



Nova Scientia

E-ISSN: 2007-0705

nova_scientia@delasalle.edu.mx

Universidad De La Salle Bajío

México

Roux Gutiérrez, Rubén Salvador; Espuna Mujica, José Adán
El Hidróxido de Calcio y los bloques de tierra comprimida, alternativa sostenible de
construcción
Nova Scientia, vol. 5, núm. 9, 2012, pp. 176-202
Universidad De La Salle Bajío
León, Guanajuato, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=203324683011>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

Revista Electrónica Nova Scientia

El Hidróxido de Calcio y los bloques de tierra comprimida, alternativa sostenible de construcción

The Calcium Hydroxide and compressed earth blocks, an alternative and sustainable construction

**Rubén Salvador Roux Gutiérrez¹ y José Adán Espuna
Mujica¹**

¹Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Tampico

México

Dr. Rubén Salvador Roux Gutiérrez. E-mail: rroux33@hotmail.com, José Adán Espuna Mujica. E-mail: jespuna@uat.edu.mx

Resumen

En la actualidad, en nuestro país se hace mención a que existen una serie de problemas con los programas de vivienda, aún cuando se ha reducido el déficit de vivienda o que se han construido cada año más viviendas en beneficio de las personas de bajos ingresos. Topelson (2011) el presente artículo describe un estudio sobre una alternativa sustentable de edificación y a la vez pretende demostrar las ventajas del uso del hidróxido de cal y los bloques de tierra comprimida (BTC), para la edificación de vivienda y así poder reducir las emisiones de CO₂ emitidas por los procesos constructivos convencionales

El presente artículo trata dos materiales elementales en los procesos constructivos de las viviendas, por un lado se realizó el estudio químico de los morteros cal – arena que se utilizan para el pegado de los mampuestos y los revoques, con la finalidad de determinar la absorción de CO₂ y por otra parte se hace el estudio mecánicos de un material alternativo para el uso de muros de carga como son los Bloques de Tierra Comprimida estabilizados con cal, por último se hace un comparativo entre estos materiales alternativos y los convencionales con relación a las emisiones de CO₂.

Palabras clave: vivienda, Hidróxido de calcio, bloque de tierra comprimida y sustentabilidad

Recepción: 01-02-2012

Aceptación: 26-10-2012

Abstract

Actually, in our country, refers to a series of problems with housing programmes, even when has been reduced the housing's deficit or that have been built every year more housing for the benefit of people on low incomes. Topelson (2011) mentions that "...We must encourage construction in intraurbanas areas, where there is an installed capacity for the provision of services, where the

prospects for construction of social fabric and economic opportunities are more viable, orienting to buyers in the criteria to choose most suitable housing for your family"

Considered constructive systems used in homes that are in use in the Tamaulipas' South area, are designed without adequately taking climate, promoting hygrothermal discomfort conditions or increase demand for energy. The results show that the use of conventional materials in the housing is poor and that design can be improved to make the homes best suited to the climate where are built with some alternative materials, as it is the case of mortars with calcium hydroxide in replacement of the cement and blocks of compressed earth rather than concrete blocks or annealing mud bricks.

Keywords: housing, Calcium Hydroxide, compressed earth block and sustainability

Introducción:

La construcción de viviendas en nuestro país al igual que otros países de Latino América es una prioridad que ha llevado a los gobiernos y a la iniciativa privada a solo solucionar un aspecto de esta: *el de la cantidad*, lo que ha provocado que las viviendas que se edifican en México, sean de mala calidad y altamente costosas en su valor energético y por ende en la producción de emisiones de Dióxido de Carbono (CO_2). Se espera que en los próximos 39 años la necesidad de vivienda sea de 43.2 millones de viviendas (Fundación Cidoc y Sociedad Hipotecaria Federal, 2011). En el sentido de la calidad de la vivienda se puede decir que este rubro en el período de 2000 a 2010 fue de 4.6 millones de vivienda, que fueron abandonadas, por cuestiones de calidad en diferentes ordenes (Fundación Cidoc y Sociedad Hipotecaria Federal, 2011).

En cuanto a los materiales de construcción que se utilizan actualmente en las viviendas que se producen a nivel nacional el 86.9% de las viviendas se construyen con bloques de concreto, ladrillo recocido en los muros y el 71.6 se construyen con techos de concreto armado o lámina metálica (INEGI, 2011). Analizando los insumos más comunes que se utilizan para edificar una vivienda de interés social de 60.20 m^2 en México se puede obtener la siguiente tabla de insumos:

| Material | Cantidad | Unidad |
|-------------------|----------|--------------|
| Concreto | 11.60 | m^3 |
| Acero | 0.73 | Ton |
| Cemento | 2.00 | Ton |
| Block de Concreto | 1,127.00 | Pzas. |

Tabla 1. Cantidad de insumos en promedio en viviendas de interés social

Con la información anterior podemos deducir las emisiones de CO_2 emitidas por los mencionados materiales de construcción y los cuales se indican en la tabla No. 2

| Material | Cantidad | Emisiones de CO_2 por unidad | Total de emisiones de CO_2 |
|-------------------|------------------------|--|-------------------------------------|
| Concreto | 11.60 m^3 | $0.25 \text{ Ton}/\text{m}^3$ ⁽³⁾ | 2.90 Ton |
| Acero | 0.73 Ton | $2.80 \text{ Ton}/\text{Ton}$ ⁽²⁾ | 2.04 Ton |
| Cemento | 2.00 Ton | $0.00041 \text{ Ton}/\text{Ton}$ ⁽²⁾ | 0.00082 Ton |
| Block de Concreto | $1,127.00 \text{ Pza}$ | $0.000693 \text{ Ton}/\text{Pza}$ ⁽⁴⁾ | 0.78101 Ton |

| | |
|------------------|--------------------|
| T O T A L | 5.72183 Ton |
|------------------|--------------------|

Tabla 2 Toneladas de emisores de CO₂ de los materiales típicos de una vivienda de Interés Social en México

- 1) (Howland Albear & Jiménez de la Fe, 2010)
- 2) (Argüello Méndez & Cuchí Burgos, enero-marzo 2008)
- 3) (Alvaréz, 2010).
- 4) (Chargoy Amador, Rosas Millán, & Téllez Muradás, 2009)

En cuanto al consumo energético se puede determinar su gasto según la tabla No.3

| Material | Cantidad | Consumo energético por unidad | Total de Consumo Energético |
|-------------------|----------------------|--|------------------------------------|
| Concreto | 11.60 m ³ | 3.23 KWh/m ³ ⁽¹⁾ | 37.47KWh |
| Acero | 0.73 Ton | 9.72 KWh/Ton ⁽²⁾ | 7.09KWh |
| Cemento | 2.00 Ton | 4.63 KWh/ Ton ⁽²⁾ | 9.26 KWh |
| Block de Concreto | 1,127.00 Pza | 4.12 KWh/Pza ⁽³⁾ | 4,643.24 KWh |
| T O T A L | | | 4,697.06 KWh |

Tabla 3. KWh gastado por los materiales típicos de una vivienda de Interés Social en México

- 1) (Howland Albear & Jiménez de la Fe, 2010)
- 2) (Argüello Méndez & Cuchí Burgos, enero-marzo 2008)
- 3) (Alvaréz, 2010).

