

# EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE UNIDADES SÍLICO-CALCÁREAS A PARTIR DE ESCORIA DE ALTO HORNO Y CAL HIDRÁULICA PARA MAMPOSTERÍA

## EXPERIMENTAL EVALUATION OF SILICON - CALCAREOUS UNITS FROM BLAST FURNACE SLAG AND HYDRAULIC LIME FOR MASONRY

NILSON ARIEL LEÓN

*Escuela de Metalurgia, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, nilsonleon@gmail.com*

NÉSTOR RICARDO ROJAS REYES

*I.M.CIMEX, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, nrrojasr@unal.edu.co*

BERNARDO UMBARILA SUÁREZ

*Jefe proyectos SUMININCO Ltda. bernardoumbarila@gmail.com*

M. OSWALDO BUSTAMANTE R.

*I.M.CIMEX, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, mobustam@unal.edu.co*

Recibido para revisar octubre 20 de 2008, aceptado noviembre 21 de 2008, versión final diciembre 10 de 2008

**RESUMEN:** El presente artículo estudia la posibilidad de fabricar elementos sílico-calcáreos para mampostería a partir de dos tipos de materias primas como son las escorias de Alto Horno y las cales hidráulicas. En el presente trabajo se evaluaron algunas propiedades físicas de las probetas fabricadas con los anteriores materiales con respecto a la Norma Técnica Colombiana, para 5 tipos de mezclas que varían entre 10 y 50 % de cal. Los resultados mostraron que es factible la fabricación de ladrillos sílico-calcáreos para mampostería que cumplen con la NTC 922.

**PALABRAS CLAVE:** Ladrillos sílico-calcáreos, utilización de subproductos, escoria de alto horno, cal hidráulica, ladrillos ecológicos.

**ABSTRACT:** The present paper studies the possibility of making silicon-calcareous elements for masonry from two types of raw material like the blast furnace slag and hydraulic limes. In the present study some physical properties of samples made according to the Norma Técnica Colombiana with the previously mentioned materials were evaluated for 5 types of mixtures that vary among 10% and 50% of lime. The results show that the silicon -calcareous brick manufacture is feasible for masonry that fulfills the NTC 922.

**KEYWORDS:** Silicon - calcareous bricks, by-product use, slag of blast furnace, hydraulic lime, ecological bricks.

### 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo sostenible de la economía mundial fuertemente industrializada ha llevado a un incremento sensible en la reutilización de residuos de producción. Este fenómeno se debe en gran parte a la fuerte especialización de los distintos sectores industriales. El desarrollo de

políticas para salvaguardar el medio ambiente, ha fomentado la aparición de nuevas zonas de mercado dedicadas al suministro de servicios "ecológicos" como la recolección y el tratamiento de los residuos de los procesos de producción [1, 2, 3].

El problema del tratamiento de estos residuos constituye un tema delicado, tanto que desde hace tiempo el mundo industrial se ha venido sensibilizando en este tipo de temática. Colombia, país en vía de desarrollo no puede ser ajeno a este tipo de problemas. Industrialmente hablando, la reutilización de los residuos de producción es una solución para la reducción de los costes de manejo de los residuos en general. El reciclaje de materiales de construcción está actualmente desarrollándose como una actividad con interesantes expectativas de crecimiento [4, 5, 6].

Un aspecto importante con respecto al gran ahorro de energía en la fabricación de este nuevo material, es que la máxima temperatura a la que se debe someter el ladrillo dentro del proceso es entre 120 – 150°C (vapor recalentado), muy bajo con respecto a la temperatura que alcanzan los hornos de ladrillo convencional de arriba de 800 – 900°C (para evitar la formación de metacaolinita [7]). Además, al quemar un ladrillo con carbón mineral, la emisión de CO<sub>2</sub> por la combustión se evita en este proceso, lo cual implica que nuestro ladrillo es ecológicamente fabricado.

