

Revista Electrónica Nova Scientia

Los materiales alternativos estabilizados y su
impacto ambiental

Alternative materials stabilized and their
environmental impact

**Rubén Salvador Roux Gutierrez¹, Víctor Manuel García
Izaguirre² y José Adán Espuna Mujica³**

¹ Jefe de Investigación, Universidad Autónoma de Tamaulipas

² Secretario Técnico, Universidad Autónoma de Tamaulipas

³ Centro de Proyectos Medio Ambientales, Universidad Autónoma de Tamaulipas

México

Rubén Salvador Roux Gutiérrez. E-mail: rroux33@hotmail.com

Resumen

El presente trabajo es resultado de investigaciones desarrolladas a partir de la experimentación de materiales alternativos para la edificación, en especial, relacionado con Bloques de Tierra Comprimida (BTC), que han sido estabilizados con hidróxido de cal y cemento, buscando cumplir con las Normas Mexicanas, en el apartado referente a materiales para uso en mampostería de las edificaciones y así corroborar que estos materiales cumplen con requisitos de calidad, al igual que los materiales convencionales, aunado a la realización del análisis de ciclo de vida (ACV) en dos poblaciones de BTC's estabilizados con cementantes, buscando determinar su impacto ambiental y finalmente poder contrastarlos con las bases de datos existentes de materiales convencionales.

Palabras clave: Materiales alternativos, estabilización, impacto ambiental

Recepción: 01-11-2013

Aceptación: 19-05-2014

Abstract

The present work is result of researches developed from the experimentation of alternative building materials, especially about the use of dirt compressed blocks (BTC in spanish), which have been stabilized with lime hydroxide and cement, trying to be accord with the Mexican standards, in the section relationated with the use in masonry buildings materials and thus verify that these materials comply with quality requirements, as well as conventional materials, in addition to the analysis of life cycle (LCA) in two populations of BTC stabilized with cementitious, seeking to determine their environmental impact and can finally compare them with existing conventional materials.

Keywords: Alternative materials, stabilization, environmental impact

Introducción

Es factible que se comente que mucho se ha escrito sobre el uso de materiales alternativos y regionales en la construcción, sin embargo, cuando se hace referencia a algunos de éstos, se asocian con materiales que fueron utilizados satisfactoriamente en tiempos anteriores por algunas civilizaciones para la edificación de sus hábitat, empero, hoy en día, existe el comentario sobre estos materiales tradicionales, donde son considerados de “baja calidad” o solo son denostados en cuanto a su calidad pues son utilizados por las personas de escasos recursos para la autoedificación de sus viviendas.

Este dilema motivó al grupo de investigadores de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo (FADU) a desarrollar una serie de investigaciones que permitiesen evaluar la calidad de materiales alternativos y regionales, en lo particular los denominados como Bloques de Tierra Comprimida (BTC).

El BTC es un material de construcción fabricado con una mezcla de tierra cruda y un material estabilizante, como cal, cemento, asfalto o yeso, que es moldeada y comprimida utilizando una prensa mecánica ó manual. Se ha empleado como un sustituto del ladrillo de barro recocido en actividades de construcción; utilizándose en la construcción de muros apilándolo manualmente y usando una mezcla de los mismos materiales como mortero de asiento.

En el presente estudio se ha utilizado para su fabricación la prensa manual de patente colombiana “Cinva-Ram”, buscando homogeneizarlos y conseguir una calidad acorde a las Normas Mexicanas (NMX-C-404-ONNCCE-2005; NMX-C-036-ONNCCE-2004; NMX-C-037-ONNCCE-2005) descritas por la Industria de la Construcción, además de determinar estabilizar esos BTC's con cemento CPO-20 y con Hidróxido de Calcio.

Bajo estas premisas se establecen dos objetivos para la presente investigación:

1. Corroborar que los BTC estabilizados con Hidróxido de calcio (conocida comunmente como Cal hidratada) tienen propiedades mecánicas iguales o superiores a los BTC estabilizados con cemento CPO-20 (Coloquialmente denominado como Cemento Portland Tipo I, cuya resistencia a la compresión es de 203.93 Kg/cm² o 20 N/mm²) y que por lo tanto cumplen con las Normas Mexicanas correspondientes.
2. Desarrollar, identificar y evaluar los impactos ambientales y la energía embebida asociados a la producción, manejo, implementación, uso y desecho de BTC, con el fin de

comparar los resultados que se obtengan de las dos poblaciones de BTC estabilizados con hidróxido de calcio y cemento CPO-20.

Con estos análisis, se busca mostrar las cualidades de este producto constructivo frente a otros materiales convencionales de edificación.

Las propiedades mecánicas que se analizaron fueron la resistencia a la compresión simple que es la propiedad principal de aceptación, de acuerdo a las normas mexicanas y reglamentos que un muro de mampostería debe tener como características para soportar las cargas verticales suficientes y así mantener la estructura estable. En el caso de los materiales de tierra esta propiedad cobra fundamental relevancia debido, pues las estructuras de tierra no están confinadas y la absorción de agua son históricamente dos de los principales factores de deterioro y paulatina degradación y destrucción de las estructuras de tierra cruda. Además se encuentran los sismos y el exceso o saturación de humedad, condición que está siempre presente ya sea en el subsuelo, así como en el entorno, aunado a la lluvia o en algunos casos, la nieve.

Resulta un tanto irónico que siendo el agua la base para la construcción con tierra cruda, sea también una fuente potencial de destrucción, por ende, históricamente la arquitectura ha promovido diversas alternativas para su control. Algunas de éstas tienen su relación con las dimensiones de los componentes constructivos, otras con su forma y acomodo y varias más con la incorporación de sustancias que aminoren de alguna manera la absorción de agua en la edificación.

El acceso de agua, en su estado líquido o en su estado de vapor en los componentes térrcos está directamente relacionado con la porosidad del material en su composición. Los huecos o vacíos de diferente forma, tamaño e interconexión que se presentan en adobes, tapias, bajareques o bloques de tierra comprimida (BTC) entre las partículas sólidas son el vehículo de acceso a la absorción del agua en las estructuras, esta porosidad se acentúa en los elementos estabilizados con cementantes ya que en el proceso de hidratación del cemento, la pasta de cemento que no se hidrata será la que genere poros capilares que afectarán al material en su resistencia. (Alcaraz Marín, 2012).

Estas propiedades sirven como base para determinar la calidad de los materiales utilizados en mampostería de acuerdo a la norma; NMX-C-404-ONNCCE-2005, para la aplicación de los métodos de prueba se siguió lo indicado por las normas: NMX-C-036-ONNCCE-2004 para la

prueba de compresión simple y la NMX-C-037-ONNCCE-2005 para la prueba de absorción de agua.

