Como o ar húmido é uma mistura de ar seco e de vapor de água, o calor específico da mistura é a soma dos calores específicos dos componentes da mistura.

A entalpia do **ar seco** é dada pela expressão:

$$H_{AS} = c_{p_{AS}} (T - T_{ref})$$

A entalpia tem de ser definida em relação a um ponto de referência. Em psicrometria, a pressão de referência é a pressão atmosférica (101,325 kPa) e a temperatura de referência é 0°C.

A entalpia do vapor de água é dada pela expressão:

$$H_V = \lambda_V + c_{p_V} (T - T_{ref})$$

$$H = H_{AS} + WH_V$$

$$H = c_{p_{AS}} (T - T_{ref}) + W [\lambda_v + c_{p_v} (T - T_{ref})]$$

Calor latente e temperatura de saturação da água

Pressão abs (kPa)	Calor latente vaporização (kJ/kg)	Temperatura de saturação (°C)
1	2485	7
5	2424	33
10	2393	46
20	2358	60
50	2305	81
100	2258	99,6
101,3 (1 atm)	2257	100
110	2251	102
120	2244	105
200	2202	120
500	2109	152

Problema 1

O ar de uma sala está à temperatura de 26,7°C e à pressão de 101,325 kPa contendo vapor de água equivalente a uma pressão parcial de 2,760 kPa.

Calcule: (a) humidade absoluta, W_a , (b) humidade relativa, WR.

$$W_a = \left[\frac{P_w}{P - P_w} \right] \frac{18}{28.9}$$

$$WR = \frac{P_w}{P_{wsat}} \times 100$$

Pressão abs (kPa)	Temperatura de saturação (°C)
1	7
5	33
10	46
20	60
50	81

(1) O ar de uma sala está à temperatura de 26,7 °C e à pressão de 101,325 kPa contendo vapor de água equivalente a uma pressão parcial de 2,760 kPa. Calcule: (a) Humidade absoluta, W_a , (b) humidade relativa, WR.

$$W_a = \left[\frac{P_w}{P - P_w} \right] \frac{18}{28.9} \quad WR = \frac{P_w}{P_{wsat}} \times 100$$

A partir das tabelas de vapor a 26,7 °C a pressão de vapor saturado $P_{wsat} = 4$ kPa

Pressão abs (kPa)	Temperatura de saturação (°C)
1	7
5	33
10	46
20	60
50	81

a)

$$w_a = \left[\frac{2.76}{101.3 - 2.76} \right] \frac{18}{28.9} = 0.01742 \text{ kg de vapor de água /kg de ar seco}$$

b)

$$WR = \frac{2.76}{4} \times 100 = 68.5\%$$

Problema 2

Se a pressão total do ar húmido for de 100 kPa (aproximadamente atmosférica) e se a humidade medida for de $0,03 \text{ kg kg}^{-1}$, calcular a pressão parcial de vapor de água .

Se o ar estiver a $60 \text{ }^\circ\text{C}$, calcular a humidade relativa.

$$W_a = \left[\frac{P_w}{P - P_w} \right] \frac{18}{28.9}$$

$$P_w = 4,6 \text{ kPa}$$

$$WR = \frac{P_w}{P_{wsat}} \times 100$$

$$WR = 4.6 / 20 = 0,23 \quad 23\%$$

Pressão abs (kPa)	Temperatura de saturação ($^\circ\text{C}$)
1	7
5	33
10	46
20	60
50	81
100	99,6

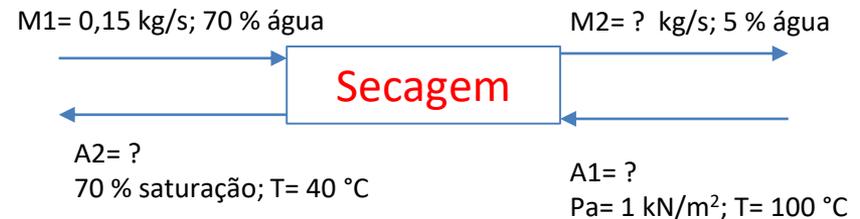
Problema 3

Pretende-se secar 0,15 kg/s de um material com 70 % de humidade, num secador em contra-corrente, de forma a que o produto final tenha 5% de humidade (ambos os valores na base húmida). A secagem é efectuada por ar aquecido a 373 K, e contendo vapor de água equivalente a uma pressão parcial de 1,0 kN/m². O ar sai do secador a 313 K e com 70 % de saturação. Calcule a quantidade de ar necessária para retirar a humidade. A pressão de saturação de vapor da água a 313 K pode considerar-se igual a 7,4 kN/m².