En base a los resultados obtenidos en las tablas No. 2 y 3, y de acuerdo a la demanda de vivienda en los próximos 39 años se puede deducir que las emisiones de CO₂ serán del orden de 313.66 millones de toneladas, o sea 8.04 millones de toneladas de CO₂ por año si fuera uniforme la producción de vivienda y que el consumo energético para producir esos materiales será de 202,912.99 millones de KWh, es decir 5,202.90 millones de KWh por año. Estas cifras revelan la necesidad de buscar alternativas de construcción más sustentables, una propuesta sería utilizar materiales de tierra en específico los denominados Bloques de Tierra Comprimida (BTC) estabilizados con hidróxido de calcio y los morteros de cal – arena, con lo que se reducirían estas cifras de emisiones de CO₂ y consumo energético, además del beneficio que ofrece el hidróxido de calcio el cual para realizar su proceso de fraguado necesita de la carbonatación que es la absorción de CO₂ de la atmósfera, así mismo se hace necesario demostrar que este material es de una adecuada calidad para edificar una vivienda, a continuación se presentan los resultados de los

experimentos realizados a los BTC estabilizados con Hidróxido de Calcio y las pruebas al Hidróxido de Calcio para determinar la absorción de CO₂

Materiales y Métodos

Método para la carbonatación del hidróxido de calcio:

Materiales y reactivos

- El Análisis de carbonato de calcio se realiza de acuerdo a la norma NMX-AA-036-SCFI-2001
- **Resultados:** Los resultados obtenidos de la carbonatación del hidróxido de calcio son los siguientes:

Modelo Teórico

Se desarrollaron las ecuaciones para determinar la conversión de hidróxido de calcio en carbonato de calcio de acuerdo a la estequiometría conocida, que el óxido de calcio (cal viva) reacciona con agua formando hidróxido de calcio (cal apagada) por medio de la siguiente reacción:

1

donde con los pesos fórmula y moleculares se pueden realizar los cálculos de producto obtenido a partir de cierta cantidad de reactivo inicial.

Cálculo del agua necesaria.

El agua necesaria para que la reacción se lleve a cabo con cierta cantidad de CaO está dada por la relación:

$$m_{H_2O} = \frac{9}{28} m_{CaO}$$

donde:

m_{H_2O} Es la masa del agua en gramos necesaria para producir la reacción

m_{CaO} Es la masa del óxido de calcio inicial en gramos

9/28 Constante que relaciona las masas del agua y del óxido de calcio

Cálculo del hidróxido de calcio formado.

El hidróxido de calcio que se formará a partir de una cantidad inicial de óxido de calcio está dada por la siguiente relación:

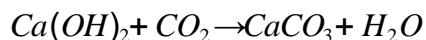
$$m_{Ca(OH)_2} = \frac{37}{28} m_{CaO}$$

donde:

- $m_{Ca(OH)_2}$ Es la masa del hidróxido de calcio en gramos que se producirá
- m_{CaO} Es la masa del óxido de calcio inicial en gramos
- 37/28 Constante que relaciona las masas del óxido e hidróxido de calcio

Carbonato de calcio formado.

El hidróxido de calcio formado se puede convertir en carbonato de calcio si se expone al CO₂ mediante la siguiente reacción:



Y de forma similar se pueden realizar cálculos a partir de una cantidad de hidróxido de calcio inicial

Cálculo del dióxido de carbono.

El dióxido de carbono que reaccionará con el hidróxido de calcio se calcula así:

$$m_{CO_2} = \frac{22}{37} m_{Ca(OH)_2}$$

donde:

- m_{CO_2} Es la masa del dióxido de carbono que se necesita para llevar a cabo la reacción, en gramos
- $Ca(OH)_2$ Es la masa del hidróxido de calcio inicial en gramos
- 22/37 Constante que relaciona las masas del dióxido de carbono y del hidróxido de calcio

Cálculo del carbonato de calcio.

El carbonato de calcio que se producirá al reaccionar el hidróxido de calcio se calcula así:

$$m_{CaCO_3} = \frac{50}{37} m_{Ca(OH)_2}$$

donde:

- m_{CaCO_3} Es la masa del carbonato de calcio que se producirá, en gramos
- $Ca(OH)_2$ Es la masa del hidróxido de calcio inicial en gramos
- 50/37 Constante que relaciona las masas del carbonato de calcio y del hidróxido de calcio

Cálculo del agua formada.

El agua que se producirá como subproducto se determina con la siguiente relación:

$$m_{H_2O} = \frac{9}{37} m_{Ca(OH)_2}$$

donde:

- m_{H_2O} Es la masa agua que se producirá, en gramos
- $Ca(OH)_2$ Es la masa del hidróxido de calcio inicial en gramos
- 9/37 Constante que relaciona las masas del agua y del hidróxido de calcio

Cálculo con porcentajes de hidróxido de calcio.

Los gramos de $Ca(OH)_2$ presentes en una muestra se pueden calcular a partir de la concentración del hidróxido (en porcentaje) a partir de la siguiente relación:

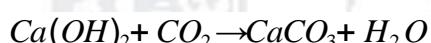
$$m_{Ca(OH)_2} = \frac{P_{Ca(OH)_2} m_{muestra}}{100}$$

donde:

- $m_{Ca(OH)_2}$ Es la masa de hidróxido de calcio, en gramos
- $P_{Ca(OH)_2}$ Es el porcentaje de hidróxido de calcio presente en la muestra
- $m_{muestra}$ Es la masa de la muestra en gramos

Cálculo de la conversión de hidróxido de calcio debido a dióxido de carbono a presión

La ecuación es:



Si se supone que los gases se comportan como ideales y que la temperatura inicial es igual a la final y lo bastante baja como para que la presión de vapor se considere despreciable en comparación con la presión del sistema, entonces la caída de presión es directamente proporcional al consumo de moles de CO₂:

$$\Delta n = \frac{V}{R} \left(\frac{P_f}{T_f} - \frac{P_i}{T_i} \right)$$

donde:

Δn = cambio en el número de moles de CO₂

V = volumen total

R = constante de los gases ideales

$P_{i,f}$ = presión inicial, final

$T_{i,f}$ = temperatura inicial, final

entonces:

$$y = \frac{M \Delta n}{m_i}$$

donde:

y = conversión de hidróxido de calcio

M = peso fórmula del hidróxido de calcio

m_i = masa inicial del hidróxido de calcio

La primera ecuación puede refinarse utilizando la ecuación de Van der Waals:

$$P_f - P_i = \frac{n_f RT_f}{V - n_f b} - \frac{n_i RT_i}{V - n_i b} - a \left(\frac{n_f}{V} \right)^2 + a \left(\frac{n_i}{V} \right)^2$$

donde a y b son las constantes de Van der Waals para el dióxido de carbono. Además, n_i es conocida, determinable de la ecuación:

$$P_i = \frac{n_i RT_i}{V - n_i b} - a \left(\frac{n_i}{V} \right)^2$$

al ser conocidas la temperatura, volumen y presión.

Por otro lado, n_f se debe determinar por algún método numérico, utilizando como base inicial el valor estimado con la ecuación de los gases ideales:

$$n_f = \frac{P_f V}{R T_f}$$

no olvidando que $\Delta n = n_i - n_f$.

Resultados teóricos y experimentales

Los resultados teóricos de contenido neto de hidróxido de calcio se presentan en la tabla siguiente.

| Nombre | Relación | | |
|-----------|----------|--------|----------|
| | Ca(OH)2 | Sílice | %Ca(OH)2 |
| Muestra 1 | 1 : 1 | 46.0 | |
| Muestra 2 | 1 : 2 | 30.6 | |
| Muestra 3 | 1 : 3 | 23 | |
| Muestra 4 | 1 : 4 | 18.4 | |
| Muestra 5 | 1 : 5 | 15.4 | |

Tabla 4. Porcentajes de hidróxido de calcio en muestras preparadas (núcleos)

Los cálculos muestran el contenido de hidróxido de calcio en porcentaje peso/peso, tomando en cuenta que el hidróxido de calcio comercial utilizado se encuentra en una pureza del 85%. A partir de estos valores se calculó el contenido de compuestos, sin tomar en cuenta el agua, que se encuentra contenida en cada muestra relacionada en la tabla 5.

| | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 | Muestra 4 | Muestra 5 |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| % de Ca(OH)2 | 46.0 | 30.6 | 23.0 | 18.4 | 15.4 |
| % de arena | 50.0 | 66.7 | 75.0 | 80.0 | 83.3 |
| % Otros | 4.0 | 2.7 | 2.0 | 1.6 | 1.3 |

Tabla 5. Contenido de componentes en 100g de muestra, sin agua.

Utilizando el modelo teórico se presenta el contenido de dióxido de carbono, en gramos, que se producirá, los resultados se muestran en la tabla 6.

| | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 | Muestra 4 | Muestra 5 |
|--|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| g CaCO₃ máx. posible | 62.2 | 41.4 | 31.1 | 24.9 | 20.8 |
| g de CO₂ consumido | 27.4 | 18.2 | 13.7 | 10.9 | 9.2 |
| Litros CO₂ puro | 15.2 | 10.1 | 7.6 | 6.1 | 5.1 |
| Aire (m³) | 152.0 | 101.1 | 76.0 | 60.8 | 50.9 |
| g de H₂O formado | 11.2 | 7.4 | 5.6 | 4.5 | 3.7 |

Tabla 6. Dióxido de carbono consumido por conversión total del hidróxido de calcio presente en carbonato de calcio.

Puede observarse que 100 gramos de muestra pueden eliminar el dióxido de carbono presente en 152 m³ de aire de la atmósfera, considerando que tiene una concentración de 0.01% de este gas y a presión y temperatura normal (25°C a 1atm). Puede observarse que 1 tonelada de cada muestra incrementará 10.000 veces el tratamiento de aire en la atmósfera, en la tabla 4 se muestra la cantidad necesaria de aire con 0.01% de carbono requerida para la conversión total de 1 tonelada de muestra.

| | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 | Muestra 4 | Muestra 5 |
|-----------------------------|------------------|------------------|----------------|----------------|----------------|
| Aire (m³) | 1.520.000 | 1.010.000 | 760.000 | 600.000 | 500.000 |

Tabla 7. Aire tratado debido a dióxido de carbono consumido por conversión total del hidróxido de calcio presente en carbonato de calcio.

Se realizó el procedimiento experimental para determinar el contenido de Ca(OH)₂ en muestras preparadas en laboratorio que se dejaron en contacto con aire de la atmósfera y determinar su conversión en carbonato de calcio hasta en 10 días. Los resultados se presentan en la tabla 8.

| Proporción | DIA | | | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| Muestra 1 | 44.29 | 49.00 | 48.00 | 45.32 | 57.35 |
| Muestra 2 | 31.90 | 34.14 | 32.16 | 35.20 | 39.54 |

| | | | | | |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Muestra 3 | 25.11 | 29.68 | 26.84 | 26.07 | 18.75 |
| Muestra 4 | 16.89 | 21.58 | 19.51 | 19.21 | 14.10 |
| Muestra 5 | 16.46 | 15.70 | 11.68 | 11.93 | 9.83 |

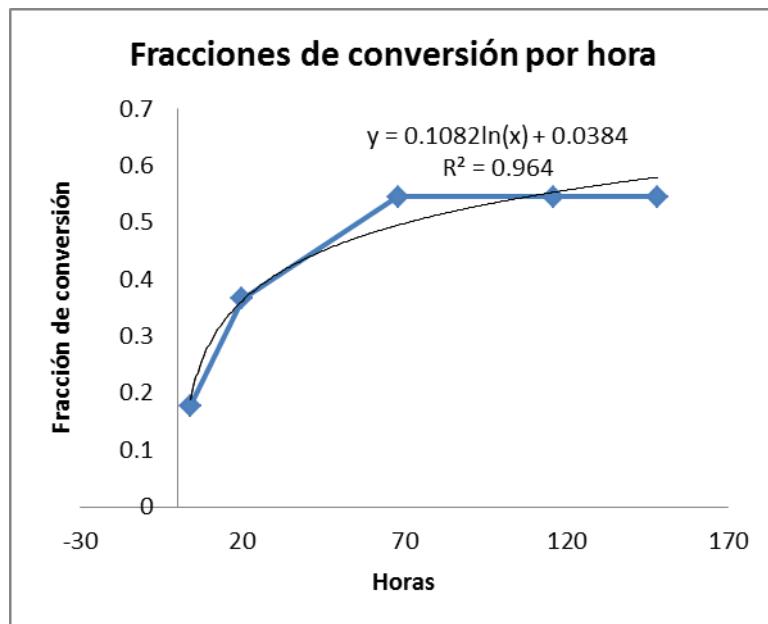
Tabla 8. Porciones experimentales de hidróxido de calcio en muestras preparadas (núcleos) después de su interacción con la atmósfera en días

