

## INTRODUCCION

El exceso de humedad contenida por los materiales puede eliminarse por métodos mecánicos (sedimentación, filtración, centrifugación). Sin embargo, la eliminación más completa de la humedad se obtiene por evaporación y eliminación de los vapores formados, es decir, mediante el secado térmico, ya sea empleando una corriente gaseosa o sin la ayuda del gas para extraer el vapor.

Esta operación se utiliza ampliamente en la tecnología química y es muy común que sea la última operación en la producción precedente a la salida del producto resultante. Es evidente que la eliminación de agua o en general de líquidos existentes en sólidos es más económica por acción mecánica que por acción térmica. La dificultad de los medios mecánicos surge cuando los productos finales y gran número de productos intermedios deben cumplir especificaciones rigurosas en cuanto a la humedad final. Habitualmente una centrífuga trabajando con grandes cargas de sólido húmedo dejará humedades en torno al 10-20 %, aunque en casos excepcionales como la sal común o cloruro sódico se puede alcanzar el 1 %.

La operación de secado es una operación de transferencia de masa de contacto gas-sólido, donde la humedad contenida en el sólido se transfiere por evaporación hacia la fase gaseosa, en base a la diferencia entre la presión de vapor ejercida por el sólido húmedo y la presión parcial de vapor de la corriente gaseosa. Cuando estas dos presiones se igualan, se dice que el sólido y el gas están en equilibrio y el proceso de secado cesa.

## DESARROLLO

### - Formas de enlace de la humedad con el material.

El mecanismo del proceso de secado depende considerablemente de la forma de enlace de la humedad con el material: cuanto más sólido es dicho enlace, tanto más difícil es el secado. Durante el secado el enlace de la humedad con el material se altera.

Las formas de enlace de la humedad con el material se clasifican en: químico, físico-químico y físico-mecánico.

La humedad ligada químicamente es la que se une con mayor solidez al material en determinadas proporciones (estequiométricas) y puede eliminarse sólo calentando el material hasta altas temperaturas o como resultado de una reacción química. Esta humedad no puede ser eliminada del material por secado.

Durante el secado se elimina, como regla, sólo la humedad enlazada con el material en forma físico-química y mecánica. La más fácil de eliminar resulta la enlazada mecánicamente que a su vez se subdivide en: humedad de los macrocapilares y microcapilares (capilares con el radio medio mayor y menor de  $10^{-5}$  cm. Los macrocapilares se llenan de humedad durante el contacto directo de ésta con el material, mientras que en los microcapilares la humedad penetra tanto por contacto directo, como mediante la adsorción de la misma en el medio ambiente. La humedad de los macrocapilares se elimina con facilidad no sólo por secado, sino que también empleando métodos mecánicos.

El enlace físico-químico une dos tipos de humedad que difieren por la solidez del enlace con el material: la humedad ligada osmóticamente y por adsorción.

La primera llamada también humedad de hinchamiento, se encuentra dentro de las células del material y se retiene por las fuerzas osmóticas. La segunda se retiene sólidamente

sobre la superficie y en los poros del material. La humedad de adsorción requiere para su eliminación un gas con una energía considerablemente mayor que la utilizada para eliminar la humedad de hinchamiento. La existencia de estos tipos de humedad especialmente se manifiesta en materiales coloidales y poliméricos.

#### - Definiciones fundamentales.

Contenido de humedad, base seca:  $x$

$$x = \frac{kg_{humedad}}{kg_{sólido\ seco}}$$

Contenido de humedad, base húmeda:

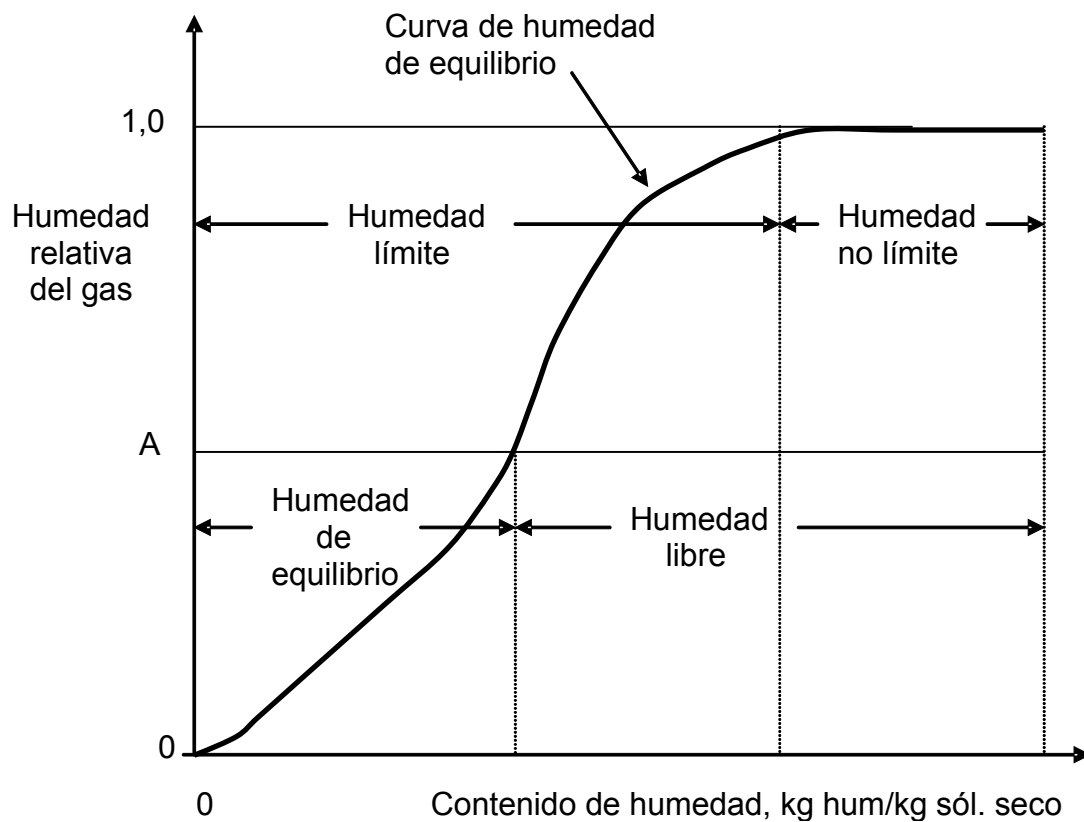
$$x = \frac{kg_{humedad}}{kg_{sólido\ húmedo}} = \frac{kg_{humedad}}{kg_{humedad} + kg_{sólido\ seco}}$$

Humedad de equilibrio:  $x^*$ , Humedad del sólido cuando su presión de vapor se iguala a la presión de vapor del gas. Es decir, humedad del sólido cuando está en equilibrio con el gas.

Humedad libre:  $x - x^*$ , Es la humedad del sólido; que es la humedad que está en exceso con relación a la humedad de equilibrio. Es ésta la humedad que se puede evaporar y depende de la concentración de vapor en la corriente gaseosa.

Existen otras definiciones como **humedad límite**; que es la humedad del sólido que ejerce una presión de vapor de equilibrio menor que aquella que ejerce el líquido puro a la misma temperatura y la humedad no límite que es la humedad del sólido que ejerce una presión de vapor igual a la del líquido puro a la misma temperatura. En la figura 1 se muestran representadas dichas humedades.

**Figura 1. Tipos de humedades**



### Clasificación de la operación de secado.

De modo general se pueden clasificar las operaciones de secado en continuas y discontinuas. En las operaciones continuas pasan continuamente a través del equipo tanto la sustancia a secar como el gas. La operación discontinua en la práctica se refiere generalmente a un proceso semi continuo, en el que se expone una cierta cantidad de sustancia a secar a una corriente de gas que fluye continuamente en la que se evapora la humedad.

### Mecanismos y cinética de secado. Transferencia de masa y calor.

Un elemento fundamental en el proceso de secado es el estudio de la intensidad de la transferencia de masa en el mismo. Para esto es necesario conocer los elementos más útiles de la transferencia de calor y masa que funcionen en los secaderos de contacto directo.

Algunos autores explican que esta depende de una serie de factores que van desde condiciones internas a externas.

Las condiciones externas están definidas por la resistencia a la transferencia de calor y de masa de la capa límite del gas, y en el caso que predominen, el secado no dependerá de las características del sólido sino de las condiciones del gas, y estará controlado por la transferencia de masa y calor entre el gas y la superficie del sólido, empleándose en la evaporación todo el calor que se recibe del gas, la cual se comporta como una superficie libre de agua.

Las condiciones internas están definidas, por la transferencia de calor y de masa a través del sólido. En el caso que predominen, es decir, que la resistencia a la transferencia de masa a través del material sea muy superior a la de la capa límite del gas, la difusión interna controlará el proceso y lo más importante será las propiedades del sólido.

Cuando se seca un sólido se producen dos procesos fundamentales y simultáneos:

- Transmisión del calor para evaporar el líquido.
- Transferencia de masa de la humedad interna a líquido evaporado.