Realizado lo anterior y obteniendo los resultados, se realizará un estudio de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), conforme la norma: NMX-SSA-14040-IMNC-2008, que indica las particularidades sobre el análisis de ciclo de vida, principios y marco de referencia. Para realizar la comparativa del ACV, se utilizó el software SimaPro versión 7.3, programa que permite determinar impactos de los materiales al realizar el ACV de la cuna a la tumba.

Metodología:

La metodología empleada en el proceso se dividió de la siguiente manera:

1. Proceso de fabricación de los especímenes de prueba y muestra de estudio.
2. Pruebas de ensayo efectuadas a los elementos muestra.
3. Análisis del Ciclo de Vida de dos elementos muestra:

Cada una de estas etapas se describe a continuación:

Fabricación. Se inició con la selección y caracterización del suelo a utilizar. Al no encontrar un suelo natural con las características ideales en la zona de estudio (Para este caso, la zona conurbada de Tampico, Madero y Altamira en el estado mexicano de Tamaulipas), se decidió fabricar uno con las características idóneas en porcentaje, que contara con un (60 %) de arcilla de baja plasticidad CL y un (40 %), de arena limosa, que 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/m^3 , el proceso para la realización de la mezcla fue en peso. Incorporándole un primer estabilizante de 7 % de Hidróxido de calcio en polvo y 8 % de cemento CPO-20. Se realizaron dos lotes de bloques de tierra comprimida (BTC) de dimensiones $0.10 \times 0.14 \times 0.29 \text{ m}$ con una prensa “Cinva-Ram”.

Material	Cantidad	Unidad
Arcilla de baja plasticidad	42.00	Kg
Arena limosa	46.00	Kg
Agua	12.00	Lt
Cemento CPO-20 8%	7.04	Kg

Tabla 1. Proporciones de material para la fabricación de BTC estabilizados con cemento (BTC-1).

La Tabla 1 muestra las proporciones de los diversos materiales para producir 28 bloques de 0.10 x 0.14 x 0.29 m estabilizados con cemento CPO-20 y en la Tabla 2 los estabilizados con hidróxido de calcio.

Material	Cantidad	Unidad
Arcilla de baja plasticidad	42.00	Kg
Arena limosa	46.00	Kg
Agua	12.00	Lt
Hidróxido de calcio 7%	6.16	Kg

Tabla 2. Proporciones de material para la fabricación de BTC estabilizados con Hidróxido de calcio (BTC-2).

Posterior a la fabricación de los 28 especímenes de cada población se uso el método estadístico de números aleatorios para elegir de cada una de las poblaciones, 10 bloques para las pruebas de compresión y 10 para la prueba de absorción. Esto fue resuelto mediante el programa StatsTM v.2, dando como parámetro el de un universo finito y el total de elementos a elegir, determinando en un primer calculo los primeros diez bloques para las pruebas de compresión y en un segundo calculo se determinaron los segundos diez elementos para las pruebas de absorción. Es de mencionar que en el caso de que uno o varios de los especímenes hubieran ya sido seleccionados en el primer muestreo, se realizo un tercer cálculo para completar la segunda muestra con especímenes que no hubiese sido seleccionados.

Pruebas mecánicas: Las pruebas aplicadas a los elementos de la muestra fueron las siguientes:

- Método de ensayo de prueba de compresión, bajo la norma NMX-C-036-ONNCCE-2004
- Método de ensayo de absorción, bajo la norma NMX-C-037-ONNCCE-2005.

El Método de ensayo de prueba de compresión, se sujetó a lo establecido en la Norma Mexicana NOM-C-36-2004. Conforme a lo establecido por la citada norma, para realizar la prueba de resistencia a la compresión simple, se colocó la probeta con el centroide de su superficie para recibir una carga alineada de manera vertical con el centro del bloque de carga de la máquina de prueba con las características que se describieron. Una vez colocada la probeta, se aplicó la mitad de la carga que se esperaba como máximo a una velocidad conveniente para posteriormente ajustar los controles de la máquina y dar una velocidad uniforme de traslado de la cabeza móvil,

de tal manera que el resto de la carga no fuera aplicada en menos de un minuto ni en más de dos. 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.

Según la Norma Mexicana NMX-C-404-ONNCCE-2005, la resistencia a la compresión simple debe de ser como mínimo para tabiques de 60 kgf/cm² de forma individual.

El Método de ensayo de absorción, se sujeto a lo establecido en la Norma Mexicana NMX-C-037-ONNCCE-2005. De acuerdo con lo establecido por la citada norma, en la presente fase del proyecto de investigación se determinó el porcentaje de Absorción Volumétrica de dos grupos de bloques de tierra comprimida: unos estabilizados con cemento CPO-20 y otros con Hidróxido de calcio.

Los aparatos y equipo utilizados fueron:

- Balanza con una capacidad adecuada y sensibilidad no menor de 0.1 % de la masa de la pieza ensayada, provista de un sistema que permite la determinación de la masa de especímenes sumergidos.
- Horno con control de temperatura capaz de mantenerse entre 373 y 383°K (100 y 110°C).

El procedimiento se dio por concluido en el momento que, después de dos pesadas sucesivas, la diferencia en masa no fue mayor al 1 %, que indicaba una presencia de agua que podría considerarse despreciable. Se registró el valor de la masa (M_s) y se tabuló como primer dato.

Posteriormente se registraron las masas de los especímenes, una vez secos, se sumergieron por completo en agua a temperatura entre 290 y 296 °K (17 y 23 °C) por un período de 24 horas.

Pasado este lapso se sacaron las piezas y se eliminó el agua superficial con un paño absorbente, para volver a determinar su masa en estado saturado (Msss).

Una vez comprobada la calidad de los BTC se procedió a comprobar su impacto ambiental a partir del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), de acuerdo al siguiente procedimiento:

Análisis de Ciclo de Vida. En cuanto al Análisis de Ciclo de Vida (ACV) la metodología fue la siguiente:

- a) Establecer el alcance.
- b) Describir el producto.
- c) Determinar la función y unidad funcional del producto.
- d) Realizar la evaluación y determinación de los impactos.
- e) Consideraciones adicionales.

Cada fase del proceso se describe a continuación:

Alcance: El alcance del ACV es de la cuna a la tumba es decir desde la extracción de las materias primas hasta la reutilización o tirado de los desperdicios productos de la demolición de los elementos constructivos realizados con este tipo de mampuesto, conforme a la NMX-SSA-14040-IMNC-2008.

Descripción del producto. En este estudio se llevó a cabo un ACV sobre dos tipos de bloques: BTC-1 y BTC-2, habiendo sido estabilizados los primeros con cemento y los segundos con hidróxido de calcio; para ambos tipos de bloques se considera una vida útil de 30 años. Dentro de sus principales características es que ambos bloques miden 29 cm x 14 cm x 10 cm. La masa unitaria del BTC-1 es de 7.65 kg y la del BTC-2 de 6.80 kg. Los datos promedio que se han registrado para resistencia a la compresión de las piezas son de 76.32 kgf/cm² en los BTC-1 y 79.69 kgf/cm² en los BTC-2.

