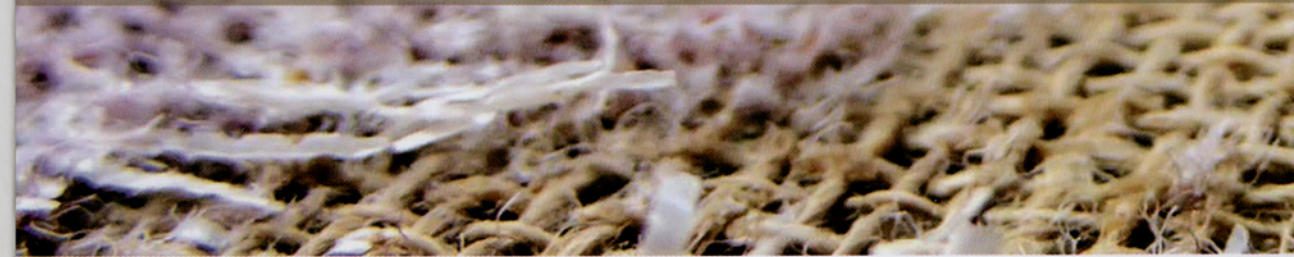


Los Bloques de Tierra Comprimida (BTC)

en zonas húmedas



El presente libro pretende demostrar la viabilidad de la utilización de materiales alternativos de construcción, como es el caso de los Bloques de Tierra Comprimida (BTC). En el desarrollo del documento se ofrecen las pruebas que se realizaron a poblaciones experimentales según las normas mexicanas, para demostrar la calidad del material y demostrar que cumple con los más altos estándares.

Por otra parte se plantea el uso de estabilizantes naturales como son el mucílago de nopal y el acíbar de sábila como una alternativa sustentable de estabilización para los BTC; asimismo se plantea el uso de la cal como material ecológico de construcción, se exponen sus propiedades y usos en la construcción con tierra.

Por último se muestra una vivienda experimental diseñada con la tecnología estudiada y en donde se demuestran las ventajas económicas y sustentables del uso de los BTC, del mucílago y de la cal, lo cual permitirá al lector tener una idea clara de que estos materiales alternativos se consideran una posibilidad sustentable para edificar viviendas en México.



ISBN 978-607-402-188-2



P
Y
V

Los Bloques de Tierra Comprimida (BTC) en zonas húmedas

Rubén Salvador ROUX GUTIÉRREZ

Rubén Salvador
ROUX GUTIÉRREZ

LOS BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA (BTC) EN ZONAS HÚMEDAS

Los bloques de tierra comprimida (BTC) en zonas húmedas

Rubén Salvador Roux Gutiérrez



Primera edición: mayo 2010

- © Rubén Salvador Roux Gutiérrez
- © Universidad Autónoma de Tamaulipas
- © Cotacyt
- © FADU
- © Fomix
- © Anfacal
- © Conavi
- © Plaza y Valdés, S. A. de C. V.

Plaza y Valdés, S. A. de C. V.
Manuel María Contreras 73. Colonia San Rafael
México, D. F., 06470. Teléfono: 5097 20 70
editorial@plazayvaldes.com

Calle de las Eras 30, B.
28670, Villaviciosa de Odón.
Madrid, España. Teléfono: 91 665 89 59
madrid@plazayvaldes.com
www.plazayvaldes.com

ISBN: 978-607-402-188-2

Impreso en México / *Printed in Mexico*

Dedicatoria

El presente trabajo de investigación se realizó con el afán de hacer asequible un mejor modo de vida para las familias asentadas en la región de la zona sur de Tamaulipas sobre todo, sin embargo, no se descarta que esta posibilidad se multiplique y un mayor número de personas logre con ello satisfacer sus necesidades de seguridad, como es contar con un lugar donde vivir.

Pensando y trabajando por lo anterior, dedico este trabajo a todos aquellos que, como un servidor y el ingeniero Alfonso Vela Mascorro, nos esforzamos por sumarnos a la causa del desarrollo de nuestro entorno, apoyando, asimismo, la difusión de la arquitectura vernácula.

*Tener fe es construir sobre lo que sabemos que está aquí,
para poder alcanzar lo que sabemos que está allá.*

CULLEN HIGHTOWER

Agradecimientos

Agradezco el apoyo brindado por la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de la Universidad Autónoma de Tamaulipas, que durante 17 años ha apoyado esta línea de investigación, así como a todos los directores que a lo largo de este tiempo tuvieron fe en el proyecto: Arq. Roberto Margain Manotou, Arq. Juan José Cuevas Lomelí y Arq. Eduardo Arvizu Sánchez.

A la maestra Gabriela Clemente Martínez, por el apoyo en la revisión de la redacción del documento.

A mi familia, por perdonar el tiempo que dediqué a este proyecto y no a ellos, en especial mi esposa, Dra. Dora Luisa Roux Oropeza; a mis hijos LDG Dora Lehida y Rubén Iván, por su apoyo para la realización de este trabajo.

A todos muchas gracias.

Índice

Prólogo	13
Introducción	15
Utilización del adobe en vivienda en el mundo	19
<i>Rubén Salvador Roux Gutiérrez</i>	
Estabilizantes utilizados en la elaboración de BTC	27
<i>Yolanda Guadalupe Aranda Jiménez</i>	
La cal como componente de la arquitectura de tierra	43
<i>Luis Fernando Guerrero Baca, Elia Mercedes Alonso Guzmán, Juan Alberto Bedolla Arrollo</i>	
Resultados obtenidos sobre el estudio de estabilización con cemento en diferentes tipos de arcilla	69
<i>Rubén Salvador Roux Gutiérrez</i>	
Entre lo tropical y lo tradicional: desarrollando un modelo sustentable de vivienda de interés social en la zona del Golfo de México	103
<i>José Adán Espuna Mújica, Mireya Alicia Rosas Lusett</i>	
Modelo de vivienda experimental.	133
<i>Rubén Salvador Roux Gutiérrez</i>	
Bibliografía	177

Prólogo

En los últimos años la vivienda en México ha generado diversos problemas, uno de ellos se relaciona de manera importante con la utilización de los materiales con los que es edificada —específicamente la materia prima que se utiliza para la fabricación de ésta— los cuales son traídos desde lugares lejanos, factor que eleva el costo de adquisición del material y, por ende, de la vivienda.

Esta situación fue el móvil para hablar sobre el particular en la presente investigación, cuyo resultado consideramos halagüeño para quienes se dedican al ramo de la construcción. Entre otros detalles destaca un producto barato, con las características técnicas adecuadas para ser utilizado en zonas húmedas.

En la parte inicial de la investigación se presentan nuestras observaciones periféricas sobre la viabilidad de encontrar en las zonas de estudio algunos de los componentes para crear la materia prima de un material para construir habitaciones a bajo costo, lo cual significó para nosotros un área de oportunidad que aprovechamos, iniciando las actividades relacionadas con el aspecto experimental en el año 1989, en el laboratorio de materiales de la Facultad de Arquitectura, institución que nos facilitó las instalaciones y el equipo necesarios para tal efecto.

En la parte final del proceso, la respuesta tentativa fue comprobada y, con entusiasmo, nos percatamos de que, efectivamente, la zona que con orgullo habitamos cuenta con los insumos necesarios para proveer de materia prima necesaria a quienes decidan aventurarse auspiciando este joven proyecto, que de antemano proporcionará a gran parte de la población el acceso a viviendas dignas de bajo costo y que, de manera colateral, apoyará la difusión de la arquitectura vernácula.

Asimismo, se presentan las alternativas de uso de impermeabilizantes naturales como lo es el mucílago de nopal, así como también la utilización de cal como alternativa de aglutinante. Por último, se trata lo relacionado con los aspectos de habitabilidad de un modelo de tierra y el proceso constructivo propuesto para edificar una vivienda de tierra en zonas húmedas.

Introducción

La presente investigación expone una alternativa asequible para aquellas personas que, de una u otra manera, buscan como condición elemental satisfacer una de sus necesidades básicas: contar con una casa-habitación. Actualmente, la población a la cual se hace referencia habita en casas —si se les puede nombrar así— construidas con materiales de desecho y, como máximo, poseen un cuarto redondo; éstas se localizan en las periferias de las principales ciudades del país, en particular nos referimos a los polos de desarrollo de la zona metropolitana de los municipios de Tampico, Madero, Tamaulipas. Dichos asentamientos son ilegales y aumentan en número diariamente, producto de situaciones como la emigración del campo a la ciudad, de la introducción y desarrollo de la industria, entre otros.

Por tales motivos, se consideró prioritario buscar una forma eficaz para proveer vivienda digna y con ello apoyar a un gran número de población con menor poder adquisitivo. La solución para lograr tan difícil tarea fue la de fabricar elementos de construcción que abarataran costos, que fueran económicos, hechos a base de tierra arcillosa equiparable al adobe, que contarán con características afines de trabajo y que, como material de construcción, tuviera presencia en todo el mundo. Se sabe que más de un tercio de la población del planeta vive en viviendas construidas con dicho material.

En México existe una gran cantidad de ejemplos de lo que es la arquitectura de adobe, todos ellos con características muy particulares de la región donde se desarrollan. La historia del uso del adobe en nuestro país se remonta hasta la época prehispánica, existiendo hasta la fecha pueblos enteros edificados con dicho material, como lo son los casos de Coyoatepec, Cholula y Comalcalco, por mencionar algunos.

La presente investigación se enfocó al análisis de la fabricación de tabiques de adobe, y ello dio inicio con la observación de los suelos en la zona conurbada del Río Pánuco, así como con el estudio de las diferentes técnicas de estabilización de suelos

arcillosos, las cuales permitieran modificar en éstos las propiedades no deseadas y, a la vez, mejorar otras condiciones, tales como la resistencia de compresión y su durabilidad, que dieran como resultado un producto de alta calidad y bajo costo, con la posibilidad de ser utilizado en la localidad.

Asimismo, se examinó lo referente al proceso de fabricación denominado “adobe prensado” o “bloque de suelo cemento”, el cual ha presentado mejores resultados que los procesos manuales tradicionales. Para finalizar, se puntualizan los datos obtenidos en los estudios realizados a los especímenes de prueba, en lo referente a los ensayos por resistencia a la compresión simple, absorción e intemperismo.

Marco histórico

A nivel mundial, la vivienda se ha constituido como un problema grave, el cual se acrecienta en los países del tercer mundo, principalmente por la falta de recursos económicos —de los propietarios, iniciativa privada y sector público— necesarios para solucionarlo.

México tiene un déficit de vivienda de 8 millones de unidades en la actualidad, número que se incrementa a la par de la población, esto indica que los próximos doce años tendrán que construirse 5.9 millones y rehabilitar 6 millones de unidades más, según estudios realizados por el Instituto Tamaulipeco de la Vivienda y el Urbanismo.¹

El problema inflacionario en el que el país se encuentra inmerso ha complicado más la situación; por un lado está el aumento en los costos de los materiales, y por otro, la falta de créditos en apoyo para la construcción de viviendas populares, lo que hace necesario plantear alternativas acordes a la economía actual.

Esta panorámica holística proporciona una idea de las acciones energéticas que deberán aplicarse por parte del gobierno y la iniciativa privada para dar solución a la problemática de la vivienda.

El caso particular de la zona metropolitana de Tampico y Madero constituye un modelo de análisis, ya que en ella se asienta la cuarta parte de la población del estado de Tamaulipas, que suma la cantidad de 1.1 millones, aproximadamente, donde la población económicamente activa representa 33%.² Dentro de este sector existe un

¹ Sergio Higuera (1981), *La casa de tierra*, p. 15.

² INEGI (1980), *Censos generales de población y vivienda*, Estado de Tamaulipas, volumen II, tomo 28, pp. 87 y 93.

INTRODUCCIÓN

gran número de personas (36 300 hab.)³ que gana el salario mínimo o menos, asimismo, sólo 21%⁴ posee vivienda propia.

Tal complicación se acrecienta si se considera que el sector productivo de la población únicamente representa 52%⁵ de las personas en edad de trabajar, lo que indica que existe 48%⁶ de habitantes que no cuenta con un ingreso fijo; este hecho hace imposible el poder acceder a una vivienda digna a mediano plazo.

Otro factor que incrementa la falta de un lugar para vivir es la emigración del campo a la ciudad, este indicador muestra que, en la zona, confluyen 220 mil⁷ personas anualmente.

De acuerdo con estos datos, se advierte que existen grandes cantidades de asentamientos humanos en áreas marginadas, donde no se cuenta con servicios públicos mínimos, como: agua potable, energía eléctrica y drenaje; colateralmente se produce contaminación, y, por otra parte, se genera el inconveniente de la tenencia de la tierra, ya que la mayoría de estos asentamientos se encuentra sobre tierras agrícolas ejidales.

Por tanto, se hace necesaria la modificación de las políticas tradicionales de vivienda en lo que corresponde al Plan Nacional sobre el particular, en el que actualmente se plantea, en uno de sus puntos principales, la creación y estudio de nuevos materiales para la construcción de viviendas, cuya característica es que sean de bajo costo, alta calidad y que permitan dar nueva solución al problema de la vivienda.

Se estima que para el año 2005, en el área metropolitana de Tampico y Madero se registraba una población de 652 mil habitantes,⁸ lo cual obligaba a emprender de inmediato las acciones necesarias para dar solución al conflicto antes mencionado.

Una alternativa para atenuar esta situación es la utilización de materiales regionales. En la zona de Tampico y Cd. Madero, el subsuelo se compone, entre otros elementos, de material arcilloso adecuado para la fabricación de adobe de bajo costo, producto que se piensa estaría al alcance de los sectores menos favorecidos en cuestiones monetarias; todo ello dentro de los lineamientos marcados en el Plan Nacional mencionado con anterioridad.

³ *Ibidem.*

⁴ *Ibidem*, pp. 97-128.

⁵ *Ibidem.*

⁶ *Ibidem.*

⁷ *Ibidem.*

⁸ Codepan (1982), *Plan de Ordenación de la Zona Conurbada del Río Pánuco*, versión abreviada, p. 33.

Antecedentes

Se conoce con el nombre de adobe al material arcilloso con el cual se pueden producir tabiques, recubrimiento y morteros; su composición física se da a partir de suelos arcillosos, limos, arenas y agregados pétreos menores de 4.75mm, así como de fibras vegetales y otros productos como el estiércol.

Otra definición dice que “el adobe es un tabique de barro sin cocer. La tierra con que se hace debe de ser limpia, sin piedras y con la menor cantidad de arena posible”.⁹

En ambas definiciones se advierte que éste es un material plástico arcilloso-limoso, que requiere de arena, grava, fibras y otros productos que permitan su estabilización en mayor o menor grado.

La elaboración del material en cuestión de la manera tradicional se realiza haciendo una excavación en el suelo, en donde se deja remojar la tierra de un día para otro, de este modo se logra la putrefacción de la misma. Posteriormente, se amasa, agregándole suficiente agua para lograr un lodo muy bien mezclado y macizo, al cual se le integran algunos de los siguientes materiales: paja, zacate, estiércol, hojas de pino, crines, pelos de bestia, en la proporción de una parte por cinco de tierra, para que sirva de amarre o estructura material.

Una vez realizado lo anterior, se procede al llenado de los moldes con el material que se ha obtenido; procurando llenar todos los huecos y rincones, se apisona con la mano para obtener una pasta compacta. Para evitar que el lodo se pegue, se “polvea” el molde con el mismo material seco, lo cual permite un desmolde rápido y sin deterioro de la pieza.

⁹ Dirección de Ingeniería Sanitaria, SSA (1976), *Manual de saneamiento, vivienda, agua y desecho*, p. M5.

Utilización del adobe en vivienda en el mundo

Rubén Salvador Roux Gutiérrez

“**E**l material de construcción, llamado concreto de tierra, barro seco, tierra apisonada, tapial, tapia con paja o adobe, se conoce desde hace miles de años. Hoy en día, se utiliza en la mitad del globo terrestre”.¹

Es sabido que este material de construcción se utiliza con mucha frecuencia en los países pobres, advirtiéndose una correlación con la explosión demográfica. Su amplia utilización se debe a su bajo costo, la fácil obtención de la materia prima utilizada en la fabricación de muros, así como de bóvedas autosustentantes. Por tal motivo, en los países pobres del mundo este material presenta ventajas económicas considerables.

En América, el uso de adobe se extiende desde Estados Unidos hasta América Central. Una muestra de lo que es la arquitectura de adobe en América se localiza en Arizona, Nuevo México, así como en los estados mexicanos de Sonora, Chihuahua, Nuevo León, Tamaulipas, Zacatecas, Tlaxcala, Morelos, Yucatán y en los países centroamericanos de Guatemala, Honduras y El Salvador; en todos ellos se ha difundido ampliamente el uso de este material para la fabricación de viviendas campesinas y populares en centros urbanos.²

En la República mexicana, el adobe se ha utilizado como material para la edificación de viviendas baratas, sobre todo en la zona norte y centro del país, las cuales son consideradas, por tradición, como áreas de gran producción adobera.

Este material, utilizado en climas tropicales sub-húmedos, ha sido rechazado debido al alto grado de deterioro del mismo por causas ambientales, así como por su alta absorción de humedad.

¹ Patrick Bardou y Varaujan Arzoumainian (1981), *Tecnología y Arquitectura, Arquitectura de adobe*, pp. 7-10.

² Conescal (1982), *Tecnología de tierra y su aplicación en la construcción de espacios educativos*, pp. 9-14.

El adobe es un material que ha sido utilizado tanto en México como en diversas partes del mundo desde tiempos inmemorables; aún en la actualidad existen ciudades enteras hechas con este material, las cuales tienen hasta tres siglos de historia y continúan habitadas, tales como el Cairo y Jerusalén.

A pesar de ello, en la presente investigación se plantea la necesidad de la utilización de nuevas técnicas de fabricación que hagan del adobe un material más seguro y confiable técnicamente; asimismo, resulta indispensable darle mayor difusión, con lo cual se permitirá que se considere al adobe como un material de buena calidad para la construcción, al alcance, sobre todo, de las personas menos favorecidas económicamente hablando y, en general, para todo aquel que tenga a bien preferirlo para la edificación de su vivienda.

Características de las arcillas

Siendo la arcilla el principal componente en la elaboración de adobe, se hace necesario conocer más acerca de ésta. La arcilla es producto de la descomposición química de los minerales que conforman a las rocas ígneas y metamórficas. Estos suelos están constituidos básicamente por silicatos de aluminio, así como por silicatos de magnesio, hierro y otros materiales, todos ellos hidratados. Estos minerales tienen una estructura cristalina y se disponen atómicamente en láminas, las cuales se denominan sílica y aluminica.

En general, las partículas de las arcillas tienen un tamaño del orden de 2 micras o menos, presentando una gran actividad eléctrica. Es conocido el hecho de que en los suelos finos predominan las fuerzas eléctricas producto de los minerales cristalinos, algunos de los cuales son muy pequeños en tamaño, lo que hace que tengan una actividad muy baja superficialmente y no contribuyan a los efectos de plasticidad y cohesión, tales como lo hacen el cuarzo y la calcita.

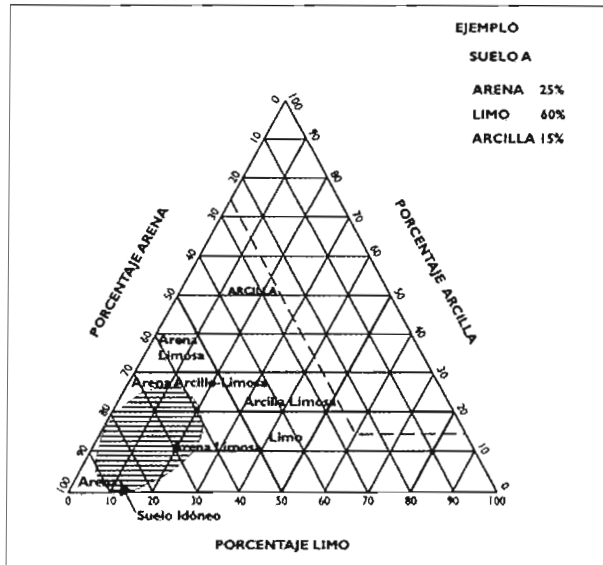
Los minerales cristalinos que sí contribuyen a la plasticidad y cohesión son los llamados *arcillosos*, de los cuales existen tres grupos, a saber: las caulinitas, las montmorilonitas e ilitas (véase figuras 1 y 2).

Clasificación de las arcillas

Con base en lo anterior y en concordancia con los minerales que conforman cada uno de los suelos, se presenta de manera sucinta una descripción sobre las arcillas:

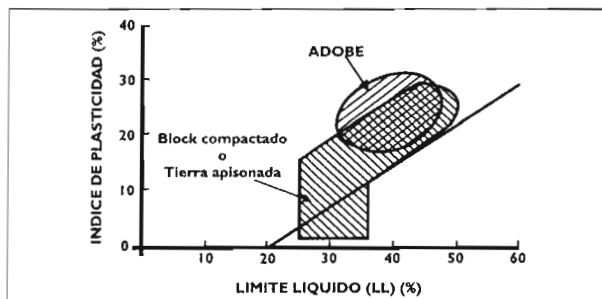
Caolinitas: están formadas por una lámina sílica y otra alumínica que se superponen indefinidamente. La unión entre todas las retículas es lo suficientemente firme para no permitir la penetración de moléculas de agua entre ellas (absorción). En consecuencia, las arcillas caoliníticas serán relativamente estables en presencia del agua.

Figura 1. Gráfica triangular de clasificación de suelos



Fuente: United Nations Centre for Human Settlements, 1985.

Figura 2. Gráfica de clasificación de suelo apropiado para realizar adobes y BTC



Fuente: United Nations Centre for Human Settlements, 1985.

Montimorilonitas: están formadas por una lámina aluminica entre dos sílicas superponiéndose indefinidamente. En este caso, la unión entre las retículas del mineral es débil, por lo que las moléculas de agua pueden introducirse en la estructura con relativa facilidad. Una condición de éstas es la de que, especialmente en presencia del agua, presentan fuertes tendencias a la inestabilidad.

Illitas: están estructuradas analógicamente como las montimorilonitas, pero su construcción interna manifiesta tendencias a formar grumos, de manera que reduce el área expuesta al agua por unidad de volumen, por ello su expansividad es menor que la de las montimorilonitas y, en general, éstas se comportan mecánicamente más favorables.³

Utilización de las arcillas para la edificación de viviendas

Parafraseando lo anterior, una gran parte de la población del mundo vive en construcciones hechas de adobe; en consecuencia, se presume que éste es el material utilizado con mayor frecuencia. Asimismo, se ha considerado que en los países en vías de desarrollo, 80% de la población que vive en el campo utiliza el adobe como material de construcción, además de que 20% de los habitantes de las zonas urbanas de los países industrializados también utiliza la tierra como material de construcción y edificación de sus viviendas.

En los últimos 30 años se han desarrollado nuevas técnicas en la producción de materiales de construcción con base en tierra, los cuales aumentan la competitividad incluso usando materiales tradicionales.

Una de las ventajas que ofrecen los productos elaborados con elementos de tierra es la condición térmica que los hace materiales plausibles para climas extremosos, y ello lo demuestra su amplia utilización en las zonas desérticas del mundo, donde los cambios de temperatura son muy drásticos.

Pero a pesar de la gran aplicación de adobe como material para edificios y viviendas populares, resulta ser de lo menos conocido entre los docentes que se dedican a la construcción, así como por las dependencias gubernamentales de los distintos países que promueven viviendas para clases populares.

³ Eulalio Juárez Badillo y Alfonso Rico Rodríguez (1975), *Mecánica de suelo, tomo 1, Fundamentos de la mecánica de suelos*, pp. 38-39.

Estabilización de suelos arcillosos

Generalidades

Las propiedades de los suelos se pueden alterar por medio de diversos procedimientos, a saber: medios mecánicos, drenando el suelo, de forma eléctrica, por cambios de temperatura o adicionando agentes estabilizadores; para este caso en especial, se estudiará únicamente el último procedimiento mencionado.

Las principales propiedades consideradas como modificadoras del suelo al ser estabilizado son:

- a) La estabilidad volumétrica.
- b) Su resistencia mecánica.
- c) Permeabilidad.
- d) Durabilidad.
- e) Compresibilidad.

La estabilización volumétrica no se debe considerar únicamente como una medida correcta, sino también como medida de prevención y seguridad.

Lo anterior sirve para que se comprenda lo relacionado con el análisis de la estabilización de las propiedades de los suelos utilizados para la elaboración de adobe, en lo que se refiere a su resistencia mecánica y durabilidad, por considerarse las características más importantes en este caso y que a continuación se describen.

Resistencia: es común que la resistencia de los suelos sea más baja cuando se encuentra húmedo. El incremento en el peso volumétrico de un suelo, por medio de la compactación, se considera como un incremento de resistencia, pero existen excepciones, como cuando hay presiones de poro en exceso, producidas por la hidrostática.

Algunos de los principales procedimientos para incrementar el peso volumétrico de un suelo son:

- 1) Compactación mediante amasado, vibración o impacto.
- 2) Vibroflotación.
- 3) Precarga.
- 4) Drenaje.
- 5) Adición de agentes que reduzcan la fricción y cohesión entre las partículas.

Durabilidad: una característica muy deseable en todos los materiales de construcción es la durabilidad, esto también es deseable en el adobe. La durabilidad se define como la resistencia del material a los procesos de intemperismo, erosión y abrasión, ésta depende directamente del tipo de agente estabilizador empleado, compatible con el suelo.

Siendo la estabilización la parte medular que proporciona al adobe mejores características para que se considere como un material de construcción óptimo para la edificación de viviendas populares, enseguida se puntualizan los diferentes métodos para lograr dicho cometido.

Estabilización mediante otro suelo

La estabilización de un suelo que contenga material fino y grueso depende de la distribución de los diferentes tamaños de sus partículas, de la forma de la partícula, de su peso volumétrico, su fricción interna y cohesión.

Una de las propiedades más importantes en un suelo es su resistencia, y uno de los factores que mayor influencia tiene sobre ella es la distribución granulométrica de las partículas del suelo.

Un suelo contiene los finos suficientes para llenar todos los vacíos entre las partículas. Obtendrá su resistencia de contacto directo entre las partículas, pero la presencia de los finos hará que se tenga una mejor distribución de los esfuerzos.

Es un suelo que contenga una gran cantidad de finos, la trasmisión de los esfuerzos no se efectuará a través de los contactos entre las partículas gruesas, las cuales prácticamente flotan en el suelo fino y por consiguiente el comportamiento del suelo será el correspondiente a las partículas finas.⁴

La estabilización mediante el mezclado de dos o más suelos permitirá tener un producto térreo con mejores características que las originales. El contenido adecuado de finos dará las condiciones necesarias a partir de las cuales un incremento adicional en el contenido de éstos provocará un aumento sustancial en el valor relativo de soporte del suelo.

Las principales características a mejorar son la granulometría y la plasticidad de la mezcla, con lo cual se puede afirmar que se obtiene un material adecuado para la fabricación de adobe, siempre y cuando el suelo fino sea de baja plasticidad.

⁴ Carlos Fernández Loaiza (1992), *Mejoramiento y estabilización de suelos*, pp. 67-69.

Por tal motivo, los finos arcillosos de alta plasticidad deben ser controlados, ya que es sabido que porcentajes superiores a 5 y 8% de cualquier clase de finos de este tipo son nocivos; asimismo, pueden ser dañinos para la capacidad de generación de resistencia de la mezcla dentro de los niveles de deformación aceptables.

Por tanto, se determina que la plasticidad de los finos tiene una importancia decisiva en el comportamiento de los suelos.

Estabilizantes utilizados en la elaboración de BTC

Yolanda Guadalupe Aranda Jiménez

Definición de estabilizante

Un estabilizante es un material que, como su nombre lo indica, permitirá mejorar las características físicas del suelo, ya sea aumentando la resistencia a la compresión, a la tracción, o bien, reduciendo las fisuras provocadas por la retracción de la arcilla.

Tipos de estabilizantes

Los estabilizantes pueden ser de origen vegetal, como fibras y savias; de origen animal: pelo de animal, estiércol de caballo; o bien de origen mineral.

A continuación se mencionarán los estabilizantes minerales más comunes.¹

Estabilizadores minerales

Cemento: éste actúa como estabilizador contra el agua en suelos de bajo contenido de arcilla. Mientras mayor sea el contenido de arcilla, más cemento es necesario para alcanzar el mismo efecto de estabilización.

¹ Gernot Minke (2001), *Manual de construcción en tierra. La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual*, pp. 50-53.

El cemento Pórtland I es un conglomerante hidráulico que resulta de la pulverización del *clinker* a un grado de finura determinado al cual se le adiciona sulfato de calcio (yeso) o agua a criterio del fabricante para mejorar su fraguado. El *clinker* está compuesto por silicatos, aluminatos y ferroaluminatos cálcicos; estos elementos, al ser mezclados con agua, reaccionan para posteriormente formar cristales entrelazados.

Cal: el intercambio de iones ocurre en el barro con cal como estabilizador si existe suficiente humedad. Los iones de calcio de la cal se intercambian con los iones metálicos de la arcilla formando uniones estabilizadoras.

Bitumen: el bitumen es apropiado para barro con bajo contenido de arcilla.²

En una clasificación más amplia, según P. Doat, los estabilizantes físico-químicos se dividen en *hidrofobos* (que no interactúan con agua), y éstos a su vez en derivados del amoníaco, resinas y asfaltos, y los *ligantes*, donde encontramos los diferentes tipos de cal, el cemento, los lignosulfitos o productos derivados de la pulpa del papel, y el silicato de sodio.

Para el caso de suelos con 55 a 65% de arena en su composición, se recomienda estabilizarlos con cal, y para aquellos que en su composición posean un porcentaje mayor a 65% se recomienda estabilizarlos con cemento.³

Estabilizadores vegetales

Son diversos los estabilizantes que pueden ser utilizados para los bloques de tierra comprimida. Dentro de esta área se encuentran las savias de plantas aceitosas y con contenido de látex; plantas con estas características son el sisal, agave, banano y *Euphorbia herea*, este último es usado en combinación con cal y tienen su mejor aplicación como pintura estabilizadora. En muchos países se han realizado diversas investigaciones que han encontrado que usando aceite de linaza doblemente cocido se incrementa la resistencia a las inclemencias del tiempo en superficies de barro, además de que la difusión del vapor en estructuras de tierra se reduce de manera considerable.

Como puede observarse, se tienen diversas alternativas vegetales para estabilizar bloques de tierra, entre ellos el almidón cocido y las melazas, que pueden utilizarse

² *Ibid.*, p. 54.

³ Adobe Association of the Southwest (2007), *Proceedings Fourth Internacional Adobe Conference of the Adobe Association of the Southwest*.

para optimizar la estabilidad. Se ha observado que este efecto aumenta si se añaden, además, pequeñas porciones de cal.

Otro estabilizante de origen vegetal utilizado en la fabricación de BTC es el mucílago de nopal: se ha buscado mejorar el comportamiento de los adobes frente al agua y la humedad de manera empírica, por lo que se le ha adicionado con mucílago de nopal, ya sea para la elaboración del adobe mismo o como protección, adicionado en capas alternativas con jabón y alumbre. A continuación se explicará en forma más amplia qué es el mucílago y cómo actúa en la estabilización de bloques de tierra comprimida.

Mucílago o hidrocoloide: es una sustancia viscosa que se encuentra en diferentes vegetales —tanto en hojas como en tallo, raíces, entre otros— y algunas leguminosas.

La resistencia a la compresión y tracción pueden incrementarse empleando almidón y celulosa, pero esos aditivos, al mismo tiempo, reducen la cohesión y aumentan la retracción, lo cual resulta desventajoso,⁴ a diferencia del mucílago, compuesto por amilasa y amilopectina.

Características del mucílago de nopal

Las cactáceas, como se expuso con anterioridad, contienen sustancias viscosas generalmente conocidas como mucílago, el cual es una sustancia viscosa que está constituida por carbohidratos de alto peso molecular. Contiene principalmente dos polímeros naturales orgánicos: amilasa (polímero de la glucosa con unión 1-4 de tipo α consigo misma) y amilopectina (polímero también de la glucosa, pero con uniones 1-6), para el caso de los vegetales; y polisacáridos compuestos por D-manosa y D-galactosa, para el caso de las leguminosas.⁵

La amilasa se encuentra formando una cadena helicoidal que en solución tiene la capacidad de formar películas delgadas que, al secar, presentan alta rigidez. La amilopectina, como todo compuesto de alto peso molecular, presenta viscosidad elevada en estado puro, pero es altamente soluble en agua. Combinadas y encontrándose en solución acuosa, ambas pueden formar capas con diferentes propiedades mecánicas, estas características de cohesión se han aprovechado para unir diferentes materiales. De esta manera, encontrándose en solución acuosa, ofrecerá a cualquier concentración diferente de cero ciertas características de cohesión.

⁴ *Idem*, p. 1.

⁵ L. Massschelein-Kleiner (1995), *Ancient Binding Media, Varnishes and Adhesives*.

Este efecto ha sido aprovechado desde la antigüedad, principalmente para la elaboración de adobe en la construcción. Tiene la ventaja de que, ya que el mucílago se encuentra en baja proporción en dilución, no se presentan problemas durante su incorporación a la mezcla de materiales para obtener adobe o bloques de tierra comprimida terminados, y durante siglos se han observado de manera empírica grandes ventajas al hacer uso de éste.

Usos ancestrales e investigaciones actuales del mucílago en construcción

La evidencia del conocimiento y uso del nopal por parte de los primeros pobladores mexicanos se encuentra en las excavaciones de Tamaulipas y Tehuacán, Puebla, donde se encontraron fosilizadas semillas y cáscaras de tuna, así como fibras de pencas de nopal, de una antigüedad de siete mil años.⁶

Van Lengen, en su *Manual del arquitecto descalzo*, describe la utilización del nopal combinado con otros materiales para mejorar la calidad de los muros, pisos y techos, haciéndolos más resistentes; sin embargo, al inicio de su libro aclara que la información no está completa (incluyendo las fuentes de donde ésta se obtuvo), ya que se busca estimular a la gente a la autoconstrucción y porque dicho manual no está dirigido a los profesionales de la construcción, sino a la comunidad que se decide por este sistema de producción de vivienda.

Las comunidades indígenas siguen utilizando la fibra de nopal para dar consistencia a sus viviendas de adobe, y el jugo de la planta sirve para impermeabilizar y elaborar pinturas. Incluso, algunos expertos aseguran que los japoneses utilizan la fibra para la fabricación de bocinas de alta fidelidad.⁷

Durante los siglos XVI y XVII, cuando los franciscanos establecieron las misiones en Baja California y zonas adyacentes, comenzaron a cultivar el nopal. Aunque esta actividad ya se desarrollaba tiempo atrás en el centro del país, los frailes encontraron que estas plantas eran de gran utilidad, ya que además de consumir las pencas tiernas y los frutos como alimento, producían un material mucilaginoso que servía como pegamento para los adobes empleados en la construcción de las misiones.

⁶ Universidad Autónoma de Chapingo (1995), *Mercado mundial del nopalito*, p. 28.