Independientemente del mecanismo de transmisión de calor el cual puede ser por conducción, convección, radiación o una combinación de cualquiera de estos, el calor tiene que pasar primero a la superficie exterior y desde esta al interior del sólido. Excepto el secado por electricidad de alta frecuencia, que genera el calor intercambiante, esto conduce a la circulación de calor desde el interior hasta la superficie exterior. También se ha reportado otro tipo de secado llamado secado por sublimación.

En el secado por convección el calor necesario para la evaporación del líquido se transmite por un agente gaseoso o un vapor que pasa por encima del sólido o lo atraviesa.

En el secado por conducción el producto que debe secarse se encuentra en recipientes de calentamiento o se desplaza por encima de estos. El calor también se difunde en el sólido a través de la conductividad del propio sólido.

En el secado por radiación el calor se transmite por las superficies radiantes próximas.

En el secado dieléctrico la energía es generada en el interior del propio material mediante un campo electromagnético de alta frecuencia en la zona de microondas.

También se reporta en la literatura el secado por sublimación, denominando así al secado en estado de congelación al vacío profundo. Según el método de transmisión del calor este procedimiento es análogo al secado por conducción pero debido a sus peculiaridades el secado por sublimación se destaca como un grupo especial.

### **Movimiento de la humedad dentro del sólido.**

Cuando se produce la evaporación superficial, debe haber un movimiento de humedad desde las profundidades del sólido hacia la superficie.

La naturaleza del movimiento influye en el secado en los períodos de caída del régimen.

A continuación se explicarán brevemente algunas de las teorías que se adelantaron para explicar el movimiento de la humedad y la relación de ésta con las curvas de régimen.

**Difusión líquida:** Se puede producir la difusión de la humedad líquida debido a los gradientes de concentración entre las profundidades del sólido, donde la concentración es alta y la superficie donde ésta es baja.

**Movimiento capilar:** La humedad no límite en sólidos granulares y porosos tales como arcillas, pigmentos de pinturas y otros semejantes, se traslada a través de capilares e intersticios de los sólidos mediante un mecanismo que implica tensión superficial. Los capilares se extienden desde pequeños receptáculos de humedad dentro del sólido hasta la superficie de secado. A medida que se lleva a cabo el secado, al principio la humedad se traslada por capilaridad hacia la superficie con suficiente rapidez, siendo constante el régimen de secado.

**Difusión de vapor:** Especialmente si se suministra calor a una superficie de un sólido mientras en otra el secado continúa, se puede evaporar la humedad debajo de la superficie, difundiéndola hacia afuera como vapor. También se puede evaporar debajo de

la superficie, las partículas de humedad existentes en sólidos granulares en forma aislada de la porción mayor de humedad que fluye a través de los capilares.

**Presión:** Durante el secado debido a la concentración de las capas externas de un sólido, se puede compeler la humedad hacia la superficie. Usualmente solo podemos conjeturar sobre cuál de los mecanismos es el apropiado para cada sólido en particular, debiendo apoyarnos en el trabajo más o menos empírico de los regímenes experimentales de secado.

**Curvas fundamentales de secado.**

La cinética de secado de un material no es más que la dependencia de la humedad del material y de la intensidad de evaporación con el tiempo o variables relacionadas con este, como la propia humedad o las dimensiones del equipo.