Función y unidad funcional. La unidad funcional (UF) es la unidad del producto utilizado como referencia en el estudio. La unidad funcional de los sistemas de producto a estudiar será la de un metro cuadrado de muro de carga, estructura, cerramiento y acabado superficial. Para ambos casos se requieren 44 bloques por metro cuadrado para conformar la unidad funcional. La masa total del murete de los BTC-1 es de 336.77 kg mientras que la de los BTC-2 es de 299.27 kg. No obstante, para la evaluación de la fase de uso no se incluye la energía operacional como pared de un edificio completo, sino solamente se considera su mantenimiento para que se

cumplan las funciones de estructura, muros y acabado superficial a las que estaría destinada. Tampoco se incluye en el estudio los impactos de los bienes de capital e infraestructura.

Metodología de evaluación y tipos de impactos. La metodología de evaluación establece los factores de caracterización mediante los que se cuantifican los impactos ambientales. Para la mayoría de impactos descritos en la Tabla 3, la caracterización se llevará a cabo mediante el método TRACI 2 (Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impact) V4.00 2012 desarrollada por la Agencia de Protección de Estados Unidos. No obstante, existen algunos impactos que el método TRACI 2 no tiene implementados en su sistema y que también se evaluarán. Este es el caso del uso del suelo y del agotamiento de los recursos minerales, para los cuales se utilizará el método ReCiPe Midpoint (I) V1.06 / World ReCiPe I, uno de los métodos más actualizados y armonizados hasta el momento y que ha sido desarrollado por Pré Consultants. Los recursos energéticos se evaluarán mediante el método CED (Cumulative Energy Demand V1.8).

Las categorías de impacto seleccionadas se describen en la Tabla 3.

Categoría de impacto	Descripción
Destrucción de la capa de ozono	La capa de ozono es un filtro de radiación ultravioleta hacia la tierra. Los compuestos clorofluorocarbonados (CFCs) destruyen esta capa.
Cambio climático	Aumento de la temperatura de la tierra como consecuencia de la emisión de gases de efecto invernadero tales como CO ₂ , CH ₄ , NO _x , O ₃ , etc (quema de combustible, emisiones industriales, etc.).
Oxidación fotoquímica (smog)	Es un oxidante fotoquímico que junto a los COV y NO _x (quema de combustible, emisiones industriales, etc.) forman el smog fotoquímico.
Acidificación	Disminución del pH del suelo y del agua como consecuencia de emisiones de NO _x , SO ₂ , NO ₂ , NH ₃ , HCl, HF, etc.
Eutrofización	Aumento de los nutrientes inorgánicos SO ₄ y NO ₃ en el agua (excrementos, fertilizantes, etc.).
Compuestos carcinogénicos	Compuestos químicos que generan cáncer al ser humano.
Contaminantes no carcinogénicos	Compuestos químicos que generan enfermedades diferentes al cáncer.
Efectos respiratorios	Contaminantes que causan enfermedades respiratorias.
Ecotoxicidad	Contaminantes que causan toxicidad a los ecosistemas (plantas y animales)
Uso del suelo agrícola o urbano.	El uso del suelo genera impactos ambientales. Área de suelo agrícola o urbano utilizado y/o ocupada derivada de una actividad industrial.
Agotamiento de los recursos minerales	Por ejemplo: minerales como la bauxita, la caliza, hierro, etc.

Agotamiento de los recursos fósiles	Por ejemplo: petróleo, gas natural, carbón, etc.
Energía embebida	Energía requerida a lo largo del ciclo de vida de un producto. Incluye energía no renovable de origen fósil, nuclear, de biomasa y renovable de origen solar, geotérmica, eólica e hídrica.

Tabla 3. Descripción de los impactos seleccionados

Otras consideraciones. Las limitaciones del presente estudio como sucede con todos los ACV, se derivan fundamentalmente de la accesibilidad, disponibilidad y calidad de datos de base, los cuales pueden afectar a la precisión de los cálculos. Asimismo, el hecho de combinar información local con la que proviene de bases de datos generadas en sitios ajenos al caso de estudio, introduce cierta incertidumbre en los resultados. Por ejemplo, las condiciones medias de Estados Unidos y Canadá (US LCI) y sobre todo las de Europa (Ecoinvent), generalmente no representan las circunstancias asociadas a los procesos de producción de México, por lo que se utilizarán los más apegados a la condiciones mexicanas para la realización del presente ACV. Además, hay que tener en cuenta que categorías tales como el impacto de uso del suelo agrícola o urbano, agotamiento de recursos hídricos, agotamiento de los recursos minerales, agotamiento de los recursos fósiles y la energía embebida están calculadas por los métodos ReCiPe y CED, desarrollados para Europa y sólo representan parcialmente las condiciones mexicanas. No obstante a falta de métodos específicos para Norteamérica, es necesario considerar al menos estos datos y métodos sin perder de vista la relatividad de los resultados. Esto significa que aunque la información no sea totalmente precisa para el entorno local, al utilizarse como referente para los dos casos estudiados, la comparación de resultados sí puede considerarse fiable.

Resultados.

Para la interpretación de los mismos, se presentaran primero las pruebas mecánicas aplicadas a los BTC estabilizados con Hidróxido de Cal y cemento CPO-20 y posteriormente los obtenidos del análisis del ciclo de vida de los dos elementos mencionados.

En relación a los resultados de la prueba a compresión simple, en la Tabla 4, se muestran los resultados de los BTC estabilizados con cemento CPO-20 al 8 %, mientras que la Tabla 5, muestra los resultados de los BTC estabilizados con Hidróxido de calcio al 7%.

RESULTADOS DE BTC ESTABILIZADOS CON CEMENTO CPO-20 AL 8%		
No. DE ESPECÍMENES POR POBLACIÓN = 10		
EDAD DE LOS ESPECÍMENES AL REALIZAR LA PRUEBA: 15 DÍAS		
POBLACIÓN CON CEMENTO		
No.	Área	RESISTENCIA en Kgf/cm ²
1	0.0392 cm ²	63.77
2	0.0392 cm ²	68.88
3	0.0392 cm ²	84.14
4	0.0392 cm ²	76.56
5	0.0392 cm ²	86.73
6	0.0392 cm ²	77.08
7	0.0392 cm ²	76.53
8	0.0392 cm ²	76.53
9	0.0392 cm ²	76.53
10	0.0392 cm ²	76.53
Promedio		76.32

Tabla 4. Resultado de prueba a compresión simple BTC estabilizado con cemento al 8 %

Se puede observar de acuerdo con los datos obtenidos y plasmados en las tablas 4 y 5 que la máxima resistencia obtenida en los BTC-1 fue de 86.73 Kgf/cm² mientras que en los BTC-2 fue de 93.62 Kgf/cm², así mismo en relación a la resistencia mínima la obtenida por los BTC- 1 fue de 63.77 Kgf/cm² contra 62.24 kgf/cm² y por último la resistencia promedio de los BTC-1 es de 76.32 Kgf/cm² y para los BTC-2 es de 79.67 Kgf/cm², lo que indica que en relación a la resistencia a la compresión simple se obtienen mejores resultados en los BTC-2 que en los BTC-1 y además se cumple con el requerimiento de la NMX-C-404-ONNCCE-2005.

