

Temperatura de bulbo húmedo y Secado

IIQ2023 - Operaciones Unitarias II

José Rebolledo Oyarce

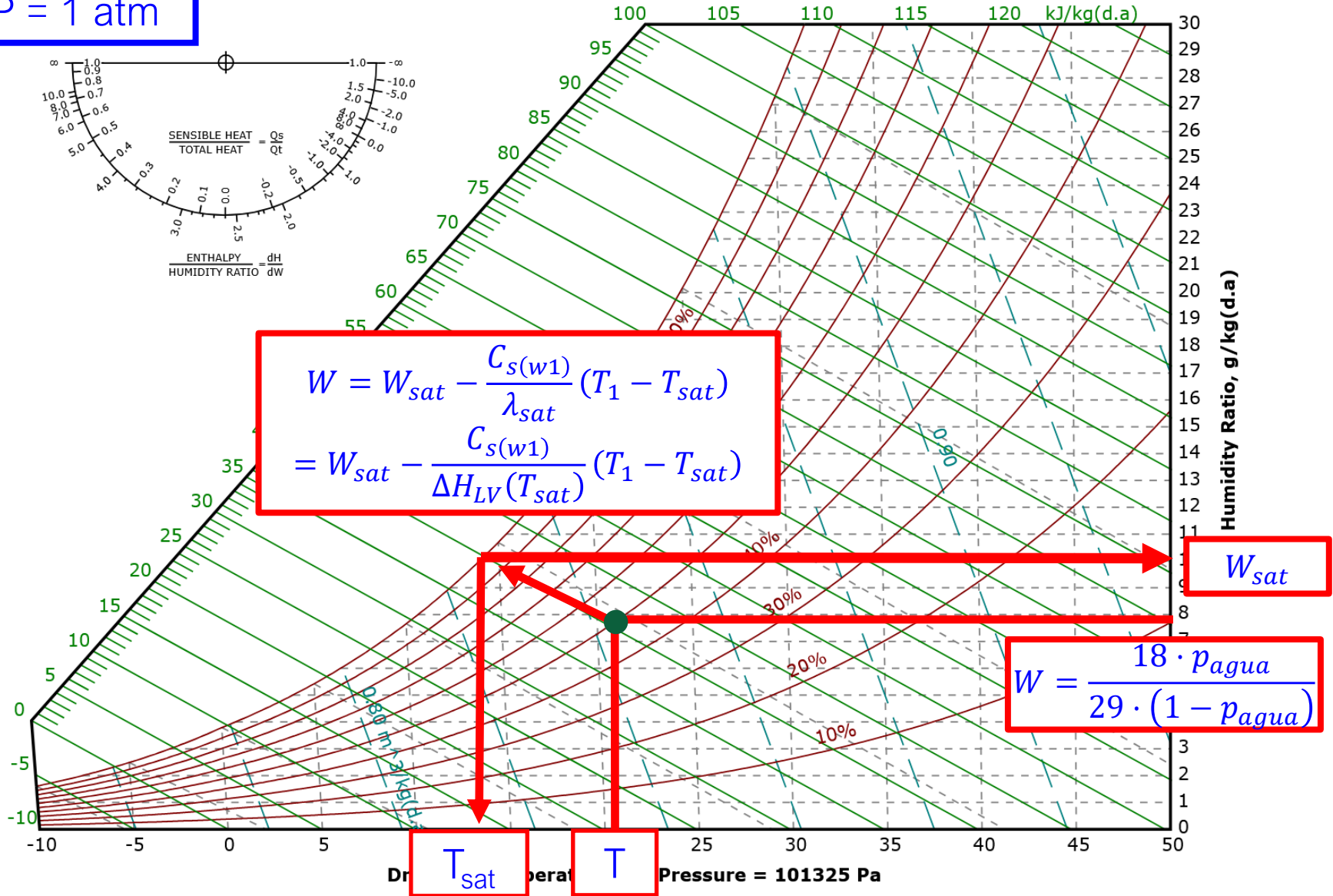
3 de Junio de 2021

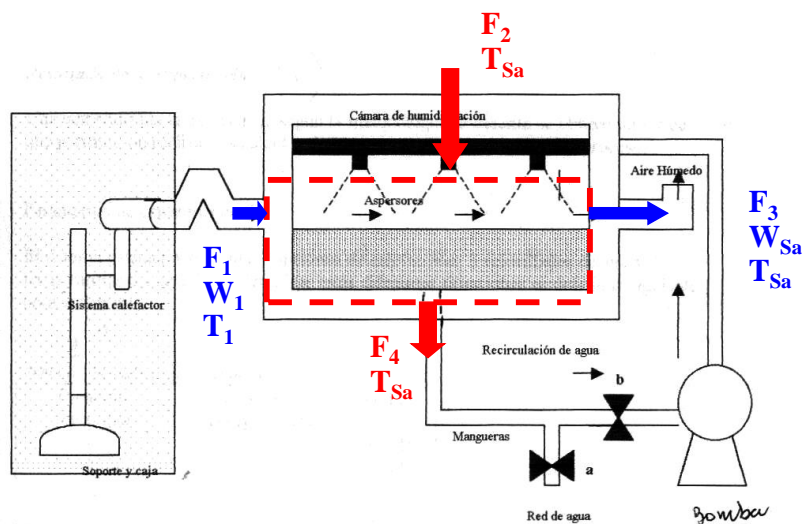


- Recordatorio de la Clase Anterior
- Objetivos de la Clase
- Concepto de Bulbo Húmedo
- Proceso de Secado
 - Isotermas de Secado
 - Curva de velocidad de secado
 - Periodos o Etapas de Secado
 - Secado en el Periodo constante

