

# DESHIDRATACION DE SOPORTES POROSOS

Richard AURIA

ORSTOM (Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación)

## Resumen

En primer lugar, se presenta un estado de la bibliografía del secado térmico. Los principales trabajos básicos, mismos que permitieron definir las bases de la investigación actual del secado, son expuestos. Se da una rápida idea de la situación del secado y de su problemática. Esta primera parte fue basada en el artículo de Moyne C. y Roques M. (9)

Un ejemplo de investigación básica del secado de hoja de hule natural es dada. Observaciones con un microscopio electrónico permitieron dar una imagen de la estructura interna del hule durante el secado. El coeficiente de transporte del agua fue medido en función de la humedad, lo cual fue introducido dentro de un modelo matemático que permitió dar la cinética de secado de hojas de hule.

## 1. INTRODUCCION

El secado es una operación que consiste en eliminar por evaporación una substancia volátil de un producto. El secado cubre varios procedimientos técnicos (atomización, filtración, destilación,...) En este trabajo nos enfocaremos en el secado térmico y más específicamente en el caso del lecho fijo, técnica bastante empleada en el pasado y el presente.

El secado es una de las más antiguas técnicas (1). Desde el paleolítico (750.000 años A.C.), el hombre secaba las hojas para su cama y también su madera para el fuego. Más tarde, entre 35.000 a 5.000 años A.C., productos como carne, ladrillo y textiles fueron secados. Aproximadamente por el año 300 A.C. aparecieron nuevas necesidades de la civilización y se empezó la conservación de productos alimentarios como el té negro, el cacao y el tabaco.

El desarrollo de la escritura, fue muy dependiente de los procedimientos del secado. En 3.000 A.C. los egipcios secaban sus papiros. El primer papel producido en 1390 en Alemania, necesitaba después de un prensado, un secado en cuarto ventilado. El primer secador de madera industrial fue construido en Inglaterra en 1727, para secar la madera utilizada en la construcción de barcos. En esa época no existían ventiladores adaptados para el secado y éste se llevaba a cabo por convección natural.

Ya en este siglo, en los años veintes, aparecieron los primeros trabajos científicos sobre el secado. La primera contribución importante fue hecha por T.K. Sherwood (2) en 1929, quien analizó los aspectos básicos del secado, separando los fenómenos físicos esenciales:

- la evaporación del líquido dentro o fuera del producto,
- la importancia de la resistencia a la transferencia interna, comparada con la transferencia externa,
- el período de secado a tasa constante que corresponde a una evaporación a la superficie del sólido.

El autor discutió con detalles el segundo período de secado o período de secado con tasa decreciente, en donde la evaporación del líquido se hace siempre en la interface, pero donde la resistencia interna del transporte del líquido es grande comparada a la resistencia externa del transporte del vapor. El mecanismo interno de transporte se describió con la ley de *Fick* con una fuerza de transporte expresada como gradiente de humedad sin ninguna deformación del sólido. El coeficiente de transporte se supone constante con una condición de perfil inicial de humedad constante. El secado para el caso de una placa permite dar una solución analítica al problema. Este modelo aplicado al secado de la madera y del barro fue conveniente. Sin embargo, el autor encontró una diferencia para el secado del jabón que fue explicado por una variación del coeficiente de difusión en función de la humedad.

Fueron N.H. Ceaglske y O.A. Hougen (3) en 1937 quienes demostraron los límites de la ecuación de difusión y la importancia de la capilaridad para el caso del secado de un sólido granular (arena). El coeficiente de difusión es variable, los fenómenos de difusión están reservados a la parte higroscópica del secado. Los mecanismos de transporte se hacen por capilaridad y gravedad.

De un análisis de los fenómenos de transporte de calor y masa en los medios porosos O. Krischer (4) en 1962, sentó los fundamentos básicos del secado. Trabajó sobre las propiedades de equilibrio (isotermas de adsorción) de numerosos productos, el transporte por capilaridad y difusión gaseosa. Introdujo el concepto de conductividad térmica equivalente de los medios porosos húmedos y describió las diferentes fases del secado convectivo.

