

Evaluación de los factores de influencia en el modelo de Luikov durante el secado de ladrillo

Evaluation of Influence Factors in Luikov Model During Drying of Red Brick

Martines-López Enrique

Centro Nacional de Metrología, Querétaro

Dirección de Termometría

Correo: emartine@cenam.mx

Lira-Cortés Leonel

Centro Nacional de Metrología, Querétaro

Dirección de Termometría

Correo: llira@cenam.mx

Información del artículo: recibido: agosto de 2014, reevaluado: julio de 2015, aceptado: agosto de 2015

Resumen

El estudio de la transferencia de calor y de humedad en el secado de materiales sólidos porosos es importante, debido al amplio interés en reducir el agua presente en los materiales, ya que el exceso de humedad tiene efectos adversos en los materiales. En la actualidad, la investigación del secado se realiza de manera experimental, ya que no se cuenta con un modelo universal de secado que aplique satisfactoriamente a todos los materiales sólidos. Los modelos desarrollados se aplican a grupos restringidos de materiales. Uno de los modelos más aceptados para describir la transferencia de humedad en materiales capilares porosos es el modelo de Luikov, el cual se deriva de la termodinámica de procesos irreversibles. Además de la extensa aplicación de este modelo, hace falta identificar las propiedades termofísicas que tienen mayor influencia en los perfiles de secado, ya que existen pocas comparaciones contra datos experimentales. En este trabajo se utilizó la solución del modelo de Luikov obtenida por Liu *et al.* (1991) para alcanzar los perfiles de humedad en el proceso de secado de muestras de ladrillo a diferentes temperaturas, en donde se realizó una evaluación de los factores de influencia que afectan al perfil obtenido. Se encontró en el análisis, que la difusión es uno de los principales mecanismos que controla la transferencia de humedad. También el modelo se validó experimentalmente en muestras de ladrillo secados a temperaturas de 60 y 80°C; asimismo los resultados teóricos y experimentales concuerdan satisfactoriamente en la región final del secado, lo cual es útil en la determinación del contenido de humedad.

Descriptores:

- modelo de Luikov
- contenido de humedad
- secado
- factores de influencia
- ladrillo

Abstract

The heat and moisture transfer in the drying of porous solid materials is important, since excessive moisture has adverse effects on these materials; then, it exist a wide interest on the reduction of moisture in them. Nowadays, the research of the drying process is carried out both theoretical, as experimentally, because does not exist a universal model which satisfactorily describe the drying process of all kind of solid materials. The developed models apply to restricted groups of materials. To describe the moisture transfer in capillary porous materials, one of the more accepted theoretical models is the Luikov model, which is derived from the principles of thermodynamics of irreversible processes. This model has been applied to many materials; however, to describe the moisture transfer in capillary porous materials, it is needed a comprehensive analysis to identify the thermophysical properties which have major influence in the drying profiles. Also, it is needed to validate the model for those materials in which the model is applied. In this work, the solution of Luikov model (as obtained by Liu *et al.*, 1991) was used to obtain moisture profiles during the drying of brick at different temperatures. Also, an evaluation of the influence factors which affects to the obtained moisture profiles was carried out. It was found that one of the most important mechanisms which control the drying process is the diffusion of moisture. Also, the experimental validation using brick was performed at temperatures of 60 and 80°C; the theoretical and experimental results agree in the falling rate period, which is useful in the moisture content determination.

Keywords:

- Luikov model
- moisture potential
- drying
- influence factors
- brick

Introducción

El secado de materiales sólidos porosos se ha estudiado ampliamente de manera teórica y experimental; sin embargo, al no existir una teoría general que describa satisfactoriamente este proceso para todos los materiales sólidos (Wang *et al.*, 2007; Mujumdar, 2006) se continúa con el uso de los modelos propuestos.

Algunos de los modelos que se han desarrollado para describir la transferencia de calor y de humedad en el secado, incluyen el modelo de Philips y DeVries (1957), el modelo de Luikov (1975), el modelo de Kowalsky y Strumillo (1997), el modelo de Warren (1983), entre otros.

El modelo de Luikov se desarrolló sobre la base de principios de termodinámica de procesos irreversibles y de las relaciones lineales de difusión de calor y humedad; además, se puede solucionar analíticamente para geometrías conocidas (Fulford, 1969; Shahary, 2012). Este modelo se ha empleado satisfactoriamente para varios tipos de materiales (Hernández y Quinto, 2005; Fulford, 1969; Kerestecioglu *et al.*, 1998; Shahary, 2010).

La solución analítica que se obtiene de este modelo, bajo condiciones específicas, no toma en cuenta la incertidumbre de los factores que afectan a los perfiles de humedad y temperatura, ya que impide saber el nivel de concordancia con los datos experimentales. Adicio-

nalmente, conocer los coeficientes de mayor influencia en los perfiles calculados permite determinar el mecanismo de transferencia de humedad que controla el proceso de secado.