Los resultados experimentales presentan desviaciones con el método y una incertidumbre del 3%. Comparando los resultados con el análisis teórico de la tabla 8 se encuentra que no puede identificarse una conversión significativa del hidróxido de calcio en carbonato de calcio en un periodo de 10 días. Los experimentos desarrollados con el uso del dispositivo de alta presión se presentan en la tabla 9.

| Muestra 1A | |
|-----------------------|-------------------|
| Tiempo (h) | Conversión |
| 4 | 0.18 |
| 20 | 0.37 |
| 68 | 0.55 |
| 116 | 0.55 |
| 148 | 0.55 |

| Muestra 1B | |
|-----------------------|-------------------|
| Tiempo (h) | Conversión |
| 8 | 0.17 |
| 24 | 0.40 |
| 69 | 0.53 |
| 116 | 0.53 |
| 142 | 0.53 |

Tabla 9. Variación de presión por contacto de CO₂ 99% de pureza con muestra de mortero 1:1 a 120lb de presión inicial.



Gráfica 1.- Fracciones de conversión por hora para la muestra A.

Puede observarse, de acuerdo a la tabla 10, que existe una estabilización en la conversión de hidróxido de calcio a carbonato de calcio al quinto día aproximadamente, esto a alta presión.

De esta relación puede calcularse la ecuación de velocidad de reacción, que en la gráfica logarítmica (gráfica 1) “x” es el valor del tiempo. A partir de este tipo de datos experimentales se presenta a continuación el cálculo de velocidad de reacción para el caso de exposición ambiental.

Cinética de reacción

Como se ha mencionado anteriormente, sabemos que la ecuación de conversión de hidróxido de calcio corresponde a:



La ecuación que interesa para fines cinéticos es:



Asumiendo que la reacción es elemental:

$$\frac{d[\text{OH}]}{dt} = -k[\text{OH}]^2[\text{CO}_2]$$

Cambiando concentración de CO₂ a densidad molar (se usa esta en lugar de la presión parcial, porque a altas presiones, como las de los experimentos, hay una desviación de la idealidad):

$$\frac{d[OH^-]}{dt} = -k\bar{D}[OH^-]^2$$

donde D es la densidad molar del CO₂. Si la concentración molar inicial de OH⁻ es "x" y "b" es la concentración molar de carbonato formado:

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{k\bar{D}}{2}(b - 2x)^2$$

Como la cantidad del CO₂ se puede considerar constante, por ser mucho mayor que la del hidróxido en el cilindro de prueba (lo que en la atmósfera también puede considerarse igualmente constante)

$$\frac{dx}{dt} = -k_s(b - x)^2$$

donde:

$$k_s = \frac{k\bar{D}}{2}$$

si x(0)= 0, entonces:

$$x = \frac{k_s b^2 t}{2k_s b t + 1}$$

La conversión de hidróxido es:

$$y = \frac{2x}{b}$$

$$y = \frac{2k_s b t}{2k_s b t + 1}$$

donde

$$k_s = \frac{y}{2bt(1-y)}$$

También

$$\frac{1}{(1-y)} = 2k_s b t + 1$$

Esta última ecuación es de carácter lineal para 1/(1-y)

Se analizan ahora dos experimentos con muestra 1:1 dejada un tiempo dentro de un reactor a 30 °C y presión de alrededor de 100 psi de CO₂, los datos experimentales se presentan en la tabla 10 para una estadística de segundo orden y en la tabla 11 para una de primer orden.

De acuerdo a cálculos para una estadística de segundo orden respecto al hidróxido debería comportarse linealmente.

| | t (horas) | 1/ (1- y) | | Estadística |
|-----------|-----------|-----------|-----|-------------|
| Muestra A | 0 | 1.00 | | |
| | 4 | 1.21 | m= | 0.0159 |
| | 20 | 1.58 | b= | 1.130 |
| | 68 | 2.20 | r = | 0.996 |
| | 166 | 3.76 | | |
| | t (horas) | 1/ (1- y) | | |
| Muestra B | 0 | 1.00 | | |
| | 28 | 1.20 | m= | 0.015 |
| | 69 | 2.05 | b= | 0.950 |
| | 142 | 3.24 | r = | 0.989 |
| | 167 | 3.24 | | |

Tabla 10. Datos experimentales para una muestra expuesta a dióxido de carbono a 100psi a una temperatura de 30°C. Estadística de segundo orden

Se examinaron los cálculos para los mismos datos suponiendo una cinética de primer orden, los datos experimentales se muestran en la tabla 11.

$$\frac{dx}{dt} = -k_{s1}(b - 2x)$$

donde :

$$\ln(1 - y) = -k_{s1}t$$

| | t (horas) | ln (1- y) | | Estadística | |
|-----------|-----------|-----------|--|-------------|--------|
| Muestra A | 0 | 0.000 | | | |
| | 4 | -0.190 | | m= | -0.007 |
| | 20 | -0.460 | | b= | -0.180 |
| | 68 | -0.790 | | r = | -0.969 |
| | 166 | -1.320 | | | |
| | | | | | |
| | t (horas) | ln (1- y) | | | |
| Muestra B | 0 | 0.000 | | | |
| | 28 | -0.180 | | m= | -0.008 |
| | 69 | -0.720 | | b= | -0.040 |
| | 142 | -1.180 | | r = | -0.979 |
| | 167 | -1.180 | | | |

Tabla 11. Datos experimentales para una muestra expuesta a dióxido de carbono a 100psi a una temperatura de 30°C. Estadística de primer orden

La cinética de primer orden estadísticamente es inferior.

Por tanto, se acepta la hipótesis de cinética de segundo orden respecto al OH⁻

Se realizaron dos experimentos con muestra 1:1 a 30 °C y 100 y 300 psi de CO₂, por 3 horas.

| Presión (psi) | conversión | k _s | k (que es $\frac{2k_s}{D}$) |
|---------------|------------|----------------|------------------------------|
| 100 | 0.077 | 0.0022 | 1.54E-02 |
| 300 | 0.240 | 0.0081 | 1.80E-02 |

Tabla 12. Datos experimentos con muestra 1:1 a 30 °C y 100 y 300 psi de CO₂, por 3 horas

Como se ve, la conversión (y) y la k_s es el triple en el caso de la presión de 300 respecto a la de 100, esto debe ser porque la cinética respecto al CO₂ es de primer orden, tal cual era la hipótesis. Por lo mismo, la k es prácticamente la misma.