RESULTADOS DE BTC ESTABILIZADOS CON HIDRÓXIDO DE CALCIO AL 7%		
No. DE ESPECÍMENES POR POBLACIÓN = 10		
EDAD DE LOS ESPECÍMENES AL REALIZAR LA PRUEBA: 15 DÍAS		
POBLACIÓN CON HIDRÓXIDO DE CALCIO EN POLVO		
No.	Área	RESISTENCIA en Kgf/cm ²
1	0.0392 cm ²	86.22
2	0.0392 cm ²	64.03
3	0.0392 cm ²	76.02
4	0.0392 cm ²	77.30
5	0.0392 cm ²	89.29
6	0.0392 cm ²	62.24
7	0.0392 cm ²	85.71
8	0.0392 cm ²	82.91
9	0.0392 cm ²	93.62
10	0.0392 cm ²	79.34
Promedio		79.67

Tabla 5. Resultado de prueba a compresión simple BTC estabilizado con Hidróxido de calcio al 7 %

Las tablas 6 y 7 presentan los resultados de la prueba de absorción de las poblaciones de BTC estabilizados con 8% de cemento y 7% de Hidróxido de calcio de acuerdo con la norma: NMX - C - 441 - ONNCCE - 2005, que uindica que la absorción aceptada es del 21% en promedio y del 30% de manera individual.

RESULTADOS DE BTC ESTABILIZADOS CON CEMENTO CPO-20 AL 8%				
No. DE ESPECÍMENES POR POBLACIÓN = 10				
EDAD DE LOS ESPECÍMENES AL REALIZAR LA PRUEBA: 15 DÍAS				
No.	Masa seca (kg) Ms	Masa saturada (kg) Msss	Agua absorbida (kg)	Absorción (%)
1	7.651	8.109	0.458	5.99
2	7.602	8.056	0.454	5.97
3	7.721	8.153	0.432	5.60
4	7.568	8.186	0.618	8.17
5	7.689	8.167	0.478	6.22
6	7.573	8.251	0.678	8.95
7	7.684	8.354	0.670	8.72
8	7.732	8.345	0.613	7.93
9	7.741	8.459	0.718	9.28
10	7.577	8.789	1.212	16.00
Promedio				8.28

Tabla 6. Resultados de la prueba de absoción a la población de BTC estabilizados con cemento CPO-20 al 8%

El resultado de esta prueba expreado en las tablas 6 y 7 muestra que la absorción mínima para los BTC-1 fue de 5.60 %, mientras que para los BTC-2 fue de 9.68%, en tanto que la máxima para los BTC-1 fue de 16% y para los BTC-2 de 15.06%, por último la absorción promedio de los BTC-1 fue de 8.28% mientras que para los BTC-2 fue de 11.73%, en este caso la conclusión es que los BTC-1 estabilizados con cemento CPO-20 tuvieron una menor absorción de agua que los BTC-2 estabilizados con Hidróxido de Calcio, aunque ambas cumplen con la norma NMX - C - 441 - ONNCCE - 2005.

RESULTADOS DE BTC ESTABILIZADOS CON HIDRÓXIDO DE CALCIO AL 7%				
No. DE ESPECÍMENES POR POBLACIÓN = 10				
EDAD DE LOS ESPECÍMENES AL REALIZAR LA PRUEBA: 15 DÍAS				
No.	Masa seca (kg) Ms	Masa saturada (kg) Mss	Agua absorbida (kg)	Absorción (%)
1	6.960	7.767	0.807	11.59
2	6.791	7.563	0.772	11.37
3	6.864	7.645	0.781	11.38
4	6.814	7.596	0.782	11.48
5	7.010	7.782	0.772	11.01
6	6.608	7.603	0.995	15.06
7	6.745	7.564	0.819	12.14
8	6.770	7.425	0.655	9.68
9	6.755	7.568	0.813	12.04
10	6.698	7.470	0.772	11.53
Promedio				11.73

Tabla 7. Resultados de la prueba de absorción a la población de BTC estabilizados con Hidróxido de calcio al 7%

La norma NMX-C-404-ONNCCE-2005, indica que el porcentaje de absorción para tabiques recocidos es de 21%, al no haber una norma para BTC en México, se tomo como el valor de calidad el anteriormente mencionado. Por lo que aunque los BTC-2 tienen una mayor porcentaje de absorción que los BTC-1 se encuentran dentro de la NMX y son adecuados para poder fabricar muros de mampostería.

En relación a los Resultado del Análisis de Ciclo de Vida, los datos sobre las entradas y salidas de los procesos unitarios de fabricación de los BTC, fueron desarrollados a partir de la práctica productiva realizada en la Universidad Autónoma de Tamaulipas especialmente en el año 2011, acotada a la región de Tamaulipas, en el noreste de la República Mexicana. La técnica de recopilación de estos datos se ha realizado a partir de la propia experiencia académica. Lo mismo se puede decir acerca del tipo y cantidad de materias primas, así como las distancias de transporte desde su área de suministro.

No obstante, los datos cualitativos de la etapa de suministro de materias primas, que incluye la extracción y procesamiento de los materiales, como por ejemplo el cemento, o el tipo de transporte, se han tomado de la base de datos US LCI, la cual muestra datos medios de Estados Unidos a partir de una mezcla de tecnologías. Cuando no ha sido posible obtener información, se ha utilizado la base de datos Ecoinvent.

El modelo de ciclo de vida diseñado en el software SimaPro se ha realizado utilizando los procesos que se indican en la Tabla 8.

