

# Secagem



**Secagem:** Separação de líquidos voláteis de materiais sólidos pela vaporização do líquido e remoção do vapor

Meio para manufaturar produtos que influencia diretamente as suas qualidades.

O líquido removido é geralmente a água mas pode ser qualquer outro solvente ou mistura de solventes.

O sólido a ser seco pode ser um produto natural, como a madeira, ou um produto semi-acabado ou acabado (papel, por exemplo).

A vaporização de líquidos requer calor, por isso a secagem pode ser considerada como um processo de separação térmica.

O produto a ser seco é denominado **sólido úmido**, ou apenas sólido, e a substância que transfere o calor necessário é chamado de **agente secante**. Esta substância pode ser o ar, um gás inerte ou vapor superaquecido.

O **conteúdo de umidade** é denominada pela letra X e é medida em kg de líquido por kg de sólido seco.

A **umidade de agentes secantes gasosos** é denominada por Y e é dada em kg de vapor por kg de gás seco. A umidade de saturação é denominada  $Y^*$ .

O fluxo de massa do vapor que deixa a superfície do sólido por unidade de tempo é chamada **velocidade de secagem** e é denominada por

$$\dot{m} \quad (\text{em kg m}^{-2}\text{s}^{-1})$$

A velocidade de secagem é geralmente determinada pela medida da mudança de umidade com o tempo  $dX/dt$ .

$$\dot{m} = - \frac{M_s}{A} \frac{dX}{dt}$$

$M_s$  é a massa do sólido seco

$A$  é a porção da área superficial que está em contato com o agente secante.

A velocidade de secagem depende do conteúdo de umidade  $X$  e das condições de secagem (pressão do ar, temperatura, umidade, temperatura da superfície aquecida...)

A relação entre velocidade de secagem e conteúdo de umidade é chamada de **curva de velocidade de secagem**.

## Calor Requerido para a Vaporização

A energia que deve ser fornecida para a vaporização da água dependerá da sua temperatura. A quantidade de energia necessária para vaporizar a água em determinadas condições pode ser calculada a partir do valor do calor latente de vaporização.

## EXEMPLO

Uma alimentação com umidade inicial de 80% deve ser seco a 100 °C até atingir uma umidade de 10%. Se a temperatura inicial da alimentação é de 21 °C, calcule a quantidade de energia requerida por unidade de massa do material original, para a secagem a pressão atmosférica.

- O calor latente de vaporização da água a 100 °C e a pressão atmosférica é de 2257kJ kg<sup>-1</sup>.
- O calor específico da alimentação é de 3,8 kJ kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup> e para a água é de 4,186 kJ kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>.
- Encontre também a energia requerida / kg de água removida.

Base de cálculo: 1 kg alimentação

Umidade inicial = 80%

800 g umidade estão associados a 200 g matéria seca.

Umidade Final = 10 %,

100 g umidade estão associados a 900 g matéria seca,

$$\frac{100 \text{ g umidade}}{900 \text{ g mat seca}} \cdot 200 \text{ g matéria seca} = 22,2 \text{ g umidade}$$

Assim, 1 kg da alimentação original deve perder  $(800 - 22) \text{ g umidade} = 778 \text{ g} = 0,778 \text{ kg umidade}$ .

Energia requerida para 1 kg original material

$Q =$  energia para elevar a temperatura até  $100^{\circ}\text{C}$  + calor latente para remover a água

$$Q = 1 \text{ kg } (100 - 21)^{\circ}\text{C} \times 3,8 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} + 0,778 \text{ kg} \times 2257 \text{ kJ kg}^{-1}$$

$$Q = 300,2 \text{ kJ} + 1755,9 \text{ kJ}$$

$$Q = 2056 \text{ kJ}$$

Energia/kg água removida, quando 2056 kJ são requeridos para remover 0,778 kg de água,

$$Q = 2056/0,778 \text{ kJ kg}^{-1}$$

$$Q = 2643 \text{ kJ kg}^{-1}$$



## EXEMPLO

Usando o mesmo material que no exemplo anterior, uma operação de secagem a vácuo deve ser feita a 60 °C sob uma pressão de saturação correspondente de 20 kPa abs ( ou um vácuo de 81,45 kPa). Calcule a energia térmica necessária para remover a umidade por unidade de massa do material original.

Energia requerida por kg do material

$Q = \text{energia para elevar a temperatura até } 60^{\circ}\text{C} + \text{calor latente para remover a água a } 20 \text{ kPa}$

$$Q = 1 \text{ kg } (60 - 21)^{\circ}\text{C} \times 3.8 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} + 0,778 \text{ kg} \times 2358 \text{ kJ kg}^{-1}$$

$$Q = 148,2 \text{ kJ kg}^{-1} + 1834,5 \text{ kJ kg}^{-1}$$

$$Q = 1983 \text{ kJ kg}^{-1}$$

## CALOR LATENTE E TEMPERATURA DE SATURAÇÃO DA ÁGUA

Absolute Pressure (kPa)	Latent heat of Saturation (kJkg <sup>-1</sup> )	Vaporization temperature (°C)
1	2485	7
2	2460	18
5	2424	33
10	2393	46
20	2358	60
50	2305	81
100	2258	99.6
101.35(1atm)	2257	100
110	2251	102
120	2244	105
200	2202	120
500	2109	152

# Características dos sólidos úmidos

Duas características dos sólidos úmidos têm influência direta na velocidade de secagem. As questões correspondentes são:

- 1) O líquido está livre no sólido para se mover ou está ligado ao sólido por adsorção ?
- 2) A evaporação ocorre na superfície ou no interior do sólido ?

A primeira característica é descrita pelo equilíbrio termodinâmico (isoterma de adsorção) e a segunda pela cinética de transporte no interior do sólido (capilaridade, difusão)

Se a água livre está em contato e em equilíbrio com o seu vapor então a pressão de vapor é igual a pressão de saturação na respectiva temperatura  $P_v^*(T)$ .

Na presença de um gás inerte (ar, por exemplo) a pressão total na superfície do líquido é igual a soma da pressão de saturação  $P_v^*$  e a pressão parcial do gás inerte  $P_g$

$$P = P_v^*(T) + P_g$$

A razão entre a pressão parcial e a pressão total é igual a respectiva fração molar:

$$\tilde{y}_g = \frac{N_g}{N_v + N_g} = \frac{P_g}{P}$$

$$\tilde{y}_v^*(T) = \frac{N_v}{N_v + N_g} = \frac{P_v^*}{P}$$

O número de mols  $N$  (expresso em kmol) está relacionado com a massa do respectivo componente  $M$  (expresso em kg) pela massa molar (em kg/kmol) (18.01 kg/kmol para a água e 28.96 kg/kmol para o ar)

$$M_v = N_v \tilde{M}_v$$

$$M_g = N_g \tilde{M}_g$$

A partir das equações anteriores a umidade de saturação pode ser obtida:

$$Y^*(T) = \frac{\tilde{M}_v}{\tilde{M}_g} \frac{P_v^*(T)}{P - P_v^*(T)}$$

A umidade do gás insaturado é dada por:

$$Y = \frac{\tilde{M}_v}{\tilde{M}_g} \frac{\phi P_v^*(T)}{P - \phi P_v^*(T)}$$

onde  $\phi$  é a umidade relativa e é dada por:

$$\phi = P_v / P_v^*(T)$$

$Y_{eq}$ : umidade do ar sob condições de equilíbrio termodinâmico

$X_{eq}$ : conteúdo de umidade

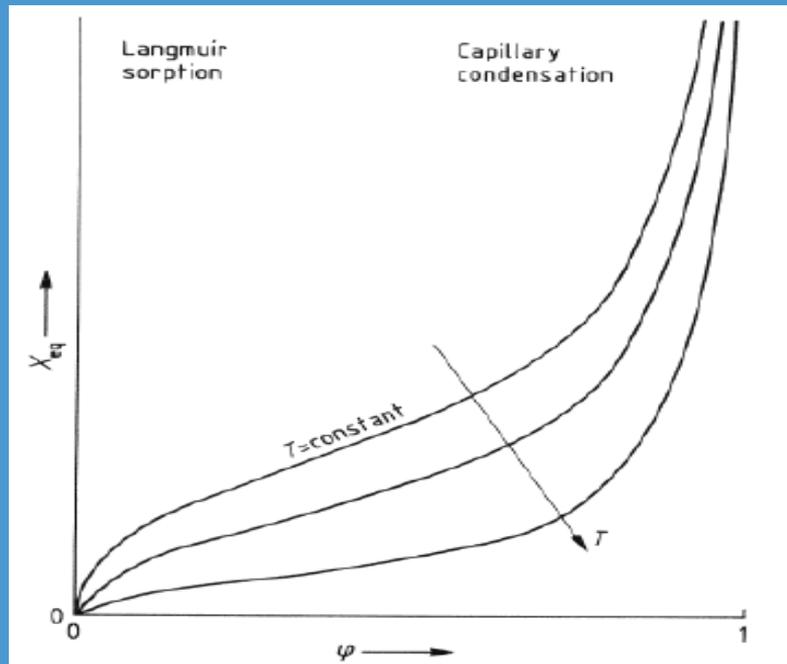
$$Y_{eq} = f(T, X_{eq}).$$

A pressão parcial do vapor na mistura gás-vapor ( $P_{v,eq}$ ) é sempre menor que a pressão de vapor de saturação  $P_v^*(T)$ .

