



# **tierra, sociedad, comunidad**

**15° Seminario Iberoamericano de Arquitectura  
y Construcción con Tierra  
Cuenca - Ecuador**

**9-13 de Noviembre 2015**



Tierra, sociedad, comunidad  
15° Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra  
Cuenca – Ecuador, Noviembre 2015  
© 2015, Universidad de Cuenca  
ISBN 978-9978-14-313-1  
Derecho de autor: CUE-002345



**15° Seminario Iberoamericano de  
Arquitectura y Construcción con  
Tierra**  
Cuenca - Ecuador

**Edición**  
Célia Neves

**Editorial**  
Proyecto vlirCPM “Manejo y Preservación de la Ciudad Patrimonio Mundial”  
Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca.  
Red Iberoamericana PROTERRA

**Comité Editorial**  
Arq. Hugo Pereira, Coordinador Red Iberoamericana PROTERRA  
Ing. Msc. Celia Neves, Coordinadora Comité Científico 15° SIACOT  
Arq. Fausto Cardoso, Director Proyecto vlirCPM  
Msc. Lorena Vásquez

**Compilación**  
Arq. María Cecilia Achig  
Arq. Gabriela Barsallo  
Arq. Silvana Vintimilla

**Diseño y Diagramación:**  
Arq. Silvana Vintimilla

**Fotografía de portada:**  
Arq. Fausto Cardoso

Publicación revisada por pares académicos.

Los criterios y opiniones expresados en los artículos de esta publicación son de exclusiva responsabilidad de cada uno de sus autores.

**Cuenca, Ecuador, Noviembre 2015**

## **Comité Científico 15 SIACOT**

Arq. Alejandro Ferreiro – FARQ/UDELAR – Uruguay  
Arq. Dr. Alexandre Mascarenhas – IFMG – Ouro Preto – Brasil  
Ing. MSc. Ariel González – UTN Santa Fe – Argentina  
Arq. MSc. Cecilia López Pérez – Pontificia Universidad Javeriana – Colombia  
Ing. MSc. Célia Neves – PROTERRA/Rede TerraBrasil – Brasil (coordinadora)  
Arq. PhD. Gabriela García V. – Universidad de Cuenca/ Universidad Católica de Lovaina, Bélgica – Ecuador  
Arq. Dra. Graciela María Viñuales – Centro Barro/CEDODAL – Argentina  
Arq. Dr. Jorge Tomasi – CONICET/FFyL/UBA – Argentina  
Hist. Juana Font – Fundación Antonio Font de Bedoya – España  
Prof. Dr. Luis Fernando Guerrero – UAM-X – México  
Arq. MSc. Márcio V. Hoffmann – Fato Arquitetura; Taipal construções em terra – Brasil  
Arq. PhD. Maria Fernandes – DGPC - CEAACP – CdT – Portugal  
Arq. Dra. Maria Isabel Kanan – ICOMOS-ISCEAH – Brasil  
Arq. MSc. María Teresa Méndez Landa – Universidad Ricardo Palma – Perú  
Prof. Dra. Mariana Correia – Escola Superior Gallaecia – FCO – Portugal  
Arq. MSc. Mirta E. Sosa – CRIATiC/FAU/UNT – Argentina  
Ing. Mónica Bahamondez – CNCR – Chile  
Arq. Dra. Natalia Jorquera Silva – UCHILE – Chile  
Prof. Dr. Obede Borges Faria – UNESP – Campus de Bauru – Brasil  
Prof. Arq. Rafael F. Mellace – FAU/CIUNT/UNT – Argentina  
Arq. MSc. Rodolfo Rotondaro – UBA/CONICET – Argentina  
Ing. Rosa Delmy Nuñez de Hércules – FUNDASAL – El Salvador  
Arq. PhD. Verónica Heras – Universidad de Cuenca – Ecuador  
Prof. Dr. Virgilio Ayala –Universidad San Carlos – Guatemala

## MATERIALES Y CULTURAS CONSTRUCTIVAS

### Artículo Científico

**Análisis estructural de dos muros de adobe con diferente sistema de aparejo**

Johnny Agüero Benites; Javier Cerón Uribe; Juan Carlos González Lévano; María Teresa Méndez Landa

**Caracterización mecánica de las unidades de adobe del complejo arqueológico Huaca de la Luna mediante ensayos de ultrasonido**

Rafael Aguilar; Cristhian Saucedo; Mijail Montesinos; Eduardo Ramírez; Ricardo Morales; Santiago Uceda

