

CAPÍTULO 4

PROCESO DE SECADO

Introducción

El secado con aire caliente por medio de la fluidización se ha utilizado ampliamente desde 1948 [2] y se usa actualmente esta técnica para secar minerales molidos, arena, polímeros, fertilizantes, fármacos, materiales cristalinos y muchos otros materiales. Las razones principales por la cual el secado por fluidización es tan popular son:

- a) Contacto eficiente de gas y sólido permite unidades compactas y relativamente bajos costos de capital combinado con una relativa alta eficiencia térmica.
- b) El manejo de las partículas es bastante gentil comparado con algunos otros tipos de secadores.
- c) La carencia de partes móviles, como alimentación y descarga de material, hace que los costos de mantenimiento sean muy bajos.

Una de las limitantes en el secado por fluidización es la elección de materiales fluidizables, algunos materiales tienden a aglomerarse o simplemente no fluidizan, algunas técnicas permiten ampliar la fluidización a algunos materiales dado que implementan mecanismos de vibración.

El secado es el objetivo principal de este trabajo por lo que hay que entender cuales son los principios de este fenómeno.

Los materiales húmedos consisten en dos fases la fase sólida o esqueleto y la fase líquida. La fase sólida puede tener muchas propiedades físicas, químicas, estructurales, mecánicas, biomecánicas y muchas otras propiedades que pueden afectar el secado del

material, estas propiedades también afectan la técnica y la tecnología utilizada en proceso de secado.

En el secado, las graficas utilizadas son una herramienta muy útil y de gran importancia por que de ellas puede mostrarse el comportamiento del secado y servirá a esta tesis para determinar el efecto de la porosidad.

Parámetros de Materiales Mojados

El primer parámetro es el contenido de humedad la cual puede ser definida de dos maneras como explica Strumillo y Kudra [34].

Base seca:

$$X = \frac{m_A}{m_S} = \frac{\text{Kg de humedad}}{\text{Kg de material seco}} \quad (4.1)$$

Base húmeda

$$X' = \frac{m_A}{m} = \frac{m_A}{m_A + m_S} = \frac{\text{Kg de humedad}}{\text{Kg de material mojado}} \quad (4.2)$$

En el secado existen algunos valores característicos que identifican estados en el contenido de humedad.

Equilibrio en el contenido de humedad (*equilibrium moisture content*) e.m.c. La humedad que esta en equilibrio con el vapor contenido en el agente de secado. Este es el mínimo contenido de humedad en la cual un material puede teóricamente ser secado. También es llamado: *contenido mínimo de humedad higroscópica*.

Contenido crítico de humedad (*critical moisture content*) c.m.c. Es una humedad característica ocurre un cambio en las condiciones de secado en las cuales pasa del secado a velocidad constante a la velocidad decreciente de secado.

Contenido máximo de humedad (*maximum moisture content*). Esta es el contenido máximo de humedad en el cual todos los vacíos están llenos de humedad.

Contenido inicial de humedad (*inicial moisture content*). El contenido de humedad al comienzo del secado.

Contenido máximo de humedad higroscópica (*maximum hygroscopic moisture content*). Esta es el equilibrio en el contenido de humedad del sólido cuando la humedad del ambiente está saturada.

Equilibrio en el Secado

Investigaciones han demostrado que la humedad atrapada en pequeños poros ejerce una presión de vapor menor a la del puro líquido a cierta temperatura. Este efecto se muestra en la ecuación de Kelvin.

$$\ln j = -\frac{2s}{r} \frac{M}{rRT} \quad (4.3)$$

A este tipo de sólidos que presentan propiedades de higroscopia puede ser interpretado por el modelo de sorpción. El símbolo f es la humedad gaseosa relativa. Esto se refiere a la humedad relativa de sorpción arriba de 0.2 donde la formación de una capa monomolecular de moléculas de agua en las paredes de los poros. Para una mayor humedad relativa ($0.2 < f < 0.6$) se forman capas multimoleculares; sucesivamente más capas en la

monocapa. Arriba de $f > 0.6$ en humedad relativa el proceso de condensación capilar toma efecto esto es el poro se encuentra lleno de agua.

Clasificación de Materiales

Los materiales húmedos pueden ser divididos en tres grupos de acuerdo a su comportamiento en el secado.

1. Cuerpos coloidales (gels elásticos) Los cuales cambian de tamaño pero conservan sus propiedades elásticas durante el secado (gelatina, agar).
2. Cuerpos capilares porosos (gels quebradizos) Los cuales se vuelven quebradizos, se encogen ligeramente como: arena y carboncillo.
3. Cuerpos coloidal-capilar porosos los cuales tienen propiedades de ambos tipos. Las paredes de las capilares son elásticos y se hinchan durante la humidificación como madera, piel, cartón, etc.

