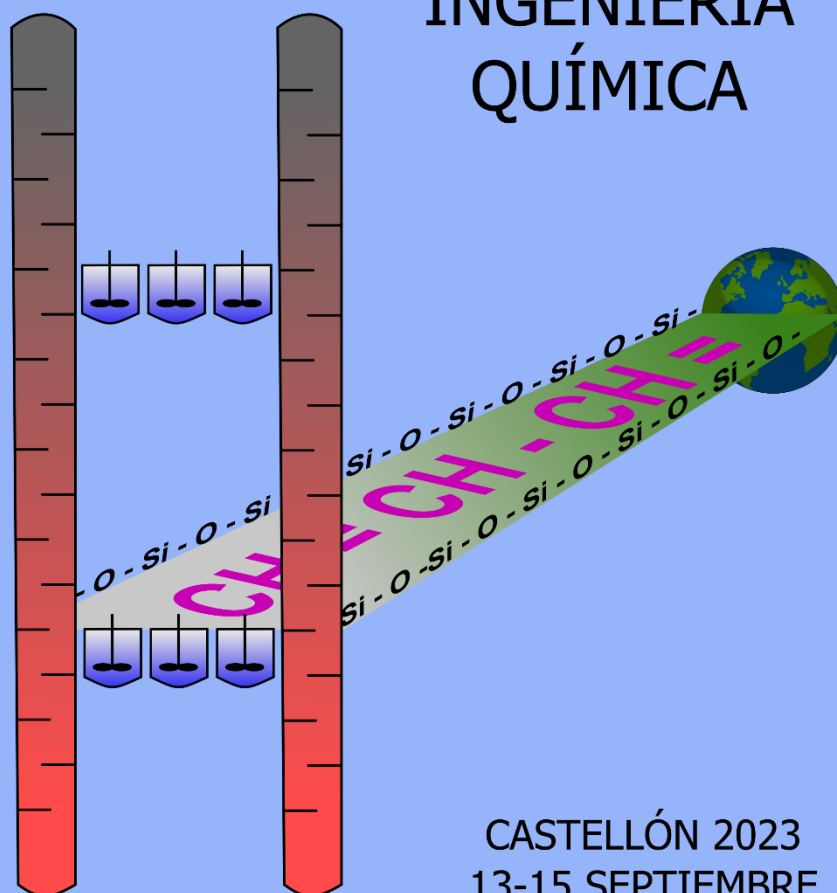


XXXVII

JORNADAS  
NACIONALES  
DE  
INGENIERÍA  
QUÍMICA



CASTELLÓN 2023  
13-15 SEPTIEMBRE

INGENIERÍA QUÍMICA:  
EL PUENTE HACIA UN  
FUTURO SOSTENIBLE

LIBRO DE ACTAS



ISBN: 978-84-09-54675-6

## COMITÉ DE ORGANIZACIÓN

Copresidentes: Prof. Dr. Sergio Mestre Beltrán y Prof. Dr. Enrique Javier Sánchez Vilches.

Organizadores: Prof. Dra. María José Orts Tarí y Prof. Dra. Carolina Clausell Terol.

## SESIONES CIENTÍFICAS

- 1) Energía y sostenibilidad.
- 2) Materiales avanzados.
- 3) Procesos innovadores.

## PATROCINADORES



## MODELIZACIÓN DE LA SORCIÓN EN BALDOSAS CERÁMICAS REGULADORAS DE LA HUMEDAD AMBIENTAL

**J. Castellano\***, V. Sanz, E. Cañas, E. Sánchez

*Instituto Universitario de Tecnología Cerámica (IUTC), Universitat Jaume I (UJI), Castellón, España*

*e-mail: javier.castellano@itc.uji.es*

**Palabras clave:** regulación de humedad, baldosa cerámica, cinética de sorción, modelo matemático

### 1 Introducción

El desarrollo de viviendas confortables con menor consumo energético implica un aumento del aislamiento térmico y una reducción en la ventilación de los espacios interiores, lo que puede dar lugar a ambientes con condiciones de humedad perjudiciales para las personas y baja calidad del aire. La exposición a este tipo de entornos es susceptible de producir síntomas clínicos que se corresponden con el "Síndrome del edificio enfermo", los cuales se manifiestan en forma de dolor de cabeza, irritación de las membranas mucosas, alergia o problemas respiratorios<sup>1</sup>.

