

OPTIMIZACIÓN OPERACIONAL Y ENERGÉTICA DE UN PROCESO DE SECADO INDUSTRIAL DE UNA ARCILLA CAOLINITICA PARA PRODUCCIÓN DE MATERIALES DE LA CONSTRUCCIÓN

Hamilton Copete¹, Sandra García², Henry Copete³, Raúl Ortega⁴, Jhony Gutierrez⁵

1: Ingeniero de Materiales, Soluciones Energéticas y de Automatización S.A.S, Medellín

2: Ingeniera de Materiales, Sumicol-Corona S.A, Medellín

3: MSc. Ingeniero Mecánico, Soluciones Energéticas y de Automatización S.A.S, Medellín

4: Ingeniero de Instrumentación y Control, Sumicol-Corona S.A, Medellín

5: Ingeniero Mecánico, Soluciones Energéticas y de Automatización S.A.S, Medellín

*Contacto: hamiltoncopete@gmail.com

RESUMEN

En el proceso de secado se utilizan dos cilindros rotatorios para disminuir el porcentaje de humedad de una arcilla caolinitica desde un 30%, hasta un requerimiento del producto por debajo del 1% de humedad. Inicialmente para lograr esto era necesario hacer pasar la arcilla dos veces por el secadero, por lo cual se modificaron condiciones de operación como velocidad del tambor, flujo de alimentación, velocidad del aire de secado; para así lograr las características necesarias del producto en un solo paso sin afectar las propiedades cerámicas del mismo, las cuales se determinaron por TGA, FRX y reactividad de alúmina para caolines. Por otro lado se mejoró la eficiencia energética mediante la optimización de la combustión, disminuyendo las infiltraciones de aire frio de un 1000% a un 200%, el consumo específico de combustible se redujo de 4,48 a 2,98 kWh/kg de agua evaporada, triplicando la producción sin afectar las características físicas y mineralógicas de la arcilla.

Palabras Clave: *Secado, Arcilla, Combustión, Humedad, Productividad, Consumo Específico, Velocidad de Secado*

ABSTRACT

The drying process use two rotating cylinders to reduce the kaolinitic clay moisture from 30% to a requirement of the product below 1%. Initially to achieve this was necessary twice passing clay through the dryer, thus were modified operating conditions as drum speed, feed rate, drying air velocity, in order to achieve the necessary features in one product step without affecting the ceramic properties of it, which were determined by TGA, XRF and reactivity of alumina kaolin. On the other hand energy efficiency improved by optimizing combustion, reducing cold air infiltration 1000% to 200%, the specific fuel consumption was reduced from 4.48 to 2.98 kWh / kg of water evaporated, tripling the production without affecting the physical and mineralogical characteristics of the clay.

Keywords: *Drying, Clay, Combustion, Moisture, Productivity, Specific Comsumption, Drying Rate*

1 INTRODUCCIÓN

Los secadores rotatorios son ampliamente usados en el secado de materiales granulados o polvos, ya que sus ventajas son mayores si los comparamos con otro tipo de secadores, en lo referente al costo de operación, versatilidad y facilidad de manejo [1]. El principio de funcionamiento se basa en un efecto cascada generado por aletas al interior del cilindro de tal forma que el material húmedo pasa a través de una corriente de aire caliente, que fluye ya sea co-corriente o contracorriente a los sólidos [2]. La pérdida de calor hacia el material y la evaporación del agua reducen la temperatura del gas rápidamente, de tal manera que sale del secadero a una temperatura comparativamente baja [3]. La eficiencia del secado depende en gran medida de la diferencia entre la temperatura de los gases de salida y entrada. Sin embargo, independientemente de las temperaturas de los gases, el material a secar y el tiempo de secado (residencia) son críticos, ya que estos regulan la velocidad de difusión de agua desde el núcleo hasta la superficie del material [4]. En los procesos de secado por aire caliente se observan normalmente dos periodos, inicialmente un periodo de velocidad de secado constante, donde el secado ocurre solo por evaporación de agua, y un periodo de velocidad de secado decreciente en el cual la cinética se puede estimar con la segunda ley de Fick, para una lámina infinita que se muestran en las ecuaciones 1 y 2, donde M es el contenido de humedad del producto en cada momento (kg agua/kg materia seca), M_0 es el contenido inicial de humedad, M_e es el contenido de humedad de equilibrio, t es el tiempo, a es una constante, k es denominada la constante de secado y L es el semiespesor de la lámina (m); Γ , se define como relación de humedad adimensional [5].

