



## SIMPOSIO INTERNACIONAL DE CONSTRUCCIONES

### Planta piloto de LC<sup>3</sup>, correlación de parámetros operativos al obtener arcillas con adecuada deshidroxilación

#### *LC<sup>3</sup> pilot plant, correlation of operational parameters when obtaining clays with adequate dehydroxylation*

Autores: Dr. Ing. Machado L.I.<sup>1</sup>; Dr. Ing. Esperanza, G.<sup>1</sup>; Ing. Maure L.<sup>2</sup>; Dr. Sc. Ing. Martirena F.<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales.

<sup>2</sup> Empresa Geominera del Centro.

El estudio de nuevos materiales y formulaciones adecuadas para la obtención de aglutinantes con características similares al cemento Portland requiere intensos estudios de laboratorio y también la realización de costosas pruebas industriales, sin embargo, el uso de una planta piloto con un horno rotatorio como se describe en este trabajo permite abordar con éxito los procesos industriales.

El Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnologías y Materiales (CIDEM) junto con la empresa IPIAC-NERY se ha comprometido con el desarrollo de una planta piloto que fabrica cantidades limitadas de LC<sup>3</sup>, lo cual permite el estudio del proceso al interactuar diferentes parámetros operativos.

Sin embargo, la operación de una planta de producción de cemento, independientemente de la escala de producción, requiere correlacionar diferentes parámetros de trabajo como flujo de producción, velocidad de rotación del horno, consumo de combustible, temperatura, entre otros.

En este trabajo se presenta la evaluación de la arcilla que se procesa y modifica térmicamente al adquirir propiedades reactivas con un grado de deshidroxilación superior al 90 por ciento, así como, adecuadas propiedades mecánicas de los morteros según las normas cubanas, en relación con algunos de los diferentes parámetros operativos de la instalación.

Palabras claves: arcillas reactivas, horno rotatorio, parámetros operativos.



## *LC<sup>3</sup> pilot plant, correlation of operational parameters when obtaining clays with adequate dehydroxylation*

Authors: Dr. Ing. Machado L.I.<sup>1</sup>; Dr. Ing. Esperanza, G. ; Ing. Maure L.C.<sup>2</sup>. Dr. Sc. Ing. Martirena F<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Central University Marta Abreu de Las Villas, Center for Research and Development of Structures and Materials (CIDEM)  
[ivanm@uclv.edu.cu](mailto:ivanm@uclv.edu.cu)

<sup>2</sup> Geo-mining company of the Center, Villa Clara, Cuba

### SUMMARY

The study of new materials and suitable formulations to obtain binders with characteristics similar to Portland cement requires intensive laboratory studies and also the performance of expensive industrial tests, however, the use of a pilot plant and the rotatory kiln such as the one described in this work allows successfully address industrial-level testing.

The Center for Research and Development of Technologies and Materials (CIDEM) together with the company IPIAC-NERY has committed to the development of a pilot plant that manufactures limited quantities of LC<sup>3</sup>, which allows the study of the process by interacting different parameters and sources of raw materials.

However, the operation of a cementitious material production plant, regardless of the production scale, requires correlating different work parameters such as production flow, kiln rotation speed, fuel consumption, temperature, and others.

The evaluation of the clay that is processed and thermally modified by acquiring reactive properties from its degree of dehydroxylation greater than 90 percent, and adequate mechanical properties, is presented in this work, which is correlated with the calculation of different operating parameters of the installation

Keywords: reactive clays, rotary kiln, operating parameters.



## **INTRODUCCION**

El Centro de Investigaciones y Desarrollo de Tecnologías y Materiales (CIDEM) de conjunto con la empresa IPIAC-NERY se ha comprometido con el desarrollo de una planta piloto que realiza la fabricación de cantidades limitadas de un nuevo aglomerante conocido como LC<sup>3</sup>, lo cual permite el estudio del proceso al interactuar diferentes parámetros y fuentes de materias primas, la obtención de este material permite disminuciones importantes en el gasto energético y con ello la disminución de las emisiones de efecto invernadero.

El LC<sup>3</sup>, reconocido también por la comunidad científica internacional como “Cemento de Bajo Carbono”, resulta de la sustitución de cantidades importantes de clínquer por arcilla activada térmicamente (AAT), cuyos resultados y avances se encuentran documentados en diversas revistas y documentos científicos (Vizcaíno 2015)).

