

## **CAPITULO 5.**

### **PROCESO DE SECADO.**

#### **5.1 Descripción general del proceso de secado.**

El secado se describe como un proceso de eliminación de sustancias volátiles (humedad) para producir un producto sólido y seco. La humedad se presenta como una solución líquida dentro del sólido es decir; en la microestructura del mismo. Cuando un sólido húmedo es sometido a secado térmico, dos procesos ocurrirán simultáneamente:

1. Habrá transferencia de energía (comúnmente como calor) de los alrededores para evaporar la humedad de la superficie. (proceso 1)
2. Habrá transferencia de la humedad interna hacia la superficie del sólido. (proceso 2)

La velocidad a la cual el secado es realizado esta determinada por la velocidad a la cual los dos procesos, mencionados anteriormente, se llevan a cabo. La transferencia de energía, en forma de calor, de los alrededores hacia el sólido húmedo puede ocurrir como resultado de convección, conducción y/o radiación y en algunos casos se puede presentar una combinación de estos efectos. [22]

#### **5.2 Condiciones externas.**

Este caso se refiere al proceso<sup>1</sup>, donde, la eliminación de agua en forma de vapor de la superficie del material, depende de las condiciones externas tales como: temperatura, humedad y flujo del aire, área de la superficie expuesta y presión. Estas condiciones son importantes durante las etapas iniciales de secado cuando la humedad de la superficie esta siendo removida. En algunos materiales puede haber encogimiento, excesiva evaporación en la superficie, después de que la humedad inicial ha sido removida dando lugar a altos gradientes de humedad del interior a la superficie. Este fenómeno es causado por el sobresecado y encogimiento y consecuentemente las altas tensiones dentro del material, dando como resultado agrietamiento y deformación. [22]

### **5.3 Condiciones internas.**

El movimiento de humedad dentro del sólido es una función de la naturaleza física dentro del sólido, la temperatura y su contenido de humedad. En una operación de secado cualquiera de estos procesos puede ser el factor que determine la velocidad de secado.

A partir de la transferencia de calor hacia un sólido húmedo, un gradiente de temperatura se desarrolla dentro del sólido mientras la evaporación de la humedad ocurre en la superficie. La evaporación produce una migración de humedad desde adentro del sólido hacia la superficie, la cual ocurre a través de uno o más mecanismos, normalmente, difusión, flujo capilar, presión interna causada por el encogimiento durante el secado. [22]

### **5.4 Mecanismo de secado.**

Hay dos métodos para remover la humedad:

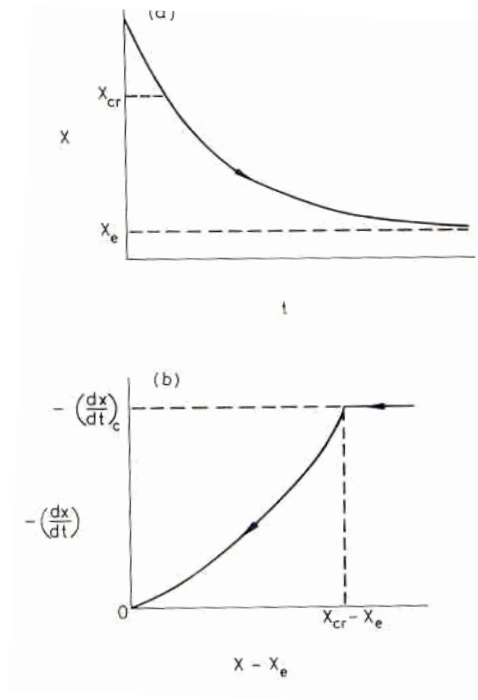
1. Evaporación. Esta ocurre cuando la presión del vapor de la humedad en la superficie del sólido es igual a la presión atmosférica. Esto se debe al aumento de temperatura de la humedad hasta el punto de ebullición. Si el material que está siendo secado es sensible al calor, entonces la temperatura a la cual la evaporación ocurre, la temperatura puede ser disminuida, bajando la presión (evaporación al vacío). Si la presión disminuye más allá del punto triple, entonces la fase líquida no puede existir y la humedad en el producto es congelada.
2. Vaporización. El secado es llevado a cabo por convección, pasando aire caliente sobre el producto. El aire es enfriado por el producto y la humedad es transferida hacia el aire. En este caso la presión del vapor de la humedad sobre el sólido es menor que la presión atmosférica. [22]

### **5.5 Cinética del secado.**

Si un lote de polvo o granos húmedo es secado en un lecho fluidizado y el contenido de humedad  $X$  (definido como peso de agua por unidad de peso de sólido seco) es determinado como una función de tiempo  $t$ , la curva resultante de  $X$  contra  $t$  será igual a la curva de la figura 5.1a.

