

**“DISEÑO Y ELABORACIÓN DE LADRILLO REFRACTARIO (22x11x6cm)
EMPLEANDO MATERIAS PRIMAS NACIONALES, UTILIZADOS EN LA
CONSTRUCCIÓN, MANTENIMIENTO Y REPARACIONES DE HORNOS DE CRISOL Y
CUBILOTE”**

Cuichán Alulema Alejandro Paolo

Llano Guanochanga Mayra Janet

Guasumba Codena José

**alejopaolo@hotmail.com, mayrajanetllano@hotmail.com,
jguasumba@espe.edu.ec**

Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE

Sangolquí-Ecuador

RESUMEN

El artículo describe el diseño y elaboración de ladrillo refractario (22x11x6) utilizando materias primas nacionales, empleados en la construcción, mantenimiento y reparación de hornos de crisol y cubilote.

Se analizaron tres tipos de pastas, siendo la pasta C la más idónea, ya que con esta se alcanza la fase cordierita, que proporciona tanto los porcentajes de composición química, así como también las propiedades físico-mecánicas del ladrillo refractario.

Para comprobar que el producto cumpla con los estándares requeridos se realizaron diferentes ensayos, bajo normas INEN y especiales, para con ayuda de los resultados obtenidos, realizar una

evaluación de los mismos, con ladrillos refractarios importados de Colombia de la marca ERECO y norma INEN 0635

Palabras claves

- Conductividad Térmica
- Cono Pirométrico
- Cordierita
- Fundición
- Refractario

1.- INTRODUCCION

En la actualidad en el área de fundición de las industrias metalúrgicas, la utilización de ladrillos refractarios para el funcionamiento de los hornos tanto de crisol como de cubilote, ha ido creciendo, por lo que los mismos son importados de países como Colombia, Argentina, debido a que en el país no se elaboran este tipo de productos.

En el proceso de fundición el ladrillo refractario constituye uno de los elementos principales, motivo por el cual se busca obtener un producto de similares características a los exportados de otros países, eliminando de esta manera los costos de adquisición del mismo. Después de haber realizado los estudios técnicos pertinentes, se ha elaborado un ladrillo refractario que posee propiedades físico-mecánicas adecuadas y que están bajo parámetro de las normas INEN, alcanzando de este modo una rentabilidad económica.

2.- DISEÑO EXPERIMENTAL

2.1 FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Diseño y elaboración de ladrillo refractario (22x11x6) utilizando materias primas nacionales, empleados en la construcción, mantenimiento y reparación de hornos de crisol y cubilote, el mismo que cumpla con los siguientes parámetros de composición química, mecánicas, físicas y térmicas, bajo normas INEN 573, 574, 575, 576, 635.

2.2 RECURSOS, MANO DE OBRA Y EQUIPOS.

Diatomita.- Posee un alto contenido de sílice y se encuentra en el sector de Yahuarcocha

Caolín.- tiene un alto contenido de óxido de aluminio, se encuentra en el sector de Veracruz.

Chamota.- esta se obtiene a partir de la cocción del caolín a una temperatura de 1150°C a 1200°C.

Carboximetilcelulosa (C.M.C).- es un estabilizante de origen vegetal, se utiliza para dar una compactación a la pasta.

MANO DE OBRA.- Este proyecto lo realizamos conjuntamente con la ayuda de profesionales y técnicos, utilizando las materias primas descritas anteriormente y con el uso adecuado de equipos, técnicas y medidas de seguridad.

EQUIPOS

Molino de Bolas.- Son cámaras giratorias que poseen en su interior bolas de acero y piedras de ríos, permitiendo la trituración de las arcillas. Estos molinos pueden operar en seco o en húmedo. [1] (ZENITH S.A., 2013)

Balanza Horizontal.- es un instrumento que sirve para medir masa y cuerpo.

Hormigonera.- Empleada para la elaboración del hormigón. Su principal función es la de suplantar el amasado manual de diferentes elementos que componen la mezcla.