Una de las propiedades más importante que ofrece la nueva formulación aglomerante es la expansión de la producción al lograr sustituciones de clínquer de hasta el 50 % reduciendo consecuentemente las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera al disminuir el consumo de energía ((Delgado 2014, Dairon 2017).

Sin embargo, la óptima obtención de la AAT depende de diversos parámetros asociados al proceso productivo en primer lugar, las características iniciales del material arcilloso procedente de determinada concesión o yacimiento, y en segundo lugar la temperatura y el tiempo en que el material es sometido a la correspondiente variación de temperatura.

La simulación del horno rotatorio permite obtener distintos tiempos de permanencia, al variar parámetros como su inclinación y su velocidad de rotación, de este modo experimentalmente pueden correlacionarse estos parámetros con el grado de reactividad puzolánica de la arcilla activada térmicamente(Machado 2019).

En este trabajo se expone el estudio de algunos de los parámetros de la planta piloto de producción de cemento instalada en áreas de la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas al obtener arcilla activada, la reactividad o índice de actividad puzolánica del material arcillosos procesado es corroborado por diversos análisis de laboratorio.



## DESARROLLO

Entre los parámetros de control más importantes en la industria cementera se encuentran los perfiles de temperatura en los equipos, así como, características y propiedades de la materia prima alimentada y del producto final (Kimberly 2016), en este trabajo se aborda las condiciones de trabajo del horno rotatorio y las condiciones de combustión que propician las temperaturas adecuadas para la deshidroxilación de la arcilla en proceso.

La planta piloto consta de un grupo de equipos que permiten llevar adelante el proceso para la obtención del LC3, de estos resultan de la mayor influencia el horno rotatorio con sus equipos auxiliares, quemador de combustible, ventilador de enfriamiento y ventilador de extracción de los gases calientes. La interacción en el trabajo de estos equipos determina la transferencia de calor al material arcilloso y con ello la deshidroxilación de la arcilla al obtener adecuadas propiedades puzolánicas.

### ✓ Horno rotatorio

En la tabla 1 se detallan las características geométricas del horno instalado y otros parámetros calculados según recomendaciones teórico – prácticas (DUDA 1977, F. G. Colina 2016).

Tabla 1 Principales parámetros de trabajo y dimensiones del horno rotatorio <i>IPIAC – CIDEM</i> para obtención de AAT.								
Di	L	t	Q	n	v	$\phi$	p	$\beta$
0.42	3.745	11	100	2.5	2	11	2	2.751

t: tiempo de permanencia (minutos). L: longitud del horno rotatorio (m).  
d: diámetro interior (m). n: velocidad de rotación (r.p.m.).  
p: pendiente de inclinación del horno.

El tiempo de permanencia es inversamente proporcional a la velocidad de rotación y diámetro del horno, siendo directamente proporcional a la longitud del horno. En la figura 1 se muestra una foto de la instalación.



**Convención 2021**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**Planta piloto de LC3, correlación de parámetros operativos para obtener adecuado grado de deshidroxilación.**



Figura 1. Instalación del horno rotatorio para la obtención de AAT, en detalles quemador e instalación de enfriamiento y evacuación de gases calientes.

Otro aspecto importante al considerar la correlación entre los parámetros de trabajo de la instalación y la obtención de un material arcilloso con adecuada reactividad puzolánica es el balance de masa y energía que se produce, el balance térmico se establece al tener en consideración la eliminación del agua libre y del agua adsorbida (hasta 400 °C), y en la descomposición o pérdida de los OH<sup>-</sup> de la arcilla (hasta ≈ 850 °C), de este modo en la tabla 2 se resume el balance de energía en el proceso al evaluar el consumo de combustible del quemador TK 2/20 A2 (TEKENER. 2018) y las pérdidas dadas por el diseño y construcción del horno con su sistema de enfriamiento y extracción de gases.

Tab.2 Balance térmico*		
Balance	Valor	P
Q <sub>1</sub> (MJ/h)	150.3874	100%
Q <sub>2</sub> (MJ/h)	100	66%
Q <sub>3</sub> (MJ/h)	33.8448	23%
Q <sub>4</sub> (MJ/h)	16.54262	11%
*(Machado 2019)		

El horno cuenta además con cuatro termopares ubicados convenientemente que permiten realizar en tiempo real el control de la temperatura, de este modo se conoce la temperatura de los gases calientes a la salida del horno (entrada del material arcilloso y conducto a la



**Convención 2021**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**Planta piloto de LC3, correlación de parámetros operativos para obtener adecuado grado de deshidroxilación.**

chimenea), también se monitorea la temperatura en la zona de enfriamiento de la arcilla y en la zona de combustión de los gases, adicionalmente mediante un termopar portátil laser se mide la temperatura en diferentes puntos del cuerpo exterior del horno rotatorio.