⁷ F. González (2006), *Nopal: alimento, medicina y cosmético*, p. 28.

En conservación de edificios históricos, el mucílago de nopal (*Opuntia ficus-indica*) se ha utilizado en morteros elaborados con cal.⁸

Carmen Sáenz (2006) cita a varios investigadores que han estado utilizando el hidrocoloide del nopal para diversos usos en construcción, a saber: en Perú, Ramsey, en 1999, estudió el uso de goma o mucílago de cladodios de nopal para estabilizar bloques de adobe; comparándolo con la cal, los resultados obtenidos no fueron exitosos como se esperaba, probablemente debido a que las dosis empleadas fueron de 10%. La metodología utilizada para preparar la goma de nopal como estabilizante consiste en limpiar y remojar en agua los cladodios (1:1 en peso); las mejores condiciones de remojo fueron 18 días a 15-20°C (82-92%/hr) o entre 7 y 14 días a 20-25°C (77-88%/hr). Del mismo modo, Cárdenas *et al.* (1998) efectuaron ensayos preliminares acerca del uso de jugo de nopal en pastas de Ca(OH)₂, indicando que su incorporación vuelve más débil la textura de la cal, asimismo, ha señalado que desde hace muchos siglos en México se agrega jugo de nopal como un adhesivo orgánico a la cal para restaurar y proteger edificios históricos.

Torres-Acosta *et al.* (2005) también analizaron la adición de mezclas de nopal y *Aloe vera* en el concreto como un modo de aumentar las propiedades anticorrosivas al entrar en contacto con el acero.

Por su parte, Hernández y Serrano (2003), en un estudio sobre adición de mucílago de nopal liofilizado a morteros ampliamente usados en la construcción, observaron que la adición de 0.5g de mucílago liofilizado mejoraba las características mecánicas de la mezcla, con una mejor resistencia a la compresión que los controles sin mucílago de nopal. La mezcla de yeso + arena sílice + mucílago de nopal liofilizado mostró un esfuerzo a la compresión de 151.8 kg/cm² a los 28 días, en comparación con el control, que fue de 125.6 kilos sobre centímetros cuadrado.

A partir del año 2005, investigadores del Centro de Física y Tecnología Avanzada (CFTA), perteneciente a la Universidad Nacional Autónoma de México, campo Juriquilla, Querétaro, se encuentran desarrollando un método que permitirá determinar la resistencia que adquiere el mortero utilizando el mucílago de nopal. El avance de estos estudios fue presentado en la conferencia magistral *Materiales del siglo XXI*, por el doctor Víctor Castaño,⁹ y consiste en la utilización del mucílago de nopal para mejorar propiedades mecánicas del mortero y algunos otros materiales de construcción.

⁸ A. Cárdenas, W. M. Arguelles y F. M. Goycoolea (1998), "On the Possible Role of *Opuntia ficus-indica* Mucilage in Lime Mortar Performance in the Protection of Historical Buildings", *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, núm. 3.

⁹ Hernández, Caballero, Castaño *et al.* (2005), *Modification of Portland Cement Mortars with Cactus Gum*.

Otras investigaciones¹⁰ sugieren que el mucílago mejora las características físicas de las pastas de cemento y morteros, disminuye la permeabilidad y aumenta la resistencia a la compresión.

De manera paralela, Torres Acosta y Cano Barrita (2007), investigadores de la Universidad Marista de Querétaro e Instituto Politécnico de Oaxaca, respectivamente, desarrollaron una investigación utilizando mucílago de nopal en pastas de cemento, mortero y concreto, encontrando que al utilizar soluciones al 1% disminuye la permeabilidad; no se encontró una diferencia significativa en la resistencia a la compresión aun cuando se agregaron también diversos porcentajes de cemento como estabilizante. Debe señalarse que estas investigaciones utilizaron mucílago de nopal deshidratado añadido a las mezclas de cemento antes mencionadas a diferencia de la presente investigación, que, por el contrario, realizará soluciones con mucílago de nopal y se utilizarán para la fabricación de bloques de tierra comprimida.

Investigadores de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología (Upibi), perteneciente al Instituto Politécnico Nacional, presentaron en 2006 un proyecto de investigación denominado *Ultrafiltración de mucílago de nopal*, clasificado dentro del área de Ingeniería y Tecnología del Instituto.

Características de la sábila

La planta de sábila ha sido utilizada desde la antigüedad en diversas civilizaciones, principalmente las de África, Asia, Europa y Medio Oriente.

En México existen muchos y muy diversos usos populares para la sábila (en los cuales la planta es tratada artesanalmente en casa y se utilizan sólo productos naturales), principalmente de tipo medicinal. Diversos usos se mencionan en el presente trabajo más adelante. Además, se han atribuido propiedades mágicas a la sábila, por lo que es costumbre colocarla detrás de las puertas de las casas.

La sábila también ha sido utilizada en diversos procesos industriales, como en ciertos tratamientos en petróleo crudo.

Taxonomía de la sábila

En el siguiente cuadro se presentan las características taxonómicas de la sábila.

¹⁰ S. Chandra, L. Eklund, y R. R. Villarreal (1998), "Use of Cactus in Mortars and Concrete", *Cement and Concrete Research*, núm. 28, p. 41.

Cuadro 1. Taxonomía y características de la sábila

Nombre científico	<i>Aloe vera</i>
Origen	Norte de África, Islas Canarias, España
Asociación vegetal	Es una especie introducida y cultivada en varios estados de las zonas áridas de México
<i>Características químicas</i>	
Materia orgánica	Rico (2)
Ph	7-8.2 (1)
Carbonatos	Abundantes

Fuente: Comisión Nacional Forestal (s. f.), *Aloe vera (L) Burn.*

Volumen de producción por estado

La cadena productiva de la sábila comercializa su producción en el mercado internacional. Con una superficie plantada de sábila de 3 900 hectáreas y una producción anual de 98 mil toneladas de hoja, se abastece la demanda de las seis agroindustrias instaladas en González, Hidalgo y Jaumave, las cuales producen pulpa, jugos y gel para las industrias farmacéutica, de alimentos y de cosméticos. En González, la empresa mexicana Gildan adquiere la producción de hoja de sábila de 24 productores de la región y la transforma en 4.6 millones de litros de pulpa por año para su exportación a Estados Unidos.

En el continente americano, México es el principal productor de sábila, de acuerdo con información del Internacional Aloe Science Council (IASC), donde participa con 47% de la superficie sembrada a nivel mundial y con 56% de la superficie nacional cultivada, tal y como se puede apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 1. Porcentaje de participación de cultivo de sábila por país hasta 2005

<i>País</i>	<i>Superficie (ha)</i>	<i>Participación (%)</i>
México	10 248	56
República Dominicana	3 500	18
Venezuela	3 400	18
Estados Unidos	649	3
Costa Rica	520	3
Guatemala	200	1

Continúa...

Tabla 1. Porcentaje de participación de cultivo de sábila por país hasta 2005 (continuación)

<i>País</i>	<i>Superficie (ha)</i>	<i>Participación (%)</i>
Argentina	100	0.60
Brasil	50	0.30
Total	19 119	100

Fuente: elaboración del autor con datos de la Subsecretaría de Desarrollo Rural.

Tabla 2. Porcentaje de participación de cultivo de sábila por estado hasta 2005

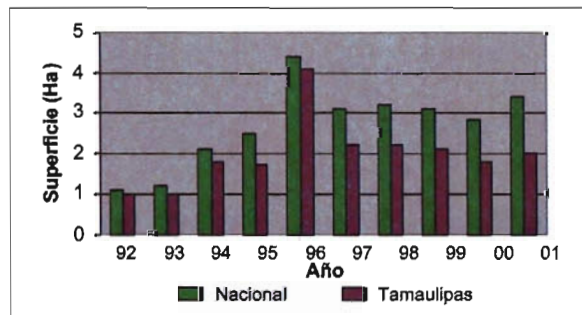
<i>Estado</i>	<i>Producción (ton)</i>	<i>Participación (%)</i>
Tamaulipas	66 978.18	76
Yucatán	5 287.75	6
San Luis Potosí	9 694.21	11
Otros estados	6 169.04	7
Total	88 129.18	100%

Fuente: elaboración del autor con datos de la Subsecretaría de Desarrollo Rural.

Producción en Tamaulipas

En la siguiente gráfica se presentan las hectáreas de cultivo destinadas a la producción de sábila en Tamaulipas.

Gráfico 1. Superficie establecida para cultivo de sábila: comparativo nacional y Tamaulipas



Fuente: SDR (2004), *Cultivos estratégicos*.

Tabla 3. Superficie establecida por ha y municipio en Tamaulipas hasta 2001

<i>Municipio</i>	<i>Superficie (ha)</i>		
	<i>Total</i>	<i>Riego</i>	<i>Temporal</i>
Hidalgo	14	14	-
Padilla	376	215	161
Güemez	35	30	5
Victoria	14	10	4
Llera	200	200	-
González	923	358	565
Altamira	207	43	164
Aldama	182	-	182
Jaumave	330	200	130
Tula	370	-	370
Total	2 651	1 070	1 581

Fuente: SDR (2004), *Cultivos estratégicos*.

Usos del mucílago de la sábila y similitudes con el mucílago de nopal

El acíbar ha tenido diversos usos en diferentes áreas:

- Industria farmacéutica: como catalizador en procesos celulares.
- Perfumería y cosmetología: para elaboración de cremas emolientes, humectantes, hidratantes y desinfectantes, así como en la elaboración de champú tonificante, jabones, lociones para la piel y filtros solares, gracias a su contenido de sapogeninas, glucósidos y polisacáridos.
- Alimentos: elaboración de bebidas refrescantes y nutritivas por su contenido en proteínas, aminoácidos, minerales, enzimas y otros complementos que le dan cualidades aperitivas, nutritivas, tónicas y reconstituyentes.
- Agronomía: como repelente e insecticida en larvas presentes en algunas plantas tuberosas. En experimentos con papa ha presentando una acción inhibitoria de enfermedades virales presentes en el tubérculo.

La similitud en la composición química entre el mucílago de nopal y el de sábila radica en que ambos contienen macromoléculas compuestas por unidades de glucosa conocidas como biopoliméricas, sólo que el mucílago de nopal contiene menor cantidad de biopolímero. Estos polímeros podrían mostrar efectos cohesivos entre partículas, a diferencia de diversas sustancias no poliméricas.

Composición química del acíbar o jugo de sábila

El acíbar es el jugo obtenido a partir de las hojas de sábila; presenta una apariencia mucilaginoso, glutinoso y de color amarillo verdoso oscuro.

La especie del género *Aloe* contiene una mezcla de glucósidos llamados aloína colectivamente, la cual es el principio activo de la planta. La proporción de compuestos es la siguiente:

- Dos resinas amarillo-brillantes, muy activas, posiblemente idénticas, solubles en bicarbonato de sodio (30%).
- Una resina muy activa soluble en bicarbonato de sodio (6.8%).
- Aloína ligeramente activa (15.0%).
- Emodina ligeramente activa (1.5 a 1.8%).
- Sustancias hidrosolubles inactivas (15.2%).
- Sustancias amorfas que producen alteraciones estomacales, pero que no llegan al efecto purgativo (5.1%).

El acíbar de sábila contiene 12 enzimas. Estas enzimas constan de una fracción protéica o apoenzima y un grupo prostético o coenzima. La enzima actúa formando un complejo con la piel, la parte de la proteína que se une a éste se convierte en un centro activo; en la mayoría de los casos la acción de la enzima depende de la coenzima y específicamente para el tipo de sustrato (piel abierta, cuero cabelludo, entre otros) de la apoenzima.

Se han observado efectos curativos del acíbar fresco de la sábila en quemaduras por radiación, accidentes nucleares o exposición a rayos X, también se ha encontrado actividad antibiótica, astringente, inhibidor del dolor, desinflamatorio, coagulante y estimulante. Se han realizado experimentos para encontrar inhibición de tejidos tumorosos, tratamiento de quemaduras (incluyendo las de origen radioactivo), inhibición de la artritis, enfermedades de la piel como psoriasis, dermatitis e infecciones diversas, entre muchas otras.

Aditivos

Por aditivo se entiende: “Cualquier material que no sea agua, agregados o cemento, que se usa como ingrediente [...] y se le agrega inmediatamente antes o durante el mezclado. Los aditivos se emplean para modificar propiedades [...]”.¹¹

En algunas ocasiones, el suelo utilizado presenta una baja cohesividad (principalmente barros), este problema puede abatirse incrementando la cohesividad añadiendo a la mezcla suero de leche, cuajada descremada (conocida como *quark* alemán), queso fresco, orina, estiércol, aceite de linaza doblemente cocido o cola de cal y caseína. Es importante que antes de agregar cualquier aditivo se realicen pruebas en cada uno de los casos correspondientes previo a la edificación de cualquier elemento de construcción.

En recientes investigaciones desarrolladas por el arquitecto Roberto Mattone, se ha utilizado el gluten de trigo como base para recubrimientos de tierra-yeso y se han descubierto varias propiedades de éste. El gluten, que es alimento, mejora la adherencia del mortero al soporte y es compatible con el yeso. En suelos demasiados salitrosos, tiende a absorber la sal, mejorando su composición, y además actúa como aglutinante.¹²

Estabilización con cal

La utilización de cal para la estabilización del suelo (especialmente de suelos finos) data desde épocas muy antiguas. Las arcillas forman una parte importante del suelo, y generalmente requieren una estabilización para aumentar la resistencia, así como disminuir los cambios volumétricos debido al contenido de agua.

La utilización de esta técnica cumple con el plan trazado, obteniéndose varios efectos:

1. Reducción del índice de plasticidad.
2. Aceleración de la disgregación de los grumos arcillosos durante la pulverización, mediante el uso de agua y cal.
3. Reducción de los efectos aglomerados.

¹¹ Concretos Apasco (1985), *Manual de concreto*, p. T-8-1.

¹² Roberto Mattone (2007), *Anuario de investigación de construcción con tierra y del diseño sustentable*.

4. Reducción de las contracciones y las expansiones debido a la humedad.
5. Incremento de la resistencia a la compresión.

Para poder utilizar cal como estabilizante, fue necesario determinar los tipos de minerales arcillosos contenidos en el suelo a estabilizar, ello permitió optimizar el procedimiento y predecir el resultado.

Acción de la cal en las arcillas

El aplicar la cal sobre los tres tipos de arcillas más comunes trajo como resultado el caso de las montmorilonitas, además de que presentó fuertes reacciones con la adición de la cal, lo que hizo que sufriera profundas modificaciones al entrar en contacto con ésta.

Con las caolinitas se demostró un aumento de cristales de calcita, con la ausencia total de otros minerales; y con las ilitas la cal reaccionó con el azufre, formando sulfatos, lo que provocó una disminución de la reacción con la cal con el suelo arcilloso.

De este modo, se llegó a la conclusión de que la acción de la cal se puede advertir en dos fases:

Primera etapa: en ésta se observa la acción producida por el aporte masivo de iones a causa de la cal. Los cationes de calcio se unen a la arcilla debido al intercambio catiónico, lo cual provoca la unión de las partículas arcillosas. Esto aumenta a una floculación a edades tempranas, lo cual ayuda a aumentar o disminuir el límite líquido, así como también favorece un aumento del índice plástico, todo esto produce que el suelo se vuelva menos sensible al agua.

Segunda etapa: en ésta las arcillas reaccionan en forma regular, dependiendo de la naturaleza de los materiales arcillosos. Ello se traduce en una degradación de los mismos elementos mineralógicos, apareciendo nuevos, dando como resultado un aumento en la resistencia en la compresión simple.

Diseño de la estabilización

“El diseño de la estabilización con cal, se basa en las características deseadas en el suelo estabilizado, considerándose indispensable conocer las características origina-

les de los minerales arcillosos, para de este modo beneficiarse de las ventajas que se obtendrán con el empleo de cal”.¹³

Existen varios procedimientos para el diseño de un suelo-cal, pero cualquiera que sea el método, hay un punto donde el contenido de cal no produce ninguna mejoría; a éste se le conoce como “punto de fijación”, y significa que la reacción potencial de los minerales arcillosos queda satisfecha.

Uno de los métodos más empleados es el que se conoce con el nombre de American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), en éste se emplean pruebas de compresión simple, previa determinación del contenido de cal, por medio de una gráfica (gráfico 2), para lo cual se hacen necesarios los datos de porcentaje de suelo para pasar la malla número 4 y el índice plástico, tal como lo plantea Carlos Fernández Loaiza.¹⁴

Se deben hacer tres especímenes de prueba y obtener el resultado después de curarlos.

Procedimiento constructivo

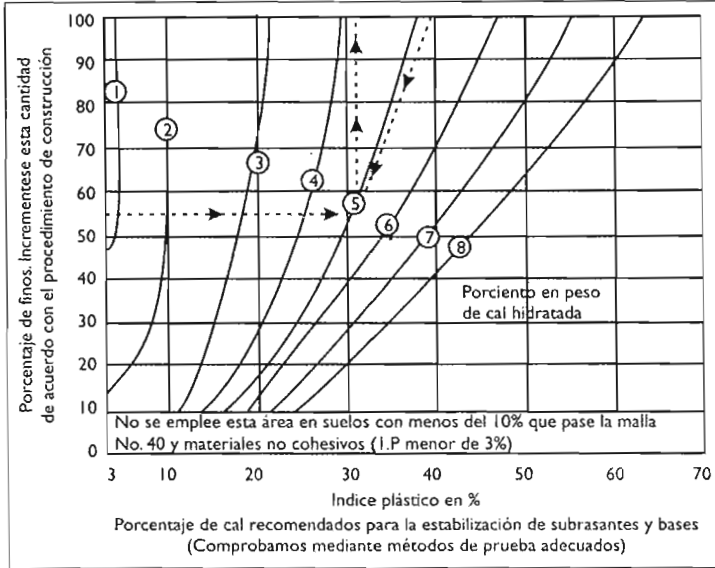
Por recomendación de la National Line Association de Estados Unidos, el procedimiento de construcción de una estabilización con cal debe estar conformado por los siguientes pasos:

1. Se utiliza cal hidratada que cumpla con las especificaciones correspondientes.
2. Disgregar la arcilla, posteriormente se realiza el mezclado en dos etapas, utilizando sólo 50% de cal calculada en el diseño en cada una de las etapas.
3. Adicionar la cal de manera dosificada, de acuerdo con el peso seco del suelo.
4. Mezclar de manera inicial con el propósito de distribuir la cal de manera uniforme, para lo cual se deberá agregar agua hasta 5% por arriba de la humedad óptima.
5. Aplicar un curado que va de 1 a 48 horas para lograr que la arena y la cal rompan los grumos de arcilla.
6. Comportar de acuerdo con las pruebas de elaboración realizadas previamente.

¹³ *Ibidem*, p. 129 (imagen).

¹⁴ Carlos Fernández, *op. cit.*, pp. 129-140.

Gráfico 2. Método de la AASHTO para las estabilizaciones con cal



Fuente: Carlos Fernández Loaiza (1992), *op. cit.*, p. 129.

Resultados obtenidos con adobe estabilizado con cal

La Fundación Salvadoreña de Desarrollo y Vivienda Mínima (Fundasal) en los años 1978 y 1980 realizó investigaciones para obtener nuevos materiales de construcción producidos en el país, con posibilidades de ser utilizados en viviendas de bajo costo.

Se hicieron estudios sobre los procedimientos tradicionales de fabricación de adobe; asimismo, se analizaron dos tipos de arcillas: una rojiza de alta plasticidad y una grisácea de bajo índice, descubriéndose que al mezclar la arcilla roja con arena y cenizas volcánicas se obtenía un buen material, por lo cual se procedió a realizar tabiques de adobe con el material mencionado; el mezclado de los componentes se realizó con pala y algunas veces a mano, para posteriormente proceder a realizar los adobes.

Se utilizaron moldes de 23 x 23 x 10.5 cm. Por razones de modulación fueron llenados en dos capas a mano, aunque también se elaboraron adobes con máquina Cinva-Ram. Dicho adobe fue secado al sol con el fin de evitar el agrietamiento producido por el calor.

En la siguiente tabla se pueden observar las pruebas a las cuales fue sometido dicho material de adobe en baldosas.

Tabla 4. Resultados de pruebas a adobes con cal

<i>Pruebas</i>	<i>Procedimientos</i>	<i>Resultado</i>
A la compresión	Según normas ASTM-C-140-75	26kg/cm ²
A la resistencia al impacto del agua	Se aplicó un chorro de agua a una distancia de 50cm durante 15, 30, 60, 90 y 120 minutos	Se produjo una perforación de 6cm de diámetro y 5mm de profundidad
Resistencia a la humedad	Se sumergieron los tabiques en agua durante tres semanas	Se redujo 20% la resistencia a la compresión
Resistencia al intemperismo	Se fabricaron paredes de 2.0m de alto y se dejaron a la intemperie durante seis meses	Sin deterioro
A la contracción por secado	Por medición directa del producto	Deformación

Fuente: elaboración propia.

Posterior a las pruebas, se realizó un análisis del costo del adobe, el cual fue de 260 pesos mexicanos.

Una vez identificada la dosificación adecuada tanto técnica como económicamente, se procedió a la construcción de 37 viviendas.

Evaluación de las paredes

Las paredes de adobe, son elementos que actúan por su propio peso y no poseen ningún tipo de refuerzo; estos elementos ante la acción de la lluvia, el viento y el sol, se han erosionado en la parte superior de la vivienda, aspectos que se ven agudizados en la esquina de la misma, donde la falta de vegetación hace las paredes mayormente expuestas a la intemperie.

Por otro lado, las paredes también se encuentran bastante deterioradas en el interior de la vivienda, esto es por el uso y roce de los muebles.

Entre otros aspectos observados, en las esquinas interiores de las viviendas el uso de hamacas ha provocado en algunos casos el rompimiento casi total de los adobes.

LOS BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA (BTC) EN ZONAS HÚMEDAS

Respecto de la deficiencia constructiva, el hecho de la erosión del adobe puede destacarse que se debe [*sic*] a un mal amasijo de la mezcla con la cual fueron hechos, por tanto se observaron grumos en donde no existía homogeneidad del material y es precisamente en estos puntos donde la erosión es más evidente.¹⁵

Por esta razón, se le aplicó un recubrimiento a las paredes de las viviendas, con lo cual se logro mantenerlas en perfecto estado.

¹⁵ Yvonne Lorena Muñoz Berdugo (1989), *Adobe estabilizado*, pp. 9-10.

La cal como componente de la arquitectura de tierra

*Luis Fernando Guerrero Baca¹
Elia Mercedes Alonso Guzmán²
Juan Alberto Bedolla Arrollo³*

Introducción

A lo largo de la historia, las diferentes civilizaciones que florecieron en el territorio nacional utilizaron la cal como fundamento para el desarrollo de su cultura constructiva. Gracias al uso de este material estuvieron en posibilidad de desarrollar edificios y conjuntos urbanos de dimensiones y relaciones estructurales de destacada singularidad y belleza.

Este hecho, además, ha permitido que estos complejos sistemas subsistan hasta nuestros días, manteniendo gran parte de sus cualidades estáticas, físicas, químicas y estéticas. Es evidente que los núcleos de tierra compactada y piedras unidas con lodo que conforman el sustento de los basamentos que caracterizan las estructuras mesoamericanas estarían seriamente deteriorados en nuestros días si no hubieran estado

¹ Doctor en Diseño con especialidad en Conservación Urbana y de Inmuebles Patrimoniales. Miembro del Cuerpo Académico en Conservación y Reutilización del Patrimonio Edificado (UAM-X-CA-60) de la Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco. Coordinador del Comité Científico de Tierra, Icomos Mexicano. Correo electrónico: lfgbaca@correo.xoc.uam.mx

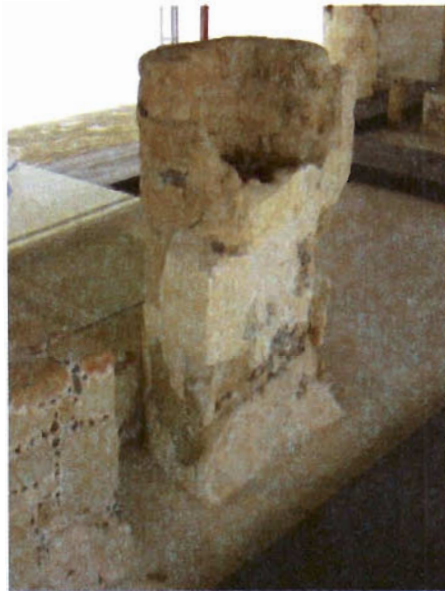
² Doctora en Ingeniería, miembro del Cuerpo Académico CA-UMSNH-147, profesora e investigadora de la FIC y del PIDA, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Correo electrónico: ealonso@zeus.umich.mx

³ Maestro en Arquitectura, Investigación y Restauración de Sitios y Monumentos. Estudiante del Programa Interinstitucional de Doctorado en Arquitectura. Profesor-investigador de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Correo electrónico: bedollaalberto@gmail.com

confinados por rocas asentadas con mortero de cal arena, y finalmente protegidos con superficies elaboradas con estas mismas mezclas.

Desde hace varias décadas se ha tendido a concentrar la atención sobre los estucos de cal ubicados en elementos compositivos de las pinturas murales y relieves policromados que formaban parte de templos y palacios. Sin embargo, es evidente que la presencia de superficies encaladas formó parte de prácticamente todas las estructuras, pavimentos y esculturas localizadas tanto en las áreas urbanas destinadas a funciones rituales y de gobierno, como en las viviendas utilizadas por toda la población.

**Figura 1. Estructuras de tierra protegidas por superficies de cal.
Tizatlán, Tlaxcala**



Además de este uso constructivo, la cal se empleaba desde tiempos inmemoriales en los procesos de teñido de textiles, curtido de pieles, desintegración de desechos sólidos, conservación de alimentos, limpieza de huesos, recubrimiento de piezas de cerámica y hasta en tratamientos terapéuticos. Todavía en nuestros días se sigue utilizando en la preparación de alimentos, como sucede con la nixtamalización, método que consiste en la cocción parcial del maíz para permitir su molienda y posibilitar

la elaboración de la masa para las tortillas, tamales y una extensa gama de platillos cuyas recetas se han conservado por siglos.

Con el correr de los años, la presencia de la cal dentro de los procedimientos constructivos de nuestro país continuó evolucionando a partir de la combinación de conocimientos procedentes de diferentes orígenes. Sin embargo, a mediados del siglo xx, como consecuencia del crecimiento en la producción del cemento, este material fue relegado junto con otros sistemas tradicionales de edificación.

Dos cambios generacionales fueron suficientes para que la sabiduría de miles de años fuera considerada obsoleta y el patrimonio intangible constituido por el conocimiento de sus condicionantes de elaboración fuera olvidado.

Afortunadamente, en años recientes, a partir de estudios originados en el campo de la arquitectura sustentable, el uso de la cal ha adquirido una nueva dimensión al ponerse en evidencia sus calidades económicas, ecológicas y sanitarias.

Este desarrollo se vincula también con el amplio nivel de difusión que ha ido adquiriendo la edificación con tierra de la que atávicamente la cal ha sido un complemento inseparable. Por siglos ha sido puesta a prueba la eficacia de esta substancia como componente estabilizante que limita los efectos de absorción hídrica, dilatación y retracción de las arcillas presentes en los materiales térreos.

En el presente texto se dan a conocer algunos datos relevantes acerca del origen y evolución de aplicaciones de la cal como componente constructivo, y se detalla una serie de previsiones que se han de tomar en cuenta cuando se trabaja con este material, las cuales inciden de manera determinante en la calidad y duración de las estructuras en que se utilice.

Es fundamental poner al alcance de toda la sociedad los conocimientos relacionados con el uso de la cal, ya que no se trata de nociones que pertenezcan sólo a los especialistas del diseño, la construcción y la restauración de monumentos, sino que es una parte integral de la sabiduría popular y debe recuperar esta condición.

El ciclo de la cal

El material constructivo que se conoce comúnmente como cal es el producto de un proceso de calcinado, rehidratación y secado de rocas de origen calizo. Este fenómeno resulta sumamente interesante debido a los factores ecológicos que involucra.

Se trata de un desarrollo de tipo cíclico que inicia con la transformación del carbonato de calcio —CaCO₃, mineral de origen sedimentario— y concluye con

la generación del mismo material, pero mediante un procedimiento artificial. Para comprender de manera más clara esta “metamorfosis”, se puede explicar a partir de lo que se conoce como el “ciclo de la cal”.⁴

Todo comienza con la extracción de rocas con alto contenido de carbonato de calcio del medio natural. La mayoría de las veces, las calizas están contaminadas con carbonato de magnesio, $MgCO_3$ (dolomita), material que es indeseable en la construcción por sus problemas de solubilidad en agua. Además de las piedras o minerales inorgánicos, existen otros elementos orgánicos ricos en calcio que históricamente han sido utilizados para su extracción como son las conchas, corales y caracoles marinos.

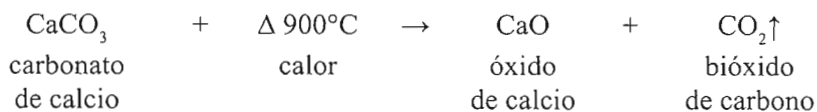
Todas estas fuentes se presentan en la naturaleza acompañados de sustancias como el hierro y el magnesio, que dentro de este proceso se consideran impurezas o contaminantes debido a que su presencia modifica el comportamiento esperado para el producto final. Para que la piedra caliza sea apta para fines constructivos deberá contar con por lo menos 90% de carbonato de calcio, de otro modo la cal resultante será de mala calidad.

En el pasado, se sabía por experiencia transmitida de modo tradicional que la piedra caliza que producía buena cal era la que presentaba un color claro uniforme y con pocas manchas amarillas, anaranjadas, rojas o negras, que suelen ser sintomáticas de la presencia de hierro. Además, al golpear entre sí dos fragmentos de piedra con alto contenido de carbonato de calcio, se produce un sonido de tipo metálico que ayuda a su identificación.

Hoy en día, para la producción industrial de cal se manejan cuidadosos análisis químicos que permiten verificar la pureza de la piedra caliza utilizada como materia prima.

Este producto natural es sometido a temperaturas de entre 900 y 1 300°C en hornos especialmente diseñados que antaño utilizaban leña o carbón como combustible, pero que en la actualidad funcionan a base de gas.

Por el efecto del calor, en esta etapa el material base se transforma en óxido de calcio, al tiempo que desprende dióxido de carbono como un gas que se eleva a la atmósfera. La reacción se puede representar químicamente de la siguiente manera:



⁴ Francisco Azconegui *et al.* (1998), *Guía práctica de la cal y el estuco*, pp. 10-12.

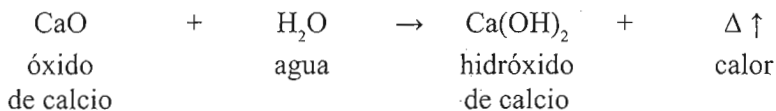
Figura 2. Cantera de material calizo. Ciudad Guerrero, Chihuahua



El óxido de calcio, al que comúnmente se le denomina “cal viva”, es un producto inestable que perdió parte de su peso durante la calcinación. Es una sustancia ávida de agua que, si no se controla de forma adecuada, tiende a recuperar el equilibrio que mantenía como carbonato de calcio.

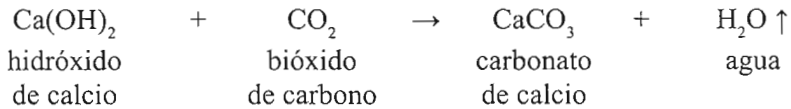
Resulta un material sumamente cáustico y corrosivo, pues reacciona muy fácilmente con cualquier fuente de humedad, pero tiene la cualidad de que, al momento de agregársele agua, adopta un estado “latente” que permite su uso inmediato o su almacenamiento al convertirse en lo que se conoce como “cal apagada” o “cal hidratada”.

Lo que sucede a nivel químico es que el óxido de calcio toma el hidrógeno y oxígeno del agua y se transforma en hidróxido de calcio, que es un material con consistencia fluida, y que, mientras se mantenga aislado del aire, puede conservar sus cualidades durante meses o años. Como se explicará más adelante, la hidratación o “apagado” de la cal viva es una reacción en la que se desprende calor.



La pasta de cal es sumamente versátil y puede ser utilizada como insumo para pinturas, morteros o mezclas constructivas.

La etapa con la que concluye el ciclo de la cal se desarrolla cuando el hidróxido de calcio toma bióxido de carbono del aire y pierde agua por evaporación, en un proceso en el que se endurece al recuperar su estado original como carbonato de calcio, es decir, se convierte nuevamente en roca.



Esta fase final es la más importante para la construcción, ya que durante el proceso de fraguado al hidróxido de calcio se le pueden incorporar minerales adicionales, con el objetivo de que sean “atrapados” durante el endurecimiento y se vuelvan parte integral del conjunto. De este modo, se crea una “piedra artificial” con cualidades físicas, químicas, formales y cromáticas singulares, en función tanto del origen físico-químico de los agregados como de los procesos de manufactura.

Figura 3. Decoraciones hechas con mezclas pigmentadas de cal y arena. Kohunlich, Quintana Roo



La producción de cal

Este sencillo, pero trascendente proceso químico, se conoce desde hace muchos siglos en todo el mundo y ha permitido el desarrollo de diversos efectos formales y constructivos a partir de la incorporación de diferentes avances tecnológicos. Sin embargo, la calidad y resistencia de los productos obtenidos es resultado de la eficiencia con que se lleven a cabo las diferentes etapas del ciclo.

Además de la necesidad de una selección adecuada de la materia prima, con el propósito de contar con una sustancia que contenga la menor cantidad posible de impurezas, el proceso de cocción es también de gran trascendencia, ya que si no se ejecuta de manera apropiada, algunas partes del producto tendrán características químicas diferentes al resto, con lo que se obtendrán resultados heterogéneos.

Si, por ejemplo, el horno no alcanza la temperatura requerida, la piedra caliza (CaCO_3) no se transforma químicamente en su totalidad en óxido de calcio (CaO) o cal viva, y no será útil como material aglomerante, o lo será sólo una parte de la piedra quemada, con lo que el resto se convertirá en un desperdicio que, si bien no afecta los procesos constructivos por tratarse de una arena inerte, altera las especificaciones volumétricas de las mezclas.

En el caso de nuestro país, se sabe que en la época prehispánica las piedras calizas o las conchas marinas eran calcinadas en fogones con diferentes capacidades y formas, pero que rara vez funcionaban de manera hermética, por lo que no toda la materia prima recibía la misma cantidad de calor durante el tiempo necesario. Es por ello que en algunos sitios prehispánicos se encuentran materiales que cumplen su función aglutinante a la perfección, mientras que otros que estuvieron parcialmente calcinados tienen muy poca adherencia.

En la actualidad, esta falta de homogeneidad constructiva, genera problemas críticos para la conservación y restauración de muchos de estos inmuebles.

