



Preparación de CaO (Cal Viva) Mediante Tratamiento Térmico con Microondas.

Raúl Adolfo González Vivas

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA ELECTRÓNICA
Y TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2011**

Preparación de CaO (Cal Viva) Mediante Tratamiento Térmico con Microondas.

Raúl Adolfo González Vivas

**TITULO A OBTENER:
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**DIRECTOR:
Ph.D. CARLOS RODRIGO CORREA CELY**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA ELECTRÓNICA
Y TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2011**

DEDICATORIA

A mis padres Hersilia Vivas Mateus y Siervo González Sosa, por su incondicional amor y apoyo en todo el camino recorrido, aún cuando hubo obstáculos en el trayecto. A mi hermano Claudio Hernán por su respaldo y compañía. A mi hermano Oscar Gilberto por su incansable voz de aliento. A mi hermano Joaquín Ernesto por su ayuda. A mi hermana Blanca Estella por sus consejos. A Elvinia Morales quien me enseñó a nunca dejar de soñar. A mis ángeles Lorena y Valentina cuya luz eterna ilumina mi vida y a los demás miembros de mi familia y amigos que desde la distancia me acompañaron en todo momento. Todos ellos son mis grandes tesoros.

Que Dios los bendiga a todos.

Raúl Adolfo González Vivas

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus más sinceros agradecimientos a:

La Universidad Industrial de Santander y a la escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones por su invaluable labor en la formación de profesionales idóneos.

El profesor Rodrigo Correa Cely, Director del trabajo de grado por sus enseñanzas, colaboración, motivación y acompañamiento para llevar a feliz término este proyecto.

El ingeniero Iván Amaya Contreras por su dedicación y colaboración.

A todas aquellas personas que de una u otra manera contribuyeron a la realización de éste proyecto.

Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	12
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	12
2.1. ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS (OEM).....	12
2.1.1 Generalidades.....	12
2.1.2 Hardware para microondas (horno a microondas).....	13
2.1.2.1 Magnetron.....	13
2.1.2.2 Guías de onda.....	13
2.1.2.3 Cavidad resonante.....	13
2.2. CAL.....	13
2.2.1 Proceso para obtener la cal.....	13
2.2.2 Tipos de cal.....	14
2.2.3 Factores que influyen en las propiedades de la cal obtenida.....	14
3. MATERIALES USADOS.....	14
3.1 Piedra Caliza.....	14
3.2 Escoria de Arrabio.....	14
4. HARDWARE UTILIZADO, PREPARACIÓN Y CALIBRACIÓN.....	14
4.1 Horno microondas.....	15
4.2 Termómetro.....	15
4.3 Preparación y Calibración.....	15
5. EXPERIMENTOS PRELIMINARES.....	15
5.1 Procedimiento.....	16
5.2 Pruebas.....	16
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	18
7. REFERENCIAS.....	18

Lista de Figuras

Figura 1. Hardware diseñado para realizar las pruebas.....	15
Figura 2. Temperaturas en el horno al calentar un material.....	15
Figura 3. Tamaño de las piedras usadas.....	16
Figura 4. Diferentes Recipientes Utilizados.....	16
Figura 5. Ubicación del recipiente en el horno.....	16
Figura 6. Distribucion de calor dentro del horno microondas.....	16
Figura 7. Resultado de calentar el material durante 5 minutos en el recipiente 2....	16
Figura 8. Material obtenido después de calentar piedra y escoria.....	16
Figura 9. Muestra de la cal obtenida en el proceso.....	17
Figura 10. Piedra caliza que demuestra presencia de cal.....	18
Figura 11. Perfil de Temperatura.....	18

Lista de Tablas

Tabla 1. Composición química de la escoria.....	14
Tabla 2. Potencia del horno medida al calentar un material.....	15
Tabla 3. Datos de temperatura de exposición de piedra caliza en diferentes recipientes para 5 y 6 minutos.....	17
Tabla 4. Datos de recuperación de la cal obtenida.....	17
Tabla 5. Datos obtenidos a exponer el material con la proporción 1:1 a las microondas.....	18

RESUMEN

TÍTULO: PREPARACION DE CaO (Cal Viva) MEDIANTE TRATAMIENTO TÉRMICO CON MICROONDAS*

AUTOR: RAUL ADOLFO GONZALEZ VIVAS**

PALABRAS CLAVES: compuestos de calcio, tratamiento térmico, calentamiento electromagnético, diseño estadístico de experimentos.