A diminuição da pressão de vapor na superfície do material com alto conteúdo de umidade está associado com o fenômeno chamado Condensação Capilar.

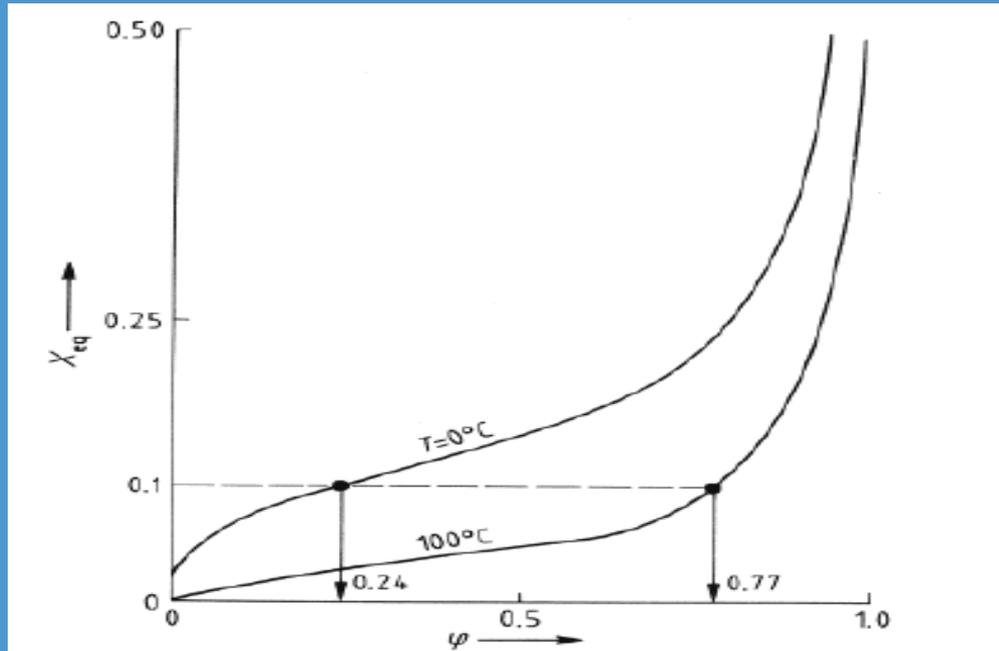
Com um baixo conteúdo de umidade (limite  $X \rightarrow 0$ ) a atração intermolecular entre o fluido e o sólido tem um papel fundamental. Fala-se então de adsorção de Langmuir.

O conteúdo de umidade no equilíbrio de um sólido  $X_{eq}$  é descrita como uma função da umidade relativa do ar  $\phi$  a várias temperaturas. Estas curvas são chamadas de isotermas de adsorção.

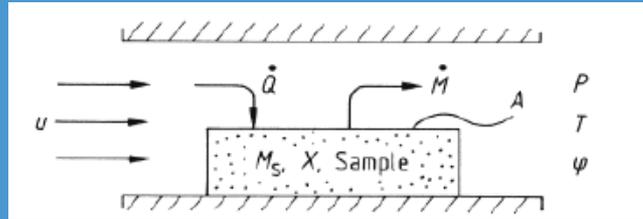


**Exemplo:** Isoterma de adsorção para batatas:

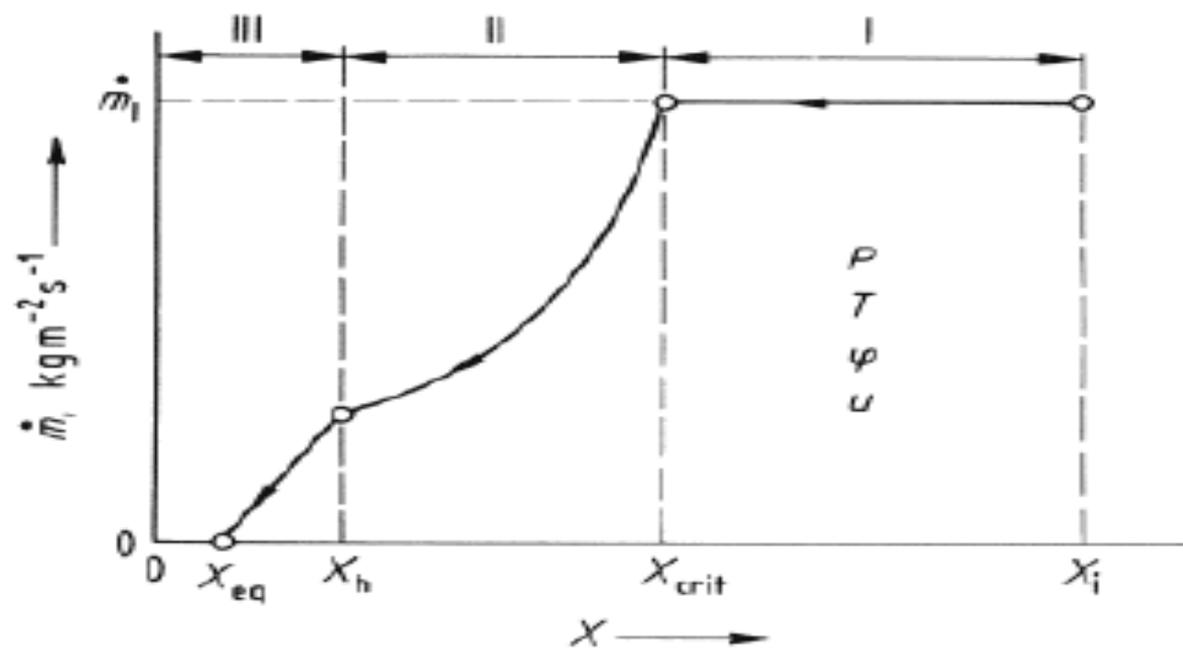
Para secar batatas até uma umidade residual  $X_{eq}=0,10$ , por exemplo, ar frio a  $T=0^{\circ}\text{C}$  e baixa umidade relativa  $\phi=0,24$ , ou ar quente com  $T=100^{\circ}\text{C}$  e alta umidade relativa  $\phi=0,77$  podem ser usados.



