



ESTUDIO DE LA ARCILLA EXPANDIDA COMO RELLENO DE INTERCAMBIADORES PARA ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO¹

Gea M., Hoyos D., Iriarte A. y Lesino G.

Universidad Nacional de Salta, Instituto de Investigación en Energías No Convencionales (INENCO)
Av. Bolivia 5150, 4400, Salta, Argentina. Email: geam@unsa.edu.ar

RESUMEN: Se presenta un estudio de las características y propiedades de la arcilla expandida (LECA) para ser usada como relleno en intercambiadores para enfriamiento evaporativo. Se analizó la posibilidad de aprovechar su porosidad para reducir la circulación de agua. Se realizó un estudio microscópico de su estructura mediante análisis de imágenes. Se plantearon las ecuaciones de balance de calor y masa que gobiernan el proceso de enfriamiento evaporativo. Se ensayó experimentalmente un prototipo de enfriador evaporativo con relleno de bolas de arcilla expandida y se elaboró un programa de simulación. Se concluye que es un material adecuado para relleno de intercambiadores por ser liviano, rígido e inerte. Se encontró que la absorción de agua ocurre sólo en una delgada capa superficial en la cual se encuentran los poros abiertos.

Palabras clave: enfriamiento evaporativo, bolas de arcilla expandida, LECA.

INTRODUCCION

En estudios realizados con anterioridad sobre un sistema de enfriamiento evaporativo instalado en una casa de cría de plantines de olivo en la provincia de Catamarca se observó el problema de la degradación del relleno de paja de los intercambiadores (Iriarte y otros, 1999; Gea y Lesino, 1999). Las causas fueron la dificultad que existe para distribuir el agua de tal manera que moje toda la paja, la acumulación de polvo, la proliferación de microorganismos y el apelmazamiento.

Una alternativa sería utilizar rellenos estructurados los cuales tienen menor área específica que los rellenos de paja pero, a diferencia de éstos, en los rellenos estructurados casi toda la superficie se aprovecha para el intercambio de calor y masa ya que las paredes se mojan uniformemente, la generación de microorganismos es mucho menor, su sistema de distribución de agua permite un mejor autolimpiado y producen una baja pérdida de carga del aire. La dificultad se encuentra en su alto costo ya que no se fabrican en el país.

Tratando de encontrar un intercambiador para enfriamiento evaporativo que no sufra la degradación que sufre la paja y no resulte tan costoso como los rellenos estructurados se estudió la performance de rellenos aleatorios constituidos por bolas de arcilla expandida conocidas como LECA (Lightweight Expanded Clays Aggregate) que es un material inerte, liviano y disponible en el mercado ya que se fabrica para la industria de la construcción.

CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LA ARCILLA EXPANDIDA

La arcilla expandida es un material de origen cerámico con una estructura altamente porosa (figura 1). Su elevada resistencia mecánica la hace apta para su utilización tanto en morteros aislantes ultraligeros como en hormigones ligeros de altas prestaciones. Por ser un material inerte y poroso también se usa comúnmente como sustrato en hidrocultivo.

El germen de la arcilla expandida son pequeñas esferas de arcilla cruda con una granulometría de 0 a 6 mm. La expansión se produce en hornos rotatorios gracias a un choque térmico a 1.200 C. A esta temperatura, la arcilla comienza a fundir al tiempo que se produce la combustión de la materia orgánica en el interior de la arcilla. Los gases de combustión expanden la bola de barro hasta alcanzar 5 veces su tamaño original.

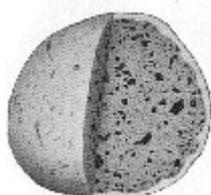


Figura 1: Micro y macro poros vistos en un corte de una bola de arcilla expandida

¹ Trabajo parcialmente financiado por el Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta y por la Agencia Nacional de Promoción de Ciencia y Técnica.

El uso de la arcilla expandida como relleno de intercambiadores para enfriamiento evaporativo requiere el conocimiento de los factores geométricos y físicos asociadas a la transferencia de calor y masa.