$$\Gamma = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = a \cdot e^{-kt} \quad (1)$$

De esta expresión es posible obtener el coeficiente de difusión efectiva (D_{ef}), ya que:

$$k = \frac{D_{ef} \pi^2}{4L^2} \quad (2)$$

La influencia de la temperatura sobre este coeficiente D_{ef} puede establecerse mediante la ecuación de Arrhenius:

$$D_{ef} = D_0 \cdot e^{\left(-\frac{E_a}{RT}\right)} \quad (3)$$

Donde E_a es la energía de activación de la difusión (kJ/mol), R es la constante de los gases (kJ/mol.K), T es la temperatura absoluta y D_0 es la difusividad para contenidos altos de humedad. El trabajo realizado permitió identificar y controlar los parámetros principales de operación maximizando el rendimiento de los secadores y la calidad del producto.

2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para el proceso de secado se empleó una arcilla caolinitica en bruto con un porcentaje de humedad de entrada del 30%, inicialmente se determinó la cinética de secado, para lo cual se utilizó un secadero piloto estático con control de temperatura, evaluando la velocidad de secado a 140, 170 y 200°C. Una vez encontrada la dependencia del secado de la arcilla con respecto a la temperatura se procedió a realizar ensayos industriales para replicar lo realizado a nivel de laboratorio.

Inicialmente, la arcilla se alimenta a dos secaderos con configuraciones similares, en los cuales se evaluó la influencia del tiempo de residencia por el método descrito por Mujumdar et al. [5], flujo de alimentación y velocidad del aire de secado, las temperaturas de entrada y salida con una termocupla JKT y la velocidad del aire con una sonda Pitot, la eficiencia de la combustión se determinó con un analizador de gases tipo infrarrojo no dispersivo, estos análisis se realizaron antes y después de modificar la estructura del secadero para disminuir las infiltraciones de aire frio. Una vez encontrados los parámetros óptimos se evaluaron los cambios físicos y químicos sufridos por el material por medio de FRX, TGA y reactividad de alúmina, esta ultima para conocer si hay transformaciones significativas en la caolinita.

3 RESULTADOS

3.1 Curvas de secado

En la Figura 1 se puede observar la curva de secado (a) y la curva de velocidad de secado (b) para las diferentes temperaturas.

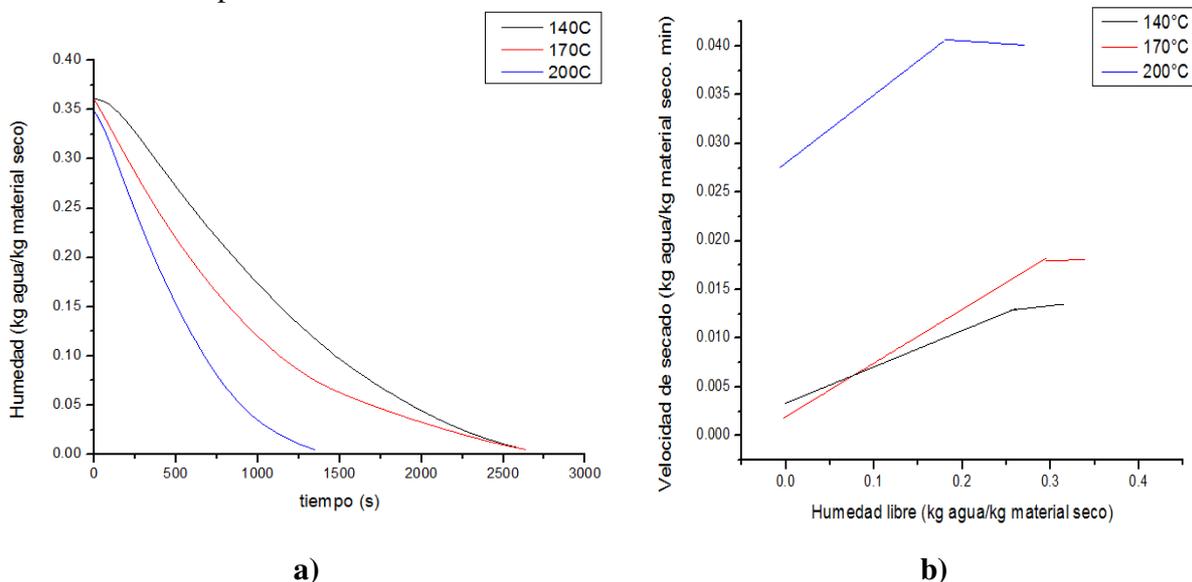


Figura 1. a) Curva de secado de la arcilla para cada temperatura (Humedad en base seca, kg agua/kg material seco), b) Curva de velocidad de secado, mostrando los tramos correspondientes a velocidad de secado constante y velocidad de secado decreciente.