Existen numerosas posibilidades para acondicionar el aire y regular la humedad en ambientes interiores mediante dispositivos eléctricos como equipos de aire acondicionado, humidificadores y deshumidificadores. Sin embargo, desde un punto de vista sostenible, adquiere gran interés la autorregulación de humedad mediante los propios elementos de construcción como, por ejemplo, materiales cerámicos o baldosas que incorporen dicha funcionalidad. Estos materiales, desarrollados inicialmente en Japón y basados en estructuras porosas con elevada presencia de mesoporos (poros de diámetro entre 2 y 50 nm)<sup>2</sup>, permiten mantener unas condiciones de humedad más saludables y confortables a partir de mecanismos de sorción del vapor de agua. Así, cuando la humedad relativa del ambiente es elevada, las baldosas cerámicas son capaces de reducirla mediante procesos de adsorción y condensación capilar. Por el contrario, si la humedad disminuye en exceso, se produce un fenómeno de desorción y se atenúa la variación de la humedad relativa.

Tradicionalmente, la capacidad de sorción de los materiales reguladores de humedad se ha caracterizado a nivel de laboratorio mediante ensayos isotermos en cámara climática, modificando la humedad relativa del aire y registrando la variación de masa que experimenta el material con el tiempo durante ciclos de diferente duración<sup>3</sup>. Las curvas cinéticas de sorción se han modelizado de acuerdo con las ecuaciones planteadas por Lagergren o Elovich<sup>4,5</sup>.

En el presente trabajo se analizan las cinéticas de sorción de materiales cerámicos que presentan estructuras con mesoporos que se preservan, al menos parcialmente, hasta temperaturas de cocción elevadas. Las curvas cinéticas se modelizan siguiendo un modelo matemático de sorción basado en la ecuación diferencial de pseudo-segundo de Lagergren que relaciona la velocidad de sorción con el cuadrado de la diferencia respecto a la humedad de equilibrio o cantidad de agua máxima que puede adsorber el material en las condiciones fijadas de temperatura y humedad relativa:

$$\frac{dq_t}{dt} = K(q_e - q_t)^2 \quad (\text{Ec. 1})$$

De acuerdo con la ecuación 1, humedad de equilibrio ( $q_e$ ) y la constante de velocidad de sorción ( $K$ ) constituyen los parámetros de ajuste del modelo.

## 2 Procedimiento experimental

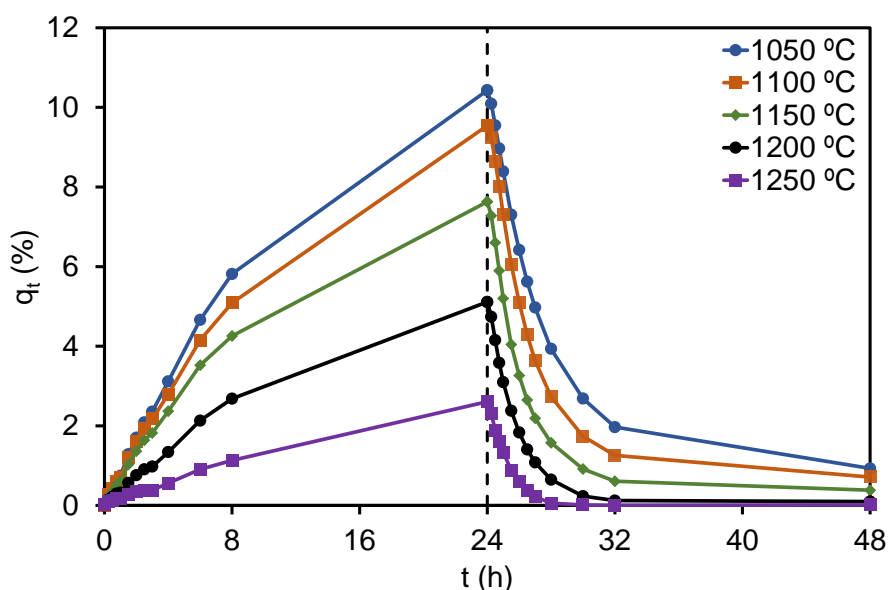
En primer lugar, se prepararon probetas cilíndricas de aproximadamente 40 mm de diámetro y 5 mm de espesor por prensado uniaxial a partir de una composición cerámica en forma pulverulenta que presenta capacidad reguladora de humedad después de una cocción a alta temperatura. Las probetas se conformaron con una presión de prensado de 300 kg/cm<sup>2</sup> y una humedad del material pulverulento de 5,5% en base seca. Las probetas se secaron en estufa y se cocieron en horno eléctrico de laboratorio siguiendo un ciclo rápido a temperatura máxima entre 1050 y 1250 °C, a fin de variar la capacidad de sorción del material. Se cocieron dos piezas para cada temperatura.