✓ **Material arcilloso**

El material arcilloso es suministrado a la planta piloto por la Empresa Geominera del Centro procedente del yacimiento Yaguajay que se encuentra ubicado 300 m al sur de la ciudad del mismo nombre en la provincia de Sancti Spíritus quedando ubicado a 60 km por carretera de la Fábrica de Cemento Siguaney. Este depósito arcilloso ha sido fehacientemente estudiado, se encuentra la presencia documentada de minerales arcillosos del grupo de la caolinita en contenidos no inferiores al 40 %, tiene reservas que garantizan su explotación a escala industrial por no menos de 20 años. (Martíirena. 2018)

La fuente de estos sedimentos fue una corteza de intemperismo por rocas ácidas emergida al norte de la Plataforma Insular Cubana. Las arcillas constituyen el componente principal de este depósito de tipo redepositado, caracterizadas por un contenido promedio de 27.14% de  $Al_2O_3$ , indicando la presencia de minerales del Grupo de los Caolines.

En todos los casos predomina la caolinita como mineral arcilloso y cuarzo, calcita y goethita como principales minerales no arcillosos, todo lo cual se corresponde con las descripciones geológicas y mineralógicas del depósito realizadas en estudios anteriores. Además, se reporta la presencia relativamente frecuente de vermiculita, anatasa, birnesita y yeso.

En la tabla 3 se puede observar la composición mineralógica de los distintos tipos tecnológicos, determinada mediante Análisis Termogravimétrico. Como se muestra, el contenido de caolinita en todas las capas es similar o superior al 40%, lo cual confirma que con estas arcillas se pueden obtener materiales con alta reactividad puzolánica. Sin embargo, un factor negativo es el alto contenido de calcita de la capa B, aspecto que se recomendó se tuviera en cuenta para hacer el mezclado.



**Convención 2021**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**Planta piloto de LC3, correlación de parámetros operativos para obtener adecuado grado de deshidroxilación.**

Tabla 3 Composición mineralógica del material arcilloso presente en el yacimiento suministrador.

	% OH- asociado a hidróxidos de hierro	% Caolinita	% Calcita
Capa A	1.57	40.62	3.72
Capa B	2.17	42.17	20.62
Capa C	3.09	51.43	3.17

Para la evaluación inicial de la idoneidad del material arcilloso con vistas a su empleo como AAT se realiza la preparación y evaluación de morteros estandarizados, cuyos resultados se presentan en la tabla 4, se muestra la evolución de la resistencia a la compresión a los 7 y 28 días, en morteros con sustituciones parciales de un 30 % de arcilla calcinada a 750 °C, 800 °C y 850 °C. Como referencia se utilizan los valores de resistencia a la compresión establecidos por las Normas Cubanas (NC95:2011, 2011), (NC506:2013, 2013), (NC-TS527:2013, 2013) para cementos tipo P35.

Tabla 4 Resultados de resistencia a compresión en morteros estandarizados con el empleo de material arcilloso calcinado. 750, 800, 850 °C (respectivamente)					
7 días			28 días		
Capa A	Capa B	Capa C	Capa A	Capa B	Capa C
29.34	23.28	28.59	35.20	27.65	35.16
41.69	34.81	36.25	36.88	44.63	45.62
31.31	28.38	23.05	35.84	30.72	25.03

Dados los resultados de resistencia a la compresión que se presentan es de esperar que la mezcla de los diferentes tipos tecnológicos pueda alcanzar resistencias mínimas superiores a los 25 Mpa, se espera obtener en la operación del horno temperaturas promedios de 800 – 850 °C lo cual garantiza la deshidroxilación del material, lo cual apunta al objetivo del trabajo, obtener en las condiciones de trabajo de la planta piloto material arcilloso con adecuada reactividad puzolánica.