Carta psicrométrica: muestra propiedades de sistema aire-agua

$P = 1 \text{ atm}$



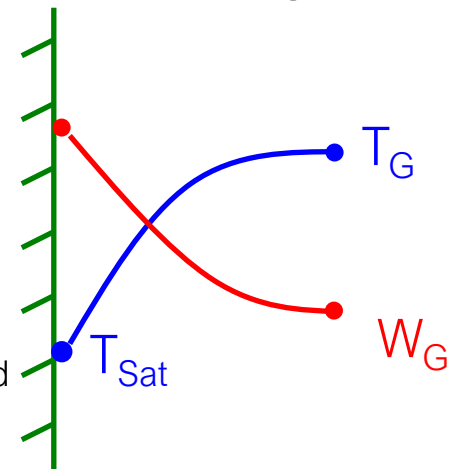


Agua

Aire

$$W_{\text{Sat}} = W_i$$

$$T_L = T_i = T_{\text{Sad}}$$



← Calor sensible
→ Calor latente

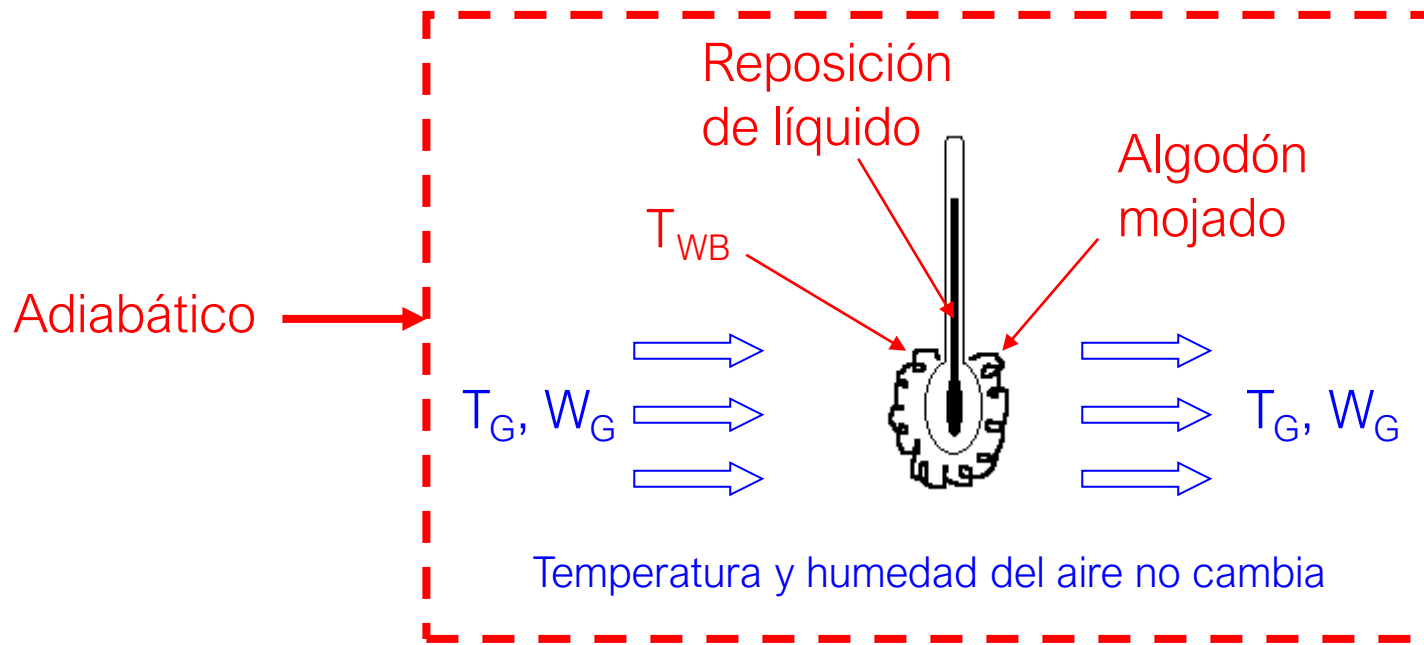
T_i y W_i representan condiciones de interfase \Rightarrow equilibrio y por tanto son condiciones de saturación. La temperatura del aire T_G **debe** ser mayor que T_i y W_i **debe** ser mayor que W_G .

Objetivos de la Clase

- Comprender qué se entiende por temperatura de bulbo húmedo.
- Conocer la Ley de Lewis o Relación psicrométrica.
- Aprender a calcular el tiempo de secado en el período de velocidad constante.

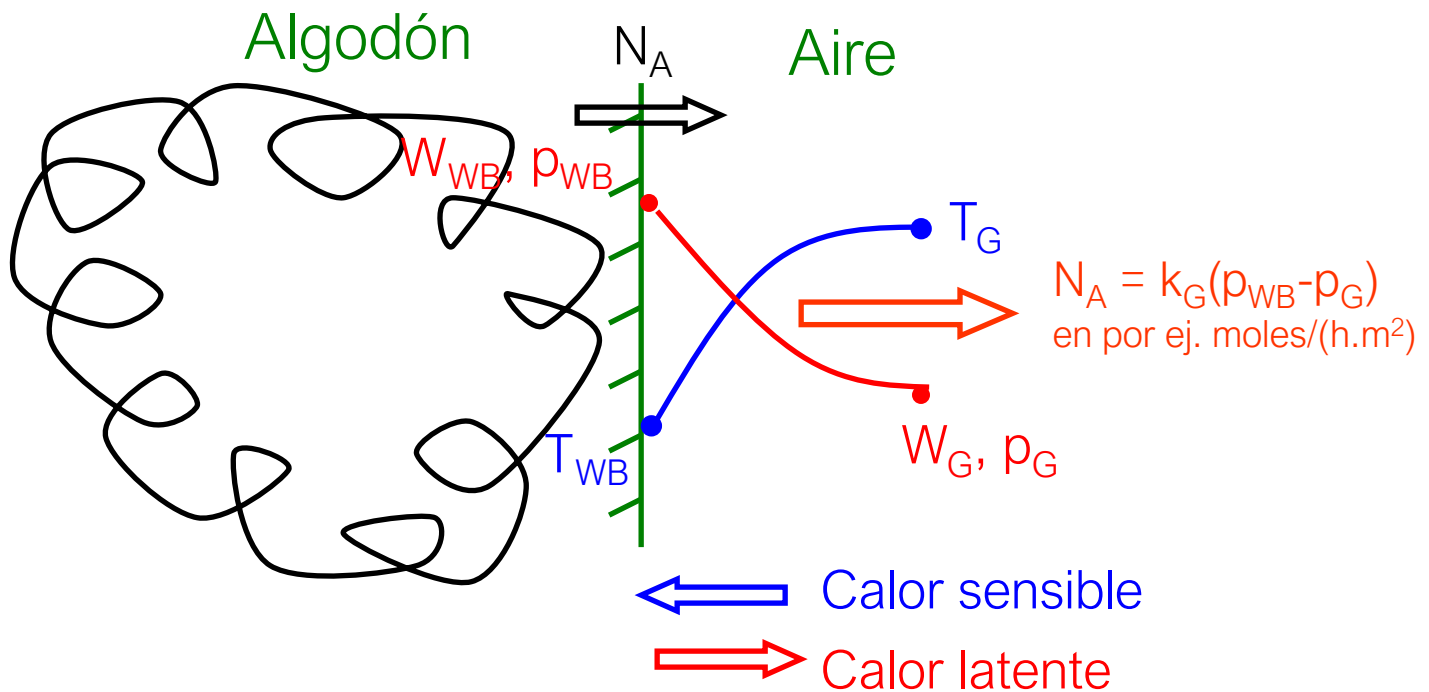
Temperatura de bulbo húmedo (T_{WB})

Aire insaturado se contacta con poca agua líquida bajo condiciones adiabáticas.



Inicialmente: $T_{\text{termómetro}} = T_G$, temperatura de bulbo seco

Como el gas no está saturado, y el sistema es adiabático, el agua pasa del bulbo al aire, y se evapora. Luego se establece un estado estacionario de no-equilibrio.



En estado estacionario:

Calor utilizado para evaporar agua = Calor suministrado al agua

El calor suministrado por el gas caliente sigue la ecuación de la ley de enfriamiento de Newton, por lo tanto:

$$Q_{entregado} = h(T_G - T_{WB})A$$

Donde h es el coeficiente de transferencia convectivo, T_G es la temperatura del gas, T_{WB} es la temperatura en el bulbo húmedo. A es el área superficie de la superficie expuesta al gas

Ahora para determinar el calor requerido para evaporar el vapor, tenemos primero que saber la cantidad de vapor transferido al aire:

$$n_A = k'_G(y_{WB} - y_G)A = k_G(p_{WB} - p_G)A$$

Donde k'_G y k_G son los coeficientes de transferencia del gas. y_{WB} e y_G es la concentración del vapor en el gas en el bulbo húmedo y en el seno del gas. p_{WB} y p_G es la presión parcial del vapor en el gas en el punto de bulbo húmedo y en el seno del gas.