## Curvas de velocidade para secagem por convecção

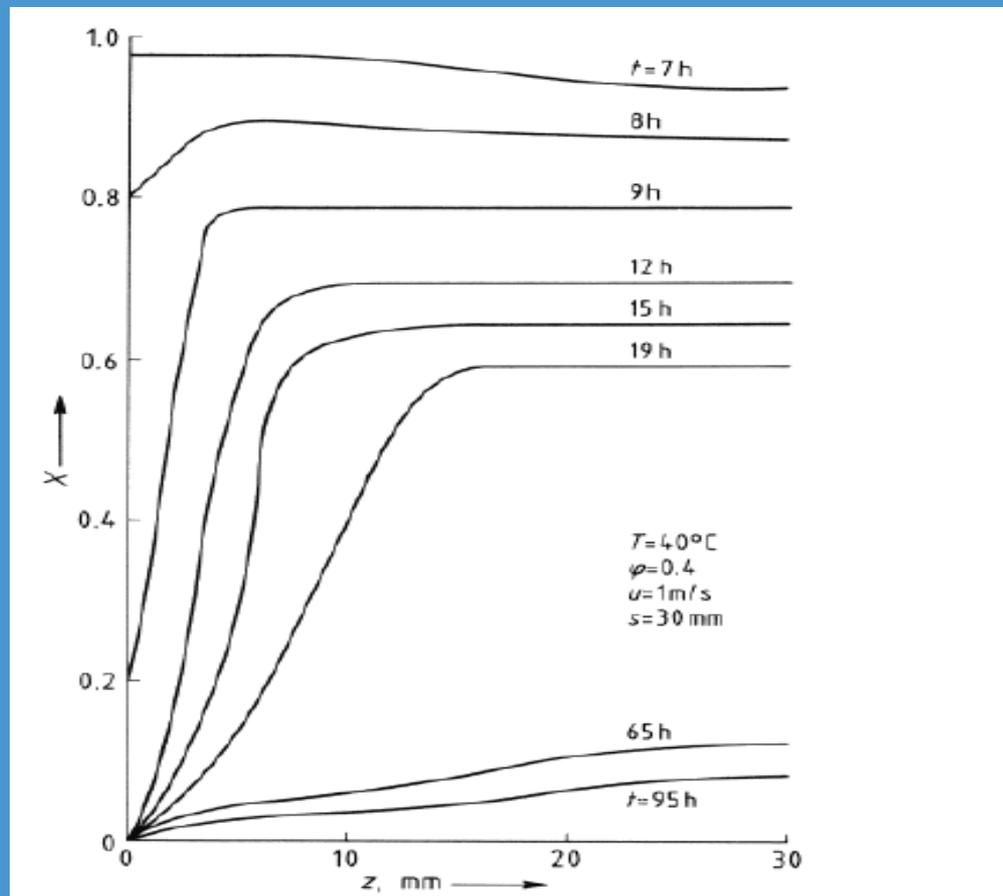


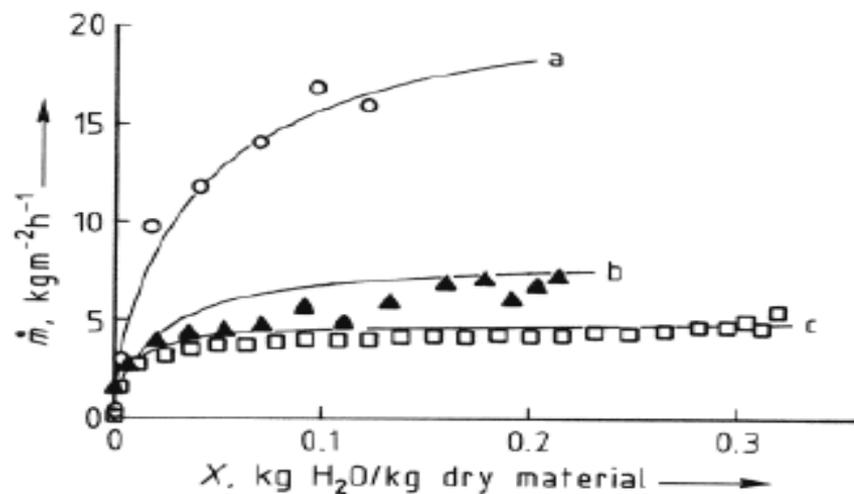
$$\dot{m} = -\frac{1}{A} \frac{\Delta M}{\Delta t} = -\frac{M_s}{A} \frac{\Delta X}{\Delta t}$$











Drying rate curves for nonhygroscopic, vacuum-dried aluminum silicate particles  
 Conditions:  $P=2.63$  kPa,  $T_w=80$  °C, and mixer speed = 45 rpm  
 a)  $d=0.83$  mm; b)  $d=3.25$  mm; c)  $d=6.60$  mm

# Métodos de secagem e tipos de secadores

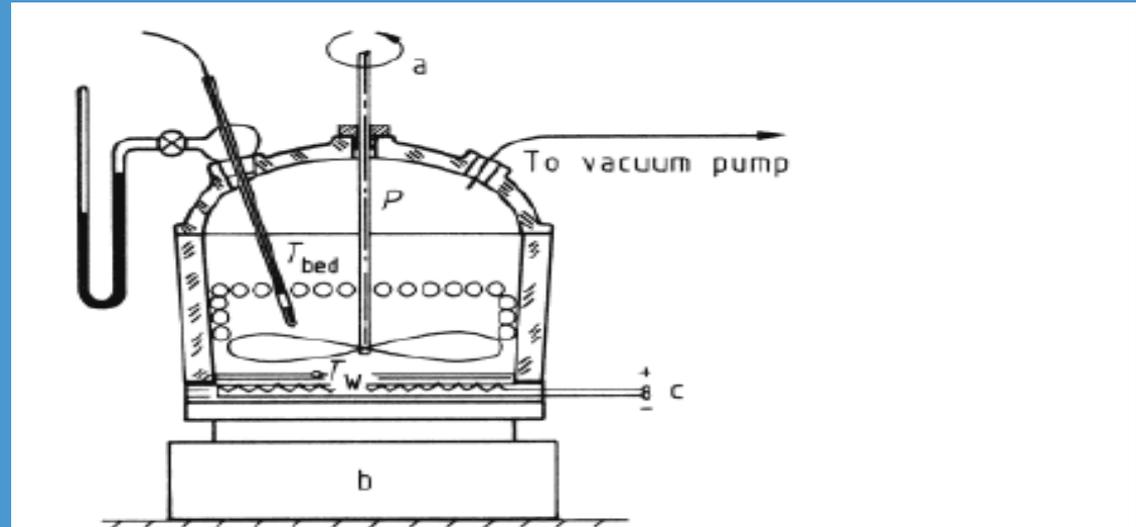


# Secagem por contato

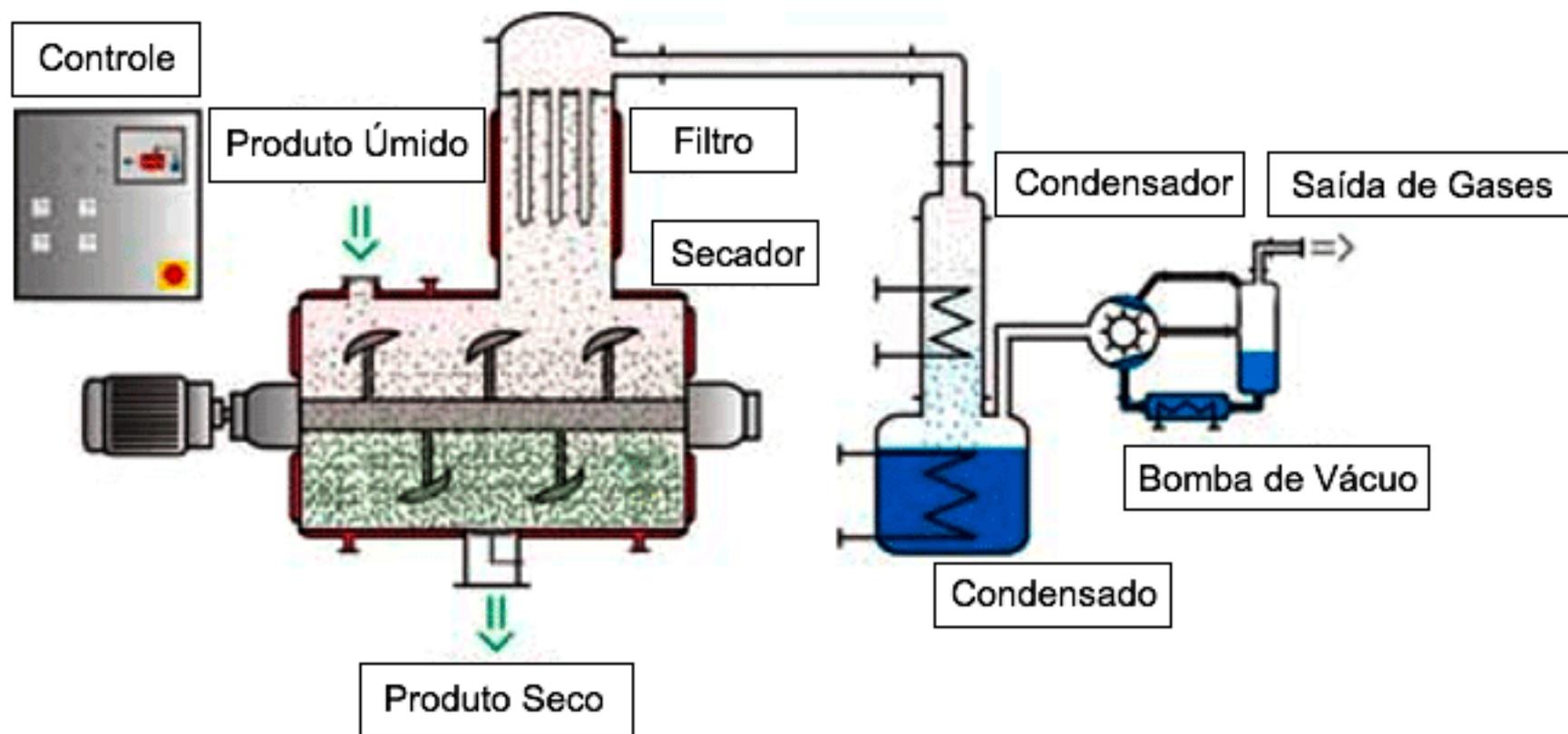
O calor necessário para a vaporização é transferido pelo contato direto do sólido úmido com uma superfície aquecida