Porosidad

La caracterización microestructural del elemento poroso fue realizada mediante el análisis de imágenes microscópicas. Las imágenes en tonos de gris adquiridas de una sección plana de la bola de arcilla (figura 2a) fueron invertidas para resaltar los poros (figura 2b). Posteriormente se obtuvieron los histogramas de las mismas y de su observación se eligieron tres niveles de discretización: 200, 205 y 210. Se observó que el nivel que mejor separa los poros es 205 (figura 2c). Con la imagen discretizada se observa que la estructura de la arcilla expandida esta constituida por un conjunto de poros cerrados que le dan la característica de material liviano pero que no aportan para la absorción de agua.

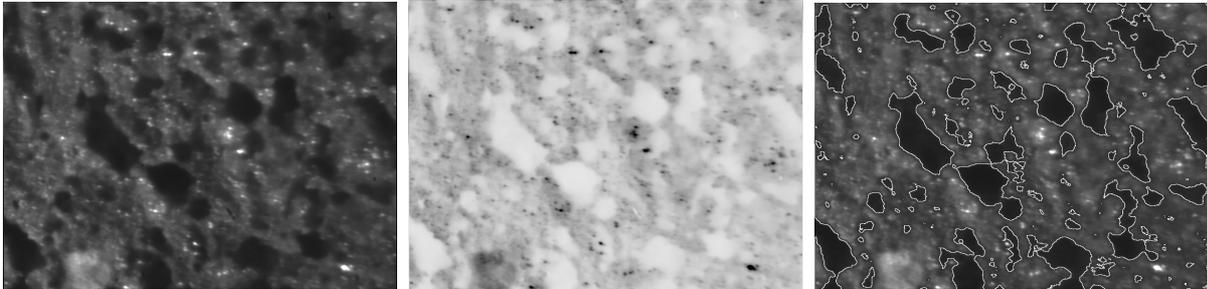


Figura 2: a) Imagen original en tonos de gris. b) Imagen invertida. c) Imagen con los poros identificados.

La porosidad total del material está determinada por la fracción de poros abiertos (que son capaces de absorber agua) y la fracción de poros cerrados. La porosidad total en porcentaje de volumen fue obtenida como:

$$\rho_{total} = (1 - \rho_a / \rho_{esp}) \cdot 100 \quad (1)$$

ρ_a = densidad aparente de la bola de arcilla (kg/m^3)

ρ_{esp} = densidad específica (material sólido) (kg/m^3)

La densidad aparente medida es de 827 kg/m^3 y la densidad específica de 1350 kg/m^3 por lo que resulta una porosidad total del 39 %.

Se observa que los poros abiertos se encuentran en una delgada cáscara (figura 3). Para la determinación de la porosidad abierta se estimó su espesor usando la imagen del borde y se midió la cantidad de agua absorbida por los poros y la cantidad de agua libre en su superficie mediante una experiencia de secado que se detalla más adelante.

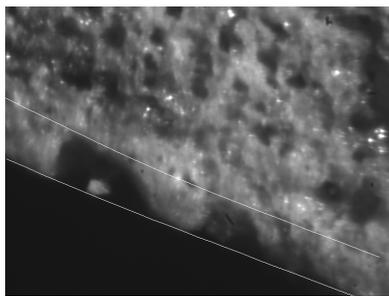


Figura 3: Imagen de un borde que permite estimar el espesor de la capa de poros abiertos

Isotermas de desorción:

La humedad en la superficie de la arcilla expandida en equilibrio con el ambiente depende del contenido de agua y de otros factores como la tensión capilar en los poros y las fuerzas originadas en la interacción superficial que influyen en la presión de vapor del agua.

Se determinó experimentalmente la correspondencia entre la humedad de equilibrio y el contenido de agua del material para una determinada temperatura y se construyeron las isotermas de desorción (figura 4).

Para obtener cada punto de la isoterma se colocó una pequeña muestra de material previamente saturado de agua en un recipiente en contacto con aire a temperatura controlada. El recipiente contiene en el fondo una solución saturada de sales que determinan la humedad relativa del aire. La arcilla pierde humedad hasta llegar al equilibrio con el aire después de varias

horas y su peso se mantiene constante. Se obtuvieron las isotermas para 20 C y 40 C utilizando soluciones saturadas de cloruro de litio, nitrito de sodio, cromato de potasio y bromato de potasio (Perry & Green, 1997).