Esta es convencionalmente dividida en dos partes, el primero llamado periodo de velocidad constante de secado y el segundo velocidad decreciente de secado. El contenido de humedad en el punto de transición entre los dos periodos es llamado contenido crítico de humedad  $X_{cr}$ . Si el secado continúa más tiempo,  $X$  se aproximará al contenido de humedad  $X_e$ , correspondiente a la humedad de equilibrio. En cualquier punto de la curva, la

cantidad de humedad removible permaneciente ( $X - X_e$ ) se conoce como el contenido de humedad libre.



**Figura 5.1** Ejemplo de curvas de secado y velocidad de secado [23].

La velocidad de secado,  $-dX/dt$ , puede ser determinada en cualquier punto derivando la curva de  $X$  contra  $t$ . Una grafica de  $-dX/dt$  contra el contenido de humedad libre ( $X - X_e$ ) es una forma alterna de representar el secado característico de un material tal y como se muestra en la figura 5.1b.

Como un método aproximado, el periodo de velocidad constante puede ser considerado como correspondiente a la humedad removida de la superficie de las partículas, mientras

que el periodo de velocidad decreciente corresponde a la eliminación de la humedad interna [23].

### **5.6 Velocidad constante de secado.**

La superficie contiene humedad, la vaporización se lleva a cabo a partir de ahí. En esta etapa de secado se lleva a cabo la difusión del vapor del agua a través de la interfase aire/humedad y la velocidad a la cual la superficie por difusión es eliminada. Hacia el final del periodo constante, la humedad tuvo que ser transportada del interior del sólido hacia la superficie por fuerzas capilares. Cuando el promedio del contenido de humedad ha alcanzado el contenido de humedad crítico  $X_{cr}$ , la película de humedad en la superficie ha sido tan reducida por evaporación que más allá del secado causa distorsiones más allá de la superficie, entonces, el proceso se controla por las resistencias exteriores.[22].

### **5.7 Velocidad decreciente de secado.**

La velocidad a la cual la humedad puede pasar a través del sólido como resultado de la concentración de gradientes entre las partes más profundas y la superficie es el paso a controlar. Dado que, la profundidad media del nivel de humedad incrementa progresivamente y la conductividad de calor de las zonas externas secas es muy pequeña, la velocidad de secado es cada vez más influenciada por la conducción de calor. Sin embargo, si el producto seco tiene una densidad alta y cavidad pequeña con poros pequeños, el secado es determinado no tanto por la conducción de calor pero, si por una resistencia alta a la difusión dentro del producto. Como la concentración de humedad disminuye por el secado, la velocidad de movimiento de humedad interna también disminuye [22].

## **5.8 Determinación del contenido de humedad.**

### **5.8.1 Métodos directos.**

Estos consisten esencialmente en la determinación del contenido de humedad de una muestra de secado llevada a cabo en un horno de secado con o sin soplado a través de aire, o por secado en una cámara de vacío o en su defecto en un desecador de vacío. La muestra de material tiene que ser preparada en cada caso de la siguiente manera: el material es desintegrado en piezas de 1-2 mm<sup>3</sup>, y una muestra con masa de 4-5 g es colocada dentro de un previamente secado y pesado contenedor de vidrio, el cual es colocado dentro de la cámara de secado y secar a 102-105 °C. La medida de la masa es llevada a cabo a temperatura ambiente, no sin antes dejar que la muestra sea enfriada en el desecador.