La última clasificación propuesta arriba tiene un carácter convencional dado que los poros capilares-coloidales son poros capilares aunque su estructura sea coloidal sus propiedades son capilares. Sin embargo cuerpos coloidales son una colección de muchas partículas finas ($0.1 - 0.001 \mu\text{m}$) y pueden ser tratados como poros capilares.

Lo siguiente es diferenciar entre poros capilares y coloidales, un acercamiento es en el cual se les llama poros capilares a los que el radio de los poros es menor a 10^{-5}m . La humedad en tales cuerpos es mantenida principalmente por la tensión superficial. Si el radio de los poros es mayor a 10^{-5}m , las fuerzas gravitacionales deben ser tomadas en cuenta y tales cuerpos son llamados porosos [34].

Debido a los mecanismos de movimiento de fases de líquidos y gases, se dividen las capilaridades en dos tipos: **microcapilares** con radii menor a 10^{-7} m. El valor de 10^{-7} es del mismo orden de las líneas de flujo libre del vapor de agua a presión atmosférica. En microcapilares en el cual las líneas de flujo son mayores que el radio de capilaridad, el gas es transportado por difusión ordinaria. En microcapilares, los tubos capilares son llenados con líquido debido a la adsorción del vapor en paredes capilares con una capa monomolecular alrededor de 10^{-7} m de espesor. Y los **macrocapilares** los cuales son llenados con líquido solo cuando estos están en contacto directo con el líquido, esto quiere decir que no absorben agua del ambiente, por el contrario liberan la humedad al ambiente.

Debido a que en el laboratorio de la universidad no contamos con dispositivos para determinar el radio de los poros, simplemente tendremos en cuenta el efecto de partículas cada vez más porosas. La porosidad la mediremos con una técnica comentada mas adelante en el capítulo 6 referente a porosidad.

Tipos de Humedad en Sólidos

Humedad superficial. Este es el líquido que existe en la capa externa del material debido a los efectos de tensión superficial.

Humedad, desatado, libre o capilar. Toda la humedad interna en un material no-higroscópico está suelta. En un material higroscópico donde la presión del vapor actual es función del valor saturado $p_A = j p_{A eq}(T)$ hay humedad en exceso en el contenido de la humedad de equilibrio correspondiente a la humedad de saturación.

Humedad desatada puede ser presentada en dos maneras

- Estado funicular: Un estado de líquido continuo existe en el cuerpo poroso
- Estado pendular: El líquido a lo largo y entre partículas discretas es discontinuo, así que la humedad esta mezclada con burbujas de aire.

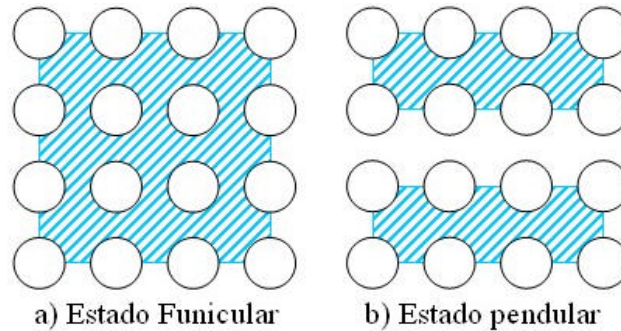


Figura 4.1 Estado de humedad desatada, libre o capilar

Humedad atada, higroscópica o disuelta. Este es el líquido el cual ejerce presión de vapor menor que la de puro líquido a cierta temperatura provocada por la retención en poros pequeños, solución en paredes celulares, químicas o adsorción física.

Propiedades Mecánicas de Materiales Mojados

La determinación de la humedad en un material puede ser un trabajo muy arduo de identificar por lo que se introducen parámetros para estimar y cuantificar los huecos llamados poros o capilaridades, unos de los parámetros más importantes son:

- La porosidad. Que es el cociente del volumen total de huecos sobre el volumen total del cuerpo.

$$e = \frac{V_{voids}}{V_p} \quad (4.4)$$

- Tortuosidad. Es el cociente de la dimensión del cuerpo en cierta dirección sobre la longitud del camino atravesado por el componente en el proceso de difusión.

$$z = \frac{L}{L_D} \quad (4.5)$$

- Factor de forma de poro. Este parámetro caracterizado por la desviación del canal de forma de la difusión cuando se compara con un cilindro.

Mecanismos del Proceso de Secado

Tipos de Migración de Humedad

La migración de humedad toma parte en fase líquida y gaseosa y se distinguen los siguientes tipos de humedad.