Con el siguiente trabajo se evaluó un tipo de ladrillo sílico-calcáreo que podría funcionar como unidad de mampostería para una posible aplicación como lo es la construcción convencional de vivienda [8]. En la fabricación de esta unidad se utilizaron dos materiales de dos géneros industriales: escoria de Alto Horno proveniente de una acería y cal hidráulica. Si se pudiera obtener un ladrillo proveniente de materiales de desecho y costo de producción bajo no sólo se obtendría un nuevo material, sino que este material sería ecológicamente producido, característica que no puede ser ajena a ningún proceso industrial.

En la mampostería moderna, se aprovechan los ladrillos de arcilla y los bloques de concreto de gran resistencia, unidos mediante morteros de cemento [9]. El muro así ensamblado se considera un elemento monolítico, siempre y cuando las uniones de las juntas puedan garantizar la transmisión de esfuerzos entre las

piezas individuales, sin fallas o deformaciones considerables [10, 11].

Existe toda una gama de piezas en el mercado, en general la geometría de estas no esta regulada, pero se exige que cumplan las especificaciones adoptadas en la Norma Sismo Resistente 98 (NSR-98) en su numeral D.3.6. La evaluación del comportamiento de las unidades sílico-calcáreas para mampostería debe cumplir con la Norma Técnica Colombiana 922 (NTC 922) [12].

Para llegar al objetivo de obtener un ladrillo para mampostería [13], se debió caracterizar las materias primas utilizadas en la fabricación e implementar un diseño experimental adecuado. Luego se evaluaron las diferentes mezclas (desde 10 hasta 50% de cal) con el fin de compararlas y determinar cuáles cumplen con la norma NTC 922.

## 2. ESTUDIO EXPERIMENTAL

### 2.1 Escoria de Alto Horno

La escoria que se utilizó en el trabajo fue granulada (gruesa y fina), procedente de la empresa Acerías Paz del Río (Nobsa – Boyacá) y su distribución granulométrica se presenta en la Figura 1 donde se observa un  $d_{80} = 2,45$  mm y 0,96 mm para escoria gruesa y fina respectivamente. En la Tabla 1 se observa su composición química, la cual se encuentra dentro de los rangos normales de una escoria típica procedente de la fabricación del arrabio [14].

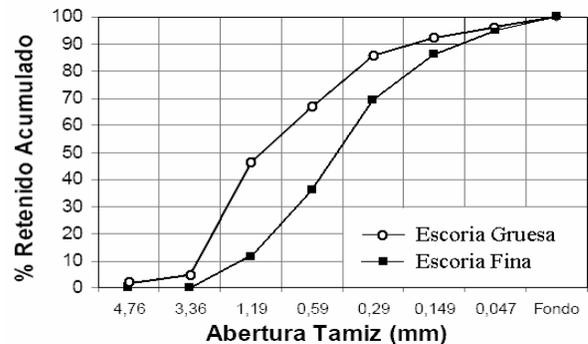


Figura 1. Distribución granulométrica de la escoria de alto horno

Figure 1. Grain sized distribution of the blast furnace slag

**Tabla 1.** Composición química de la escoria de alto horno**Table 1.** Chemical composition of the blast furnace slag

Compuesto	% en peso
CaO	43,34
SiO <sub>2</sub>	25,50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,01
P	2,30
MgO	1,45
Na <sub>2</sub> O	1,40
S	1,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,71
Fe	0,50
K <sub>2</sub> O	0,14

## 2.2 Cal

Dos tipos de cal fueron evaluados en el trabajo: cal aérea (siderúrgica) y cal hidratada (agroindustrial), esta última se utilizó por los buenos resultados obtenidos y su bajo costo en el mercado, las cuales fueron suministradas por la empresa Suminco Ltda (Nobsa – Boyacá); sus composiciones químicas se presentan en las Tablas 2 y 3. Para poder clasificar correctamente las cales, Vicat [15] determinó como índice de hidraulicidad de una cal la siguiente relación:

$$i_v = \frac{SiO_2 + Al_2O_3}{CaO} \quad (1)$$

Se consideran cales aéreas las cales cuyo índice sea menor de 0,1 e hidráulicas a las de índice superior a 0,1.