Al nivel de la descripción de los fenómenos acoplados calor-masa en medios porosos no saturados, el trabajo de J.R. Philip y D.A. de Vries (5) en 1957 fue importante. Introdujeron de manera clara las ecuaciones constitutivas para las densidades del flujo líquido y de vapor en función de los gradientes de concentración volumétrica de agua líquida, de la temperatura y de la intensidad de gravedad.

J.W. Cary y S.A. Taylor (6) (1962), introdujeron la termodinámica de los procesos irreversibles, deduciendo de la fuente de entropía las relaciones fenomenológicas del sistema. A.V. Luikov (7), en 1966, escribió de manera más formal al nivel matemático estas relaciones.

Más reciente fue el trabajo de S. Whitaker (8) (1977) quien desarrolló una teoría del secado usando el concepto de "volumen elemental representativo".

Vemos con este rápido estudio histórico que existen las bases teóricas del secado. Sin embargo, estos estudios no son suficientes para tener una teoría del secado. El secado se realiza sobre productos muy diferentes en donde la teoría hecha para medios capilares y porosos no es todavía aplicable.

## **2 . SITUACION DEL SECADO**

En el secado intervienen una multitud de temas: química, físico-química, termodinámica, mecánica, ingeniería de procesos, bioquímica,...

## **2.1 . Varios tipos de productos**

El secado se puede realizar sobre varios tipos de productos que se podrían clasificar, según C. Moyne y M. Roques (1986) (9), en:

- los productos capilo-porosos en donde los poros tienen dimensiones superiores a la micra. En este tipo de materiales se pueden aplicar las ecuaciones clásicas de los medios continuos.
- los medios con porosidad nanométrica en donde las dificultades consisten en la descripción de los fenómenos de fijación y migración del agua. Dentro de esta clase se encuentra una gran parte de los productos agro-alimentarios.
- los geles y soluciones líquidas en donde no existe una estructura porosa bien definida: la leche, los jugos de frutas y los productos gelatinosos hacen parte de esta clase.

Un tipo de producto se puede encontrar en dos clases de materiales durante el secado. Por ejemplo, un producto como la madera pertenece, a alta humedad, a la clase capilo-poroso y a baja humedad a los materiales con porosidad nanométrica.

Los productos a secar no son materiales ideales. Pueden ser heterogéneos, anisotrópicos (madera) o deformables (geles) esta es una de las dificultades para describir sus propiedades de transporte. Otros, como el papel, pueden cambiar de estructura durante el secado. La gran variabilidad en las propiedades físicas (humedad inicial, composición,...) de los productos naturales impide la generalización de modelos.

## **2.2 . Diversidad de las situaciones industriales**

El término "secador" cubre un número importante de situaciones diferentes (C. Moyne y M. Roques (1986) (9):

- los dispositivos usados: charolas, lechos fluidizados, tambor, atomizador;
- la escala de la operación: de algunos kilos, hasta algunas toneladas por hora;
- la cantidad de agua: de algunos porcentajes hasta un secado completo del producto;
- la forma del producto, película, polvo, esferas, placas,...;
- las energías usadas;
- el tipo de calentamiento: conducción, convección, radiación, microondas,...

## **2.3 . Los criterios de evaluación**

Si queremos evaluar el desempeño de un proceso de secado, es necesario fijar criterios. El costo energético podría ser una respuesta única, pero la evaporación de un kilo de agua (sin el calor de adsorción) requiere 2.3 MJ, valor casi invariable. El aspecto energético no es tan ligado al secado del producto, sino:

- a un aislamiento térmico;
- a la administración de la energía;
- a la selección de la energía primaria adecuada.

Otros criterios de evaluación podrían ser la rapidez del secado y la calidad (aspecto, preservación, retención de aromas, etc.) del producto final.