DESCRIPCIÓN:

RESUMEN: La tecnología de microondas se presenta como una alternativa importante en la industria mundial. El presente trabajo permitió determinar la posibilidad de realizar un tratamiento térmico a la piedra caliza mediante la exposición de ésta a la acción de las microondas. Se realizaron las pruebas necesarias en un horno convencional de uso doméstico, obteniendo muestras que posteriormente se identificaron como cal. Se concluyó mediante un diseño estadístico de experimentos, que teniendo un adecuado sistema de calentamiento de la piedra caliza y con un respectivo control de la temperatura para que esta sea óptima, se puede realizar un tratamiento térmico a la piedra caliza con baja contaminación y de una forma más rápida sin ver comprometida la salud de los trabajadores encargados del proceso. Se menciona de manera sucinta el hardware utilizado para la exposición del material escogido a las microondas, también se mencionan los elementos utilizados para manipular los materiales necesarios para las pruebas. Una descripción de las pruebas hechas a la piedra caliza y el análisis de los resultados obtenidos son incluidos en este trabajo, además de recomendaciones para procesos e investigaciones posteriores que lleven a una obtención de cal en mayor escala que la que se obtuvo en los procesos descritos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico - Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.
Director: Rodrigo Correa Cely.

ABSTRACT

TITLE: MICROWAVE-BASED HEAT TREATMENT WITH FOR CaO (QUICKLIME) PRODUCTION*

AUTHOR: RAUL ADOLFO GONZALEZ VIVAS**

KEYWORDS: calcium compounds, heat treatment, electromagnetic heating, statistical design of experiments.

DESCRIPTION:

ABSTRACT:The technology of microwave is presented like an important alternative in the world industry. The present work permitted to determine the possibility to carry out a heat treatment to the limestone by means of the exposition of this to the action of the microwave. The necessary tests in a conventional oven of domestic use were carried out, obtaining samples that subsequently were identified like lime. A statistical design of experiments was concluded by means of, that having an adequate system of warming-up of the limestone and with a respective control of the temperature so that this be optimizes, a heat treatment to the limestone with low contamination and of a faster form can be carried out without seeing compromised the health of the workers responsible for the process. The hardware utilized for the exposition of the material chosen to the microwave is mentioned in a succinct way; also the elements utilized are mentioned to manipulate the necessary materials for tests. A description of the done tests to the limestone and the analysis of the results obtained are included in this work, besides recommendations for processes and subsequent investigations that carry to an obtaining of lime in greater scale that the one that was obtained in the processes described.

*Thesis of Grade

**Faculty of Physic-Mechanical Engineerings.Electrical, Electronics Engineerings and Telecommunication's School.Supervisor: Rodrigo Correa Cely.

Preparación de CaO (Cal Viva) Mediante Tratamiento Térmico con Microondas Microwave-based heat Treatment with for CaO (Quicklime) production

Raúl Adolfo González¹
Iván Amaya²
Rodrigo Correa³

¹Estudiante de Ingeniería Electrónica de la Universidad Industrial de Santander sede Bucaramanga. Correo electrónico: adolgonza@gmail.com

²Ingeniero Electrónico de la Universidad Industrial de Santander. Correo electrónico: iamaya2@gmail.com

³PhD. Docente de la Universidad Industrial de Santander sede Bucaramanga. Correo electrónico: crcorrea@uis.edu.co

RESUMEN: La tecnología de microondas se presenta como una alternativa importante en la industria mundial. El presente trabajo permitió determinar la posibilidad de realizar un tratamiento térmico a la piedra caliza mediante la exposición de ésta a la acción de microondas. Se realizaron pruebas en un horno convencional, obteniendo muestras de cal. Se concluyó mediante un diseño estadístico de experimentos, que se puede realizar un tratamiento térmico a la piedra caliza con baja contaminación y de una forma más rápida. Se menciona de manera sucinta el hardware utilizado para la exposición a las microondas, los elementos usados, una descripción de las pruebas hechas a la piedra caliza y el análisis de los resultados obtenidos.

PALABRAS CLAVES: compuestos de calcio, tratamiento térmico, calentamiento electromagnético, diseño estadístico de experimentos.

I. INTRODUCCIÓN

Tratamiento térmico hace referencia a someter un material a elevadas temperaturas con el fin de cambiarle características como dureza, ductilidad y resistencia, además de obtener una reacción química. Este requiere un elevado uso de energía (ya sea calórica o eléctrica). Ejemplo de ello es el proceso de obtención del carbonato de calcio, el cual requiere mantener una temperatura superior a los 900°C durante más de 24 horas, desprendiendo gases como sulfuros y óxidos de carbono. Al ambiente llegan elementos tóxicos que son expulsados sin ningún filtro y a veces sin haber sido quemados completamente, afectando la salud de la población. También se emiten partículas sólidas de cal y gases de combustión [1]. La calcinación de la piedra caliza emite gases contaminantes que contribuyen a la formación de lluvia ácida, como dióxido de azufre y óxido de nitrógeno.

La aplicación de microondas en procesos industriales es bien conocida en la industria mundial [2]. El calor necesario para el proceso se obtiene por vibración de las moléculas polares al ser sometidas a la energía

ABSTRACT: Microwave technology is presented as an alternative for the industrial sector in worldwide. The present research allowed to determinate the feasibility of heat treating the limestone by means of microwaves. Tests were conducted in a conventional oven, obtaining lime as a product. A statically designed experiment concludes that it is possible to treat the limestone in a faster and cleaner way. The elements (hardware and expendables) are briefly mentioned and tests done to the limestone, as well as the results obtained, are discussed.