Entre las principales aportaciones traídas de Europa a partir del siglo XVI estuvo precisamente la edificación de hornos más eficientes. Se trataba de estructuras de tiro que, además de alcanzar y mantener una temperatura adecuada y regulada en un tiempo menor, lograban la cocción de grandes volúmenes de materia prima, con lo que la producción daba mejores resultados. Esta tecnología permitió obtener productos con mayor control de calidad que, unidos a las técnicas edilicias occidentales y a la sabiduría ancestral de la mano de obra indígena, dieron continuidad a la tradición constructiva de la cal. Gracias a esta amalgama cultural se desarrollaron los monasterios, fortificaciones, catedrales, palacios, haciendas,

puentes y acueductos de notable calidad y singular belleza que conforman nuestro patrimonio virreinal.⁵

El uso extensivo de la construcción con este material se prolongó durante el siglo XIX y la primera mitad del siglo XX. A partir de entonces, su empleo se ha visto notablemente disminuido en la edificación a consecuencia de la avasalladora embestida del cemento y otros productos constructivos industrializados.

Existen algunos poblados tradicionales en los que todavía es posible conseguir costales con cal viva en piedra producida de manera artesanal, ya que —sobre todo en el medio rural— la gente la utiliza en diferentes actividades domésticas y agrícolas, además de su función constructiva.

Paradójicamente, México es el sexto productor de cal a escala mundial, con una aportación anual estimada en 6.5 millones de toneladas.⁶ La mayor parte de dicha

Figura 4. Acabado bruñido del recubrimiento de cal del convento de Tepoztán, Morelos



⁵ George Kubler (1984), *Arquitectura mexicana del siglo XVI*, pp. 170-171.

⁶ Los principales productores de cal son: China (23); E. U. (18.4); Rusia (8); Japón (7.5); Alemania (7); México (6.5); Brasil (6.3); Italia (3.5); Reino Unido (2.5) y Francia (2.4) (millones de toneladas anuales). Fuente: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2003/mcs2003.pdf>

producción se destina al consumo local, pues sólo se exportan unas 60 mil toneladas, de las cuales 95% es consumido por Estados Unidos.⁷

En promedio, 76% de la producción calera de México corresponde a “cal parcialmente hidratada” y 16% a cal viva, ambas usadas principalmente para la fabricación del cemento, para la estabilización de suelos y como aglutinante en mamposterías, acabados superficiales y pinturas. El restante 8% se consume en las industrias siderúrgica, química, ambiental, papelera, cerámica, del vidrio y alimentaria.

La cal viva

En las especificaciones y recomendaciones mexicanas referentes al uso de la cal para la conservación y restauración de edificios históricos, por décadas se ha insistido en la necesidad de utilizar la cal viva y, especialmente, “en piedra”, la cual se conoce a nivel regional bajo el nombre de zoquite. Este requerimiento obedece al hecho de que a partir de ella se puede tener un control más cuidadoso del procedimiento de apagado y posterior mezclado.

Si para iniciar una obra se sabe que la materia prima tiene el porcentaje adecuado de óxido de calcio y la fecha en que fue elaborada es reciente, existe bastante certeza de que los resultados finales serán los esperados.

Este aspecto referente al tiempo resulta fundamental, ya que dadas las características higroscópicas y gran actividad del óxido de calcio, si se deja a la intemperie o no se envasa en recipientes apropiados, la humedad del medio ambiente entrará en acción y el proceso de “apagado” de la cal se desarrollará sin control, directamente en la materia prima.

Una vez que la cal viva ha salido del horno, empieza a absorber la humedad del aire que la rodea y se va convirtiendo en hidróxido de calcio. Si esta sustancia sigue en contacto con el medio ambiente, reacciona con el bióxido de carbono del aire y se transforma de nueva cuenta, en muy poco tiempo, en carbonato de calcio, con lo que pierde por completo sus cualidades aglomerantes. Esto significa que el ciclo de la cal se lleva a cabo de manera natural y sin control, desperdiándose todo su potencial.

En cambio, cuando se adquiere cal viva en piedras, se sabe que la capa externa de cada pieza sufrirá este proceso de hidratación y carbonatación, por lo que se desarro-

⁷ El resto de las exportaciones fueron a Cuba (2.7%) y Belice (1.3%). Las exportaciones las realizaron empresas concentradas en la franja fronteriza con Estados Unidos. Fuente: <http://www.economia.gob.mx/?P=1727>

llará una “superficie protectora” (pátina pasivante) que evitará que el aire ingrese a su interior y la mayor parte del material seguirá siendo óxido de calcio activo.

Empero, hay que reconocer que dados los volúmenes necesarios para la construcción y la dificultad de empacar, almacenar y transportar la cal viva en piedra, su uso se ve restringido, hasta cierto punto.

Sin embargo, gracias a la creciente demanda de las diversas ramas industriales por obtener óxido de calcio de buena calidad, los fabricantes cada vez se preocupan más por los factores relacionados con la cocción, pulverización, empaque y tiempo de entrega, por lo que en casi todo el país se puede contar con óxido de calcio altamente puro para ser utilizado también en procesos constructivos.

Pero además de esta materia prima, desde hace muchos años se tiene una “segunda opción” que resuelve algunos de los problemas que se derivan de la necesidad de cuidar el proceso de apagado de la cal viva y de evitar accidentes en su manejo. Se trata de la “cal parcialmente hidratada”, conocida genéricamente como “calhidra”, que es un óxido de calcio que después de su cocción es triturado y humedecido por aspersión en un proceso industrial.

De este modo, se vigila que la cantidad de agua adicionada se limite a la hidratación de algunas partículas, de modo que se desarrolle una mezcla seca de polvo de óxido de calcio e hidróxido de calcio.

La calhidra se vende a granel o es empaquetada en sacos de 20 o 25 kg. Cuando este insumo se adquiere al poco tiempo de haber sido producido y una vez que llega a la obra se “apaga”, siguiendo el proceso que se detallará a continuación, puede desarrollar propiedades muy semejantes a las de cal viva en piedra.

Este material tiene la ventaja de que se consigue prácticamente en cualquier localidad y, además, debido a su hidratación previa, resulta menos reactivo en su manejo y su respuesta es menos violenta y exotérmica que la de la cal viva al momento de ser colocado en agua para la obra.

No obstante, es necesario reconocer que, lamentablemente, mucha de la calhidra que se comercializa no presenta características homogéneas, pues suele ser almacenada por mucho tiempo, con lo que su eficiencia se minimiza al contacto con el aire, lo que la vuelve inerte e inútil para la construcción, como se explicó en líneas anteriores.

Para evitar este problema es posible realizar una sencilla prueba con el objetivo de verificar si la cal viva o la calhidra que se está adquiriendo está todavía activa o ya se convirtió en carbonato de calcio y, por tanto, perdió sus cualidades aglutinantes. El procedimiento consiste en llenar con cal aproximadamente la cuarta parte de un frasco transparente, de preferencia de vidrio, y marcar —con una cinta adhesiva o con color indeleble— el nivel que ocupa el material. Posteriormente, se agrega agua

hasta llenar el recipiente, se tapa y se agita hasta que el polvo se disuelva. Si es necesario, se agrega más agua hasta que su nivel final ocupe por completo el recipiente y se evite así que parte de la cal quede depositada en la superficie interior del frasco que queda seca. Se deja reposar hasta que se vea completamente transparente el agua y la parte sedimentada al fondo presente una consistencia “sólida” al mover ligeramente el frasco. Esto sucederá entre las doce y las veinticuatro horas de reposo de la prueba, dependiendo de la calidad del material.

Figura 5. Verificación de la calidad de la cal



Una vez que la cal se ha asentado, se verifica su nivel final y se compara con la marca que se hizo inicialmente. El volumen final debería ser cercano al doble del original, ya que las moléculas de hidróxido de calcio son mayores que las de óxido. Si la cal no aumenta su volumen, quiere decir que ya no incorporó agua en su interior, por lo que se trata de un material inservible como aglomerante al haber recuperado su condición de carbonato de calcio, que es un material no reactivo. Es como si se tratara de un polvo de mármol o una arena calcárea que desarrollará ninguna adherencia.

La calidad de la construcción sólo se puede garantizar mediante el cuidado del tiempo que transcurre entre la calcinación de la cal y su hidratación en la obra.

“Apagado” de la cal

Las especificaciones de restauración⁸ indican que para “apagar” la cal viva, es decir, para convertir el óxido de calcio en hidróxido de calcio, se requiere construir tres artesas o tinas colindantes.

Estos recipientes pueden estar excavados en el piso a unos cincuenta centímetros de profundidad y delimitados con muros de contención de ladrillo rojo. Cuando las condiciones del suelo no lo permiten, se podrán construir las artesas en la superficie, pero con muros de por lo menos 28cm de espesor y una altura no mayor a los 30cm, con el fin de contener adecuadamente los empujes provocados por el peso de la mezcla y resistir el proceso de “batido” que se necesita para su correcta hidratación.

En la primera artesa se depositan las piedras de cal viva, el polvo de óxido de calcio o la calhidra, y se vierte lentamente agua en una cantidad suficiente, considerando tanto la absorción que desarrolla el óxido de calcio como la cantidad que se evapora en el proceso. Se debe tomar en cuenta el aumento de volumen que sufre la cal durante su hidratación para que no se agregue demasiada agua y se desborde.

Se recomienda mezclar continuamente con un azadón o con paletas de madera para deshacer todos los zoquites. Se cubre la artesa para evitar que le caigan impurezas y se deja reposar bajo un espejo de agua de 5cm, aproximadamente. En los primeros días, este espejo de agua puede ser retirado y sustituido por agua nueva (el agua retirada es algo espesa, presenta un color amarillento y se conoce como “agua de cal”, y entre otros usos tradicionales es buena para consolidar la cantera). Después de varios días, se recoge la pasta y se hace pasar a la segunda artesa a través de un harnero de 5 milímetros.

La pasta colada se cubre por completo con agua, sobrepasando nuevamente su nivel. Se vuelve a proteger la artesa y se deja reposar por otros días más. Se repite el colado para pasar la pasta a la tercera artesa, pero esta vez filtrándola en un harnero con tela de mosquitero, después de lo cual está en condiciones óptimas para su aplicación.

⁸ Sedue (1981), *Especificaciones generales de restauración*, pp. 29-30.

Figura 6. Reacción durante el apagado de la cal



Sin embargo, éste no es un método único, ya que en función del desarrollo tecnológico de las diferentes culturas y sus necesidades prácticas, los procesos de hidratación se han llevado a cabo bajo diversos procedimientos. Hay sitios en los que se apaga la cal en piedra solamente rociándola con agua, o colocándola en cestos de mimbre que se sumergen en agua y se sacan rápidamente. Después, la cal se cubre con arena de modo que se conserve la humedad sin que se presente contacto con el aire.⁹

Un proceso parecido que se realiza cuando no se cuenta con recipientes grandes para mantener la cal sumergida consiste en verter la pasta de cal y conformar un montículo con un diámetro de 1.5 a dos metros. Posteriormente, se alisa su superficie con una llana, de manera que se forme una costra que fraguará por estar en contacto con el aire, pero que mantendrá aislada y fresca la cal hidratada en el interior. Para utilizarse, se debe cuidar la apertura de un hueco pequeño para extraer la cal sin que se ventile el resto del material.

En otras regiones se utilizan varios recipientes individuales en los que se deja sumergida la cal y se va utilizando la que lleva más tiempo hidratándose. Se acostumbra dejar el material en el agua al menos un mes para asegurarse de que se ha hidratado por completo.

Al añadir el agua a la cal viva, se genera una reacción exotérmica, por lo que el apagado debe hacerse con mucha precaución. Una vez que se ha dado la primera

⁹ Pedro Paz (2001), *Construcción práctica por Antonio Torres Torija*, p. 129.

reacción, la pasta de cal fría se puede colocar cubierta de agua en recipientes de plástico grueso en los que se deja hidratar por meses o hasta años. Se sabe que entre más tiempo pase la cal bajo el agua, las mezclas que se produzcan con ella serán de mejor calidad, por resultar más plásticas para el trabajo y conformar materiales más duros al fraguar.

No se recomienda utilizar recipientes de metal, ya que son susceptibles de corroerse con la cal, con lo que pueden llegar a perforarse, además de que el óxido contamina y mancha la materia prima.

El agua debe añadirse a la cal viva poco a poco, mezclando la pasta constantemente. Nunca se deben lanzar los zoquetes al agua, pues estallan y lanzan partículas de cal viva que pueden resultar dañinos a los operarios.

Además, durante la reacción se producen burbujas que salpican y expelen gases, por lo que los trabajadores que ejecutan esta labor deben calzarse con zapatos de suela gruesa de cuero que cubran todo el pie, vestir overoles o prendas de algodón gruesas, y usar guantes, además de cubrirse los ojos con lentes de seguridad y la boca con una mascarilla. Las salpicaduras o el fino polvo de óxido de calcio que se desprende en el proceso, al entrar en contacto con el sudor de la piel, la saliva de la boca o las lágrimas de los ojos, absorbe su humedad y produce escoriaciones por quemaduras.

Hay que insistir en que cuando se llega a utilizar cal que no ha permanecido el tiempo necesario bajo el agua o no se ha realizado un batido adecuado de la mezcla, se corre el riesgo de que algunas de las partículas de óxido de calcio no se hidraten por completo, por lo que al aplicarse en morteros, recubrimientos o pinturas, entran en contacto con agua y presentan la reacción de hidratación. Este fenómeno se manifiesta con la aparición de perforaciones en los acabados provocada por el hueco que dejan las partículas de óxido de calcio al estallar. Los albañiles hablan de este fenómeno como el “palomeo” de un recubrimiento.

De este modo, podemos concluir que la calidad de las mezclas con cal dependerá de una buena selección de las calizas de origen, un proceso homogéneo de calcinación a 900°C como mínimo, la hidratación inmediata después de la calcinación y un largo periodo de reposo bajo el agua.

Mezclas con cal

En la construcción rara vez se utiliza la cal de manera aislada, ya que necesita de sustancias que controlen su proceso de fraguado y con las cuales se conformen estructuras estables, gracias a la combinación de las propiedades mineralógicas de sus componentes.

En función del uso que se les vaya a dar, las mezclas con cal pueden hacerse con arenas de río o de mina. Las primeras son adecuadas para pastas muy aguadas propias de lechadas, enlucidos e inyecciones de grietas, ya que debido a la forma redondeada de sus gránulos tienden a fluir con mayor facilidad. En cambio, para la elaboración de morteros de unión de mamposterías, entortados de cubiertas y revocos gruesos, es preferible utilizar arena de mina.¹⁰ La morfología de los cantos rodados impide su trabazón mecánica; en el caso del material volcánico, éste presenta mayor área superficial al contacto con el adhesivo.

En ambos casos es importante eliminar la tierra o materiales orgánicos y además, cernirla para lograr la diversidad granulométrica requerida para su aplicación.

Resulta interesante revisar la especificación que realizó Antonio Torres Torija, en 1895, acerca de mezclas que por aquel entonces todavía eran de uso corriente:

Según las proporciones en que se mezclen la cal y arena, así resultarán tres especies de mezcla: la que se conoce por mezcla de pared o para mampostar, la mezcla para aplanar y la mezcla fina.

La proporción más común para la mezcla de pared es de 6 arrobas de cal (69kg) para un cajón de arena; para la de aplanados, siendo la misma la cantidad de cal, puede aumentarse la de arena hasta un cuarto de cajón más; y para la mezcla fina, la cantidad de cal es la que debe predominar, disminuyéndose, en consecuencia, la proporción de la arena según se quiera obtener la mezcla más o menos fina.

El empleo de las dos primeras clases de mezcla lo dice bien su nombre; el empleo de la tercera es generalmente en los revocados de los pisos de ladrillo y en algunos entalles y chaflanes.

Para terminar diremos que una arroba (11.5kg) de cal da tres cubos de lechada, y éstos hacen con dos costales de arena ocho cubos de mezcla de pared, por lo que a un cajón de arena corresponden 6 arrobas de cal (69kg).¹¹

El agua que se utiliza para las mezclas debe estar limpia de tierra, microorganismos y sales para evitar deterioros posteriores, en pocas palabras, debe ser potable. En lo que respecta a su cantidad relativa, las especificaciones varían de manera notable ya que, a diferencia de lo que sucede con el cemento cuyo origen industrial y estandarización de sus normas permite establecer rangos precisos, en el caso de la cal, la diversidad de variables que involucra limita el rigor de estos datos.

¹⁰ Marco Vitrubio (1985), *Los diez libros de la arquitectura, traducción directa del latín por Agustín Blanquez*, p. 43.

¹¹ Paz, *op. cit.*, p. 134.

La proporción de agua se verá afectada tanto por del uso que se le vaya a dar, como por la granulometría de las arenas y del clima local. Esta cantidad de agua que requieren los morteros equivale al volumen que ocupa el aire que se encuentra entre los granos de arena y que, lógicamente, varían en función de su granulometría. Si la mezcla contiene sólo arenas gruesas, los huecos que quedan entre sus granos serán muy grandes y se requerirá mayor cantidad de agua. Si el material agregado es sólo fino, el área superficial aumenta de forma exponencial y se requerirá una cantidad enorme de lechada para recubrirlos y pegarlos. Es por ello que, además de conocer la cantidad de agua requerida, lo ideal es trabajar con una mezcla granulométrica heterogénea, es decir, con muchos tamaños de granos para que entre ellos se llenen los huecos.

La experiencia de los albañiles, basada en ensayos y errores, normalmente hace innecesaria su medición, pues ellos conocen la consistencia ideal del material con sólo tocarlo. Sin embargo, es útil tener una idea aproximada de la cantidad de agua necesaria como sugiere Gárate,¹² quien propone un método simple de medición que consiste en llenar un recipiente con un volumen determinado de la arena con la variedad granulométrica que se va a emplear (una cubeta de veinte litros es apropiada), posteriormente, se vierte agua litro a litro en la arena lentamente para que se reparta de manera uniforme dentro del recipiente. Una vez que el agua forma un “espejo” en la superficie, detenemos el proceso y esperamos un poco a que se termine de disper-

Figura 7. Mezcla de cal con arena



¹² Ignacio Gárate (2002), *Artes de la cal*, p. 252.

sar, pero sin perder la cuenta de la cantidad que se está agregando. Una vez que el agua ya no es absorbida, conocemos el volumen de aire que ocupaban sus huecos y, por tanto, la cantidad de agua necesaria para la mezcla.

También puede realizarse la prueba en un laboratorio según los estándares de la American Society for Testing and Materials, (ASTM): Densidad ASTM C 128-97, Absorción (%) ASTM C 128-97, Peso Vol. Seco Varillado (kg/m^3) ASTM C 29-97, Módulo de Finura ASTM C136-96, MF, Tamaño Máximo ASTM C136-96, TM, pruebas que se realizan a los pétreos para caracterizar su calidad y su uso como material en morteros.¹³

Recubrimientos de cal y arena

El uso de recubrimientos de cal, en el caso de nuestro país, es muy antiguo y se difundió en todas sus regiones geográficas. Sin embargo, entre los ejemplos más destacados, sin lugar a dudas, se encuentran los murales al fresco de Teotihuacán, en los que se evidencia un continuo proceso de experimentación técnica y material que tardó cerca de 750 años.

Los murales más primitivos, correspondientes al año 200 d. C., aproximadamente, se ejecutaban sobre delgadas capas de cal parcialmente carbonatada y aplicada de manera burda. Entre los años 350 y 500 d. C., aparece el uso de arenas de cuarzo volcánico como una aportación técnica fundamental. Este agregado presenta tres cualidades sobresalientes: primero, debido a su morfología cristalina, se acomoda muy homogéneamente entre las partículas de carbonato de calcio, con lo que se forma una estructura con alta resistencia mecánica. En segundo término, se trata de minerales translúcidos y semicristalinos que ayudan a que los pigmentos aplicados se vean más luminosos. Y, por último, pueden ser finamente bruñidos y pulidos, con lo que se mejora su duración y saturación cromática.

Como refiere Diana Magaloni, la técnica de bruñido incide de manera determinante en las características de las pinturas murales prehispanicas.

Antes de pintar, a los enlucidos húmedos se les aplicaba una fina capa de arcilla blanca, generalmente mezclada con mica y haloisita, las cuales cumplen dos funciones técnicas de importancia para el fresco. En principio, las arcillas permiten el bruñido de las superficies por ser partículas de forma laminar que tienen la capacidad de resbalar una sobre otra. Con ello se logra la uniformidad y lisura característica de los murales. Asimismo-

¹³ ASMT (2000), *Annual Book of American Society for Testing and Materials Standards*, Section Four, Construction, vol. 04.08, Soil and Rock (I): D420-D5779.

mo, por su capacidad de absorción de agua, ayudan a prolongar el tiempo de ejecución del pintor, manteniendo la superficie del enlucido con la humedad requerida, es decir, “fresca” —de ahí el término que define a esta pintura. Adicionalmente, este proceso de compactación de arenas y enlucidos mediante la acción de bruñir, genera una superficie óptima para pintar.¹⁴

Desde tiempos ancestrales se verificó mediante la experiencia edificatoria la importancia que tenía el diseño integral de estructuras de tierra que incluía su recubrimiento con morteros o pinturas de cal, pues las protegen del agua, con lo que las arcillas mantienen estable su equilibrio dimensional. Al mismo tiempo, dadas las características de porosidad de estos enlucidos, se logra el necesario intercambio de aire y vapor de agua entre los componentes arquitectónicos de tierra y el medio ambiente, con lo que se evita que las obras se debiliten por la acumulación hídrica.

En *Los diez libros de la arquitectura*, Vitruvio (pp. 52-54) describe las cualidades de los edificios de adobe y dice que éstos son tan valiosos como los hechos con cualquier otro material, aunque condiciona su conservación al hecho de que estén “bien jaharrados”, es decir, enlucidos con mezclas de cal.

Este recubrimiento debe aplicarse en capas sucesivas con variaciones granulométricas de la arena y proporciones crecientes de cal, de modo que el primer estrato del aplanado contenga arena gruesa en una proporción aproximada de tres a uno con respecto a la cal, y un espesor no mayor a los tres centímetros. Posteriormente, se coloca una segunda capa utilizando arena medianamente tamizada, en una proporción aproximada de dos a uno con respecto a la cal, y con espesores de no más de medio centímetro. Por último, se coloca una delgada capa de mortero con arena finamente cribada, y en una proporción igual a la de la cal.¹⁵

Esta tercera capa puede ser substituida de forma directa por la pintura a la cal cuando se requiere concluir más rápido las obras y utilizar menor cantidad de material. Esta pintura se realiza con hidróxido de calcio más diluido, al que se le agregan pigmentos minerales, algún tipo de aglutinante orgánico (mucílago de cactáceas, caseína, leche, goma, cola, etc.) y un poco de sal común o alumbre.

Esta sucesión de capas permite lograr una adecuada adherencia entre el recubrimiento y el núcleo de tierra, como resultado tanto de la penetración del mortero en los poros de la materia base como por la re-cristalización de carbonato de calcio en torno a los granos de arena que componen la tierra del muro o del terrado de las cubiertas.

¹⁴ Diana Magaloni (1995), “Técnicas de la pintura mural en Mesoamérica”, *Arqueología Mexicana*, núm. 16, p. 18.

¹⁵ Luis Guerrero (2006), “Aplicación de la cal en estructuras tradicionales de tierra”, *Anuario de Investigación sobre Diseño Sustentable*, p. 54.

Las mezclas a base de cal que se utilizan como recubrimiento o como pintura han de ser aplicadas en las épocas del año más frías y húmedas, pero hay que tomar en cuenta que un exceso de humedad relativa del aire (es decir, de 80%) resulta contraproducente. Con temperaturas superiores a los 30°C se aceleran los procesos de fraguado, y con menores a los 7°C se retrasan, y si bien es cierto que entre más lento sea el secado de las mezclas la resistencia final será mucho mayor, cuando se llegan a presentar heladas es necesario suspender los trabajos. Asimismo, los acabados han de ser protegidos de los rayos directos del sol y de corrientes fuertes de viento que incidan en la velocidad del secado.¹⁶

Figura 8. Aplicación de recubrimientos de cal



Estabilización de tierra mediante el uso de cal

En lo que se refiere al uso de la cal como estabilizante de la tierra, las aplicaciones son diversas. La documentación más antigua que se conoce sobre este tema se refiere

¹⁶ Ignacio Gárate, *op. cit.*, p. 94.

específicamente a la elaboración de tapiales en los que de manera tradicional se empleaba la cal como agregado. Una fuente muy interesante al respecto es el libro *Los prolegómenos*, escrito por Ibn Jaldun, aproximadamente en el siglo XIV. Este texto explica, con respecto a la fabricación de muros de tierra, que:

Otra rama es formar las paredes con sola arcilla. Se sirve para esta operación de dos tablas, cuya longitud y anchura varían según los usos locales; pero sus dimensiones son, en general, de cuatro varas por dos. Se colocan estas tablas (a lo largo) en los cimientos [...], y se vierte allí una mezcla de tierra y cal que se apisona en seguida con pisones hechos a propósito para ese fin.¹⁷

Documentos posteriores, también españoles, hacen mención al uso de la cal como ingrediente de los núcleos de muros de tapia, haciendo distinción entre cuatro tipos. Primero, la llamada “tapia ordinaria”, en la que se empleaba sólo tierra. Luego la “tapia real”, formada por mezclas de tierra con 10% de cal apagada en polvo. Después estaba la “tapia calicostrada” o “acerada”, que recibe este nombre debido a su altísima resistencia y a que se trataba de tapias reales recubiertas por ambas caras con mezclas de cal y arena. Al final estaba la “tapia valenciana” que Fernando García Salnero¹⁸ describe en su *Léxico de alarifes del siglo de oro* diciendo que “...se hace con tierra, medios ladrillos y cal, echando lechos de uno y de otro, y es una obra fortísima...”.

Estructuras similares o aún más endurecidas gracias a la presencia de grava y piedra se conocen en Portugal como “tapias militares”, y servían para realizar importantes fortificaciones y murallas de las que en nuestros días todavía se conservan imponentes restos en sitios como Paderne, al sur del territorio lusitano.

Desde la Segunda Guerra Mundial, los suelos estabilizados con cal han sido muy utilizados en la construcción, principalmente en las plantillas de carreteras, vías del ferrocarril y presas, en países como Alemania, Argentina, Brasil, España, Estados Unidos, Francia y Perú, entre muchos otros. Desde ese entonces, sobre todo en el campo de la ingeniería de caminos, se han desarrollado importantes investigaciones y prácticas sobre esta técnica, por lo que en la actualidad se cuenta, incluso, con algunas normas y especificaciones probadas por más de veinte años en tales países.

El principio de acción del suelo-cal es que la cal neutraliza los cationes libres de las arcillas estabilizándolas. De este modo en vez de tener partículas muy finas de arcilla, al combinarse con la cal las partículas se agrupan en partículas mayores más estables que no se deslizan

¹⁷ Juan Monjo (1998), “La evolución histórica de la arquitectura de tierra en España”, *Arquitectura de tierra. Encuentos Internacionales*, p. 33.

¹⁸ Juan Monjo, *op. cit.*, p. 36.

entre sí. La aplicación de la cal se hace en capas de 15 o 20 cm (zona superficial del camino). La dosificación es de 6% del volumen de tierra [...]. La solución planteada es de muy fácil ejecución y cuenta con un ahorro significativo frente a otras opciones como pavimento o asfalto [...]. Esta cal puede ser utilizada en todo tipo de morteros y en suelo cal donde se han obtenido muy buenos resultados en las densidades de compactación.¹⁹

Asimismo, la cal se ha empleado como consolidante en la fabricación de bloques de tierra comprimida (BTC) en lugar de cemento, con lo que se logra economizar su fabricación e incrementar su resistencia a la humedad y capacidad de carga, al tiempo que se controla la posible aparición de sales hidrosolubles que se manifiestan como eflorescencias conocidas comúnmente como “salitre”.

“Uma certa quantidade de cal, adicionada a terra, determina uma reação química entre os hidróxidos de cálcio e magnésio com os argilo-minerais dos solos. Essas misturas podem, então, ser usadas para a produção de tijolos, blocos e paredes monolíticas. Para essa finalidade, devem ser utilizados cales hidratados, desde que de boa qualidade”.²⁰

En Brasil, en décadas recientes, se han hecho importantes estudios acerca de la estabilización de tierra con cal a partir de la evidencia en el uso de esta mezcla en muchos edificios históricos. Como refiere Oliveira,²¹ aunque no existen muchas referencias documentales acerca del uso de la cal en estructuras históricas de tierra en aquel país, en la práctica parece ser un recurso frecuente desde épocas más antiguas de lo que suele pensarse, como se manifiesta en edificios pertenecientes al siglo XVII.

La cal era aplicada como estabilizante en la fabricación de adobes como lo demuestran piezas encontradas durante la restauración de la casa histórica de la familia Maniani, en Ilha das Vacas, Baía de Todos os Santos. En este edificio se analizaron piezas utilizadas en muros divisorios, las cuales contenían más de 20% en masa de carbonato de calcio. Sin embargo, el uso más frecuente de esta mezcla se aplicaba a la elaboración de tapias, en lo que se conoce localmente como *solo-cal* (suelo-cal) y que predominaba en los sistemas defensivos.

La construcción de murallas de suelo-cal se intensificó en Brasil con la llegada de ingenieros militares, en particular en el siglo XVIII, asociada a la generación de la nueva arquitectura abaluartada. La tierra estabilizada con cal, además de aumentar de manera significativa la resistencia de las estructuras al intemperismo, presenta

¹⁹ Fuente: www.ambar-minera.com.ar/cal_s.html

²⁰ Adilson Carvalho (1997), “Estabilização de solos com adições com cal”. *ABPC, Boletim*, núm. 13, p. 23.

²¹ Mário Oliveira (2005), “O solo-cal: uma visão histórica e documental”, *Memoria del IV SIACOT-IIIATP*, p. 2.

la cualidad de absorber los proyectiles con los que eran atacadas las fortificaciones, evitando los desprendimientos de fragmentos de material que presentaban las murellas hechas con piedra o ladrillo.²²

En fechas más recientes se realizó una serie de trabajos en la Universidad Federal del Bahía con miras a determinar el efecto de la composición mineralógica de las arcillas dentro de sistemas compactados de suelo-cal. En estas experiencias se han logrado establecer interesantes comparaciones entre tipos de mezclas con distribuciones granulométricas similares. Se desarrollaron diversos ensayos con probetas en las que se agregaron como estabilizantes fracciones de cal que variaban entre cero y 12 por ciento.

Entre los diversos resultados obtenidos, destaca el hecho de que para determinados tipos de suelos se pudieron obtener incrementos en la resistencia a la compresión simple que pasó de 6 hasta 15 kg/cm². Además, se evidenció la disminución de la contracción de las mezclas debido al secado, así como la limitación en la acumulación de agua. Las mejores respuestas se consiguieron agregando solamente entre 4 y 8% de cal.²³

Aunque se cuenta con datos históricos acerca de este tema y se han corroborado científicamente las cualidades de la aplicación de cal como estabilizante de la tierra asociadas a su comportamiento físico, todavía quedan muchos datos por descubrir, sobre todo acerca de los fenómenos químicos que se desarrollan al interior estas mezclas.

Se sabe de manera general, que en virtud de la dimensión y estructura laminar de las partículas de arcillo minerales que componen el suelo, los cationes de calcio se insertan entre las micelas de las arcillas incrementando su estabilidad, sobre todo ante la presencia de agua. Sin embargo, dada la diversidad de arcillas presentes en la naturaleza y la gran cantidad de componentes químicos que suelen contener, la relación de los cationes presenta notables variaciones en su comportamiento. Algunos estudios han demostrado que en estas mezclas se detectan formaciones de neo-silicatos y aluminatos hidratados de calcio que son muy adecuadas para mejorar las propiedades de los suelos, además de la contribución derivada de la propia carbonatación del hidróxido de calcio.²⁴

En fechas recientes, en el Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás

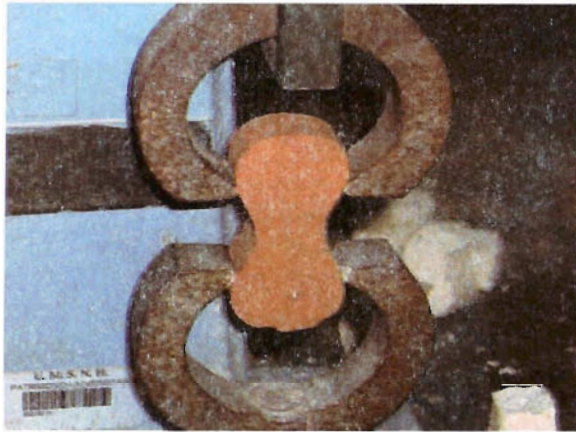
²² *Ibidem*, p. 5.

²³ Márcio Hoffmann (2002), *Efeito dos argilo-minerail do solo na matéria prima dos sistemas construtivos com solo cal*, p. 72.

²⁴ Mário Oliveira *et al.* (1990), “The Study of Accelerated Carbonation of Lime-Stabilized Soils”, *International Conference on the Conservation on Earthen Architecture*, pp. 166-170.

de Hidalgo, se han realizado cuantificaciones para encontrar proporciones ideales que mejoren el comportamiento físico-mecánico de piezas de arcilla dopadas, estabilizadas con minerales como cal y/o yeso. Las arcillas que se han caracterizado provienen del Banco de Santiago Undameo, Michoacán, y son del grupo smectitas, montmorilonitas. Las arcillas se han mezclado con cal o yeso, y su comportamiento puede resumirse como: sin estabilizante volumétrico la resistencia mecánica de piezas cúbicas de arcilla es del orden de 33% de la resistencia mecánica obtenida bajo las mismas condiciones de laboratorio, pero en piezas de arcilla estabilizadas con minerales como el yeso, (CaSO_4) o el carbonato de calcio (CaCO_3). Los cambios volumétricos también presentaron mejoría y disminuyeron notablemente.²⁵

Figura 9. Prueba de arcillas estabilizadas con cal y yeso



Conclusiones

El uso de la cal como material complementario de la tierra que conforma estructuras arquitectónicas presenta muchas cualidades de tipo constructivo, económico y ecológico.

Entre ellas podemos destacar que, debido a las pequeñas dimensiones cristalográficas de las partículas de cal, son susceptibles de penetrar en los minerales arcillosos, ocupando los lugares donde suelen estar las moléculas de agua, con lo que se evitan

²⁵ Mario Olguín (2008), *Comportamiento físico-mecánico de piezas de arcilla dopadas, estabilizadas con minerales como cal y/o yeso*.

cambios volumétricos en las arcillas, se mejora su adherencia y se eleva su resistencia mecánica a diferentes solicitaciones.

Esta cualidad permite, asimismo, que se formen cadenas cristalinas de carbonato de calcio en las que las arenas presentes en la tierra quedan atrapadas, con lo que se incrementa la resistencia del conjunto.

Debido a esta fuerza cohesiva, las mezclas con cal son altamente compatibles con la mayoría de los materiales constructivos tradicionales de tipo poroso, por lo que se pueden hacer diversos tipos de ligas y empotres.