Proceso	Proceso en la base de datos	Base de dDatos
Cemento Portland	Portland cement, at plant/US	US LCI
Transporte en camión	Transport, single unit truck, diesel powered/US	
Maquinaria de demolición	Loader operation, large, INW/RNA	
Gasolina revolvedora	Gasoline, combusted in equipment/US	
Arcilla	Clay, at mine/CH U	Ecoinvent
Arena	Sand, at mine/CH U	
Cal hidráulica	Lime, hydraulic, at plant/CH U	
Embalaje de la cal hidráulica	Kraft paper, unbleached, at plant/RER U	
Agua	Tap water, at user/RER U	
Pegamento	Vinyl acetate, at plant/RER U	
Sal de mesa	Sodium hydroxide, 50% in H ₂ O, diaphragm cell, at plant/RER U	
Vertedero BTC	Disposal, limestone residue, 5% water, to inert material landfill/CH U	

Tabla 8. Procesos seleccionados en el modelo

A continuación, se describen los datos recopilados que conforman el inventario de este estudio ACV, a partir de la información local y la obtenida de las bases extranjeras.

La etapa de materias primas y fabricación incluye la extracción y procesamiento de las materias primas, su transporte hasta la obra y los recursos naturales empleados para la fabricación de los BTC. Se considera la extracción minera y el procesamiento de la arcilla y la arena así como todos los procesos de la fabricación del cemento Portland y la cal hidráulica.

El transporte de las materias primas se hace mediante camiones que utilizan diesel como combustible y las distancias son las que se indican en la Tabla 9. Todas las materias primas se transportan a granel excepto el Hidróxido de Calcio que se proporciona en sacos de 25 kg que están fabricados de papel, suponiendo que un saco pesa 100 g y está fabricado con papel kraft. Se estima que los sacos de papel se eliminan en un vertedero local.

Los BTC se fabrican en el mismo lugar de la obra. La mezcla de los componentes de los BTC se realiza mediante una revolvedora que consume 0,0183 l/kg de gasolina. La mezcla de las materias primas se introduce en un molde que cuenta con una prensa hidráulica que se acciona manualmente de manera que se le da forma a los BTC.

El agua que se utiliza proviene de la red de municipal.

Tipo de BTC	Materia prima	Tipo de materia prima	% en masa	Procedencia hasta lugar de fabricación del BTC (km). Datos tomados de manera directa desde el banco al sitio de la obra en Tampico	Consumo de agua (L/kg BTC)
BTC-1	Cemento	Procesada	8	105	0,42
	Arcilla	Sin procesar	43,85	10	
	Arena limosa	Sin procesar	48,15	35	
BTC-2	Hidróxido de calcio	Procesada	7	400	0,42
	Arcilla	Sin procesar	44,38	10	
	Arena limosa	Sin procesar	48,62	35	

Tabla 9. Datos de inventario de la fabricación de los BTC

La etapa de obra y mantenimiento, consiste en la colocación de los BTC conformando un tramo de muro, e incluye el consumo del mortero para unir los bloques, el revoque y la pintura que proporciona el acabado superficial. Para la unión de los bloques y el revoque se utilizan $0,006 \text{ m}^3$ de mortero.

Un metro cúbico de mortero se prepara con 389 kg de hidróxido de calcio, 1520 kg de arena y 200 lt de agua. Como acabado superficial su utiliza una pintura a la cal. Se emplean 0,143 litros por metro cuadrado de pared. Para fabricar 10 litros de pintura se consideran 4 kg de cal, 0,5 kg de sal de mesa y 0,25 ml de acetato de polivinilo (pegamento comercial conocido en México como Resistol 850).

El único mantenimiento que requiere el muro consiste en pintarlo cada dos años con la misma pintura a la cal que se usó al construir el muro. Cada vez que se pinta el muro se consumen $0,0715 \text{ l/m}^2$. Como se ha comentado anteriormente, la vida útil de los muros de BTC es de 30 años, por lo que se realiza el cálculo correspondiente a la cantidad de pintura requerida en concepto de mantenimiento.

Para la etapa de fin de vida, se considerara despues de que pasen 30 años, cuando el muro ha llegado a su fin de vida, se considera su demolición, la cual se llevaría a cabo con una retroexcavadora de tipo Backhoe Loaders. Se estima un tiempo de trabajo por parte de esta máquina de 0,144 h/m³ (Doka, 2009). El residuo de BTC derruido se transporta una distancia de 30 km ya sea hasta el vertedero o bien, hasta el punto donde será reciclado. Se considera que el reciclado tiene un impacto nulo respecto a la disposición en vertedero.

Debido a la alta reciclabilidad de los BTC, se estable un escenario que consiste en que el 90% de los residuos de BTC se reciclan y el restante 10% va a un vertedero de materiales inertes. Los límites del sistema del reciclado terminan cuando los residuos han sido trasladados al punto donde se reciclará el material. No se incluye en este estudio ni la preparación del material, es decir su triturado, ni el nuevo uso que se le dé a este material secundario. Estos últimos impactos, así como la cantidad de material que se evita por el hecho de utilizar material secundario (antes residuo) podrían incluirse en el caso en el que el BTC sea fabricado con residuos de antiguos bloques.

Como se indicó anteriormente, para la obtención de los resultados del ACV se ha utilizado el software SimaPro 7.3.3. Se manejaron 3 métodos de evaluación para diferentes categorías de impacto:

- TRACI 2 V.4: *Destrucción de la capa de ozono, Cambio climático, Oxidantes fotoquímicos (smog), Acidificación, Eutrofización, Carcinogénicos, No carcinogénicos sobre la salud humana, Efectos respiratorios sobre la salud humana y Ecotoxicidad.*
- ReCiPe Midpoint (I) V1.06 / World ReCiPe I: *Uso de suelo agrícola y urbano, Agotamiento de recursos hídricos, Agotamiento de recursos minerales y Agotamiento de recursos fósiles.*
- CED (Cumulative Energy Demand): *Energía embebida.*

Los resultados del ACV del muro de los BTC-1 se muestran en la Tabla 10 por Unidad Funcional, es decir 1m² de muro.

Categoría de impacto	MP y fabricación	Obra y mantenimiento	Fin de vida	Total
Destrucción de la capa de ozono (kg CFC-11 eq)	3.99E-07	1.04E-07	1.48E-08	5.18E-07
Cambio climático (kg CO ₂ eq)	55.23	2.04	3.64	60.91
Oxidantes fotoquímicos - smog (kg O ₃ eq)	8.46	0.07	1.05	9.59
Acidificación (mol H ⁺ eq)	21.12	0.18	1.95	23.24
Eutrofización (kg N eq)	1.63E-02	2.47E-04	2.06E-03	1.86E-02
Salud Humana: carcinogénicos (CTUh)	4.01E-07	1.41E-09	5.04E-08	4.53E-07
SH: no carcinogénicos (CTUh)	5.99E-06	7.37E-08	4.85E-07	6.55E-06
SH: efectos respiratorios (kg MP10 eq)	4.75E-02	6.62E-04	2.68E-03	5.08E-02
Ecotoxicidad (CTUe)	54.94	0.04	9.30	64.29
Uso de suelo agrícola y urbano (m ² a)	7.47	4.85	2.48	14.8
Agotamiento de recursos hídricos (m ³)	4.08E-01	1.43	8.11E-05	1.84
Agotamiento de recursos minerales (kg Fe eq)	7.31E-03	3.07E-03	5.26E-06	1.04E-02
Agotamiento de recursos fósiles (kg Petróleo eq)	10.36	0.23	1.22	11.81
Energía embebida (MJ)	446.77	16.59	53.77	517.13
CTUh : Unidad de Toxicidad Humana (Casos de toxicidad/kg _{emisión}) CTUe: Unidad de Toxicidad en los Ecosistemas (PAF m ³ día /kg _{emitido}). PAF: Fracción Potencialmente Afectada de especies.				