Con los datos de la Tabla 2, el índice de Vicat para la cal aérea es:

$$i_v = \frac{3,98 + 1,42}{87,32} = 0,06$$

Con los datos de la Tabla 3, el índice de Vicat para la cal hidráulica es:

$$i_v = \frac{10,2 + 1,5}{75,1} = 0,15$$

**Tabla 2.** Composición química de la cal aérea**Table 2.** Chemical composition of the aerial lime

Compuesto	% en peso
CaO	87,32
SiO <sub>2</sub>	3,98
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,42
MgO	0,60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,07
PPC	4,13
Reactividad	351

**Tabla 3.** Composición química de la cal hidráulica**Table 3.** Chemical composition of the hydraulic lime

Compuesto	% en peso
CaO	75,1
SiO <sub>2</sub>	10,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,5
MgO	0,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,5
PPC	5,25
Reactividad	286

## 3. DISEÑO EXPERIMENTAL

Para el desarrollo del presente proyecto se utilizó un diseño experimental del tipo factorial 2<sup>3</sup>, que se utiliza con frecuencia en las primeras etapas de experimentación para detectar los factores que son candidatos potenciales para una investigación mas detallada [16]. El tratamiento factorial diseñado consistió en tres factores con dos niveles cada uno: presión de conformado (A), granulometría de la escoria (B) y tiempo de fraguado al ambiente (C). Dejando constante la humedad, tiempo de mezclado, la temperatura y tiempo de secado de las probetas, la presión y permanencia de las probetas en el autoclave [17, 23]. En la Tabla 4 se muestran las 8 combinaciones con tres repeticiones cada una.

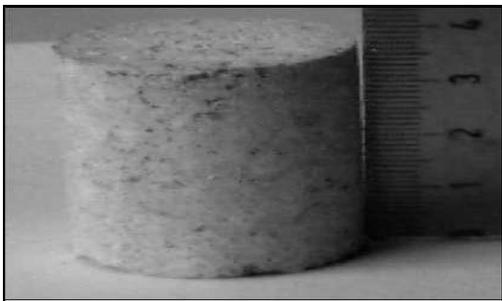
Tipos de Mezcla: Las mezclas que se evaluaron fueron cinco (5): Mezcla 1: 10% cal y 90% escoria; Mezcla 2: 20% cal y 80% escoria; Mezcla 3: 30% cal y 70% escoria; Mezcla 4: 40% cal y 60% escoria y por último Mezcla 5: 50% cal y 50% escoria.

**Tabla 4.** Diseño experimental tipo factorial  $2^3$   
**Table 4.** Experimental design factorial type  $2^3$

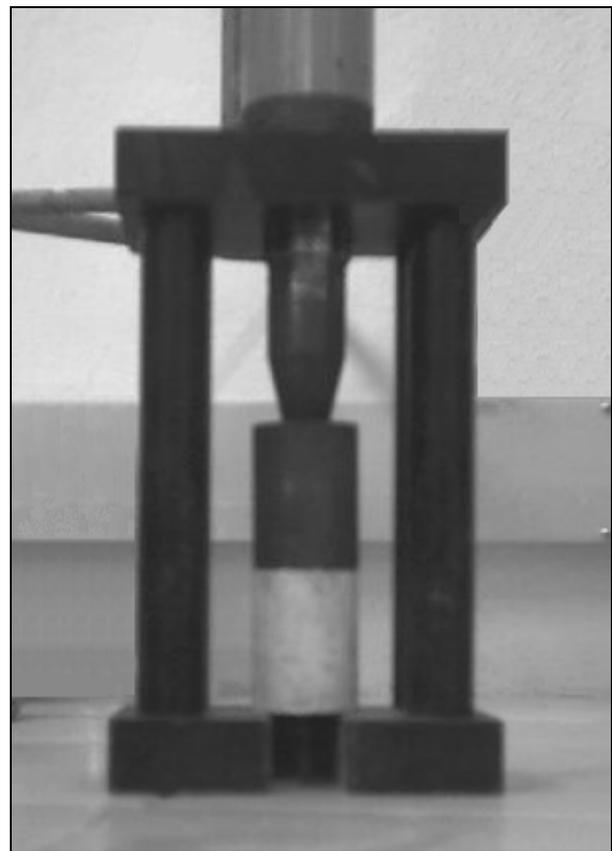
Tratamiento	A	B	C
	Presión de Conformado [Kgf/cm <sup>2</sup> ]	Granulometría Escoria	Tiempo fraguado al Ambiente [días]
1, 2 y 3	200	Fina	10
4, 5 y 6	300	Fina	10
7, 8 y 9	200	Gruesa	10
10, 11 y 12	300	Gruesa	10
13, 14 y 15	200	Fina	20
16, 17 y 18	300	Fina	20
19, 20 y 21	200	Gruesa	20
22, 23 y 24	300	Gruesa	20