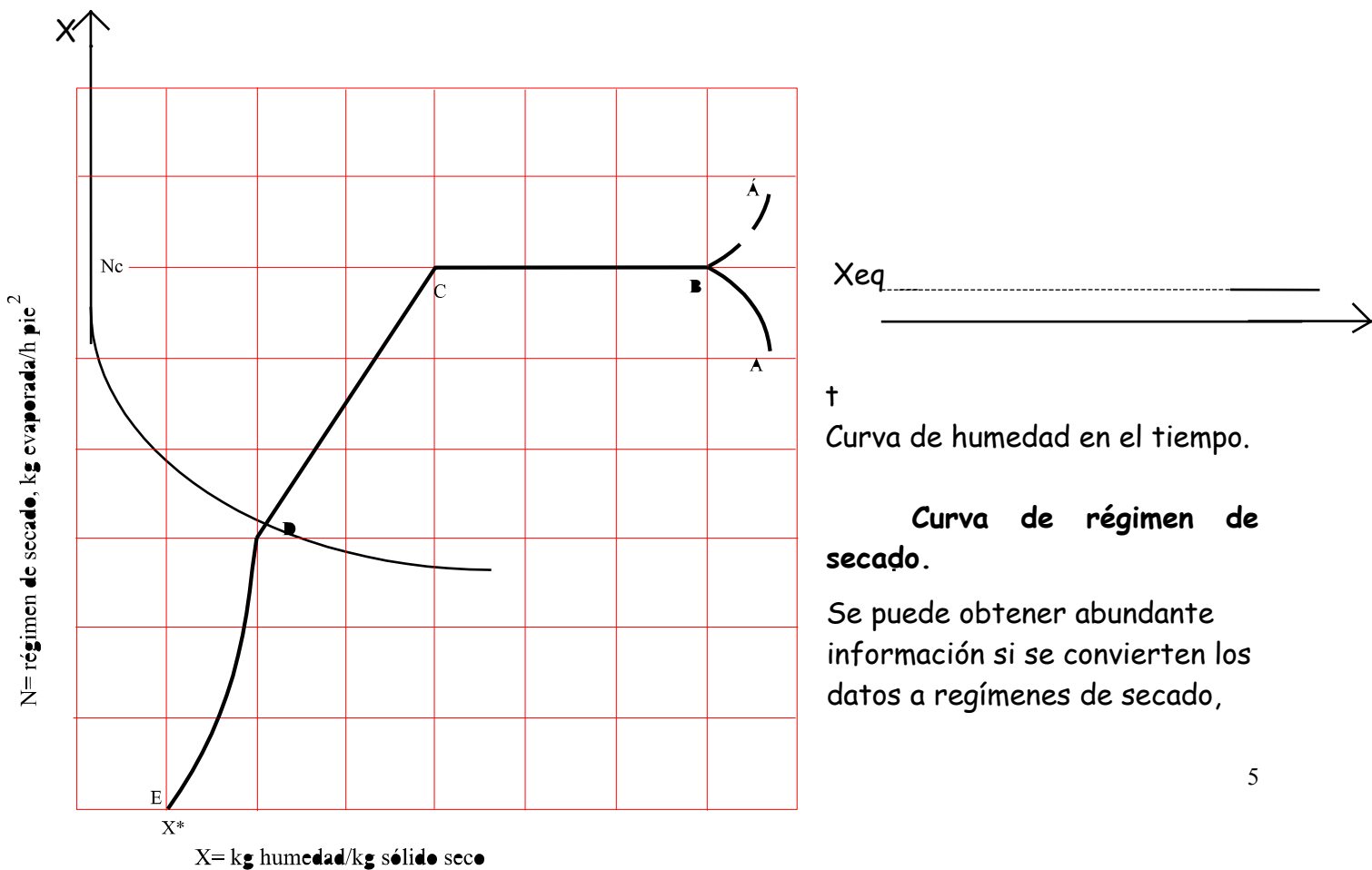
La intensidad de evaporación se determina a través de la velocidad de secado, que es el cambio de humedad (base seca) en el tiempo.

A partir de las curvas de cinética de secado ( $x$  vs  $t$ ,  $dx/dt$  vs  $x$ ), que deben ser obtenidas a nivel de laboratorio, puede tenerse una idea del tiempo de secado, del consumo de energía, del mecanismo de migración de humedad, de las condiciones predominantes en la transferencia de calor y masa y de la influencia que tienen en la velocidad de secado las variables del proceso tales como: temperatura, humedad de entrada, velocidad del aire, etc.

Por todo esto es que determinar las curvas de secado constituye uno objetivo fundamentales para entender el secado de los materiales.

**Curvas de secado.**

Con los datos obtenidos durante la prueba de secado o sea de la variación de la humedad con el tiempo, puede hacerse un gráfico de contenido de humedad en función del tiempo. Este será útil para la determinación directa del tiempo necesario en el secado discontinuo de grandes partidas bajo las mismas condiciones de secado.



expresados como  $N$  (lb de humedad evaporada/ h· pie<sup>2</sup>), y se lleva a un gráfico en función del contenido de humedad. Se puede hacer esto midiendo las pendientes a las tangentes trazadas a la curva de humedad contra tiempo, o por medio de la determinación en base a la curva, de pequeños cambios  $\Delta x$  en el contenido de humedad para los correspondientes cambios en el tiempo  $\Delta t$  y calculando el régimen de secado como:  $N = -L_s \cdot \Delta x / A \cdot \Delta t$ . Donde  $L_s$  es el peso del sólido seco y  $A$  es la superficie húmeda sobre la que sopla el gas y a través de la cual se lleva a cabo la evaporación en el caso del secado con circulación cruzada de aire.

Generalmente se pueden apreciar dos partes notorias de la curva de régimen de secado: un período de régimen constante y uno de caída de régimen, aunque teóricamente existen o se pueden apreciar tres etapas del proceso o períodos de secado.

Figura 3. Curva de velocidad de secado vs humedad.