Las unidades de la k son L²/(h mol²). Se calcula suponiendo que la presión del CO₂ en el medio de la reacción es la misma que en medio gaseoso que se encuentra por encima.

Para estimar el tiempo necesario para alcanzar una determinada conversión con una presión de dióxido de carbono diferente, por ejemplo la del aire, se calcula la k_s a partir de la k , segun la fórmula deducida anteriormente:

$$k_s = \frac{k\bar{D}}{2}$$

o también:

$$k_s = \frac{k}{2V}$$

donde V es el volumen molar del CO₂ (la inversa de la densidad molar). La ecuación final es:

$$t = \frac{y}{2k_s b(1-y)}$$

donde (t) es el tiempo que toma la conversión de hidróxido de calcio (y), la concentración molar inicial de OH⁻ es (b) y la (k_s) a es una constante obtenida a partir de la constante de reacción (k).

Conociendo la concentración de CO₂ en la atmósfera como 390 ppm (en volumen), se deduce que el volumen molar es 63750 L/mol, y la k promedio es 1.67 X 10⁻² L²/(h mol²), se puede estimar el tiempo para una muestra de concentración molar b de hidróxido, que es dos veces la concentración formal (de peso fórmula, porque es una sustancia iónica) del hidróxido de calcio .

En la muestra 1:1 probada, el tiempo necesario para llegar a la mitad de conversión, sería de 68 años. Una conversión de 0.9 tomaría 610 años, y para llegar a 0.99, tardaría 6700 años.

Para un mortero 1:2 el tiempo necesario sería de 102 años para llegar a la mitad de la conversión, mientras que para uno de proporción 1:3 sería de 136 años, para 1:4 de 170 años y para 1:5 sería de 204 años.

Con relación a fabricación y realización las pruebas mecánicas de los BTC, se utilizó el siguiente método:

Para la fabricación y prueba de los Bloques de Tierra Comprimida (BTC)

Método de Fabricación de los BTC:

El método de fabricación se inicia con la selección y aptitud del suelo. Al no encontrar un suelo con las características ideales en la zona de estudio, se decidió fabricar uno con la mezcla de una arcilla de baja plasticidad (CL, 60 %) y una arena limosa (40 %), incorporándole 7 % de cal en polvo. La Tabla 13 muestra las proporciones de los diversos materiales para producir 14 bloques de 14 x 29 x 10 cm estabilizados con cal.

| Material | Cantidad | Unidad |
|-----------------------------|----------|--------|
| Arcilla de baja plasticidad | 21.00 | Kg |
| Arena limosa | 23.00 | Kg |
| Agua | 6.00 | Lts. |
| Cal 3% | 1.33 | Kg |
| Cal 5% | 2.22 | Kg |
| Cal 7% | 3.10 | Kg |

Tabla 13. Proporciones de material para la fabricación de los BTC estabilizados con hidróxido de calcio

Una vez obtenida la mezcla con las proporciones antes señaladas se utiliza una prensa manual “Cinva-Ram”, la cual prensa los BTC a una presión de 44.08 Kg/cm², la producción por hora es de 42 BTC utilizando una cuadrilla de 5 obreros, los BTC se deben dejar en reposo 15 días antes de ser ensayados, el secado es al sol.

Método de ensaye a la compresión simple empleado

Máquina de prueba:

Se utilizó una prensa hidráulica marca CONTROLS con una capacidad de 120 toneladas que comple con las especificaciones indicadas en la norma NOM-C-36-1983, así mismo para poder aplicar una carga uniformemente repartida se utilizaron dos placas de acero cuyas dimensiones son de 140 mm de ancho por 290 mm de largo y un espesor de 94.5 mm. Las placas y el especimen de prueba se colocaron en la máquina de prueba haciendo concidir el centroide de la máquina con el centroide del especimen, por último la velocidad de carga de la prueba fue de 90 segundos en todas las pruebas

Cálculos de resultados

Para calcular los resultados se tomó la carga máxima en kilos y se dividió entre el área trasversal de la probeta, siendo ésta la medida total de una sección perpendicular a la dirección de la carga, incluyendo los huecos, a menos de que éstos estuvieran ocupados por porciones de unidades adyacentes.

También se pudo obtener la resistencia a la compresión al área neta, calculándola de la siguiente manera:

$$A_n = A_t - A_h$$

Donde:

A_n = área neta

A_t = área total de la superficie de la carga

A_h = área de los huecos.

Especificaciones

Según la NMX-C-6-1976, la resistencia a la compresión simple debía de ser como mínimo para tabiques MqM-D de $75\text{kg}/\text{cm}^2$, en promedio de cinco piezas y de $60\text{kg}/\text{cm}^2$ de forma individual.

Para determinar el porcentaje de Absorción Volumétrica del grupo de Bloques de Tierra Comprimida unos estabilizados con Cal.

El estudio se sustentó en la metodología planteada en la normatividad mexicana dirigida hacia el diseño y control de mamposterías en general producidas por la “INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION - CONCRETO – BLOQUES, LADRILLOS O TABIQUES Y TABICONES” (NMX-C-037, NMX-C-006 y NMX-C-010) debido a que hasta la fecha en nuestro país no se cuenta con normas específicas para el diseño de bloques de tierra comprimida (BTC), carencia que se pretende subsanar a partir de estudios como el que es motivo del presente trabajo, que debe garantizar su dureza o resistencia para poder utilizarse como material estructural para la edificación

Los aparatos y equipo utilizados fueron:

- Balanza con capacidad adecuada y sensibilidad no menor de 0.1 % de la masa de la pieza ensayada, provista de un sistema que permita la determinación de la masa del espécimen sumergido.
- Horno con control de temperatura capaz de mantenerse entre 373 y 383 °k (100 y 110 °C).