✓ **Condiciones de operación para la obtención de AAT.**

Como se señaló anteriormente la instalación cuenta con un quemador tipo TK 2/20 A2 el cual según el catálogo de su fabricante es capaz de realizar la combustión completa (una vez ajustado la relación aire – combustible), en las condiciones de segunda llama



**Convención 2021**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**Planta piloto de LC3, correlación de parámetros operativos para obtener adecuado grado de deshidroxilación.**

o entrega de mayor potencia se tiene un gasto o consumo de combustible de hasta 18 kg/h con una potencia de 213 kw. En la figura 2 se muestra el perfil de temperaturas exteriores en la carcasa o cuerpo del horno rotatorio, es posible considerar entre 1000 – 950 °C la temperatura de los gases en el extremo del horno cercano al quemador (Maure. 2021).

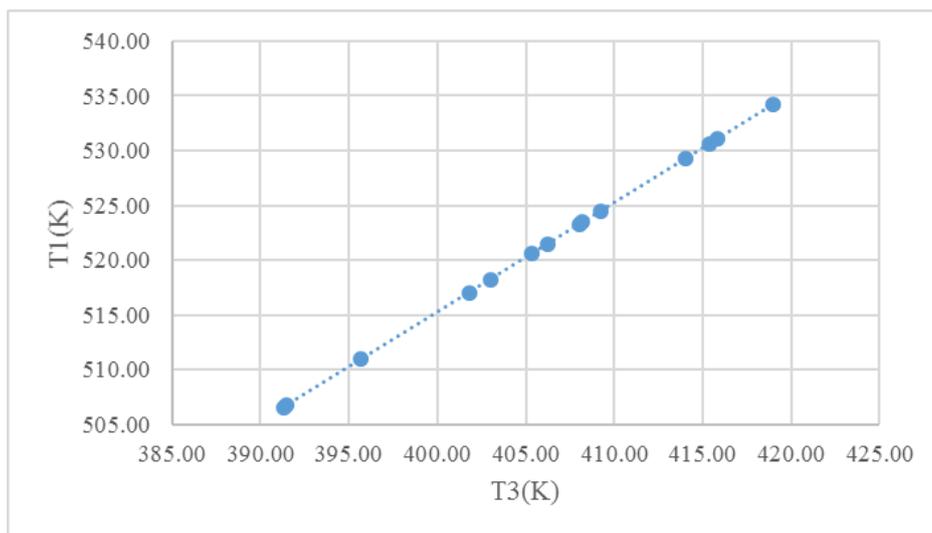


Figura 2 Perfil de temperaturas exteriores en el cuerpo del horno

Para el correcto calentamiento del horno hasta la temperatura de calcinación se seguirá de forma detallada el protocolo dado en la hoja de control de operación del horno (Machado 2020), se considera que el horno está listo para la calcinación cuando la temperatura promedio que se registra en el panel de control se encuentra en el intervalo de 420 – 450 ° C. Se ha establecido que durante el proceso de calcinación el horno trabajara a 1 rpm (10 hz en el panel de control), el ventilador de enfriamiento en el intervalo 8 – 10 % y el ventilador de tiro de los gases calientes a 12 % de su potencia.

Se realiza en todo momento durante la calcinación el control de la temperatura promedio la que no debe exceder los 460 ° C, en caso necesario se aumentará el flujo del ventilador de enfriamiento (10 – 12 %) hasta restablecer la temperatura promedio de trabajo, el horno debe trabajar con una temperatura estable en esas condiciones de trabajo lo que será verificado periódicamente por el operador de la planta.



**Convención 2021**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**Planta piloto de LC3, correlación de parámetros operativos para obtener adecuado grado de deshidroxilación.**

✓ **Arcilla activada térmicamente.**

Existen diferentes métodos experimentales para establecer el grado de deshidroxilación y/o la reactividad puzolánica de diversos materiales en este caso, para determinar si el proceso industrial llevado adelante en la planta piloto para la obtención de arcillas activadas térmicamente, se utiliza el procedimiento técnico de ensayo desarrollado en el Centro de estudios de química aplicada (CEQA) de la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (Alujas. A 2019).

La metodología aplicada consiste básicamente en calcinar en condiciones controlada a temperaturas de 350 °C y 800 °C determinando las pérdidas por ignición y luego realizar el mismo proceso a la arcilla calcinada industrialmente, con estos datos se determina el grado de calcinación de la arcilla. En la tabla 5 se muestran los resultados para muestras obtenidas durante la calcinación de las arcillas descritas dados los parámetros fijados para el proceso en el horno rotatorio de la instalación.