En la curva (a), es posible identificar el efecto de la temperatura durante un proceso de secado, o bien en la pérdida de humedad de la arcilla; se evidencia que a mayor temperatura se acelera la pérdida de humedad; por ejemplo para un tiempo de secado de 1000s se identifica una humedad de 0.0074 a 200°C, 0.115 a 170°C y 0.1733 a 140°C. Adicional, la curva de velocidad de secado (b) permite diferenciar dos periodos, uno de velocidad de secado constante y otro de velocidad de secado decreciente, este último ha sido empleado por diferentes autores [6], para estimar la cinética, a partir de la segunda ley de Fick, resolviendo la dependencia de la temperatura mediante una ecuación tipo Arrhenius.

Para la resolución de dicha ecuación; se requiere identificar el valor del coeficiente de difusión efectiva (D_{ef}); este se obtiene mediante la representación gráfica de $\ln \Gamma$ frente al tiempo (ver Figura 3a)

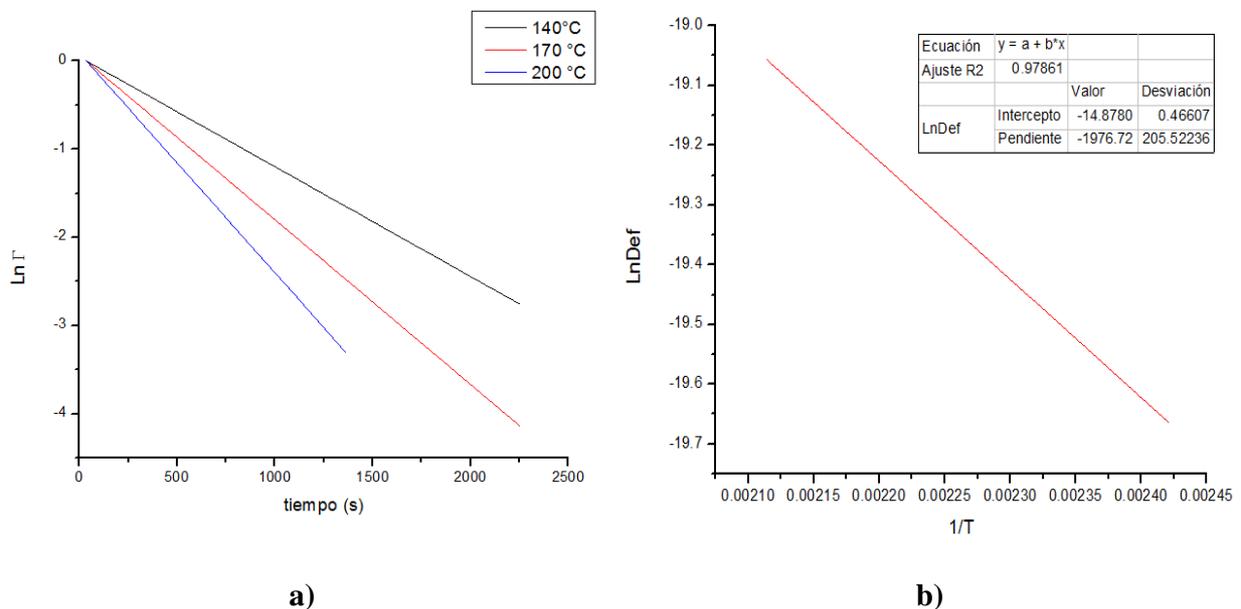


Figura 2.a) Representación gráfica de $\ln \Gamma$ frente al tiempo, b) $\ln D_{ef}$ en función del inverso de la temperatura

A partir de las pendientes de las líneas rectas de la Figura 2a, es posible encontrar la constante de secado k ; con ella se determina el coeficiente de difusión efectiva D_{ef} de la ecuación 2. Ahora bien, para determinar la influencia de la temperatura sobre este coeficiente de difusión efectiva, empleamos la ecuación 3, donde graficando $\ln D_{ef}$ contra el inverso de la temperatura absoluta (Figura 2b), se puede determinar la energía de activación y la difusividad.