Aunque en un principio las mezclas con cal no son muy resistentes, en poco tiempo su capacidad se incrementa y con los años ésta nunca decrece. Normalmente un mortero de cal-arena (1/3) a los siete días presenta una resistencia cercana a 100kg/cm^2 , a los 28 días puede llegar a los 125kg/cm^2 , a los 90 días 135kg/cm^2 y así sucesivamente.²⁶ De manera práctica se han obtenido valores de poco más de 80kg/cm^2 de resistencia a compresión en arcillas estabilizadas con 4 a 6% de yeso o cal.

Como resultado de la estructura y forma que los cristales presentan al fraguar, los morteros de cal funcionan como una especie de “filtro” del flujo del aire y del agua, por lo que, sin llegar a impermeabilizar totalmente los materiales, constituyen una eficaz protección ante la humedad.

Asimismo, esta permeabilidad hace posible que los materiales porosos que protegen puedan “transpirar y respirar” mediante el intercambio de aire y agua que evita que los núcleos de los muros, techos y entresijos retengan la humedad que se produce por la ascensión capilar o por la filtración, de manera que se conserva equilibrado su nivel higrotérmico.

Por otra parte, debido a la estabilidad de la cal cuando se encuentra en su fase de hidróxido de calcio, es posible realizar cantidades suficientes o hasta sobrantes de mezclas y morteros, sin generar desperdicios por su facilidad de almacenamiento.

También se obtiene mucha mayor facilidad de aplicación y distribución uniforme, con lo que se proporciona incluso la posibilidad de corregir errores de ejecución por la lentitud y homogeneidad del fraguado. Durante las jornadas de trabajo se logran mayores avances debido a que las mezclas no se endurecen demasiado rápido, lo que las haría difíciles de manejar.

Por otra parte, los procesos de carbonatación no concluyen con el aparente fraguado del material, sino que las reacciones se prolongan por mucho tiempo. Este hecho hace posible que las superficies encaladas tengan una función higiénica en dos sentidos. Por un lado, absorben el bióxido de carbono del aire y lo intercambian por vapor de agua, con lo que se convierten en sistemas de control y limpieza ambiental.

²⁶ Fuente: www.calhidra.com.mx/index1.html

Y, en segundo lugar, dada la alcalinidad y fuerza de la reacción que se lleva a cabo, la mayor parte de los gérmenes, hongos e incluso pequeños insectos, es repelida o erradicada.

Además, debido a la propiedad de absorción hídrica, la cal apagada aumenta su volumen en un 100% o más, con lo que se puede considerar que rinde prácticamente el doble en las mezclas con arena.

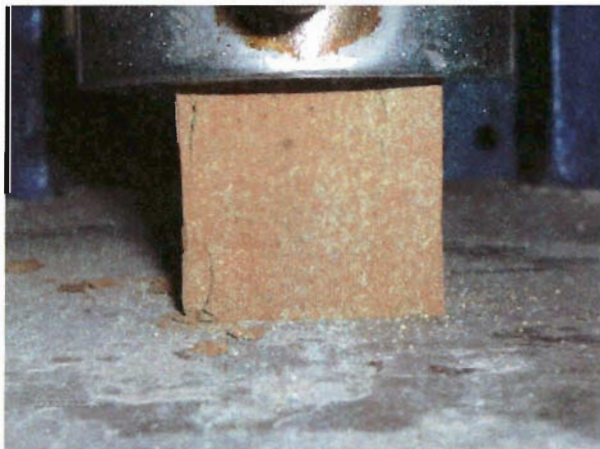
Con los siglos, la arquitectura de tierra ha demostrado ser amigable con el entorno por su elevada adaptación a la naturaleza. De este modo, su protección y estabilización con elementos de cal permite tanto su conservación material como la salvaguardia de la cultura constructiva tradicional que le dio origen.

La combinación entre la tierra y la cal, a través de experiencias atávicas, ha demostrado que es posible generar sistemas estructurales con una alta eficiencia térmica, que aprovecha de manera racional los recursos naturales y que tiene un bajo impacto sobre el ambiente cuando se desarrolla de manera sustentable.

La conservación e impulso al uso de la cal en los sistemas constructivos no sólo permite mantener viva una tradición histórica que forma parte de nuestro patrimonio, sino que puede incidir de manera directa en la elevación de la calidad de vida de la sociedad al permitir la configuración de espacios con mejores condiciones de confort y preservar el medio ambiente.

La recuperación y rehabilitación de los edificios históricos y tradicionales no solamente resulta trascendente para salvaguardar la cultura y la identidad social, sino que también contribuye claramente a la conservación del medio natural.

Figura 10. Resistencia a la compresión



Resultados obtenidos sobre el estudio de estabilización con cemento en diferentes tipos de arcilla¹

Rubén Salvador Roux Gutiérrez

Por mucho tiempo se ha considerado al cemento Pórtland como el más adecuado para la estabilización de suelos arcillosos en la búsqueda de materiales regionales que tengan un menor costo, así como una alta factibilidad en la construcción de viviendas, obtenidos a partir de suelos arcillosos estabilizados con este cemento; por tanto, se consideró necesario el estudio de esta técnica.

Por lo general, la estabilización con cemento plantea dos criterios fundamentales, a saber: la durabilidad y resistencia, repercutiendo ambos en el aspecto económico. Este último punto es muy importante, ya que se ha detectado que el empleo de aditivos en la mezcla de suelo-cemento, aporta ahorros muy significativos, así como una mejora de las propiedades del suelo tratado por dicho procedimiento.

Es evidente que cuando un material inerte o la mezcla de varios de ellos, no logra una estabilización mecánica adecuada, y que su resistencia es realmente baja, o bien que fácilmente se afecta por los cambios de humedad, es necesario, al formular un proyecto tomar en cuenta los materiales de “mala calidad”. [...] La técnica de la estabilización involucra una buena disgregación de suelo —específicamente en el caso de arcilla—, adición de cemento, mezcla en seco y adición en agua tanto de fraguado como la necesaria para la compactación.²

¹ Los autores agradecen el soporte financiero de la Coordinación de Investigación Científica de la UMSNH con el Proyecto 11.5, así como el soporte de movilidad del Proyecto Trainmonher CE, FP6-2002-INCO-COMULTILAT/SSA-5, el soporte técnico del ingeniero civil Mario Alberto Olguín Domínguez en las cuantificaciones. Asimismo, se cuenta con el apoyo de la División de Ciencias y Artes para el Diseño de la UAM-X.

² Carlos Fernández Loiza (1992), *Mejoramiento y estabilización de suelos*, p. 150.

Mecánica de la estabilización con cemento

Por lo general se tiene la idea de que las propiedades mecánicas de un suelo tratado con cemento son resultado del endurecimiento de éste. Si tal característica sólo se debiese a la hidratación del cemento, el suelo se podría considerar químicamente inerte, ello provoca que las partículas del cemento licúen a las partículas del suelo, formando un esqueleto relativamente continuo de un material duro y resistente que contiene un matiz de suelo inalterado en su composición química. Uno de los beneficios que se obtiene es el sellado de vacíos en el suelo tratado, haciéndolo más impenetrable y, por lógica, más resistente a los cambios de humedad.

Proyecto de estabilización

Es importante tener siempre en cuenta las características a obtener en el suelo estabilizado, tales como resistencia a la compresión, los agentes abrasivos, la trabajabilidad del suelo, entre otros, por lo cual es importante considerar las características originales del suelo a estabilizar —es decir, a los minerales arcillosos— para poder predecir el resultado que se obtendrá con la adición de cemento.

Existen muchos criterios para determinar la cantidad necesaria de cemento, pero para ello es muy importante analizar los factores de contenido de material orgánico presente en el suelo, como la acidez (ph), los porcentajes de los distintos minerales arcillosos, tipo de cemento, granulometría del suelo y minerales amorfos —sílice y alúmina— de este modo, se podrán obtener los resultados esperados.

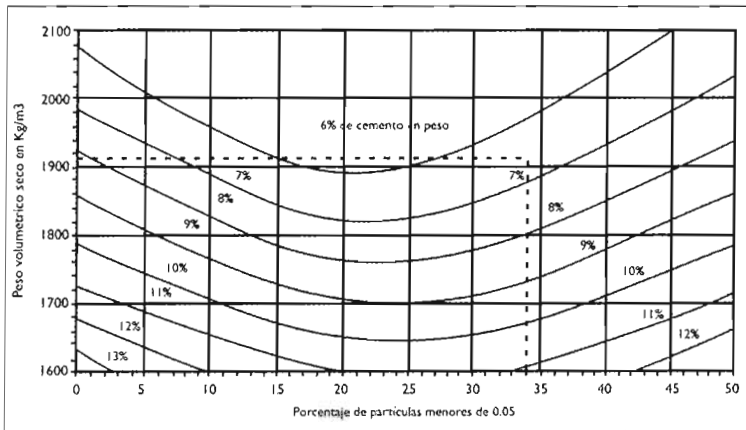
Al igual que en la estabilización con cal, existen un sinnúmero de procedimientos para la estabilización con cemento; por ser el más práctico, se analizará el método de la Portland Cement Association, llamado cemento “corto”,³ mismo que presenta dos variables:

La variable “A” es para aquellos suelos que contienen partículas que son retenidas en la malla núm. 4, a éste se le determina la granulometría y el peso volumétrico seco suelto, máximo Proctor. Con los datos obtenidos (véase gráfico 1), se obtiene el contenido de cemento; se fabrican tres especímenes que se compactan al 100%, con un curado de siete días, para determinar la resistencia, que debe ser mayor a la obtenida en el gráfico 2.

³ Como lo recomienda Carlos Fernández Loaiza (*op. cit.*, p. 178).

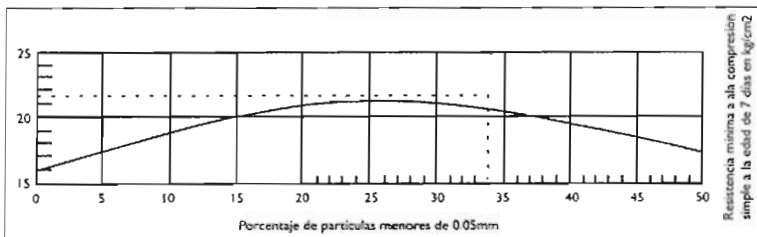
La variable “B” es para suelos que pasan la malla núm. 4; a éstos se les determina la granulometría y el peso volumétrico seco suelto, máximo Proctor. Con los datos obtenidos (gráfico 3) se calcula el contenido de cemento, se fabrican tres especímenes, compactados al 100%, con un curado de siete días, se determina la resistencia a la compresión simple, que debe ser mayor a la promedio estimada con la ayuda del gráfico 4.

Gráfico 1. Proporción de cemento requerido para estabilizaciones de suelos que no contienen partículas retenidas en la malla núm. 4



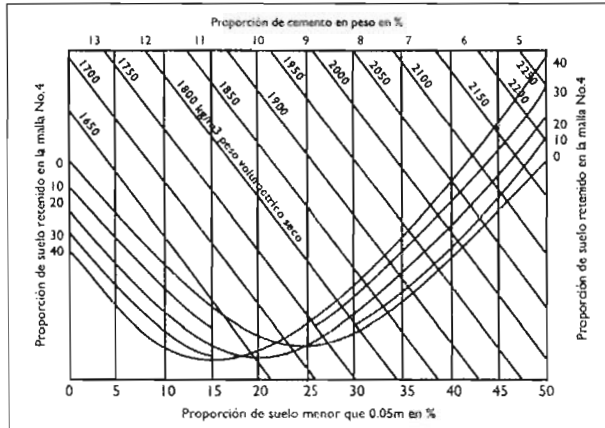
Fuente: elaboración propia con base en datos de Fernández Loaiza (1992), p. 150.

Gráfico 2. Resistencia mínima a la compresión simple a la edad de 7 días requerida para la mezcla de suelo con cemento que contenga partículas retenidas en la malla núm. 4



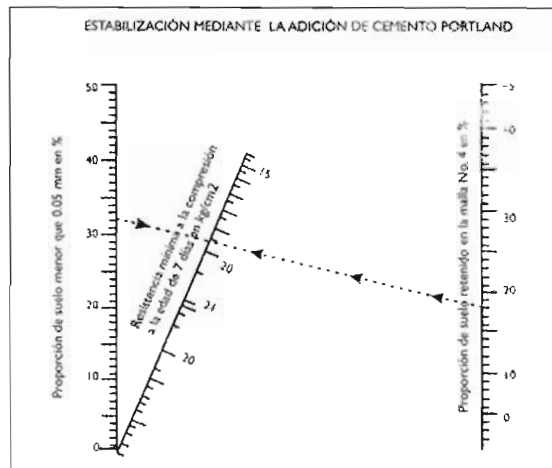
Fuente: elaboración propia con base en datos de Fernández Loaiza (1992), p. 150.

Gráfico 3. Proporción de cemento adecuado para la mezcla de suelo que contenga material retenido en la malla núm. 4



Fuente: elaboración propia con base en datos de Fernández Loaiza (1992), p. 150.

Gráfico 4. Resistencia mínima a la compresión simple a la edad de 7 días, requerida por la mezcla de suelo cemento que contienen material retenido en la malla núm. 4



Fuente: elaboración propia con base en datos de Fernández Loaiza (1992), p. 150.

Procedimiento de control en la dosificación

Los métodos que son empleados para el control de la dosificación del suelo-cemento suelen ser muy variables; en el presente trabajo se citan los más importantes, entre los cuales se pueden mencionar los siguientes:

1. Método químico.
 - a) Método ASTM 806-57.
 - b) Método Vargene.
 - c) Método de California.
2. Método de conductibilidad eléctrica.
3. Método de fotometría de flama.
4. Método de termómetro.⁴

Resultados obtenidos en el estudio de estabilización con cemento en los diferentes tipos de arcillas desarrollado por la Universidad de París X I. U. T. de Ville de Avray

El uso del cemento como estabilizador arroja buenos resultados en los problemas de contracción por secado, dilatación y absorción de agua. Asimismo, el estabilizador aumenta la cohesión de las partículas del suelo, sustituyendo a los materiales fibrosos. El cemento aumenta el módulo de elasticidad, el esfuerzo de compresión, dando una mayor seguridad para la construcción.

El hecho de elegir cemento como estabilizador de suelos arcillosos se justifica porque dicho material desempeña un papel importante en dos niveles:

- 1) Encuentra la floculación de los minerales arcillosos, reduciendo el área de contacto, limitando la absorción de agua.
- 2) Es un proceso de captación de iones de Ca^{++} con inserción posterior de estructuras de arcilla. En el caso de cemento, los iones Ca^{++} provienen prin-

⁴ *Ibidem*, p. 189.

principalmente de la hidratación del silicato tricálcico, acelerando el principio de hidratación.

A continuación se describen los resultados del uso de diferentes arcillas comunes, como son: las caolinitas, montmorilonitas e ilitas, utilizando como estabilizador los cementos siguientes: DPA, CPB (cemento mezclado con 25% de productos no metálicos de silicato de aluminio y silicato de calcio), y XHA (limo hidráulico artificial).

Estudio experimental realizado por la Universidad de París XI. U. T. de Ville Dávray

En esta parte se estudia la influencia de tres parámetros esenciales:

1. Naturaleza mineralógica.
2. La naturaleza del cemento y su contenido.
3. Las condiciones de curado.

Un parámetro importante es el concerniente a la plasticidad de mezclas manufacturadas, el cual resulta de pruebas que permitieron determinar el contenido óptimo de agua en relación con el peso del material sólido. Para la realización del estudio, la arcilla se secó al horno a una temperatura de 105°C para eliminar residuos de agua, una vez hecho lo anterior, se adoptó para todas las arcillas un radio de:

$$\left(\frac{E}{MS} = \frac{\text{Agua}}{\text{Materiales sólidos}} \right) = 0.90.$$

Asimismo, se aplicaron los siguientes regímenes de curado:

1. Para primera serie, los métodos estandarizados aplicados indicaron mantener el aire a 20°C y con una humedad relativa de 50 por ciento.

2. Para los segundos, se almacenaron los especímenes a la misma temperatura por un espacio de siete días en una atmósfera saturada de agua.

El esfuerzo de compresión a los 14 y 20 días, con diferentes arcillas de acuerdo con el contenido de cemento (mayor a 20%), se muestra en los gráficos 5 y 6, donde se observa que el esfuerzo se incrementa en relación con el contenido de cemento en todas las arcillas, dando valores mayores la arcilla caolinítica que las montmorilonítica e ílítica, pero cuya cohesión se debilitó con el paso del tiempo.

Los métodos estandarizados para el curado con agua —en relación con el esfuerzo de compresión, vinculado con el medio ambiente de 50% de humedad relativa— resultarán válidos, cualquiera que sea la naturaleza de las arcillas (gráfico 7). La adición de inertes en la mezcla de arena en 60% en peso mejora la resistencia a la compresión simple, pero provoca que se exceda el límite mínimo de 10% de cemento (gráficos 8 y 9).

Por otra parte, con la arcilla caolinítica, la cual tiene una mayor resistencia a la compresión, se varió el radio E/MS con un contenido de cemento de 15%, mostrado en el gráfico 10. Las curvas obtenidas muestran que la resistencia a la compresión alcanza un máximo de $E/MS=0.7$, con una variación más súbita que el concreto hecho de cemento Pórtland.

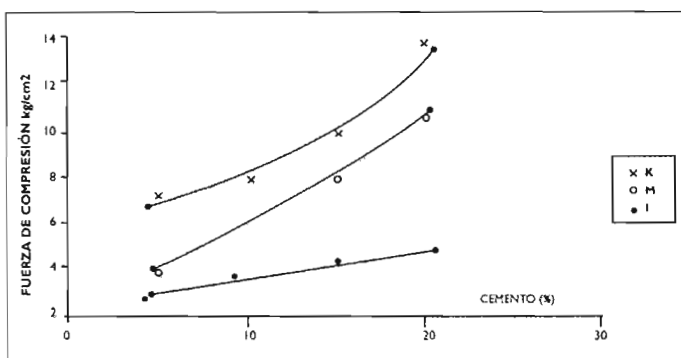
El estudio de mezclas arcilla-cemento mostró que el producto presentó una actitud real de absorción atmosférica de agua cuando éste fue expuesto a la humedad; la expansión de las muestras almacenadas en agua son mostradas en el gráfico 11.

El estudio de las mezclas arcilla-cemento muestra que:

1. La naturaleza mineralógica de la arcilla juega una parte [sic] importante en el esfuerzo de los productos. El esfuerzo de compresión decrece en orden caolinítica, montmorilonita e ílita.
2. El aumento de agua en la mezcla inicial es un factor fundamental que debe de ser tomado en cuenta para asegurar un esfuerzo suficiente.
3. En la mayoría de los medios disminuye ligeramente el esfuerzo, cualquiera que sea la naturaleza de la arcilla.
4. Para un punto de vista práctico, los resultados de esta serie de pruebas muestran que un pequeño aumento de materiales fibrosos es suficiente para elaborar productos de construcción que tengan esfuerzos similares. La presencia de inertes es de cualquier forma necesaria para prevenir una mayor absorción de agua cuando los productos son expuestos al mezclado.

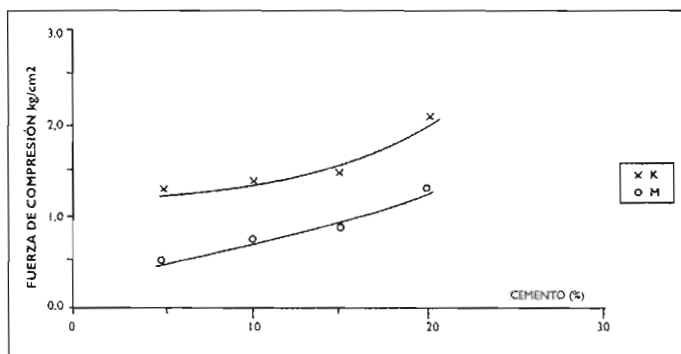
Un trabajo en esta forma consiste en materiales de fabricación por compactación dinámica muestra la limitación al contenido del agua el cual se reduce en orden a la contracción del secado con posible dilatación en caso de mezclados prolongados.⁵

Gráfico 5. Influencia del contenido de cemento en la fuerza de compresión a los 14 días



Fuente: Boyle-Bodin *et al.* (1989), *op. cit.*, p. 211.

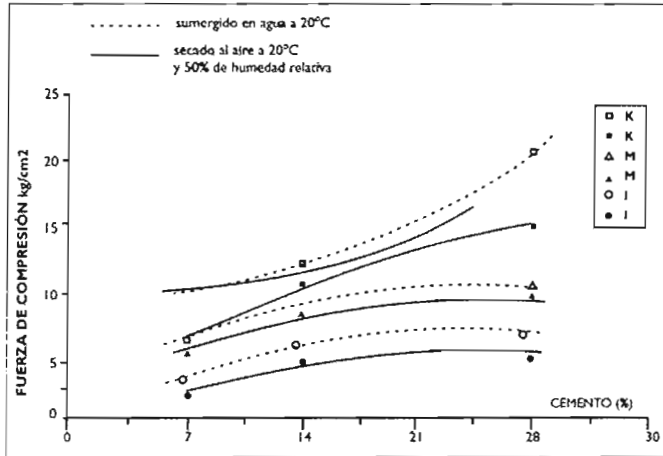
Gráfico 6. Influencia del contenido de cemento en la fuerza compresiva a los 28 días



Fuente: Boyle-Bodin *et al.* (1989), *op. cit.*, p. 212.

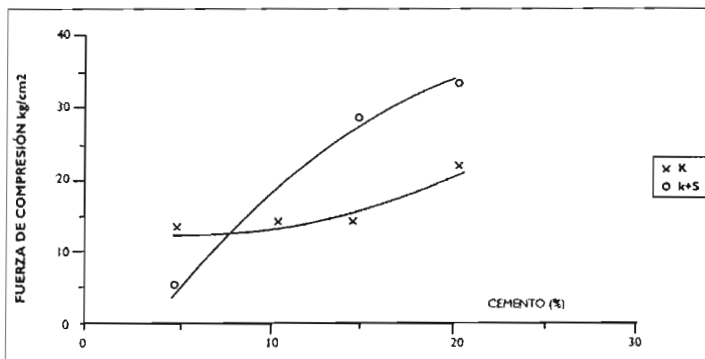
⁵ F. Boyle-Bodin *et al.* (1989), *Estudio de la influencia del género de las arcillas en la elaboración de productos de "barro" estabilizado con mortero hidráulico*, vol. 1, p. 215.

Gráfico 7. Efectos de las condiciones de curar en la fuerza de compresión de las mezclas que contienen 15% de cemento



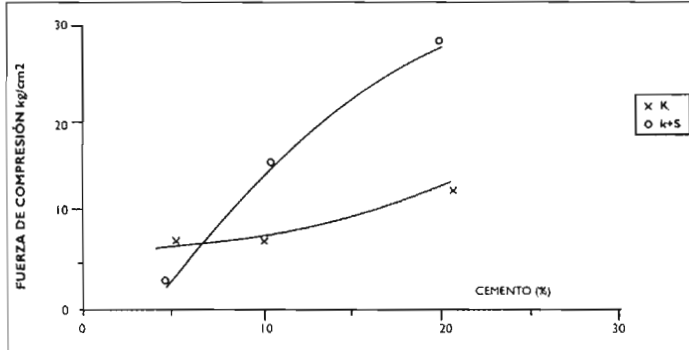
Fuente: Boyle-Bodin *et al.* (1989), *op. cit.*, p. 212.

Gráfico 8. Efecto de mezclas de arena en la fuerza de compresión a los 14 días (contienen 15% de cemento)



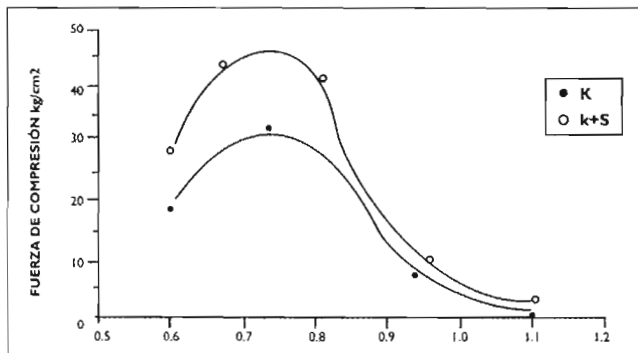
Fuente: Boyle-Bodin *et al.* (1989), *op. cit.*, p. 213.

Gráfico 9. Efecto de mezclas de arena en la fuerza de compresión a los 28 días



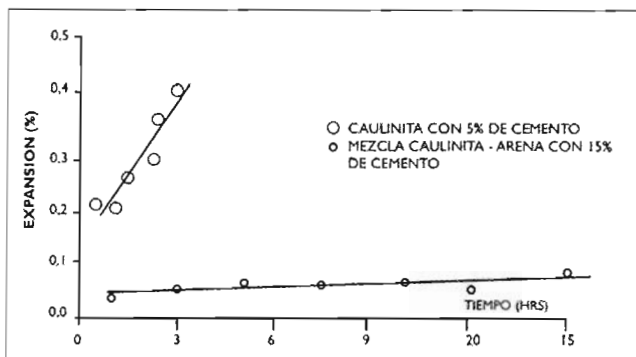
Fuente: Boyle-Bodin *et al.* (1989), *op. cit.*, p. 213.

Gráfico 10. Fuerza de compresión contra cociente agua (15% de cemento + 85% caolinita)



Fuente: Boyle-Bodin *et al.* (1989), *op. cit.*, p. 214.

Gráfico 11. Variación de expansión con el tiempo para mezclas inmersas en agua



Fuente: Boyle-Bodin *et al.* (1989), *op. cit.*, p. 215.

Estabilización con otros productos

Asfalto

Como en cualquier estabilización, se busca la obtención de un producto de mejor calidad que los originales, existiendo la posibilidad de que se utilicen materiales con aditivos, con el propósito de que presenten una tendencia favorable para utilizarse en la construcción, sobre todo cuando están constituidos por limos, arcilla, arena y grava; la naturaleza de los asfaltos los hace un material de uso recurrente para lograr una estabilización exitosa.

La estabilización con asfalto constituye un tema muy amplio por la gran cantidad de productos que existen, y con los cuales se logran buenos resultados en la estabilización de suelos arcillosos. En el entorno existe una gran variedad de ellos, entre los cuales destacan: los cementos asfálticos, los asfaltos rebajados y las emulsiones asfálticas. Para el tratamiento de arcilla con asfalto se presenta un problema: su alto costo, por lo que tal mezcla sólo se emplea como riego de impregnación en el pavimento, para con ello lograr la impermeabilización.

Polímeros

Por lo general, la utilización de estos productos se realiza con el afán de formar una estructura impermeable a los efectos del agua; para lograrlo, casi siempre se utilizan en este procedimiento resinas sintéticas y naturales. Dentro de estas últimas se encuentran la anilina y el furfural, entre otros; el proceso de preparación se efectúa mezclando primero uno de los líquidos con el suelo y posteriormente se procede a compactarlo.

La cantidad de resina a emplear es el equivalente a 2% en peso, pero se debe tener precaución, ya que dicho material es muy tóxico; existen muchos productos que adquieren tal clasificación y su comportamiento es muy variable, dependiendo principalmente del suelo; por otra parte, la estabilización con polímeros es costosa.

De acuerdo con las características de las arcillas concurren diferentes métodos de estabilización de suelos arcillosos, y los estudios realizados por investigadores suponen la siguiente hipótesis: si al suelo arcilloso con el que se realiza el tabique de adobe se le proporciona la humedad óptima en el momento de la compactación y se estabiliza con cemento, se obtendrá un producto barato y de buena calidad para la construcción de vivienda popular en climas tropicales húmedos.

Diseño experimental

Para realizar el estudio se tomó una muestra de arcilla de la parte poniente de la ciudad de Tampico de terrenos colindantes con un conjunto habitacional de Infonavit.

A dicha arcilla se le determinaron los límites líquidos, el límite plástico y el índice de plasticidad, el cual se clasificó con la tabla correspondiente. Después se realizaron las pruebas de contracción lineal, así como la prueba de compactación Proctor para obtener la humedad óptima de compactación.

Una vez realizadas las pruebas anteriores, la arcilla se mezcló con arena de río e ixtle en proporción 60, 39 y 1%, respectivamente, para proceder a fabricar tres poblaciones de prueba, las cuales contaron con un número de especímenes de 40 cada uno.

Dicha población fue estabilizada con cemento en las siguientes proporciones: la primera con 6% de cemento en peso, la segunda con 8% en peso, y la tercera con 10% de cemento en peso. Una vez fabricadas las poblaciones, se les dejó secar a la sombra durante tres días, y posteriormente al sol durante 12 días; más adelante se tomaron 30 especímenes de cada población de forma aleatoria, y se realizó la prueba de resistencia a la compresión, verificando que en todo momento se trabajara en

estado seco con la mitad de ellos, y la otra mitad se colocara en agua durante 24 horas para inmediatamente hacer la prueba de compresión simple en estado húmedo, apegándose a las normas NMX-C-36-1983 y NMX-C-6-1976.

Una vez realizado lo anterior, se tomaron cinco especímenes aleatoriamente de cada población y se les colocó en agua durante 24 horas para realizar la prueba de absorción, acoplándose con las normas NMX-C-37-1986 y NMX-C-6-1976.

Asimismo, se realizó una prueba de intemperismo, sumergiendo los últimos cinco especímenes en agua durante tres semanas para determinar los deterioros que pudo tener el espécimen y comprobar la resistencia a la compresión simple, mencionada anteriormente.

Se realizó el análisis económico del producto, obteniéndose costos de insumos, de horario de maquinaria, además de aplicarse cargos por indirectos y utilidad. Se debe considerar que los resultados obtenidos, en todo caso, deberán ser comparados contra otros materiales existentes en el mercado de la región.

Con los resultados finales obtenidos de las pruebas a la compresión simple en estado seco y húmedo se realizó el proceso estadístico empleando el procedimiento de la "F" de Fisher para aprobar o disprobar la hipótesis.

Muestreo

El muestreo que se aplicó se apega a las normas oficiales mexicanas, las cuales indicaron: "se recomienda que deben de tomarse aleatoriamente, tomando 10 piezas como mínimo por cada lote de diez mil piezas o fracción".⁶

Lo anterior se ratifica con la ponencia denominada "Código y lineamiento relativos a la intensidad de muestreo de los materiales utilizados en la construcción de viviendas", presentada por el Ing. Raúl Menchaca Menchaca en el *Tercer Simposium CIB/RILEM*, realizado en la ciudad de México el día 9 de noviembre de 1989, en donde se alude a lo siguiente: en el caso de tabiques de barro se acostumbra considerar una muestra integrada de 10 piezas, cinco para obtener resistencia a la compresión simple y cinco para obtener su capacidad de absorción, tomando como promedio de utilización el promedio equivalente a cinco viviendas.⁷

⁶ Norma Oficial Mexicana, NOM-C-10-1986, p. 6.

⁷ Raúl Menchaca (1989), "Código y tratamiento relativos a la intensidad de muestreo de los materiales utilizados en la construcción de viviendas", *Tercer Simposium CIB/RILEM*, vol. II, p. 126.

Aparatos e instrumentos

Para validar el trabajo experimental, se aplicaron las normas técnicas, así como las pruebas de laboratorio a partir de los aparatos que se describen más adelante.

Las dimensiones de los tabiques de adobe se rigen por la NOM-C-6-1976, la cual describe lo siguiente:

Tabla 1. Medidas de los adobes, NOM-C-6-1976

<i>Tipo</i>	<i>Medidas de fabricación (mm)</i>
Largo	290
	190
Ancho	90
	140
	190
Altura o peralte	290
	45
	65
	90
	140
	190
	290

Fuente: *Norma Oficial Mexicana (NMX-C-6-1976)*, p. 3.

Otros fabricantes proponen las siguientes medidas:

Tabla 2. Comparativo de medidas

<i>Fabricante</i>	<i>Medidas (mm)</i>
Italmex	Largo: 280 Ancho: 140 Peralte: 90
Itavu	Largo: 300 y 400 Ancho: 150 y 400 Peralte: 100 y 100

Fuente: elaboración propia con base en datos de la empresa Ital Mexicana, S. A. de C. V. (Italmex) y el Instituto Tamaulipeco de la Vivienda y Urbanismo (Itavu).

Para los efectos de esta investigación, se seleccionó la especificación que proporciona Italmex, ya que se contó con una máquina Adopress 2000. Debido a que los procedimientos de fabricación son múltiples, en este documento sólo se tratan los de tipo hidráulico, cuya maquinaria se describe a continuación.

Adopress 2000

Máquina para la fabricación de adobloques prensados, construida totalmente de acero estructural, la cual cuenta con un molde para producir piezas con una dimensión de 90x140x280mm. Además incluye un sistema hidráulico a base de una unidad oleodinámica que hace operar el pistón hidráulico por medio de una válvula direccional manual, cuya función es compactar el material depositado en el molde a 60kg/cm². Asimismo, se estructura por un depósito de aceite para la unidad oleodinámica con una capacidad de 100 litros Y con un motor de 10 H. P. de 220/60 eléctrico.⁸

Mezcladora

Para dar un mejor mezclado al material, se utilizó una mezcladora eléctrica con las siguientes características:

Mezcladora de tipo turbina de cuba circular con palas y acorazamiento interiores intercambiables, de acero magnesio para larga duración, los ejes que la sostienen están montados sobre chumaceras selladas y sobredimensionadas, con un motor de 5 H. P. de 220/60 eléctrico, la producción de la mezcladora es de 5.5 a 6.5 m³/hora, con un tiempo por ciclo de 60 segundos.⁹

Resistencia a la compresión simple

Máquina de prueba

De acuerdo con la NOM-C-36-1983 la cual dice:

La máquina de prueba debería estar equipada con dos bloques de acero, cuya dureza Rockwell C, no sea menor de 60 y de dureza Brinell N 620; una de las cuales tendría

⁸ Información proporcionada en entrevista personal con el Ing. Roberto González; en la ciudad de México, durante el *Tercer Simposium CIB/RILEM*.

⁹ *Ibidem*.

asiento esférico que transmitiera la carga a la superficie de la probeta, y el otro en un bloque plano rígido en el cual se destacó la probeta.

Cuando el área de aplicación de la carga de los bloques de acero no fue suficiente para cubrir el área que va a cargar en la probeta deben colocarse placas adicionales de acero que cumplieran con los requisitos que se anotaron en el párrafo siguiente, éstas se colocaron entre los bloques de carga y la probeta cabeceada de modo que el centroide de la superficie a la cual se le aplicó la carga y se alineó con el centro de los bloques de la máquina.

Placas y bloques de prueba

Las superficies de los bloques y placas de carga no deberían diferir de un plano en más de 0.025mm en cualquiera de las dimensiones y en 152.4mm en el centro de la esfera del bloque superior, deberían coincidir con el centro de la carga. Si se usara placa de carga, el centro de la esfera debería caer en una línea que pasara verticalmente en el centroide de la carga de la probeta.