O processo de secagem pode ocorrer mesmo em uma atmosfera contendo apenas o vapor do líquido

Exemplo: Secadores a vácuo



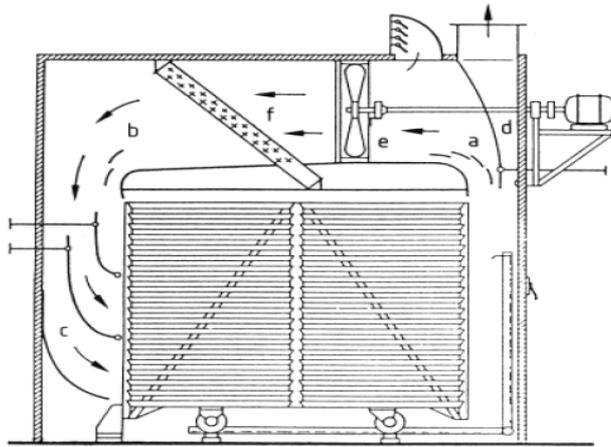
Laboratory tray dryer to determine the drying rate during contact drying  
a) Mixer; b) Balance; c) Heater



# 1. Secagem por convecção

## 1.1 Fluxo de gás

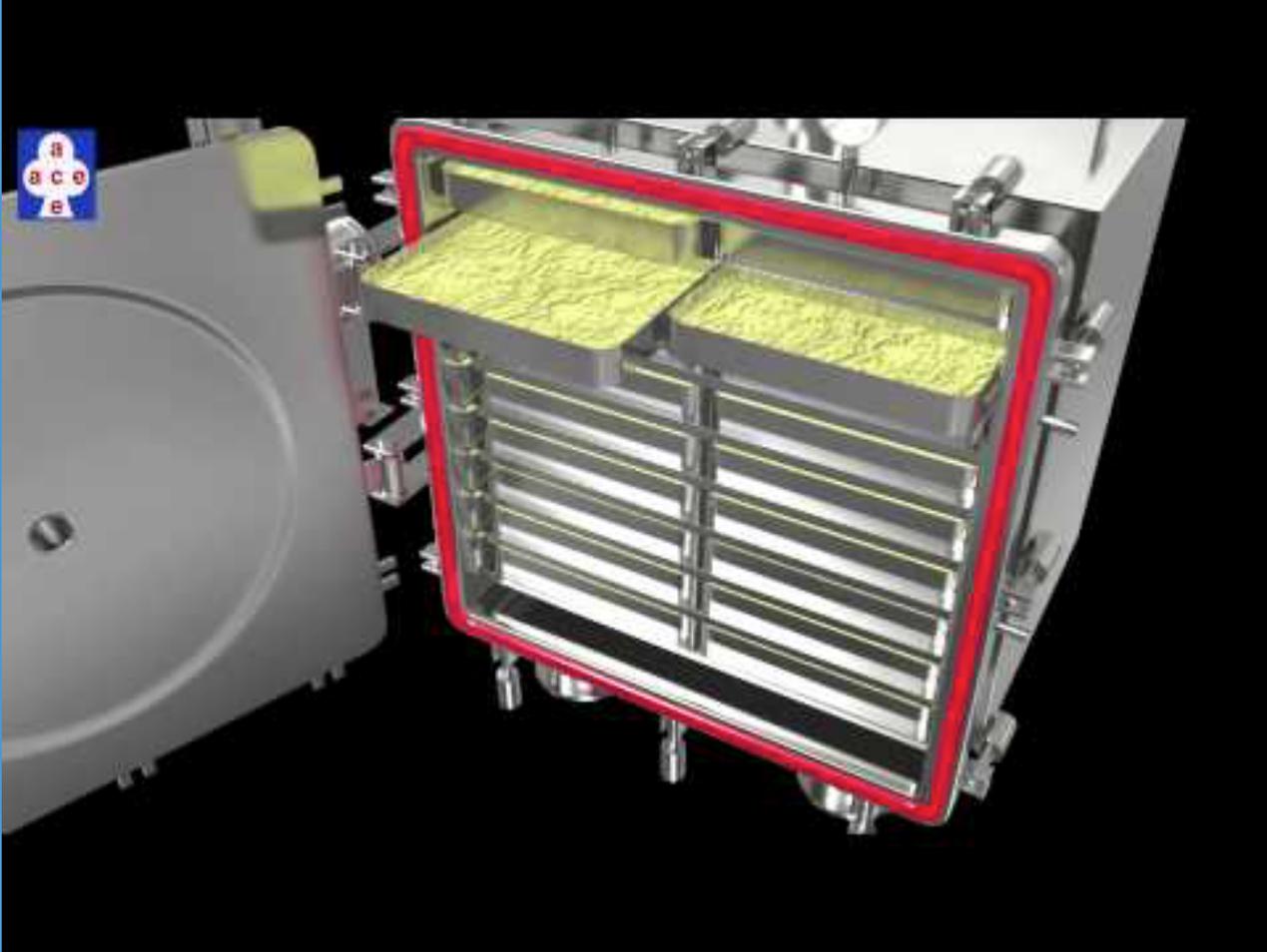
Forno Para pequenas quantidades de sólidos úmidos, o mais simples e barato secados é um forno com circulação de ar forçada.



Compartment dryer (Courtesy of Babcock BSH)

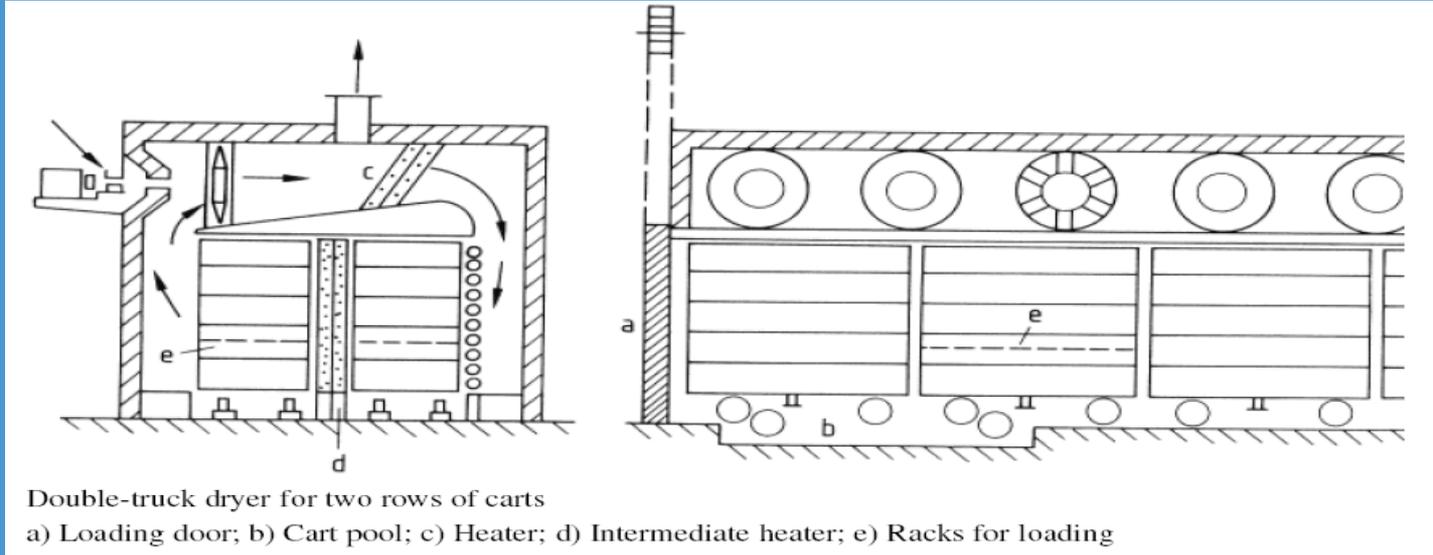
a)–c) Turning vanes; d) Air-exhaust duct with damper; e) Fan; f) Heaters