KEYWORDS: calcium compounds, heat treatment, electromagnetic heating, statistical design of experiments.

proveniente de las microondas, a diferencia del proceso tradicional (horno a combustible y eléctrico) se transmite por difusión (de la capa exterior al interior). Esta vibración acelera los procesos de cocción, tratamiento térmico de materiales, secado, etc.

La reutilización de los residuos de producción es una solución para su disminuir el valor de materia prima nueva requerida en un proceso. Darle un uso a la escoria de arrabio (Metal fundido que se obtiene directamente del alto horno por reducción del mineral de hierro), y reducir la acumulación de esta, motivó (junto con la variable ambiental y energética) el presente trabajo.

II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

a) ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS (OEM)

Generalidades

Una onda electromagnética es la forma de propagación de la radiación electromagnética a través del espacio, por lo que no necesita de un medio material para

propagarse; es decir, puede desplazarse en el vacío. La onda electromagnética es transversal; las direcciones de los campos eléctrico y magnético son perpendiculares a la de propagación. Las ondas electromagnéticas de radiofrecuencia, corresponden a ondas entre 30 kHz a 300 MHz y las microondas, que corresponden a ondas entre 300 MHz y 30 GHz. Las microondas son generadas por diferentes dispositivos siendo los más comunes el klystron, el magnetrón y el gyrotrón [3].

Hardware para microondas (horno a microondas)

Los hornos a microondas son usados en diversos campos a nivel mundial como procesamiento de alimentos, de pinturas, secado de cueros, y más [4]. El campo electromagnético generado en el horno penetra en el material y orienta las moléculas en dirección a éste. Cuando estas se orientan en dicha dirección, el campo magnético se invierte, con lo que todas cambian su posición (rotan). Estas inversiones de la orientación del campo electromagnético suceden rápidamente, a razón de 2450 millones por segundo, lo que produce calor por agitación molecular. Los principales componentes de un horno son:

Magnetron

El magnetron está formado por un cátodo caldeado por un filamento y construido en el centro de una cámara circular llamada ánodo y un imán que rodea al conjunto [5]. Los electrones tienden a moverse desde un punto de potencial negativo hacia un potencial positivo. El campo magnético está dado por un imán permanente montado alrededor del magnetron, para que éste sea paralelo con el eje del cátodo. El imán varía de acuerdo a los requerimientos particulares de la aplicación. El cátodo que es alimentado con 3,5 V, se calienta generando electrones. Dos imanes en los extremos proporcionan un campo magnético axial. El campo provoca que los electrones sean atraídos por el ánodo en forma de espiral. Los espacios en el interior de la recámara son cavidades cilíndricas que inducen un campo resonante y de alta frecuencia, causando que los electrones que pasan por delante de estos espacios oscilen a una frecuencia cercana a 2,45 GHz. Estas ondas electromagnéticas son extraídas del magnetron con una antena corta que es conectada a una guía de onda que transporta la energía a una cavidad resonante [6]. El ánodo se alimenta con 4 kV.

Guía de onda

Es una estructura de un solo conductor y puede ser de diferentes tipos (rectangulares, elípticas, de onda curva son solo algunos ejemplos). Es utilizada para transmitir ondas electromagnéticas. La conducción de energía no ocurre en las paredes de la guía de onda, sino a través del dieléctrico (generalmente aire) por medio de reflexión dentro de la guía. Opera a frecuencias mayores de 1 GHz, donde otros conductores como líneas de cables paralelos y coaxiales no son óptimos.

La guía de onda comunica al magnetron con la cavidad resonante con escasas pérdidas. Esta guía de onda, debe tener unas dimensiones muy precisas, estando directamente ligada a la frecuencia que transporta.

Cavidad resonante

Es el espacio donde se coloca el material a exponer y en la mayoría de los casos es de sección rectangular. Las ondas son llevadas desde el magnetron por una guía de onda, llegando algunas directamente al material y otras reflejándose en las paredes hasta llegar al objetivo. La cavidad tiene dimensiones precisas para un calentamiento óptimo de los materiales expuestos a la acción de las microondas [7]. Para mejorar la uniformidad disponen de un plato giratorio, paredes giratorias o un agitador en la parte superior.

b) CAL

Está compuesta por calcio y oxígeno y hace referencia tanto a la cal viva como a la cal apagada. La llamada cal viva (CaO) está constituida por óxido de calcio, y se obtiene tradicionalmente por calentamiento a unos 900°C de rocas que contuviesen carbonato de calcio (generalmente piedras calizas). Al llegar a la temperatura de disociación, el carbonato de calcio se convierte en óxido de calcio y dióxido de carbono. La cal apagada se produce al entrar en contacto la cal viva con agua, obteniendo así el hidróxido de calcio (Ca(OH)₂).

Proceso para obtener la cal

Consta de subprocesos que se mencionan a continuación:

Extracción. Se extrae de las canteras de caliza con pico y pala o con cargas de explosivos.