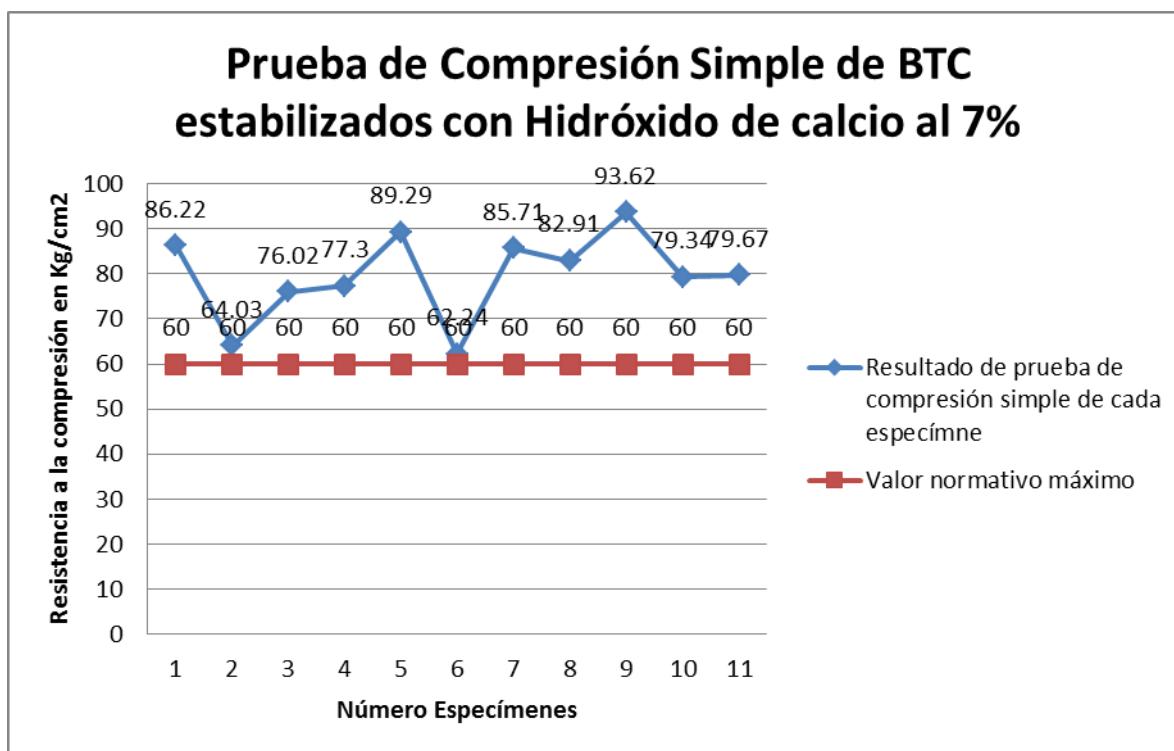
Se realizaron dos lotes de bloques de tierra comprimida (BTC) de dimensiones 0.10 x 0.14 x 0.29cm con una prensa Cinva Ram. La tierra utilizada contenía 40% de arcilla y presentaba un índice de plasticidad del 12%, un límite líquido del 32%, un límite plástico del 20%, con un peso volumétrico seco máximo de 1820 kg/m³. El lote estaba estabilizado con 7% hidróxido de calcio en polvo marca Calidra.

El muestreo de las piezas a probar fue aleatorio, de acuerdo con lo que marcan las normas NMX-C-006 y NMX-C-010 habiéndose determinado elegir 10 piezas de cada uno de los dos lotes, para la determinación de agua absorbida. Los especímenes se secaron en el horno a temperatura entre 373 y 383 °K (100 y 110 °C) siendo sacados periódicamente para ser pesados. El procedimiento se dio por concluido en el momento en que después de dos pesadas sucesivas, la diferencia en masa no fue mayor al 1%, lo que nos indicaba una presencia de agua que podría considerarse despreciable. Se registró el valor de la masa (Ms) y se tabuló como primer dato.

Posteriormente se registraron las masas de los especímenes ya secos y se sumergieron en agua a temperatura entre 290 y 296 K (17 y 23 °C) por un período de 24 horas; terminado este período se sacaron y se eliminó el agua superficial con un paño o papel absorbente, para volver a determinar su masa en estado saturado (Msss). En cuanto a las pruebas mecánicas de los BT en la tabla número 14 se muestran los resultados de la prueba a compresión simple de los BTC estabilizados con hidróxido de calcio al 7% y en las tablas 15 se muestran los resultados de la absorción de los BTC estabilizado con hidróxido de calcio al 7%

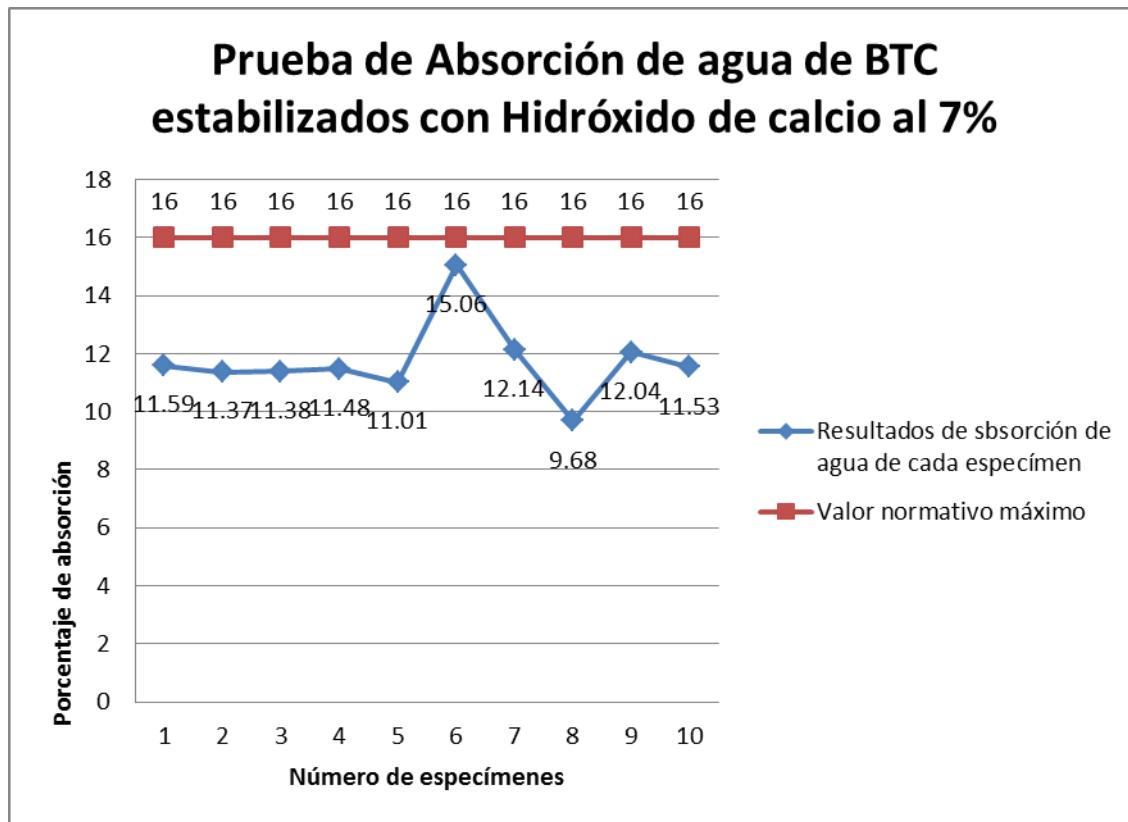
| Resultados de prueba de compresión simple de BTC estabilizados con hidróxido de calcio al 7% en polvo | | | |
|--|-------------|---------------|---|
| No. de especímenes por población = 10 | | | |
| Edad de los especímenes al realizar la prueba: 15 días | | | |
| Población con Hidróxido de calcio en polvo | | | |
| No. | TON | ÁREA | RESISTENCIA en Kg/cm² |
| 1 | 3.38 | 0.0392 | 86.22 |
| 2 | 2.51 | 0.0392 | 64.03 |
| 3 | 2.98 | 0.0392 | 76.02 |
| 4 | 3.03 | 0.0392 | 77.30 |
| 5 | 3.50 | 0.0392 | 89.29 |
| 6 | 2.44 | 0.0392 | 62.24 |
| 7 | 3.36 | 0.0392 | 85.71 |
| 8 | 3.25 | 0.0392 | 82.91 |
| 9 | 3.67 | 0.0392 | 93.62 |
| 10 | 3.11 | 0.0392 | 79.34 |
| Promedio | | | 79.67 |