### **3 . UN EJEMPLO DE SECADO TERMICO - EL HULE NATURAL**

Se presenta un ejemplo de lo que se puede hacer al nivel de la investigación básica sobre un producto natural como el hule. Empezamos por una descripción del hule durante el proceso del secado con observaciones al microscopio electrónico. Las muestras de hule están preparadas con una técnica de criofractura. Después, medimos durante una cinética de secado los perfiles de humedad en una hoja de hule y sacamos de estos datos el coeficiente de transporte del agua. Al final, construimos un modelo matemático para describir las cinéticas de secado de hojas de hule.

#### **3.1 . Introducción**

El hule natural es un producto muy utilizado para la fabricación de numerosos productos de gran consumo. Sus propiedades de elasticidad, resistencia, pobre conducción, etc., todavía no igualadas por el hule sintético, hace de este producto un material irremplazable en algunos sectores de la industria como la aeronáutica y la construcción de coches (neumáticos). La mayor producción está asegurada por los países del sureste asiático (94%), 5% por Africa y 1% por los países de América del Sur.

Antes de su uso industrial, ciertas operaciones de transformación química, mecánica y térmica son necesarias. El secado es una parte importante de esta transformación, consume el 90% de la energía total, equivalente a un consumo anual de un millón de TEP en 1987. Este importante gasto de energía se debe a que la humedad final de producto no debe ser mayor a 0.5% (humedad en base seca). La impermeabilidad del hule favorece un proceso lento de difusión de la humedad del interior del producto hacia su superficie.

Los trabajos de investigación sobre el secado del hule natural son escasos. Los primeros estudios definieron los principales períodos de secado: un período con tasa constante y un período de secado decreciente, el cual está dividido en dos fases: una fase llamada "intermedia" y la otra difusional. El primer período incluye una evaporación de superficie, la cual está saturada de suero. Este período está acoplado con una transpiración del suero bajo la acción de la contracción de la estructura. En el segundo período, las dos fases están divididas por un punto crítico de secado, todos los autores sitúan el valor de la humedad de este punto en 10%. La fase difusional del secado representa 90% del tiempo del secado.

#### **3.2 . Estructura interna del hule**

##### **\* Observaciones del producto seco**

Las muestras que hemos observado están hechas desde una hoja de hule natural totalmente deshidratada. Las observaciones están hechas con un microscopio electrónico. La foto 1 da una imagen del estado más característico de la superficie del hule natural seco. Ninguna porosidad es observada, el material es compacto. Sin embargo, algunos poros fueron observados en algunas regiones periféricas de las muestras.

##### **\* Observaciones en el producto hidratado**

El principio del método usado consiste en una observación al microscopio electrónico de una fractura realizada en el material hidratado y previamente congelado. Esta técnica llamada "criofractura" tiene por principal ventaja el evitar los errores que puedan existir cuando se utilicen productos químicos (preparación, inclusión y fijación).