Prensa Hidráulica Manual.- Máquina herramienta de funcionamiento hidráulico sirve para presionar objetos, contiene un cilindro el cual tiene en su interior un embolo que sale y comprime la pieza contra la mesa, todo esto gracias al fluido del aceite hidráulico que es accionado desde una bomba hidráulica de uso manual.

Horno Mufla o Copela Horizontal.- Tiene sección ovalada. En esta mufla se coloca el cuerpo que hay que calentar y de este modo se halla fuera del contacto de los productos de la combustión y expuesto, por el contrario, a la acción oxidante del aire.

Máquina Universal de Ensayos.- En ingeniería se denomina máquina universal a una máquina semejante a una prensa con la que es posible someter materiales a ensayos de tracción, compresión y flexión para medir sus propiedades. Así por ejemplo, se ha utilizado en la medición de las propiedades de tensión de los

polímeros.[2] (TIMOSHENKO, Stephen; GODIER, J.N., 1999).

Microscopio Metalúrgico.- Este microscopio es utilizado para analizar las superficies de metales y plástico a través de luz polarizada. Utilizado en amplios campos metalúrgicos, arqueología, geología, restauración, mineralogía.

Medidor de Dureza (Durómetro).- Aparato que mide la dureza de los materiales. Los más utilizados son los de Rockwell, Brinell, Vickers y Microvickers.

2.3 TECNICAS APLICABLES

Molienda.- Consiste en triturar cada uno de los componentes de forma separada tales como: diatomita, chamota y caolín, el mismo que se da lugar en el molino de bolas.

Tamizado.- Se seleccionó los tamices que contienen mallas 5, 100 y 200 debido a la facilidad con que se los encuentra en el mercado. Las especificaciones técnicas de los mismos se encuentran en la tabla anterior. [3] (AVGUSTINIK, 1983, pág. 334).

Conformado.- En este proceso se utiliza el C.M.C para una buena compactación, uno de los parámetros importantes para obtener las dimensiones estándares del ladrillo, es el grado de contracción que tiene pasta al momento de la cocción.

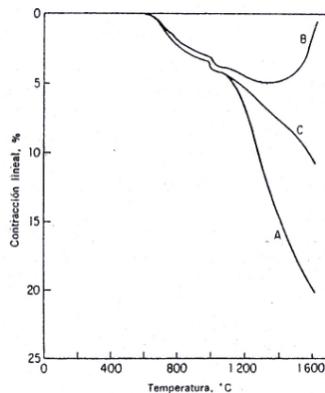


Figura 1. Curvas de Contracción de cocción.
Fuente: Avgustinik, A.I., Ed. 1983, pp.184.

Secado.- tiene como objeto eliminar el agua libre, no combinada, contenida en la pasta cruda e incorporada durante la preparación de las materias primas. El horno se debe calentar a una temperatura superior a los 100°C, para nuestro caso el mismo se calentó a una temperatura constante de 120°C por el lapso de 48 horas.

Cocción.- Es la más importante debido a que en esta etapa se definen las propiedades que va a adquirir el producto final. Los parámetros que se controlaron son la temperatura máxima de cocción de 1400°C, un tiempo de cocción de 15 horas, la velocidad de calentamiento y de enfriamiento.

Se seleccionó el ciclo de cocción de 1350°C debido a que su temperatura máxima es de 1400°C y a esta temperatura se forma la fase cordierita.

2.4 MUESTRAS DE PRUEBA

Método –Fase Cordierita.- La cordierita existe en la naturaleza en forma de mineral bastante escaso, y constituye la fase situada en el centro del diagrama triaxial MgO-Al₂O₃-SiO₂ Limitada por las líneas que unen cinco puntos eutécticos.