### 3.1 Fabricación del Ladrillo

Dentro del proceso de fabricación y con base en estudios previos [17, 18, 23] las probetas de las mezclas se secaron a una temperatura de 50°C, con un tiempo de mezclado de 10 minutos, un tiempo de secado al aire antes de introducirlas en la autoclave de 2 horas y un tiempo de fraguado en autoclave de 24 horas a una presión de 2,7 kgf/cm<sup>2</sup>. Las probetas fabricadas para ensayar poseen forma cilíndrica con un diámetro de 1 pulgada y una altura alrededor de 3,5 cm, como se observa en la Figura 2. Todas las probetas se ensayaron con respecto a la resistencia a la compresión normal (con base en la NTC 922) [12, 13], la prensa utilizada (prensa hidráulica con sensibilidad de  $\pm 1\%$  (kgf/cm<sup>2</sup>)) para los ensayos de compresión se observa en la Figura 3.



**Figura 2.** Forma y tamaño de las probetas  
**Figure 2.** Form and size of the samples



**Figura 3.** Prensa y probeta para el ensayo de compresión  
**Figure 3.** Press and sample for the compression test

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Evaluación de los Efectos Factoriales

Las letras mayúsculas *A*, *B* y *C* representan los factores y la etiqueta de “Tratamiento” usa las

letras minúsculas correspondientes *a*, *b* y *c*. La letra minúscula está presente si el factor está en el nivel 1, de lo contrario, el factor tiene el nivel 0. La etiqueta de tratamiento es “(1)” si todos los factores están en el nivel 0, (Ver Tabla 5).

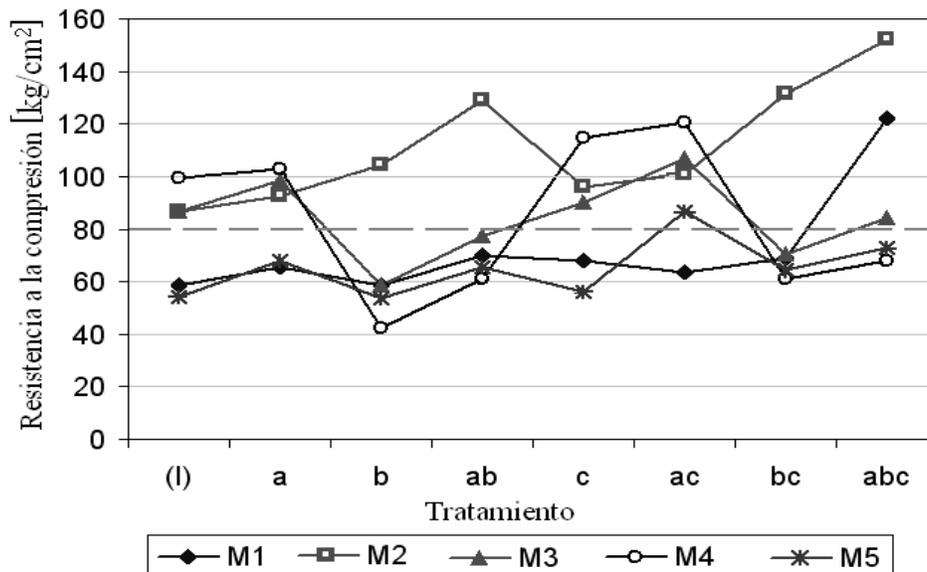
**Tabla 5.** Etiquetas de tratamiento para los ensayos  
**Table 5.** Labels of treatment for the tests