Trituración. En esta etapa la piedra es sometida a un proceso de trituración que arrojará como producto trozos de menor tamaño.

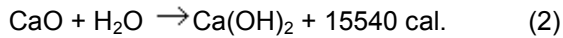
Calcinación. En esta etapa las rocas se someten a elevadas temperaturas (900°C a 1200°C), se calcinan y pierden dióxido de carbono, produciendo óxido de calcio (cal viva) como se aprecia en la ecuación (1). Es importante que el tamaño de la roca sometida a calcinación sea homogéneo para que se realice en forma efectiva y en la totalidad en los fragmentos.



Enfriamiento. Posteriormente se disminuye la temperatura de la cal que sale del horno para que pueda ser manipulada.

Pulverización. Los trozos de cal se separan y se pasan por rodillos para obtener cal en polvo.

Hidratación. Consiste en agregar agua a la cal viva [8]. Esta reacciona desprendiendo mucho calor transformándose en hidróxido de calcio (Ca(OH)₂). El producto de esta reacción, ecuación (2), es conocido como cal apagada.



Tipos de cal

Las rocas calizas contienen impurezas que comunican a la cal distintas propiedades. La proporción de estas impurezas produce la cal aérea o grasa y la cal magra o ácida. La primera ocurre cuando la piedra caliza es pura o tiene un contenido máximo en arcilla de un 5%. Produce una cal blanca que forma una pasta muy fina y untuosa cuando se apaga. La segunda se obtiene cuando se calcina y se apaga piedra caliza con un contenido del 2% al 8% de arcilla y más de un 5% de óxido de magnesio. Al mezclarla con agua es de color grisáceo. Esta cal no se emplea en construcción porque al secarse se disgrega.

Factores que influyen en las propiedades de la cal obtenida

Muchas de las propiedades de la cal dependen tanto de la calidad de la piedra caliza utilizada, como también del proceso de calcinado [9]. De estas propiedades depende el uso que se le dé a la cal. Algunos factores que influyen en las propiedades de la cal obtenida son:

- La dureza de la cal obtenida. Depende de las impurezas de la caliza utilizada como también de la temperatura de calcinación. Una caliza impura da una cal dura si se calcina a temperaturas elevadas.
- La porosidad y como consecuencia la densidad de la cal también depende de la temperatura de calcinación (a mayor temperatura menor porosidad y por lo tanto una mayor densidad). Las calizas que contienen entre 15% y 30% de materia arcillosa produce cales altamente hidráulicas que son muy apreciadas para fabricar cemento.

III. MATERIALES USADOS

Para llevar a cabo las pruebas preliminares se utilizó piedra caliza con alto contenido de carbonato de calcio y escoria de arrabio como susceptor (material que tiene la habilidad de absorber energía electromagnética y convertirla en calor) para elevar la temperatura dentro del recipiente contenedor en el momento de exponer a la acción de las microondas.

Piedra Caliza

Es una roca que contiene como componente principal carbonato de calcio. Este material es de gran importancia en la industria del cemento y su tratamiento térmico puede ser costoso, demorado o tener un difícil manejo ambiental como es el caso del uso de hornos rotatorios o verticales también llamados caleras. El carbonato de calcio viene en dos formas, terroso y claro. El primero es producido por la molienda de piedras calizas en partículas muy finas. El segundo, por otro lado, es obtenido por el calentamiento de piedras calizas a su temperatura de disociación y reconstitución de los componentes por una precipitación controlada [10].

Escoria de arrabio

La escoria de alto horno es un producto secundario, que se genera durante la obtención del arrabio, en cantidades proporcionales a la producción.

Impurezas en el Mineral Derretido + Piedra Caliza = Escoria

La escoria que flota sobre el metal fundido en el horno se drena separadamente, ésta se elimina antes de llegar al recipiente. Es interesante considerar la aplicación de la escoria a la elaboración de otros productos desde tres aspectos importantes: tecnológico (mejora propiedades y puede acelerar los procesos), ambiental (menor contaminación) y económico (ahorro de combustible y materia prima) [11]. La influencia de esta adición en las características de los cementos resultantes está vinculada con la composición de la escoria, tamaño y distribución de partículas, el porcentaje utilizado, tiempo de curado, (variables de temperatura y humedad), clinker base, aditivos, ayuda molienda, etc. La composición química de la escoria está determinada por el funcionamiento del alto horno y por el material de hierro [12]. En esta oportunidad la escoria usada fue la producida por el alto horno en Acerías Paz del Río, empresa ubicada en Paz del Río (Boyacá), la cual tiene un porcentaje en peso de acuerdo a la tabla 1.

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA ESCORIA	
COMPUESTO	% EN PESO
Oxido de Magnesio (MgO)	1,45
Anhídrido silícico (SiO ₂)	25,50
Oxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)	0,71
Oxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)	17,01
Oxido de Calcio (CaO)	43,34
Oxido de Sodio (Na ₂ O)	1,40
Oxido de Potasio (K ₂ O)	0,14
Fosforo (P)	2,30
Azufre (S)	1,00
Hierro (Fe)	0,50

Tabla 1. Composición química de la escoria.