Transporte por difusión líquida. En este tipo de transporte de humedad se asume que la velocidad de transferencia de la humedad líquida es proporcional al gradiente de la concentración de humedad dentro del material.

Transporte por difusión de vapor. Este es el principal mecanismo de transferencia de humedad por vapor en el material. Toma lugar cuando la dimensión característica de los espacios del aire libre son mayores a 10^{-7} m.

Transporte por efusión (o difusión tipo Knudsen). Toma lugar cuando la dimensión característica del espacio del aire en un material capilar-poroso es menor a 10^{-7} m.

Transporte por termodifusión. La cual es la transferencia de humedad debida al cambio de temperatura en una dirección tomando en cuenta el coeficiente de termodifusión.

Transporte por fuerzas capilares. Si el número de capilaridades con varios radii forman canales interconectados entonces se crea una diferencia en presión capilar la cual da como resultado una redistribución de la humedad de los capilares grandes a los pequeños por succión capilar.

Transporte por presión ósmica. La presión ósmica es una función del contenido de humedad en el material.

Transporte debido al gradiente de presión. Este tipo de transporte se debe a que ciertas presiones internas varían debido a que la humedad se evapora, cambia de lugar o ha sido transportada. La humedad debe de compensar el cambio de presión y se genera el transporte.

Existen otros tipos de transporte que a su vez se entre lazan un ejemplo es: *transporte debido a la gravedad, presión interna, encogimiento o presión externa.*

Condiciones de Secado Externas e Internas

Sabemos que las condiciones externan tienen que ver directamente con la remoción de humedad por evaporación en la superficie de la partícula hacia el aire del ambiente. A su vez los factores internos se ven alterando la migración de la humedad.

Por supuesto que los factores dependen directamente del material a secar y del agente de secado, esto genera una relación con la transferencia de la masa.

Las condiciones externas. La resistencia de transferencia de masa en la capa límite de gas es mayor que la resistencia de la migración de humedad interna, así que la intensidad de secado depende principalmente de las condiciones de la parte de gas y es casi independiente de los parámetros del material. El proceso de secado controlado por el calor y el balance de masa en la superficie del sólido. En otras palabras la resistencias externas en la transferencia de masa hacia el aire (en la capa límite) es mayor a las resistencias internas. Las resistencias externas casi no dependen de las propiedades del material dado que se

encuentran fuera de las partículas si no del balance de masa y calor en la superficie del sólido.

Las condiciones internas. Aquí las resistencias de la transferencia de masa a través del material son mayores que la resistencia de difusión de la capa límite de gas, los parámetros de los materiales húmedos tienen una gran influencia en la velocidad del secado.

Condiciones internas/externas. Las resistencias en la transferencia de masa en el agente de secado y en los materiales húmedos son del mismo orden, los parámetros de los materiales húmedos, así como las del agente de secado deben ser considerados.

Se puede describir cual de las condiciones predomina más, esto es usando el número de Biot tanto de calor como de masa y se dice que [51]:

Si $Bi < 0.2$ las condiciones externas predominan

Si $Bi > 50$ las condiciones internas predominan y

Si $0.2 < Bi < 50$ Ambas condiciones predominan.

Donde el número de Biot de la masa es:

$$Bi = \frac{k_g R_s}{D_{eff}} \quad (4.6)$$

De aquí k_g es coeficiente externo de transferencia de masa, R_s es radio de la partícula y D_{eff} es la difusividad efectiva de la humedad.

Características de un Proceso de Secado

Cuando unas partículas contienen humedad y la humedad sobre pasa el 30%, esto quiere decir que la humedad ha llenado completamente todos los micro y macro capilares, la

humedad excede el espacio de los capilares y forma una capa delgada de agua sobre la superficie de la partícula.

Cuando comienza el secado y el contenido de humedad es mayor que el contenido de humedad higroscópico. La velocidad de secado es casi constante debido a que la intensidad del secado es igual a la intensidad de evaporación de la superficie libre del líquido. Cuando la capa superficial de líquido está completamente evaporada, el proceso termina en los capilares. Así la intensidad de secado puede ser mayor, esto es por que la evaporación actual en la superficie puede ser mayor (debido a la presión de vapor ejercida por el material higroscópico).

Si el contenido de humedad es menor que el higroscópico, la velocidad de secado decrece, principalmente debido a la retención de la superficie de evaporación (control de la región de difusión interna).

Hay que tomar en cuenta que el efecto de enfriamiento por evaporación cesa y la temperatura de la superficie del material empieza a incrementarse gradualmente casi hasta la temperatura del agente de secado.