Para evaluar las desviaciones con base en los valores experimentales, es necesario identificar los factores de influencia más importantes. En Liu y Cheng (1991); Alvarez *et al.* (2001); Efimov *et al.* (2011); Dantas *et al.* (2002); Scarpa y Milano (2002) se analiza el efecto que tienen algunos coeficientes en los perfiles de secado; sin embargo estos análisis no toman en cuenta todos los factores presentes, tales como los asociados a las condiciones iniciales y de frontera, entre otros. Martines y Lira (2012) aplicaron el modelo de Luikov para una placa de cerámica; sin embargo, no se realizó la validación experimental correspondiente.

En este trabajo se describe la solución del modelo de Luikov para una muestra de ladrillo, usando la metodología de Liu *et al.* (1991), donde se evalúan todos los factores de influencia involucrados mediante la ley de propagación de incertidumbre (JCGM100, 2008), lo cual permitió identificar aquellos que tienen mayor contribución.

Por otra parte, se obtuvieron los perfiles experimentales de contenido de humedad y temperatura en muestras de ladrillo, lo que permitió comparar los resultados del modelo con los resultados experimentales en dos valores de temperatura.

Modelo de Luikov

El modelo de Luikov consiste de un sistema acoplado de ecuaciones diferenciales parciales de segundo orden, que describe la transferencia de calor y de humedad en materiales capilares porosos (Luikov, 1975).

En la figura 1 se muestra el esquema de un ladrillo representado por una placa plana que inicialmente se encuentra a una temperatura T_0 y con un contenido de humedad U_0 . Posteriormente, la placa se coloca en un medio de secado convectivo, cuyas condiciones son U_a y T_a .

El modelo de Luikov para una placa plana en una dimensión está dado como

$$\rho C_q \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = K_q \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + \varepsilon \lambda C_m \frac{\partial U(x,t)}{\partial t} \quad (1)$$

$$\rho C_m \frac{\partial U(x,t)}{\partial t} = K_m \delta \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + K_m \frac{\partial^2 U(x,t)}{\partial x^2} \quad (2)$$

La ecuación (1) describe la transferencia de calor por conducción dentro de un cuerpo e incluye un término para la transferencia de calor debido a cambios de fase del agua dentro del cuerpo; la ecuación (2) describe la transferencia de humedad por difusión e incluye un término que considera la transferencia de humedad debido a gradientes de temperatura.

Si se supone simetría en la placa, entonces el problema se puede solucionar para la mitad, es decir, para $0 \leq x \leq L$.

Las condiciones de frontera para este problema se derivan mediante balances de masa y energía en la superficie ($x = L$) y en el centro de la placa ($x=0$). En $x = \pm L$.

$$K_q \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} + a_q [T(x,t) - T_a] + (1 - \varepsilon) \lambda a_m [U(x,t) - U_a] = 0 \quad (3)$$

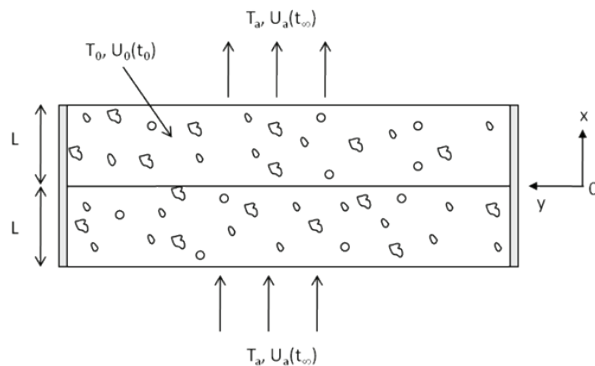


Figura 1. Modelo físico para el ladrillo en un medio convectivo

$$K_m \frac{\partial U(x,t)}{\partial x} + K_m \delta \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} + a_m [U(x,t) - U_a] = 0 \quad (4)$$

Donde a_q y a_m son los coeficientes convectivos de transferencia de calor y masa, respectivamente.

La ecuación (3) describe el balance de calor al considerar que el calor se transfiere dentro del cuerpo por conducción y en la superficie por convección; adicionalmente, se incluye un término debido al calor por cambio de fase del agua en los poros. La ecuación (4) describe el balance de humedad debido a la conducción de humedad al interior y por convección en el exterior; además incluye un término que considera el flujo de humedad debido a un gradiente de temperatura.

En $x=0$ no hay flujo de calor, ni flujo de humedad, por lo tanto se tiene

$$\frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial U(0,t)}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

Las condiciones iniciales ($t=0$) del material son

$$T(x,0) = T_0 \quad (7)$$

$$U(x,0) = U_0 \quad (8)$$

Método de solución

Para resolver el modelo descrito se hacen las siguientes suposiciones:

- Los coeficientes y propiedades termofísicas tienen valores constantes.
- Dentro de los poros existe agua en forma líquida y vapor.
- La matriz sólida del material no se deforma durante el secado.
- Se ignoran los efectos electromagnéticos y gravitacionales.
- No hay reacciones químicas.
- El cuerpo sólido es isotrópico.