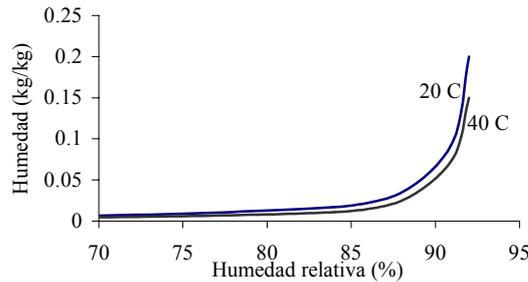


Figura 4: Isotermas de desorción de la arcilla expandida para 20 C y 40 C

Calor de desorción:

El calor de vaporización en la desorción es igual al calor de vaporización del agua libre mas el calor de vaporización del agua ligada y depende del contenido de humedad. Se puede calcular a partir de la ecuación de Clausius-Clapeyron aplicada a la curva de cambio de fase del vapor de agua a agua líquida ligada al material y a la curva de cambio de fase del vapor de agua a agua libre (Horn y otros, 1998).

$$\ln (HR_1/HR_2) = - h_1 / R (1/T_2 - 1/T_1) \tag{2}$$

donde:

HR₁ = humedad relativa de equilibrio a la temperatura T₁ en Kelvin

HR₂ = humedad relativa de equilibrio a la temperatura T₂ en Kelvin

h₁= calor de vaporización del agua ligada

Geometría:

Los factores de la geometría que influyen en el intercambio de calor y masa son el diámetro medio de las bolas de arcilla y el grado de compactación de éstas, que viene dado por la fracción de huecos, con los que se obtiene el área específica de intercambio.

La fracción de huecos es la relación entre el volumen de huecos, que es el volumen total menos el volumen de las bolas, y el volumen total.

$$\varepsilon = (V_t - V_b) / V_t \tag{3}$$

ε = Fracción de vacíos

V_t = Volumen total del lecho

V_b = Volumen de las bolas de arcilla

El área específica es la relación entre el área de intercambio, que es la superficie del relleno, y el volumen del lecho.

$$A_e = A_i / V_t = A_i (1-\varepsilon) / V_b \tag{4}$$

A_e = Área específica

A_i = Área de intercambio

Si consideramos a cada bola de arcilla como una esfera de diámetro medio d correspondiente a una distribución normal en la muestra, el área de n bolas será n π d² y el volumen, n π d³ / 6. Entonces el área específica se puede calcular como:

$$A_e = 6 (1-\varepsilon) / d \tag{5}$$

d = Diámetro medio de las bolas de arcilla

MODELIZACIÓN DE UN LECHO DE BOLAS DE ARCILLA EXPANDIDA

Se plantean los balances de calor y masa en un volumen de control de espesor diferencial dx siendo x la dirección del flujo de aire y se realizan las siguientes hipótesis: flujo unidimensional; se desprecia la transferencia de calor por conducción; las propiedades se mantienen constantes; no existen pérdidas de calor y masa al ambiente; no existen gradientes de temperatura y humedad en el interior de las bolas de arcilla (modelo de capacidad concentrada); existe un equilibrio termodinámico entre la superficie de arcilla y la capa de aire que la rodea y se considera que ésta se encuentra a la temperatura de la arcilla..

En el fluido, la ecuación diferencial correspondiente al balance de calor es:

$$(\rho C_p)_f \varepsilon \frac{dT_f}{dt} = (m C_p)_f / A_i \frac{dT_f}{dx} + h_v (T_b - T_f) \quad (6)$$

En el sólido, la ecuación diferencial correspondiente al balance de calor es:

$$(\rho C_p)_b (1 - \varepsilon) \frac{dT_f}{dt} = h_v (T_f - T_b) \quad (7)$$

T = temperatura (C)

ρ = tiempo (s)

m = flujo másico de aire (kg/s)

ρ = densidad (kg/m³)