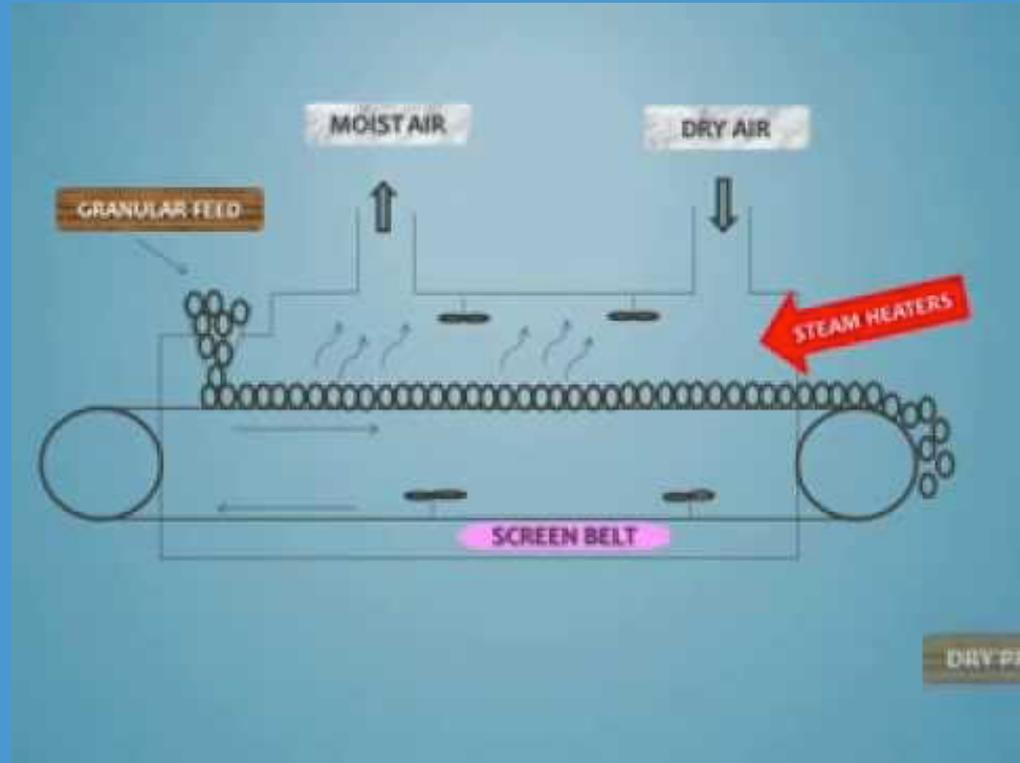
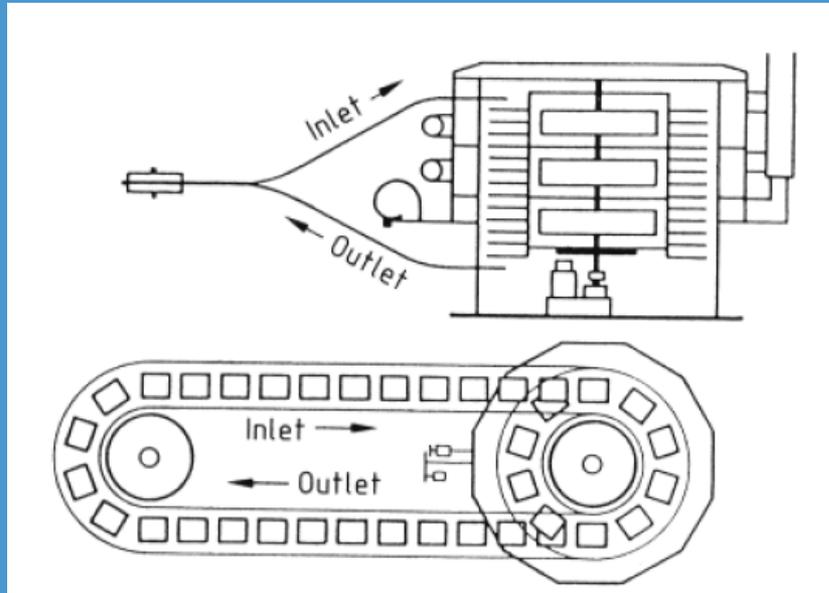