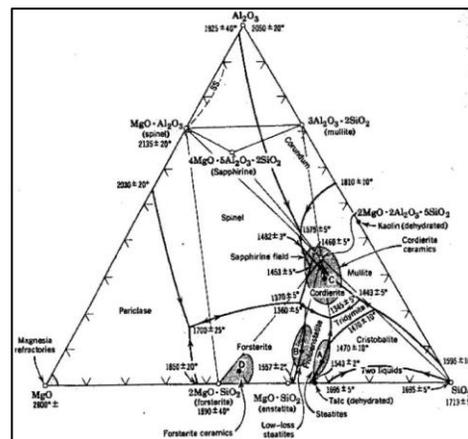


Figura 2. Sistema MgO-Al₂O₃-SiO₂
Fuente: Doman, R., Science of Ceramics 1980

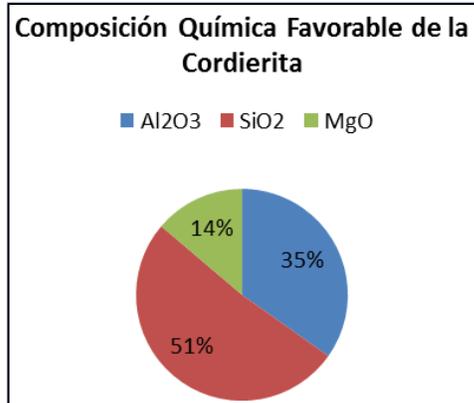


Figura 3. Composición Química Favorable de la Cordierita

Fuente: Llano, M.; Cuichán A.; Ladrillo Refractario Alternativo, 2013

Formulación.- A continuación se estudia la posibilidad de desarrollar una formulación usando la fórmula teórica de la cordierita.

Fórmula de la cordierita



Peso molecular de la cordierita: 584.99 gr/mol.

Composición en Peso de la Cordierita

C. Química	Porcentaje (%)
SiO ₂	51.36
Al ₂ O ₃	34.86
MgO	13.78

Resultados obtenidos de la composición en peso de la cordierita.

Para poder utilizar cada una de las arcillas, se las somete a una prueba de composición química misma que se realizó en el laboratorio de E.P.N, para conocer la composición química porcentual.

Análisis Químico porcentual

Comp.	Diat(%)	CaoA(%)	CaoC(%)
SiO ₂	70.72	0.49	60.0
Al ₂ O ₃	29.40	78.21	0.21
MgO	4.64	3.84	30.4

MEJORAMIENTO

Cálculo de Dosificación de la Materia Prima (Muestra C)

Datos

Pesa de la mezcla (Pm) = 2kg

Composición Porcentual de la Mezcla Ideal

Oxido de Sílice (SiO₂) = 0.514

Oxido de Aluminio (Al₂O₃) = 0.348

Oxido de Magnesio (MgO₂) = 0.138

Composición Porcentual de la Mezcla B (Resultado de Pruebas)

Oxido de Sílice (MB SiO₂) = 0.235

Oxido de Aluminio (MB Al₂O₃) = 0.465

Oxido de Magnesio (MB MgO₂) = 0.144

Peso de las Materias Primas de la mezcla B

PDia = 0.684 (Kg)

PCaoA = 0.633 (Kg)

PCaoC = 0.908 (Kg)

Calculo del peso de la Diatomita para la Mezcla C (PMC Dia)

$$PMC \text{ Dia} = \frac{PDia * SiO_2}{MB SiO_2}$$

$$PMC \text{ Dia} = 1.496 \text{ (Kg)}$$

Calculo del peso del Caolín A para la Mezcla C (PMC CaoA)

$$PMC \text{ CaoA} = \frac{PCaoA * Al_2O_3}{MB Al_2O_3}$$

$$PMC \text{ CaoA} = 0.474 \text{ (Kg)}$$

Calculo del peso del Caolín C para la Mezcla C (PMC CaoC)

$$PMC \text{ CaoC} = \frac{PCaoC * MgO_2}{MB MgO_2}$$

$$PMC \text{ CaoC} = 0.870 \text{ (Kg)}$$

Con los datos obtenidos los pesos requeridos de materia primara serán: diatomita 1.496 kg, caolín A 0.474 kg, caolín C 0,870 kg.