Esta cantidad de vapor tenemos que entregarle la energía necesaria para evaporarse y después la energía necesaria para que alcance la temperatura del seno del gas. Es decir:

$$Q_{evaporar} = n_A \cdot PM_A [\lambda_{WB} + C_{p_A}(T_G - T_{WB})]$$

Reemplazando n_A en la ecuación de energía:

$$Q_{evaporar} = (k_G(p_{WB} - p_G)A) \cdot PM_A [\lambda_{WB} + C_{p_A}(T_G - T_{WB})]$$

Pero si consideramos que el calor sensible es despreciable frente al calor latente, entonces:

$$\lambda_{WB} + C_{pA}(T_G - T_{WB}) \approx \lambda_{WB}$$

Con ello,

$$Q_{evaporar} = k_G(p_{WB} - p_G) \cdot A \cdot PM_A \cdot \lambda_{WB}$$

Como declaramos al inicio, este sistema forma un equilibrio, por lo tanto:

$$Q_{evaporar} = Q_{entregado}$$

$$k_G(p_{WB} - p_G) \cdot A \cdot PM_A \cdot \lambda_{WB} = h(T_G - T_{WB})A$$

Reordenando,

$$T_{WB} = T_G - \frac{k_G PM_A \lambda_{WB}}{h} (p_{WG} - p_G)$$

Pero, por propiedades psicrométricas, sabemos que la humedad absoluta relaciona el concepto de presión parcial del sistema, por lo tanto:

$$W = \frac{PM_v p_v}{PM_g (P - p_v)}$$

Pero sabemos que $p_v = y_v P$:

$$W = \frac{PM_v y_v P}{PM_g (P - y_v P)} = \frac{PM_v y_v}{PM_g (1 - y_v)}$$

Y reordenando:

$$y_v = \frac{W PM_g}{PM_v + W PM_g}$$

Pero si la cantidad de humedad es pequeña, es decir, el vapor ejerce una presión parcial baja en el gas ($(P - p_v) \approx P$):

$$y_v = \frac{W PM_g}{PM_v + W PM_g} \approx \frac{W PM_g}{PM_v} \rightarrow p_v = \frac{P \cdot W \cdot PM_g}{PM_v}$$

Con ello,

$$T_{WB} = T_G - \frac{k_G PM_A \lambda_{WB}}{h} (p_{WG} - p_G)$$

$$T_{WB} = T_G - \frac{k_G PM_A \lambda_{WB}}{h} \left(\left(\frac{P \cdot W_{WB} \cdot PM_B}{PM_A} \right) - \left(\frac{P \cdot W_G \cdot PM_B}{PM_A} \right) \right)$$

$$T_{WB} = T_G - \frac{k'_G \lambda_{WB}}{h} ((W_{WB} \cdot PM_B) - (W_G \cdot PM_B))$$

$$T_{WB} = T_G - \frac{k'_G PM_B \lambda_{WB}}{h} (W_{WB} - W_G)$$

O bien:

$$W_G - W_{WB} = - \frac{h}{k'_G PM_B \lambda_{WB}} (T_G - T_{WB})$$

Relación entre T_{sat} y T_{WB}

$$T_{\text{sat}} : \quad W_G - W_{\text{sat}} = -\frac{C_s}{\lambda_{\text{sat}}} (T_G - T_{\text{sat}})$$

$$T_G : \quad W_G - W_{\text{WB}} = -\frac{h}{k'_G P M_B \lambda_{\text{WB}}} (T_G - T_{\text{WB}})$$

En este sistema, si tenemos que se cumple la analogía de Chilton-Colburn, entonces:

$$\frac{k'_G P M}{G} Sc^{2/3} = \frac{h}{c_p G} Pr^{2/3}$$

Para nuestro caso:

$$\frac{k'_G P M_B}{h} = \frac{1}{(c_p)_B} \left(\frac{1}{Le} \right)^{2/3}$$

Donde $Le = Sc/Pr$, tenemos que comúnmente $(Le)^{2/3}$ se conoce como razón psicrométrica

Relación entre T_{sat} y T_{WB}

$$T_{\text{sat}} : \quad W_G - W_{\text{sat}} = -\frac{C_s}{\lambda_{\text{sat}}} (T_G - T_{\text{sat}})$$

$$T_G : \quad W_G - W_{\text{WB}} = -\frac{h}{k'_G P M_B \lambda_{\text{WB}}} (T_G - T_{\text{WB}})$$

En el caso particular de la mezcla de agua-aire, tenemos que la razón psicrométrica es aproximadamente 1, por lo que se cumple lo siguiente:

Ley de Lewis o Relación psicrométrica

$$C_s = h_G / 29 k_G$$

En otros sistemas esto no ocurre. Generalmente la pendiente $h/PM_{\text{GasInerte}} k'_G$ es mayor que C_s por lo que $T_{\text{WB}} > T_{\text{Sat}}$.

Secado de Sólidos

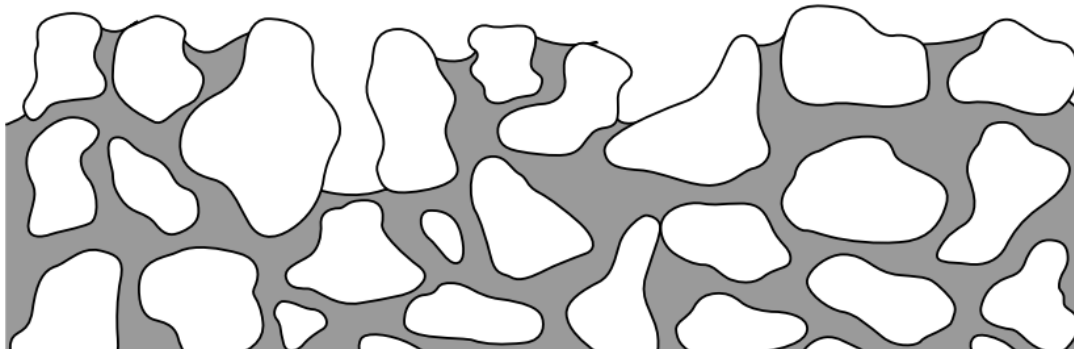
Los sólidos que podemos secar se dividen en dos categorías:

Sólidos Granulares o Cristalinos: Estos sólidos retiene el vapor en poros abiertos entre las partículas.

Son principalmente compuestos inorgánicos, por ejemplo, rocas machacadas, arena, etc.

Durante el proceso de secado, el sólido no es afectado por la remoción de la humedad, entonces la selección de las **condiciones de secado y tasa de secado no son críticas**.

Materiales en esta categoría se pueden llegar a secar rápidamente hasta llegar a un contenido de humedad bajo.