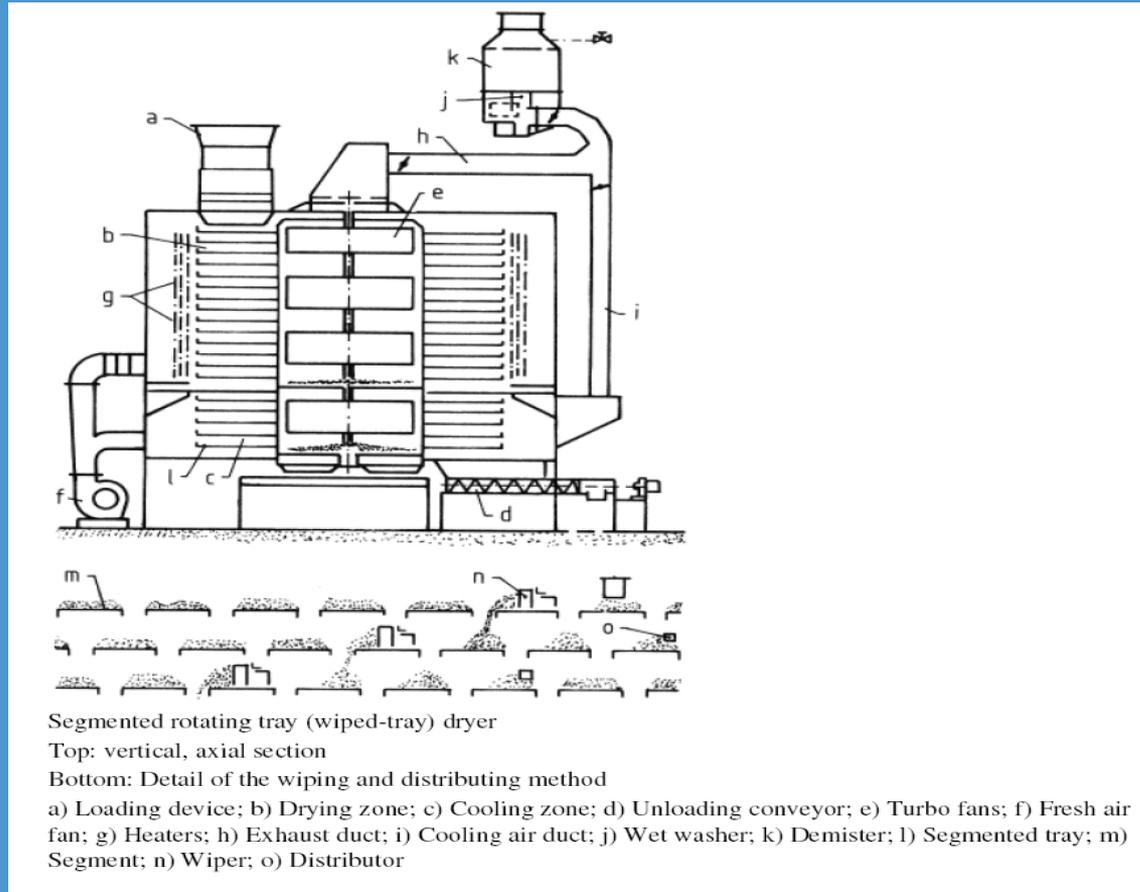
## Secadores tipo Túneis



# Secador do tipo Correia

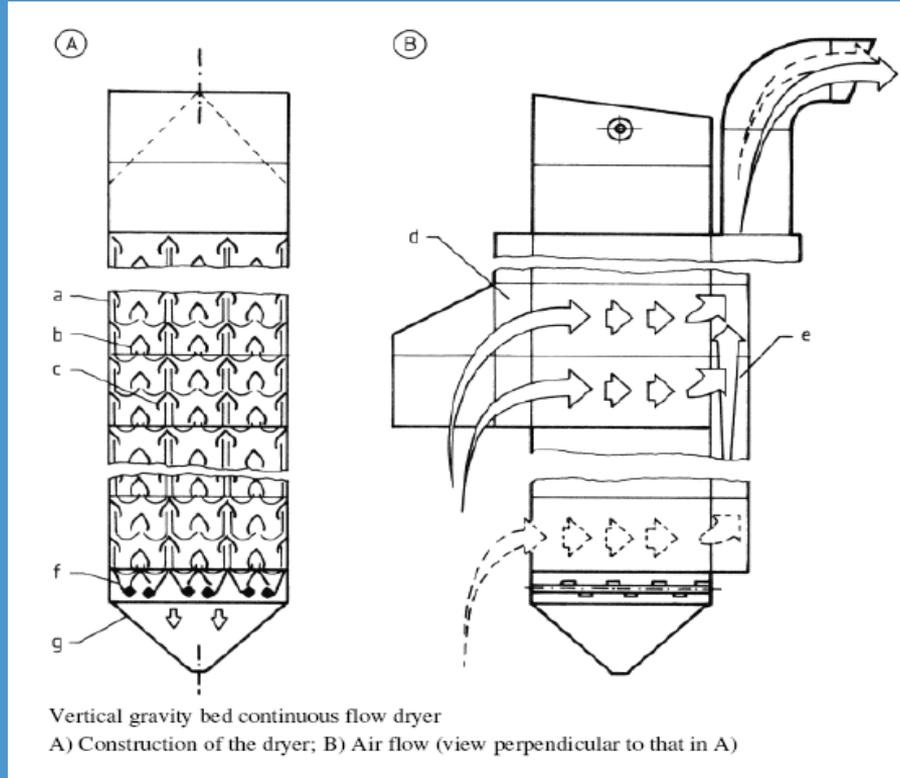


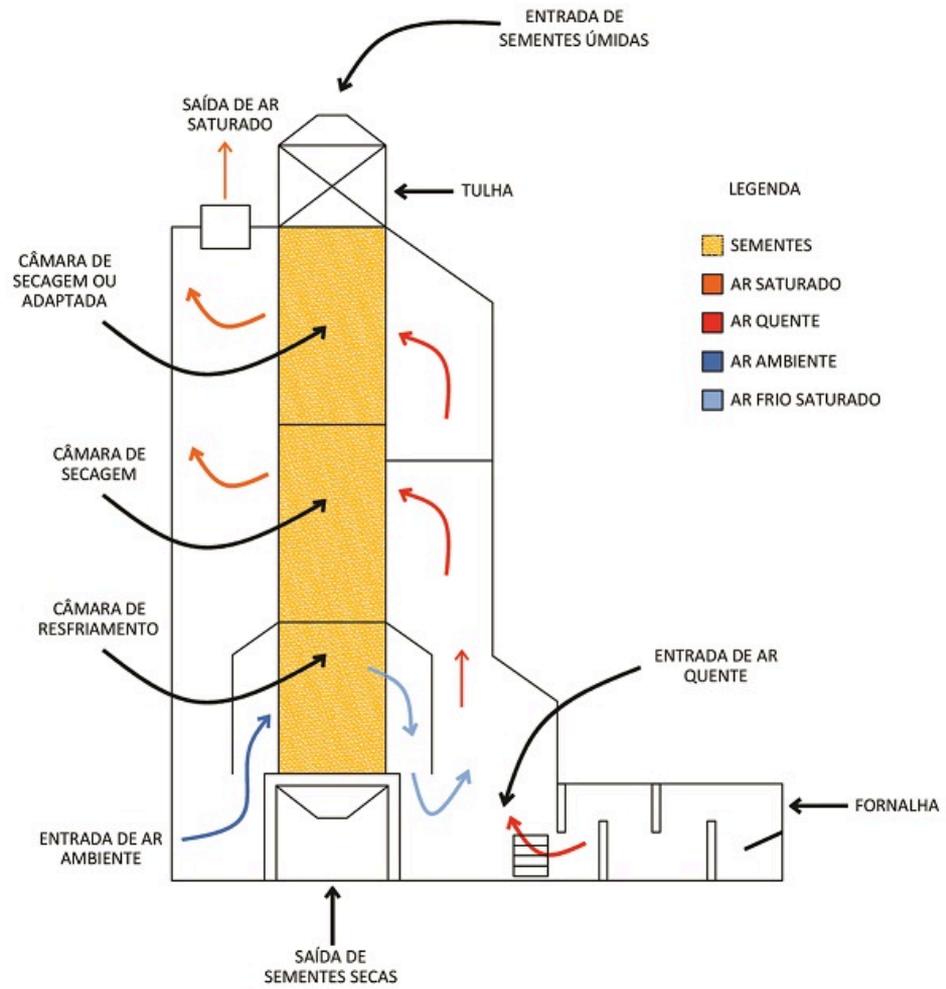
## Secador de bandejas rotatórias

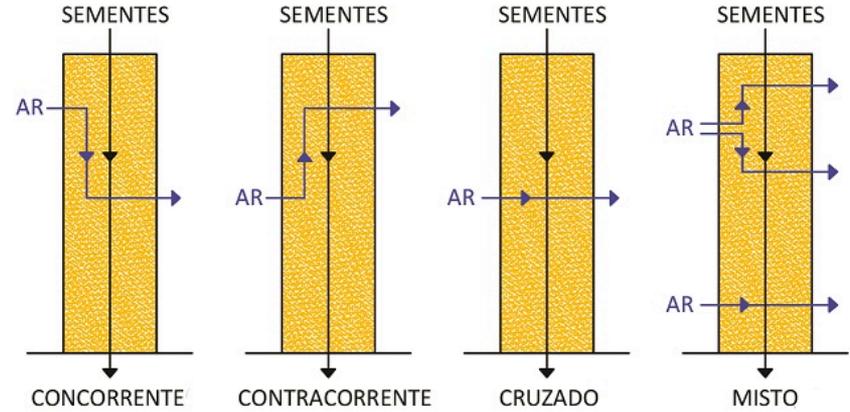
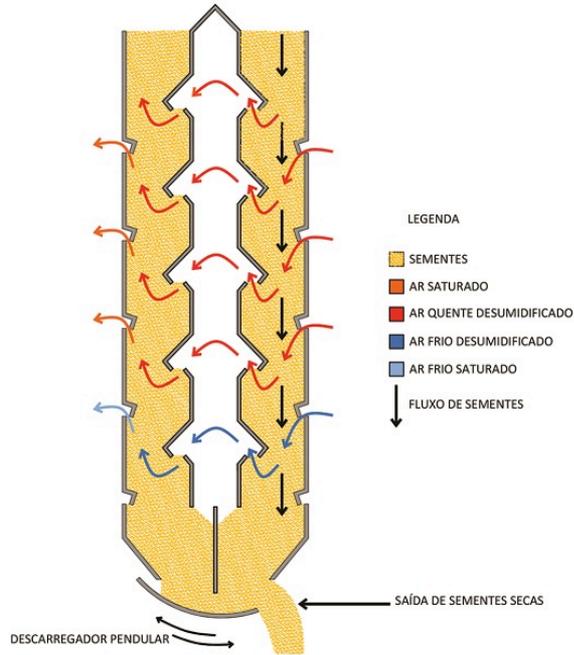