Masa Total para elaborar 10 ladrillos refractarios (M_{TL})

$$M_{TL} = n * M_{r1}$$

$$M_{TL} = 35.686 \text{ (Kg)}$$

CÁLCULOS DE LA MATERIA PRIMA PARA ELABORAR 10 LADRILLOS REFRACTARIOS

Peso Total de Diatomita ($PT_{Diatomita}$)

$$PT_{Diatomita} = \frac{PMC \text{ Dia} * M_{TL}}{Pm}$$

$$PT_{Diatomita} = 26.69 \text{ (Kg)}$$

Peso Total de Caolín A

$$PT_{Caolín A} = \frac{PMC \text{ CaoA} * M_{TL}}{Pm}$$

$$PT_{Caolín A} = 8.457 \text{ (Kg)}$$

Peso Total de Caolín C

$$PT_{Caolín C} = \frac{PMC \text{ CaoC} * M_{TL}}{Pm}$$
$$PT_{Caolín C} = 15.522 \text{ (Kg)}$$

3.- PRUEBAS Y ENSAYOS DEL LADRILLO REFRACTARIO.

3.1. Propiedades del Ladrillo Refractario

Se determina el procedimiento de cada una de las pruebas y ensayos y posteriormente se las desarrolla, de esta manera se obtienen los datos que consecuentemente se utilizan en el desarrollo del capítulo cinco; con los cuales se calcula las características físicas y mecánicas que el Ladrillo Refractario debe cumplir.

Composición Química.- Para determinar la composición Química del Ladrillo Refractario se utiliza la Norma INEN 576, la misma que establece el siguiente objeto y alcance. Esta norma establece los Análisis Químicos para determinar los componentes químicos de los materiales refractarios Sílico-Aluminosos.

Porosidad, Absorción de Agua y Densidad Aparente.- Se realiza bajo norma INEN 573 [4] (I.N.E.N., Materiales Refractarios Determinación de la Porosidad, Absorción de Agua y Densidad Aparente (INEN 573), 1981, pág. 1).

- Con un cepillo de acero se eliminó las incrustaciones de cuerpos extraños que tuvo la muestra.
- Registrar la masa seca con ayuda de la balanza.
- En un recipiente con agua potable sumergir las muestras en su totalidad sin tocar el fondo y hervir por un periodo de dos horas. Enfriarlas a temperatura

ambiente por un mínimo de 3 horas, sin sacar del recipiente.

- Retirar las muestras del agua y secarlas ligeramente con un trapo húmedo de lino para quitar el agua libre de la superficie.
- Eliminar el exceso de agua de la superficie con cuidado para no quitar el agua contenida en los poros. Luego se procede a pesar la masa de la muestra saturada de agua y de superficie húmeda.

Porosidad Aparente

Se calcula con la siguiente expresión:

$$Pa = \frac{G_a - G}{V_a} \times 100$$

$$Pa = \frac{292.894 - 269.426}{122.150} \times 100$$

$$Pa = 19.212 \%$$

Absorción de Agua

Se calcula con la siguiente expresión:

$$A = \frac{G_a - G}{G} \times 100$$

$$A = \frac{292.894 - 269.426}{269.426} \times 100$$

$$A = 8.710 \%$$

Densidad Aparente

Se calcula con la siguiente expresión:

$$Paa = \frac{G}{V_a}$$

$$Paa = \frac{269.426(g)}{122.150(cc)}$$

$$Paa = 2.206 \text{ g/cc}$$

Resistencia a la Rotura por Compresión en frío (INEN 574).

Someter a los ladrillos y piezas refractarias a una carga de compresión, en frío, para conocer la resistencia máxima admisible. [5] (I.N.E.N., Materiales Refractarios Determinación de la Resistencia a la rotura por Compresión y por Flexión, en frío (INEN 574, 1981, pág. 1).

