

MODELIZACIÓN Y SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA CONTRACCIÓN LINEAL DE BALDOSAS CERÁMICAS A PARTIR DE LA CURVA DE COCCIÓN

**Maykon Cargnin¹, Selene Maria de Arruda Guelli Ulson de Souza²,
Antônio Augusto Ulson de Souza², Agenor De Noni Junior³**

¹ Instituto Maximiliano Gaidzinski, Cocal do Sul, SC, Brasil

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química,
Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil

³ Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais,
Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, SC, Brasil

1. INTRODUCCIÓN

La producción de baldosas cerámicas, por el proceso de monococción es actualmente la más extendida de las empresas de cerámicas. Las investigaciones sobre la cocción en este proceso son de gran importancia para la industria cerámica, ya que debe adaptarse a los nuevos parámetros de productividad, calidad y eficiencia energética, debido al crecimiento tecnológico y la diversificación de productos. La literatura demuestra que la simulación numérica se puede emplearse con éxito en estos casos. En este trabajo, un modelo fenomenológico basado en el transporte de calor por conducción se aplicó para determinar la evolución del perfil de temperatura de la placa de cerámica a lo largo del calentamiento y un modelo cinético de sinterización para determinar la contracción lineal. Con estos datos ha sido posible determinar las dimensiones finales de una baldosa cerámica de gres de pasta roja, clase BIIa.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El modelo se obtuvo a partir del fenómeno de transferencia de calor por conducción en la baldosa cerámica, pasando por alto los efectos causados por las reacciones químicas que ocurren en el interior, de acuerdo con la ecuación (1). Se utilizó el modelado de conservación de la energía a la baldosa cerámica, que describe la variación de temperatura en función del tiempo y de la posición (BIRD, 2002). Al comienzo del proceso la temperatura de toda la baldosa cerámica es igual a la temperatura ambiente, considerada la condición inicial del problema. Los fenómenos de convección y radiación en la superficie se consideran como una de las condiciones de contorno en las superficies superior e inferior. En el centro de la baldosa ha sido considerado la condición de simetría.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = - \left(\frac{\partial q''_{cd,x}}{\partial x} + \frac{\partial q''_{cd,y}}{\partial y} + \frac{\partial q''_{cd,z}}{\partial z} \right) \quad (1)$$

La discretización de la ecuación y las condiciones de frontera se realizaron utilizando el método de volúmenes finitos con la función de interpolación CDS (Maliska, 2004). Además de obtener la ecuación del perfil de temperatura, la sinterización fue examinada por el modelo cinético también empleado por Orts et al. (1993), Benavidez y Oliver (2001) y Salem et al. (2009), para material cerámico, de acuerdo con la ecuación (2).

$$R_l = k_0 \cdot e^{\left(\frac{-E_A}{R \cdot T}\right)} \cdot t^n \quad (2)$$

donde " R_l " es la contracción lineal de la baldosa cerámica, " k_0 " el factor de la frecuencia, " E_A " la energía de activación, " R " la constante de los gases ideales, " T " la temperatura de la baldosa cerámica, " t " es el tiempo de sinterización al final de la zona de cocción y la " n " el exponente del tiempo que depende del mecanismo dominante en la sinterización (KINGERY, 1975). Los parámetros " k_0 ", " E_A " y " n " se determinaron a partir de datos experimentales de contracción por linealización de la ecuación (2) y ajuste por mínimos cuadrados, tras cocción de probetas 80x20x2,3 mm³ (1,847 g/cm³, densidad aparente a seco), cocidas en horno de rodillos de laboratorio en distintas condiciones: 30, 40 y 50 min (frío-a-frío) y temperaturas máximas desde 1273 K hasta 1423 K (incrementos de 30 K).

Este modelo se aplicó a la cocción industrial de un producto de 450x450x80 mm³ no esmaltado, ciclo de cocción de 30 min (frío-a-frío) y temperatura máxima de 1425 K. Los datos experimentales han sido comparados con aquellos obtenidos con el modelo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los parámetros cinéticos de sinterización determinados fueron: $E_A = 178000$ J/mol, $n = 0,26280$, $k_0 = 44770$ s⁻¹. Los valores experimentales de la contracción lineal de los tiempos de cocción de 30 minutos, 40 y 50 y la temperatura de 1393 K son 0,0590, 0,0638 y 0,0681, respectivamente. Las curvas de cocción en el horno de laboratorio son representadas por la Figura (1). Estos valores corresponden aproximadamente a los valores simulados de 0,0599, 0,0647 y 0,0687. La Figura (2) muestra los valores de contracción lineal para todas las condiciones. Se demuestra la capacidad del modelo para simular la contracción lineal de cocción desde el 0,01 hasta el 0,07.