La solución del modelo se obtiene de acuerdo con la metodología descrita por Liu *et al.* (1991), que comprende los siguientes pasos:

- Transformación del problema no homogéneo en uno homogéneo.
- Aplicación de la función potencial para desacoplar las ecuaciones.
- Obtención de las ecuaciones para los perfiles de humedad y temperatura.
- Cálculo de los valores propios de la ecuación trascendental.
- Obtención de los perfiles de humedad y temperatura.

La función potencial $\phi(x, t)$ utilizada para desacoplar el sistema (Liu y Cheng, 1991) está dada como

$$T_1(x, t) = \left(K_m \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \rho C_m \frac{\partial}{\partial t} \right) \phi \quad (9)$$

$$U_1(x, t) = -K_m \delta \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \quad (10)$$

Donde $T_l = T - T_a$ y $U_l = U - U_a$

Al usar la función potencial en el sistema homogéneo obtenido de (1) y (2), y aplicar el método de separación de variables (Farlow, 1993) se obtiene la solución general del sistema, el cual se da por las ecuaciones (11) y (12).

$$T_1(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \xi_n^2 e^{-\xi_n^2 t} \left[(-K_m D_1^2 + \rho C_m) \cos D_1 \xi_n x + (-K_m D_2^2 + \rho C_m) g(\xi_n) \cos D_2 \xi_n x \right] \quad (11)$$

$$U_1(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} K_m \delta \xi_n^2 e^{-\xi_n^2 t} A_n \left[D_1^2 \cos D_1 \xi_n x + D_2^2 g(\xi_n) \cos D_2 \xi_n x \right] \quad (12)$$

Donde

D_1, D_2, K_m, C_m, ρ y δ son constantes; ξ_n son los valores propios que se obtienen de la ecuación trascendental (ecuación 13); los valores A_n y B_n dependen de ξ_n ; $g(\xi_n) = A_n/B_n$.

La ecuación (11) permite obtener los perfiles de temperatura para una placa plana, mientras que la ecuación (12) permite calcular los perfiles de contenido de humedad.

La ecuación trascendental se obtiene al evaluar el modelo en las condiciones iniciales y de frontera, está dada por

$$\xi^2 (D_1 D_2) \tan D_1 \xi \tan D_2 \xi + \psi_1 \xi D_2 \cdot \tan D_2 \xi + \psi_2 \xi D_1 \cdot \tan D_1 \xi + \frac{\alpha_q \alpha_m}{K_q K_m} = 0 \quad (13)$$

La ecuación (13) no es lineal y tiene un número infinito de valores propios, incluso también puede tener valores complejos (Liu y Cheng, 1991; Alvarez *et al.*, 2001; Lobo *et al.*, 1987). La evaluación que se realiza en el presente trabajo solo incluye a los valores propios reales, ya que los valores complejos solo tienen contribución en los primeros instantes del secado; en el periodo de velocidad decreciente los perfiles concuerdan satisfactoriamente Liu y Cheng, 1991; Alvarez *et al.*, 2001).

Los métodos numéricos usados para calcular los valores propios reales (ξ_n) fueron el método de Newton-Raphson y el método de bisección (Hoffman, 1992).

Para el caso de ladrillo, los coeficientes involucrados en el modelo de Luikov se presentan en la tabla 1, cuyos datos están dados en Alvarez *et al.* (2001).

Evaluación de los factores de influencia en la predicción de los perfiles de humedad y temperatura

La solución obtenida con el modelo de Luikov es exacta; sin embargo, los perfiles de humedad y temperatura logrados con esta no toman en cuenta la incertidumbre de las propiedades termofísicas, ni la de los parámetros incluidos en las condiciones iniciales y de frontera. Dada la dificultad que se tiene para obtener los valores de incertidumbre de las propiedades involucradas, se realizó un análisis paramétrico haciendo variaciones de los valores en porcentajes específicos de los mismos.