Tratamiento	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	Presión de Conformado [kgf/cm <sup>2</sup> ]	Granulometría de la Escoria	Tiempo fraguado al ambiente [días]
(1)	0	0	0	200	Fina	10
<i>a</i>	1	0	0	300	Fina	10
<i>b</i>	0	1	0	200	Gruesa	10
<i>ab</i>	1	1	0	300	Gruesa	10
<i>c</i>	0	0	1	200	Fina	20
<i>ac</i>	1	0	1	300	Fina	20
<i>bc</i>	0	1	1	200	Gruesa	20
<i>abc</i>	1	1	1	300	Gruesa	20

### 4.2 Resistencia a la Compresión

La Figura 4 presenta los resultados de los 5 tipos de mezcla que se realizaron en el trabajo. Los datos de resistencia a la compresión corresponden al valor promedio de tres probetas

de ensayo. Con base en la NTC-922 los ladrillos sílico-calcareos ensayados Tipo II deben cumplir con una resistencia a la compresión mínima de 80 kgf/cm<sup>2</sup> y el promedio para cinco unidades es 100 Kg/cm<sup>2</sup>[12].



**Figura 4.** Resultados del ensayo de compresión de las probetas de las mezclas en función del tratamiento. **M1** mezcla 1, **M2** mezcla 2; **M3** mezcla 3; **M4** mezcla 4 y **M5** mezcla 5  
**Figure 4.** Results of the strength test of the samples of the mixtures versus the treatment. **M1** mixes 1, **M2** mixes 2; **M3** mixes 3; **M4** mixes 4 y **M5** mixes 5

Como se observa en la figura anterior las mezclas M1 (10% cal) y M5 (50 % cal) tienen por lo menos un tratamiento (no el mismo) que entrega un valor mínimo que cumple con la NTC 922. Las mezclas M3 y M4 (30% y 40% de cal respectivamente) entregan cuatro tratamientos iguales que los sitúan dentro de la norma. La mezcla con 20% de cal (M2) está ubicada dentro de la norma para todos los tratamientos, convirtiéndose así en la mezcla que entrega los mejores resultados con respecto a la resistencia a la compresión. En general se podría observar que la mezcla al 20% de cal, la escoria actúa como agregado mientras que la cal actúa como cementante.

### 4.3 Análisis por Variables

La presión de conformado alta es un factor que mejora la resistencia a la compresión en 3 de las cuatro mezclas ensayadas, esto pasa tal vez por que mejora las reacciones sólido-sólido que se pueden encontrar en el momento de endurecimiento de la mezcla, debido a la cercanía relativa de los reactantes. La granulometría gruesa, por el contrario, es un factor que disminuye la resistencia a la compresión, pues se observa que afecta de forma negativa en 3 de los cuatro tratamientos en donde se aplica, lo anterior es posible debido a que el área específica de un material fino es mayor que un material grueso y también las partículas se pueden distribuir más uniformemente entre la matriz. El tercer factor, tiempo de fraguado, no tiene una influencia muy importante como tratamiento, debido al corto tiempo que se dejaron fraguar.

### 4.4 Ensayos Complementarios

Otros ensayos realizados fueron el de inmersión en agua durante 24 horas y ebullición durante 5 horas [12], los cuales se pueden apreciar en la Tabla 6. Se observan datos sólo en relación a la presión de conformado porque las otras variables (granulometría de la escoria y tiempo de fraguado) se escogieron con base en la mejor respuesta en cuanto a la resistencia a la compresión. Cada dato se obtuvo del promedio de 2 probetas.