Fuente: N. A. León, N. R. Rojas, B. Umbarila, W. O. Bustamante. *Evaluación Experimental de Unidades Sílico-Calcreas a Partir de Escoria de Alto Horno y Cal Hidráulica para Mampostería.*

IV. HARDWARE UTILIZADO, PREPARACIÓN Y CALIBRACION

Para llevar a cabo las pruebas, se diseñó el arreglo de hardware que se muestra en la figura 1.

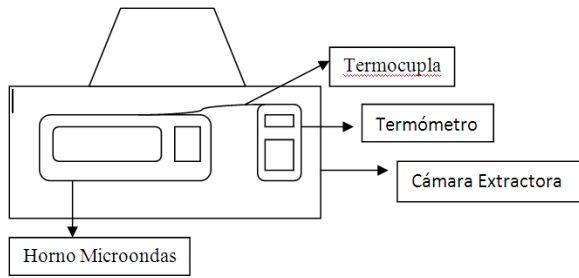


Figura 1. Hardware diseñado para realizar las pruebas
Fuente: Autor.

Horno microondas

El horno microondas utilizado es marca Samsung 1400 watts de potencia. Los gases que desprende el calentamiento de la piedra caliza y que salen del horno se expulsaron mediante el escape de la cámara extractora donde estuvo ubicado el horno en todas las pruebas.

Termómetro

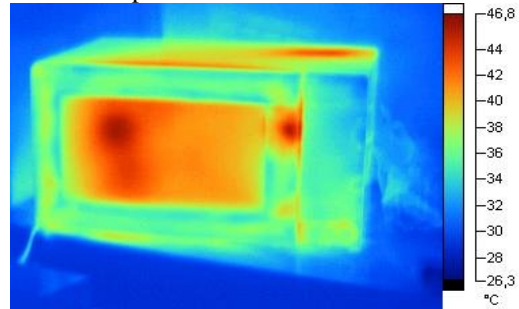
Marca Fluke 52 II el cual se utilizó con una termocupla tipo K. Este termómetro es de 2 entradas y permite una lectura de temperatura con una precisión de +/- [0,06% + 0,3°C] para el rango -200°C a 1372°C para este tipo de termocupla.

Preparación y calibración

La preparación del equipo utilizado fue de la siguiente forma: El horno fue el principal instrumento para realizar las pruebas por ello, se buscó el tiempo de uso en el que su desempeño fuera óptimo:

- A. Se tomaron imágenes termográficas con una cámara IR flexcamThermallmager Ti 50 Marca Fluke para saber la temperatura de la superficie a través del tiempo como se observa en la figura 2.

3 minutos después de haber iniciado el calentamiento.



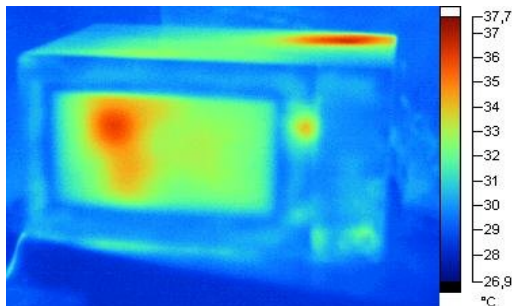
6 minutos después del inicio.

Figura 2. Temperaturas en el horno al calentar un material
Fuente: Autor.

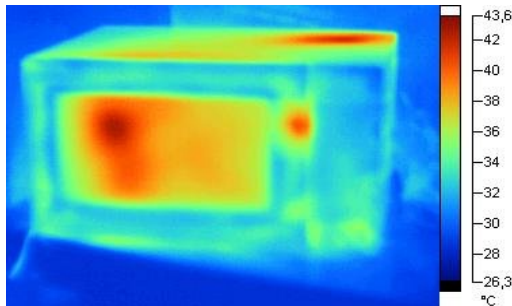
- B. Usando los datos mostrados en la tabla 2, se observa que la potencia, disminuye con el transcurso del tiempo. Teniendo esto presente, las pruebas se realizaron en un intervalo de 10 minutos (durante el cual el horno no se calienta por arriba de 50 °C). Después de ese tiempo se consideró que podría afectar las pruebas introduciendo un error en la toma de la temperatura.

Tiempo (s)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (W)
0	13,70	109	1431
180	12,71	114	1388
360	11,54	114	1260
540	10,47	114	1146

Tabla 2. Potencia del horno medida al calentar un material
Fuente: Autor



Toma al iniciar el calentamiento.



Por otra parte el termómetro fue utilizado con una termocupla tipo k, que se calibró con un termómetro patrón.

V. EXPERIMENTOS PRELIMINARES

Para llevar a cabo los experimentos diseñados estadísticamente [13] y realizar las pruebas se analizaron las variables más significativas. Pueden afectar dicho proceso:

1. Material, tamaño y forma del recipiente.
2. Tamaño de la piedra caliza al momento de calentarla.
3. Ubicación del recipiente en el horno al momento de someterlo a calentamiento.
4. Tiempo de exposición a las microondas.
5. Proporción entre piedra y escoria.
6. Ubicación de la piedra y la escoria en el recipiente.
7. Temperatura ambiente.