Posteriormente, los ensayos de sorción de humedad se realizaron utilizando una cámara climática que permite regular la temperatura y la humedad relativa del aire (HC2020, Heraeus Vötsch). En el ensayo, las probetas se colocan en el interior de la cámara y se establecen unas condiciones iniciales de temperatura 23 °C y humedad relativa 50% durante un mínimo de 16 h. Las piezas se pesan, obteniendo  $m_0$ , y se vuelven a introducir en la cámara aumentando la humedad relativa a 90%. A continuación, se realizan pesadas a períodos de tiempo crecientes ( $m_t$ ) hasta alcanzar una duración de 24 h y se calcula la cantidad de agua adsorbida en función del tiempo ( $q_t$ ) como porcentaje incremental respecto a la masa inicial  $m_0$  según indica la ecuación 2. Por su parte, la desorción de humedad se determina de forma análoga, disminuyendo la humedad relativa de 90% a 50% y realizando las pesadas correspondientes a diferentes tiempos. De esta forma, se obtienen las curvas cinéticas de sorción del material durante ciclos con diferente humedad relativa y temperatura isoterma.

$$q_t(\%) = \frac{m_t - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (\text{Ec. 2})$$

## 3 Resultados y discusión

En la Figura 1 se muestran las curvas cinéticas de sorción obtenidas en función de la temperatura máxima de cocción durante ciclos de 24 h. En la figura se pone de manifiesto el efecto de la temperatura máxima sobre la capacidad de sorción del material, con valores máximos que van disminuyendo al aumentar la temperatura de cocción y cinéticas que se vuelven más rápidas. En efecto, un incremento en la temperatura de cocción provoca una disminución de la porosidad, reduce la cantidad de mesoporos y aumenta el diámetro de éstos en general, de forma que se produce una disminución de la capacidad para regular la humedad y los fenómenos de condensación capilar<sup>6</sup>. Además, se observa que la desorción se produce a mayor velocidad que la adsorción.



**Figura 1:** Curvas cinéticas isotermas de sorción de humedad para muestras cocidas a diferente temperatura.

Las curvas de sorción de la Figura 1 pueden modelizarse de acuerdo con la ecuación de pseudo-segundo orden de Lagergren (ecuación 1), la cual puede integrarse dando lugar a la ecuación 3 con las condiciones de contorno propias de la adsorción y la ecuación 4 para la desorción<sup>7</sup>:

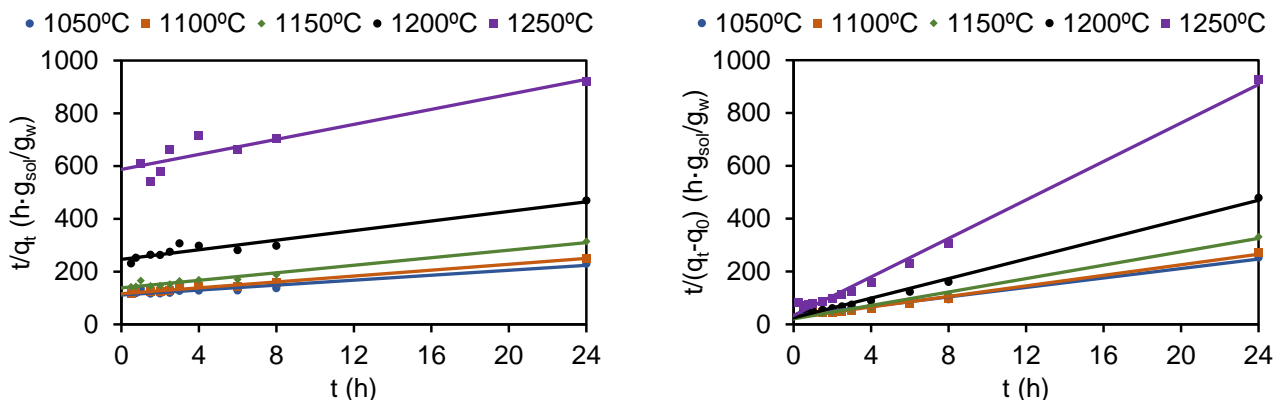
$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{Kq_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (\text{Ec. 3})$$

$$\frac{t}{q_0 - q_t} = \frac{1}{K(q_e - q_0)^2} + \frac{1}{q_e - q_0} t \quad (\text{Ec. 4})$$

Las ecuaciones permiten linealizar las curvas de sorción y obtener los parámetros del modelo, humedad de equilibrio ( $q_e$ ) y constante de velocidad de sorción ( $K$ ), a partir de las pendientes y las ordenadas en el origen de las rectas, siendo  $q_0$  la cantidad de agua adsorbida al inicio de la desorción (valor máximo en la Figura 1).

La linealización de las curvas cinéticas se presenta en la Figura 2, a la izquierda para la adsorción y a la derecha para la desorción. Las humedades de equilibrio y las constantes de velocidad que se obtienen a partir de los ajustes se detallan en la Tabla 1, en función de la temperatura de cocción y según se considere el fenómeno de adsorción o desorción. Los resultados corroboran la bondad de los ajustes, con tendencias marcadamente lineales, coeficientes de correlación cercanos a la unidad y humedades de equilibrio similares en adsorción y desorción, pues este valor es intrínseco al material y no debe depender del fenómeno analizado (adsorción o desorción).

Según se observa en la Tabla 1, la humedad de equilibrio disminuye con el aumento de la temperatura de cocción mientras que la constante de velocidad de sorción aumenta en general. Además, las constantes de velocidad son más elevadas en el caso de la adsorción, puesto que este fenómeno se produce a mayor velocidad.

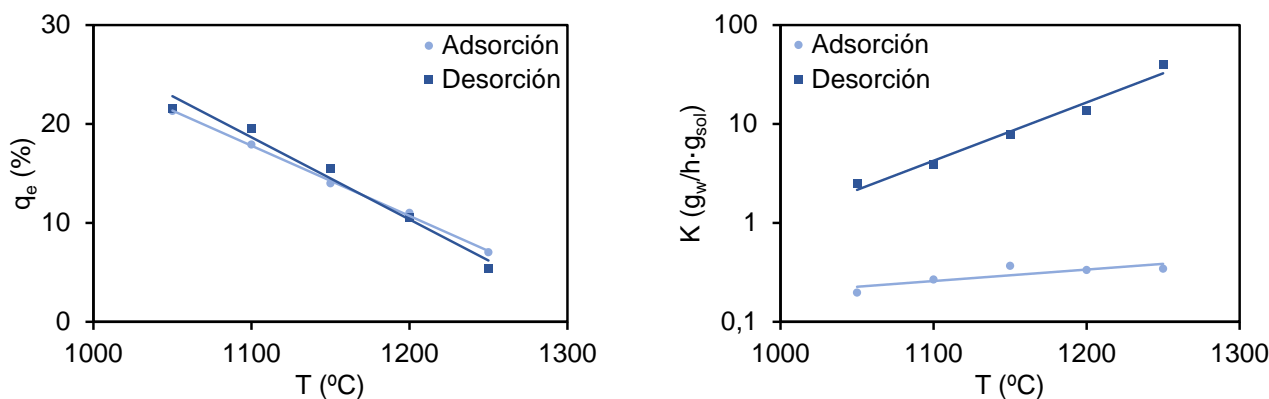


**Figura 2:** Ajustes lineales de las curvas de sorción según las ecuaciones (adsorción a la izquierda y desorción a la derecha).