Tabla 14. Resultados de Prueba de compresión simple de los BTC estabilizados hidróxido de calcio al 7%



Gráfica 2. Comparativo de los resultados de compresión de los BTC estabilizados hidróxido de calcio al 7% versus el valor normativo

| Masa seca (kg) Ms | Masa saturada (kg) Msss | Agua absorbida (kg) | Absorción (%) |
|----------------------|----------------------------|---------------------|---------------|
| 6.960 | 7.767 | 0.807 | 11.59 |
| 6.791 | 7.563 | 0.772 | 11.37 |
| 6.864 | 7.645 | 0.781 | 11.38 |
| 6.814 | 7.596 | 0.782 | 11.48 |
| 7.010 | 7.782 | 0.772 | 11.01 |
| 6.608 | 7.603 | 0.995 | 15.06 |
| 6.745 | 7.564 | 0.819 | 12.14 |
| 6.770 | 7.425 | 0.655 | 9.68 |
| 6.755 | 7.568 | 0.813 | 12.04 |
| 6.698 | 7.470 | 0.772 | 11.53 |
| Promedio | | | 11.73 |

Tabla 15. Resultados de Absorción de los BTC estabilizados hidróxido de calcio al 7%**Gráfica 3.** Comparativo de los resultados de absorción de agua de los BTC estabilizados hidróxido de calcio al 7% versus el valor normativo

Ahorro energético y de reducción en emisiones de CO₂

Con los datos presentados anteriormente se puede hacer un análisis con el fin de demostrar que el uso de los BTC en muros y techos, más la utilización de morteros de cal – arena proporción 1:2 para el pegado de los BTC y el revoque en muros y plafones se tendrá una disminución el costo energético y en las emisiones de CO₂ que se incrementará por el efecto de la carbonatación del hidróxido de calcio utilizado, en las tablas 16 y 17 se presentan los resultados de la utilización de estos materiales en la edificación de una vivienda.

| Material | Cantidad | Consumo energético por unidad | Total de Consumo Energético |
|------------------|---------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| Cal | 2.00 Ton | 0.953KWh/ Ton⁽⁶⁾ | 1.906.00 KWh |
| BTC | 7,700.00 Pza | 0.212 KWh/Pza⁽⁶⁾ | 1,632.40 KWh |
| T O T A L | | | 3,538.40 KWh |

Tabla 16. Resultados de consumo energético utilizando BTC e hidróxido de calcio en la producción de vivienda en los próximos 39 años

6. (Argüello Méndez & Cuchí Burgos, enero-marzo 2008)

| Material | Cantidad | Emisiones de CO₂ por unidad | Total de emisiones de CO₂ |
|-------------------------------------|---------------------------|---|---|
| Cal | 2.00 Ton | 0.00032Ton/Ton⁽⁶⁾ | 0.00064Ton |
| Bloques de tierra comprimida | 7,700.00 Pza | 0.00046284Ton/Pza⁽⁵⁾ | 3.5638 Ton |
| Absorción por la cal | 4.81 m³ | 509.94 Ton/m³ | - 2,419.1414 Ton |
| T O T A L | | | -2,415.5769 Ton |

Tabla 17. Resultados de la producción de CO₂ utilizando BTC e hidróxido de calcio en la producción de vivienda en los próximos 39 años

5. (Angulo, 2006)

6. (Argüello Méndez & Cuchí Burgos, enero-marzo 2008)

| Viviendas necesarias en los próximos 39 años | Consumo energético en KWh por vivienda | Total de KWh Totales |
|---|---|-----------------------------|
| 43.20 millones con materiales convencionales | 4,697.06 KWh | 202,912.99 millones |

| | | |
|--|--------------|---------------------|
| 43.20 utilizando BTC y Hidróxido de calcio | 3,538.40 KWh | 152,858.88 millones |
| Ahorro de energía | | 50,054.11 millones |

Tabla 18. Comparativo de los procesos constructivos convencionales vs la utilización de BTC y morteros de cal – arena 1:2 en la producción de vivienda en los próximos 39 años con relación al consumo energético

| Viviendas necesarias en los próximos 39 años | Producción de Toneladas de CO ₂ por vivienda | Total de Toneladas de CO ₂ |
|--|---|---------------------------------------|
| 43.20 millones con materiales convencionales | 5.72 Ton. | 247.10 millones |
| 43.20 utilizando BTC e Hidróxido de calcio | -2,415.5769 Ton | -104,352.92 millones |
| Ahorro de energía | | -104,105.82 millones |

Tabla 19. Comparativo de los procesos constructivos convencionales vs la utilización de BTC y morteros de cal – arena 1:2 en la producción de vivienda en los próximos 39 años con relación con la relación de toneladas de CO₂

De acuerdo con los resultados se tendría una reducción de 104,105.82 millones de toneladas de CO₂ en los 39 años siguientes y en cuanto al consumo de energía este sería de 50,054.11 millones de KWh, es decir un 24.66 % menor para edificar el mismo número de viviendas que es de 43.2 millones, lo que demuestra que estos materiales alternativos tienen un menor impacto al medio ambiente.