Las variables más significativas que se consideraron en estas pruebas fueron la1, 3, 4 y 5.

Procedimiento

Las pruebas se realizaron dejando fija la proporción entre piedra y escoria aproximadamente 1:1, 1:2, 2:1 y 1:0. Con un margen de error de +/- 1%. El tamaño de la piedra caliza fue de acuerdo con el tamaño de tamizado 3/8, 1/2, 3/4 y 1 pulgada. En la figura 3 se muestran las piedras calizas ya tamizadas, la regla en la parte superior mide 13 centímetros.



Figura 3. Tamaño de las piedras usadas
Fuente: Autor.

Se seleccionaron 3 recipientes de barro (cerámico) y un crisol mostrados en la figura 4.

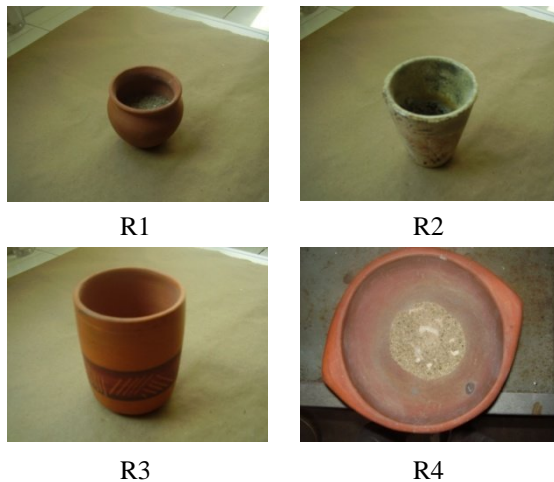


Figura 4. Diferentes Recipientes Usados
Fuente: Autor.

La figura 5 muestra la ubicación óptima dentro de la cavidad.



Figura 5. Ubicación del recipiente en el horno.

Fuente: Autor

Como lo muestra la figura 6, esta posición es la más adecuada debido a que en este punto se obtuvo la mayor incidencia de las microondas y por tanto se podría tener mayor temperatura.

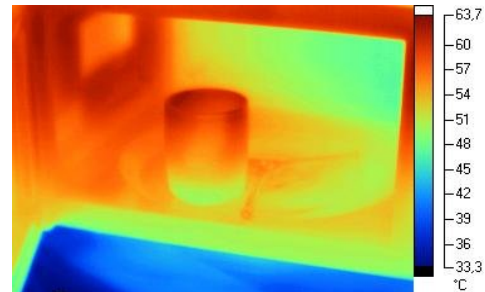


Figura 6. Distribucion de calor dentro del horno microondas
Fuente: Autor.

Pruebas

Las pruebas se hicieron tomando aleatoriamente el recipiente y tamaño de la piedra caliza para un tiempo de exposición a las microondas dado. Por ejemplo, para un tiempo de 5 minutos y proporción piedra caliza-escoria 1:1, el recipiente 2 arrojó la muestra que se aprecia en la figura 7.



Figura 7. Resultado de calentar el material durante 5 minutos en el recipiente 2.
Fuente: Autor

En el ejemplo mencionado, la temperatura alcanzó 530°C en la superficie de la escoria, vitrificándose parte de ella. La piedra presentó un color blanco y no se manifestó presencia de cal. Por otra parte, al calentar por un minuto adicional se apreció reacción dentro del horno y, nuevamente, hubo presencia de vitrificación. Sin embargo se aprecia de cal como se ve en la figura 8, con temperatura en la escoria de 768 °C.



Figura 8. Material obtenido después de calentar piedra y escoria.

Fuente: Autor.

La tabla 3 muestra los resultados obtenidos donde T1, T2, T3 y T4 son los tamaños de la piedra caliza expuesta a microondas; R1, R2, R3 y R4 los recipientes y las cantidades separadas por un guion son temperaturas de la piedra caliza y escoria después de la exposición, respectivamente.

R	T	Tpiedra-Tescoria (°C)
5 MINUTOS		
1	1	160-154
2	3	530-420
3	4	194-160
4	2	121-94
6 MINUTOS		
1	4	302-315
2	2	768-590
3	1	136-89
4	3	176-147

Tabla 3. Datos de temperatura de exposición de piedra caliza en diferentes recipientes para 5 y 6 minutos.

Fuente: Autor.

Se hizo un diseño estadístico de experimentos en forma factorial, donde algunas de las pruebas permitieron obtener cal. Para comprobarlo se humedeció con agua las piedras blancas. Estas reaccionaron desprendiendo calor. Se buscó pintar una superficie y al pulverizar las muestras obtenidas, se pudo diluir en agua. La cal obtenida se muestra en la figura 9.



Figura 9. Muestra de la cal obtenida en el proceso.

Fuente: Autor.