Calculo de M_c

$$M_c = \frac{G}{a * e}$$

$$M_c = \frac{20000 \text{ kg}}{11.5 \text{ cm} * 6.5 \text{ cm}}$$

$$M_c = 267.56 \text{ kg/cm}^2$$

Resistencia a la Rotura por Flexión en frío (INEN 574)

Calculo de M_f

$$M_f = \frac{3GL}{2a * e^2}$$

$$M_f = \frac{3(16971.3N)(170\text{mm})}{2(115\text{mm}) * (65\text{mm})^2}$$

$$M_f = 8.907 \text{ Mpa}$$

$$M_f = 89.07 \text{ Kg/cm}^2$$

Cono Pirométrico (INEN 575).

Establece el método para determinar el Cono Pirométrico Equivalente (C.P.E.), de los materiales refractarios, por comparación con Conos Pirométrico Normales o de referencia. [6] (I.N.E.N., Materiales Refractarios Determinación del Cono Pirométrico Equivalente (INEN 575), 1981, pág. 1).

3.2 ENSAYOS ESPECIALES

Son aquellos ensayos que no tienen un procedimiento establecido bajo Normas y

que por consiguiente no existen valores con los cuales van a ser evaluados.

Dureza.- El método para calcular la dureza en refractarios [7] (Megazine, 2013) es la de la Escala Rockwell, debido a que pertenece a la familia de los cerámicos es recomendable usar la escala B y como elemento indentador la punta de bola de acero 1/16”.

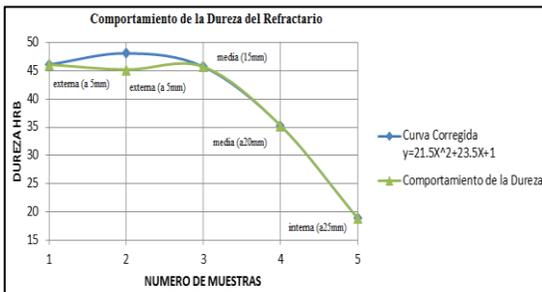


Figura 4. Ensayo de Dureza

Fuente: Llano, M.; Cuichán A.; Ladrillo Refractario Alternativo, 2013

Rango de dureza.- A medida que se va acercando al interior del refractario disminuye la dureza del mismo, por lo cual una dureza promedio no sería lo más recomendado, he aquí que se define un rango de 18.9 - 46.1 HRB, siendo más frágil en la parte interna y más resistente en su parte superficial.

Tamaño de Grano.- Este ensayo consiste en determinar el tamaño de grano y la microestructura que se forma en el proceso de cocción del ladrillo refractario.

Conductividad Térmica.- Debido a que no existe un ensayo normalizado para determinar la Conductividad Térmica de refractarios, se pone a consideración el siguiente procedimiento que se basa en los principios básicos de la transferencia de calor.

Procedimiento

- Con la ayuda de la amoladora cortar el ladrillo 85x110x30mm y posteriormente pulir las dos caras del refractario hasta obtener áreas libres de rugosidades y dar el acabado superficial con el cepillo de acero.
- Encender la estufa a su máxima capacidad.
- Medir la temperatura de la estufa con la termocupla y cuando esta haya llegado a una temperatura constante colocar una de las platinas (A) sobre ella.
- Medir la temperatura de la cara superior de la platina (A) en distintos punto hasta que alcance una temperatura uniforme.
- Colocar el ladrillo refractario en su cara más ancha sobre la platina (A).
- Revestir de fibra de vidrio el contorno del ladrillo refractario, para asegurar un flujo de calor paralelo a través del mismo.
- Una vez que el ladrillo refractario haya alcanzado la temperatura uniforme de en la cara superior, colocar la platina (B) sobre la misma.
- Esperar que la platina B alcance una temperatura uniforme, para luego medir las temperaturas de las caras superiores del ladrillo y de la platina B utilizando las Termocuplas.



Figura 5. Toma de datos placa B.

Fuente: Llano, M.; Cuichán A.; Ladrillo Refractario Alternativo, 2013

4. CONCLUSIONES

Una vez realizados los estudios técnicos, de producción nacional y económicos sobre el ladrillo refractario, se puede concluir que su elaboración es factible, tomando en consideración aspectos económicos como la adquisición de materias primas, debido a que en el país se cuenta con yacimientos que no están concesionados y son de fácil acceso, motivo por el cual las arcillas nacionales tienen un costo que rodea entre los \$80 USD por tonelada, mientras que las de importación es de \$300 USD.