Foto 1: Observación de la superficie del hule natural deshidratado

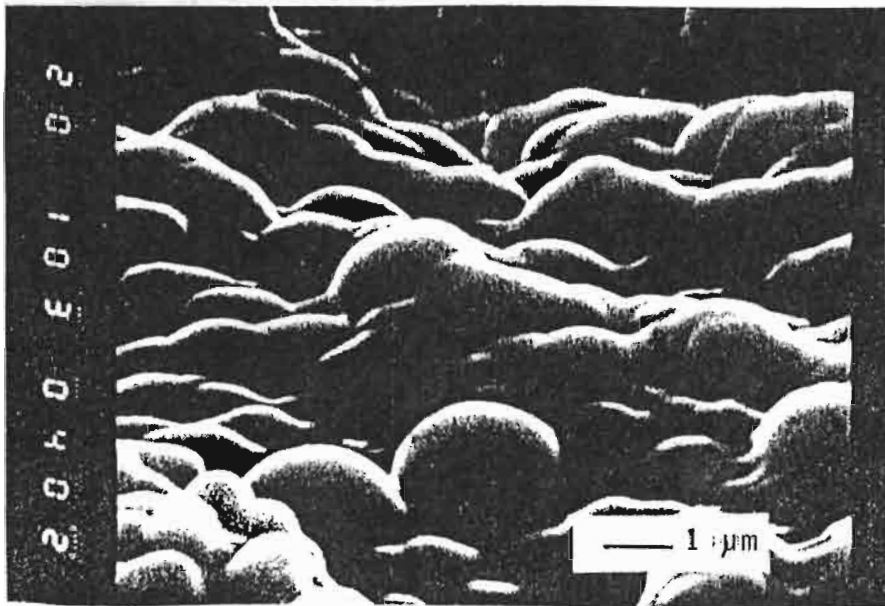


Foto 2: Observación de la estructura interna del hule hidratado

El resultado de esta observación (foto 2) sugiere que la estructura está compuesta de glóbulos de hule ligados entre sí. Los pre-tratamientos químicos del hule para su utilización (coagulación con ácido), mecánico (laminado de las hojas) y térmico (secado) no parecen influir sobre la estructura. Los glóbulos conservan las formas y dimensiones que tenían en el producto original (latex de hule). El conjunto de los glóbulos constituyen un sistema bastante cerrado que dejan varias cavidades con pocas conexiones entre ellas. El secado del producto permite un acercamiento progresivo de los glóbulos hasta un estado compacto que corresponde a la estructura seca observada (foto 1). El hule natural puede ser representado durante el secado como un medio difásico (hule + serum) sin fase gaseosa (10).

### **3.3 . Estudio experimental del mecanismo de transporte de agua durante el período difusional. Medida del coeficiente de transporte**

Con el modelo fenomenológico de transporte de agua desarrollado (10), un estudio es hecho para analizar los mecanismos internos de transporte de agua durante el período de secado con tasa decreciente. Este estudio tiene por objeto:

- validar la relación fenomenológica del transporte de agua.
- estudiar la variación del coeficiente de transporte isotérmico de agua, en función de la humedad.

Para este estudio se introducen muestras de una hoja de hule en un secador con temperatura (60°C) y humedad 50% controladas. Seguimos durante el secado la evolución de los perfiles de humedad y de temperatura de las muestras en la dirección de transferencia perpendicular a las caras de la hoja. Para la medida de los perfiles de humedad, las hojas se cortan y se pesan.

La figura 1 presenta la evolución del perfil de humedad obtenido sobre el centro de la muestra. Estos perfiles ponen en evidencia fuertes gradientes de humedad ( $100\text{m}^{-1}$ ) en algunas regiones. Después de 42 horas de secado, se llega en la superficie de la hoja a la humedad de equilibrio ( $w=0.5\%$ ). Este valor corresponde al valor de la humedad de equilibrio en la superficie del producto, la cual está caracterizada físicamente por una delgada película de color negra llamada "Costra". Cerca de la superficie, observamos un punto de inflexión (perfiles de humedad 6, 7, 8). Una región con perfiles de humedad cerca del valor 0 progresa durante el secado hasta el centro de la hoja (perfiles 7, 8).

Durante esta parte del secado, la distribución de la temperatura es uniforme (10). Ningún desequilibrio térmico existe entre la muestra y el ambiente, lo que nos permite suponer un secado isotérmico.

#### **\* Variación del coeficiente de transporte isotérmico de agua en función de la humedad**

Antes de presentar los resultados de la variación del coeficiente de transporte con la humedad, hemos verificado la linearidad entre los flujos y la fuerza termodinámica del secado entre 5% y 15% de humedad (10). Con los perfiles establecidos, fue posible determinar el valor del coeficiente de transporte isotérmico del agua para un rango de humedad de 2% a 16%. La figura 2 presenta la variación del coeficiente en función de la humedad. Observamos que este coeficiente pasa por un mínimo de humedad en un valor de 10%. Este valor corresponde al segundo punto crítico del secado que marca el principio de la fase de secado difusional.