**Refuerzos y protecciones superficiales sostenibles para bóvedas de adobe recargado en México**

Ramón Aguirre; Luis Fernando Guerrero

**Culturas constructivas de tierra en Monforte de Lemos, Galicia, España**

Laura Álvarez-Testa Sánchez; Mariana Correia

**Análisis de la estabilidad de arcillas de alta plasticidad por medio de la dimensión fractal**

Yolanda G. Aranda-Jiménez; Edgardo J Suarez- Domínguez; Victor Garcia Izaguirre

**Refuerzo sísmico de mallas de sogas sintéticas para construcciones de adobe**

Marcial Blondet; Julio Vargas; Nicola Tarque; Jonathan Soto; Carlos Sosa; Javier Sarmiento

**Desenvolvimento de processos de produção e avaliação do desempenho de tintas para a construção civil manufaturadas com pigmentos de solos**

Fernando P. Cardoso; Rita de Cássia S.S. Alvarenga; Anôr Fiorini de Carvalho

**Estabilização alcalina de adobes**

Adriano da Silva Felix; Pablo Raphael de Lacerda Ferreira; Normando Perazzo Barbosa; Khosrow Ghavami

**Uso de las fracciones ligeras del crudo como estabilizantes de tierra**

Yuko Kita; Annick Daneels; Alfonso Romo de Vivar

**Bloques de tierra comprimidos con suelos derivados de cenizas volcánicas y materiales reciclables: una alternativa ecológica**

Gloria Milena Molina Vinasco; Mónica Andrea Arenas Castaño; Alejandro Londoño; Oscar Andrés Parra; Lina Marcela Vallejo

**La cabuya en los revoques en tierra**

Mónica Pesántes Rivera

**Técnicas adoptadas en la elaboración de hormigón para obtener una matriz a base de tierra**

Mirta A. Sánchez; Silvia N. Casenave; Javier Fornari; Susana Keller; Federico Amaya; Lucía Belinde; Marilina Beltramo

**Investigación teórico-práctica sobre la cultura constructiva regional en las terminaciones de muros de tierra cruda en dos climas de argentina**

Giulia Scialpi; Natacha Hugón; Rodolfo Rotondaro

**Comparación entre propiedades físicas y mecánicas de adobes tradicionales y BTC estabilizados químicamente**

Marcelo Vázquez; Daniel Sebastián Guzman; Jorge Mateo Iñiguez

### Informe Técnico

**Propuesta de paneles estructurales modulares de bahareque prefabricado de madera**

Juan Pablo Astudillo Cordero; Nina Vacacela Albuja

**Caracterización constructiva de elementos estructurales en el bahareque: fibras, amarres y ataduras como representación cultural del Azuay**

Freddy Espinoza Figueroa; Álvaro Maldonado Valverde; Paulina Mejía Coronel

**Metodología de control de calidad en producción de paneles con suelos estabilizados**

Adriana Beatriz García; Juan Pablo Mazzeo; Armenia G. Martínez

**Investigación exploratoria del uso de plantas acuáticas en técnicas de construcción con tierra**

Ariel González; Roberto Constanzo; José Fernandez

**Información análisis de bancos de arcillas para la fabricación de BTC en Coahuila, México**

Rubén Salvador Roux Gutiérrez; Jesús Velazquez Lozano

## CONSERVACIÓN PREVENTIVA Y CURATIVA

### Artículo Científico

**Los sistemas constructivos de tierra en el México prehispánico**

Annick Daneels

**Recubrimientos de tierra compactada para la conservación del patrimonio arqueológico de México y El Salvador**

Luis Fernando Guerrero; Oscar Camacho

**Trabajos de documentación de la casa-hospital de la Vera Cruz de San Juan, Villalón de Campos**

Félix Jové Sandoval; Irene Martín Pedruelo; David Ordóñez Castañón

**Conservación del edificio de Taurichumpi – Santuario Arqueológico de Pachacamac. Perú**

Janet Oshiro; Denise Pozzi-Escot

**Primeros datos sobre el uso de adobe y cal en época prehispánica en la región michoacana del Río Balsas Medio, México**

José Luis Punzo Díaz; Diego Rangel Estrada; Erika Ibarra Ávila; Jesús Zarco Navarro

**Camino prehispánico Pando**

Julio Vargas Neumann; Stephanie Gil; Frédérique Jonnard; José Montoya

### Informe Técnico

**Aplicación del sistema para evaluar el estado constructivo en muros de adobe**

María Cecilia Achig; Lourdes Abad

**Diagnóstico y metodología de intervención para el acondicionamiento acústico de construcciones en tierra cruda: el caso de restauración de la iglesia de San Pedro de Atacama, Chile**