Discusión o Conclusión: De acuerdo a lo expuesto en la presente investigación se tienen las siguientes conclusiones:

1. La cinética de reacción es de segundo orden respecto al OH⁻
2. El tiempo (t) que le toma a una fracción de muestra (y) que contiene cierta cantidad molar inicial de OH⁻ (b) puede calcularse a partir de una constante de reacción determinada experimentalmente (k_s) de acuerdo a:

$$t = \frac{y}{2k_s b(1-y)}$$

Esta ecuación tiene un comportamiento exponencial

3. Una tonelada de mortero podría absorber el CO₂ de **1.520.000** metros cúbicos de gas, cuya concentración de CO₂ es del 0.01%, en una relación 1:1 (hidróxido de calcio: arena).
4. La conversión de un cilindro de mortero mencionada en el párrafo anterior, le tomaría aproximadamente 68 años la conversión de un 50% del hidróxido contenido total en carbonato. Esto a condiciones medioambientales normales.
5. Los cilindros expuestos a condiciones normales no muestran cambios significativos debido a carbonatación en un periodo de 7 días. En un medio de CO₂ a 25°C y 120psi de presión en 7 días se logra aproximadamente hasta un 50% de conversión.
6. Para los morteros 1:2, 1:3, 1:4, y 1:5 se encontró que el tiempo de reacción incrementa en la misma proporción que disminuye el contenido de hidróxido de calcio en las muestras.
7. Los resultados obtenidos referentes al porcentaje de absorción de agua de los BTC se encuentran dentro del rango de los tabique MqM del Grado de Calidad “C” según las NMX-C-006-1976, que nos indica que el promedio de absorción es de 18%.
8. Los BTC estabilizados con hidróxido de calcio no presentaron, pérdida de masa, ni deformación alguna al termino de la prueba de absorción
9. Pero por otra parte los BTC estabilizados con hidróxido de calcio, cumplen con los criterios de calidad para tabiques cerámicos de barro y/o arcilla, pero su estabilización tiene un menor costo, al ser la cal más económica que el cemento. En el caso de la cal el consumo máximo fue de 0.221 gramos por pieza equivalentes a \$ 0.88 pesos
10. Por último, resulta evidente que el hidróxido de calcio mantiene la absorción del agua las estructuras de tierra cruda en un rango dentro de las normas mexicanas para mampostería pero con destacadas ventajas ecológicas, por lo que se convierte en una gran aliada para la elaboración de bloques de tierra comprimida, en el camino hacia el desarrollo de una arquitectura más amable con el medio ambiente.
11. La capacidad de carga de los BTC estabilizados con hidróxido de calcio alcanza resultados superiores a los indicados en los reglamentos mexicanos. La resistencia obtenida con el hidróxido de calcio fue mayor que la normativa que es de 60 Kg/cm².

12. Se puede concluir que resultará mucho más sustentable la utilización de los BTC y el hidróxido de calcio en la edificación de vivienda ya que los resultados obtenidos, así lo demuestran

Referencias

- Álvarez, C. (2010). *Terrarum Arquitectos*. Recuperado el 9 de Enero de 2012, de <http://www.terrumarquitectos.com/Materiales%20y%20construcción%20sostenible.pdf>
- Angulo, D. (25 de agosto de 2006). Tierra TEC. Recuperado el 10 de junio de 2012, de www.terratec.com
- Argüello Méndez, T. d., & Cuchí Burgos, A. (enero-marzo 2008). Análisis del impacto ambiental asociado a los materiales de construcción empleados en las viviendas de bajo coste del programa 10 x10 Con Techo-Chiapas del CYTED. *Informes de la Construcción*, 25-34. BIBLIOGRAPHY \l 2058
- Cizer, O., Van Balen, K., Elsen, J., & D, V. G. (2008). CARBONATION REACTION KINETICS OF LIME BINDERS. *ACEME08, 2nd International Conference on Accelerated Carbonation for Environmental and* (págs. 139-148). Roma, Italia: ACEME.
- Chargoy Amador, J. P., Rosas Millán, L. Á., & Téllez Muradás, D. R. (2009). Generación de inventarios para el Análisis de Ciclo de Vida de cemento, block, bovedilla, vigueta y ladrillo en la zona centro de México . Cholula: Universidad de las Américas Puebla.
- Fundación Cidoc y Sociedad Hipotecaria Federal. (2011). *Estado Actual de la Vivienda en México 2011*. México,D.F.: SEDESOL. BIBLIOGRAPHY \l 2058
- Galván Ruiz, M., & Velázquez Castillo, R. (2011). Cal, un antiguo material como una renovada opción. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 93-102.
- Howland Albear, J. J., & Jiménez de la Fe, S. (2010). *Obras, Revista Cubana de la Construcción*. Recuperado el 9 de Enero de 2012
- INEGI. (2011). *CENSOS DE POBLACIÓN Y VIVIENDA 2010*. MÉXICO, DF: INEGI.
- Lia, X., Fernández Bertos, M., Hillsa, C. D., Carey, P. J., & Simon, S. (2007). Accelerated carbonation of municipal solid waste incineration fly ashes. *Waste Management*, 1200-1206.
- Roux Gutiérrez Rubén Salvador (2010). Los Bloques de Tierra Comprimida en Zonas Húmedas. México: Plaza y Valdés.
- SECOFI, D.G.N. (1983). Norma oficial mexicana, NMX-C-006-1976. Industria de la construcción – ladrillos bloques cerámicos de barro, arcilla y/o similares - Naucalpan: Ed. Dirección General de Normas de la SECOFI.
- SECOFI, D.G.N. (1983). Norma oficial mexicana, NMX-C-036-1983. Industria de la construcción –ladrillo, bloques y adoquines de concreto- Resistencia a la compresión simple –método de prueba. Naucalpan: Ed. Dirección General de Normas de la SECOFI.
- SECOFI, D.G.N. (1986). Norma oficial mexicana, NMX-C-010-1986. Industria de la construcción –concreto, bloques, ladrillos, tabiques y tabicones. México: Dirección General de Normas de la SECOFI.

- SECOFI, D.G.N. (1986). Norma oficial mexicana, NMX-C-037-1986. Industria de la construcción –concreto - bloques – ladrillos o tabiques de concreto- determinación de la absorción de agua; México: Dirección General de Normas de la SECOFI.
- Suppen Reynaga, H. (2008). Análisis del ciclo de vida de materiales para la vivienda de interés social en México. México, DF: CADIS, SA de CV.
- Topelson, Sara, (2011). En: “*Estado Actual de la Vivienda en México 2011*”. México,D.F.: SEDESOL.