Secado de Sólidos

Los sólidos que podemos secar se dividen en dos categorías:

Sólidos Fibrosos, Amorfos o Gelatinosos: En estos sólidos la humedad está disuelta o atrapada en las fibras o en poros muy finos.

Principalmente son sólidos orgánicos, como madera, cuero, etc.

Estos materiales son afectados por la remoción de la humedad, comúnmente contrayéndose cuando se secan e hinchándose cuando se mojan.

Si la superficie es secada muy rápida, el gradiente de humedad y temperatura puede causar **agrietamiento, deformación, endurecimiento de la carcasa y/o ruptura**. Por lo tanto, la selección de las condiciones de secado es un factor crítico.



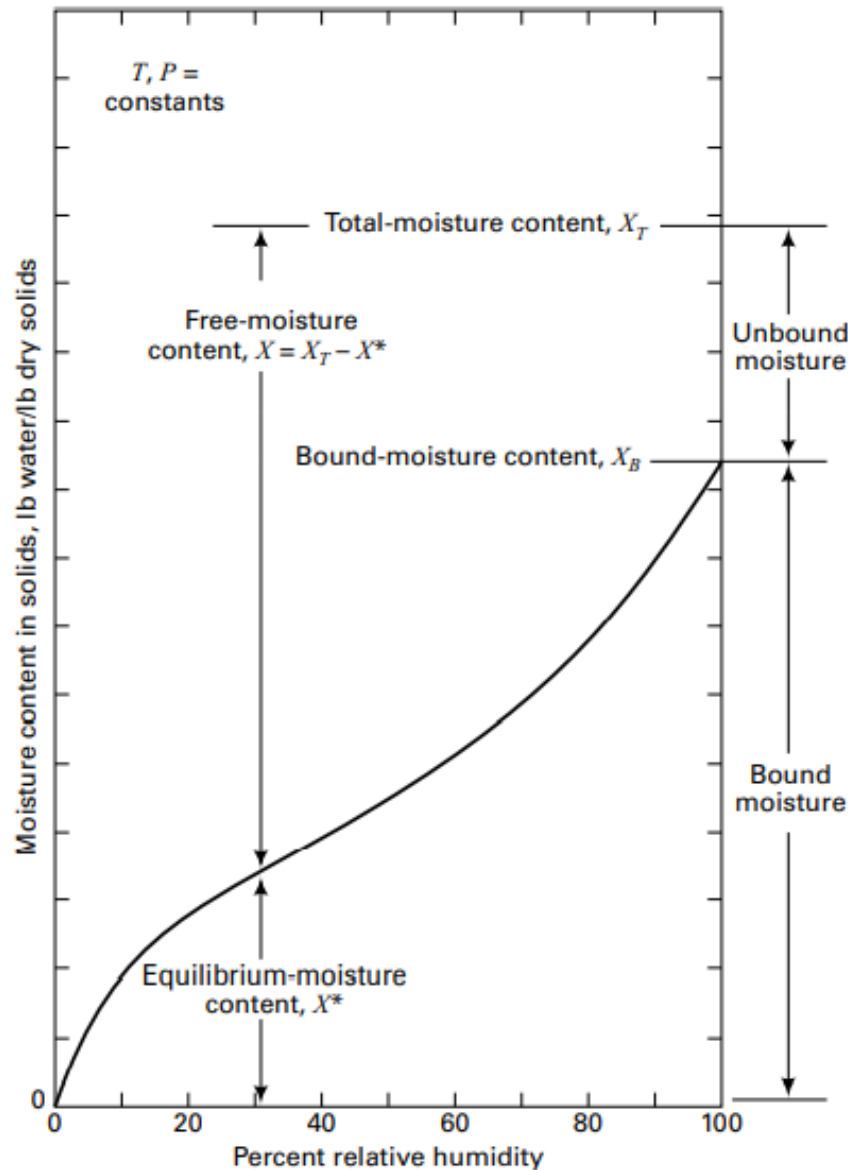
Contenido de Humedad en Equilibrio

En un proceso de secado, lo que se puede eliminar de humedad de un sólido está limitado, particularmente para los sólidos de segunda categoría, por el contenido de humedad de equilibrio del sólido, que depende de factores que incluyen la temperatura, la presión y el contenido de humedad del gas.

Incluso si las condiciones de secado producen un sólido completamente seco, la exposición posterior del sólido a una humedad diferente puede resultar en un aumento en el contenido de humedad.

Una forma común de representar la relación de la cantidad de humedad que tiene el sólido versus la humedad del aire es a través de isotermas de equilibrio

Isoterma de Absorción



Tenemos que para una situación de presión y temperatura constante, a distintas condiciones de humedad relativa se alcanza el equilibrio de humedad del sistema (X^*)

Si la HR = 100% el contenido de humedad en equilibrio es conocido como **humedad ligada**, X_B . Y si el sólido tiene un contenido total de humedad, $X_T > X_B$, el exceso $X_T - X_B$ es la **humedad no ligada**.

Si la HR < 100%, el exceso de X_T sobre el contenido de equilibrio, es decir, $X_T - X^*$, es el **contenido de humedad libre**.

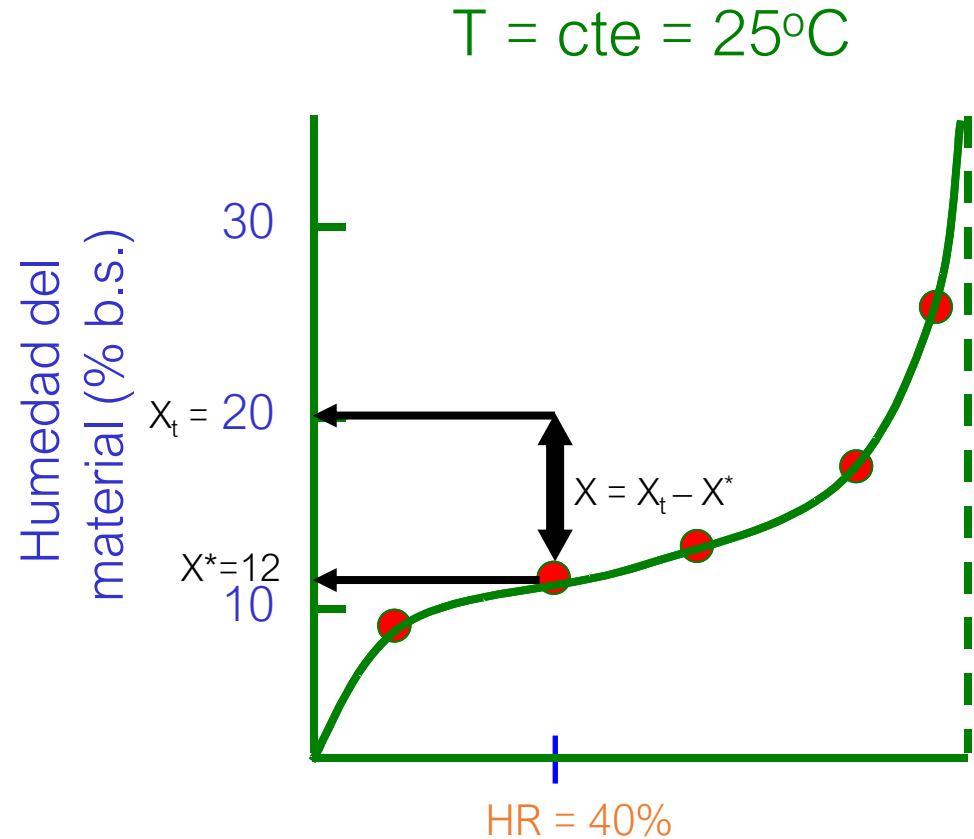
En el proceso de secado, la humedad que retiramos es el contenido de humedad libre

Humedad Libre de una Muestra

Ej:

Material tiene humedad de equilibrio (X^*) de 0,12 kg agua/kg ss con aire de 40% de HR a 25°C.