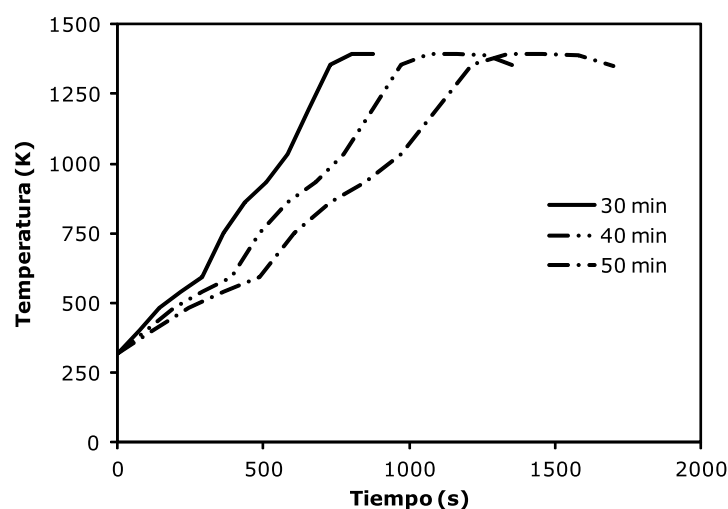


Figura 1 – Curvas de cocción en el horno de laboratorio para diferentes tiempos de cocción a una temperatura de 1120°C.

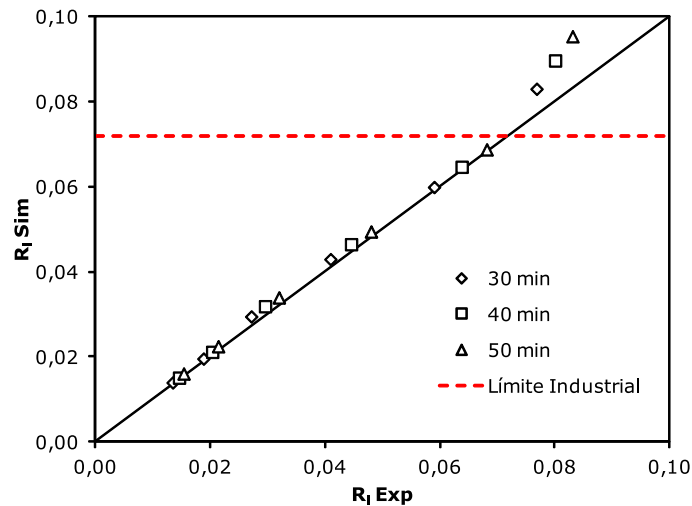


Figura 2 - Comparación de los valores experimentales ($R_i \text{ Exp}$) y simulados ($R_i \text{ Sim}$) de la cocción de la baldosa cerámica a diferentes tiempos de cocción ($R^2 = 0,9913$).

La Figura (3) se presenta el resultado del perfil de temperatura y el perfil de la contracción lineal hipotética de la baldosa cerámica cocida en condiciones industriales. Se puede observar que existe una amplia variación en la temperatura y la contracción lineal entre la superficie y el centro de la baldosa cerámica al final de la zona de cocción. Para determinar la contracción lineal de la baldosa cerámica, determinó, en primer lugar, la temperatura promedio a través de la integración del perfil de temperatura, como se muestra en la Ecuación (3). Con la temperatura media se determinaron la posición en el espesor de la baldosa y el valor correspondiente de la contracción lineal. Para este caso, el valor promedio de la temperatura de la baldosa cerámica fue 1407 K. Esta es la temperatura que corresponde a una distancia de $\pm 2,3$ mm desde el centro de la placa. En este punto, la contracción simulada y por lo tanto la contracción de la pieza se le asignó 0,0663. Siendo el tamaño inicial de 481,38 mm, el tamaño final simulado ha sido 449,46 mm.

$$\bar{T}_{placa} = \frac{1}{z} \int T(z) dz \quad (3)$$

Donde "T" es la temperatura media de la placa, "z" es el espesor y $T(z)$ es la función del perfil de temperatura.

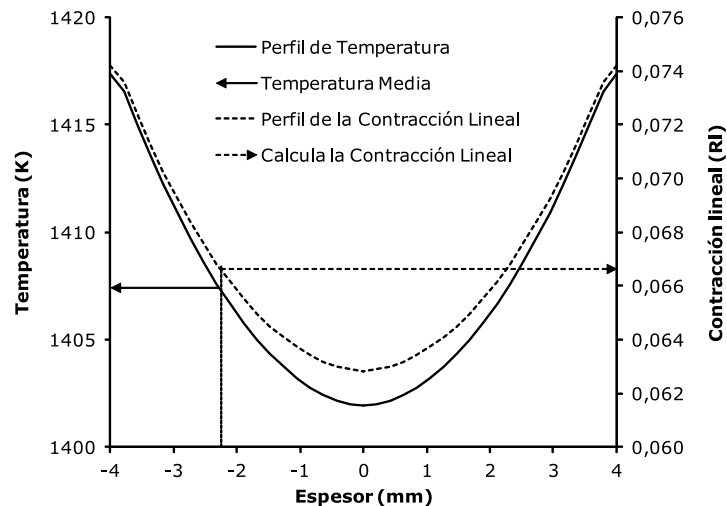


Figura 3 - Perfil de la temperatura y la hipotética contracción lineal en función del espesor de la baldosa cerámica.