Existen distintos métodos para calcular los coeficientes de sensibilidad que permiten cuantificar su efecto en el perfil de humedad en procesos transitorios (Cacuci, 2003; Goyal y Srinivasan, 2012). La evaluación del efecto de cada parámetro en el perfil total se obtiene al aplicar la ley de propagación de errores, también conocida como la ley de propagación de incertidumbres (JCGM100,

Tabla 1. Coeficientes del modelo de Luikov para ladrillo

Propiedad	K_q	K_m	C_q	C_m	ρ	ε	λ	δ
Valor	0.44	6.04×10^{-8}	879	0.0018	1200	0.3	2.5×10^6	0.56
Unidades	W/m·K	Kg/m·s·%	J/kg·K	kg/kg·%	Kg/m ³	adimensional	J/kg	%/K

2008), la cual establece que la incertidumbre se puede calcular con la ecuación

$$u = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)} \quad (14)$$

Donde

f = contenido de humedad $U(x,t)$ o temperatura $T(x,t)$,
 x_i = factores de influencia
 $\partial f / \partial x_i$ = coeficientes de sensibilidad
 $u(x_i)$ = incertidumbre del factor de influencia x_i

Los valores de los coeficientes de sensibilidad de la ecuación (14) se calculan al derivar directamente la función f (cuando es posible), en otro caso, se estiman al perturbar el valor del coeficiente (x_i) por una cantidad Δ (manteniendo los otros constantes) y evaluando su efecto en $U(x,t)$ o $T(x,t)$.

En el problema que se presenta aquí, los valores de Δ corresponden a los porcentajes de variación de los coeficientes. De lo anterior, la ecuación de propagación de incertidumbres para la distribución de temperatura y humedad se puede escribir como en la ecuación (15).

Los factores de influencia en el modelo de Luikov se pueden clasificar como sigue:

- Coeficientes del modelo son: $K_q, K_m, C_q, C_m, \varepsilon, \lambda, \delta, \rho, L$.
- Condiciones iniciales: U_0, T_0 .
- Condiciones de frontera: a_q, a_m, T_a, U_a .

En la tabla 2 se presentan los valores porcentuales de variación de los coeficientes incluidos en el modelo.

$$uf(x,t) = \sqrt{\left(\frac{\Delta f}{\Delta K_q} \right)^2 u^2 K_q + \left(\frac{\Delta f}{\Delta K_m} \right)^2 u^2 K_m + \left(\frac{\Delta f}{\Delta C_q} \right)^2 u^2 C_q + \left(\frac{\Delta f}{\Delta C_m} \right)^2 u^2 C_m + \left(\frac{\Delta f}{\Delta \rho} \right)^2 u^2 \rho + \left(\frac{\Delta f}{\Delta \varepsilon} \right)^2 u^2 \varepsilon + \left(\frac{\Delta f}{\Delta \lambda} \right)^2 u^2 \lambda + \left(\frac{\Delta f}{\Delta \delta} \right)^2 u^2 \delta + \left(\frac{\Delta f}{\Delta a_q} \right)^2 u^2 a_q + \left(\frac{\Delta f}{\Delta a_m} \right)^2 u^2 a_m + \left(\frac{\Delta f}{\Delta L} \right)^2 u^2 L + \left(\frac{\Delta f}{\Delta U_0} \right)^2 u^2 U_0 + \left(\frac{\Delta f}{\Delta U_a} \right)^2 u^2 U_a + \left(\frac{\Delta f}{\Delta T_0} \right)^2 u^2 T_0 + \left(\frac{\Delta f}{\Delta T_a} \right)^2 u^2 T_a} \quad (15)$$

Donde $f=U(x,t)$ o $T(x,t)$

Tabla 2. Porcentaje de variación de las variables de influencia del modelo

Propiedad	K_q	K_m	C_q	C_m	ρ	ε	λ	δ	L
$\pm\Delta$	5 %	10 %	5 %	10 %	10 %	10 %	10 %	10 %	0.001 m

Las condiciones iniciales b) U_0 y T_0 corresponden al contenido de humedad y temperatura que tiene la muestra de ladrillo antes de iniciar el proceso de secado. Las incertidumbres estándar con las que se puede realizar esta medición son 0.5% y 0.06°C, respectivamente.

Las condiciones a la frontera, cuyos coeficientes están dados en c), corresponden a las condiciones del medio secante; es decir, a las condiciones de contenido de humedad (U_a) y temperatura (T_a) que se alcanzan en el sistema de secado, y al tratarse de un medio convectivo se incluyen los coeficientes convectivos de transferencia de masa (a_m) y de calor (a_q). Los valores de incertidumbre asociados a los coeficientes dados en c) son: $u U_a = 0.1\%$, $u T_a = 1.5^\circ\text{C}$, $u a_m = 10\%$ y $u a_q = 10\%$.

Con el propósito de agilizar el cálculo del efecto de los factores de influencia en los perfiles de contenido de humedad, el análisis se realizó con un valor propio en la función trascendental.

Factores de influencia en la distribución de humedad

Al evaluar la ecuación (15) para cada uno de los coeficientes dados en a), b) y c) se encontraron las contribuciones de cada uno de los coeficientes involucrados. Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 2 y 3.

En la figura 2 se muestran los coeficientes que tienen una contribución mayor de 0.2%, mientras que en la figura 3 aquellos que tienen una contribución menor.