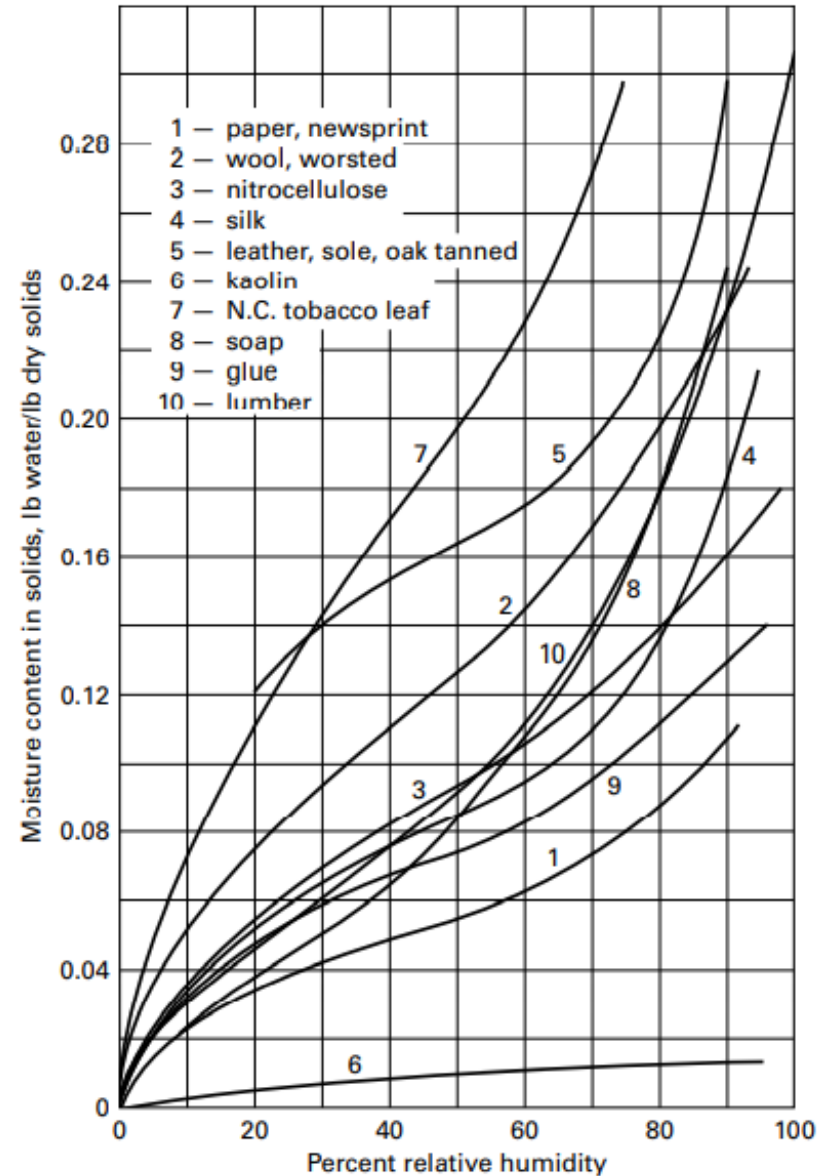
Si muestra tiene 0,2 kg agua/kg ss inicialmente (X_t), sólo se podrá eliminar por secado con este aire 0,08 kg agua/kg ss, que es el contenido de humedad libre ($X = X_t - X^*$).



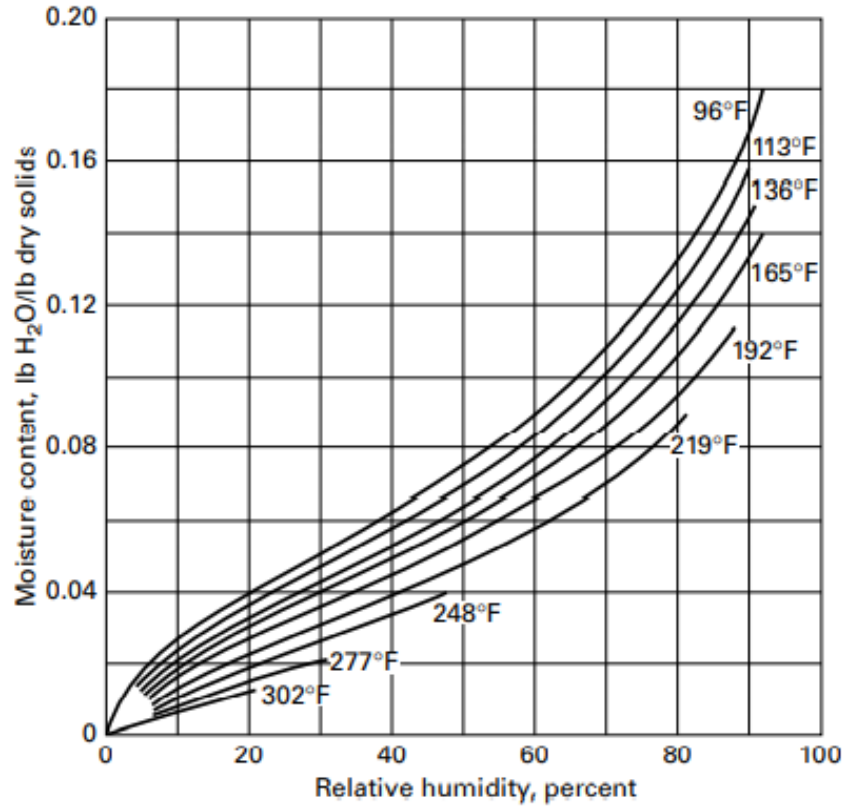
Efecto del material en la Isoterma

En el gráfico podemos apreciar diferentes isotermas para 10 materiales sólidos diferentes a una temperatura de 25°C y 1 atm

Cada material tendrá su propia isoterma y es importante conocerla para saber el límite máximo de remoción de humedad que podemos lograr