El bloque con asiento esférico debería mantenerse fijo en su sitio, esto obligaría a girarlo ligeramente en cualquier dirección. El diámetro de la cara de la carga de los bloques debería entonces ser cuando menos de 16cm. Cuando se emplearan placas de acero entre los bloques de carga y la probeta, éstos deberían tener un espesor igual, por lo menos de la tercera parte de la distancia de la orilla del bloque de carga a la esquina más distante de la probeta.¹⁰

Procedimiento

De acuerdo con la NOM-C-36-1983 para hacer 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 acero— 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.

Cálculos de resultados

Para calcular los resultados se tomó la carga máxima en kilos y se dividió entre el área transversal de la probeta, siendo ésta la medida total de una sección perpendicu-

¹⁰ Norma Oficial Mexicana, NOM-C-36-1983, p. 2.

lar 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:

$$AN = At - Ah$$

Donde:

An= área neta

At= área total de la superficie de la carga

Ah= área de los huecos.¹¹

Especificaciones

Según la NMX-C-6-1976, la resistencia a la compresión simple debía de ser como mínimo para tabiques MqM-D de 50kg/cm², en promedio de cinco piezas y de 40kg/cm² de forma individual.

Determinación de la absorción del agua

Esta medida se busca en las especificaciones de la NMX-C-37-1986.

Procedimiento

Se registró el peso seco de cinco muestras y posteriormente se sumergieron en agua a una temperatura de entre 17 y 23°C por un tiempo máximo de 24 horas; una vez terminado el periodo, se retiraron, se deshumedecieron y finalmente se secaron.

Posteriormente, se obtuvo el peso específico sumergiendo el espécimen atado con un alambre, o bien con un cordón de nylon, de un diámetro pequeño, cuyo peso no debió ser mayor a 0.5% del peso de la pieza; después se colocó en una canastilla, la cual pendió de un brazo de la balanza; el proceso anterior se realizó evitando que el alambre tocara las paredes y el fondo del recipiente.¹²

¹¹ *Ibidem*, p. 4.

¹² *Norma Oficial Mexicana*, NOM-C-37-1986, p. 3.

Tabla 3. Cálculo para la absorción de agua

Cálculo	$A = \frac{M_{sss} - M_s}{M_{sss} - P_a} \times 100$
Donde	A = El volumen de agua retenida en el volumen aparente del espécimen en dm ³ /m ³ . Ms = Peso seco del espécimen en kilos. Msss = Peso específico y superficie seco en kilos. Pa = Peso ahogado en kilos (38).

Especificaciones

Según la NMX-C-6-1976 para tabiques MqM-D, la absorción debería ser de 18% para el promedio de cinco piezas y de 20% para piezas individuales.

Análisis de datos

Prueba de resistencia a la compresión

Tabla 4. Resultados de ensayos de compresión simple de BTC estabilizados con 6% de cemento en estado seco

Fecha de producción: 8 de julio de 1989. Fecha de ensayo: 18 de julio de 1989. Ensayo de ladrillo crudo procesado. Prueba de resistencia a la compresión simple en estado seco.						
Material con que fue realizada la mezcla: a) Arcilla 60% b) Arena 39% c) Ixtle 1% Estabilizado con 6% de cemento.						
Cantidad de estabilizador en gr	Área en cm	Carga en kg		Carga en kg/cm		Edad en días
		1° gr	Rupt. total	1° gr	Rupt. total	
460	392	11 500	11 500	29.33	29.33	10
460	392	10 000	11 000	25.51	28.06	10

Continúa...

RESULTADOS OBTENIDOS SOBRE EL ESTUDIO DE ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO

Continuación...

Cantidad de estabilizador en gr	Área en cm	Carga en kg		Carga en kg/cm		Edad en días
		1° gr	Rupt. total	1° gr	Rupt. total	
460	392	10 000	14 500	25.51	36.99	10
460	392	11 000	14 500	28.06	36.99	10
460	392	15 000	16 000	38.26	40.81	10
460	392	11 000	17 000	28.06	43.36	10
460	392	15 000	16 000	38.26	40.81	10
460	392	15 500	15 500	39.54	39.54	10
460	392	11 000	11 000	28.06	28.06	10
460	392	15 000	18 000	38.26	45.91	10
460	392	6 000	20 000	15.30	51.06	10
460	392	18 500	22 000	47.19	56.12	10
460	392	7 000	16 500	17.85	42.09	10
460	392	18 000	21 000	45.91	53.57	10
460	392	14 000	17 000	35.71	43.36	10
Promedios de la prueba				33.15	41.40	

Fuente: elaboración propia con base en datos obtenidos de los ensayos de laboratorio.

Tabla 5. Resultados de ensayos de compresión simple de BTC estabilizados con 6% de cemento en estado húmedo

Fecha de producción: 8 de julio de 1989.						
Fecha de ensayo: 18 de julio de 1989.						
Ensayo de ladrillo crudo procesado.						
Prueba de resistencia a la compresión simple en estado húmedo.						
Material con que fue realizada la mezcla:						
a) Arcilla 60%						
b) Arena 39%						
c) Ixtle 1%						
Estabilizado con 6% de cemento: inmersión durante 24 horas.						
Cantidad de estabilizador en gr	Área en cm	Carga en kg		Carga en kg/cm		Edad en días
		1° gr	Rupt. total	1° gr	Rut. total	
460	392	12 000	14 000	30.61	35.71	10
460	392	11 000	12 000	28.06	30.61	10
460	392	5 500	8 000	14.03	20.40	10

Continúa...

LOS BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA (BTC) EN ZONAS HÚMEDAS

Tabla 5. Resultados de ensayos de compresión simple de BTC estabilizados con 6% de cemento en estado húmedo (continuación)

Cantidad de estabilizador en gr	Área en cm	Carga en kg		Carga en kg/cm		Edad en días
		1° gr	Rupt. total	1° gr	Rupt. total	
460	392	5 000	9 000	12.75	22.95	10
460	392	5 000	10 000	12.75	25	10
460	392	8 000	16 000	20.40		10
460	392	8 000	12 000	20.40		10
460	392	5 000	12 000	17.85		10
460	392	5 000	11 000	12.75		10
460	392	5 000	12 000	12.75		10
460	392	5 000	11 000	12.75		10
460	392	6 000	12 000	15.30		10
460	392	5 000	9 000	12.75		10
460	392	5 000	10 000	12.75		10
460	392	5 000	12 000	12.75		10
Promedios de la prueba				33.15	41.40	

Fuente: elaboración propia con base en datos obtenidos de los ensayos de laboratorio.

Tabla 6. Resultados de ensayos de compresión simple de BTC estabilizados con 8% de cemento en estado seco

Fecha de producción: 12 de julio de 1989.						
Fecha de ensayo: 22 de julio de 1989.						
Ensayo de ladrillo crudo procesado.						
Prueba de resistencia a la compresión simple en estado seco.						
Material con que fue realizada la mezcla:						
a) Arcilla 60%						
b) Arena 39%						
c) Ixtle 1%						
Estabilizado con 8% de cemento.						
Cantidad de estabilizador en gr	Área en cm	Carga en kg		Carga en kg/cm		Edad en días
		1° gr	Rupt. total	1° gr	Rupt. total	
613	392	24 000	25 000	61.22	63.77	10
613	392	26 000	27 000	66.33	68.88	10
613	392	28 000	33 000	71.43	84.18	10

Continúa...

RESULTADOS OBTENIDOS SOBRE EL ESTUDIO DE ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO

Continuación...

Cantidad de estabilizador en gr	Área en cm	Carga en kg		Carga en kg/cm		Edad en días
		1° gr	Rupt. total	1° gr	Rupt. total	
613	392	26 000	30 000	66.33	76.53	10
613	392	31 000	34 000	77.08	86.73	10
613	392	29 500	31 000	75.25	77.08	10
613	392	29 000	30 000	73.98	76.53	10
613	392	30 000	30 000	76.53	76.53	10
613	392	29 000	30 000	73.98	76.53	10
613	392	25 000	30 000	63.77	76.53	10
613	392	28 500	32 000	72.70	81.63	10
613	392	30 000	34 000	76.53	86.73	10
613	392	30 000	32 000	76.53	81.63	10
613	392	25 000	30 000	63.77	76.53	10
613	392	25 000	29 000	63.77	73.98	10
Promedios de la prueba				70.61	77.72	

Fuente: elaboración propia con base en datos obtenidos de los ensayos de laboratorio.

Tabla 7. Resultados de ensayos de compresión simple de BTC estabilizados con 8% de cemento en estado húmedo

Fecha de producción: 12 de julio de 1989.						
Fecha de ensayo: 22 de julio de 1989.						
Ensayo de ladrillo crudo procesado.						
Prueba de resistencia a la compresión simple en estado húmedo.						
Material con que fue realizada la mezcla:						
a) Arcilla 60%						
b) Arena 39%						
c) Ixtle 1%						
Estabilizado con 8% de cemento: inmersión durante 24 horas.						
Cantidad de estabilizador en gr	Área en cm	Carga en kg		Carga en kg/cm		Edad en días
		1° gr	Rupt. total	1° gr	Rupt. total	
613	392	12 000	13 000	30.61	33.16	10
613	392	15 000	17 000	38.26	43.36	10
613	392	17 000	17 500	43.36	44.64	10
613	392	15 000	17 000	38.26	43.36	10

Continúa...

Tabla 7. Resultados de ensayos de compresión simple de BTC estabilizados con 8% de cemento en estado húmedo (continuación)

Cantidad de estabilizador en gr	Área en cm	Carga en kg		Carga en kg/cm		Edad en días
		1° gr	Rupt. total	1° gr	Rupt. total	
613	392	14 000	16 000	35.71	40.81	10
613	392	7 000	16 000	17.85	40.81	10
613	392	17 000	20 000	43.36	51.02	10
613	392	21 000	22 500	53.57	57.39	10
613	392	16 000	18 000	40.81	45.91	10
613	392	13 000	15 000	33.16	38.26	10
613	392	14 000	19 500	35.71	49.74	10
613	392	15 000	18 000	38.26	45.91	10
613	392	16 000	17 500	40.81	44.64	10
613	392	15 000	17 000	38.26	43.36	10
613	392	15 000	18 500	38.26	47.19	10
Promedios de la prueba				35.08	44.63	

Fuente: elaboración propia con base en datos obtenidos de los ensayos de laboratorio.

Tabla 8. Resultados de ensayos de compresión simple de BTC estabilizados con 10% de cemento en estado seco

Fecha de producción: 14 de julio de 1989.						
Fecha de ensayo: 24 de julio de 1989.						
Ensayo de ladrillo crudo procesado.						
Prueba de resistencia a la compresión simple en estado seco.						
Material con que fue realizada la mezcla:						
a) Arcilla 60%						
b) Arena 39%						
c) Ixtle 1%						
Estabilizado con 10% de cemento.						
Cantidad de estabilizador en gr	Área en cm	Carga en kg		Carga en kg/cm		Edad en días
		1° gr	Rupt. total	1° gr	Rupt. total	
766	392	24 000	44 000	61.22	112.24	10
766	392	30 000	41 000	76.53	104.57	10
766	392	25 000	42 000	63.77	107.14	10

Continúa...

RESULTADOS OBTENIDOS SOBRE EL ESTUDIO DE ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO

Continuación...

Cantidad de estabilizador en gr	Área en cm	Carga en kg		Carga en kg/cm		Edad en días
		1° gr	Rupt. total	1° gr	Rupt. total	
766	392	17 000	40 000	43.36	102.04	10
766	392	11 000	55 000	28.06	140.30	10
766	392	18 000	53 000	45.91	135.20	10
766	392	32 000	48 000	81.63	122.44	10
766	392	12 000	48 000	30.61	122.44	10
766	392	36 000	48 000	91.83	122.44	10
766	392	32 000	52 000	81.63	132.65	10
766	392	39 500	44 000	99.48	112.24	10
766	392	7 000	51 000	17.85	130.10	10
766	392	16 000	51 000	40.81	130.10	10
766	392	21 000	41 000	53.57	104.59	10
766	392	5 000	52 000	12.75	132.65	10
Promedios de la prueba				55.26	120.74	

Fuente: elaboración propia con base en datos obtenidos de los ensayos de laboratorio.

Tabla 9. Resultados de ensayos de compresión simple de BTC estabilizados con 10% de cemento en estado húmedo

Fecha de producción: 14 de julio de 1989.						
Fecha de ensayo: 24 de julio de 1989.						
Ensayo de ladrillo crudo procesado.						
Prueba de resistencia a la compresión simple en estado húmedo.						
Material con que fue realizada la mezcla:						
a) Arcilla 60%						
b) Arena 39%						
c) Ixtle 1%						
Estabilizado con 10% de cemento: inmersión durante 24 horas.						
Cantidad de estabilizador en gr	Área en cm	Carga en kg		Carga en kg/cm		Edad en días
		1° gr	Rupt. total	1° gr	Rupt. total	
766	392	20 000	35 000	51.02	89.28	10
766	392	30 000	36 000	70.63	91.83	10
766	392	23 000	37 500	58.67	94.38	10

Continúa...

Tabla 9. Resultados de ensayos de compresión simple de BTC estabilizados con 10% de cemento en estado húmedo (continuación)

Cantidad de estabilizador en gr	Área en cm	Carga en kg		Carga en kg/cm		Edad en días
		1° gr	Rupt. total	1° gr	Rupt. total	
766	392	20 000	36 000	51.02	91.83	10
766	392	20 000	39 000	51.02	99.48	10
766	392	25 000	33 000	63.77	84.18	10
766	392	30 000	37 000	76.53	94.38	10
766	392	24 000	36 000	61.22	91.38	10
766	392	23 000	37 000	58.67	94.38	10
766	392	24 000	38 500	61.22	98.21	10
766	392	26 000	37 000	66.32	94.38	10
766	392	23 000	38 000	58.67	96.93	10
766	392	32 000	35 000	81.63	89.28	10
766	392	32 000	38 000	81.63	96.93	10
766	392	30 000	38 000	76.53	96.93	10
Promedios de la prueba				35.08	44.63	

Fuente: elaboración propia con base en datos obtenidos de los ensayos de laboratorio.

Tabla 10. Resultados a la compresión simple, en estado seco obtenidas en otras investigaciones*

Mezcla utilizada y estabilizador	Carga en kg/cm ²	
	1a. Rupt	Rupt. total
Arcilla: 80% Limo: 10% Triturador: 10% Estabilizada con cal	10.17	53.26

* La prueba se realizó con una población de ocho especímenes.

Fuente: Sergio Higuera Gil (1981), *La casa de tierra*, p. 17.

Tabla 11. Resistencia a la compresión simple en estado húmedo obtenida en otras investigaciones

<i>Mezcla utilizada y estabilizador</i>	<i>Carga en kg/cm²</i>	
	<i>1a. Rupt</i>	<i>Rupt. total</i>
Arcilla: 80% Limo: 10% Triturador: 10%	36.6*	45.10
Estabilizada con: Cal* Cemento**	29.1**	30.90

* La prueba se realizó con una población de ocho especímenes.

** La prueba de humedad se hizo sumergiendo los especímenes en agua durante 24 horas.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 12. Comparación de resistencias mínimas a la compresión simple con otros materiales

<i>Tipo de material</i>	<i>Resistencia mínima a la compresión simple en kg/cm²</i>
Block hueco de concreto de muy buena calidad	60.0
Block hueco de concreto de media calidad	40.0
Ladrillo recocido	30.0
Adobe estabilizado con 8% de cemento	71.0

Fuente: elaboración propia.

Prueba de capacidad a la absorción

Tabla 13. Resultados de la prueba de absorción de agua

<i>Población núm. 1</i>	<i>Población núm. 2</i>	<i>Población núm. 3</i>
<i>Peso seco (kg)</i>	<i>Peso seco (kg)</i>	<i>Peso seco (kg)</i>
1. 7.700	7.650	7.100
2. 7.600	7.680	7.150
3. 7.720	7.700	7.120
4. 7.560	7.700	7.800
5. 7.680	7.100	7.110
<hr/>	<hr/>	<hr/>
38.26 / 5 = 7.652	38.44 / 5 = 7.688	36.26 / 5 = 7.256
<i>Peso húmedo (kg)</i>	<i>Peso húmedo (kg)</i>	<i>Peso húmedo (kg)</i>
1. 8.100	7.800	7.600
2. 8.000	7.720	7.620
3. 8.150	7.820	7.610
4. 8.180	7.830	7.630
5. 8.160	7.750	7.625
<hr/>	<hr/>	<hr/>
40.650 / 5 = 8.118	38.920 / 5 = 7.784	37.985 / 5 = 7.597

Fuente: elaboración propia.

Porcentaje de absorción:

Población 1: 6% de cemento $(7.652-8.118)/8.118 \times 100 = 5.74$ por ciento.

Población 2: 8% de cemento $(7.688-7.784)/7.784 \times 100 = 1.23$ por ciento.

Población 3: 10% de cemento $(7.256-7.597)/7.597 \times 100 = 4.49$ por ciento.

Tabla 14. Absorción de agua obtenida en otras investigaciones

<i>Mezcla utilizada y estabilizador</i>	<i>Tiempo sumergido en el agua (hrs)</i>	<i>% absorción</i>
Arcilla: 80% Limo: 10% Trituración: 10%	24.00	17.2
Estabilizada con cal		

Fuente: Sergio Higuera Gil, *op. cit.*, p. 45.

Tabla 15. Comparativo de costos con otros materiales locales

<i>Materiales</i>	<i>P. U. (pesos)</i>	<i>Piezas/m²</i>	<i>Costos/m² (pesos)</i>
Block de concreto	5.80	13.00	76.44
Ladrillo recocido	6.00	66.00	396.00
BTC	1.80	29.00	52.20

Fuente: elaboración propia.

Tabla 16. Prueba de intemperismo

<i>Población</i>	<i>Promedio de resistencia a la compresión simple kg/cm²</i>		<i>Promedio de absorción (%)</i>	<i>Observaciones</i>
	<i>1a. grieta</i>	<i>R. total</i>		
Núm. 1: 6% de cemento	37.75	39.79	10.00	No sufrió deterioro
Núm. 2: 8% de cemento	39.17	47.82	10.32	No sufrió deterioro
Núm. 3: 10% de cemento	31.63	53.00	12.63	No sufrió deterioro

Fuente: elaboración propia.

Análisis estadístico

Análisis de datos

Muestras

Las muestras fueron formadas con 15 especímenes cada una; los resultados que se muestran provienen de la prueba de compresión simple en estado seco (kg/cm²).

Tabla 17. Resistencia a la comprensión simple en estado seco en las poblaciones 1, 2 y 3

<i>Población 1</i>	<i>Población 2</i>	<i>Población 3</i>
29.33	63.77	112.24
28.02	68.88	104.59
36.99	76.53	107.14
40.81	84.18	102.04
43.36	86.73	140.30
40.81	79.08	135.20
44.64	76.53	122.44
28.06	76.53	122.44
45.91	76.53	122.44
51.02	76.53	132.65
56.12	81.63	112.24
42.09	86.73	130.10
53.57	81.63	130.10
43.36	76.53	130.10

Fuente: elaboración propia.

Medias muestrales:

Media de la muestra 1	41.40533
Media de la muestra 2	77.71934
Media de la muestra 3	120.75100
Media de medias	79.95856

Desviaciones estándar:

Muestra 1	8.613052
Muestra 2	6.162965
Muestra 3	12.173790
Desviación estándar entre columnas	39.7202

Varianzas:

Varianza entre columnas	385.6749
Varianza entre medias maestres	1577.694

RESULTADOS OBTENIDOS SOBRE EL ESTUDIO DE ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO

FACTOR “F” 4.0900

Grado de libertad en el numerador 2

Grado de liberación en el denominador 42

Límite de control (0.01) 5.16

Resultado se aprueba la hipótesis.

Análisis de datos

Muestras

Las muestras se formaron en 15 especímenes cada una; los resultados que se muestran corresponden a la prueba de compresión en estado húmedo, en kilos sobre centímetros cuadrados.

Tabla 18. Resistencia a la comprensión simple en estado húmedo de las poblaciones 1, 2 y 3

<i>Población 1</i>	<i>Población 2</i>	<i>Población 3</i>
31.61	30.61	51.02
28.06	38.26	70.62
14.03	43.36	58.67
12.75	38.26	51.02
12.75	38.71	51.02
20.40	17.85	63.77
17.85	43.36	76.53
12.75	53.37	61.22
12.75	40.81	58.67
12.75	33.16	61.22
12.75	35.71	66.32
15.30	38.26	58.67
12.75	40.81	81.63
12.75	38.26	81.63

Fuente: elaboración propia.

LOS BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA (BTC) EN ZONAS HÚMEDAS

Medias muestrales

Media de la muestra 1	16.06667
Media de la muestra 2	37.73667
Media de la muestra 3	64.57000
Media de medias	39.45778

Desviaciones estándar:

Muestra 1	5.861770
Muestra 2	7.5750227
Muestra 3	10.544510
Desviación estándar entre columnas	24.29743

Varianzas

Varianza entre columnas	112.10880
Varianza entre medias muestrales	590.36500

FACTOR “F” 4.83474

Grado de libertad en el numerador 2

Grado de liberación en el denominador 42

Límite de control (0.01) 5.16

Resultado se aprueba la hipótesis.

Reporte de la investigación

Para realizar las pruebas se tomó una arcilla de la parte poniente de la ciudad, específicamente de los terrenos colindantes al conjunto habitacional Infonavit, a la cual se aplicaron las siguientes determinaciones:

Clasificación

Se procedió a determinar el tipo de arcilla por medio de la obtención de su plasticidad y su contracción lineal, con los siguientes resultados:

RESULTADOS OBTENIDOS SOBRE EL ESTUDIO DE ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO

Límite líquido 32.91
 Límite plástico 22.31
 Índice plástico 10.62

De acuerdo con los anteriores datos y la tabla de plasticidad, se concluye que se trata de una arcilla con limos de baja plasticidad (CL).

La contracción lineal obtenida fue de 5mm, en una pastilla de 2x2x10cm. A la postre, se realizaron las pruebas de compactación Proctor, las cuales arrojaron los siguientes resultados:

Peso de la muestra 9.10 kg
 Contenido de agua adicionado 1.35 litros
 Peso máximo 1399.06 kg/m³
 Humedad óptica 15%

Estas pruebas se desarrollaron del 11 al 17 de marzo de 1989. Asimismo, se procedió a fabricar los especímenes de prueba en una máquina ux3 marca Ital-Mex Mod. Adopress 2000, con diferentes porcentajes de cemento y en las mezclas que se muestran enseguida:

Tabla 19. Población de prueba

<i>Población</i>	<i>Material</i>	<i>%</i>	<i>Núm. especímenes</i>
Núm. 1	Arena	60	40 pzas.
	Arcilla	39	
	Ixtle	1	
	Cemento	6	
Núm. 2	Arena	60	40 pzas.
	Arcilla	39	
	Ixtle	1	
	Cemento	8	
Núm. 3	Arena	60	40 pzas.
	Arcilla	39	
	Ixtle	1	
	Cemento	10	

Fuente: elaboración propia.

A cada producción se le hicieron las pruebas de resistencia a la compresión, siempre en una prensa hidráulica, según la NOM-C-36-1983, cuyo resultado promedio fue el siguiente: para la mezcla de 6%, de 33.15kg/cm² para la primera grieta, y de 41.40kg/cm² para la mezcla de 8% de cemento. Los resultados fueron: en estado seco de 70.61kg/cm² para la primera grieta, y de 77.72kg/cm² a la ruptura total; para la mezcla de 10% de cemento, en estado seco, los resultados fueron de 55.26kg/cm² para la primera grieta, y de 120.74kg/cm² para la ruptura total.

En estado húmedo se presentaron los siguientes hallazgos: 60.37kg/cm² a la primera grieta, y 93.61kg/cm² a la ruptura total. Estos resultados muestran que se cumple con la especificación NOM-C-6-1976 en el límite de capacidad de carga en lo que se refiere a las mezclas de 8 y 10% de cemento en estado seco; en lo referente al estado húmedo, solamente la mezcla de 10% cumple con la norma.

También se hizo la prueba de absorción de agua, según la NOM-C-37-1986, la conclusión fue, en promedio para la mezcla de 6% de cemento, de 5.74% de absorción; para la mezcla de 8%, de 1.23%; y para la mezcla de 10%, de 4.49%, estos resultados muestran que todas las mezclas cumplen con la NOM-C-6-19.

Para determinar su durabilidad, se realizó la prueba de inmersión en agua durante tres semanas, la resultante fue que los tabiques fabricados con la mezcla de 6% de cemento no sufrió ningún deterioro, tuvo una absorción de agua de 10%, y su resistencia a la compresión fue de 37.75kg/cm² a la primera grieta y de 39.79kg/cm² a la compresión simple; de 39.17kg/cm² a la primera grieta; y de 47.82kg/cm² a la ruptura total.

Los tabiques fabricados con la mezcla de 10% de cemento no sufrió deterioro, su absorción de agua fue de 12.68%, y su resistencia a la compresión fue de 31.63kg/cm² a la primera grieta, y de 53.0kg/cm² a la ruptura final. También se realizó un análisis económico del producto, el cual dio un valor de venta de 1.80 pesos por pieza y un costo de 52.20 pesos por metro cuadrado, siendo más económico en tal presentación, al incluir menos cantidad de piezas que otros materiales de menor costo unitario.

A manera de colofón, con los resultados obtenidos de la prueba de resistencia a la compresión simple en estado seco y húmedo, se realizó el proceso estadístico de la "F" de Fisher, los resultados determinan que la hipótesis es correcta.

Conclusiones y recomendaciones

Con relación al proceso de investigación desarrollado, se establece como sustento en las siguientes conclusiones que:

- El adobe es un material que se utiliza en diversas partes del mundo, desde países industrializados hasta los que se encuentran en vías de desarrollo, por lo cual se puede decir que existe toda una cultura del adobe a nivel mundial.
- Los suelos ideales para la fabricación de adobe son aquellos cuya plasticidad es baja y que cuentan con 40% máximo de contenidos de arena.
- El proceso de estabilización más adecuado y económico para las condiciones climatológicas de la zona conurbada de la desembocadura del Río Pánuco es la que utiliza el cemento Pórtland como agente estabilizador.
- El proceso de fabricación más adecuado es el que utiliza un prensado hidráulico, ya que éste le da una mejor compactación al tabique.
- El adobe elaborado durante el proceso experimental cumple con la Norma Oficial Mexicana (NOM-C-6-1976), en lo referente a la resistencia a la compresión simple, ya que los resultados obtenidos son superiores a lo requerido.
- En lo referente a la prueba de absorción de agua, las piezas mostraron menor absorción a la señalada por la NOM citada en párrafos anteriores.
- Presenta una durabilidad adecuada para la zona conurbada de la desembocadura del Río Pánuco, de acuerdo con las pruebas de inmersión a las que se sometieron las piezas durante tres semanas, las cuales no sufrieron deterioro alguno.
- El material resultó ser más económico por metro cuadrado que los materiales más usados en la región —ladrillos y bloques de concreto.
- Sus ventajas económicas son mayores debido a que puede ser utilizado de manera aparente, sin necesidad de recubrirlo.
- Resultó idóneo para su uso en la edificación de vivienda popular, puesto que la materia con la que se produce existe dentro de la zona, lo cual hace que se reduzcan los fletes por acarreo.
- No solamente puede ser utilizado en muros, sino también en la fabricación de cubiertas, pisos, etc., debido a sus características físicas y mecánicas.

Con base en estas conclusiones, se emiten las siguientes recomendaciones:

1. Es necesaria una mayor difusión de este tipo de producto para fomentar su uso, dadas sus bondades en comparación con otros de similar naturaleza y que además son los que hasta ahora se utilizan, los cuales no se ofertan a bajo costo, propiciando que sean poco asequibles.
2. Es fundamental una mayor investigación de los procedimientos constructivos que permitan el hallazgo de productos adecuados a la zona, y que además, ofrezcan alternativas de calidad a bajo costo.

Entre lo tropical y lo tradicional: desarrollando un modelo sustentable de vivienda de interés social en la zona del Golfo de México

*José Adán Espuna Mújica
Mireya Alicia Rosas Lusett*

Resumen

La zona del Golfo de México se caracteriza por ser básicamente de alta humedad relativa, un régimen térmico elevado de poca variación entre sus temperaturas máximas y mínimas en los meses de verano, y con una arquitectura habitacional que tiende a conservar su tipología y sistemas de edificación. La mayoría de las viviendas se ha construido con madera y ladrillos, sin embargo, en años recientes ha aparecido el bloc de concreto, lo que ha provocado una modificación en el microclima interior de las viviendas, aunado al progresivo encarecimiento de la construcción.

Por otra parte, si bien la construcción en años recientes ha demostrado sus bondades en cuanto a durabilidad y resistencia a los fenómenos atmosféricos, también ha provocado en las zonas urbanas de bajos recursos económicos o de interés social una serie de problemas ambientales, como lo es el aumento de las islas de calor, con las consecuentes modificaciones a las viviendas. En este mismo tenor, el aumento del costo de las viviendas ha sido la génesis de desarrollos cada vez de menor área habitable, es decir, parafraseando que más con menos, se ha conseguido “más incomodidad para los usuarios con menos espacio para desarrollar sus actividades”. El incremento de la población que se ha registrado en los últimos 30 años ha originado la construcción de una gran cantidad de espacios habitacionales, en los cuales las condiciones climáticas y biológicas han sido soslayadas; consecuentemente, se ha

presentado la inadecuación de la arquitectura al medio físico. Ello se identifica en las áreas que cada vez presentan una mayor densidad de población, las conocidas promociones de viviendas de interés social y lo reducido de sus áreas habitables, con una pobre calidad de vida, incrementando no sólo el número de habitantes en nuevas áreas urbanas, sino que también se presenta un incremento en las demandas de recursos hídricos y energéticos, promovido por los aparatos acondicionadores de aire, que se han convertido en una “compra obligada” para paliar los efectos de calor en las viviendas en los meses cálidos.

Para el caso del presente estudio, la unidad de análisis corresponde al denominado Modelo de Edificación Sustentable de Tierra, ubicado en Tampico, Tamaulipas, en los terrenos de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de la Universidad Autónoma de Tamaulipas. Cuando hablamos de este modelo se hace referencia a una vivienda de adobe, a las formas de construcción utilizadas, producto de la evolución de una técnica milenaria que responde a un sistema constructivo sustentable con propuestas particulares que se adecúan a su medio ambiente.

El doctor Rubén Roux empezó a desarrollar, primero, una serie de bloques de tierra comprimida estabilizados con 6% de cemento Pórtland tipo 1, que después de realizar una serie de pruebas de laboratorio, se evidenció la posibilidad de realizar un modelo escala 1:1 que permitiese monitorear el comportamiento interior de este prototipo en las condiciones naturales del entorno climático tropical de la zona sur de Tamaulipas. Esta idea de monitorear y evaluar la vivienda coadyuva a comprender cómo un adecuado diseño bioambiental optimiza las condiciones de habitabilidad en las viviendas y su relación con los aspectos medioambientales en los espacios exteriores.

Este capítulo presenta algunos datos y avances de la evaluación de la vivienda y su adecuación a un contexto caluroso en verano, con alta humedad relativa, con la intención de determinar de manera objetiva la influencia de los factores climáticos en los espacios diseñados de la misma, proponiéndose sistemas de medición higrotérmicos, así como su continua codificación. Los datos que se obtengan serán fundamentales para deducir si el Modelo de Edificación Sustentable de Tierra es igualmente adecuado desde el punto de vista de habitabilidad que uno convencional, en donde los datos que de ambos se recolecten permitirán concluir sobre las condiciones de bienestar del habitador de cada tipo de vivienda.

Introducción

El desarrollo de las viviendas desde una óptica económica o comercial ha sido causal, en la mayoría de las ocasiones, de que las viviendas hubiesen reducido sus dimen-

siones, afectando no solamente la comodidad de los habitantes, pues las medidas mínimas utilizadas no permiten realizar algunas actividades de manera adecuada. Sin embargo, las condicionantes físicas del entorno natural, que siempre han influido en la sensación de bienestar y de nuestra capacidad para el trabajo físico y mental, se han soslayado; lo mismo ocurre con la capacidad de disfrutar, descansar y dormir. Las combinaciones de condiciones climáticas producen sensaciones de lasitud y depresión que afectan a los individuos que habitan estos minúsculos cuartos.

Se ha escrito sobre la necesidad de vivienda en México para el año 2030, previendo que será de alrededor de 45 millones de hogares. Lo anterior representa la necesidad de edificar, a partir de 2001, un promedio de 766 mil viviendas anualmente, según datos de la Comisión Nacional del Fondo de Vivienda (Conafovi). La construcción de vivienda ejerce un efecto multiplicador sobre la economía, "...no sólo por el valor monetario de los bienes físicos, sino también porque contribuye a la productividad de los hogares",¹ además de ser un importante generador de empleos, al demandar una gran cantidad de bienes y servicios nacionales y ser un elemento articulador del crecimiento ordenado de las ciudades.

Estos factores se añaden a la incorporación de aspectos antropométricos, socio-culturales y psicológicos, por mencionar algunos que infieren de manera directa en la arquitectura. Evans y De Schiller² han sugerido que la fatiga climática es una de las causas principales del lento progreso de desarrollo tecnológico y económico de algunas de las regiones del trópico. Por el contrario, se puede relacionar el rápido crecimiento de ciertas naciones del lejano oriente con las mejoras de las condiciones en las viviendas y los lugares de trabajo como resultado de los progresos en el diseño de los edificios y la introducción de sistemas de acondicionamiento.

En el campo de la arquitectura es conocido el hecho de que un ambiente sensiblemente cálido resulta incómodo para los habitantes de los espacios diseñados. Si a las condicionantes térmicas se le incrementa una elevada humedad relativa, se acentúa la incomodidad, ya sea en temperaturas elevadas, con la consecuente transpiración, como en clima frío, en donde se pueden presentar problemas de salud. El buscar un concepto de arquitectura bioclimática se ha vuelto cada vez más complejo, por constituir una preocupación retomada recientemente; la arquitectura de suyo es bioclimática, sin embargo, se ha ido olvidando que ésta debe estar en diálogo con su entorno natural, "[...] No existe una 'arquitectura bioclimática', sino la arquitectura, simple y llanamente".³ Como consecuencia, se hace vez más cada evidente que la

¹ Cidoc-Conacyt (2004).

² Evans y De Schiller (1994),

³ López de Asiaín (1997),

estandarización de modelos de viviendas en diferentes puntos de la geografía del país es inadecuado y, sobre todo, no es recomendable si se buscara una vivienda de calidad.

Las mediciones que se hagan a modelos espaciales tridimensionales aportarán una serie de datos que coadyuven a solventar los problemas de habitabilidad y comodidad para los individuos que realicen sus actividades, buscándose las condicionantes que permitan adecuar las condiciones térmicas, de humedad y ventilación mediante la utilización de un sistema constructivo tradicional y ancestral: el adobe, en este caso, aplicando el BSC (bloque de suelo cemento), estabilizado con 6% de cemento Pórtland tipo I como material de edificación en un lugar en buena medida adverso a las condiciones adecuadas de comodidad, específicamente un clima tropical subhúmedo, como es el que prevalece en la zona sur de Tamaulipas. Con la presente investigación se pretende contrastar los sistemas convencionales a la arquitectura de tierra y encontrar los parámetros que coadyuven a reducir las molestias provocadas por los agentes climáticos, así como determinar ciertos aspectos de diseño que atenúen el insumo de recursos energéticos mediante la adecuación del proyecto al entorno físico, con la consecuente mejora de los espacios habitables.