Transferencia de Calor y Masa entre el Material y el Agente de Secado: Condiciones

Externas

Para los cálculos de transferencia de calor por convección y la transferencia de masa usamos las siguientes ecuaciones:

$$q = h(T_s - T_g) \quad (4.7)$$

$$w = k(r_s - r_g) \quad (4.8)$$

Los índices de las ecuaciones 4.7 y 4.8 son *s* para superficie y *g* para gas húmedo.

Existen dos maneras de obtener los coeficientes para las ecuaciones de arriba; el primero de los métodos es basado en encontrar las relaciones analíticas adecuadas de los datos empíricos o por una aproximación de las soluciones usando ecuaciones diferenciales describiendo la transferencia de calor y masa. El segundo de los métodos es usando las bases teóricas que pueden ser encontradas en libros de texto en transferencia de calor y mecánica de fluidos.

La transferencia de calor entre materiales mojados y un agente seco depende de muchos parámetros externos, la influencia de estos factores está incluida en la aplicación de los números adimensionales adecuados.

Transferencia de Calor		
<i>Convección forzada</i>	$Nu = f_1(Re, Pr, Gu)$	(4.9)
<i>Convección libre</i>	$Nu = f_2(Gr, Pr)$	(4.10)
Transferencia de Masa		
<i>Convección forzada</i>	$Sh = f_3(Re, Sc, Gu)$	(4.11)
<i>Convección libre</i>	$Sh = f_4(Gr', Sc)$	(4.12)

Aplicando estas condiciones a la fluidización, se han propuesto las siguientes ecuaciones para la transferencia de calor.

La ecuaciones de Kunii y Levenspiel [35] para $0.1 < Re < 80$ y $Pr \sim 0.7$

$$Nu = 0.03Re^{1.3} \quad (4.13)$$

y las ecuaciones de Syromyatnikov *et al* [36] que nos dan las siguientes relaciones

$$Nu = 0.0133Re^{1.6} \quad \text{para } 0 < Re < 80 \quad (4.14)$$

$$Nu = 0.316Re^{0.8} \quad \text{para } 80 < Re < 500 \quad (4.15)$$

Para la transferencia de masa, de acuerdo con los estudios de Richardson y Szakely [37] para $Sc \sim 0.6$.

$$Sh = 0.374Re^{1.8} \text{ para } 0.1 < Re < 15 \quad (4.16)$$

$$Sh = 2.01Re^{0.5} \text{ para } 15 < Re < 500 \quad (4.17)$$

También en ciertos casos puede considerarse los efectos de radiación y conducción que afectan la transferencia de calor.

Transferencia de Calor por Conducción en el Material a Secar: Condiciones Internas

Conductividad de calor en la estructura del material seco.

Asumamos dos casos limitantes de conducción de calor en materiales porosos, son los arreglos paralelos y perpendiculares de las capas de aire. La transferencia de calor será expresada en las relaciones siguientes.

1. Para un arreglo paralelo

$$Q_{t1} = A \frac{I_1}{b} (T_1 - T_2) \quad (4.18)$$

2. Para un arreglo perpendicular

$$Q_{t2} = A \frac{I_2}{b} (T_1 - T_2) \quad (4.19)$$

Donde b es el espesor del cuerpo poroso in dirección de la transferencia de calor. El coeficiente de transferencia de calor puede ser calculado de las siguientes ecuaciones para ambos casos.

$$I_1 = (1 - e)I_s + I_B \quad (4.20)$$

$$I_2 = \frac{1}{\frac{(1-e)}{I_S} + \frac{e}{I_B}} \quad (4.21)$$

Donde los índices de los coeficiente S y B indican *sólido* (esqueleto seco) y *gas seco* respectivamente.

Podemos observar en la Figura 4.2 los valores para los coeficientes de transferencia de calor.