**Tabla 6.** Resultados de ensayos complementarios

**Table 6.** Results of complementary tests

Tipo de Mezcla	Presión de Conformado [kgf/cm <sup>2</sup> ]	% de Absorción
Mezcla 1	200	9,48
	300	5,19
Mezcla 2	200	13,53
	300	7,35
Mezcla 3	200	20,01
	300	18,41
Mezcla 4	200	20,04
	300	17,86
Mezcla 5	200	21,27
	300	16,59

Recordando que según la NTC 922, la máxima absorción para ladrillo perforado (que no es nuestro caso, pero la norma sólo habla de este tipo de unidad) la máxima absorción de agua debe ser de 20%. Como se observa en la anterior tabla, sólo 3 tipos de probeta se alejan levemente de la norma, pero la Mezcla 2, que en los ensayos de compresión entregó los mejores resultados, cumple cabalmente con dicha norma.

Es de observarse que a menor cantidad de cal el porcentaje de absorción de agua disminuye, esto debido tal vez a que existe cal que necesita agua para reaccionar y convertirse a hidróxido. También se observa que a mayor presión de conformado, la absorción de agua igualmente disminuye, esto sucede por que los espacios interparticulares que quedan en la probeta son más pequeños con un compactado mayor que con uno menor.

El mecanismo teórico de endurecimiento consiste en que la sílice presente en el agregado y la cal reaccionan químicamente produciendo silicatos cálcicos hidratados (no se cuantificaron en este trabajo), que constituyen un cementante que le da consistencia a las piezas [19, 20, 21, 22].

Todas las mezclas y ensayos que se realizaron utilizando cal siderúrgica no fueron aptos para cumplir con al NTC 922, tal vez por su alto contenido de CaO [19, 20]. Por el contrario la cal agro-industrial, cal de bajo precio por su poca

reactividad y relativamente altos contenidos de impurezas (diferentes tipos de óxidos), fue el subproducto que entrego los mejores resultados, por ejemplo, la mezcla 80% escoria – 20 % cal entregó una resistencia a la compresión promedio de 111,6 kgf/cm<sup>2</sup>, con un valor máximo de 152,3 kgf/cm<sup>2</sup>.

## 5. CONCLUSIONES

Es posible la fabricación de probetas hechas con escoria de Alto Horno granulada y cal agro-industrial que cumplan con la norma NTC 922, lo cual indica que podrían ser utilizadas como elementos para mampostería estructural. Debido a que los materiales anteriores son subproductos de procesos industriales, su costo es relativamente bajo, comparado con el costo de fabricación de ladrillos convencionales (hechos de arcilla o cemento con agregado).

Las probetas fabricadas con la mezcla 80% escoria 20% cal, entregaron todas un valor de resistencia a la compresión sobre 80 kgf/cm<sup>2</sup>. La probeta que recibió un tratamiento de prensado a 300 kgf/cm<sup>2</sup>, tiempo de fraguado de 20 días y una granulometría de escoria gruesa obtuvo un valor máximo de resistencia a la compresión de 152,3 kgf/cm<sup>2</sup> y una absorción de agua del 8,33%. Con base en lo anterior, esta mezcla cumple completamente con la NTC 922, lo cual la concibe como la mezcla candidata para realizar futuros ensayos pero directamente con ladrillos para mampostería estructural.

## REFERENCIAS

[1] MARTIRENA, FERNANDO; SEIJO, PEDRO; KENNAS, SMAIL; MACHADO, IVAN Y GONZÁLEZ, RAUL. Waste to Energy Technologies Targeting the Poor. The Cuba Case Study. World Renewable Energy Congreso. Koeln, 29 June- 5 July 2002.

[2] BOADA ORTIZ, ALEJANDRO. El Reciclaje, Una Herramienta no un Concepto. Reflexiones Sobre la Sostenibilidad. Universidad Externado de Colombia. Centro de Gestión Ambiental. Bogotá. 2003.

[3] BIBIKO UMWELTTECHNIK & BERATUNG GMBH. Concepto de Reciclado Reduce Costes de Manipulación en la Planta de Elementos Prefabricados. Tecnología del hormigón. PHI – Planta de Hormigón Internacional – 2. 2007.