Descripción de la problemática

El desarrollo de modelos de vivienda alternativos que ayuden a reducir los consumos de energía, la producción de desechos y polución, así como evitar impactos negativos a la atmósfera, son las premisas claves para la construcción sustentable, desarrollados en este caso mediante un modelo de vivienda que se adecúe a su entorno natural. Dichos modelos de viviendas alternativas deben considerar los siguientes aspectos:

- La necesidad de reducir el consumo de energía y temperaturas máximas en viviendas con alto insumo energético, debido al uso indiscriminado del aire acondicionado y refrigeración.
- La identificación de variables críticas de diseño y su impacto en el medio ambiente regional.
- Preparación de datos de diseño: intensidad máxima de radiación solar con base en mediciones; determinar las temperaturas de confort y la influencia del clima en el hábitat edificado.
- Desarrollo de herramientas de diseño para arquitectos durante el proceso de diseño.

Tratar de vincular los diferentes parámetros que impactan a la arquitectura habitacional, a partir del modelo de arquitectura de tierra, y pensar en su adecuación al contexto tropical es, al parecer, adecuado e importante cuando se trata de desarrollar una arquitectura propia del medio ambiente tropical, cuando se pretende desarrollar modelos alternativos económicos y sustentables. La intención de desarrollar un modelo o prototipo de vivienda de tierra para el clima tropical subhúmedo se originó a partir del auge que han tomado las viviendas populares propiedad de particulares, en cuyo caso se ha buscado construir la mayor cantidad de vivienda con el mínimo de recursos económicos, respondiendo al déficit cuantitativo de vivienda, empero, se soslayó el aspecto de calidad no tanto de los materiales utilizados y de los procedimientos constructivos, sino más bien en lo referente a la comodidad o confort ambiental, basado en el comportamiento climático al interior de los espacios.

Asumiendo que se debe establecer un diálogo entre arquitectura y entorno, la denominada arquitectura bioclimática debe buscar la optimización de los insumos hídricos y energéticos, desde la concepción del proyecto de diseño, estudiándose a profundidad el concepto arquitectónico a desarrollar, analizando las características del medio ambiente con el propósito de aprovechar las que resulten favorables a la vivienda, y protegiendo los espacios interiores de los elementos que disminuyen el confort humano. Sin embargo, los parámetros de sensación térmica son bastante subjetivos, a decir de Evans y De Schiller, pero los que se consideran relacionados con el medio y que impactan las áreas habitables son: temperatura, humedad relativa, la radiación solar o soleamiento, y el viento. A estos factores climáticos también es conveniente añadir las actividades físicas a realizar por parte del usuario, así como su metabolismo y, de ser posible, la adecuación corporal a las temperaturas.

Antecedentes de las viviendas en la zona de estudio

Antecedentes históricos de la zona sur de Tamaulipas

Si bien hasta los primeros años del siglo XIX Altamira fue bastante importante como asentamiento humano, a principios de 1823 se re-puebla, o mejor dicho, es fundado el actual Tampico, ubicado en la ribera norte del Río Pánuco y al sur de Altamira. Este asentamiento fue gestionado por los mismos altamirenses, que deseaban un puerto próximo a la desembocadura del Pánuco, lo que en consecuencia les proporcionara una “[...] mayor facilidad y baratura en el desembarque de las

mercancías”.⁴ El lado veracruzano no permaneció impassible, por lo que empezó a desarrollarse un pequeño asentamiento humano, el cual, con el auge petrolero de principios del siglo xx, se conoció como Mata Redonda; en 1902, su dueña, Andrea Viñas, arrendó el embarcadero a la Huasteca Petroleum Corporation.

Figura 1. Ubicación de Tampico, Tamaulipas, en la costa del Golfo de México



Fuente: www.google.com.mx, mapas de México.

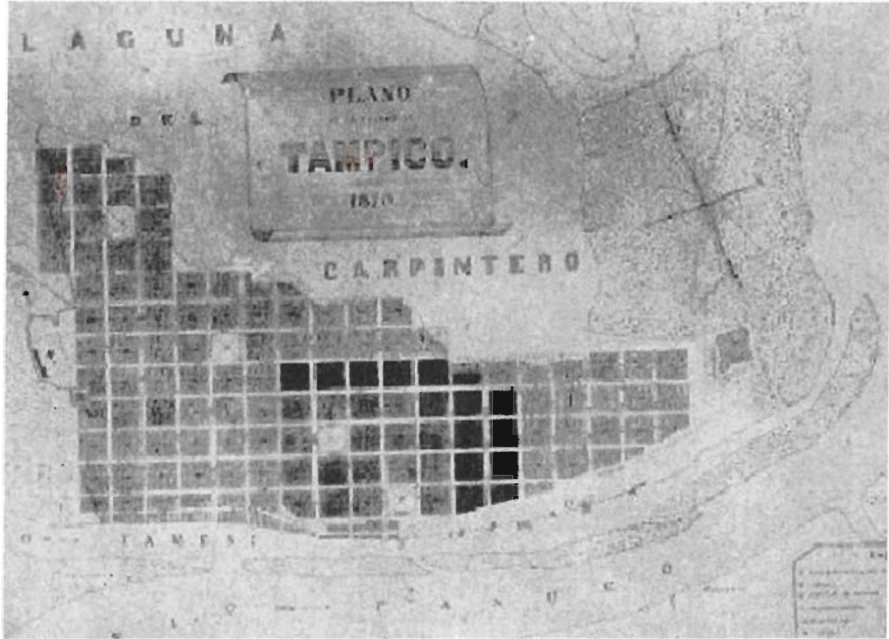
Fundación y crecimiento poblacional de Tampico

Al finalizar el movimiento independentista de México, la villa de Altamira era un importante centro comercial de la Huasteca, aunque tenía un pequeño inconveniente para seguir creciendo, comercialmente hablando: el hecho de que el puerto le quedara alejado provocó “...una considerable merma de utilidades por los gastos de almacenamiento y transporte, así como por los retrasos y pérdidas de mercancías ocurridas durante la época de crecidas o nortes”.⁵ Ello provocó que los altamirenses buscaran inmediata solución a estos problemas.

⁴ Alejandro Prieto (1975), *Historia, geografía y estadística del estado de Tamaulipas*, p. 217.

⁵ María del Pilar Sánchez (1998), *Proyección histórica de Tampico, Monografía*, p. 11.

Figura 2. Plano de Tampico del año 1870



Fuente: cortesía de la Casa de la Cultura de Tampico.

La aparición en esta villa del general Antonio López de Santa Anna fue la solución a los problemas de los altamirenses, ya que en reunión de cabildo celebrada el 5 de abril de 1823, le fue solicitado el “...permiso para ir a repoblar el Alto del Antiguo Tampico”.⁶ Así, 57 familias se dispusieron a repoblar Tampico el día 12 de abril del mismo año. Este recién establecido puerto contó desde su repoblación con una receptoría marítima, por decreto oficial, desde el 2 de noviembre de 1821. El 12 de octubre de 1883, siendo gobernador de Tamaulipas el señor Francisco Vital Fernández, se autorizó la construcción del embarcadero.

Sin embargo, hacia 1866 este muelle quedó aislado cuando la franja de tierra existente entre los ríos Tamesí y Pánuco (véase figura 3), que en esos años todavía corrían paralelos, empezó a alargarse como efecto de los remolinos que se formaban al unirse las dos corrientes. En consecuencia, fue necesario construir otro muelle, esta vez en las márgenes del Río Pánuco, conectándose esta isleta con tierra firme

⁶ *Ibidem*, p. 45.

Figura 3. Vista del atracadero en la plaza del muelle, hoy Plaza de la Libertad



Fuente: cortesía de la Casa de la Cultura de Tampico.

por medio de un puente de madera construido sobre el Río Tamesí. Cuando se fundaron la villa y puerto de Santa Anna de Tampico, se trazaron 18 manzanas y dos plazas delimitadas por la calle Altamira, al norte; Aduana, al este; Miradores, al oeste, y el río Tamesí al sur. Empero, rápidamente la población creció hacia el norte y el este, por lo que se “...dispusieron trece manzanas más”.⁷

Figura 4. Las casas consistoriales y la catedral de Tampico, hacia 1920



Fuente: cortesía de la Casa de la Cultura de Tampico.

⁷ *Ibidem*, p. 56.

Una de las primeras construcciones que se realizaron en esta nueva villa fue la Parroquia, en el sitio que actualmente ocupa el Palacio Municipal. Fue ocho años después, en 1831, cuando se inició la construcción de la parroquia de mampostería, en el sitio que actualmente ocupa la Catedral (véase figura 4). Junto a esta primera parroquia se edificaron las salas o casas consistoriales que albergaron al Ayuntamiento.

El mercado se construyó en 1825, por razones comerciales, a orillas del Río Tamesí, a un costado de la Plaza del Muelle, hoy conocida como de la Libertad. Es en el año de 1826 cuando se le concedió el título de Ciudad a la Villa de Tampico; paradójicamente, Altamira continuó siendo villa hasta la segunda mitad del siglo xx. En 1845, Tampico era un próspero y creciente asentamiento humano con calles empedradas y numerosas casas de buena calidad, y según datos de la época, las viviendas eran "...144 de piedra, 20 de ladrillo, 118 de madera y 19 de guano con techo⁸ de tejamanil".⁹ Ocho años después, de acuerdo con los datos obtenidos, Tampico fue la localidad del estado que más rápidamente había crecido en población y extensión territorial.

El auge durante el porfiriato. De 1880 a 1911

En el último cuarto del siglo xix, la ciudad permaneció sin mayor crecimiento en su mancha urbana, concentrándose los asentamientos de la población en los límites que se tuvieron en la primera mitad del mismo siglo; empero, en los últimos años de la mencionada centuria y principios del xx, se hizo más notorio el crecimiento poblacional (véase figura 5), sobre todo en los terrenos ganados en zonas inundables como lo son los del sitio conocido como "El Cascajal" en la parte poniente de la ciudad, y "El Golfo", en terrenos cercanos al Río Pánuco, en la parte sureste de Tampico.

Los treinta años del porfiriato fueron de gran progreso en Tampico, lo cual resultaba evidente en el aumento demográfico tanto de migrantes nacionales como extranjeros originado por el auge económico, pues en dicha época se desarrolló la industria, destacándose fábricas de aguardiente, jabón, velas, conservas, así como astilleros y plantas de energía eléctrica.

⁸ De acuerdo con Gendrop (1997), se define como *guano* al nombre genérico de algunas palmeras cuyas hojas se usan para techar. Tejamanil es una tabla delgada y cortada en listones que se coloca como teja en las techumbres de las casas.

⁹ María del Pilar Sánchez, *op. cit.*, p. 56.

Figura 5. Vista del puerto de Tampico, desde el pueblo viejo, en el estado de Veracruz, 1910



Fuente: cortesía de la Casa de la Cultura de Tampico.

El crecimiento en la oferta de trabajo provocó, de acuerdo con Sánchez, “...una clase trabajadora con una calidad de vida superior a la de otras ciudades industriales del país”,¹⁰ sin embargo, uno de los aspectos que seguía desalentando la migración era el de enfermedades como la malaria y la tuberculosis. A principios de siglo la población de la ciudad llegó a un poco más de 16 mil habitantes, manteniéndose “...más o menos estable hasta 1910 y se incrementó a raíz del auge petrolero”.¹¹

Con dirección hacia el norte en el denominado camino del Volantín, conocido ahora como la Avenida Hidalgo, principal arteria de comunicación de la ciudad, ésta creció lentamente, en donde “... había a principios de siglo [xx] una serie de granjas y establos que surtían a la ciudad con sus productos y constituían un lugar de paseo para los tampiqueños”.¹²

A finales del siglo xix, aproximadamente por 1870, las familias de nivel socioeconómico alto se establecieron en “La Barra”, situada en la desembocadura del Pánuco, creando una colonia con casas de veraneo, a las cuales, al entrar el servicio de tren hacia 1891, se les construyó una estación con características de *art nouveau*, dando como resultado “...una zona residencial magníficamente comunicada, con amplias y frescas casas para los empleados estadounidenses del ferrocarril”.¹³

¹⁰ *Ibidem*, p. 69.

¹¹ Joaquín Meade (1977), *La huasteca tamaulipeca*, p. 184.

¹² María del Pilar Sánchez, *op. cit.*, p. 64.

¹³ *Ibidem*, p. 64.

Asimismo, en dicha época surgieron asentamientos de obreros que laboraron en la refinería de petróleo de Árbol Grande, transnacional estadounidense que en un principio se constituyó en un asentamiento al que, en el año de 1924, junto con “La Barra” y Miramar, se le daría el nombre de la Villa de Doña Cecilia, para que posteriormente, en 1930, recibiera el nombre que actualmente porta: Ciudad Madero.

Características climáticas de la zona sur de Tamaulipas

El clima que predomina en Tampico, de acuerdo con datos proporcionados por la Comisión Nacional del Agua (CNA), es de tipo tropical sub-húmedo, cálido y extremo con lluvias durante el verano, con una temperatura media de 24°C, con una variación promedio de 36.8°C a 9.7°C, como la máxima y mínima temperaturas, respectivamente, aunque se tiene el registro máximo histórico de 46°C como máxima y una mínima histórica de 0 grados centígrados.

Tabla 1. Temperatura media mensual (grados centígrados)

	<i>Periodo</i>	<i>Ene.</i>	<i>Feb.</i>	<i>Mar.</i>	<i>Abr.</i>	<i>May.</i>	<i>Jun.</i>	<i>Jul.</i>	<i>Ago.</i>	<i>Sep.</i>	<i>Oct.</i>	<i>Nov.</i>	<i>Dic.</i>
Tampico	1999	20.6	22.9	24.6	27.2	29	29.4	29	29.2	28	25.2	23	19.5
Promedio	De 1991 a 1999	18.6	19.9	22.3	24.9	29.8	28.2	28	28.9	27.5	25.7	22.3	19.8
Año más frío	1974	19.6	17.9	22.3	24.1	27	25.9	25	26.8	25.6	23.4	20.8	18.7
Año más caluroso	1998	21.6	22.5	22.4	24.7	28.2	30.2	30	29.6	28.7	26.2	25.2	20.8

Fuente: tamps.inegi.gob.mx

Soleamiento

La sensación que se produce al sentarse a la sombra de un árbol en un día caluroso y soleado es de placer, por tanto, al igual que la temperatura, dicha sensación sirve como parámetro para determinar la cantidad de radiación solar que alcanza una parte de la corteza terrestre o un edificio en su plano expuesto al sol. Esta radiación es,

hasta la fecha, la forma más abundante de energía disponible, y en sitios como el sur de Tamaulipas se sugiere evitar la incidencia de los rayos solares sobre las fábricas o muros y retardar su efecto en las cubiertas con una adecuada selección de materiales y grosor de muros.

Vientos

Éstos se forman por corrientes de aire producidas en la atmósfera por causas naturales, siendo sus características principales velocidad, dirección y frecuencia. Los vientos son otro de los agentes climáticos de vital importancia para el diseño arquitectónico, pues en climas cálidos y húmedos sirven como instrumento para climatizar los espacios internos mediante su adecuado manejo, pues llegan a provocar sensaciones agradables a los habitantes de estos espacios. Los vientos dominantes en la región soplan del este-sureste, son producto de la cercanía con el Golfo de México, y soplan la mayor parte del año, por lo general entre los meses de marzo a octubre, pues en el invierno se presentan los vientos provenientes del polo norte, mismos que son conocidos en la zona como “nortes”, es decir, corrientes que se presentan súbitamente como producto de una masa de aire polar originada en zonas de alta presión y baja temperatura, mismos que azotan la región con velocidades de 45 a 100 km por hora con una duración de 18 a 24 horas, y como consecuencia de su presencia hay descenso en la temperatura.

Humedad

La humedad es el vapor de agua contenido en el aire que por lo general se expresa en porcentaje, denominándose humedad relativa por la relación de humedad que contiene el aire y la cantidad necesaria para saturar éste a la misma temperatura. La humedad relativa es una manifestación de la energía en el aire llamada calor latente, el cual se vincula directamente con la temperatura y la percepción de comodidad ambiental del usuario, por lo que atenuar la humedad relativa se hace necesario en zonas cálidas y húmedas como parámetro de diseño en las viviendas de estos sitios. La humedad en la zona sur de Tamaulipas es alta, considerando que el promedio anual es de 70%, siendo por lo general septiembre el mes más húmedo que coincide con ser el de más alta precipitación pluvial. La humedad relativa más baja registrada

Tabla 2. Dirección de vientos, expresada en dirección y velocidad en m/s. Comprende los municipios de Tampico, Madero y Altamira, Tamaulipas

Mes	Hora	3		6		9		12		15		21		24			
		D	V	D	V	D	V	D	V	D	V	D	V	D	V		
Julio	3							ESE	1	ESE	3	ESE	5	E	2	SE	3
	13	NE	1	E	2	E	2									ONO	1
	23			NO	2	NO	3	N	1	NE	4	NE	2			E	1
Agosto	30							SE	1	E	3	E	4	ESE	2	SE	1
	3																
	13									ESE	3	ESE	4				
	23							E	2	O	1						
	30					SSE	1										

Fuente: elaborada por el arquitecto Mireya Rosas con base en datos del EHC Altamira, CNA.

es de 50% en los meses de enero y febrero, después del paso de vientos fríos y secos del invierno conocidos como “nortes”. La alta humedad relativa de la zona, aunada a la presencia de sales y en la actualidad de los gases provenientes de la refinería, ocasiona que en algunos de los materiales constructivos utilizados en la región se favorezca la corrosión.

Tabla 3. Humedad ambiental promedio mensual en la zona sur de Tamaulipas

<i>Meses</i>	<i>Promedio de humedad ambiental o relativa (%)</i>	<i>Meses</i>	<i>Promedio de humedad ambiental o relativa (%)</i>
Dic-02	76	Jun-03	78
Ene-03	78	Jul-03	78
Feb-03	82	Ago-03	78
Mar-03	77	Sep-03	85
Abr-03	80	Oct-03	75
May-03	77	Nov-03	74

Precipitación

Se le denomina precipitación al agua que de la atmósfera (sea en estado líquido o sólido) se deposite en la superficie terrestre, pudiendo presentarse en forma de granizo, llovizna, nieve, condensación o punto de rocío, o la más común en la zona sur de Tamaulipas: en gotas o lluvia, de ahí que se le denomine precipitación pluvial. Se mide en un lapso o periodo determinado en milímetros, que es equivalente a un litro de agua de lluvia por metro cuadrado. La institución encargada de medir estos datos es la Comisión Nacional del Agua (CNA). La precipitación pluvial, de acuerdo con las estadísticas proporcionadas por la CNA y el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), ha ido variando año con año, así, el mínimo de precipitación anual fue de 788mm y el máximo de 1 044mm. Por lo general, el mes más lluvioso es septiembre, que coincide con la época de ciclones o huracanes. Los ciclones han sido los fenómenos meteorológicos extremos que más desastres han causado en hábitat construido de la zona, pues llevan vientos que sobrepasan los 120km/hora y llegan a presentar vientos de hasta 240km/hora, los cuales provocan

Tabla 4. Precipitación pluvial en Tampico, expresada en milímetros

	<i>Periodo</i>	<i>Ene.</i>	<i>Feb.</i>	<i>Mar.</i>	<i>Abr.</i>	<i>May.</i>	<i>Jun.</i>	<i>Jul.</i>	<i>Ago.</i>	<i>Sep.</i>	<i>Oct.</i>	<i>Nov.</i>	<i>Dic.</i>	<i>Total</i>
Tampico	2000	61.1	24.8	57.4	4.2	6.8	174	43.7	29.6	229	90.4	45.9	47	814.2
Promedio	1921-1999	27.2	18.5	15	22	51.8	194	135	161	266	131	43	49	1087
Año más seco	1949	14.9	24	12	6.5	5.5	27.6	19.5	38.6	233	15.9	16	29	427.6
Año más lluvioso	1931	236	14.5	12	16	11.9	192	254	514	314	280	69	13	1 687.9

destrozos en viviendas, hundimiento de embarcaciones, derribo de árboles y ruptura de sus ramas, además de fuertes lluvias y marejadas que impiden el natural desfoque de los ríos, trayendo en consecuencia que éstos eleven su nivel y produzcan inundaciones.

Se han destacado en la historia del Tampico moderno tres ciclones, el primero en 1933, que provocó daños en poco más de 75% de las edificaciones de Tampico, con vientos superiores a 175km/hora. Cabe mencionar que la mayoría de las casas de la zona en esta época eran de madera (véase figura 6).

Figura 6. Calle Carranza, después del ciclón en 1933



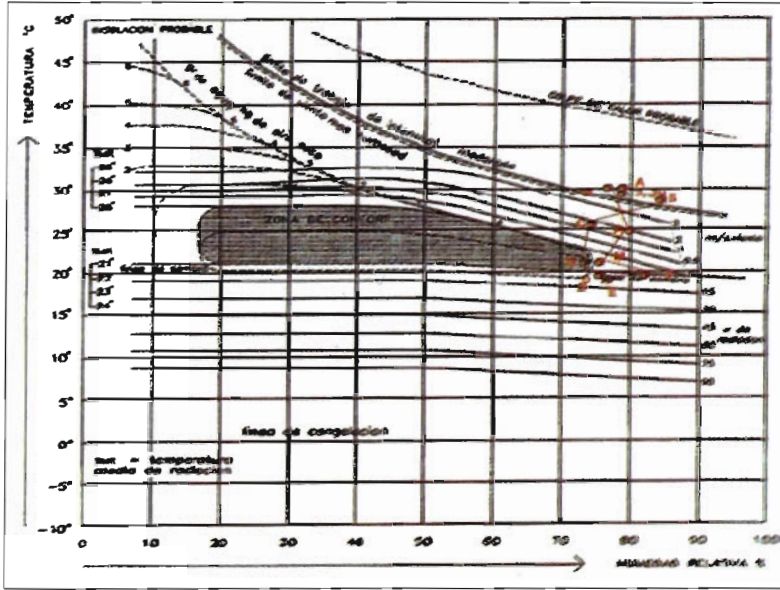
Fuente: Casa de la Cultura de Tampico.

Gráficos de análisis higrotérmico

En el gráfico de Olgay se han introducido las líneas que unen las condiciones medias de todos los meses del año en Tampico. Se observa que el mes de noviembre está dentro de la zona de confort. Los meses de diciembre, enero, febrero y marzo, por la alta humedad registrada, se encuentran fuera de dicha zona.

Durante los meses de abril y octubre se presenta mayor humedad; los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre se encuentran en el denominado límite de trabajo de intensidad moderada.

Gráfico 1. Gráfico de Olgay



Fuente: elaborado por Mireya Rosas con base en el modelo de V. Olgay.

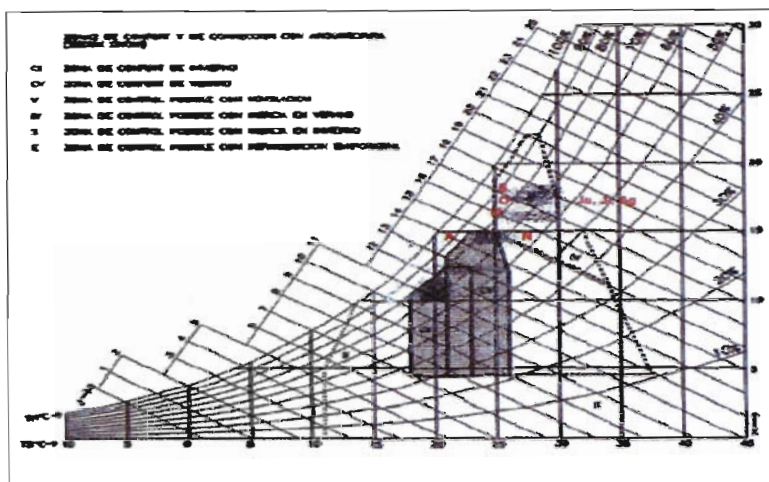
Gráfico en el ábaco psicométrico de Givoni

De acuerdo con las condiciones del clima —manifestadas en las zonas de confort de invierno y verano—, y las exigencias de la arquitectura, se deduce que los meses de mayo a octubre están dentro de una zona de control factible mediante ventilación, como la primera aproximación de lo que debe ser un proyecto arquitectónico desde el punto de vista térmico (véase gráfico 2).

Temperaturas en Tampico

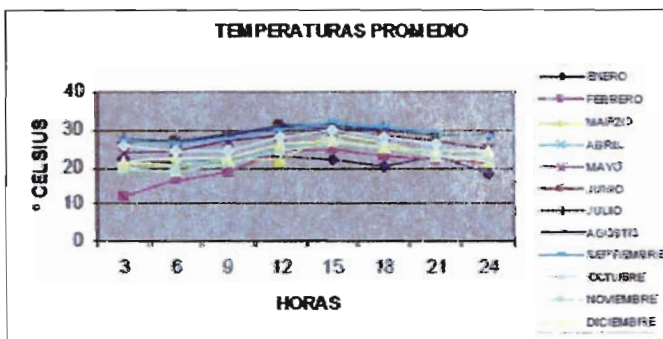
En el gráfico 3 se puede apreciar que las horas de confort se registran durante las mañanas de los meses de enero, marzo y abril. En verano, desde las 9:00 horas las temperaturas suben desde los 28°C hasta los 32°C, manteniéndose constantes durante la noche, con una variación que oscila entre los 2 o 3 grados centígrados.

Gráfico 2. Gráfico de confort



Fuente: elaborado por Mireya Rosas con base en Baruch Givoni.

Gráfico 3. Tabla horaria anual de temperaturas en Tampico durante 2005



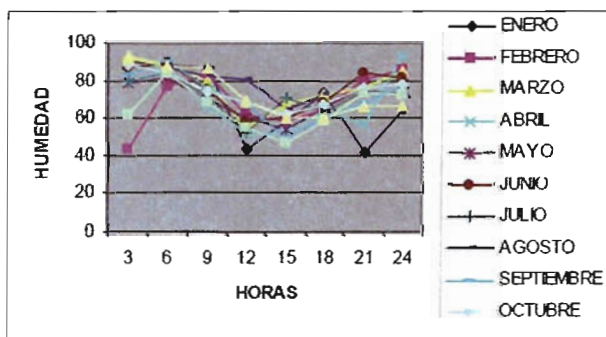
Fuente: elaborado por Mireya Rosas.

Humedad relativa

En la gráfica siguiente se reportaron los mayores porcentajes de humedad registrados a primeras horas de la mañana, disminuyendo a partir de las 9:00 hasta las 15:00 horas,

que es cuando el sol se encuentra perpendicular a la superficie terrestre. Los meses con mayor registro de porcentaje de humedad fueron marzo y agosto.

Gráfico 4. Tabla horaria anualizada de humedad relativa en Tampico durante 2005



Fuente: elaborado por Mireya Rosas.

Una breve descripción de las características limítrofes y climáticas

La zona conurbada del sur de Tamaulipas abarca tres municipios, principalmente, siendo el de mayor extensión el de Altamira, mientras que Madero es el más pequeño de Tamaulipas. Tampico, en particular, se encuentra delimitado por los municipios anteriormente citados; su desarrollo como asentamiento humano se extendió hacia el norte, dirección que actualmente sigue el natural crecimiento urbano del municipio, debido a tres condicionantes geográficas:

- Al sur limita con el Río Pánuco.
- Al poniente colinda con el sistema lagunario del Río Tamesí.
- Al oriente colinda con el Río Pánuco y Ciudad Madero.

En consecuencia, por sólo tener una dirección que favoreciera su natural desarrollo, la mancha urbana creció hacia el norte, hasta conurbarse con el municipio de Ciudad Madero, en los años sesenta, y con el de Altamira en los últimos años de los ochenta.

Por su cercanía con el Golfo de México, así como por el hecho de tener un puerto natural en el Río Pánuco, Tampico es el principal puerto mexicano en cuanto a tone-

laje se refiere (según datos referidos por el Gremio Unido de Alijadores) y Ciudad Madero es el segundo puerto petrolero en el ámbito nacional de acuerdo con Petróleos Mexicanos. La zona conurbada presenta una topografía sensiblemente plana, pues desde las riberas del Pánuco hasta Altamira es propiamente una meseta de pendientes suaves con una elevación promedio sobre el nivel medio del mar (SNM) de quince metros.

El clima de la zona conurbada del sur de Tamaulipas es de tipo tropical subhúmedo, cálido y extremoso, con dos estaciones de lluvias, la primera entre los meses de abril y mayo, y la segunda de agosto a octubre, con registros extremos anualizados que van de 427.6mm a 1 687.9mm. Casi siempre el mes más lluvioso es septiembre, atribuyéndose la precipitación pluvial a los fenómenos meteorológicos conocidos como ciclones.

Características de la zona de estudio

La realización del análisis histórico de la arquitectura habitacional en la zona sur de Tamaulipas, así como de las condicionantes geográficas y climatológicas de éste, permitirá obtener datos objetivos para poder evaluar las soluciones particulares en las viviendas para constatar si éstas son consecuencia de una relación entre contexto físico y las necesidades de sus habitantes con la intención de lograr un mayor confort físico que se asocia, generalmente, a la temperatura, el soleamiento y la humedad, o bien si se trata de simple capricho de los ingleses que se asentaron en este lugar. Se advierte que estas adecuaciones de la arquitectura habitacional de procedencia extranjera al medio físico en el sur de Tamaulipas tuvieron una serie de modificaciones por el ámbito cultural de quienes las generaron, así como de sus tradiciones y forma de vida.

Si bien en algunas épocas del año (como lo es el verano) los ciclos diurno y nocturno presentan variaciones de poca oscilación térmica, la vivienda debe ser adecuada para el medio en donde se le ubicará para lograr el confort de sus ocupantes, así como la conservación de la energía y de otros recursos. La vivienda no puede ser un elemento aislado, sino que debe funcionar como el modelo molecular de una comunidad que incluya desde la elección correcta del sitio hasta llegar a la estructura general del asentamiento, donde sea factible adecuar climáticamente vecindarios existentes por medio de un correcto estudio de planeación ambiental. Al parecer, los ingleses tomaron en cuenta las premisas de Vitrubio —aunque no todas sus recomendaciones—, quien afirma:

“...habrá de escogerse un lugar de aires sanísimos. Este lugar habrá de ser alto, de temperatura templada, no expuesto a las brumas ni a las heladas, ni al calor ni al frío: estará además alejado de lugares pantanosos, para evitar [...] efluvios nocivos en los cuerpos de los habitantes y hagan por tanto infecto y pestilente el lugar”.¹⁴

El diseño de la vivienda en observaciones preliminares está estrechamente ligado con los conceptos de diseño climático, tales como forma, orientación, volumen y color, con lo que se considera una apropiada selección de materiales y procedimientos constructivos que conformaron la envolvente de la vivienda.

Principales problemas del medio ambiente

Por la altura sobre el nivel medio del mar, la vivienda en cuestión no se encuentra en una zona inundable a pesar de su cercanía con un jagüey, sin embargo, la humedad relativa de la zona y la vaporización natural del vaso lacustre cercano propicia corrosión y oxidación en los materiales de construcción. La lluvia que cae sobre la zona de Tampico es moderadamente ácida, provocada por los gases que se producen en la refinería, mismos que son llevados por los vientos dominantes o brisas a la mancha urbana.

El sol, aunado a la alta humedad relativa, provoca una variación térmica escasa, pues si bien la temperatura máxima en un día caluroso del verano puede ser de 34°C a las 15:00 horas (21:00 GMT), la mínima de ese día es de 27°C, sintiéndose esta temperatura a las 4:00 horas (10:00 GMT). Esta poca varianza térmica y la vegetación, que puede catalogarse como de selva tropical subhúmeda, permiten la proliferación de insectos como mosquitos, principales transmisores del dengue, paludismo o malaria, etcétera.

Síntesis de la evolución del concepto formal de la vivienda

En la zona sur de Tamaulipas resulta muy complicado definir una casa típica tam-piqueña, maderense o altamirensis, más difícil será determinar una para la zona que, además, es de clima subtropical húmedo. Los factores locales de ubicación del terreno y la época de construcción que han modificado en algunos casos la forma arquitectónica, así como la mano de obra y los materiales de construcción, que en

¹⁴ Marco Lucio Vitrubio (1985), *Los diez libros de la arquitectura, traducción directa del latín por Agustín Blánquez*, p. 17.

la época correspondiente a la presente investigación proviene de otros países y regiones.

En un primer acercamiento a las viviendas se puede observar en su aspecto externo lo inclinado de sus cubiertas. Las techumbres en la zona tienden a ser inclinadas como respuesta natural al clima imperante, pues considerando que la precipitación promedio en la zona es mayor a los 800 milímetros anuales, se busca que la lluvia sea desalojada con mayor velocidad.

Hasta finales de la década de los sesenta, se consideraba elevar los techos a más de tres metros para crear un colchón de aire que evitaba la radiación de calor al interior de la misma. Las techumbres se prolongaban hacia el exterior para proteger las paredes del desgaste del sol y la lluvia, y son conocidas como aleros o vuelos, que en algunas casas cambia la inclinación natural del techo por una pendiente más suave, creando unos portales o *halls* techados, los cuales, a su vez, protegían el interior de la vivienda del soleamiento y del constante calentamiento de la pared expuesta.

Análisis de los sistemas constructivos de la vivienda

Ubicar los sistemas y procesos constructivos de las viviendas permite distinguir los materiales en cuanto a su aprovechamiento y la adecuación de los mismos al procedimiento de construcción empleado; ello implica que los materiales, sistemas y procedimientos constructivos que se utilizaron en las viviendas condicionaron en cierta manera el diseño, si bien no tanto la forma, pues la función para la cual fueron proyectadas éstas fue la de proporcionar hábitat y cobijo a sus usuarios.

Presentar una síntesis de los materiales que se han usado en la construcción de las mismas —ya sea con materiales tradicionales o con actuales— es parte del análisis tipológico. Al desarrollarse un epítome constructivo se puede hacer referencia a los tipos de cimientos utilizados, así como de las losas y muros, elementos que siempre se han constituido para formar la unidad de una misma función y concepto arquitectónico: la casa-habitación.

En ocasiones se requiere de un mismo procedimiento constructivo, sin embargo, eventualmente, cada uno de los elementos antes señalados conlleva diferente procedimiento durante el periodo de construcción, motivado por determinantes como los materiales empleados, cuya elección "...no depende siempre del arquitecto [...] además, queda al arbitrio del dueño el disponer si el edificio ha de construirse con ladrillos o con piedra tosca o labrada".¹⁵

¹⁵ *Ibidem*, p. 162.

Los requerimientos para una nueva vivienda para el trópico

¿Por qué dedicarse a determinar el confort en viviendas de interés social edificadas en un clima tropical con materiales alternativos? La comodidad o el confort se ha considerado como el parámetro más relevante en el diseño bioclimático, debido a que conseguir que los espacios arquitectónicos sean agradables a sus habitantes, tanto física como psicológicamente, es la premisa más importante.