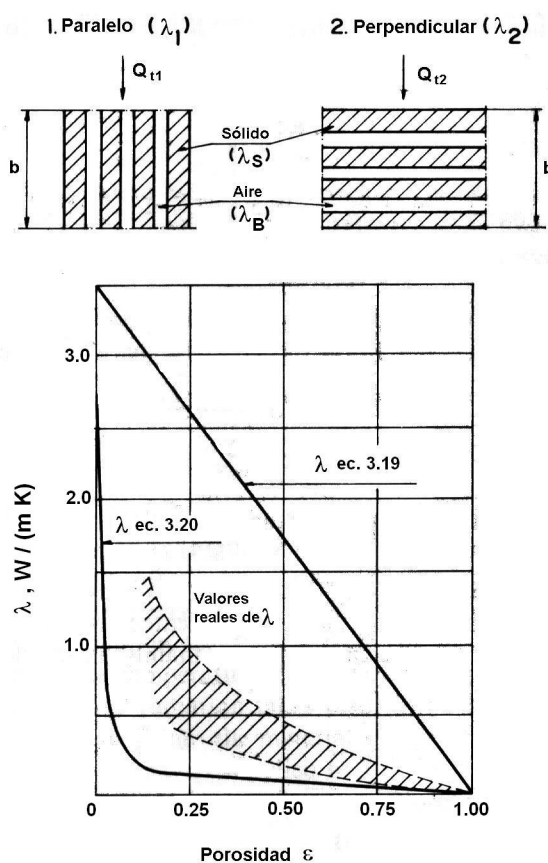


Figura 4.2 Rango de valores posibles de conductividad térmica para materiales porosos (origen mineral) [34]

Generalmente podemos establecer que para materiales fibrosos o porosos el coeficiente aparente de conducción de calor depende sólo ligeramente del valor real del coeficiente de conducción de calor del sólido.

Conducción de Calor en Materiales con Humedad Saturada (Estado Funicular)

En vez del coeficiente de conducción de calor para el aire seco λ_B , el coeficiente correspondiente para líquido saturado λ_{Al} debe ser usado en la forma presentada para esqueletos de materiales secos, ecuaciones 4.20 y 4.21. Las ecuaciones quedan entonces como:

$$I_1 = (1 - e)I_s + I_{Al} \quad (4.22)$$

$$I_2 = \frac{1}{\frac{(1 - e)}{I_s} + \frac{e}{I_{Al}}} \quad (4.23)$$

Conducción de Calor en Materiales con Humedad no Saturada (Estado Pendular)

En este caso las siguientes formas de transferencia de calor y coeficiente λ son posibles.

- Transferencia de calor a través del esqueleto del sólido, λ_s
- Transferencia de calor a través del líquido, λ_{Al}
- Transferencia de calor por evaporación y condensación de la humedad del líquido en el espacio interno del poro (transferencia de calor por difusión de vapor debe ser considerado), λ_D
- Transferencia de calor por conducción de mezcla vapor-aire (λ_g) en el espacio interno del poro encerrado por paredes secas del poro (sin evaporación y condensación).

Cinética del Secado: Características Generales

En la cinética del secado basan los estudios en los cambios de la cantidad promedio de humedad con el tiempo, contrario a lo que describe la dinámica del secado que describe los cambios de temperatura y humedad.

Así la cinética del secado describe la cantidad de humedad evaporada, el tiempo, el consumo de energía, etc. Sin embargo, el cambio de humedad depende de la transferencia de calor y de masa entre la superficie del cuerpo, el ambiente y el interior del material a secar.

Es indispensable saber que la intensidad del secado refleja el cambio en la cantidad de humedad a través del tiempo, que es influenciado por los parámetros del secado como, temperatura, humedad, velocidad relativa del aire, presión total, etc.

Existen modelos que explican este fenómeno uno de los cuales se puede expresar en una forma simplificada donde se trata de una esfera, que trasforma el calor suministrado en la disminución de humedad, la ecuación de balance de energía tiene la siguiente formula:

$$h p d_p^2 y (T_g - T_s) = N \frac{p d_p^3}{6} r_s \Delta H \quad (4.24)$$

Donde:

$$N = \frac{6 h y (T_g - T_s)}{r_s d_p \Delta H} \quad (4.25)$$

De la ecuación 4.25 puede verse que la velocidad del secado crece con el decremento del diámetro de la partícula y un incremento en la temperatura del gas así como la velocidad de calentamiento (determinado por el coeficiente de transferencia de calor, h) de donde la ecuación de Froessling puede ser manipulada y mostrada como:

$$h \approx \frac{u_g^{0.5}}{d_p^{0.5}} \quad (4.26)$$

y

$$N \approx T_g \frac{u_g^{0.5}}{d_p^{1.5}} \quad (4.27)$$

Donde u_g es la velocidad del superficial del gas [m/s], d_p es el diámetro de la partícula [m], T_g es la temperatura del gas (húmedo) [K]. En las ecuaciones 4.26 y 4.27 como se puede observar las unidades no son consistentes, esto es debido a que la contribución de los demás parámetros es insignificante y los valores de los parámetros más significativos dan una aproximación a las ecuaciones.

Para un mayor entendimiento de las ecuaciones hay que saber que h es el coeficiente de transferencia de calor, d_p es el diámetro de la partícula, ϕ es el factor de forma, T_g es la temperatura del gas húmedo, T_s es la temperatura de la superficie, ρ_s es la densidad del sólido y H es el calor latente.