El proceso de secado puede considerarse completo cuando la diferencia entre el valor obtenido por el contenido de humedad del material en dos medidas consecutivas no exceda  $\pm 0.05\%$ . La literatura indica que este proceso es más rápido cuando se lleva a cabo a 130-150 °C. Sin embargo, investigaciones probaron los resultados obtenidos de esta manera pueden variar 0.5-1.0%. Así, el método rápido parece ser conveniente solo para determinación aproximada del contenido de humedad del material. [22]

### **5.8.2 Métodos indirectos.**

En el caso particular de las industrias, el contenido de humedad presente en el material tiene que ser determinado por métodos más rápidos que los métodos directos. Ejemplos de métodos indirectos son los siguientes: métodos eléctricos de los cuales tres han llegado a ser muy difundidos: determinación de humedad basado en el cambio de la resistencia DC,

medida de capacitancia electrostática (constante dieléctrica del material), y la medición de la pérdidas en un campo de AC. Otros métodos rápidos son los métodos químicos desarrollados principalmente para la mayoría de los casos, cuando la humedad es agua, tal es el caso del análisis de Kart-Fischer basado en reacción química del yodo en la presencia de agua, y el método de extracción el cual es llevado a cabo con etanol. [22]

### **5.9 Clasificación y selección de secadores.**

La selección del contenido final de humedad es principalmente dictada por los requerimientos de almacenamiento y estabilidad. El contenido final de humedad determina el tiempo de secado y las condiciones requeridas para el proceso. Los gradientes de humedad interna dentro de las partículas y la variación del contenido de humedad entre las partículas son importantes. Las restricciones de temperatura pueden aumentar a causa de la degradación térmica, cambios de fase, decoloración y manchas, flamabilidad de polvos, entre otros factores. La sensibilidad térmica fija la temperatura máxima a la cual la sustancia puede ser expuesta durante el tiempo de secado. [22]

La primera subdivisión esta basada en métodos de transferencia de calor:

1. Conducción de calor.
2. Convección de calor.
3. Radiación de calor.
4. Calefacción dieléctrica.

La siguiente subdivisión esta basada en el tipo de recipiente secador:

1. Bandeja.

2. Tambor rotatorio.
3. Lecho fluidizado.
4. Neumático
5. Spray.

## **5.10 Información experimental sobre cinética de secado en lechos fluidizados.**

### **5.10.1 Efecto de la profundidad del lecho en la velocidad de secado.**

Mostafa, 1977 (citado por D. Reay y C. G. J. Baker) estudio el secado de silica gel en un lecho fluidizado de 0.10 m de diámetro. Midió la temperatura del lecho y la humedad del aire como una función de la altura arriba del placa distribuidora, indico que tanto en el periodo de velocidad constante como en el de velocidad decreciente, el secado fue ocurriendo solamente a cualquier punto en el fondo 0.02 m del lecho. Incrementando la altura del lecho de 0.05 m a 0.20 m no hubo diferencias significativas para el grado de humedad del gas. Sin embargo, la humedad relativa del gas que sale del lecho fue sustancialmente menor que la humedad relativa en equilibrio correspondiente al contenido de humedad del sólido predominante.

Por lo tanto, tomando en cuenta lo anterior se deduce que, en materiales como: silica gel el cual pierde agua fácilmente y con ello la mayoría del secado se logra dentro de una distancia corta respecto al distribuidor, y el gas que sale de fase densa esta probablemente cerca del equilibrio con los sólidos; por otro lado, incrementando la profundidad del lecho arriba de la zona de secado no hay incremento significativo en la velocidad de secado. [23]



### **5.10.2 Efecto del tamaño de partícula en la velocidad de secado.**

En los experimento con silica gel, Mostafa, 1977 (citado por D. Reay y C. G. J. Baker) descubrió que incrementando el diámetro de partícula  $d_p$  de 106 a 2247  $\mu\text{m}$  se obtiene un ligero incremento en la velocidad de secado. Los experimentos fueron ejecutados a la misma velocidad de gas, altura y temperatura de lecho. En contraste, Venecek y Picka, 1964 (citados por D. Reay y C. G. J. Baker), en sus experimentos con fertilizante NPK, encontraron que el tiempo para eliminar una cantidad dada de humedad fue proporcional al cuadrado del diámetro de la partícula. [23]