Los factores con mayor contribución fueron:

$K_m(a)$ tiene una contribución máxima de 0.7%; que es el coeficiente de conductividad de humedad (similar a la conductividad térmica), indica la velocidad a la que el

material “conduce” la humedad. Se espera que al incrementar el valor de K_m se reduzca el tiempo de secado; en este caso se encontró que al incrementar su valor en 10% el tiempo de secado se reduce en aproximadamente 1.3 h.

a_m (c) es el coeficiente convectivo de transferencia de masa (contenido de humedad). El incremento en 10% del valor del coeficiente redujo el tiempo de secado en 1.3 h. Su contribución máxima es de 0.45% del contenido de humedad.

C_m (a) tiene una contribución de 0.3%; al igual que el calor específico, cuando el valor de C_m crece, el tiempo de secado se incrementa. En este caso un incremento de 10% en el valor de C_m aumentó el tiempo de secado en 3 h.

ρ (a) es la densidad del material, cuya contribución máxima fue de 0.3%. El incremento de 10% en el valor de ρ aumentó el tiempo de secado en 3 h.

L (a) es el espesor del ladrillo, el cual tiene una contribución máxima de 0.25%. Se encontró que un incremento de 1 mm en el espesor incrementa el tiempo de secado en aproximadamente 2 h.

λ (a) es el calor latente de evaporación e indica que a mayor valor, se requiere mayor cantidad de energía para evaporar el agua líquida presente, lo cual puede prolongar el tiempo de secado. En este caso se encontró que un incremento en 10% de su valor incrementó el tiempo de

secado en 0.2 h. Su contribución máxima en la incertidumbre fue de 0.2% en contenido de humedad.

a_q (c) es el coeficiente convectivo de transferencia de calor, que está acoplado con la transferencia de humedad en las condiciones de frontera; el incremento en 10% del valor de a_q , redujo el tiempo de secado en 0.1 h. La contribución máxima de este coeficiente es de 0.2% de contenido de humedad.

De manera resumida, en la tabla 3 se muestran los valores de los coeficientes con mayor contribución en el perfil de humedad.

En la figura 3 se muestra el efecto de los factores de influencia que tienen una contribución menor de 0.2% de contenido de humedad.

Los factores que tienen una contribución entre 0.05 y 0.1% fueron U_o , U_a y T_o , los cuales están relacionados con las condiciones iniciales y de frontera. Según se observa en la figura 3, el contenido de humedad en el medio de secado U_a puede tener un efecto importante en la región final de secado, por lo que para alcanzar la masa seca se requiere tener un horno de secado que genere una atmósfera con mínimo contenido de humedad.

Los coeficientes con contribuciones menores de 0.05% y que se pueden ignorar son: ε , δ , T_o , K_q y C_q . La contribución de δ en el perfil de humedad se reportó en (Liu y Cheng, 1991; Alvarez *et al.*, 2001; Farlow, 1993) con conclusiones similares.

Tabla 3. Coeficientes con mayor contribución en el perfil de humedad de acuerdo con la solución del modelo de Luikov

Propiedad	K_m	a_m	C_m	ρ	L	λ	a_q
Contenido de humedad/%	0.70	0.45	0.30	0.30	0.25	0.20	0.20

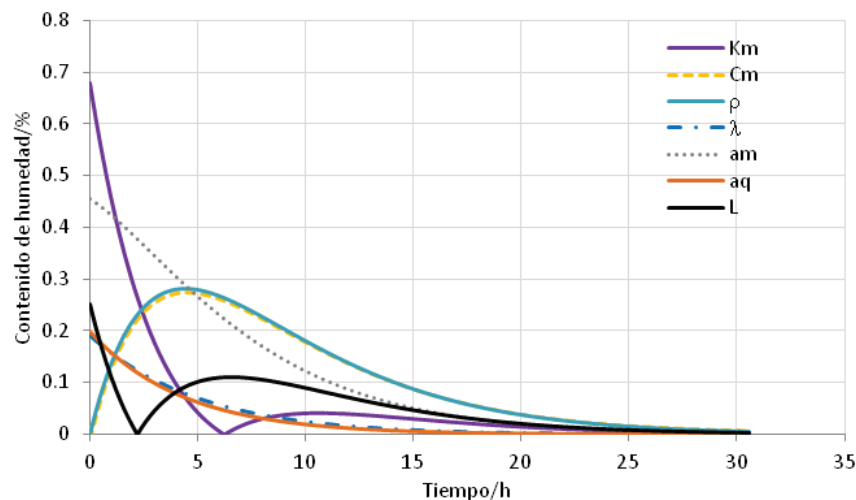


Figura 2. Factores de mayor influencia en los perfiles de contenido de humedad en el proceso de secado de ladrillo