Efecto de la Temperatura en la Isoterma



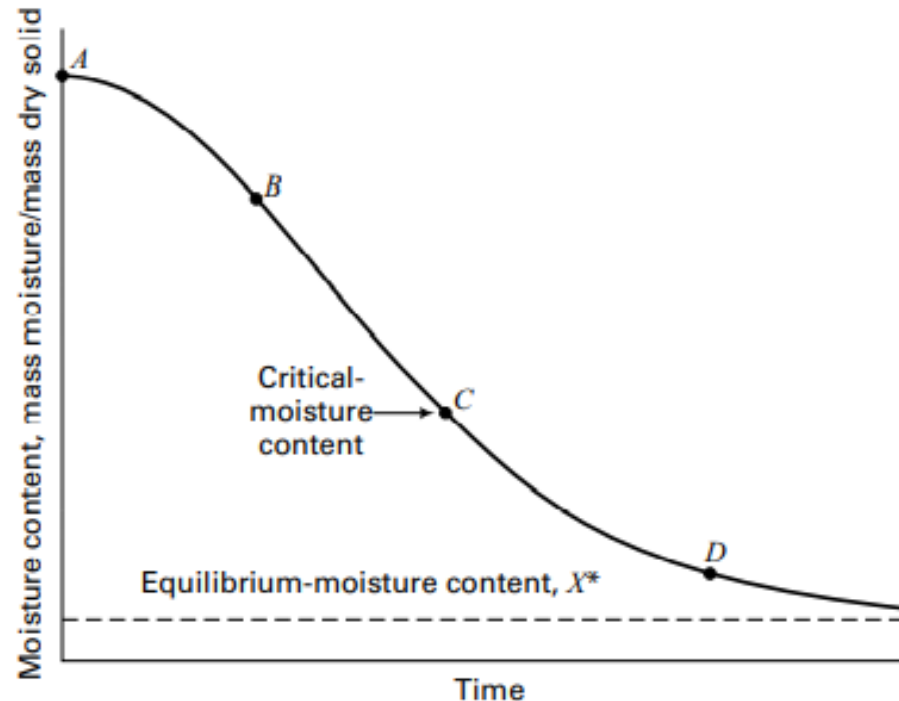
La isoterma también se ve impactada por la temperatura del material.

En este caso estamos viendo el comportamiento de las isotermas de la pulpa de sulfita

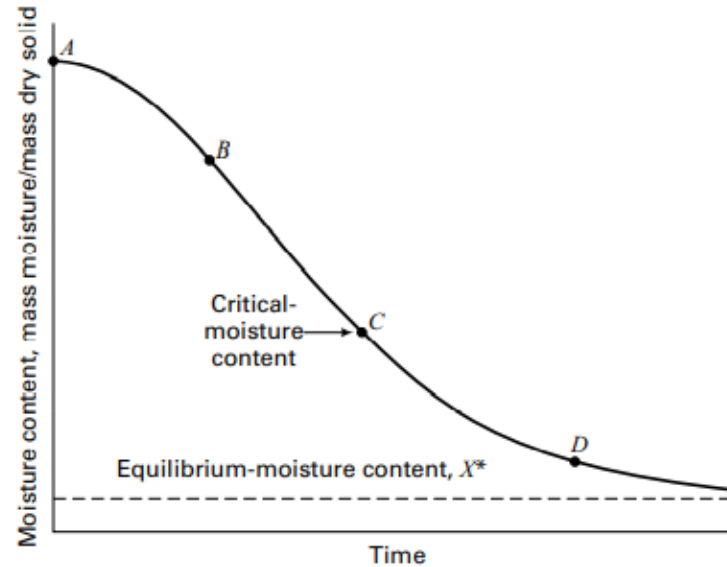
Construcción de curva de velocidad de secado

Ahora que sabemos como se comporta el equilibrio necesitamos saber como va evolucionado el proceso de secado.

Para ello Sherwood desarrollo una metodología que consiste en ir midiendo el contenido de humedad en el sólido en distintos momento del tiempo, con el fin de obtener una curva de la tasa de secado.



Construcción de curva de velocidad de secado



Se miden las pendientes de las tangentes a la curva $\rightarrow dX/dt$ para distintos t .

Se calcula el flux de secado (R) ($\text{kg agua}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$) para cada punto según:

$$R = -\frac{m_s}{A} \frac{dX}{dt}$$

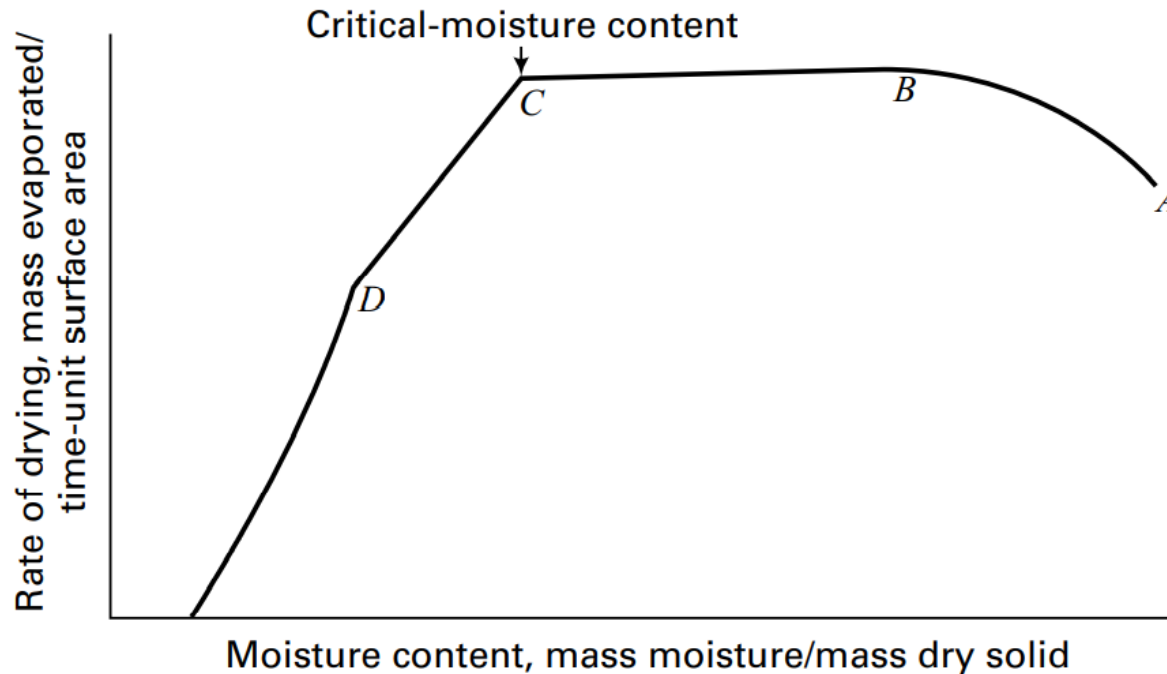
Donde:

m_s = kg de sólido seco

A = área superficial expuesta [m^2]