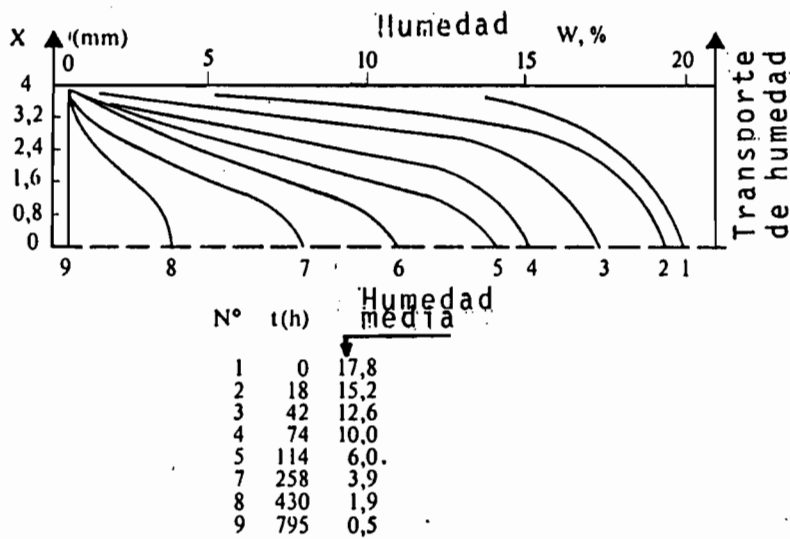


Fig.1: Perfiles de humedad en una hoja de hule natural durante el secado.

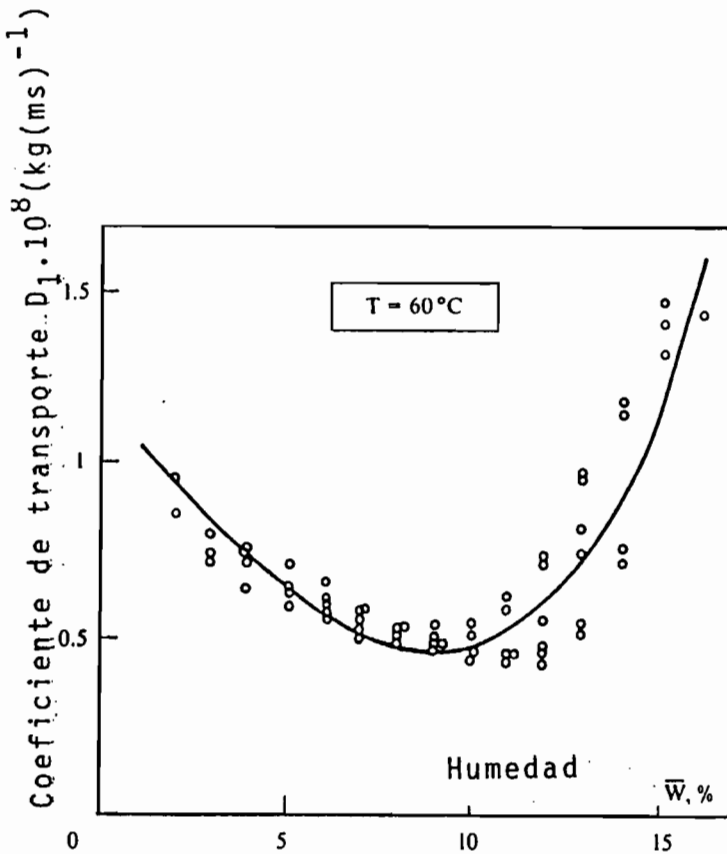
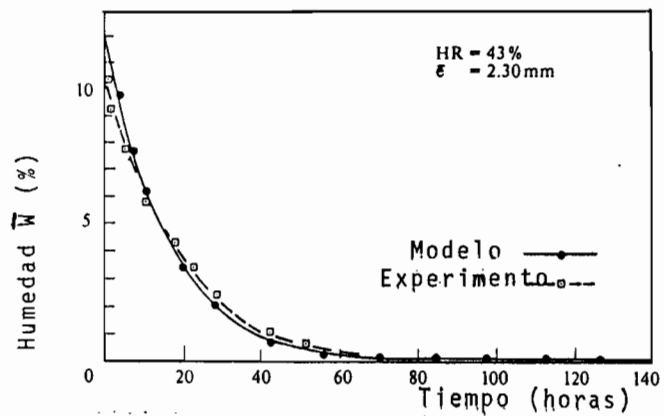