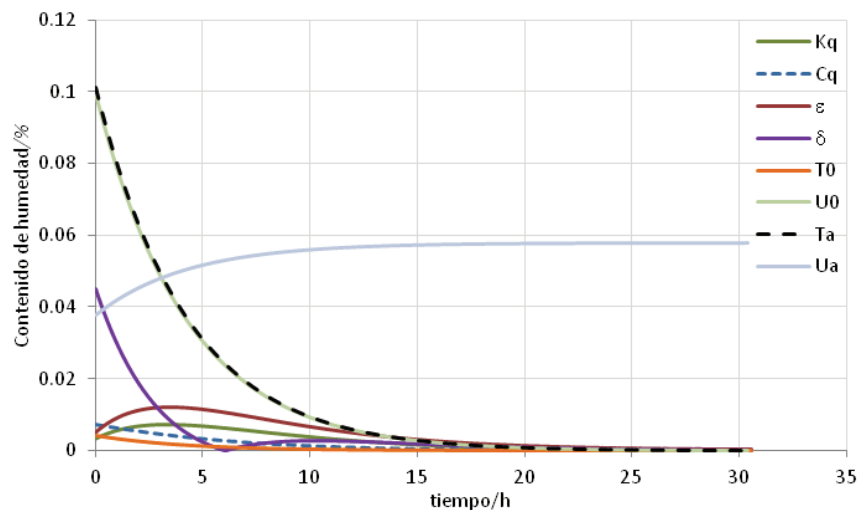


Figura 3. Factores de influencia con menor contribución en los perfiles de contenido de humedad en el proceso de secado

Validación del modelo

Para validar el modelo se usaron muestras de ladrillo tradicional con espesor de 25 mm y un horno de secado comercial que opera por convección forzada, de aproximadamente 40 a 325°C y tiene una incertidumbre estándar por estabilidad de $u_{stb}=0.11^{\circ}\text{C}$ y una incertidumbre estándar por gradientes de $u_{grad}=0.86^{\circ}\text{C}$. La medición de temperatura dentro del horno se realizó con termopares (tipo T) colocados en el volumen de trabajo, los cuales se midieron con un multímetro digital, que se comunicó a una computadora para la adquisición de datos.

Las muestras de ladrillo se acondicionaron mediante inmersión en agua por al menos 12 h y luego se expusieron al ambiente para eliminar el agua líquida presente en la superficie, posteriormente se pesaron y se colocaron en el horno para iniciar el secado. Los experimentos de secado se realizaron a 60 y 80°C.

Las muestras se sacaron del horno por periodos específicos de tiempo hasta que no se observaron cambios en la masa (condición de masa constante). La medición de masa se realizó con una balanza de 3.1 kg con resolución de 0.1 g.

La masa seca del ladrillo requerida para calcular el contenido de humedad (y con ella obtener los perfiles de humedad) se obtuvo al secar la muestra a 130°C por periodos de 1 h hasta alcanzar masa constante.

Los perfiles experimentales y los obtenidos con el modelo Luikov a 60 y 80°C se muestran en las figuras 4 y 5, respectivamente.

Los perfiles (teóricos y experimentales) de la figura 4 muestran una diferencia en los perfiles en las primeras horas; sin embargo, en la región final del periodo de velocidad decreciente estos concuerdan satisfactoriamente.

Los resultados obtenidos en las figuras 4 y 5 muestran que el secado de ladrillo obtenido experimental-

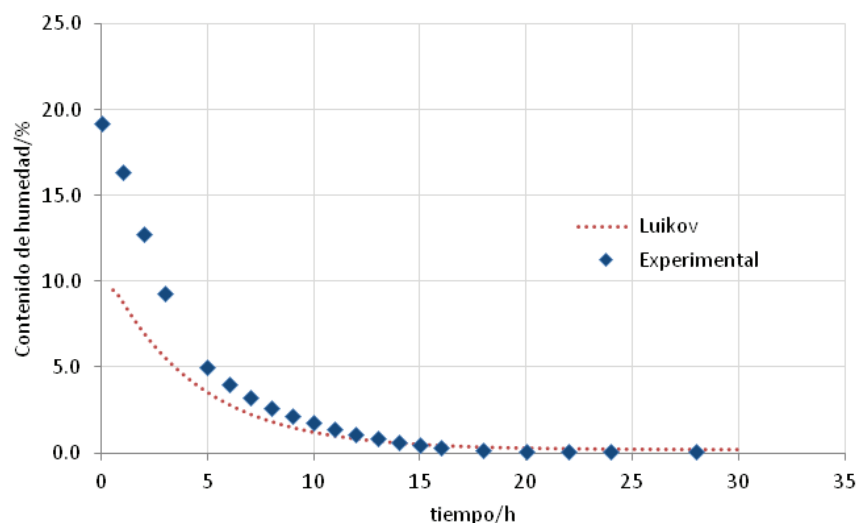


Figura 4. Comparación de los perfiles de humedad teóricos y experimentales de una muestra de ladrillo a una temperatura de 60°C