C_p = calor específico (J/kg C)

h_v = coeficiente de transferencia de calor por unidad de volumen (W/m³)

subíndice f = fluido

subíndice b = sólido

subíndice v = por unidad de volumen

En el fluido, la ecuación diferencial correspondiente al balance de masa es:

$$\rho_f \varepsilon \frac{dw_f}{dt} = m / A_i \frac{dw_f}{dx} + h_{mv} (w_f - w_{s,b}) \quad (8)$$

En el sólido, la ecuación diferencial correspondiente al balance de masa es:

$$\rho_b (1 - \varepsilon) \frac{dw_b}{dt} = h_{mv} (w_{s,b} - w_f) \quad (9)$$

w = contenido de agua por unidad de masa (kg/kg)

h_m = coeficiente de transferencia de masa

subíndice s = saturación de vapor de agua

La humedad absoluta en la superficie del sólido w_{s,b} se calcula utilizando la ecuación (1) y las isoterms de sorción.

$$w_{s,b} = f(w_b(\rho), T) \quad (10)$$

La relación entre la humedad absoluta y la humedad relativa es:

$$w = 0,622 \frac{HR P_{sat}(T)}{(P_{atm} - 0,378 HR P_{sat}(T))} \quad (11)$$

$$P_{sat}(T) = e^{(23,5613 - 4032 / (273,15 + T - 38))} \quad (12)$$

HR = humedad relativa

P_{sat}(T) = presión de vapor de saturación a la temperatura T (Pa)

P_{atm} = presión atmosférica (Pa)

El calor que entregan la arcilla y el aire para sostener la evaporación es:

$$q_{ev} = H_d A_i h_{mv} (w_{s,b} - w_f) \quad (13)$$

El calor de desorción H_d (J/kg) es igual al calor de vaporización del agua libre h_{fg} más el calor de vaporización del agua ligada H_l que se obtiene desde la ecuación (2).

La relación entre los coeficientes de transferencia de calor y masa surge de la analogía de los procesos en la capa límite:

$$h / h_m = \rho C_p Le^{2/3} \quad (14)$$

Le = número adimensional de Lewis

La resolución del sistema se realiza planteando los circuitos térmico y másico y utilizando el programa Simusol. A cada elemento de volumen del lecho discretizado le corresponden los siguientes circuitos:

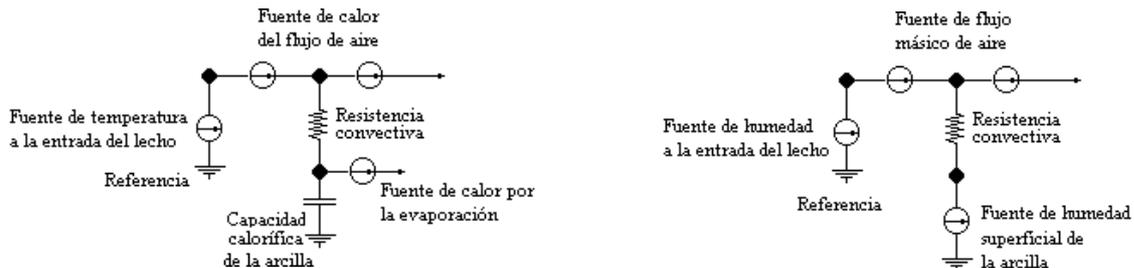


Figura 5: Circuitos térmico y de masa que representan las transferencias en el lecho de bolas de arcilla

En el circuito térmico los nodos representan valores de temperatura y la corriente es el flujo de calor. La fuente de temperatura a la entrada del lecho provee el valor de la temperatura ambiente desde una tabla de datos experimentales. La fuente de calor de flujo de aire representa el calor transferido entre los nodos de temperatura a la entrada y a la salida. La capacidad calorífica de la porción del lecho de arcilla considerado isotérmico está representado por el condensador. La resistencia convectiva representa la resistencia a la transferencia de calor entre la arcilla y el aire. La fuente de calor por la evaporación es el producto de la masa evaporada por el calor de desorción.