Es necesario acotar que la arquitectura edificada y habitada en los trópicos no es propia de un clima tropical. “Algunos precisan que la frase, si no el concepto, se originó durante los tiempos de la Colonia y es un legado vestigial de la soberanía europea...”¹⁶ En el Modelo de Vivienda Sustentable de Tierra, como en todo edificio, es necesaria la sensación de comodidad, en consecuencia, la influencia de los agentes higrotérmicos puede ocasionar algunas molestias en la fisiología de los habitantes de esta vivienda.

¿Qué es lo que se requiere para el desarrollo de una nueva vivienda en la zona tropical? La casa-habitación que se está edificando en la zona tropical del Golfo de México está ocasionando muchos problemas, desde urbanos hasta psicológicos. En primer lugar, las áreas habitables se han transformado con una premisa de diseño basado en aspectos monetarios: los espacios de la vivienda se planean en lugares sumamente reducidos. Ello provocó que una de las premisas principales del Modelo de Vivienda Sustentable de Tierra fuera la de incrementar su área.

El segundo problema que se encontró está relacionado con el primero: la falta de espacio habitable hace que los usuarios empiecen a usar los patios o las techumbres como áreas de expansión o “crecimiento”, con la intención de adecuar estas áreas a sus necesidades cotidianas, empero, consecuentemente a este aumento de área edificada, sobreviene otra serie de problemas:

- Inadecuada ventilación.
- Iluminación.
- Aumento en la temperatura interior.

Si bien uno de los objetivos principales para el desarrollo de la vivienda de adobe era construir un modelo con espacios habitables más grandes que los ofertados por los promotores de vivienda convencional, haber soslayado la evaluación de los efectos causados por los aspectos climáticos y del entorno natural en la misma podría

¹⁶ Bay Joo-Hwa y Ong Boon-Lay (2006), *Tropical Sustainable Architecture: Social and Environmental Dimensions*, p. 1.

generar algunas molestias o afectar la salud de sus habitantes. Esto hizo necesario evaluar la vivienda con el objetivo integral de desarrollar no sólo un modelo que proporcionase una mayor área de construcción con menor precio, sino también desarrollar un modelo que fuese adecuado a la región, a un contexto con altos índices de humedad, por lo general superiores a 70%, y temperaturas que en verano llegan a rebasar a los 34°C. Entonces, "...entenderemos la percepción como el conjunto de fenómenos que nos informa las características del entorno, mediante la captación por parte del organismo humano de las distintas energías presentes en el medio ambiente".¹⁷

De esta manera, además de construir a un menor costo, se propone la construcción con materiales tradicionales tecnificados, con características sustentables y responsabilidad ecológica, buscando causar un impacto mínimo al entorno e integrando ecosistemas que contribuyan de manera positiva a la reducción de consumos energéticos. Esta vivienda no es un pequeño ejemplo de experimentación de bajo costo, sino que trata de evidenciar las bondades de una construcción tradicional contra uno realizado de manera convencional.

Desarrollando un modelo basado en técnicas tradicionales

García Chávez (2006)¹⁸ comenta que el mundo alcanzó una población de casi 7 mil millones de habitantes que requirió de aproximadamente 9 300 millones de toneladas de combustibles fósiles. En contraparte, las energías renovables y sistemas alternativos de construcción han crecido de manera significativa, sin que todavía impacten o influyan en los sistemas constructivos. El potencial de las viviendas alternativas con procedimientos de construcción sustentable es enorme, sobre todo cuando existe la posibilidad de ayudar a resolver los daños que se han causado al entorno.

Descripción del prototipo de edificación sustentable de tierra

Para el caso del presente estudio, la unidad de análisis corresponde al denominado Modelo de Edificación Sustentable de Tierra, ubicado en Tampico, Tamaulipas, en

¹⁷ Rafael Serra y Helena Coch (2001), *Arquitectura y energía natural*, p. 17.

¹⁸ Garcia Chavez (2006), "Ecopet 21: An Innovative Sustainable Building for Ecological Communities in Tropical Regions", en *Tropical Sustainable Architecture*.

los terrenos de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de la Universidad Autónoma de Tamaulipas. Cuando hablamos de este modelo, se hace referencia a una vivienda de adobe, a las formas de construcción utilizadas, producto de la evolución de una técnica milenaria que responde a un sistema constructivo sustentable, con propuestas particulares que se adecúan a su medio ambiente.

El prototipo de vivienda cuenta con dos plantas en 78.43m², en planta baja se localiza el vestíbulo, la sala-comedor, la cocina, las escaleras y un cuarto de baterías, cuya entrada se orienta hacia el exterior; en la planta alta se localizan dos recámaras y un baño (véase figura 7).

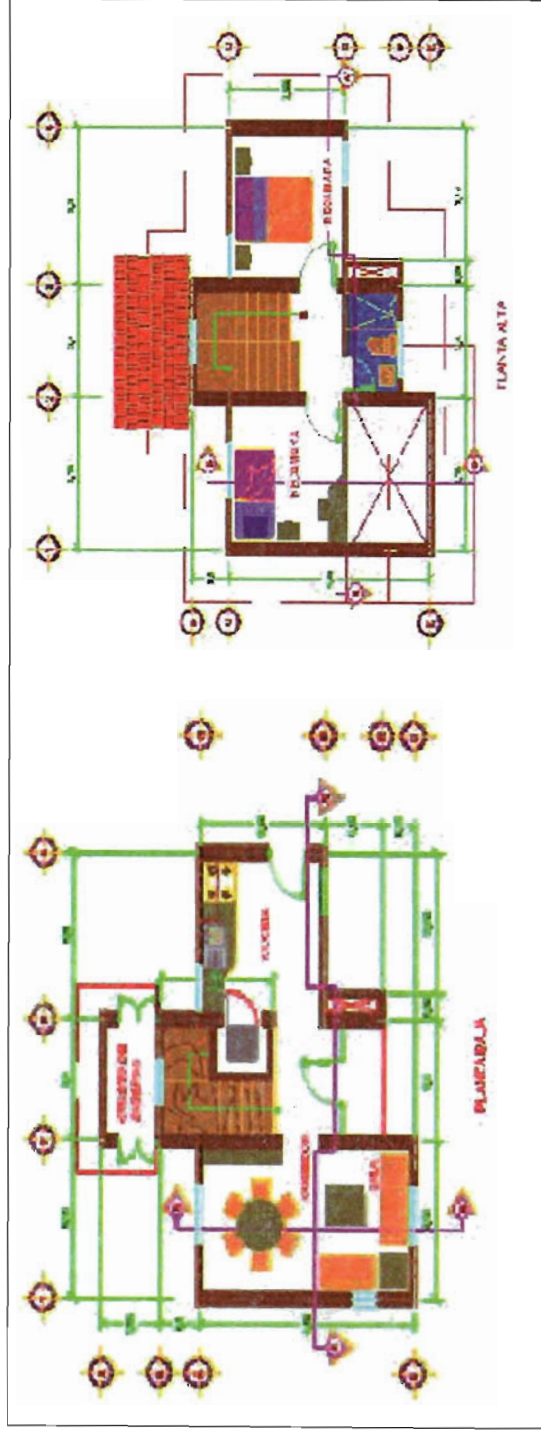
La importancia de presentar una propuesta nueva basada en la sustentabilidad de la arquitectura de tierra en zona tropical recae en el hecho de que el tipo convencional de construcción se seguirá promoviendo y edificando a menos de que se desarrolle una alternativa de vivienda eficaz y económica, que además presente ventajas ecológicas e, incluso, ayude a la correcta planificación urbana de la región. Ante esto, urge la pregunta: ¿cómo puede el diseñador arquitectónico responder a este reto?

Los habitantes de la zona sur de Tamaulipas consideran el adobe y la madera como materiales inadecuados para la zona, o bien, se les relaciona con viviendas marginales; sin embargo, no existen estudios en la zona que comprueben si efectivamente se debe a estas características o son otras variables o aspectos específicos de estas viviendas los que aportan una adecuación al medio ambiente. La otra posibilidad es que la vivienda de adobe tenga mejor comportamiento o, al menos, un comportamiento similar a otra vivienda construida con materiales industrializados, como el tabique o block de concreto y losas de concreto armado.

Es evidente que se tuvieron que analizar los espacios habitables (desde la óptica bioclimática) del prototipo de vivienda sustentable de tierra ubicada en un entorno climático tropical húmedo, además de sus diversos habitáculos en lo que corresponde a temperatura interior y exterior; asimismo, se consideró la humedad relativa y la intensidad de los vientos que afectan de manera directa a la casa, contrastándola con un modelo de vivienda convencional de similares características, que permitiese evaluar las propuestas de diseño arquitectónico con sistemas bioclimáticos adecuados, con procedimientos constructivos y materiales de reducido costo y de un bajo impacto al medio ambiente.

Para comprobar las bondades del Modelo de Vivienda, se realizaron diferentes actividades tendientes a la obtención de datos confiables que permitan corroborar o desechar la aseveración de su habitabilidad y sustentabilidad, origen de las siguientes actividades:

Figura 7. Plantas de distribución o arquitectónicas del prototipo de vivienda



Fuente: doctor Rubén Salvador Roux Gutiérrez.

- Desarrollo de las condiciones de habitabilidad teórica y su determinación en el prototipo de vivienda de BTC en un sitio de clima tropical húmedo.
- Evaluar las condiciones de confort del prototipo de vivienda sustentable de tierra.
- Caracterizar la vivienda convencional, que servirá de contraste al prototipo de edificación sustentable de tierra.
- Recolectar los datos y la información de los factores climáticos del lugar de edificación del prototipo y de la vivienda convencional.
- Registrar los datos higrotérmicos, de luminosidad, de vientos y de dióxido de carbono (CO₂) que se obtengan de los habitáculos de la vivienda prototipo de BTC y la de contraste en el lapso temporal antes mencionado, así como las que incidan en la zona sur de Tamaulipas.
- Delimitación de la zona de confort o comodidad para el clima subtropical húmedo, característico de la zona sur de Tamaulipas.
- Se desarrollarán y describirán los siguientes gráficos y evaluarán los resultados obtenidos conforme a las características higrotérmicas y de ventilación.
- Recabar, con instrumentos especiales, las cargas calóricas, los índices de temperaturas máximas, mínimas y media en bulbo seco y los porcentajes de humedad relativa (HR).
- Análisis de los factores biofísicos que inciden en las viviendas a evaluar ubicadas en un sitio con características de clima tropical húmedo.
- Evaluación del comportamiento físico del prototipo, así como los grados de deterioro de los elementos de construcción durante el periodo de recolección de datos.
- Establecimiento y determinación de las relaciones posibles entre los factores biofísicos y los factores de construcción.

Los parámetros antes descritos se hacen necesarios dentro del análisis del proyecto arquitectónico, aunado a las características de la región, que si bien pueden ser determinadas de manera regular o cíclica, es factible que presenten algunas variaciones puntuales. Esto es con la intención de replantear teórica y prácticamente nuevos derroteros en lo referente a la construcción de arquitectura habitacional popular, rediseñando los elementos y materiales con soluciones medioambientales, con una propuesta alternativa en sus procedimientos constructivos, respetuoso de las necesidades de sus habitantes, utilizando materiales que no produzcan emanaciones tóxicas y con un elemento natural que se adecúe al contexto físico.

Evaluación y conclusiones

Las pruebas en el Modelo de Vivienda Sustentable de Tierra concluyeron en febrero de 2008, lo que ha permitido presentar las características que del Modelo se han ido obteniendo para cuestiones de su confort en un medio ambiente tropical. Es necesario mencionar que se seguirán haciendo otras pruebas relacionadas con el comportamiento del material, su durabilidad y resistencia a las cuestiones climáticas, por lo que dicho modelo seguirá siendo evaluado en algunos otros parámetros.

De acuerdo con los datos obtenidos y las características de diseño que se aplicaron en la prueba, se utilizó la ventilación cruzada para disminuir la sensación de calor al interior de la vivienda. Desde el punto de vista físico, el tener esta ventilación coadyuvó a disminuir el uso de ventiladores en la zona de las habitaciones o recámaras, con la consecuente disminución del consumo eléctrico. En el contexto social, prescindir de aparatos de aire acondicionado ayudará a los dueños de este tipo de viviendas a reducir sustancialmente el gasto por consumo eléctrico. De cualquier manera, es necesario conocer en un futuro si nuestro modelo será evaluado de forma positiva por sus habitantes. A continuación se presenta una tabla con las mediciones higrotérmicas al interior de la vivienda en el mes más cálido, que es julio.

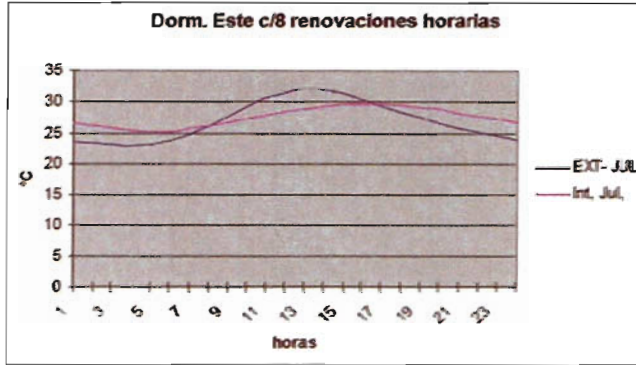
Tabla 5. Datos higrotérmicos promedios obtenidos en la segunda quincena del mes de julio

	<i>Temperatura °C</i>			<i>Humedad %</i>		
	<i>Promedio</i>	<i>Máxima</i>	<i>Mínima</i>	<i>Promedio</i>	<i>Máxima</i>	<i>Mínima</i>
Cuarto este	31.532	35.85	28.072	67.897	78.238	51.07
Cuarto oeste	31.725	35.689	28.32	67.833	76.906	52.302
Cocina	29.95	31.281	27.604	73.752	81.98	61.327
Sala-comedor	29.873	31.433	27.579	74.25	83.402	58.135
Promedio	30.77	33.56325	27.89375	70.933	80.1315	55.7085

Fuente: elaboración y toma de datos de José Adán Espuna Mujica.

Se tomaron como base estos datos por coincidir con los días más cálidos del año en promedio, así como por estar entre los siete días anteriores y posteriores al solsticio de verano. Si no fuese suficiente la reducción en aproximadamente 3°C con respecto a la máxima exterior en promedio, se debe mencionar que se obtuvieron una serie de datos, proporcionados por el arquitecto Patrone, de la Universidad de Buenos Aires, para el desarrollo teórico de la ventilación en el dormitorio este con ocho renovaciones horarias, mismo que se ejemplifica en el siguiente gráfico.

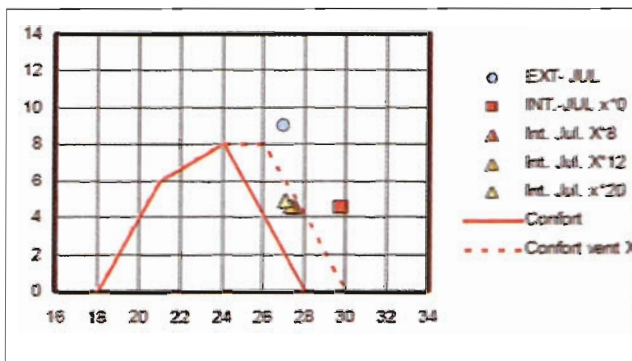
Gráfico 5. Temperaturas del dormitorio este con 8 renovaciones horarias



Fuente: toma de datos de José Adán Espuna Mujica, elaborado por arquitecto Patrone, FADU, UBA.

Es probable que estas temperaturas no sean lo suficientemente cómodas para algunos usuarios, sin embargo, temperaturas constantemente inferiores con respecto al exterior en climas tropicales resultan agradables para la mayoría de las personas, sobre todo teniendo en cuenta que los datos obtenidos en el dormitorio oeste no estuvieron tan alejados como los de su contraparte en el este. Los datos obtenidos en este análisis permiten proponer alternativas que coadyuven a mejorar las temperaturas al interior de la vivienda, como se muestra en el siguiente gráfico.

Gráfico 6. Delimitación de la zona de confort



El triángulo indica también que el dormitorio este con un aislamiento de 5cm de fibra de vidrio y un triplay de 5mm clavado bajo la techumbre, como sustentación de la fibra y una mínima ventilación nocturna, permite ubicarse en la zona de confort de manera constante.

En síntesis, la vivienda de adobe se comporta de manera adecuada en cuanto a los parámetros higrotérmicos, con una buena ventilación, misma que hace sentir una disminución en cuanto a la humedad relativa, que también por característica de los materiales de tierra adsorben una buena parte de la misma, para desprenderse paulatinamente de ésta cuando aumenta la temperatura y, en consecuencia, se reduce al exterior. Es conveniente continuar estudiando otros parámetros de confort o comodidad, pues si bien en esta etapa fueron favorables, resta estudiar cómo se sienten social, psicológica y fisiológicamente los usuarios reales en este modelo de vivienda, además de las pruebas a la resistencia al intemperismo, que si bien en pruebas de laboratorio fueron satisfactorias, hasta la fecha se ha corroborado en el comportamiento de los materiales utilizados en la vivienda, que han sido básicamente bloques de tierra comprimida, desechando el mito de que el adobe no se puede utilizar en medios tropicales húmedos.

Modelo de vivienda experimental

Ruben Salvador Roux Gutiérrez

Introducción

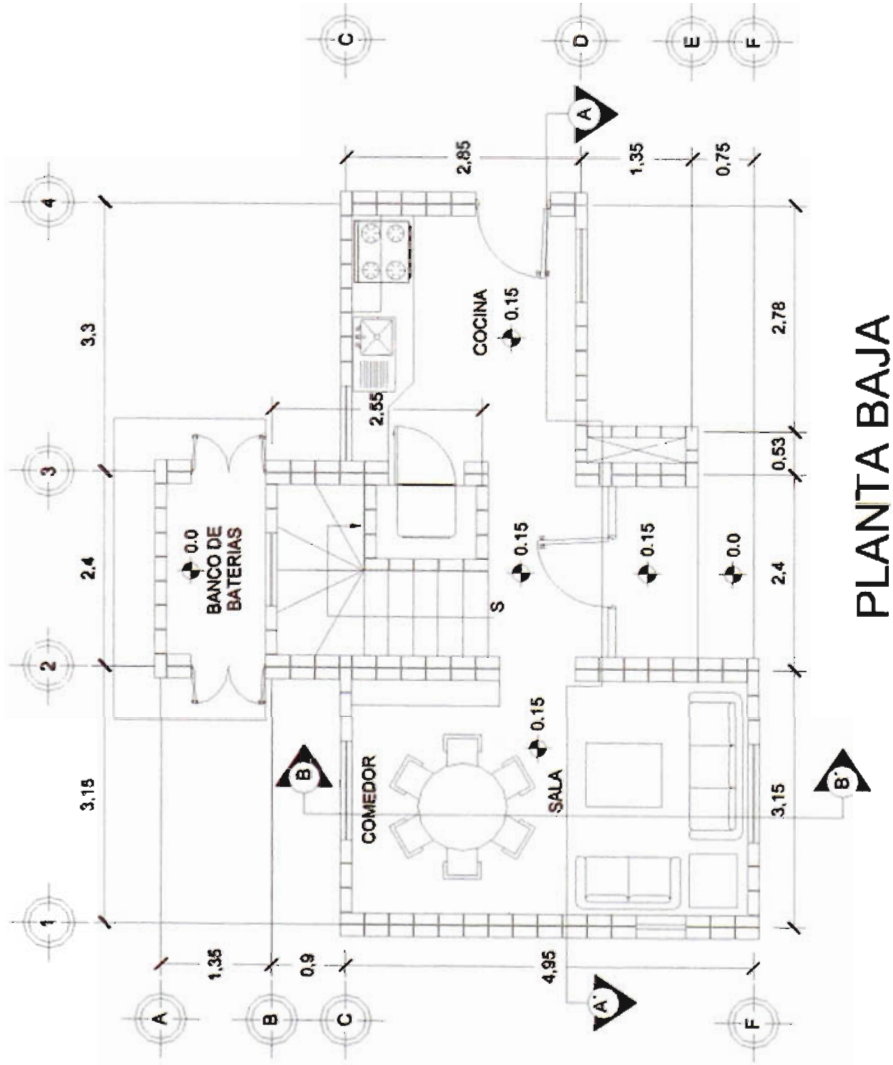
La aplicación de los trabajos de experimentación realizados a lo largo de 17 años permitieron desarrollar un modelo de vivienda sustentable con la aplicación de los materiales investigados previamente en el laboratorio y en campo; asimismo, se pudo corroborar si las técnicas tradicionales de edificación con tierra tienen un sustento científico que permita extender su uso a formas de producción masivas.

En principio, con este modelo se busca demostrar su sustentabilidad a través del menor consumo energético al producir los materiales con que se construyó, así como hacer que los gastos de energía bajen en cuanto a su consumo por operación y reducir los costos de construcción de las viviendas de interés social, además de incrementar los metros cuadrados de construcción ofertados.

La vivienda cuenta con dos plantas, en la planta baja se localiza el recibidor, la sala-comedor, la cocina, un área para alacena y el cuarto de baterías, así como la escalera. En planta alta se cuenta con dos recámaras y un baño completo. La superficie total de la vivienda es de 78.43 metros cuadrados.

A continuación, se describe paso a paso el proceso constructivo, destacando las diferencias con respecto al proceso convencional que se realiza en la zona sur de Tamaulipas, el cual varía muy poco con respecto al resto del país.

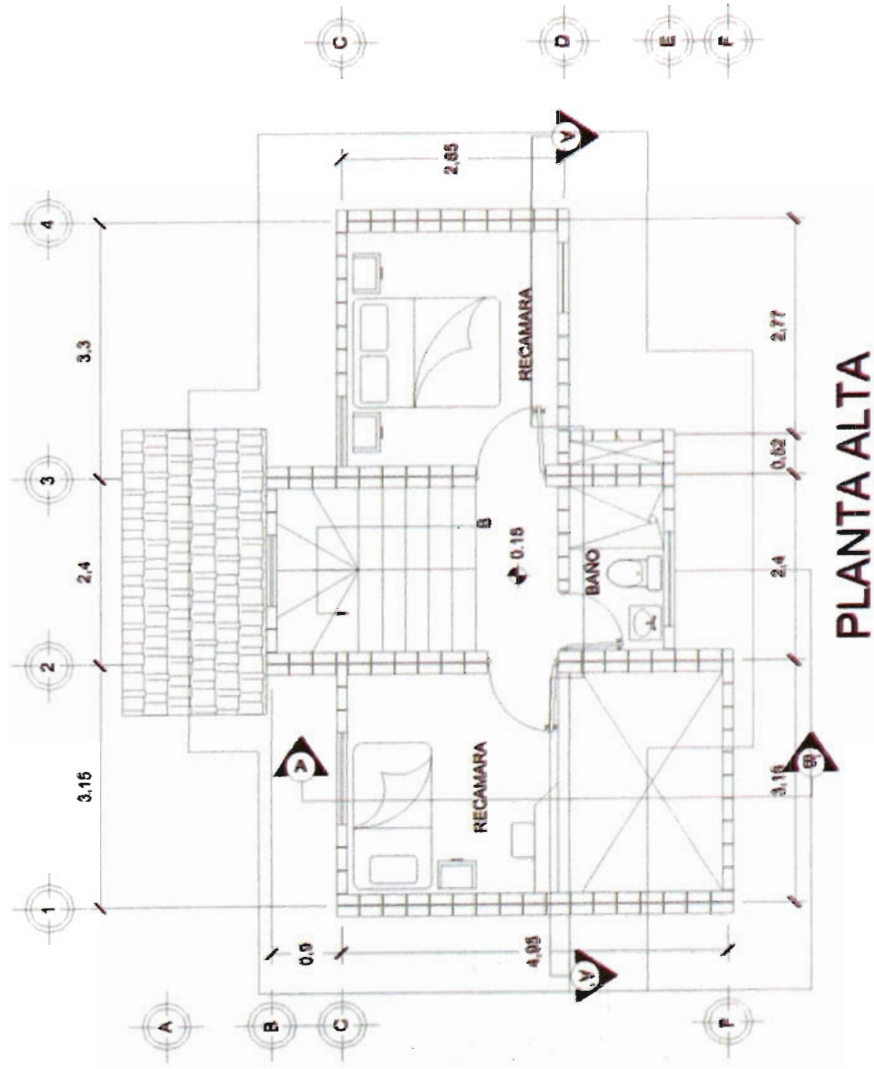
Figura 1. Planta baja arquitectónica del prototipo



PLANTA BAJA

Fuente: elaboración propia.

Figura 2. Planta alta arquitectónica del prototipo



Fuente: elaboración propia.

Proceso constructivo

Trazo y cimentación

El trazo se realizó utilizando un aparato topográfico (tránsito) con el cual se fijaron los ejes de proyecto sobre el terreno; una vez realizado lo anterior se procedió a marcar el ancho de las excavaciones, las cuales eran de 0.85 metros.

También se fijaron niveles para determinar la profundidad de las excavaciones y los niveles de piso terminado, los cuales fueron de 0.15m por arriba del terreno natural.

Foto 1. Trazo inicial



Fuente: fotos del capítulo tomadas por el autor del mismo.

Foto 2. Excavación realizada



Foto 3. Proceso de la excavación



Foto 4. Excavación realizada, parte posterior



Foto 5. Introducción de acero de refuerzo en la cimentación



Foto 6. Colado de cimentación



Después de hacer un análisis económico de las posibles cimentaciones superficiales a utilizar, se determinó que la más viable era la basada en zapatas corridas, posteriormente se realizó el cálculo estructural y se determinaron los espesores, diámetro del acero de refuerzo y resistencia del concreto. A continuación se presentan los datos obtenidos.

Cuadro 1. Características de cimentación

<i>Concepto</i>	<i>Características</i>
Ancho de zapata	0.80m
Peralte de zapata	0.15m
Diámetro del acero de refuerzo	Varilla núm. 3
Resistencia del acero de refuerzo	$f'y = 4200\text{kg/cm}^2$
Separación del acero	0.20m en ambos sentidos
Resistencia del concreto	$F'c = 200\text{kg/cm}^2$
Tamaño máximo del agregado	19mm
Tipo de arena	Arena de río
Tipo de cemento	CPO

Fuente: elaboración propia.

Como el BTC no presenta un buen comportamiento ante la humedad, se determinó que el rodapié fuera de un material más resistente, para lo cual se utilizaron bloques de concreto de 15 x 20 x 40 cm, resultando en un muro doble en los muros cargadores y sencillo en los transversales, que sólo son para división. Con la finalidad de no usar cimbra, se planeó que los castillos fueran ahogados y sólo se colocó una cadena de desplante de 15 x 20 cm armada con cadenas tipo pre-armada de 15 x 20 x 4 -1/4, colocándose doble en los muros de igual dimensión; el concreto utilizado en estas cadenas fue de una resistencia $f'c = 150$ kilos sobre centímetro cuadrado.

Como medida de prevención para evitar el deterioro de los BTC en la parte baja del muro, se determinó hacer un sobrecimiento con un material de mayor resistencia a la humedad, por lo que se utilizaron bloques de concreto de 15 x 20 x 40 cm para dar una altura de 0.40m por arriba de la cadena de desplante.

Foto 7. Desplante de rodapié y castillos ahogados



Foto 8. Desplante de rodapié, vista general



Foto 9. Colocación de cadenas de cimentación



Foto 10. Cadenas de cimentación e impermeabilización del rodapié

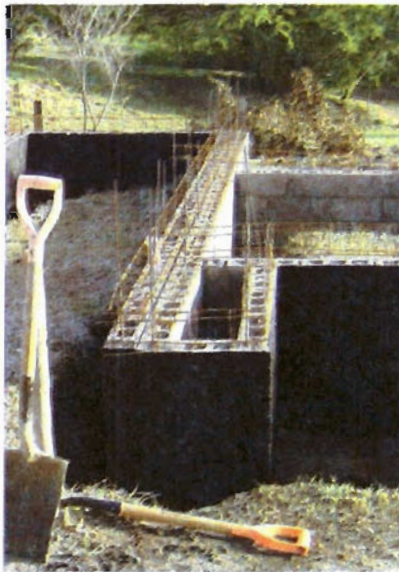


Foto 11. Proceso de impermeabilización del rodapié



Foto 12. Vista de la cimbra y colado de cadenas de cimentación



Foto 13. Muros de BTC y sobrecimiento



Foto 14. Desplante de muros de BTC



Foto 15. Detalle de desplante de muro de BTC



Muros de carga

En los ejes 1, 2, 3 y 4 se localizaron los muros de carga, los cuales tienen un espesor de 28cm. En los ejes A, B, C, D, E y F, los muros tienen un espesor de 14cm. Todos están fabricados con BTC estabilizados con cemento a 6% en peso; el suelo que se utilizó es una mezcla de arcilla de baja plasticidad y un limo arenosos en proporción 60-40%, los BTC se prensaron en una adobera hidráulica a una presión de 60kg/cm²; en el agua de mezclado se utilizó mucílago de nopal y el mortero de unión fue de cal-arena en proporción 1:1, siendo la junta no mayor de 1 centímetro.

Para lograr una mayor estabilidad del muro, se buscó el cuatrapeo adecuado, ello con la finalidad de que las cargas se distribuyeran de forma correcta y uniforme; en este procedimiento no se utilizaron elementos de concreto de refuerzo, por lo que el muro trabaja exclusivamente a compresión y su estabilidad está dada por peso.

En los vanos de puertas y ventanas se colocaron dinteles de madera de pino a base de vigas de 100 x 150mm, las cuales se empotraron 0.30m en los extremos con el propósito de evitar las fallas en estos puntos.

Foto 16. Muros de BTC

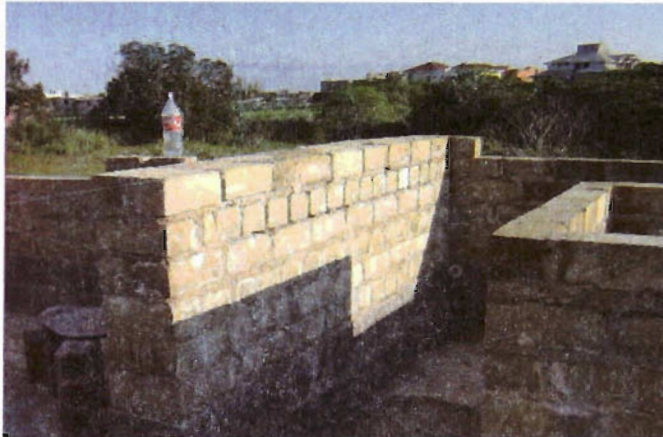


Foto 17. Detalle de cuatrapero de los BTC



Foto 18. Detalle de aunedmiento de las hiladas de BTC



Foto 19. Proceso de desplante de muros de BTC



Foto 20. Muros dobles de BTC



Foto 21. Proceso de fabricación de los BTC



Foto 22. Detalle de dinteles de madera



Foto 23. Dintel de madera en cuarto de baterías



Foto 24. Detalle de dintel



Foto 25. Detalle de dintel en ventilas de la planta alta



A la altura de la losa de entrepiso se coló una cadena de cerramiento de concreto, la cual tiene dos dimensiones: 0.28 x 0.20 y 0.14 x 0.20 m, dependiendo sobre qué muro se encuentre. La cadena está armada con otras tipo pre-armada de 15 x 15 x 4 - ¼" y su función es la de dar rigidez a los muros haciendo la función de un anillo de cerramiento.

Foto 26. Colocación del acero de refuerzo en cadenas de cerramiento



Foto 27. Cimbrado de cadenas de cerramiento en el cuarto de baterías



Foto 28. Detalle de cimbra en cadenas de cerramiento



Foto 29. Desplante de muros en la planta alta



Losa de entrepiso

La losa de entrepiso está construida con madera, este elemento estructural se diseñó utilizando vigas de madera de piso de una sección de 100 x 150 mm, las cuales se empotraron en el muro de BTC; con la finalidad de garantizar la fijación, se anclaron por medio de ángulos de $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{4}$ ", adosándose a la cadena de cerramiento por medio de barrenanclas de $\frac{1}{2}$ " de diámetro y tornillos pijas del número 8 x media pulgada.

LOS BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA (BTC) EN ZONAS HÚMEDAS

Para protegerlas de insectos y de humedades, se utilizaron un funguicida y una emulsión alifática en los extremos que quedan empotrados en los muros.

Una vez colocadas las vigas, se puso una cama de triplay marino de $\frac{3}{4}$ " , la cual se fijó a las vigas por medio de tornillos pija del núm. 8 x $\frac{1}{2}$ "; ya colocado al triplay se le aplicó una capa de emulsión asfáltica y un riego de arena con el propósito de darle una superficie rugosa, para posteriormente colocar piso de cerámica vitrificada.

Foto 30. Aplicación de fungicida



Foto 31. Distribución de vigas de madera de entrepiso

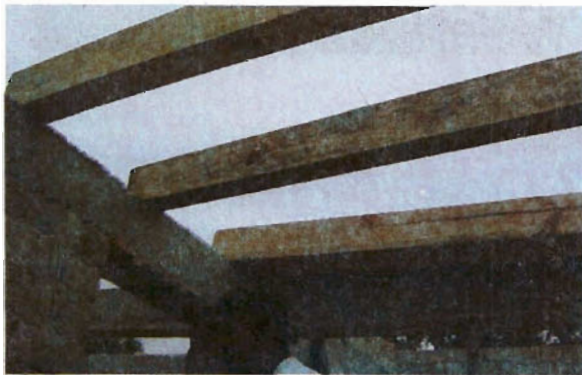


Foto 32. Detalle de anclado de las vigas de madera



Foto 33. Detalle de anclaje

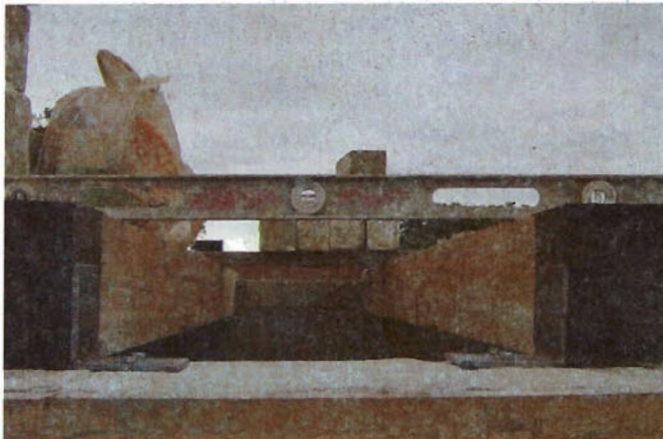


Foto 34. Detalle de anclaje



Foto 35. Colocación de cama de triplay en losa de entrepiso



Foto 36. Detalle de losa de entresuelo



;

Foto 37. Vista inferior de losa de entresuelo



Foto 38. Vista inferior de losa de entrepiso



Construcción de la planta alta

Muros

Al igual que en planta baja, los muros tienen un espesor de 28cm en los ejes 1, 2, 3, y 4, y de 14cm en los ejes A, B, C, D, E, y F, la única variante en los muros de planta alta es que en los ejes 1, 2, 3 y 4 se realiza una piña en la parte superior para provocar una inclinación en la losa; al igual que en planta baja, se remata con una cadena de cerramiento de concreto de 0.28 x 0.20 y de 0.14 x 0.20 metros.