Tabla 10. Resultados globales del ACV del muro de BTC-1

Como se puede observar, las materias primas y fabricación es la etapa que presenta mayor impacto ambiental, con más del 70% del impacto sobre todas las categorías excepto la del *agotamiento de los recursos hídricos*.

El consumo de agua durante la construcción del muro, es el proceso que más contribuye al *agotamiento de los recursos hídricos*. Además, esta etapa de obra repercute de manera importante sobre la *destrucción de la capa de ozono*, el *agotamiento de los recursos hídricos* y el *agotamiento de los recursos minerales*. El fin de vida contribuye entre un 3% y 23% sobre el total.

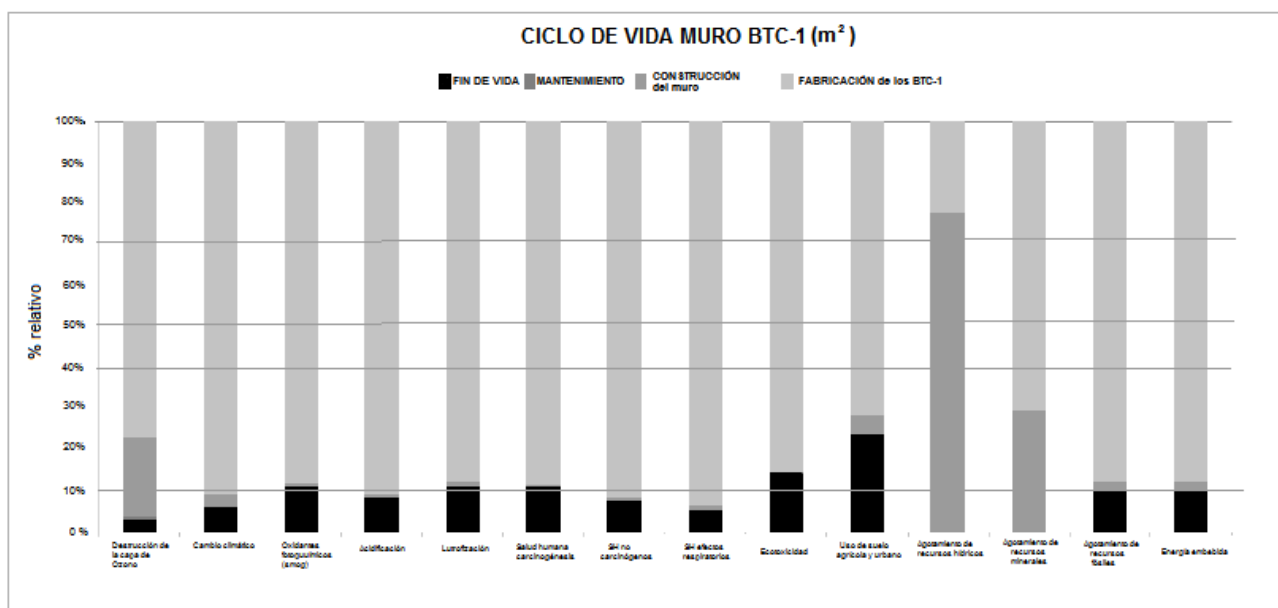


Figura 1. Impactos del un metro cuadrado de muros fabricado con BTC-1

El mezclado mediante la revolvedora es el causante de más del 50% del impacto sobre el *smog*, *acidificación*, *eutrofización*, *carcinogénicos*, *ecotoxicidad*, *agotamiento de los recursos fósiles* y en la *energía embebida*, a consecuencia de la producción y combustión de la gasolina que consume.

El cemento y más concretamente su clinker, es el responsable de más de la mitad del impacto sobre la *destrucción de la capa de ozono*, *cambio climático*, *no carcinogénicos* y *efectos respiratorios*.

La arena incide con más 55% del impacto total sobre el *uso del suelo agrícola y urbano*, *agotamiento de los recursos hídricos* y *agotamiento de los recursos minerales*. El transporte de las materias primas incide hasta un 10% dependiendo de la categoría de impacto.

Finalmente, la producción y combustión de la gasolina es el proceso con más *energía embebida*, toda ella procedente de recursos fósiles. En segundo lugar en consumo energético sería el cemento Portland.

Los resultados del ACV del muro de los BTC-2 se muestran en la Tabla 11 por Unidad Funcional, es decir 1 m² de muro.

Como se puede observar, las materias primas y fabricación presentan el mayor impacto ambiental con valores entre un 22% - 92% del total del impacto para cada categoría.

La etapa de construcción del muro contribuye de manera importante en las categorías de *agotamiento de los recursos hídricos* y en menor medida sobre la *destrucción de la capa de ozono* y el *agotamiento de los recursos minerales*.

Categoría de impacto	MP y fabricación	Obra y mantenimiento	Fin de vida	TOTAL
Destrucción de la capa de ozono (kg CFC-11 eq)	1.08E-06	1.04E-07	1.32E-08	1.20E-06
Cambio climático (kg CO ₂ eq)	35.74	2.04	3.40	41.18
Oxidantes fotoquímicos - smog (kg O ₃ eq)	6.34	0.07	1.01	7.42
Acidificación (mol H ⁺ eq)	12.24	0.18	1.86	14.28
Eutrofización (kg N eq)	1.50E-02	2.47E-04	1.97E-03	1.72E-02
Salud Humana: carcinogénicos (CTUh)	2.88E-07	1.41E-09	4.73E-08	3.37E-07
SH: no carcinogénicos (CTUh)	3.49E-06	7.37E-08	4.56E-07	4.02E-06
SH: efectos respiratorios (kg MP10 eq)	1.83E-02	6.62E-04	2.57E-03	2.15E-02
Ecotoxicidad (CTUe)	50.89	0.04	8.73	59.66
Uso de suelo agrícola y urbano (m ² a)	11.21	0.00	0.02	11.24
Agotamiento de recursos hídricos (m ³)	0.41	1.43	0.00	1.84
Agotamiento de recursos minerales (kg Fe eq)	3.51E-02	3.07E-03	4.70E-06	3.82E-02
Agotamiento de recursos fósiles (kg Petróleo eq)	8.85	0.23	1.14	10.22
Energía embebida (MJ)	451.14	11.85	48.11	511.10

CTUh : Unidad de Toxicidad Humana (Casos de toxicidad/kg_{emisión})
 CTUe: Unidad de Toxicidad en los Ecosistemas (PAF m³ día /kg_{emitido}).
 PAF: Fracción Potencialmente Afectada de especies.