Fig. 2: Variación del coeficiente de transporte de agua en función de la humedad.

Fig. 3: Comparación del modelo con un experimento para una hoja de hule natural



#### **\* Modelo matemático y comparación con el experimento**

Un modelo fue desarrollado para describir la evolución de la humedad de hojas de hule durante la fase difusional del secado. Después fue integrado numéricamente por diferencias finitas usando el coeficiente de transporte medido experimentalmente. La figura 3 da un ejemplo de la comparación de una cinética obtenido con el modelo y el experimento. Este modelo matemático es útil cuando la humedad relativa del aire es menor a 60%, que corresponde a las condiciones industriales del hule.

#### **4. CONCLUSIONES**

El secado térmico de productos agrícolas e industriales ocupa una parte importante de los gastos energéticos de un país. Los estudios básicos son relativamente recientes; el primer simposio internacional fue hecho en 1978 y permitió reunir por la primera vez a los investigadores y a los industriales del secado. Para el estudio del secado de un producto es necesario contar con diferentes competencias científicas y técnicas. Sin embargo, dado el interés de los industriales por disminuir los costos energéticos y mejorar la calidad final de los productos, se constituyen poco a poco equipos de investigación interdisciplinarios. Estos laboratorios podrían en el futuro ayudar a diseñar nuevos tipos de secadores y de procesos industriales.

#### **BIBLIOGRAFIA**

1. KROLL(K.), MUJUMDAR (A.S.) and MENON (A.S.), Drying since the millenius. Proceedings of the Second International Drying Symposium., 1980, 485-494
2. SHERWOOD (T.K.), The dryings of solids. Ind. Eng. Chem., 1929, vol. 21 N° 1, 12-16
3. CEAGLSKE (N.H.) and HOUGEN (O.A.), Drying granular solids. Ind. Eng. Chem., 1937, vol. 29, N° 7, 805-813
4. KRISCHER (O.) - Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Springer-Verlag, 1962.
5. PHILIP (J.R.) and de VRIES (D.A.), Moisture movement in porous materials under temperature gradient. Trans. Amer. Geophys. Union, 1957, vol. 38, 222-232
6. CARY (J.W.) and TAYLOR (S.A.), The interaction of the simultaneous diffusion of heat and water vapor. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 26, 1962, 413-416.
7. LUIKOV (A.V.), Heat and mass transfer in capillary porous bodies. Pergamon Press, Oxford, 1966.
8. WHITAKER (S.), Simultaneous heat mass and momentum transfer: a theory of drying. Advances in Heat Transfert, vol. 13, 1977, 119-203
9. MOYNE (C.) et ROQUES (M.), Réalités et perspectives du séchage. Revue Générale de Thermique, 292, 1986, 207-214.
10. AURIA (R.), Contribution à l'étude du caoutchouc naturel: structure interne et transfert d'humidité lors du séchage. Thèse de Doctorat. USTL Montpellier, 1988, 190 pp.

Auria Richard (1989)

Deshidratacion de soportes porosos

Mexico : ORSTOM, 8 p. multigr.

Simposio Internacional de Fermentaciones en Medio Solido,  
Iztapalapa (MEX), 1989/04/10-17