Foto 39. Desplante de muros de BTC en planta alta



Foto 40. Desplante de muros planta alta recámara poniente



Foto 41. Desplante de muros planta alta recámara oriente



Foto 42. Detalle de desplante de muros de baño y cubo instalaciones

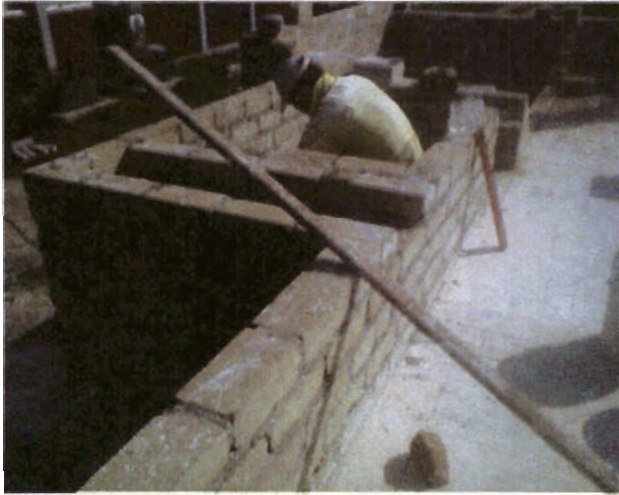


Foto 43. Detalle de muros planta alta



Foto 44. Estructura losa azotea cuarto de baterías



Foto 45. Detalle de losa azotea cuarto de baterías



Foto 46. Detalle de losa azotea cuarto de baterías



Foto 47. Proceso desplante en planta alta



Losa de azotea

Está construida con madera, a base de vigas de madera de piso de una sección de 50 x 100 mm, las cuales se empotraron en el muro de BTC y, con la finalidad de garantizar fijación, se anclaron por medio de ángulos de $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{4}$ ", adosándose a la cadena de cerramiento mediante barrenanclas de $\frac{1}{2}$ " de diámetro y tornillos pijas del núm. 8 x media pulgada.

Una vez colocadas las vigas, se insertó una cama de triplay marino de $\frac{3}{4}$ ", la cual se fijó a las vigas por medio de tornillos pija del núm. 8 x $\frac{1}{2}$ ", ya colocado el triplay, se le aplicó un cartón asfáltico para posteriormente terminar con una membrana de impermeabilizante integral con acabado mineralizado.

Para hacer las uniones entre vigas y vigas y formar los aleros, se utilizaron uniones de lámina galvanizada troquelada y éstas se unieron a las vigas por medio de tornillos núm. 8 x una pulgada.

Foto 48. Detalle de losa en azotea de sala



Foto 49. Aspecto de losa de azotea



Foto 50. Aspecto de losa de azotea



Foto 51. Losa de azotea ensamblada



Foto 52. Proceso constructivo de losa de azotea



Foto 53. Proceso constructivo de losa de azotea



Foto 54. Proceso constructivo de losa de azotea



Foto 55. Aspecto de losa de azotea

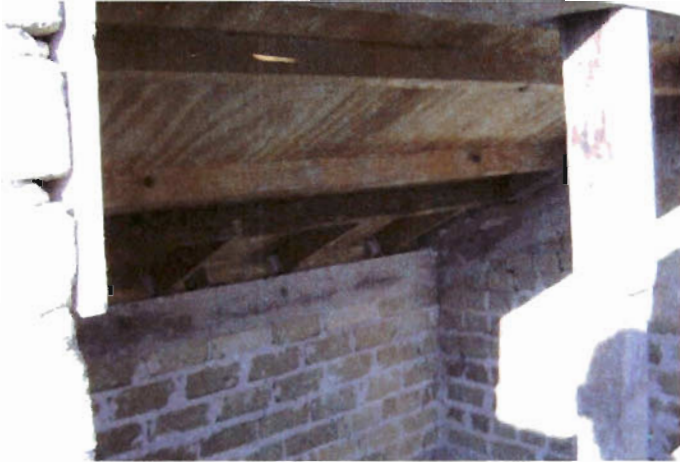


Foto 56. Detalle de ensamble de vigas de losa de azotea



Acabados

Muros

Los acabados de muros interiores y exteriores se hicieron a base de aplanados de cal-arena en proporción 1:1, al cual, en el agua de mezclado, se le incorporó mucílago de nopal en proporción 50-50% agua-mucílago.

La aplicación se realizó mediante el proceso tradicional, sólo se aplicó una lechada de cemento con el propósito de provocar mayor adherencia al mortero cal-arena, el espesor máximo de los aplanados fue de 1 cm, dejándose perfectamente a plomo.

En el área de regadera del baño y en el área de cocina, en la zona de fregadero se colocó un lambrín de azulejo de 30 x 30 cm. pegado con cemento especial o pegazulejo, las juntas se sellaron con cemento blanco.

Foto 57. Lechareada de cemento previa al revoque



Foto 58. Aplicación de mortero cal-arena



Foto 59. Aplicación de mortero cal-arena



Foto 60. Aplicación del revoque de cal-arena



Pisos

En toda la vivienda se colocó piso vitrificado de 33 x 33cm, dejándose una junta de 5mm entre mosaico y mosaico, en planta baja se pegó con cemento especial o pegazulejo, mientras que en planta alta se utilizó pegamento de contacto especial para adherir madera y cerámica. Las juntas en planta baja se sellaron con cemento blanco y en planta alta con sellador acrílico anti-hongos.

Los pisos se nivelaron perfectamente, sólo en el área de baño se dejaron pendientes hacia las coladeras previamente ubicadas para garantizar el escurrimiento de las aguas generadas en el área de regaderas y en el baño.

Foto 61. Detalle de piso cerámico sobre losa de entrepiso



Foto 62. Proceso de colocación de piso cerámico sobre losa en entrepiso

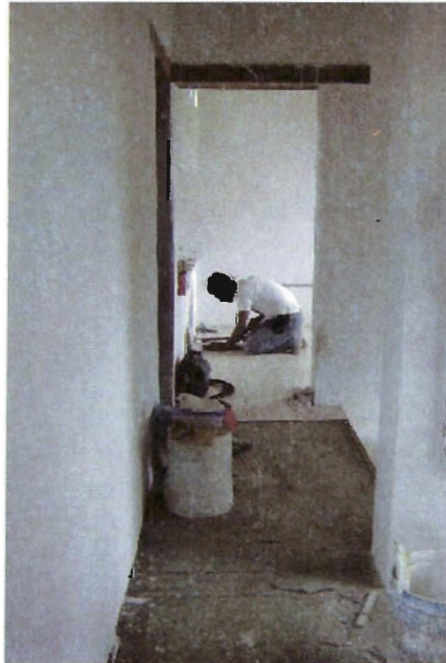


Foto 63. Proceso de colocación de piso cerámico sobre losa en entrepiso



Pintura

La pintura que se utilizó tiene como base cal diluida en agua con mucílago de nopal y aplicada con brocha de ixtle a dos manos, con lo cual se garantizó el sellado de poros y la adherencia de la pintura.

Instalaciones

Las instalaciones hidráulicas son de tubo de polipropileno copolímero Randon, el cual se une por medio de conexiones pegadas por termofusión, lo que reduce el grado de contaminación del agua, ya sea por plomo (como es el caso del cobre debido a sus uniones soldadas a base de estaño-plomo) o por resinas epóxicas en el caso del CPVC o del PVC.

Los diámetros utilizados fueron de 13mm en la red general y alimentación a muebles, y de 19mm en la alimentación general.

MODELO DE VIVIENDA EXPERIMENTAL

En la instalación sanitaria se utilizó un sistema dividido, el cual se realizó a base de tubería de PVC sanitaria de norma, utilizando diámetros de 100mm para las canalizaciones de aguas negras y de 50mm para la conducción de aguas grises. Las aguas negras y grises se conducen a un sistema de tratamiento de aguas o digestor de 1 050 litros que cumple con la NOM-006-cna-1997.

En las instalaciones eléctricas se utilizó un sistema fotovoltaico de energía solar que consta de un panel solar con las siguientes características:

<i>Concepto</i>	<i>Valor</i>
Potencia (watts)	54
Voltaje (v)	17.4
Amperaje (amperes)	3.11
Voltaje en circuito abierto (voc)	21.7
Corriente en corto circuito (isc)	3.31

Una batería modelo NC24/NC27 de ácido y un inversor solar de carga PW400-12 con las siguientes características: 110 vca de entrada, 12 vcd de salida, 45 amp. continuos, tres terminales.

La red eléctrica es visible por medio de tubo Conduit de ½" de diámetro Ced. 20 metálica y cables THW del núm. 12, cuenta con apagadores y contactos tipo Quinzino y rosetones de porcelana de 3" de diámetro con lámparas ahorradoras de energía. El sistema cuenta también con dos centros de carga QO-2 y dos pastillas electromagnéticas de 2 x 15 amperes.

Foto 64. Detalle de alimentaciones y desagües de instalaciones hidrosanitarias



Foto 65. Ramaleo de instalación sanitaria

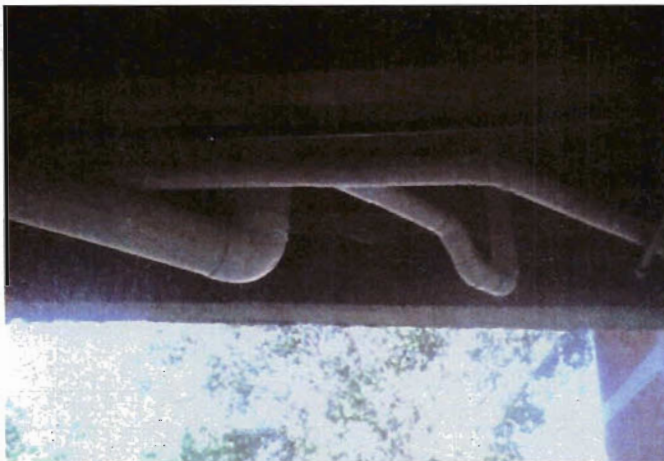


Foto 66. Instalación eléctrica en losa de azotea



Foto 67. Fotocelda solar

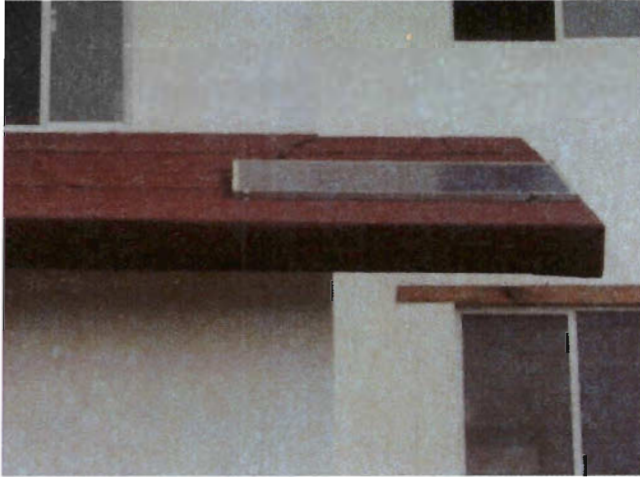
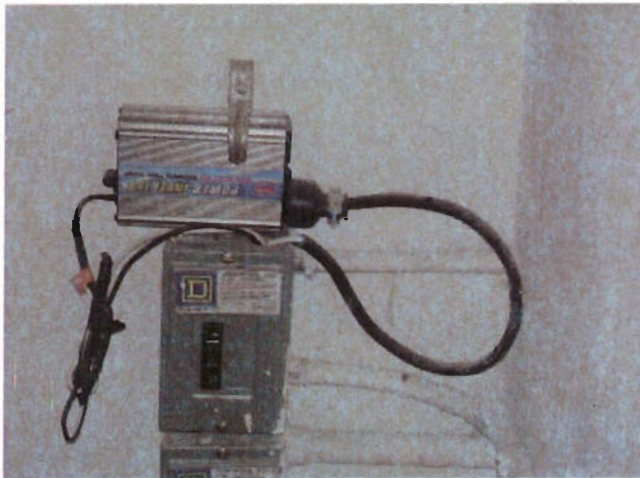


Foto 68. Inversor de corriente



Muebles sanitarios

En el área de baño se colocaron muebles sanitarios de cerámica de color beige (excusado y lavabo), en la cocina se colocó un fregadero de acero inoxidable, las llaves son tipo económicas mezcladoras al igual que la regadera.

Foto 69. Muebles sanitarios del baño



Foto 70. Fregadero en cocina



Carpintería y ventanería

Las puertas exteriores e interiores son de tambor de pino, previamente barnizadas, y las ventanas son de aluminio de 1 ¼” con vidrio claro de 3mm y mosquiteros con tela de aluminio, las cuales se colocaron a base de tornillo y taquetes.

Bibliografía

- Adobe Builder (2000), *Interaméricas, Book no. 8*, Estados Unidos.
- (2001), *Rammed Earth, Book no. 9*, Estados Unidos.
- Adobe Association of the Southwest (2007), *Proceedings Fourth Internacional Adobe Conference of the Adobe Association of the Southwest*, Adobe, Estados Unidos.
- Andrade Narváez, Jorge (1992), *Tabasco, tipología de vivienda*; México, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco, División de Ciencias y Artes para el Diseño.
- ASTM (1997). *Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete and Shotcrete C-1116-97*, Estados Unidos.
- Avita G., Rodolfo C. (1997), *Suelo Cemento*, México, IMCYC.
- Azconegui, Francisco *et al.* (1998), *Guía práctica de la cal y el estuco*, León, Editorial de los Oficios.
- Bardou, Patrick y Varoujan Arzoumainian (1981), *Tecnología y arquitectura, arquitectura de adobe*, Barcelona, Gustavo Gili.
- Barrios L., Gastón (1994), *Manual de construcción en adobe*, Chile, Universitaria.
- Basterra, Alfonso y Félix Jové (2001), “La construcción con tierra cruda hoy”, *Revista Arquitectura y Construcción*, (1)1, pp. 1-8.
- Bay, Joo-Hwa y Boon-Lay Ong (2006), *Tropical Sustainable Architecture: Social and Environmental Dimensions*, Oxford, Architectural Press-Elsevier.
- Beck, Ulrich (1999), *Un nuevo mundo feliz*, Alemania, Paidós.
- Belmares, Héctor, Arnoldo Barrera, Ernesto Castillo, Etienne Verheugen y Margarita Monjaras (1980), *New Composite Materials from Natural Hard Fibers*, México, Centro de Investigación en Química Aplicada, pp. 555-561.
- Benito, F. (1998), *Arquitectura tradicional de Castilla y León*. Castilla y León, Junta de Castilla y León, Conserjería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, Conserjería de Educación y Cultura.

- Boltvinik, Julio (2002), "Pobreza externa de espacio habitacional 1960-2000", *La Jornada* 1(1), pp. 21-23.
- Boyle-Bodin, F. *et al.* (1989), "Estudios de la influencia del género de las arcillas en la elaboración de productos de 'barro' estabilizado por mortero hidráulico, vol. I, ponencia 11" (pp. 207-216), *Tercer Simposium CIB/RILEM MÉXICO '89, sobre materiales y tecnología para la construcción de vivienda de bajo costo*, México, Infonavit.
- Calventus, Carreras, Casals (2006), *Tecnología energética y medio ambiente 1*, Barcelona, España, UPC.
- Campbell, Malcolm D., P. S. Coutts Robert, Anthony J. Michell y Donald Wills (1980), "Composites of Cellulosic Fibers with Polyolefins of Cement. A Short Review", *Ind. Eng. Chem. Prod. Res.*, E. U., pp. 596-601.
- Cárdenas A., W. M. Arguelles y F. M. Goycoolea (1998), "On the Possible Role of *Opuntia ficus-indica* Mucilage in Lime Mortar Performance in the Protection of Historical Buildings", *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, [3]. Recuperado el 29 de noviembre de 2006, disponible en: <http://www.jpacd.org/contents1998.htm>
- Carvalho, Adilson (1997), "Estabilização de solos com adições com cal", *ABPC, Boletim núm. 13*, São Paulo.
- Centro de Investigación Navapalos (1998), *Arquitectura de tierra*, Serie Monografías, Madrid, Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento.
- Chandra, S., L. Eklund y R. R. Villarreal (1988), "Use of Cactus in Mortars and Concrete", *Cement and Concrete Research*, 28, p. 41.
- CIDOC-JOINT Center for Housing Studies de la Universidad de Harvard (2004), "El estado de la vivienda en México", México, CIDOC-Conafovi.
- Cochran William, G. y Gertrude M. Cox (1999), *Diseño experimental*, México, Trillas.
- Comisión Nacional Forestal (s. f.), *Aloe vera (L) Burn*. Recuperado el 2 de enero de 2006, disponible en: www.conafor.gob.mx/portal/docs/secciones/bosquedes/Fichas%20Tecnicas/Aloe%20vera.pdf
- Codepan (Comisión de la Conservación de la Desembocadura del Río Pánuco) (1982), *Plan de ordenación de la Zona Conurbada del Río Pánuco. 82. Versión abreviada*, México, Codepan.
- Concretos Apasco (1985). *Manual de concreto*, México.
- Conescal, A. C. (1982), *Tecnología de tierra y su aplicación en la construcción de espacios educativos*, México, Conescal.
- Cowan, James (1994), *Handbook of Environmental Acoustic*, VNR.

BIBLIOGRAFÍA

- Cyted-Habyted (1999), *Memoria del 1º Seminario y Taller Iberoamericano sobre Vivienda Rural y Calidad de Vida en los Asentamientos Rurales*, Cuernavaca, UAM.
- Daniels, Klaus (1994), *The Technology of Ecological Building: Basic Principles and Measures, Examples and Ideas*, Boston, Birkhäuser.
- De la Fuente Lavalle, Eduardo (1995), *Suelo cemento. Usos, propiedades y aplicaciones*, México, IMCYC.
- De la Fuente, Javier (1989), *Construcción de adobe con un criterio contemporáneo*, San Nicolás de los Garza, Facultad de Arquitectura de la UANL.
- Dirección General para la Vivienda y la Arquitectura, MOPT (1992), *Bases para el diseño y construcción con tapial*, Madrid, Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerios de Obras Públicas y Transporte.
- Dirección de Ingeniería Sanitaria, SSA (1976), *Manual de saneamiento, vivienda, agua y desechos*, México, Limusa.
- Fernández Loaiza, Carlos (1992), *Mejoramiento y estabilización de suelos*, México, Limusa.
- Fonapo (1987), “Gestión financiera en apoyo a la vivienda popular”, *Memorias de actividades 1981-1986*, México, Fonapo.
- Gárate, Ignacio (2002), *Artes de la cal*, Madrid, Editorial Munilla-Lería.
- García Chávez, J. R. (1995), *Viento y arquitectura*, México, Trillas.
- _____ (2006), “Ecopet 21: An Innovative Sustainable Building for Ecological Communities in Tropical Regions”, en Joo Hwa Bay y Boon Lay Ong, *Tropical Sustainable Architecture: Social and Environmental Dimensions*, Oxford, Architectural Press-Elsevier.
- Garrison, James W. y E. F. Ruffner (eds.) (1983), *Adobe: Practical and Technical Aspects of Adobe Conservation*, Tucson, Heritage Foundation of Arizona.
- Gatani, M. P. (2000), *Ladrillos de suelo-cemento: mampuesto tradicional en base a un material sostenible* (466)(51), pp. 35-47.
- Gendrop, Paul (1997), *Diccionario de arquitectura mesoamericana*, México, Trillas.
- Gobierno del Estado de Tamaulipas, disponible en: <http://www.tamaulipas.gob.mx/tamaulipas/municipios/38/3.htm> [Fecha de consulta: 24 de noviembre de 2001].
- _____, disponible en: <http://salud.tamaulipas.gob.mx/estadistica/mortalidad.htm> [fecha de consulta: 12 de junio de 2002].
- Gómez Rodríguez, Francisco Javier (1991), “Compactación de bloques de suelo-cemento”, *Boletín icpc*, 1(58), pp. 7-8.
- González, F. (2006), *Nopal: alimento, medicina y cosmético*. Recuperado el 30 de diciembre de 2006, disponible en: <http://edicolor.com/ARTICULO2.asp?ID=1333&bann=articulodehome&posicion=posicion2>, p. 28.

- González Salas, Carlos (1974), *Tampico es lo Azul*, Cd. Victoria, Universidad Autónoma de Tamaulipas.
- _____ (1976), *Del reloj en vela*, Cd. Victoria, Universidad Autónoma de Tamaulipas.
- _____ (1980), *Los seis municipios conurbados de la desembocadura del Río Pánuco. Planteamiento histórico de los asentamientos humanos de Tampico, Ciudad Madero, Altamira, Tampico Alto, Pueblo Viejo, hoy Villa Cuauhtémoc y Pánuco*, Cd. Victoria, Universidad Autónoma de Tamaulipas.
- _____ (1993), *Los trabajadores de Tampico y Ciudad Madero: un ensayo de sub-cultura laboral, 1886-1991*, Cd. Victoria, Universidad Autónoma de Tamaulipas.
- Guerrero B., Luis Fernando (1994), *Arquitectura de tierra*, México, Universidad Autónoma Metropolitana.
- _____ (2005), “Lime in the Construction and Restoration of the Mexican Architectural Heritage”, en Lime, *Technical Advances for Conservation and Case Studies*, Santiago de Chile, Consejo de Monumentos Nacionales.
- _____ (2006), “Aplicación de la cal en estructuras tradicionales de tierra”, *Anuario de Investigación sobre Diseño Sustentable*, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo. Universidad Autónoma de Tamaulipas.
- _____ (2007), “Tierra y cal”, *Anuario de Estudios de Arquitectura 2007*, México, UAM-Xochimilco.
- Hedin, Rune (1999), “Plasticity of Lime Mortars”, *Azbe Award*, núm. 3, Virginia, National Lime Association.
- Hernández, Caballero, Castaño *et al.* (2005), *Modification of Portland Cement Mortars with Cactus Gum*, México.
- Hernández Ruiz, Luis Enrique y José Antonio Márquez Luna (1985), *Cartilla de pruebas de campo para la selección de tierras en la fabricación de adobes*, México, Conescal.
- Hernández, Z. y G. Serrano (2003), “Use of Nopal in Construction Industry”, en *Proceeding IX Mexican and VII International Congress on Knowledge and Use of Nopal*, México.
- Higueras Gil, Sergio (1981), *La casa de tierra, Plan estatal de vivienda popular y campesina*, México, ITAVU.
- Hoffmann, Márcio (2002), *Efeito dos argilo-minerail do solo na matéria prima dos sistemas construtivos com solo cal*, tesis de grado de maestría, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- Houben, Hugo, Vicebti Rigassi y Philippe Gamier (1996), *Serie Technologies, núm. 5, Blocs de terre comprime, équipements de production*, Bruselas, CRAterre-EAG.

BIBLIOGRAFÍA

- _____ y O. A. Oyejola (1998), *Serie Technologies, núm. 11, Blocs de terre comprimée, normes*, Bruselas, CRAterre-EAG.
- Houber, Guillaud, Thierry Joffroy y Odul Pasca (1995), *Blocs de terre comprime, volume II. Manuel de conception et de construction*, Alemania, CRAterre-EAG.
- INEGI (1980), *Censos generales de población y vivienda*, Estado de Tamaulipas, volumen II, tomo 28, pp. 87 y 93.
- _____ (2001), *XII Censo General de Población y Vivienda, 2000*, México, INEGI.
- Instituto del Cemento Pórtland de Argentina (1994), “Fabricación de bloques con mezclas hipercomprimidas de suelo cemento”, *Boletín del Cemento Pórtland*, (153)1, pp. 6-7.
- ITAVU (1987), *Informe técnico sobre la fabricación de adobe*, México, ITAVU.
- Juárez Badillo, Eulalio y Alfonso Rico Rodríguez (1975), *Mecánica de suelos, tomo I, Fundamentos de la mecánica de suelos*, México, Limusa.
- Kubler, George (1984), *Arquitectura mexicana del siglo XVI*, México, FCE.
- Lacomba, Ruth (comp.) (1991), *Manual de arquitectura solar*, México, Trillas.
- Levin, Fanny (1993), *Estudio para la elaboración de coco rallado y carbón activado*, San José, CNP.
- López Morales, Francisco J. (2003), *Arquitectura vernácula en México*, México, Trillas.
- Madrid M., Carlos y Norman Santander R. (1976), *Dosificación de mezclas de suelo cemento*, Colombia, ICPC.
- Maldonado, L. y H. Guillaud (1999), *Curso de construcción con tierra*, Madrid, Instituto Juan de Herrera-Escuela de Arquitectura de Madrid.
- Magaloni, Diana (1995), “Técnicas de la pintura mural en Mesoamérica”, *Arqueología Mexicana*, México, CNCA-Raíces.
- Martínez, Wilfredo *et al.* (2007a), “Propiedades físicas y mecánicas de materiales de arcilla dopados con cal y yeso para elementos estructurales verticales”, *Anuario de Investigación de Construcción con Tierra y del Diseño Sustentable*, Tampico, UAT.
- _____ (2007b), “Estabilización volumétrica con yeso y cal de arcillas montmoriloníticas para empleo en adobes en Michoacán, México”, *Memorias del 5° Seminario Arquitectura de Tierra em Portugal*, Aveiro, Universidade de Aveiro.
- Martis Neves, Celia, José Ribas Hermelo, Gianfranco Ottazzi Pasino, Julio Vargas Neumann, Suely de Silva Guimaraes y Ramos Ángel San Bartolome (1995), *Recomendaciones para la elaboración de normas técnicas de edificación de adobe tapial, ladrillo y bloques de suelo-cemento*, La Paz, Ediciones Gráficas “E. G.”.

- Masschelein-Kleiner, L. (1995), *Ancient Binding Media, Varnishes and Adhesives*, Roma, Italia, ICCROM.
- Mattone, Roberto (2007), *Anuario de Investigación de Construcción con Tierra y del Diseño Sustentable*, México, UAT, FADU.
- McHenry Jr., Paul Graham (1996), *Adobe, cómo construir fácilmente*, México, Trillas.
- Meade, Joaquín (1977), *La huasteca tamaulipeca*, Ciudad Victoria, Universidad Autónoma de Tamaulipas.
- Menchaca Menchaca, Raúl (1989), “Código y tratamiento relativos a la intensidad de muestreo de los materiales utilizados en la construcción de viviendas”, *Tercer Simposium CIB/RILEM*, México, noviembre, vol. II.
- Microsoft Corporation (1998), *Enciclopedia Encarta*, Estados Unidos, Microsoft.
- Minke, Gernot (2001), *Manual de construcción en tierra. La tierra como material de construcción y sus aplicaciones en la arquitectura actual*, Uruguay, Nordan-Comunidad.
- Monjo Carrió, J. (1998), “Las construcciones de tierra. Evolución, tipología, patología y técnicas de intervención”, *Tratado de rehabilitación, tomo III, Patología y técnicas de intervención. Elementos estructurales*, Madrid, Munilla-Lería.
- (1998), “La evolución histórica de la arquitectura de tierra en España”, *Arquitectura de tierra. Encuentros Internacionales*, Madrid, Centro de Investigación Navapalos. Ministerio de Fomento.
- Montgomery Douglas, C. (1997), *Diseño y análisis de experimentos*, México, Iberoamericana.
- Muñoz Berdugo, Yvonne Lorena (1989), *Adobe estabilizado*, El Salvador, Fundasol.
- Narvaez Tijerina, Adolfo Benito (2002), *Hábitat y vivienda en América*, San Nicolás de los Garza, Universidad Autónoma de Nuevo León, Universidad de Camagüey (Arquitectura y desarrollo sustentable 3).
- Neila González, F. Javier (2004), *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible*, Madrid, Munilla-Lería.
- Nother, R. (2000), *The Repair of Earth Walled Buildings. Tunbridge Wells, Kent*, Institute of Historic Building Conservation.
- Obras (1987), *Sistema adopress*, 175(XV), pp. 73-76.
- Olgún, Mario A. (2008), *Comportamiento físico-mecánico de piezas de arcilla dopadas, estabilizadas con minerales como cal y/o yeso*, tesis de licenciatura en Ingeniería Civil, Morelia, UMSNH.
- Oliveira, Mário M. (2005), “O solo-cal: uma visão histórica e documental”, *Memórias del IV SIACOT-ILATP*, Monsaraz Escola Superior Gallaecia.

BIBLIOGRAFÍA

- , Cybèle C. Santiago y Silvia D’Affonseca (1990), “The study of accelerated carbonation of lime-stabilized soils”, *International Conference on the Conservation of Earthen Architecture*, Las Cruces, Nuevo México, The Getty Conservation Institute-US/ICOMOS, Los Ángeles.
- Orea, Haydeé y B. Sandoval (1992), “El problema de la zona arqueológica de Paquimé y algunas alternativas de investigación para la conservación de la arquitectura de tierra”, *Memorias de la Primera Reunión de Arquitectura de Tierra*, Zacatecas, INAH.
- Paz, Pedro (coord.) (2001), *Construcción práctica por Antonio Torres Torija*, México, INAH.
- Prieto, Alejandro (1975), *Historia, geografía y estadística del estado de Tamaulipas*, México, Porrúa.
- Prieto, Valeria (coord.) (2006), *Proyecto de recuperación de la arquitectura vernácula e impulso al desarrollo integral de la comunidad indígena de San Antonio Tierras Blancas, Municipio de los Reyes, Michoacán*, Morelia, Secretaría de Cultura del Estado de Michoacán.
- Ponga, J. C., A. Rodríguez (2000), *Arquitectura popular en las comarcas de Castilla y León*, Valladolid, Junta de Castilla y León.
- Rifkin, Jeremy (1994), *El fin del trabajo*, España, Paidós.
- Rigassi, Vicent (1995), *Blocs de terre comprime, volumen 1. Manuel de production*, Alemania, CRATerre-EAG.
- Rodríguez Viqueira, Manuel et al. (2001), *Introducción a la arquitectura bioclimática*, México, Limusa.
- Roux Gutiérrez, Rubén Salvador (1990), *Utilización del material adobe para la vivienda popular en la zona conurbada de la desembocadura del Río Pánuco*, Tampico, Facultad de Arquitectura de la UAT.
- (1999), *Influencia del cemento Pórtland tipo I en la fabricación de ladrillos de adobe tecnificado en Tampico, Tam.*, Tampico, Universidad de Sevilla.
- (1999), *Utilización de ladrillos de adobe estabilizados con cemento Pórtland tipo I al 6% y reforzados con fibra de coco para muros de carga en Tampico*, Tampico, Universidad de Sevilla.
- Sáenz, Carmen (2006), “Producción industrial de productos no alimentarios”, *Cuadernos Técnicos de la FAO*.
- Salas Serrano, Julián (1995), *Habiterra, exposición Iberoamericana de construcción de tierra*, Bogotá, Escala.
- Salyer, Ivan O. y Arthur M. Usamani (1982), “Utilization of Vagase in New Composite Building Materials”, *Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev.*, 1(21), pp. 17-23.

- Sánchez Gómez, María del Pilar (1998), *Proyección histórica de Tampico, Monografía*, Universidad Autónoma de Tamaulipas, 2a. edición.
- SDR (2004), *Cultivos estratégicos*, recuperado el 22 de junio de 2007, disponible en: www.agrotamaulipas.gob.mx
- 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, Dirección General de Normas de la Secofi.
- _____ (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.
- _____ (1986), *Norma Oficial Mexicana, NMX-C-037-1986. Industria de la Construcción-concreto-bloques-ladrillos o tabicones de concreto-determinación de la absorción de agua*, México, Dirección General de Normas de la Secofi.
- _____ (1976), *Norma Oficial Mexicana, NMX-C-6-1976. Industria de la Construcción-ladrillo y bloques cerámicos de barro, arcilla o similares*, México, Dirección General de Normas de la Secofi.
- Sedue (1981), *Especificaciones generales de restauración*, México, Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología.
- Senosiain (1999), *Bio-arquitectura*, México, Noriega.
- Serra Florensa, Rafael y Helena Coch Roura (2001), *Arquitectura y energía natural*, Barcelona, UPC.
- Torres-Acosta, A. A., M. Martínez-Madrid, D. C. Loveday y M. R. Silsbee (2005), “Nopal and Aloe Vera Additions in Concreto: Electrochemical Behavior of the Reinforcing Steel”, Paper #05269 NDC CORROSION/2005 *Symposium New Developments in the Protection of Steel in Concrete*, Houston.
- _____ y Prisciliano Felipe de J. Cano Barrita (2007), “Las bondades del nopal”, *Construcción y Tecnología*, boletín del IMCYC, octubre, disponible en: <http://www.imcyc.com/ct2007/oct07/tecnologia.htm>
- United Nations Centre for Human Settlements (hábitat) (1985), *A Compendium of Information on Selected, Low-Cost Building Materials*, Nairobi, UNCFHS (hábitat) (s. f.).
- Universidad Autónoma de Chapingo (1995), *Mercado mundial del nopalito*, Chapingo, México, informe final, C. Flores Valdez, J. de Luna Esquivel, P. Ramírez Moreno, recuperado el 28 de noviembre de 2006, disponible en: <http://www.infoaserca.gob.mx/proafex/NOPAL.pdf>
- Van Lengen, J. (1981), *Manual del arquitecto descalzo. Cómo construir casas y otros edificios*, México, Concepto.

BIBLIOGRAFÍA

- Velásquez Lozano, Jesús (1997), *Selección de materiales para la fabricación de tabiques de tierra*, Saltillo, Universidad Autónoma de Coahuila.
- Vélez González, Roberto (2001), *La ecología en el diseño arquitectónico*, México, Trillas.
- Viñuelas, Graciela María, Celia Martins Neves, Mario O. Flores L. y Silvio Ríos (1994), *Arquitectura de tierra en Iberoamérica*, Buenos Aires, Impresiones Sudamérica.
- Vitruvio, Marco Lucio (1985), *Los diez libros de la arquitectura, traducción directa del latín por Agustín Blánquez*, Barcelona, Iberia.
- Warren, John (1999), *Conservation of Earth Structures*, Oxford, Butterworth-Heinemann.
- Zapata M., Blanca Helena (1991), *Fabricación de bloques de suelo-cemento*, serie 12, núm. 6, Publicación 902, Colombia, Instituto Colombiano de Productores de Cemento.

Páginas electrónicas consultadas

www.calhidra.com.mx/index1.html

www.ambar-minera.com.ar/cal_s.html

Al Fondo Mixto de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica Conacyt-Gobierno del Estado de Tamaulipas por el apoyo brindado para la publicación del presente libro.

Los bloques de tierra comprimida (BTC) en zonas húmedas
se terminó de imprimir en mayo 2010
en los talleres de Impresos Rometa,
Cuauhtémoc número 290, colonia Aldana,
delegación Azcapotzalco. C.P. 02910, México, D.F.
El tiraje consta de 1 000 ejemplares.