El secado es afectado también por factores externos como impurezas que alteran el equilibrio del secado al interactuar con la superficie de las partículas. En el caso de sistemas dispersos, la interacción entre las partículas y entre las paredes del equipo son importantes y significativas porque también afectan la superficie de las partículas.

Generalidades de las Curvas de Secado

Un proceso de secado es usualmente descrito por diagramas construidos con los siguientes coordenadas.

1. Contenido de humedad del material *contra* Tiempo de secado (**Curva de secado**).
2. Velocidad de Secado *contra* Contenido de humedad del material (**Curva de velocidad del secado**).
3. Temperatura del material *contra* Contenido de humedad (**Curva de temperatura**).

Estas curvas son obtenidas bajo condiciones de laboratorio donde se mide el cambio de masa y temperatura con el tiempo a base de muestreo. El proceso de secado es obtenido con estado estable teniendo T_g , u_g y Y como constantes. Usando aire caliente como el agente de secado. La letra Y es el contenido de humedad absoluta de masa en el aire. Esto quiere decir el peso de masa de vapor de agua *por* peso de masa de aire seco.

$$Y = \frac{m_A}{m_B} = \frac{\text{Kg de vapor de agua}}{\text{Kg de aire seco}} \quad (4.28)$$

Curva de Secado

Este tipo de curva nos muestra el contenido de humedad a través del tiempo en el proceso de secado. En el periodo inicial de secado, el cambio de humedad en el material está ilustrado en la curva A-B. Al terminar este primer periodo el secado toma una forma lineal del tipo $X = f(t)$, en este periodo la velocidad de secado es constante (recta B-C). El secado se mantiene igual por un periodo de tiempo hasta que llega a un punto crítico (Punto C) donde la línea recta tiene a curvarse y a formar una asíntota con el contenido de humedad X_{eq} donde es el valor mínimo de humedad en el proceso de secado esto quiere decir que el punto E jamás es tocado.

La recta (B-C) es llamado *el periodo de velocidad de secado constante*, y al siguiente periodo de secado se conoce como *el periodo de caída de velocidad del secado*.