Los resultados de dichas ecuaciones se resumen en la Tabla 1. Se presentan los valores de k , D_{ef} para cada una de las temperaturas y los valores de E_a y D_0 que son las constante de la arcilla evaluada.

Tabla 1. Resultados de energía de activación y difusividad

Temperatura (°C)	k	D_{ef}
140	0.0012	2.83E-09
170	0.0019	4.43E-09
200	0.0023	5.19E-09
E_a (kJ/mol)	D_o (m ² /s)	
16.4	3.46 x 10 ⁻⁸	

Los valores encontrados de Difusividad (D_o) y Energía de Activación (E_a), son del orden de los reportados por otros autores para minerales arcillosos [7] y [8].

3.2 Escalamiento industrial

Debido a la configuración del sistema de secado y las condiciones de operación, los ensayos industriales se realizaron a la temperatura de 170°C, que de acuerdo a la Figura 2 tuvo un tiempo de secado de aproximadamente 50 minutos, pero al ajustar variables proceso como velocidad de rotación del tambor y flujo de alimentación se logró obtener el producto seco pasando solo una vez por el secadero, incrementando el tiempo de residencia de la arcilla, el cual paso de 10 a 25 minutos, posibilitando eliminar alrededor de 370 kg/h de agua en cada secadero, casi duplicando el obtenido con los parámetros iniciales de operación que era cerca de 191 kg/h por secadero. Además esto implicó un aumento significativo de la capacidad de proceso, pasando de 500 a 1700 kg/h de arcilla seca con un porcentaje de humedad inferior al 1%. En la Tabla 2 se presenta las condiciones y resultados obtenidos antes y después de realizar las modificaciones en el secadero.

Tabla 2. Condiciones de operación del secadero

	Tiempo de residencia (min)	Rendimiento (kg/h)	Consumo específico (m ³ /ton)	Velocidad del aire (m/s)
Antes	10	500	70	3.5
Después	25	1700	55	3.5

3.3 Evaluación Termogravimétrica (TGA)

Los resultados del TGA se muestran en la Figura 3, en el cual se compara la materia prima con dos corrientes del secadero, los gruesos y los finos (33% en peso < 45 μm), esta última corriente es la más delicada ya que debido a su tamaño puede alcanzar temperaturas más altas, que en este caso son de 850°C al ingresar al secadero.