En el circuito másico los nodos representan valores de humedad absoluta y la corriente es el flujo másico transferido. La fuente de humedad a la entrada provee el valor de la humedad ambiente. La fuente de flujo másico de aire representa el caudal de vapor de agua transferido en el flujo de aire entre los nodos de humedad a la entrada y a la salida. La resistencia convectiva es la resistencia a la transferencia de vapor entre la superficie de la arcilla y el aire. Este flujo másico es tomado por el circuito térmico para calcular el calor de evaporación con la ecuación (13). La fuente de humedad provee el valor de la humedad del aire en la superficie de la arcilla a la saturación o a la humedad de equilibrio de la isoterma correspondiente.

Se incorporaron al programa de cálculo las ecuaciones (2), (11), (12), (13) y (14). Las isotermas de equilibrio, la temperatura y la humedad de entrada se incluyeron como tablas de datos experimentales. El programa resuelve simultáneamente los circuitos de calor y masa.

EXPERIENCIAS

Se construyó un prototipo que consiste en un lecho relleno aleatoriamente con bolas de arcilla que se encuentra en un conducto por el que circula un flujo de aire mediante la acción de un ventilador. Se midieron el flujo, la temperatura y la humedad del aire en puntos ubicados a la entrada y la salida del lecho. Se realizó la experiencia de enfriamiento evaporativo con las bolas de saturadas de agua pero sin circulación del flujo cruzado de agua a fin de determinar si la capacidad de absorción de la arcilla expandida .

Se compararon los datos experimentales con los valores teóricos entregados por la simulación de un circuito térmico y un circuito másico resueltos simultáneamente con Simusol (Alía y otros, 2003), tomando el coeficiente de transferencia de calor h como variable de ajuste. Se encontró coincidencia para un valor de $h = 9 \text{ W/m}^2 \text{ C}$.

El valor obtenido para h es muy próximo a los $10 \text{ W/m}^2 \text{ C}$ que se obtienen con la expresión para lechos de piedra recomendada por Duffie & Beckman, 1980, calculado a partir del coeficiente de transferencia de calor por unidad de volumen h_v :

$$h_v = 650 (G_0 / d)^{0.7} \tag{15}$$

G_0 = flujo másico de aire por unidad de área frontal ($\text{kg} / \text{s m}^2$)
 d = diámetro medio de la piedra (m)

y próximo al valor de $11 \text{ W/m}^2 \text{ C}$ que se obtiene con la expresión recomendada por Incropera & De Witt, 1996, a partir de una correlación de números adimensionales:

$$\square j_h = 2,06 Re^{-0.575} \tag{16}$$

j_h = factor de Colburn
 Re = número de Reynolds

Los resultados se presentan en la figura 6. Las gráficas corresponden a un caudal específico de aire de $0,25 \text{ kg/m}^2\text{s}$ para un espesor de lecho de 6 cm. Se encuentra un buen ajuste en los valores de temperatura y una diferencia en los valores de humedad que está dentro de los errores de medición.

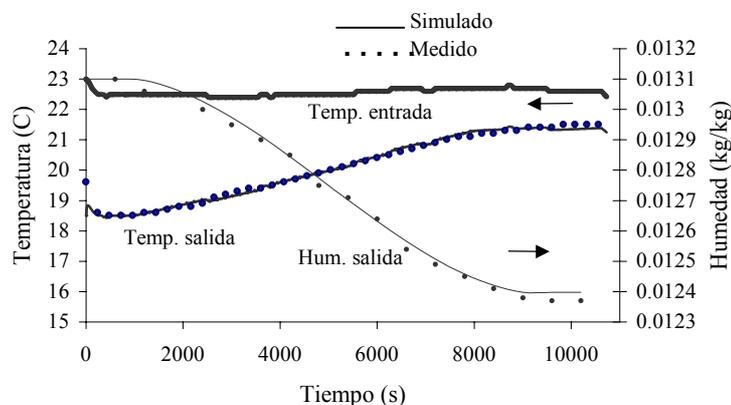


Figura 6: Evolución de la temperatura y la humedad del aire a la salida del lecho

Se observa que después de un tiempo aproximado de 1200 segundos la humedad a la salida deja de ser constante y comienza a disminuir. En este período es posible calcular la cantidad de agua libre existente en la superficie de la arcilla.