Se tomaron todas las muestras donde se apreció cal, se pesaron y la diferencia de peso, se dedujo, fue desprendimiento de CO₂; los datos se aprecian en la tabla 4.

RECUPERACIÓN DE LA CAL OBTENIDA						
Recipiente	Peso Inicia P-E (Gr)	Peso Final P-E (Gr)	Tamaño	Tiempo (m)	Peso Perdido (Gr)	Peso Cal (Gr)
2	80,41	77,80	3	5	2,61	2,13
2	80,79	75,91	2	6	4,88	3,29
2	57,44	93,50	4	8	3,94	1,92

2	88,41	85,97	4	9	2,44	2,05
1	86,55	77,83	4	10	7,72	4,81

Tabla 4. Datos de recuperación de la cal obtenida.

Fuente: Autor.

Los datos anteriores indican que la cal solo se obtuvo cuando la proporción entre piedra caliza y escoria fue 1:1. Los datos completos para esta proporción se consignan en la tabla 5. La primera columna indica el peso del material en estudio, Pp es el peso de la piedra caliza, Pe peso de la escoria. La segunda columna indica el recipiente usado (R), seguida del tamaño de piedra (T). La temperatura obtenida de la escoria y la piedra caliza Te y Tp respectivamente y el peso final de la muestra Pfm, se aprecian en las dos últimas columnas.

PROPORCION PIEDRA-ESCORIA 1:1					
5 minutos					
Pp-Pe (Gr)	R	T	Te-Tp (°C)	Pfm (Gr)	
40,05-40,01	1	1	160-154	79,93	
40,38-40,03	2	3	530-420	77,80	
42,04-42,05	3	4	194-160	83,21	
40,60-40,30	4	2	121-94	81,00	
6 minutos					
42,05-42,21	1	4	302-315	83,05	
40,62-40,27	2	2	768-590	75,91	
40,05-40,06	3	1	136-89	79,88	
40,63-40,73	4	3	176-147	78,50	
7 minutos					
40,60-40,51	1	2	352-231	80,25	
40,88-40,76	2	1	341-251	80,56	
40,43-40,86	3	3	254-230	78,10	
43,43-43,35	4	4	161-135	86,20	
8 minutos					
44,93-44,78	1	3	235-178	89,37	
48,76-48,68	2	4	720-520	93,50	
40,81-40,87	3	2	289-221	82,41	
40,96-41,19	4	1	123-112	81,68	
9 minutos					
42,69-42,62	1	3	271-201	79,47	
44,16-44,25	2	4	749-541	85,97	
40,73-38,92	3	1	239-167	78,92	
40,60-40,98	4	2	308-165	81,30	
10 minutos					
43,21-43,34	1	4	814-571	79,83	
40,72-40,21	2	3	250-203	79,74	

43,66-43,40	3	2	278-209	87,01
40,51-40,55	4	1	224-151	80,54

Tabla 5. Datos obtenidos a exponer el material con la proporción 1:1 a las microondas.

Fuente: Autor.

Utilizando una malla número 150 se separó la cal de la piedra y la escoria. En todas las pruebas donde se obtuvo cal, las piedras quedaron blancas indicando que la proporción de cal obtenida es mayor a la que se pudo recuperar, triturando la piedra y después tamizando se podría obtener esta cal. La figura 10 muestra estas piedras calizas.



Figura 10. Piedra caliza que demuestra presencia de cal.

Fuente: Autor.

De la tabla 5 se tomaron los datos de tiempo de exposición y la temperatura alcanzada en la piedra caliza para cada tamaño de piedra en distintos recipientes. Se graficaron obteniendo el perfil de temperatura que se aprecia en la figura 11.

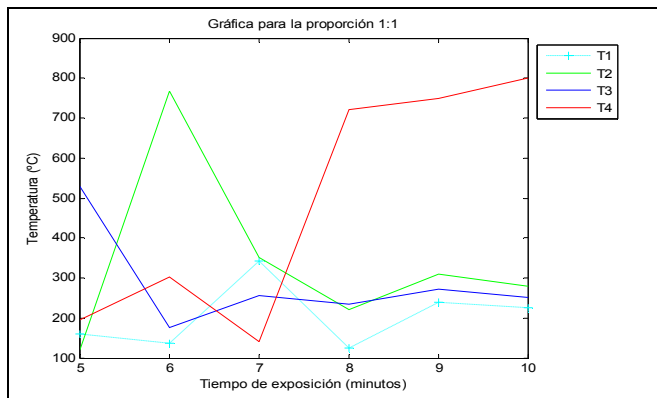


Figura 11. Perfil de Temperatura

Fuente: Autor.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo a la proporción de piedra caliza y escoria, los resultados muestran que la temperatura aumenta más significativa y uniformemente cuando se tiene presencia de escoria que solamente piedra caliza en el recipiente, esto debido a que la escoria es un suscepto, que permite mayor calentamiento de la muestra. La

proporción 1:1 es la que lleva a máxima la temperatura en la piedra caliza. Se presentó más vitrificación de la escoria cuando la proporción de ésta fue mayor, lo que indica que absorbe la mayor cantidad de la energía de las microondas. Se obtuvo mejor calentamiento con el recipiente 1 y 2, al estar la piedra abajo y la escoria arriba, debido a la geometría cónica del recipiente 2 (las microondas parecen penetrar mejor en la muestra). El recipiente 2 permite obtener mejores resultados a la hora de calentar la piedra con la proporción mencionada.