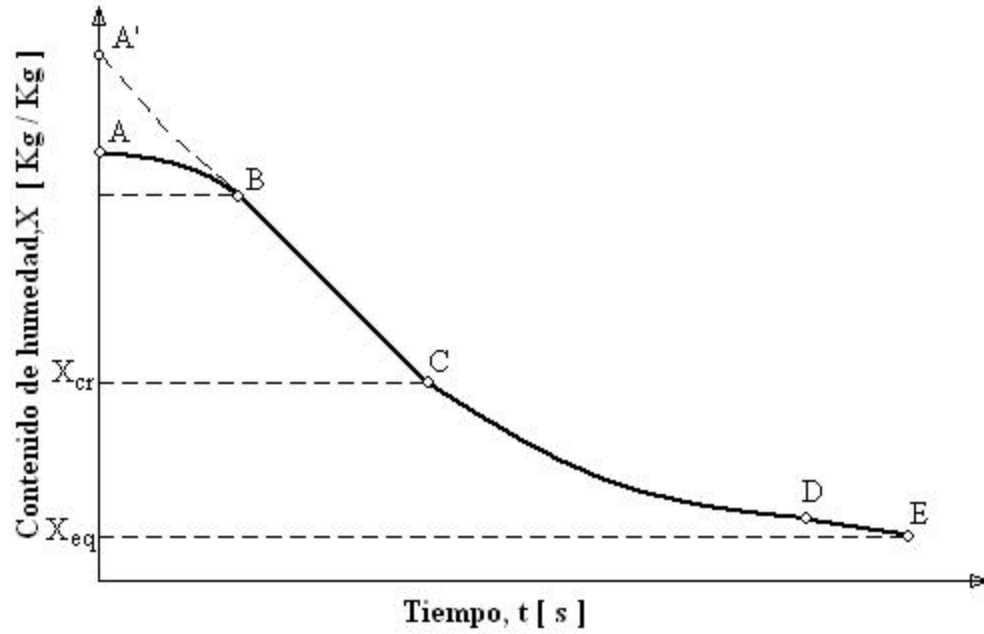


Figura 4.3 Curva de secado

Curva de Velocidad de Secado

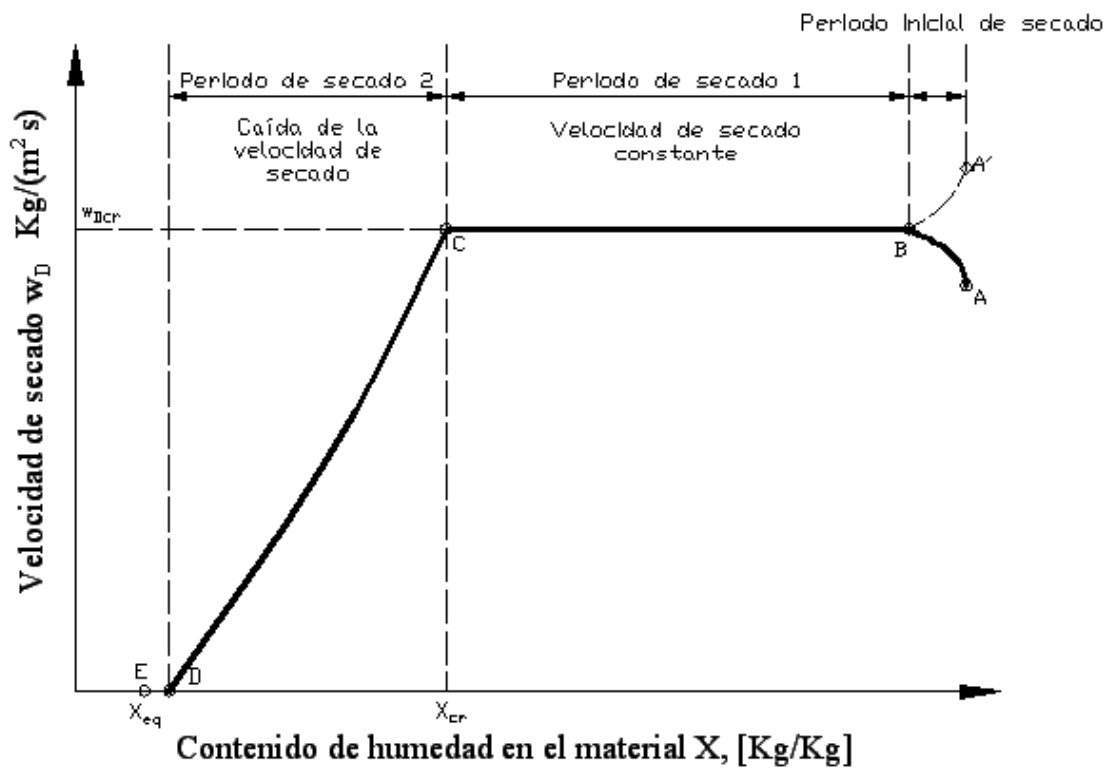


Figura 4.4 Curva de velocidad de secado

Este tipo de curva indica con que velocidad se seca el material. Este diagrama es muy útil para diferentes propósitos. Este diagrama tiene la función $w_D = f(X)$, donde muestra la cantidad de humedad removida desde el material secado por unidad de tiempo por unidad de superficie secada.

$$w_D = -\frac{mdX}{Adt} \quad (4.29)$$

O como:

$$N = \frac{dX}{dt} \quad (4.30)$$

En esta grafica también pueden verse los periodos de velocidad constante y caída en la velocidad de secado. La explicación de la forma de la curva de secado está conectado con el fenómeno de transferencia de masa y calor. Antes del secado la superficie del material está cubierta con una capa delgada de líquido la cual puede ser tratada como humedad desatada, libre o capilar. La evaporación empieza con el contacto con el aire. Considerando la resistencia de la transferencia de masa, tenemos las condiciones externas y la capa circulante de gas; limitando la velocidad de secado. Así la velocidad de evaporación puede expresarse como el coeficiente de transferencia de masa y un gradiente de humedad del aire.

$$w_D = k_g (Y_s - Y) \quad (4.31)$$

Donde Y y Y_s son la humedad del ambiente circulante. El coeficiente de transferencia de masa k_g para una velocidad de gas constante en relación con el material, permanecerá constante. La humedad Y_s corresponde a las condiciones de saturación en la temperatura de la capa de líquido (T_s). Como la evaporación de la humedad requiere de la misma cantidad de calor latente de evaporación, la superficie del líquido después de algún tiempo alcanzará

una temperatura de equilibrio (Periodo inicial de secado), así la cantidad de calor proveída hacía la superficie desde el aire circulante será igual al calor necesario para el cambio de fase. La humedad Y_s permanece constante. Como resultado de los parámetros constantes del proceso, la humedad del aire Y no cambia. La velocidad de evaporación entre los puntos B y C será constante e igual a $w_{D\ cr}$. Este valor es igual a la velocidad de evaporación en una superficie libre. Sin embargo se ha demostrado que $w_{D\ cr}$ depende del tipo de material secado y usualmente es menor que el 30% de los valores obtenidos en el proceso de la evaporación de líquidos en una superficie libre.