El resultado experimental para la contracción ha sido 0,0664 y el 449,41mm, -0,05mm de la obtenida numéricamente. Figura (4) presenta la comparación entre la contracción lineal experimental (R_l Exp) y simulada (R_l Sim). Los resultados numéricos obtenidos para la contracción lineal muestran un error relativo del 0,15% en comparación con los resultados experimentales. El modelo fue capaz de reproducir con gran precisión los valores experimentales.

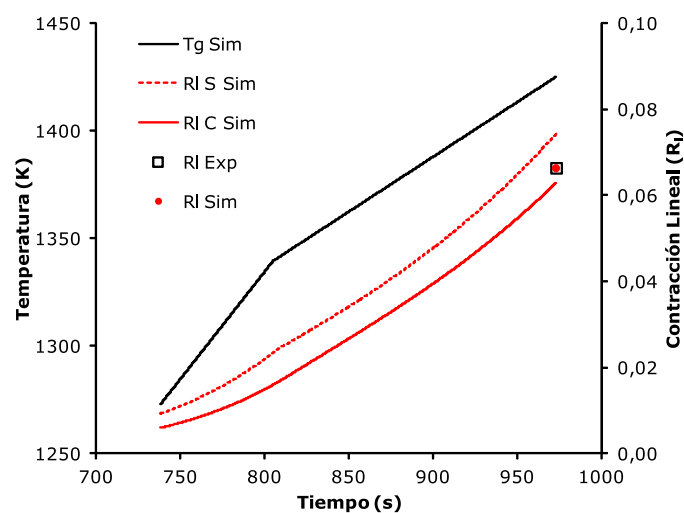


Figura 4 - Comparación entre la contracción lineal simulado en la superficie ($R_l S = 0,0742$), en el centro ($R_l C = 0,0628$), la contracción promedio ($R_l Sim = 0,0663$) y experimental ($R_l Exp = 0,0664$) obtenidos industrialmente. Temperatura del horno industrial ($T_g Sim$).

4. CONCLUSIONES

En este estudio, se han evaluado las operaciones de cocción y sinterización de baldosas cerámicas en hornos de rodillos en el laboratorio e industrialmente. Para ello se han empleado la modelización y la simulación numérica de la sinterización y el fenómeno de la transferencia de calor por conducción, respectivamente.

Los resultados de la contracción lineal de la simulación numérica muestran un importante acuerdo con los datos experimentales obtenidos tanto en el laboratorio como industrialmente, por lo que es posible utilizar esta herramienta para evaluar el comportamiento de baldosas cerámicas de distintas composiciones tras distintas condiciones de curva de cocción. Así se podría disponer de esta herramienta para la optimización de la operación de cocción de gres de pasta roja.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] BENAVIDEZ, E. R.; GONZÁLEZ OLIVER, C. J. R. Uso de métodos dilatométricos para el cálculo de la energía de activación asociada al sinterizado de compacto cerámico. En: JORNADAS SAM, 2001, Misiones. Anais Jornadas SAM. Argentina: CONAMET, 2001. p. 859-866.
- [2] BIRD, R.B.; STEWART, W.E.; LIGHTFOOT, E. N. Transport Phenomena. 2ª ed. Nueva York: John Wiley & Sons, 2004. 910p.
- [3] KINGERY, W. D; BOWEN, H. K; UHLMANN, D. R. Introduction to ceramic. 2ª ed. Cambridge: John Wiley & Sons, 1975. 1032p.
- [4] MALISKA, Clóvis R. Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004. 453p.
- [5] ORTS, M.J.; AMORÓS, J.L.; ESCARDINO, A.; GOZALBO, A.; FELIU, C. Kinetic model for the isothermal sintering of low porosity floor tiles. Appl. Clay Sci., v. 8, n. 2/3, p. 231-245, 1993.
- [6] SALEM, A.; JAZAYERI, S.H.; RASTELLI, E.; TIMELLINI, G. Dilatometric study of shrinkage during sintering process for porcelain stoneware body in presence of nepheline syenite. Journal of Materials Processing Technology. v. 209, n. 3, p. 1240-1246, Feb. 2009.