Tabla 11. Resultados globales del ACV del muro de BTC-2

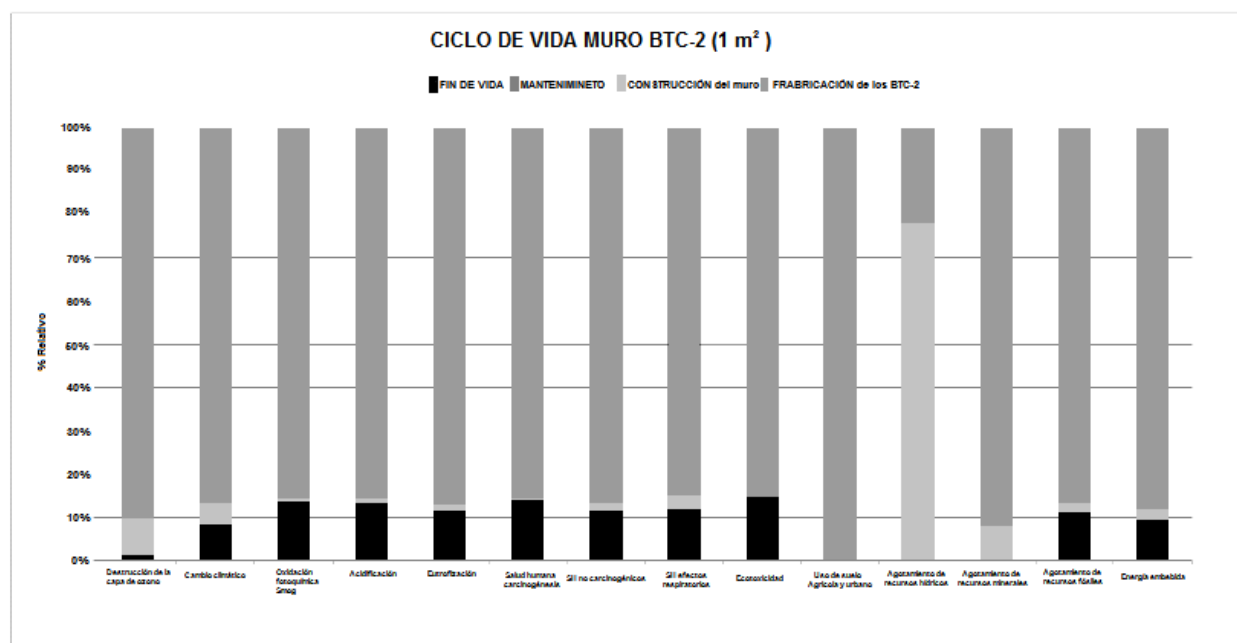


Figura 2. Impactos del un metro cuadrado de muros fabricado con BTC-2

El fin de vida es otra etapa con impacto relevante sobre la mayoría de las categorías. Por último, el mantenimiento no influye sobre el total. El proceso de mezclado mediante la revolvedora es el causante de más del 50% del impacto sobre el *smog*, *cambio acidificación*, *eutrofización*, *carcinogénicos*, *no carcinogénicos*, *ecotoxicidad*, *agotamiento de los recursos fósiles* y en la *energía embebida*, debido a la producción y combustión de la gasolina que consume.

El Hidróxido de calcio es el responsable del 1% del impacto en la categoría de ecotoxicidad y del 80% del impacto en la categoría de destrucción de la capa de ozono, debido al diesel que utiliza la maquinaria para su extracción.

El embalaje del Hidróxido de calcio presenta su mayor impacto que el *uso del suelo* ya que se requieren plantaciones madereras para la fabricación del papel aunque también incide sobre el resto de categorías.

La arena incide con un 50% del impacto total sobre el *agotamiento de los recursos hídricos* y con un 20% sobre el *agotamiento de los recursos minerales*.

El transporte de las materias primas incide hasta un 15% dependiendo de la categoría de impacto. En este caso también es la producción y combustión de la gasolina en el proceso con más *energía embebida*, toda ella procedente de recursos fósiles. En segundo lugar el consumo energético sería el del Hidróxido de calcio.

La Tabla 12 muestra un resumen de los resultados del ACV de los BTC. Se evidencia el impacto por bloque, hasta que se construye el muro y de todo el ciclo de vida de ambos tipos de bloques.

Categoría de impacto	BTC-1	BTC-2
Destrucción de la capa de ozono (kg CFC-11 eq)	5,18E-07	1,20E-06
Cambio climático (kg CO ₂ eq)	60.91	41.18
Oxidantes fotoquímicos - smog (kg O ₃ eq)	9.59	7.42
Acidificación (mol H ⁺ eq)	23.24	14.28
Eutrofización (kg N eq)	1.86E-02	1.72E-02
Salud Humana: carcinogénicos (CTUh)	4.53E-07	3.37E-07
SH: no carcinogénicos (CTUh)	6.55E-06	4.02E-06
SH: efectos respiratorios (kg MP10 eq)	5.08E-02	2.15E-02
Ecotoxicidad (CTUe)	64.29	59.66
Uso de suelo agrícola y urbano (m ² a)	14.8	11.24
Agotamiento de recursos hídricos (m ³)	1.84	1.84
Agotamiento de recursos minerales (kg Fe eq)	1.04E-02	3.82E-02
Agotamiento de recursos fósiles (kg Petróleo eq)	11.81	10.22
Energía embebida (MJ)	517.13	511.10

Tabla 12. Resumen de resultados del ACV de los BTC

Material	Energía incorporada en Mj/m ²	Emsiones de CO ₂ /m ²
Bloque de concreto	385.12 ²	53.49 ²
Ladrillo recocido	579.00 ¹	80.41 ¹
BTC estabilizado con cemento al 8%	517.13 ³	69.91 ³
BTC estabilizado con Hidróxido de calcio al 7%	511.10 ³	42.18 ³
¹ Vázquez Espío, 2001 ² Howland Albear & Jiménez de la Fe, 2010 ³ Datos obtenido del ACV realizado		

Tabla 13. Comparativo con otros materiales utilizados en mampostería

Conclusiones.