**Etapas A-B:** Es una etapa de calentamiento (o enfriamiento) inicial del sólido normalmente de poca duración en la cual la evaporación no es significativa por su intensidad ni por su cantidad. En esta etapa el sólido se calienta desde la temperatura ambiente hasta que se alcance el equilibrio entre el enfriamiento por evaporación y la absorción de calor de los gases. Este equilibrio se alcanza a la temperatura de bulbo húmedo del gas.

**Etapas B-C:** Es el llamado primer período de secado o período de velocidad de secado constante; donde se evapora la humedad libre o no ligada del material y predominan las condiciones externas. En este período el sólido tiene un comportamiento no higroscópico. La velocidad de secado se mantiene constante si el gas tiene un estado estacionario y en general depende solo de las propiedades y velocidad del mismo. Si durante el proceso, el gas se enfría, la velocidad de secado decrece pero sigue en esta zona dependiendo de factores externos al sólido. Durante este período la temperatura del sólido se mantiene igual a la de bulbo húmedo del gas, ya que se mantiene el equilibrio alcanzado al final de la etapa de calentamiento.

**Etapas C-E:** Es el segundo período de secado o período de velocidad de secado decreciente; donde se evapora la humedad ligada del material y predominan las condiciones internas o las características internas y externas simultáneamente. En estas condiciones el sólido tiene un comportamiento higroscópico. Durante el período, la temperatura del material sobrepasa la de bulbo húmedo debido a que el descenso de la velocidad de secado rompe el equilibrio térmico que mantiene estable la temperatura y una parte considerable del calor se emplea en un calentamiento del sólido. Ahora la humedad deberá ser extraída del interior del material con el consiguiente incremento de la resistencia a la evaporación.

Este período de velocidad decreciente puede dividirse en dos partes, con diferentes comportamientos de la velocidad de secado, la cual decrece cada vez más al disminuir la humedad del sólido. Esto implica dos modelos de secado diferente en dicha zona.

Un parámetro muy importante a determinar en los materiales a secar es la humedad a la cual se cambia del primero al segundo período, llamada humedad crítica. Esta depende del tipo del material y de la relación de secado en el primer período.

La forma de la curva de secado en el segundo período varía en dependencia de las características del material a secar.

## **Equilibrio durante el secado.**

Si el material a secar se pone en contacto con el aire húmedo entonces en principio son posibles dos procedimientos:

- secado (desorción de la humedad del material ) siendo la presión parcial del vapor ( $p_m$ ) sobre la superficie del material superior a su presión parcial en el aire o el gas ( $p_v$ ), es decir para  $p_m > p_v$  ;
- humectación (sorción de la humedad del material) para  $p_m < p_v$ .

En el proceso de secado la magnitud  $p_m$  disminuye y se aproxima a su límite  $p_m = p_v$ . En este caso comienza el estado de equilibrio dinámico, al que corresponde la humedad límite del material, llamada humedad de equilibrio ( $X_{eq}$ ).

Los equipos utilizados para secar se pueden clasificar también de acuerdo a cualquiera de estas categorías:

Métodos de operación: Continuos ó Discontinuos.

Métodos de propiciar el calor necesario para la evaporación de la humedad: En secaderos directos e indirectos

Naturaleza de la sustancia a secar: Puede ser la sustancia un sólido rígido como la madera, un material flexible como el papel o la tela, un sólido granular tal como la masa de cristales, una pasta espesa o delgada o una solución. Es probable que la forma física de la sustancia y los distintos métodos de manipulación empleados, ejerzan la influencia más grande en el tipo de secadero a utilizar.

## **Tipos de secaderos.**

De acuerdo a la clasificación de la operación de secado encontramos los siguientes tipos de equipos (Treybal,1965):

- Secaderos de calentamiento directo.

a) Equipos discontinuos

- Secaderos de bandejas con corriente de aire.
- Secaderos de cama fluidizada.
- Secaderos con circulación a través del lecho sólido.

b) Equipos continuos

- Secaderos de túnel.
- Secaderos neumáticos.
- Secaderos ciclónicos.
- Secaderos de cama chorreada.
- Secaderos de cama vibratoria.
- Secadero de cama fluidizada.
- Secaderos sprays.
- Secaderos de tipo turbina.
- Secaderos rotatorios.

Secaderos de calentamiento indirecto:

a) Equipos discontinuos.

- Secaderos de bandejas a vacío.
- Secaderos de bandejas a presión atmosférica.

- Secaderos por congelación.
- b) Equipos continuos.
- Secaderos de tambor.
  - Secaderos con circulación a través del lecho.