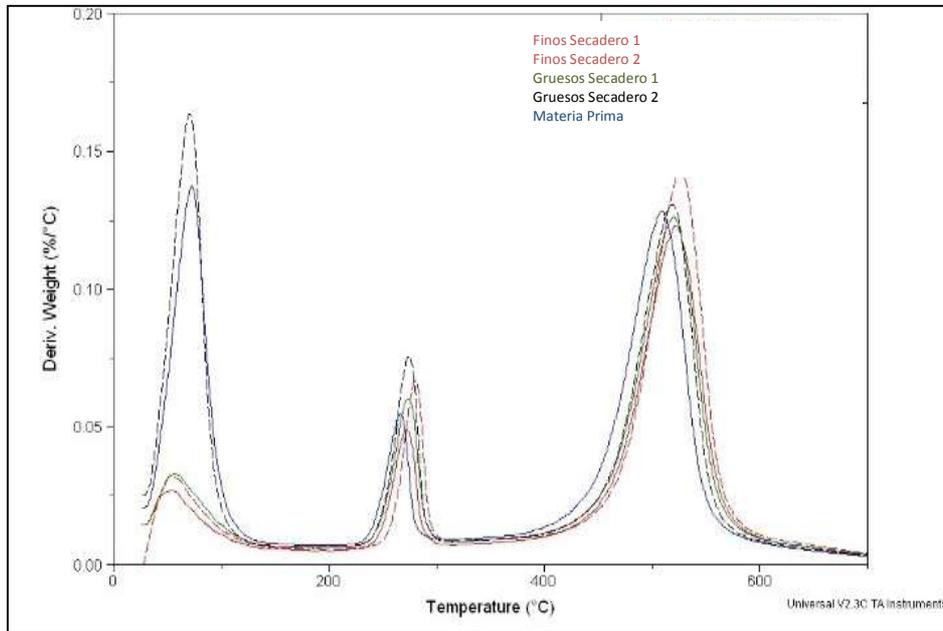


Figura 3. Análisis Termogravimétrico de diferentes corrientes en los secaderos

De acuerdo a lo observado en el análisis termogravimétrico, no se encuentran transformaciones en los rangos de temperatura comprendidos entre 200-600°C que corresponden a la GIBSITA ($\text{Al}(\text{OH})_3$) y a la Caolinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot (\text{OH})_4$) aun para el material con un tamaño de partícula menor, lo cual es provechoso porque no se está afectando la plasticidad de la arcilla para su posterior aplicación.

3.4 Evaluación de Reactividad de Alúmina

Esta prueba determina la cantidad de alúmina libre que es capaz de reaccionar con ácido sulfúrico (Ecuación 4), para materiales caoliníticos permite establecer el porcentaje de material que se ha transformado a metacaolín debido a procesos térmicos que superen las temperaturas de transformación. La

Tabla 3, muestra los resultados obtenidos al evaluar la reactividad de la alúmina para la muestra húmeda y para la muestra luego del proceso de secado.

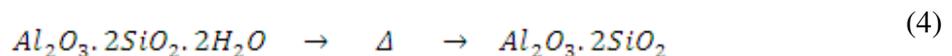


Tabla 3. Reactividad de la Alúmina y FRX

Muestra	% de Reactividad	% de Al_2O_3
Materia Prima	38,4	35,3
Material Seco	31,01	35,26

Los datos encontrados, muestran una pequeña variación en el porcentaje de reactividad; lo cual indica que el material no ha sufrido transformaciones significativas durante el secado.

4 CONCLUSIONES

El objetivo principal de la investigación se cumplió a cabalidad, ya que en términos de la optimización energética del secadero, se ha conseguido aumentar el rendimiento en un 300% comparado con la métrica encontrada en términos de capacidad y disponibilidad del equipo. Lo anterior se valida con una disminución del consumo específico de combustible en un 22.8%, para alcanzar esto se aumentó el tiempo de residencia del material al interior del secadero a 25 minutos, la velocidad óptima para los gases calientes al interior del secadero fue 3,9 m/s, se obtuvo una eficiencia térmica del 61%, la cual concuerda con valores adecuados para este tipo de secaderos [6], y por último se disminuyeron aires parásitos que entorpecían el proceso., y se incrementó la eficiencia térmica con base al poder calorífico superior del gas natural desde un 47,5 % hasta un 61%. Adicionalmente la factibilidad económica a nivel industrial reveló unos ahorros cercanos a \$130.000.000 anuales.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. Geng, "Numerical simulation on mixing kinetics of slender particles in a rotary dryer," *Powder Technol.*, vol. 193, no. 1, pp. 50–58, Jul. 2009.
- [2] F. Geng, "Simulation of dynamic processes on flexible filamentous particles in the transverse section of a rotary dryer and its comparison with video-imaging experiments," *Powder Technol.*, vol. 207, no. 1–3, pp. 175–182, 2011.
- [3] M. H. Lisboa, "Study of the performance of the rotary dryer with fluidization," *14th International Drying Symposium*, 2004, vol. C, no. August, pp. 1668–1675.
- [4] M. H. Lisboa, "A study of particle motion in rotary dryer," vol. 24, no. 03, pp. 365–374, 2007.
- [5] A. S. Mujumdar, M. Krokida, and D. Marinos-kouris, "Chapter 7. Rotary Drying," in *Handbook of Industrial Drying*, CRC Press., 2006, pp. 151–171.
- [6] O. Corzo, "Determinación experimental del coeficiente de difusión del agua durante el secado de láminas de coroba," *Saber, Univ. Oriente, Venez.*, vol. 23, pp. 36–42, 2011.
- [7] F. González, "Water diffusion through compacted clays analyzed by neutron scattering and tracer experiments Fátima González Sánchez," Universität Bern, 2007.
- [8] W. P. Da Silva, C. M. D. P. Da Silva, L. D. Da Silva, and V. S. D. O. Farias, "Drying of Clay Slabs during the Falling Rate Period: Optimization and Simulation of the Process Using Diffusion Models," *J. Mater. Sci. Res.*, vol. 2, no. 2, pp. 1–13, Jan. 2013.