En cuanto a la parte técnica, vale mencionar que dos de los parámetros más importantes a controlar es la formulación de la fase cordierita y el proceso de presado. La primera determina la refractabilidad del ladrillo, que para este caso se obtuvo con la mezcla C, un ciclo de cocción adecuado ($T^{\circ}\text{máx}$ 1400°C y tiempo de cocción de 14 horas). Y la segunda proporciona las propiedades físico-mecánicas del refractario, entre las que se destacan la resistencia a la flexión y compresión en frío, parámetros que fueron controlados con una presión de prensado de 6 toneladas, concluyendo así, que a mayor presión de prensado, mayores serán dichas propiedades.

Además uno de los aspectos adicionales que se tomó en cuenta es el medio ambiente, pues la producción de ladrillo refractario tiene un mínimo impacto en el ecosistema en donde se lo vaya a elaborar, pues del 100% de los elementos que conforman la materia prima el 95% se los puede reutilizar en dicho proceso, mientras el restante 5% correspondiente a desechos, se los puede tratar para ser

liberados posteriormente como es el caso del agua.

Finalmente al realizar un estudio económico y financiero a dicho proyecto, se puede concluir que el mismo es rentable, ya que el precio obtenido para el ladrillo refractario es de \$3.74 USD con una rentabilidad del 15% y el TIR de 34.05%, después de todas las inversiones realizadas es razonable en comparación con otros existentes en el mercado los cuales rodean los \$5.70 USD, cabe recalcar que el producto es de buena calidad y cumple con los Standares requeridos.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] ZENITH S.A. (24 de Junio de 2013). Obtenido de <http://www.zenithcrusher.com>
- [2] Timoshenko, S.; Godier, J.N. (15 de abril de 1999). Analisis de Vigas, Arcos, Placas y Laminas. En *Resistencia de Materiales*. Madrid: UPV. Obtenido de <http://www.wikipedia.org>
- [3] Avgustinik, A. (1983). *Ceramicos*. Barcelona: S.N.
- [4] I.N.E.N. (1981). *Materiales Refractarios Determiacion de la Porosidad, Absorcion de Agua y Densidad Aparente (INEN 573)*. Quito, Ecuador: INEN.
- [5] I.N.E.N. (1981). *Materiales Refractarios Determinación de la Resistencia a la rotura por Compresión y por Flexión, en frío (INEN 574)*. Quito, Ecuador: INEN.

[6] I.N.E.N. (1981). Materiales Refractarios Determinación del Cono Pirométrico Equivalente (INEN 575). Quito, Ecuador: INEN.

[7] Megazine. (17 de julio de 2013). www.megazine.com. Obtenido de <http://www.megazine.com>

6. BIOGRAFIA DE LOS AUTORES



Alejandro Paolo Cuichán Alulema nació el 6 de Julio de 1987 en la ciudad de Sangolqui. En el año 2005 obtiene el título de Bachiller especialidad Técnico en Mecánica Industrial

en el Colegio Jacinto Jijón y Caamaño. En el año 2012 egresa de la carrera de Ingeniería Mecánica en la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE. Y aspira conseguir el título de tercer nivel en los estudios mencionados.



Mayra Janet Llano Guanochanga nació el 18 de Marzo de 1987 en la ciudad de Aloasí. En el año 2005 obtiene el título de Bachiller especialidad Físico-Matemático en el Colegio Nacional

Machachi. En el año 2013 egresa de la carrera de Ingeniería Mecánica en la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE. Y aspira conseguir el título de tercer nivel en los estudios mencionados.



Segundo Guasumba Codena. MSc. En Energías Renovables en la Universidad Internacional de Andalucía España, Septiembre 2007. Candidato a Ph.D. en Ingeniería en la

Universidad Nacional de Cuyo, MZ, Argentina Noviembre 2010. Es profesor de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE. Sus áreas de interés e investigación son las Energías Renovables.