[4] HINCAPIÉ, ÁNGELA Y AGUJA, ELISA. Agregado Reciclado para Morteros. Revista Universidad EAFIT. Vol. 39. No. 132, 76-89, 45-50, 2003.

[5] ZEGA, C. y CASUCCIO, M. Evaluación de Testigos de Pavimento Elaborado con Hormigón Reciclado. Revista Ciencia y Tecnología del Hormigón. N° 13,45-50, 2006. Argentina.

[6] BARRA DE OLIVEIRA, MARILDA. Estudio de la Durabilidad del Hormigón de Árido Reciclado en su Aplicación como Hormigón Armado. Trabajo de tesis de doctorado. Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Ingeniería de la Construcción. España. 1996.

[7] YEPES RIVERA, LUZ MARINA. Estudio de la Coloración de Ladrillos Tradicionales con Adición de Óxidos y en Monococción. Tesis de grado (Magister en Ingeniería). Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 2006.

[8] ALAGUNA, GERMAN y MOGOLLÓN, VÍCTOR. Análisis de una Edificación Construida por el Sistema de Mampostería Estructural. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, 1994.

[9] JARAMILLO JIMÉNEZ, JOSÉ OSCAR. Ingeniería Estructura I. Una Introducción a las Estructuras. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Departamento de Ingeniería Civil. Educación Virtual, sitio: <http://www.virtual.unal.edu.co>. [Citado el 1 de septiembre de 2005].

[10] GUTIÉRREZ JUNCO, OSCAR JAVIER. Mampostería Estructural. Orión Editores Ltda. Bogotá, 2004.

- [11] CASTELLANOS GAMBOA, José Mauricio y SUÁREZ MORA, Alexander. Contribución de la pega vertical en mampostería estructural a la respuesta del muro ante sollicitaciones horizontales. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Nacional de Colombia. Santa Fe de Bogotá, 2001.
- [12] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Ladrillos Sílico Calcáreos. Normas Técnicas para el Sector de la Construcción. Bogotá, 1994. ICONTEC (NTC 922).
- [13] BARRIOS, LUIS. Manual de Ensayos de Laboratorio Mampostería Estructural. Tesis de grado (ingeniero Civil). Universidad de los Andes. Bogotá, 1998.
- [14] MCLEAN, Alexander. The science and technology of blast furnace slags. En: AISI. An intensive course: blast furnace ironmaking. Volume two. McMaster University. Hamilton, Ontario, Canada. June 2004.
- [15] ARREDONDO VERDÚ, FRANCISCO. Índice de Materiales. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid, 1965.
- [16] KUEHL, ROBERT. Diseño de Experimentos "Principios Estadísticos de Diseño y Análisis de Investigación". Mexico: Thomson-Learning, 2000.
- [17] LEÓN, NILSON ARIEL. Evaluación del comportamiento de la Escoria de Alto Horno y Cal en la Fabricación de Unidades Sílico-calcáreas para Mampostería en la Empresa Suminco. Trabajo de tesis (Ingeniero Metalúrgico). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja, 2005.
- [18] AZCONEGUI MORÁN, FRANCISCO; MARTÍN, MÓNICA; CASCOS, PEDRO Y DÍAZ, ALBERTO. Guía Práctica de la Cal y el Estuco. Centro de los Oficios de León. León – España, 1998.
- [19] INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM. Manual de Tecnología del Concreto. México: Editorial Limusa, 262, 1994.
- [20] MAYOR GONZÁLEZ, Gerardo. Materiales de Construcción. McGraw-Hill, Colombia, 210 1974.
- [21] SERNA, PEDRO y PELUFO, MARIA. Cementos. Departamento Ingeniería de la Construcción, Universidad Politécnica de Valencia. 1992.
- [22] ENGINEERED MATERIALS HANDBOOK. Ceramics and Glasses. ASM publication. Vol 4, USA, 1991.
- [23] OTTO, GRAF. Hormigón gaseoso, hormigón espumoso, hormigón a cal liviano. Ediciones Librería del Colegio, Buenos Aires. 96, 1951.