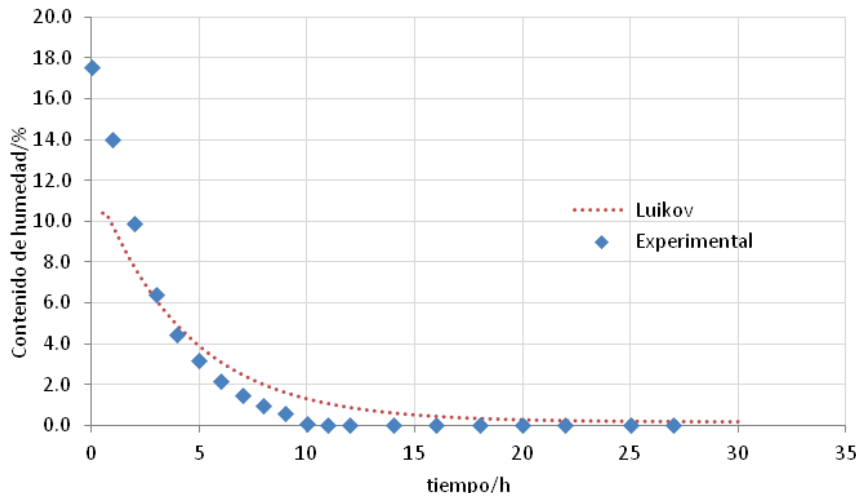


Figura 5. Secado de una muestra de ladrillo en un horno de secado a una temperatura de 80°C

mente es más rápido a 80°C que a 60°C, mientras que los valores de contenido de humedad calculados del modelo de Luikov tienen perfiles similares a los diferentes valores de temperatura. La falta de concordancia en las primeras horas, entre los perfiles calculados y experimentales, se debe a que no se consideraron las raíces complejas para obtener el perfil, y que únicamente se usó una raíz en la solución.

La comparación de los perfiles teóricos y experimentales muestra una buena aproximación en las dos primeras horas y se desvían considerablemente en el periodo de 5 h a 10 h; posteriormente los perfiles son muy similares y se ajustan satisfactoriamente en la región final del periodo de velocidad decreciente.

Conclusiones

Se implementó la solución del modelo de Luikov para una muestra de ladrillo tradicional, considerándolo como una placa plana, donde se impusieron condiciones de frontera tipo convectivo para describir el proceso de secado. Esto permitió realizar un análisis paramétrico para identificar los principales factores de influencia que afectan los perfiles de humedad en el proceso de secado.

Los parámetros con mayor contribución en los perfiles de humedad fueron K_m , C_m , ρ , λ , a_m , a_q y L , los cuales tienen una contribución mayor que 0.2% del contenido de humedad, mientras que los coeficientes restantes tienen una contribución menor y, en algunos casos, su contribución se puede ignorar. En la región final de secado las curvas de incertidumbre tienden a reducirse y predomina la incertidumbre del medio de secado. La contribución de los tres primeros coeficientes permite concluir

que la difusión de humedad es uno de los principales mecanismos que controla el proceso de secado.

Por último, se realizó la validación experimental del modelo en temperaturas de 60 y 80°C, lo cual confirmó que el modelo se puede aplicar satisfactoriamente para describir el proceso de secado en la región final del periodo de velocidad decreciente.

Agradecimientos

El presente trabajo se realizó con el apoyo del Centro Nacional de Metrología a través del programa SIDE-PRO (DAF.342.659.2008).

Nomenclatura

A, B constantes
 C_m capacidad de humedad
 C_q capacidad calorífica
 f función arbitraria
 k factor de cobertura
 K_m conductividad de humedad
 K_q conductividad térmica
 L espesor de la muestra
 T_0 temperatura inicial
 T_a temperatura del medio de secado
 T tiempo
 U_0 potencial de humedad inicial
 U_a potencial de humedad del medio de secado
 a_m coeficiente convectivo de transferencia de masa
 a_q coeficiente convectivo de transferencia de calor
 δ coeficiente termogradiente
 ε cociente entre la difusión de vapor y la difusión total de humedad