T (°C)	Adsorción			Desorción		
	$q_e$ (%)	$K$ (g <sub>w</sub> /h·g <sub>sol</sub> )	$R^2$	$q_e$ (%)	$K$ (g <sub>w</sub> /h·g <sub>sol</sub> )	$R^2$
1050	21.3	0.20	0.94	21.6	2.5	0.99
1100	17.9	0.27	0.99	19.5	3.9	0.99
1150	14.0	0.37	0.97	15.5	7.8	0.99
1200	11.0	0.33	0.93	10.5	13.8	0.99
1250	7.0	0.34	0.87	5.4	39.6	0.99

**Tabla 1:** Humedades de equilibrio ( $q_e$ ), constantes de velocidad ( $K$ ) y coeficientes de regresión ( $R^2$ ) de los ajustes.

Finalmente, en la Figura 3 se representan los parámetros del modelo en función de la temperatura máxima de cocción. Del análisis de la figura, se desprende que la humedad de equilibrio se reduce de forma aproximadamente lineal con la temperatura de cocción, mientras la constante de velocidad sigue una tendencia exponencial.



**Figura 3:** Humedades de equilibrio ( $q_e$ ) y constantes de velocidad ( $K$ ) en función de la temperatura de cocción.

## 4 Conclusiones

El presente trabajo analiza la cinética de sorción de composiciones cerámicas reguladoras de humedad cocidas a diferentes temperaturas, ajustando las curvas resultantes a un modelo matemático basado en la ecuación de pseudo-segundo orden de Lagergren. Los resultados ponen de manifiesto la bondad de los ajustes y permiten establecer los parámetros característicos del modelo (humedad de equilibrio y constante de velocidad de sorción), además de analizar su dependencia con la temperatura. De esta forma, se tiene que la humedad de equilibrio depende linealmente de la temperatura de cocción mientras que la constante de velocidad disminuye de forma exponencial.

El trabajo de modelización realizado resulta especialmente útil para predecir el comportamiento de materiales en cuanto a la capacidad de regulación de humedad y su integración en baldosas cerámicas con esta funcionalidad. Con ello, se brinda un modelo práctico para la formulación y optimización de composiciones con capacidad de regulación de humedad, pues facilita la comparación y anticipa el comportamiento regulador del material en función de la temperatura máxima de cocción.

## Referencias

- <sup>1</sup>B.L. Wang, T. Takigawa, Y. Yamasaki, N. Sakano, D.H. Wang, K. Ogino. Symptom definitions for SBS (sick building syndrome) in residential dwellings. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*. 211 (2008) 114-120.
- <sup>2</sup>O. Watanabe, E.H. Ishida, H. Maeda. Development of an autonomous humidity controlling building material by using mesopores. *Transactions of the Materials Research Society of Japan*. 33 (2008) 489-492.
- <sup>3</sup>D.H. Vu, K.S. Wang, B.H. Bac, B.X. Nam. Humidity control materials prepared from diatomite and volcanic ash. *Construction and Building Materials*. 38 (2013) 1066-1072.
- <sup>4</sup>Y.S. Ho, G. McKay. A comparison of chemisorption kinetic models applied to pollutant removal on various sorbents. *Process Safety and Environmental Protection*. 76 (1998) 332-340.
- <sup>5</sup>Z. Hu, S. Zheng, Z. Sun, Y. Chen, Y. Yan. Influence of pore structure on humidity control performance of diatomite. *Science and Technology for the Built Environment*. 23 (2017) 1305-1313.
- <sup>6</sup>M.J. Lee, H.J. Lee, K. Kim, H.J. Hwang. Fabrication of humidity control ceramics from drinking-water treatment sludge and Onggi soil. *Journal of the Korean Ceramic Society*. 53 (2016) 362-366.
- <sup>7</sup>J. Castellano, V. Sanz, E. Cañas, E. Sánchez. Assessment of humidity self-regulation functionality for ceramic tiles. *Journal of the European Ceramic Society*. 42 (2022) 716-723.