$$W = \left[\frac{P_w}{P - P_w} \right] \frac{18}{28.9}$$

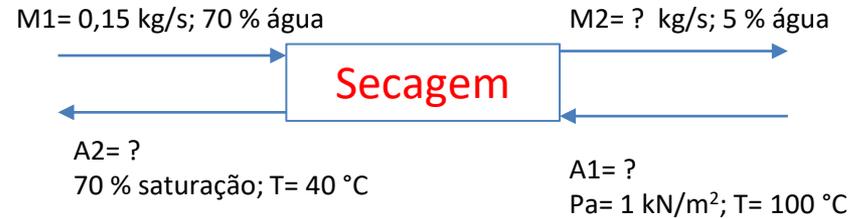
$$W_R = \frac{P_w}{P_{wsat}}$$

pressão total 101,3 kN/m²



Resolução:

Balanço de massas do material húmido:



W = água removida do material para o ar de secagem; $M_1 = 0,15 \text{ kg/s}$

$$\left\{ \begin{array}{l} M_1 = M_2 + W \\ 0,70M_1 = 0,05M_2 + W \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} M_2 = 0,15 - W \\ 0,7 \times 0,15 = 0,05M_2 + W \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{-----} \\ 0,105 = 0,05(0,15 - W) + W \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{-----} \\ 0,105 = 0,0075 - 0,05W + W \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} W = 0,1026 \text{ kg/s} \\ M_2 = 0,0474 \text{ kg/s} \end{array} \right.$$

Quantidade de água a remover = $0,1026 \text{ kg/s}$

Resolução:



Ar de entrada a 373 K e $P_w = 1,0 \text{ kN/m}^2$; pressão total $101,3 \text{ kN/m}^2$;

$$W = \left(\frac{1}{101,3 - 1} \right) \frac{18}{28,9} = 0,0062 \text{ kg/kg ar seco}$$

$$W_a = \left[\frac{P_w}{P - P_w} \right] \frac{18}{28,9}$$

Ar de saída a 313 K e 70 % humidade relativa

$$W_R = \frac{P_w}{P_{wsat}} \Rightarrow 0,7 = \frac{P_w}{7,4} \Rightarrow P_w = 5,18 \text{ kN/m}^2$$

$$W = \frac{5,18}{(101,3 - 5,18)} \frac{18}{28,9} = 0,034 \frac{\text{kg água}}{\text{kg ar seco}}$$

Resolução:

$$W_{A1} = 0,0062 \text{ kg/kg ar seco}$$

$$W_{A2} = 0,034 \text{ kg/kg ar seco}$$

O aumento de humidade é $(0,034 - 0,0062) = 0,0278$ kg água/kg de ar seco, e esta quantidade tem que corresponder à água retirada, 0,1026 kg/s

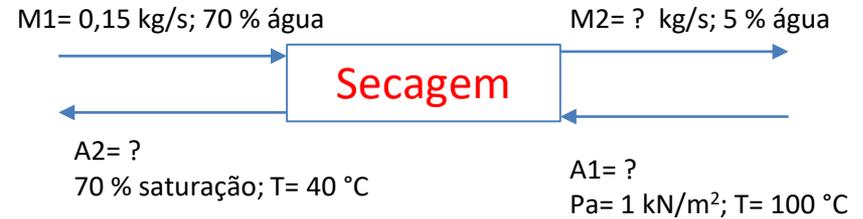
Designando por m kg/s, o caudal em massa do ar seco

$$m = \frac{0,1026}{0,0278} = 3,69 \text{ kg/s}$$

Caudal de ar $A_1 = (1 + 0,0062) 3,69 = 3,703$ kg ar húmido/s

Caudal de ar $A_2 = (1 + 0,034) 3,69 = 3,815$ kg ar húmido/s

Quantidade de água a remover = 0,1125 kg/s



Problema 4

Um alimento com 80% de humidade é seco a 100 °C até aos 10% de humidade. Se a temperatura inicial do alimento for de 21 °C, calcular a quantidade de energia requerida por unidade de massa do material original . A secagem é realizada à pressão atmosférica.

Calor específico do alimento = 3,8 kJ/kg K

Calor específico da água = 4,186 kJ/kg K

Calor latente de vaporização da água a 100 °C = 2257 kJ/kg



$$\begin{cases} M_1 = M_2 + W \\ 0,8M_1 = 0,1M_2 + W \end{cases}$$

$$\begin{cases} 1 = M_2 + W \\ 0,8 = 0,1M_2 + W \end{cases}$$

$$\begin{cases} \underline{\hspace{2cm}} \\ 0,8 = 0,1 - 0,1W + W \end{cases}$$

$$\begin{cases} M_2 = 0,222 \text{ kg} \\ W = 0,778 \text{ kg} \end{cases}$$

Resolução:

Um alimento com 80% de humidade é seco a 100 °C até aos 10 % de humidade. Se a temperatura inicial do alimento for de 21°C, calcular a quantidade de energia requerida por unidade de massa do material original . A secagem é realizada a pressão atmosférica.