La vitrificación de la escoria ocurre solo en ciertos puntos, debido a que la temperatura no es uniforme en toda la superficie. Las microondas entran a la cavidad resonante y llegan a la muestra, pero calientan más en un punto próximo al magnetrón. Los resultados muestran que al cambiar de recipiente la temperatura no tiene un crecimiento uniforme con el tiempo y, para un tamaño de piedra caliza mayor, la temperatura es más uniforme y varía menos. La geometría y el material del recipiente afectan notablemente la temperatura de las muestras (cuando la proporción de escoria es menor o nula, la variación en la temperatura es menor).

El porcentaje en peso obtenido de cal está alrededor del 7% (el calentamiento no uniforme impidió que fuera mayor). Los recipientes se calientan (absorben energía electromagnética), lo que ocasiona una pérdida de energía.

El rango de exposición adecuado está entre 8 y 10 minutos. Con el recipiente 2 se obtiene cal en un tiempo menor pero la proporción es más baja y hay más vitrificación de escoria (debido a que este recipiente permite temperaturas más elevadas y, al no interactuar uniformemente con las microondas, el calor se concentra en ciertos puntos dando paso a la posibilidad de que la escoria se vitrifique). Modificar el sistema de rotación del horno podría evitar esto. Además el horno debe contar con un escape hacia un sistema purificador de aire para los gases que se desprenden al calcinar la piedra caliza (si estos quedan atrapados pueden evitar un mejor calentamiento de la muestra). Modificar la cavidad resonante, ubicando la salida del magnetrón en la parte superior de la cavidad y colocar la muestra directamente debajo de este, podría optimizar la entrega de potencia.

VII. REFERENCIAS

[1] Ma X., Kaneko T., Tashimo T., Yoshida T. y Kato K. Use of Limestone for SO₂ Removal from Flue Gas in the semidry FGD process with a poder-particle spouted bed, en revista Chemical Engineering Science, vol 55, 20, pp. 4643-4652. 20 Octubre del 2000.

- [2] Urquiza, J y Urquiza Aguirre, J. Hornos de Alta Frecuencia y Microondas. MacGraw-Hill. 1995.
- [3] Ortiz, F. y Rojas, Y. Diseño y Construcción de un Equipo para Tratamiento Térmico de Muestras de Pavimento con Microondas. Trabajo de Grado (Ingeniería Electrónica). Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2003.
- [4] Crespo R. J. y Castaño J. Secado de Forraje con el Horno: Efecto Sobre el Análisis de Calidad, en Revista Agricultura Técnica (Chile), 67, pp. 210-218. abril-junio 2007.
- [5] Diaz Morcillo, A., Monzó Cabrera J., Domínguez Tortajada, E. y Requena Pérez M. Principios Fundamentales y Aplicaciones del Calentamiento por Microondas. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación. Universidad Politécnica de Cartagena. ISSN 1698-2924. 204. 2004.
- [6] Barrios E. y Barrios D Ingeniería Conceptual de Un proceso de Fabricación de un Material Vía Microondas (2450 MHz). Trabajo de Grado (Ingeniería Electrónica). Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2009.
- [7] Scott, A. Understanding Microwaves, John Wiley and Sons, Canadá. 1993.
- [8] Carrascal, Fabián. Plan de Mejoramiento y Acondicionamiento de la Fábrica de Cal y Carburos del Norte, Ubicada en Ocaña, Norte de Santander. Trabajo de Grado (Ingeniería Química). Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2007.
- [9] Vargas A. y Amurrio D. Modelización de un Proceso de Calcinación en un Horno Rotatorio, en revista Acta Nova, vol. 2, N°3. Diciembre 2003.
- [10] Antelis, Oscar. Mezcla Asfáltica con Cal Hidratada. Tesis de Grado (Ingeniería Civil). Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2007.
- [11] Batic, O. R., Sota J. D. y Falcone D. D. Influencia en la Incorporación de Escoria en las Características de los Cementos Resultantes. Reciclado de residuos de construcción y demolición (RCD) y de residuos de procesos (RP) PROCQMA. Universidad Tecnológica Nacional, ISBN 950-42-0056-7. 2006.
- [12] León N. A., Rojas N. R., Umbarila B. y Bustamante W. O. Evaluación Experimental de Unidades Silico- Calcáreas a Partir de Escoria de Alto Horno y Cal Hidráulica para Mampostería en revista Dyna, Año 76, Nro. 160, pp. 247-254. ISSN 0012-7353. Medellín. Diciembre de 2009.
- [13] Kuehl, R. Diseño de Experimentos. Thomson Learning. Pp 53-61. 2001.