Como ya es bien sabido en el periodo inicial de secado, el cuerpo a secar y su superficie están cubiertas con una capa de líquido, teniendo una temperatura menos a la temperatura de equilibrio T_s y como resultado, la velocidad de secado en el rango entre los puntos A y B se incrementa hasta que la temperatura de la superficie alcanza el valor correspondiente a la línea B-C. Es más raro cuando el secador es alimentado con material húmedo a una temperatura $T > T_s$. Entonces el periodo inicial de secado está representado por la línea punteada A'-B. Usualmente el periodo de secado inicial es muy corto y en la práctica puede ser despreciado.

Cuando $X < X_{cr}$ la cantidad de humedad que alcanza la superficie del cuerpo a secar empieza a caer gradualmente. Como resultado, la presión de vapor arriba de la superficie del material también empieza a decrecer de acuerdo a la ecuación 4.31 la velocidad de secado decrece. Entonces nosotros nos encontramos el periodo de caída de la velocidad de secado (Curva C-D) en este periodo la velocidad de secado es controlado por el transporte de la humedad del material (condiciones internas) la cuales dependen del gradiente de la concentración de humedad.

Tiempo de Secado

El tiempo de secado depende del material, esto define las características que tendrá la curva de secado. El tiempo de secado debe ser determinado separadamente para el primer y segundo periodo de secado.

La ecuación 4.29 define la velocidad de secado, esta puede reacomodarse para obtener el tiempo de secado.

$$\int_0^t dt = -\frac{m_s}{A} \int_{X_1}^{X_2} \frac{dX}{w_D} \quad (4.32)$$

Donde X_1 y X_2 son el contenido de humedad desde el tiempo cero al tiempo t , respectivamente.

Periodo Constante de Secado

El secado en este periodo es constante y por lo tanto la ecuación 4.32 obtenemos el tiempo para la primera parte del periodo de secado.

$$t_1 = \frac{m_s}{Aw_{D1}} (X_1 - X_{cr}) \quad (4.33)$$

Obsérvese que $X_2 = X_{cr}$ en la ecuación 4.32 esto es por que es el contenido de humedad al final del primer periodo. En este periodo de secado influyen la velocidad de secado w_{D1} depende de los coeficiente de transferencia de calor y masa (h y k_g) entre el agente de secado y la superficie a secar.

Sin embargo los materiales porosos representan un reto debido a su estructura no uniforme que crea dificultades en la estimación del contenido crítico de humedad. Es por eso que a veces es mejor hacer experimentos bajo condiciones similares a las que se usan en la practica en la industria.

Periodo de Caída de Secado

Este periodo de caída de secado puede comportarse de manera lineal como lo muestra la curva de velocidad de secado (Figura 4.4) pero también puede comportarse de manera no lineal por lo cual requiere un estudio más minucioso del comportamiento de la curva de secado. En este estudio consideraremos el caso lineal de la curva de caída secado.

La forma de la velocidad de la curva de secado depende del tipo de cuerpo, la velocidad de secado en el primer periodo de secado y el contenido crítico de humedad.

Ahora tomando la ecuación 4.32 podemos construir una ecuación similar en la cual la velocidad de secado depende del contenido se humedad.

$$t_{II} = \frac{m_s}{A} \int_{X_2}^{X_{cr}} \frac{dX}{w_{DII}} \quad (4.34)$$

Donde X_2 es el contenido final de humedad en el material.

Si observamos la figura 4.4 podemos decir que existe una dependencia de $w_{DII} = f(X)$ que es lineal y puede ser escrita de la siguiente manera.

$$w_{DII} = aX + b \quad (4.35)$$

Sustituyendo esta ecuación en la ecuación 4.34 obtenemos:

$$t_{II} = \frac{m_s}{A} \int_{X_2}^{X_{cr}} \frac{dX}{aX + b} \quad (4.36)$$

Realizando la integración obtenemos:

$$t_{II} = \frac{m_s}{aA} \ln \frac{aX_{cr} + b}{aX_2 + b} \quad (4.37)$$

Los coeficiente pueden ser obtenidos de la siguiente manera.

$$a = \frac{w_{DI} - w_{DII}}{X_{cr} - X_2} \quad (4.38)$$

$$w_{DII} = aX_2 + b \quad (4.39)$$

Sustituyendo estos coeficientes (a y b) en la ecuación 4.37 obtenemos:

$$t_{II} = \frac{m_s}{A} \frac{X_{cr} - X_2}{w_{DI} - w_{DII}} \ln \frac{w_{DI}}{w_{DII}} \quad (4.40)$$

Finalmente el tiempo total del proceso es la suma de los tiempos tomados en los dos periodos.

$$t = t_I + t_{II} \quad (4.41)$$