Tabla 5 Resultados de los ensayos realizados a la AAT, determinación del grado de deshidroxilación, propiedades mecánicas de los morteros.

Sample	Retenido* (90 µm %)	PPI** (%)	Dehydroxylat.*** (%)	Mechanical properties**** (Mpa)	
				7 days	28 days
R1	6.3	0.8	-	24.8	37.5
R2	7.2	0.81	-	23.9	38.6
R3	5.8	0.79	-	25.6	39.3
Average	6.4	0.8	92.58	24.76	38.5

Note: \* NC 980: 2013; \*\* NC EN 196-2:2012; \*\*\* Determinación del grado de deshidroxilación CEQA/UCLV; \*\*\*\* NC 506:2013.

Los resultados que se muestran evidencian un adecuado grado de deshidroxilación lo que demuestra que ha ocurrido un correcto intercambio térmico entre los gases calientes generados en el quemador y la arcilla, resultando convenientes el tiempo de residencia dado por la velocidad de rotación e inclinación del horno, así como el flujo de gases a través del cuerpo del equipo.



**Convención 2021**  
**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**  
**Planta piloto de LC3, correlación de parámetros operativos para obtener adecuado grado de deshidroxilación.**

## CONCLUSIONES

La determinación del adecuado grado de deshidroxilación por el método de la diferencia de peso de la AAT y el establecimiento de adecuadas propiedades mecánicas de los morteros fabricados, confirma que las condiciones establecidas para el proceso, (temperatura promedio, flujo de gases dentro del horno, tiempo de residencia), proveen de un material arcilloso con adecuada reactividad para ser usado en la fabricación de aglomerante tipo LC<sup>3</sup>

## BIBLIOGRAFIA

Alujas, A (2019). Determinación del grado de calcinación de arcillas caolinitas calcinadas. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Santa Clara Villa Clara, Cuba., Centro de Estudios de Química Aplicada, CEQA.

Dairon, J. A. C. (2017). Evaluación económica y ambiental de plantas prototipo de pequeño y mediano tamaño para la producción de cemento LC3. . Facultad de Construcciones. CIDEM. . Santa Clara. Cuba. 2017. , Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. . **TD.**

Delgado, E. L. (2014). Evaluación energético ambiental de la producción de cemento portland ordinario (CPO) con la adición de arcillas activadas térmicamente. . Facultad de Construcciones. CIDEM. . Santa Clara. Cuba. , Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. . **TD.**

DUDA, W. (1977). Manual tecnológico del cemento. Traducido por Antonio Sarabia González. España: Editores técnicos asociados.

F. G. Colina, I. C. y. J. C. (2016). "Diseño básico de hornos rotatorios para el tratamiento de minerales." Ingeniería Química. Julio/ Agosto 2016 Dpto. de Ingeniería Química y Metalurgia. Universitat de Barcelona.

Kimberly, O. A. C. (2016). Simulación termodinámica de la producción de clinker. Ingeniería en metalurgia y materiales. Ciudad de México, Escuela superior de ingeniería química e industrias extractivas. **Master.**

Machado (2020). Instructivo para la operación y explotación segura de la planta piloto de LC3.

Machado, L. I., and et all. (2019). Considerations for the energy balance and preliminary design of an experimental LC3 Cement Pilot I Conferencia Internacional de Producción y Uso Sostenible del Cemento. RILEM Bookseries ISBN 978-3-030-22033-4 3 - 10.

Martíirena. (2018). Informe prueba industrial para la obtención de AAT, SIGUANÉY.

Maure. (2021). " EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES DEL HORNO ROTATORIO EN LA PLANTA EXPERIMENTAL PARA LA PRODUCCIÓN DE LC3 " Revista Centro Azúcar. Editorial Samuel Feijoo. Vol. 48, No.1, Enero-Marzo, 2021

TEKENER. (2018). Manual de instrucciones para quemadores de combustible.

Vizcaíno, L., Sánchez, S., Damas, S, Pérez, A., Scrivener, K., Martirena, F.: (2015). " Industrial trial to produce a low clinker, low carbon cement. ." Materiales de Construcción. 65(317) (2015), January-March 2015, e045. ISSN-L: 0465-2746. doi:<http://dx.doi.org/10.3989/mc.2015.00614>.