## 1.2. Sólido aerado

Secador com circulação através em batelada

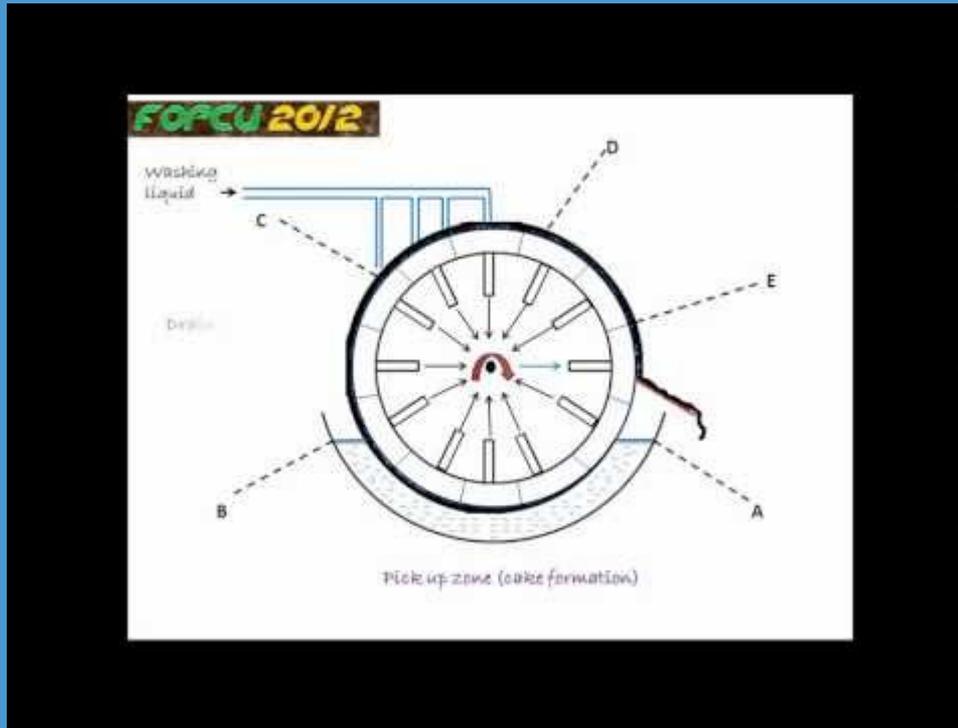




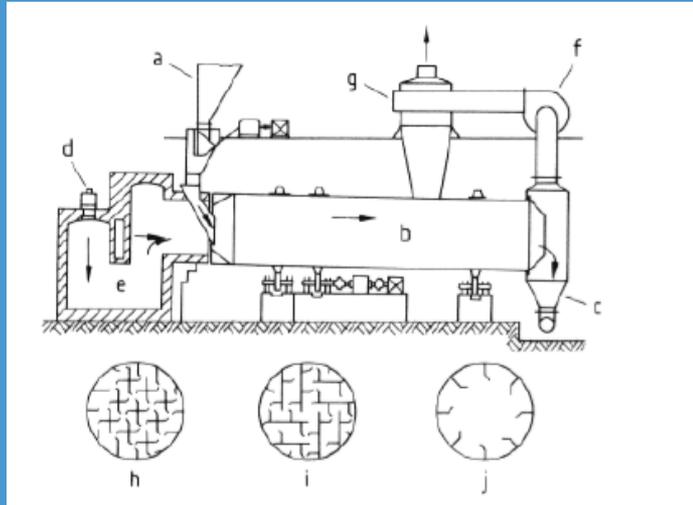


## Secadores de tambores perfurados

Este tipo de equipamento é usado para secar sólidos que podem formar camadas porosas ou superfícies curvas como fibras de celulose, madeira e algodão.



## Secadores de tambor rotativo



### Heat supply

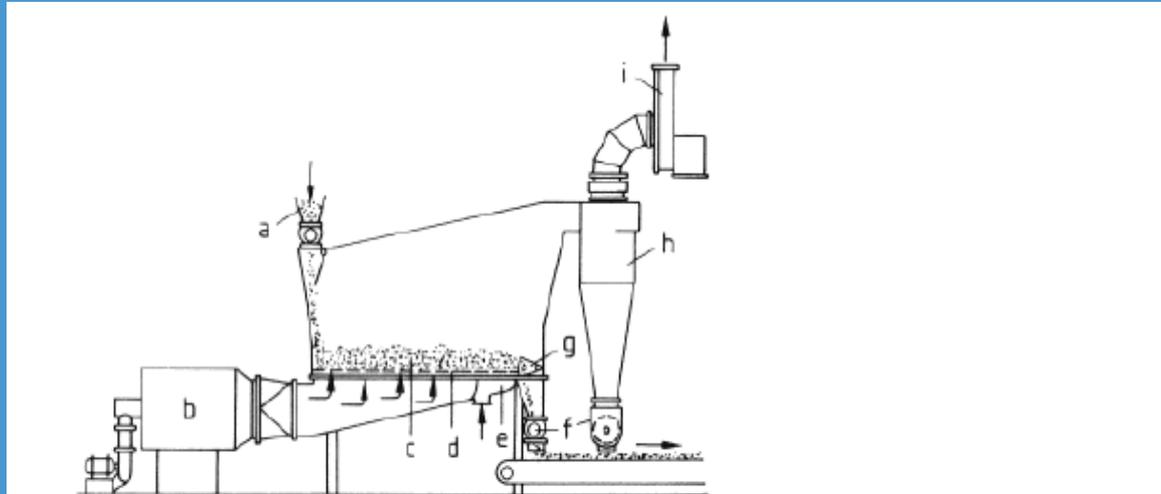
**Direct heating dryer**  
- Gas stream made up of mixture of air and combustion gases from a burner

**Indirect heating dryer**  
- Heat supplied through the shell wall by a hot flue flowing outside

A black and white photograph showing two large industrial rotary drum dryers in a factory setting. The drums are long and cylindrical, supported by a metal frame. The background shows other industrial equipment and a concrete floor.

## Secador de leito fluidizado

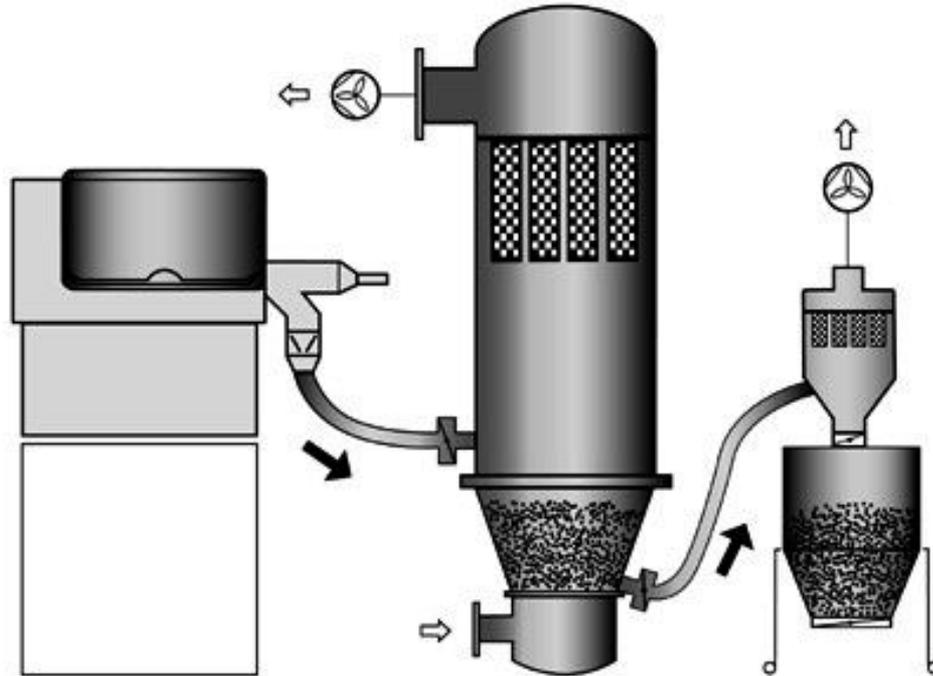
O sólido move-se em uma queda e o agente secante flui verticalmente através de uma base perfurada para fluidizar o sólido. Estes equipamentos podem operar continuamente.



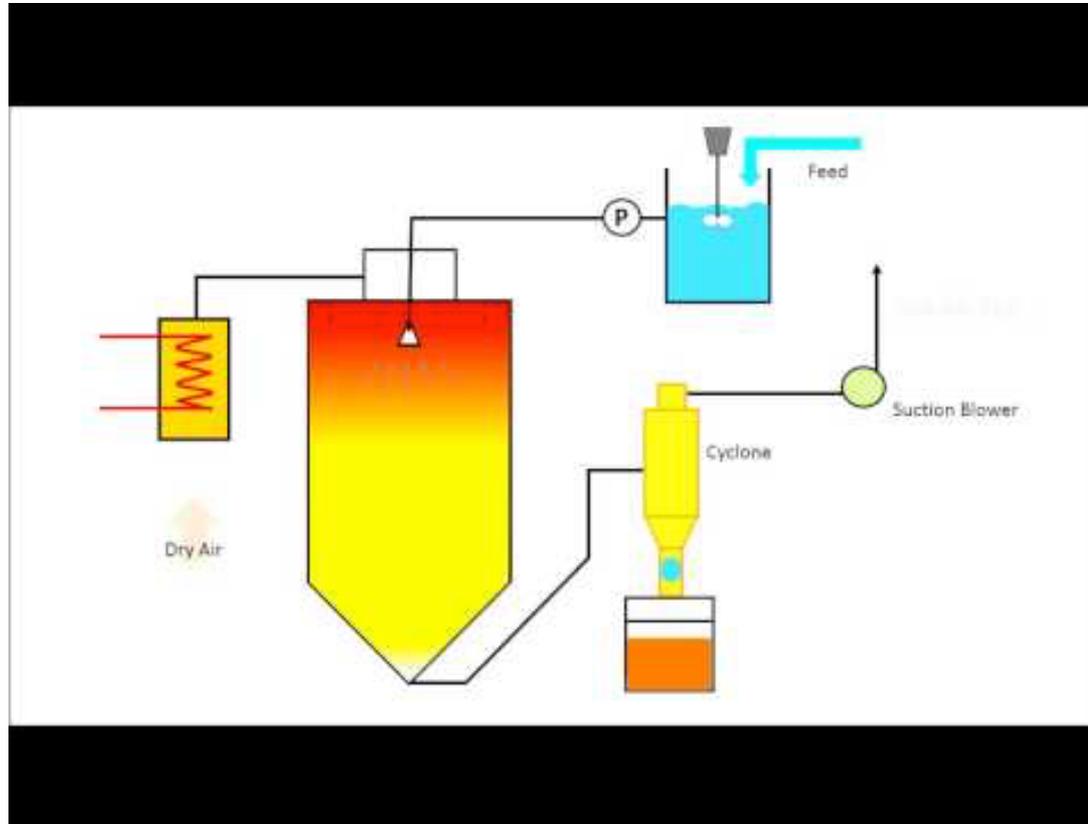
Fluidized bed dryer (Courtesy of Büttner-Schilde-Haas)