A partir de allí comienza a evaporarse el agua absorbida y sigue existiendo enfriamiento evaporativo hasta los 9000 segundos aproximadamente. Durante este período se calcula la cantidad de agua ligada, y con el espesor de la capa de poros abiertos estimado a partir de la imagen de la figura 3 se determina la porosidad abierta del material. Se obtiene una masa de agua de 2,6 kg absorbida en una capa de 3×10^{-4} m de espesor, para un diámetro medio de las bolas de arcilla de 0,031 m, lo que da como resultado una porosidad en la cáscara del 37 %.

Luego de 1200 segundos no existe evaporación y la temperatura del aire a la salida tiende lentamente al valor de la temperatura de entrada en correspondencia con el calentamiento sensible del lecho seco.

CONCLUSIONES

La arcilla expandida cuenta con cualidades que la hacen apta para ser usada como relleno de intercambiadores para enfriamiento evaporativo. Al ser un material inerte y rígido no sufre degradación por la acción del agua ni deformaciones que alteren la porosidad del lecho. Otra cualidad es que su densidad aparente relativamente baja facilita, desde el punto de vista estructural, la incorporación de un intercambiador de bolas de arcilla expandida en un edificio.

Como desventaja se encuentra que, al ser granos aproximadamente esféricos, la superficie por unidad de volumen del lecho es menor que la que se consigue con otras formas comunes en rellenos aleatorios como anillos, cilindros huecos, etc.

En cuanto a la posibilidad de reducir la circulación de agua en un sistema de enfriamiento evaporativo utilizando un material poroso, se observó que la arcilla expandida no tiene una gran capacidad de absorción porque su porosidad está constituida principalmente por poros cerrados. Para conseguir mejorar la absorción se puede utilizar una granulometría correspondiente a un diámetro medio menor con lo que se consigue aumentar el área específica y por lo tanto una mayor proporción de poros abiertos. El inconveniente que esto trae es un aumento de la pérdida de carga.

AGRADECIMIENTO

La adquisición de las imágenes microscópicas de la arcilla expandida fue realizada por el Grupo de Óptica Laser de la Universidad Nacional de Salta dirigido por el Lic. Elvio Alanís.

REFERENCIAS

Iriarte A., Lesino G. y Tomalino L. (1999) Comportamiento Higrotérmico en Invierno de Propagación de Plantas. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. (ISSN 0329-5184). Volumen 3, pp. 213 - 216.

Gea M. y Lesino G. (1999) Simulación de Paneles para Enfriamiento Evaporativo. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Volumen 3, pp. 361 – 364.

Perry R. and Green D. (1997) Perry's Chemical Engineer's Handbook, pp. 514-516. Mc Graw – Hill Education.

Horn M., Sinicio R, Beltrán R. y Corbalán R. (1999) El Proceso de Secado en Ingeniería del Secado Solar, pp. 5-1 – 5-3. CYTED. Impresos Universitarios S.A..

Duffie J. and Beckman W. (1991) Solar Engineering Thermal Processes. 2° edición, pp. 139-141. Wiley Interscience. NY. York

Incropera F. y De Witt D. (1996). Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 4° edición, pp. 392-393. Wiley y Sons, NY.

Alía D., Saravia L. y Saravia D. (2003). Manual de Simusol (inédito). Universidad Nacional de Salta.

STUDY OF EXPANDED CLAY AS PACKING FOR EXCHANGERS OF EVAPORATIVE COOLING

ABSTRACT

A study of the characteristics and properties of the expanded clay (LECA) to be used as packing in heat and mass exchangers for evaporative cooling is presented. The possibility to reduce the water circulation was analyzed of taking advantage of its porosity. A microscopic study of its structure by means of image analysis was made. The equations of heat and mass balance that govern the process were considered. A prototype of evaporative cooler formed by a packed bed of expanded clay pellets was measured and a program of simulation for the extrapolation of the result was elaborated. The conclusion is that this material being light, rigid and inert is suitable for packing. The water absorption happens only in a thin superficial layer in which are the open pores.

Keywords: evaporative cooling, expanded clay pellets, LECA.