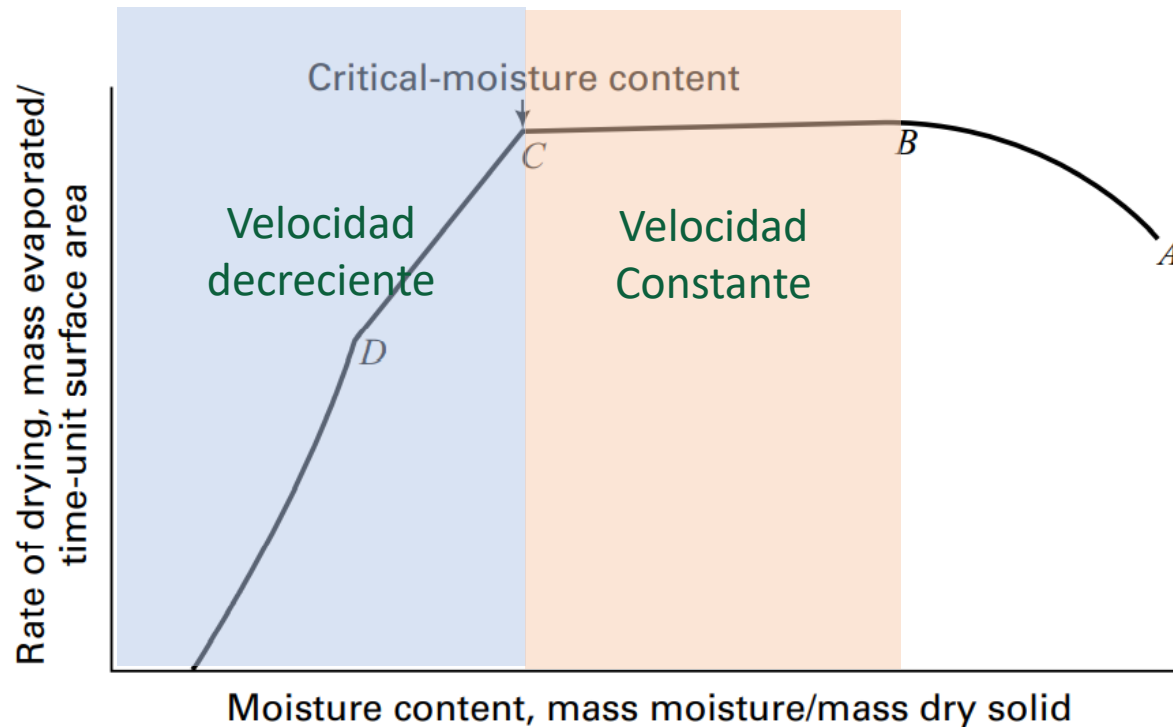
Construcción de curva de velocidad de secado

Con los valores de R para diferentes puntos se construye una curva complementaria a la velocidad de secado que es la variación de la velocidad de secado según el contenido de humedad en el sólido (X)



X_c es el punto de humedad crítico ya que es el punto en donde la velocidad de secado disminuye

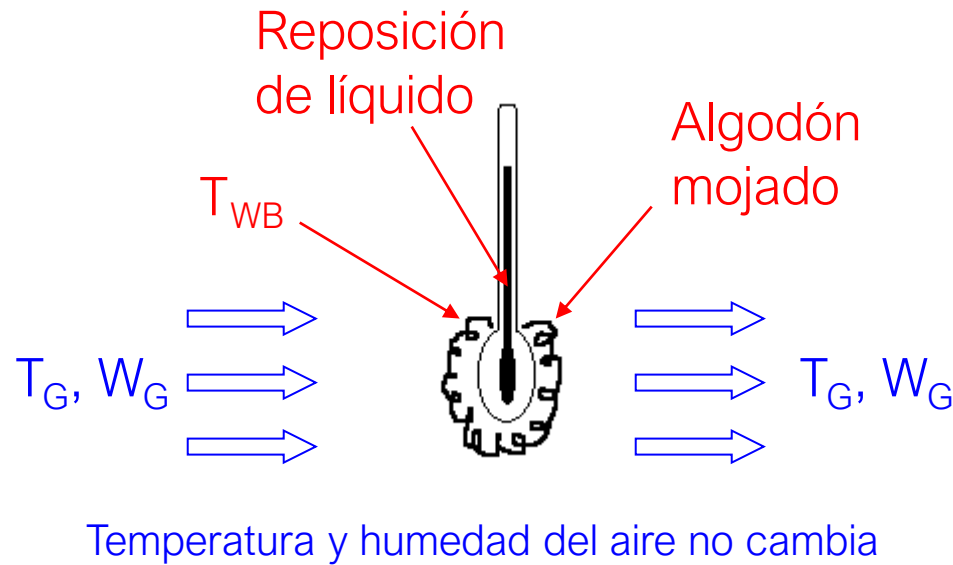
Etapas en el secado



Las curvas de secado pueden variar para distintos materiales y distintas condiciones ctes. de secado, pero en general se observará un período de velocidad cte. y un período de velocidad decreciente.

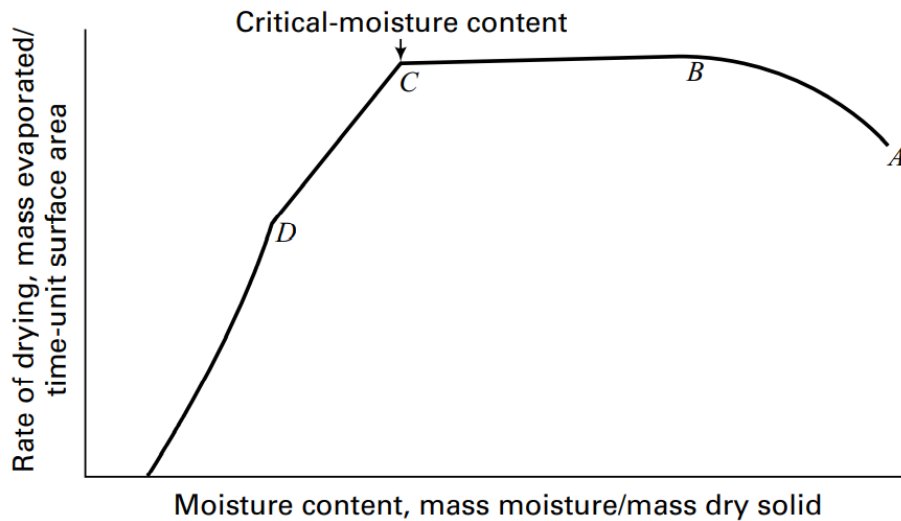
Importancia de T_{WB} durante el secado a velocidad cte.

El sistema se comporta como el termómetro húmedo, y la temperatura del material es la temperatura de bulbo húmedo.