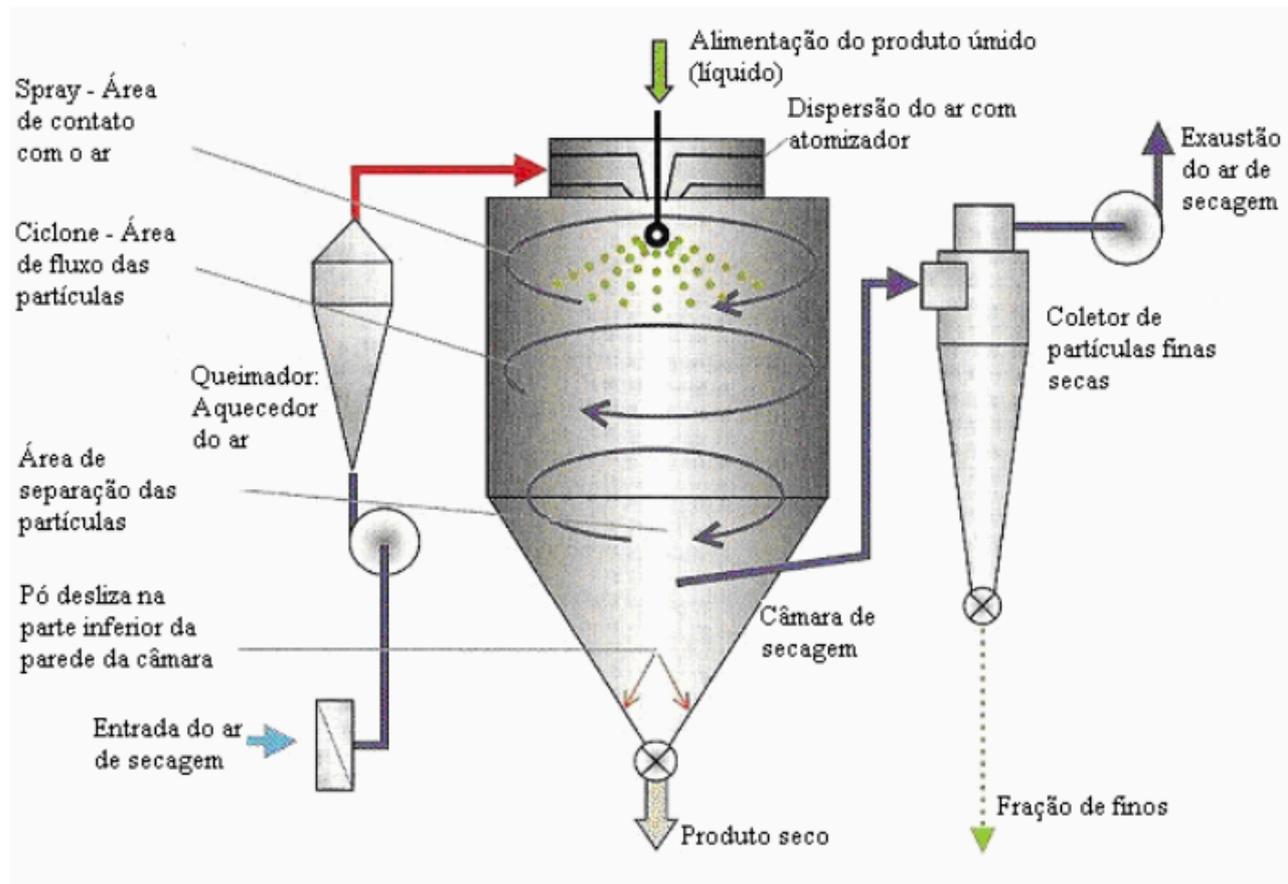
a) Fluidized bed; b) Heater; c) Solids feeder; d) Gas distributor; e) Cooling zone; f) Discharge; g) Control baffle; h) Dust separator; i) Fan

O ar de admissão é aquecido antes de entrar no Secador de Leito Fluidizado. O ar então flui homogeneamente através de uma tela especial e fluidiza o produto. Isto assegura uma excelente transferência de calor e uma alta taxa de secagem.

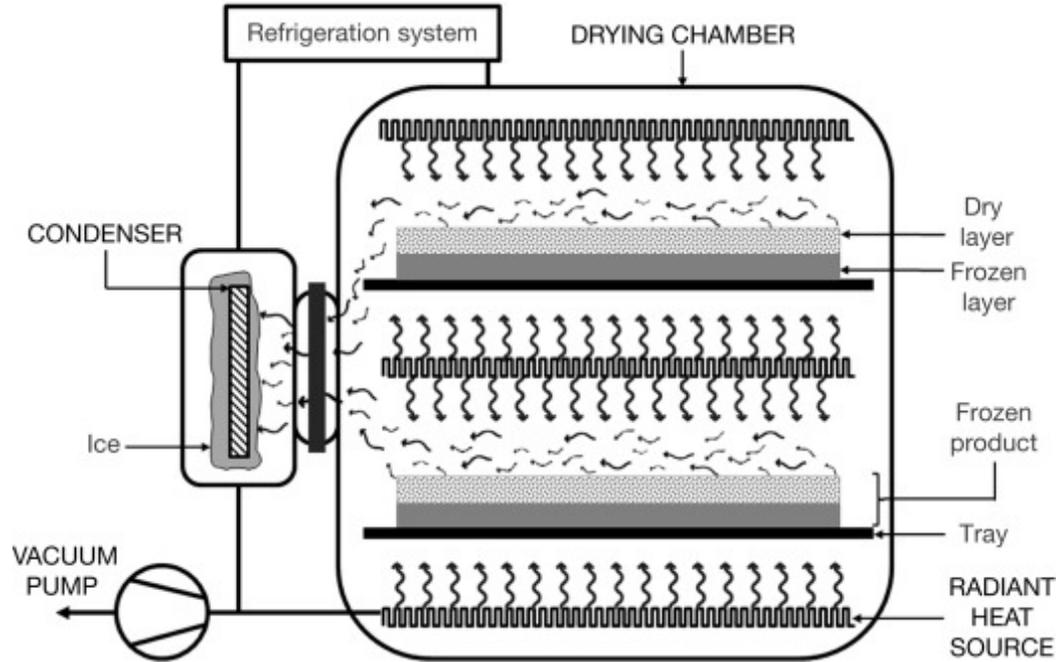


# Spray dryer





# Freeze dryer



## Freeze dryer

- A câmara de secagem é onde o produto congelado é colocado; embora o processo de congelamento possa ser feito dentro da câmara como primeira etapa, neste caso, o equipamento deve possuir um sistema de congelamento.
- A câmara deve ter um design estanque ao vácuo e as prateleiras no interior requerem controle de temperatura, uma vez que os processos de aquecimento e resfriamento ocorrem dentro da câmara.
- É necessária uma bomba de vácuo adequada para retirar os gases não condensáveis da câmara e, posteriormente, atingir o nível de vácuo desejável, ou seja, abaixo de 0,61 kPa (4,58 mm Hg ou 0,006 atm).

- A fonte de aquecimento fornece o calor latente de sublimação, uma vez que o produto congelado já está em condições de alto vácuo.
- A temperatura da fonte de aquecimento pode variar entre - 30 a 150 ° C; porém, esta última sendo muito alta para ser considerada em aplicações práticas) e é essencialmente determinada pela temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) e a umidade conteúdo da comida.
- Finalmente, a função do condensador é coletar o vapor d'água liberado pela sublimação do gelo dentro do produto, e deve ter superfície e capacidade de resfriamento suficientes para congelar todo o vapor gerado durante o processo de sublimação.
- O vapor d'água entra em contato com a superfície do condensador e se transforma em cristais de gelo, liberando energia; depois, os cristais são removidos do sistema. Normalmente, a temperatura operacional dos condensadores em liofilizadores comerciais é de cerca de 208,15 K (- 65 ° C).