Calor específico do alimento = 3,8 kJ/kg K

Calor específico da água = 4,186 kJ/kg K

Calor latente de vaporização da água a 100 °C = 2257 kJ/kg

Água removida = 0,778 kg.

Energia requerida

Calor sensível para aquecer o material até 100°C + calor latente para remover a água:

$$Q = m \times c_p \Delta T + W h_{fg}$$

$$Q = 1 \times 3,8 \times (100 - 21) + 0,778 \times 2257 = 2056 \text{ kJ.}$$

Energia/ kg de água removida

São necessários 2056 kJ para remover 0,778 kg de água,

$$2056/0,778 = 2649,5 \text{ kJ.}$$

Problema 5

Um secador rotativo em contracorrente é alimentado com 1,5 kg/s de um material com 5% de humidade e descarrega-o com 0,2% de humidade. O ar entra a 405 K e sai a 355 K, sendo a humidade à entrada 0,007 kg de vapor de água/kg de ar seco. O material entra a 294K e sai a 339 K. Calcule a massa de ar seco que passa pelo secador e a humidade do ar à saída.

Calor latente da água a 294K = 2450 kJ/kg

Calor específico do material = 1,88 kJ/kg K

Calor específico do ar seco = 0,99 kJ/kg K

Calor específico do vapor de água = 2,01 kJ/kg K

Calor específico da água = 4,18 kJ/kg K

Resolução:

Água evaporada = 0,07215 kg/s (Balanço de Massa)

P=1,425 kg/s

Calor gasto no aquecimento do material a secar (calor sensível):

$$Q_{\text{sens.}} = 1,5 \times 1,88 (339-294) = 127 \text{ kJ/s}$$

Calor gasto na evaporação da água:

$$Q_{\text{lat vap}} = 0,0725 \times 2450 = 177,4 \text{ kJ/s}$$

Calor total:

$$Q = 127 + 177,4 = 304,4 \text{ kJ/s (fornecido pelo ar que entra a 405 K e sai a 355 K)}$$

Calor específico do ar seco = 0,99 kJ/kg K

$$Q_{\text{sens Ar seco}} = m \times 0,99 (405-355) = 49,5 m \text{ kW}$$

$$\text{Quantidade de calor gasto} = Q_{\text{sens Ar seco}} = 304,4 \text{ kJ/s} = 49,5 m$$

$$m = 304,4/49,5 \Rightarrow m = 6,15 \text{ kg/s (ar seco)}$$

Resolução:

$$m = 304,4/49,5 \Rightarrow m = 6,15 \text{ kg/s (ar seco)}$$

A humidade do ar à saída?

Ar à entrada do secador:

0,007 kg de vapor de água/kg de ar seco

$$\text{Água total no ar à entrada} = m \times 0,007 = 6,15 \times 0,007 = 0,043 \text{ kg água/s}$$

Saída do secador:

$$\text{Água inicial do ar} + 0,07215 \text{ kg/s} = 0,043 + 0,07215 = 0,115 \text{ kg água/s}$$

$$\text{Humidade do ar à saída} = 0,115/6,15 = 0,0187 \text{ kg/kg de ar seco.}$$

Problema 6

Um secador é alimentado com 0,3 kg/s de um material húmido. Durante a secagem a perda de massa foi de 35%. O material entra e sai do secador a 324 K. A temperatura do ar desce de 341 K para 310 K, enquanto a humidade sobe de 0,01 para 0,02 kg/kg ar seco. Calcule as perdas de calor para o ambiente.

Calor latente da água – 2430 kJ/kg

Calor específico do ar seco – 0,99 kJ/kg K

Calor específico do vapor de água – 2,01 kJ/kg K

Água evaporada = $0,35 \times 0,3 = 0,105$ kg/s

Resolução:

A carga húmida é 0,3 kg/s e a água removida é 35% da massa inicial
 $(0,3 \times 35/100) = 0,105 \text{ kg/s}$

Seja m (kg/s) o caudal de ar seco e como o aumento de humidade é
 $(0,02 - 0,01) = 0,01 \text{ kg água/kg ar seco}$

$m \text{ água evaporada} / m \text{ água ganha por kg de ar seco} = m \text{ ar seco}$

$$m \text{ ar seco} = 0,105 / 0,01 = 10,5 \text{ kg/s (ar seco)}$$

Calor perdido pelo ar durante a secagem

$$[(10,5 \times 0,99) + (0,02 \times 10,5 \times 2,01)] \times (341 - 310) = 335 \text{ kW}$$

(ar seco) (água presente no ar)

Calor que sai na água evaporada (calor latente de vaporização)

$$0,105 \times 2430 = 255 \text{ kW}$$

Fazendo o balanço entálpico:

$$Q_{\text{perdido pelo ar}} - Q_{\text{consumido na evap água}} = 335 - 255 = 80 \text{ kW}$$