Con base de los resultados obtenidos, es posible plantear las siguientes conclusiones:

1. La capacidad de carga de los BTC estabilizados con Hidróxido de calcio alcanza resultados similares a los que se estabilizaron con cemento. Incluso en este caso, la resistencia obtenida con el Hidróxido de calcio fue 1.67 % en promedio mayor que la del cemento CPO-20.
2. La mayor resistencia a la compresión fue de 93.62 Kg/cm² en la población de BTC estabilizados con 7 % de Hidróxido de calcio y ésta fue superior en un 7.94 % con respecto a la máxima resistencia obtenida en lo BTC estabilizados con 8% de cemento CPO-20.
3. Es un hecho que los BTC estabilizados con hidróxido de calcio absorben en promedio un 11.73 % más agua que los bloques con cemento CPO-20. Esto significa que los BTC-2 presentan una porosidad relativa mayor que los BTC-2. Sin embargo, aunque este hecho de puede considerar como perjudicial por la cantidad de agua contenida en un momento determinado, también indica de manera favorable que son potencialmente más rápidos de secarse al estar en contacto con el corrientes de aire que aceleran su secado, hecho que se ha de comprobar en experimentos anteriormente realizados
4. Los resultados obtenidos referentes al porcentaje de absorción de agua de los BTC-1 y BTC-2 se encuentran dentro del rango indicados por la norma NMX-C-404-ONNCCE-2005, que indica que el porcentaje de absorción para tabiques recocidos es de 21%.
5. Como se puede observar, la mayor parte de los conceptos evaluados para el caso de los bloques de tierra comprimida estabilizados con cemento (BTC-1) presenta valores

- superiores a los BTC-2, en los que el estabilizante es el Hidróxido de Cal, por lo que se concluye que tienen un menor impacto ambiental.
6. Este hecho obedece a que, aún con la baja cantidad de estabilizante empleado, el impacto que conlleva la fabricación del cemento CPO-20 es mucho más elevado que el del Hidróxido de calcio.
 7. Este valor resulta especialmente significativo para conceptos tales como la destrucción de la capa de ozono en el que los bloques con cemento cuadruplican la afectación de los que llevan cal. Consecuentemente el dato sobre los efectos en el cambio climático son casi cincuenta por ciento superiores en los BTC-1.
 8. Es evidente que la elevada temperatura a la que se produce el cemento CPO-20 en comparación con el Hidróxido de calcio así como la duración de su proceso, provocan un fuerte efecto en la generación de gases de efecto invernadero. Mientras que el cemento CPO-20 requiere temperaturas de calcinación del carbonato de calcio y del clinker cercanas a los 1500°C, el Oxido de calcio se produce a 900°C.
 9. En los efectos sobre la salud también resulta notablemente más perjudicial el uso del cemento CPO-20. Este fenómeno se deriva de la emisión de sustancias contaminantes que se generan durante la producción del cemento CPO-20 en el que además de los desechos generados por la combustión, la materia prima despiden gases al calcinarse.
 10. Destaca el impacto del embalaje del Hidróxido de calcio sobre el uso del suelo debido a los árboles requeridos para la fabricación del papel. En ambos casos la etapa de construcción del muro, contribuye de manera importante sobre el agotamiento de los recursos hídricos y sobre el agotamiento de los recursos naturales. El final del proceso influye hasta en un 23% sobre el ciclo de vida de los BTC-1 y mientras que el 15% sobre los BTC-2. El mantenimiento apenas influye sobre el total. No así para el cemento CPO-20, ya que el impacto más importante son los SH: efectos respiratorios (kg MP10 eq) y no relacionados al embalaje.
 11. Con relación a la energía embebida resultó ser superior en un 1.17% el caso de los bloques que utilizan cemento. Esto al ser superior la energía embebida del cemento CPO_20 que la del Hidróxido de calcio.

12. Si bien cualquier proceso industrial tendrá un efecto negativo sobre el medio ambiente que debe ser evaluado con la finalidad de identificar las fases de su transformación que resultan más nocivas. En resumen, para el caso de estudio presente, se ha podido constatar que el estabilizante adecuado para fabricar bloques de tierra comprimida (BTC) es el Hidróxido de calcio por tener menor impacto que el cemento sobre el entorno natural y sobre la salud.
13. Por último al comparar los BTC con materiales convencionales podemos ver que el BTC con Hidróxido de calcio es el que mejor comportamiento tiene, solo superado en la energía incorporada por los bloques de concreto, pero con menor producción de CO² que estos últimos.

Referencias.

- Alcaraz Marín, J. (2012). *Microestructuras del hormigón*. Murcia: Univeraidad Politécnica de Cartagena.
- Andrade (1997). *Manual de estabilización de suelos con cal*. Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España, Madrid.
- Arenas, F. J. (03 de 03 de 2008). *Los materiales de construcción y el medio ambiente*. Consultado el 08 de 04 de 2011, (En red) Disponible en http://huespedes.cica.es/aliens/gimadus/17/03_materiales.html
- Fernández, C. (1992), *Mejoramiento y estabilización de suelos*, Limusa, México.
- Gilisagasti, N., y Elorza, E. (2000). *Cemento*. Universidad del País Vasco. Gipuzkoa.
- Howland Albear, J. J., & Jiménez de la Fe, S. (2010). *Obras, Revista Cubana de la Construcción*. Recuperado el 9 de Enero de 2012.
- International Standad (2006). ISO 14040:2006. Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework. Switzerland: ISO.
- International Standad (2006). ISO 14044:2006. Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines. Switzerland: ISO.
- Instituto Mexicano de Normalización y Certificación, AC. (2008). NMX-SAA-14040-IMNC-2008. Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia. México: IMNC.
- Juárez Badillo, Eulalio; Rico Rodríguez, Alfonso (1975). *Mecánica de suelos, tomo I, fundamentos de la mecánica de suelos*. México: Limusa.

- Eades, J.L. y Grim, R.E., (1966). "A quick test to determine lime requirements for lime stabilization". Highway Res. Rec. Bull. No. 139.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., (2005). "NMX-C-036-ONNCCE-2004 "Industria de la Construcción - bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural – resistencia a la compresión – método de prueba". ONNCCE. México
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., (2005). "NMX-C-037-ONNCCE-2005 "Industria de la construcción-mampostería-determinación de la absorción total y la absorción inicial de agua en bloques, tabiques o ladrillos y tabicones-método de ensayo". ONNCCE. México
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., (2005). "NMX-C-404-ONNCCE-2005 "Industria de la Construcción - bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural - especificaciones y métodos de prueba". ONNCCE. México
- Roux, R. (1990). *Utilización del material adobe para la vivienda popular en la zona conurbada de la desembocadura del río Pánuco*. Facultad de Arquitectura de la U.A.T., Tampico.
- Roux, R. (2010). *Los Bloques de Tierra Comprimida en Zonas Húmedas*. Plaza y Valdés, México.
- Vázquez Espío, M. (2001). Construcción e impacto sobre el ambiente: el caso de la tierra y otros materiales. Informes de la Construcción, 29-43.