λ calor latente de evaporación

ρ densidad

ϕ función potencial

Subíndices

0 condición inicial a condición final

q transferencia de calor

m transferencia de masa

u incertidumbre estándar combinada

Referencias

- Alvarez G., Medina J., Lira L. Aplicación de las soluciones reales y complejas de las ecuaciones de Luikov de transferencia de masa y energía. *Información Tecnológica*, volumen 12, 2001: 61-68.
- Cacuci D.G. *Sensitivity and uncertainty analysis theory*, vol.1, Chapman & Hall CRC, 2003, 285 p.
- Dantas L.B., H. Orlande R.B., Cotta R.M. Estimation of dimensionless parameters of Luikov's system for heat and mass transfer in capillary porous media. *International Journal of Thermal Sciences*, volume 41, 2001: 217-227.
- Efimov S.S., Starostin E.G., Tappyrova N.I. Effect of hydrothermal conductivity on thermal resistance of porous materials. *Thermophysics and Aeromechanics*, volumen 18, 2011: 129-134.
- Farlow S.J. *Partial differential equations for Scientists and Engineers*, Dover Publications Inc. 1993, pp. 33-42.
- Fulford D.F. A survey of recent Soviet research on the drying of solids. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, volumen 47, 1969: 378-391.
- Goyal A., Srinivasan R. Uncertainty and sensitivity analysis to quantify the accuracy of analytical model. *International Journal of Modeling and Optimization*, volumen 2, 2012: 648-652.
- Hernández-Rodríguez J., Quinto-Diez P. Secado de medios porosos: una revisión a las teorías actualmente en uso. *Científica*, volumen 9, 2005: 63-71.
- Hoffman J.D. *Numerical methods for engineers and Scientists*, McGraw Hill, Nueva York, 1992, pp 127-186.
- JCGM100:2008, GUM 1995 with minor corrections, Evaluation of measurement data- Guide to the expression of uncertainty in measurement, first edition September 2008, © JCGM2008.
- Kerestecioglu A., Swami M., Dabir R., Razzaq N., Fairey P. Theoretical and computation investigation of algorithms for simultaneous heat and moisture transfer in buildings (task 2 final report), DOES/SF/16305-2;FSEC-CR-191-88, US Department of Energy, 1998.
- Kowalski S.J., Strumillo C. Moisture transport, thermodynamics and boundary conditions in porous materials in presence of mechanical stresses. *Chemical Engineering Science*, volumen 52, 1997: 1141-1150.
- Liu J., Cheng S. Solutions of Luikov equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies. *Int. Heat and Mass Transfer*, volumen 34, 1991: 1747-1754.
- Luikov A.V. On systems of differential equations for heat and mass transfer in capillary porous bodies. *Int. J. Heat Mass Transfer*, volumen 18, 1975: 11-17.
- Lobo P.D., Mikhailov M.D., Ozisik M.N. On the complex Eigen-Values of Luikov System of equations. *Drying Technology*, volumen 5, 1987: 273-286.
- Martínez-López E., Lira-Cortés L. Analysis of Luikov's model in the process of heat and moisture transfer inside of a slab of ceramic. *Proceedings of Thermophysics 2012, Podkylava, Slovak Academic of Science, Slovak*, pp 123-133, 2012.
- Mujumdar-Arum S. *Handbook of industrial drying*, Third edition, CRC Press, 2006.
- Philip J.R., De-Vries D.A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Trans. Am. Geophys Union*, volumen 38, 1957: 222-232.
- Scarpa F., Milano G. The role of adsorption and phase change phenomena in the thermophysical characterization of moist porous materials. *International Journal of Thermophysics*, volumen 23, 2002: 1033-1046.
- Shahary A.N. *Mathematical modeling of drying foods products; Applications to tropical fruits*, (PhD thesis), University of Nottingham, 2012, 227 p.
- Wang W., Chen G., Mujumdar A.S. Physical interpretation of solids drying: An overview on mathematical modeling research. *Drying Technology*, volumen 21, 2007: 659-668.
- Warren N.J. *A mathematical model of simultaneous heat and mass transfer in a rigid porous material during the falling rate period of drying*, (PhD Thesis), Department of Chemical Engineering University of Surrey, Guildford, 1983, 147 p.

Este artículo se cita:

Citación estilo Chicago

Martines-López, Enrique, Leonel Lira-Cortés. Evaluación de los factores de influencia en el modelo de Luikov durante el secado de ladrillo. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XVII, 01 (2016): 35-44.

Citación estilo ISO 690

Martines-López E., Lira-Cortés L. Evaluación de los factores de influencia en el modelo de Luikov durante el secado de ladrillo. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen XVII (número 1), enero-marzo 2016: 35-44.

Semblanzas de los autores

Enrique Martines-López. Egresado de la Escuela Superior de Física y Matemáticas del Instituto Politécnico Nacional, obtuvo el grado de doctor en ciencia y tecnología por el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial del Estado de Querétaro en 2013. Se ha desempeñado en el Centro Nacional de Metrología por más de 20 años, donde ha colaborado en el desarrollo de los patrones nacionales de humedad en gases y sólidos.

Leonel Lira-Cortés. Realizó estudios de licenciatura en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa de la Ciudad de México, obtuvo el grado de doctor en ciencias en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico en el año 2002. Sus campos de experiencia son transferencia de calor, transferencia de masa, mecánica de fluidos y termodinámica. Actualmente es coordinador científico de la Dirección de Termometría donde colabora en el desarrollo de distintos patrones de medición.