Métodos para calcular el tiempo de secado en el período de velocidad constante

1. Utilizando curva experimental de tasa de secado



$$R = -\frac{m_s}{A} \frac{dX}{dt} \rightarrow t = \frac{m_s}{A} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{R}$$

Período de velocidad cte.

$$t = \frac{m_s}{A \cdot R_c} (X_1 - X_2)$$

En que: $R = \text{cte} = R_c$

Período de velocidad cte. y 1er período de velocidad decreciente:

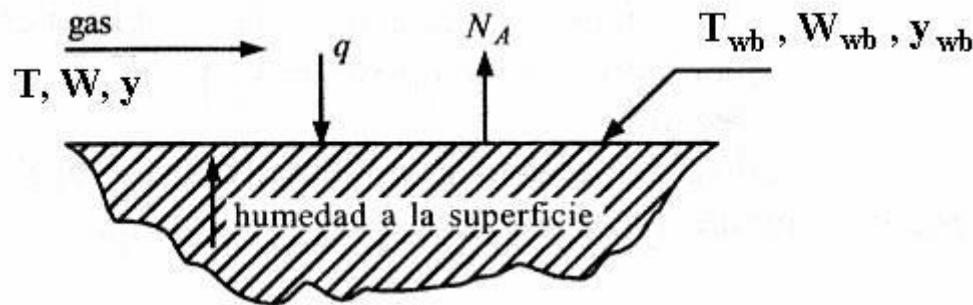
$$t = t_1 + t_2$$

$$t_1 = \frac{m_s}{AR_c} \int_{X_c}^{X_1} dX$$

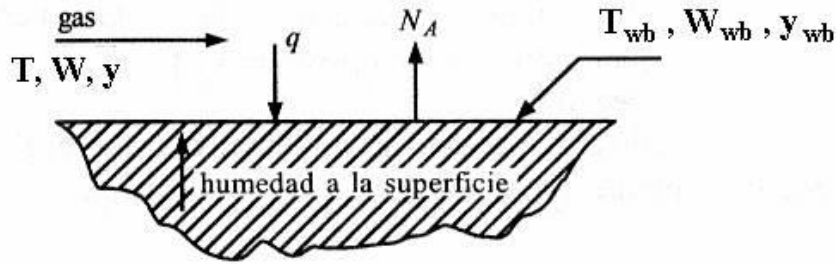
$$t_2 = \frac{m_s}{A} \int_{X_2}^{X_c} \frac{dX}{R}$$

2. Método que emplea coeficientes de transferencia

- Las velocidades de secado pueden también estimarse a través de predicciones de coeficientes de transferencia.
- Se considera que la Transferencia de Calor del aire caliente a la superficie del sólido es por convección y de la superficie al aire por Transferencia de Materia



$$\frac{dm_v}{dt} = \dot{m} = \text{velocidad de evaporación} \left[\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{h}} \right]$$



$$\frac{dm_v}{dt} = \dot{m} = \text{velocidad de evaporación} \left[\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{h}} \right]$$

Transferencia de Materia : $\dot{m} = k_G P M_{gas} (W_{WB} - W) A$

Transferencia de Calor : $\dot{m} = \frac{h(T - T_{WB})A}{\lambda_W}$
 $\left| \begin{array}{l} [h_G] = \text{W}/(\text{m}^2\text{K}) \\ [\lambda_w] = \text{J/kg} \end{array} \right.$

$$\therefore \frac{\dot{m}}{A} = R_c = P M_{gas} k_G (W_{WB} - W) = \frac{h_G (T - T_W)}{\lambda_W}$$

Ecuación idéntica a la de bulbo húmedo → temperatura del sólido está a la temperatura de bulbo húmedo durante el período de velocidad cte.

$$\therefore \frac{\dot{m}}{A} = R_c = PM_{aire} k_G (W_{WB} - W) = \frac{h(T - T_W)}{\lambda_W}$$

Frecuentemente se usa la ecuación de Transferencia de Calor para estimar R_c

Se tienen relaciones empíricas para determinar para h

Table 18.6 Empirical Equations for Interphase Heat-Transfer Coefficients for Application to Dryers (h in $\text{W/m}^2\text{-K}$, G in kg/hr-m^2 , d_p in m)

Geometry	Equation
Flat-plate, parallel flow	$h = 0.0204G^{0.8}$ ($T_d = 45-150^\circ\text{C}$, $G = 2,450-29,300$) (1)
Flat-plate, perpendicular, impingement flow	$h = 1.17G^{0.37}$ ($G = 3,900-19,500$) (2)
Packed beds, through-circulation	$h = 0.151G^{0.59}/d_p^{0.41}$, ($N_{\text{Re}} > 350$) (3)
	$h = 0.214G^{0.49}/d_p^{0.51}$, ($N_{\text{Re}} < 350$) (4)
Fluidized beds	$N_{\text{Nu}} = 0.0133N_{\text{Re}}^{1.6}$ ($0 < N_{\text{Re}} < 80$) (5)

Fluidized beds	$N_{\text{Nu}} = 0.0133N_{\text{Re}}^{1.6}$ ($0 < N_{\text{Re}} < 80$) (5)
Pneumatic conveyors	$N_{\text{Nu}} = 0.316N_{\text{Re}}^{0.8}$ ($8 < N_{\text{Re}} < 500$) (6)
Droplets in spray dryers	$N_{\text{Nu}} = 2 + 1.05N_{\text{Re}}^{0.5}N_{\text{Pr}}^{1/3}N_{\text{Gu}}^{0.175}$ ($N_{\text{Re}} < 1000$) (7)
Spouted beds	$N_{\text{Nu}} = 0.0005N_{\text{Re}_s}^{1.46}(u/u_s)^{1/3}$ (8)
$N_{\text{Re}} = d_p G / \mu$, $N_{\text{Nu}} = h d_p / k$, $N_{\text{Pr}} = C_p \mu / k$, $N_{\text{Re}_s} = d_p G_s / \mu$ G_s = mass velocity for incipient spouting u = velocity, u_s = incipient spouting velocity $N_{\text{Gu}} = (T_d - T_w) / T_d$ in absolute temperature d_p = particle size, C_p = specific heat of gas μ = viscosity of gas, k = thermal conductivity of gas	

$$\therefore \frac{\dot{m}}{A} = R_c = PM_{aire} k_G (W_{WB} - W) = \frac{h(T - T_W)}{\lambda_W}$$

Frecuentemente se usa la ecuación de Transferencia de Calor para estimar R_c

Reemplazando en $t = \frac{m_s}{AR_c} (X_1 - X_2)$

$$t = \frac{m_s \lambda_W (X_1 - X_2)}{A \cdot h \cdot (T - T_{WB})} = \frac{m_s (X_1 - X_2)}{A \cdot PM_{gas} \cdot k_G (W_{WB} - W)}$$

Efecto de las variables de proceso en el secado

$$t = \frac{m_s \lambda_W (X_1 - X_2)}{A \cdot h \cdot (T - T_{WB})} = \frac{m_s (X_1 - X_2)}{A \cdot PM_{gas} \cdot k_G (W_{WB} - W)}$$

1. **Velocidad del aire:** R_c es proporcional a h y por ende a G
2. **Efecto de la humedad del gas:** si T es cte. y W del aire disminuye $\rightarrow T_{wb}$ disminuye (carta psicrométrica) $\rightarrow R_c$ aumenta
3. **Temperatura del aire:** si W es cte. y aumenta la T del gas $\rightarrow W_{wb}$ aumenta (carta psicrométrica) $\rightarrow R_c$ aumenta
4. **Características del sólido:** aumento de espesor para un área cte., aumenta m_s y por ende el tiempo de secado

- Comprender qué se entiende por temperatura de bulbo húmedo.
- Conocer la Ley de Lewis o Relación psicrométrica.
- Aprender a calcular el tiempo de secado en el período de velocidad constante.

Temperatura de bulbo húmedo y Secado

IIQ2023 - Operaciones Unitarias II

José Rebolledo Oyarce

3 de Junio de 2021