Sergio Alfaro; Massimo Palme; Beatriz Yuste

**Consolidación de muro de adobe en Pasaje León**

Max Cabrera; Dániaba Montesinos; María Tommerbakk

**Plan piloto de conservación preventiva aplicado a las viviendas de Susudel (2011-2012) y la intervención en el cementerio de Susudel (2013)**

Fausto Cardoso Martínez

**Reparación sismoresistente en construcciones de adobe comuna de Coinco, Chile**

Marcelo Cortés Álvarez; Masue Sakakibara Romero

**Restauración del Teatro Pedro de la Barra, Antofagasta, Chile**

Patricio Morgado Uribe; Leonardo Seguel Briones

**Consideraciones para la consolidación estructural del Templo Concepción la Conquistadora de Salcajá**

F. J. Quiñónez, E. V. Ayala, M. R. Corzo, J. Quiñónez

**Reparación de grietas estructurales usando grouts de barro líquido en muros arqueológicos de tierra: experiencias en Tambo Colorado**

Henry Eduardo Torres; Véronique Wright; Gianella Pacheco; Oliver Huaman

**Restauración de un techo de barro en la iglesia de San Pedro de Atacama**

Beatriz Yuste Miguel; Camilo Giribas Contreras

## CONTEMPORANEIDAD Y PRODUCCIÓN

### Artículo Científico

#### **Transformación de las edificaciones patrimoniales en las áreas rurales del Cantón Cuenca a partir de un análisis de la actualización de los inventarios de 1988**

Gabriela Barsallo Chávez; Paula Rodas Espinoza

#### **Evaluación térmica de un elemento arquitectónico ancestral: los Putucos, Puno, Perú**

Maria Angélica Guevara Lactayo

#### **A arquitetura da polícia e a política da terra**

Natália Lelis

#### **Aprendiendo construcción sostenible**

Dániela Montesinos González

#### **Fazendas do sul de Minas Gerais no Brasil: possibilidades de preservação e gestão**

Larissa de Souza Pereira; Rosana Soares Bertocco Parisi

#### **Innovación tecnológica y saber tradicional: BTC y adobe, desarrollos paralelos en la cultura constructiva**

Ricardo Sánchez Rodríguez; Francisco Javier Soria López

### Informe Técnico

#### **Rutas sísmicas ancestrales. Un viaje por las culturas constructivas en adobe en los lugares más sísmicos del mundo**

Marcelo Cortés Álvarez; Masue Sakakibara Romero

#### **Casas de tierra en Uruguay**

Rosario Etchebarne; Vicente Ruétalo

#### **Tapiales para la construcción en Paute**

Iván González Aguirre

#### **¿ Y la transferencia de las buenas prácticas de construcción con tierra?**

Dulce María Guillén Valenzuela

#### **Las innovaciones tecnológicas como respuesta a las debilidades y aprovechamiento de potenciales en el sistema constructivo tradicional del adobe**

David Francisco Jara Avila; Tatiana Elizabeth Rodas Aviles; Víctor Marcelo Caldas Freire

#### **Escuela de construcción en tierra. Valorización contemporánea de un saber ancestral y local**

Anne Lemarquis; Amanda Rivera Vidal

#### **Las etnotecnicas y el uso de la tierra**

Arturo López González

#### **Abandono y deterioro en las casas de adobe en Malinaltenango, Estado de México, México**

Aarón David Piña Martínez

#### **Viviendas en tierra cruda para el Departamento de Antioquia-Colombia**

Beatriz Elena Saldarriaga Molina

#### **Casa de tierra sostenible**

Raúl Adolfo Sandoval Tejada, Juan Pablo Sandoval Calderón

## DESARROLLO SOCIAL Y COMUNIDAD

### Artículo Científico

**Aprendendo com os mestres japoneses o *tsuchikabe*: técnica de taipa japonesa no Brasil**

Akemi Hijioka; Bianca Joaquim; Akemi Ino

**Talleres de arquitectura de tierra para niños en Barichara, Colombia**

Natalia Rey Cuellar

**Tecnología de tierra y expresión arquitectónica. Poblados de Tucumán, Argentina**

Mirta Eufemia Sosa; Stella Maris Latina

### Informe Técnico

**Experiencia de construcción de viviendas con materiales y tecnologías regionales**

Juan Arturo Pereyra; Mabel Fabrega; Liliana Beatriz Veja; María Pía Castilla

**La experiencia de capacitación de una comunidad andina en construcción sismorresistente con adobe**

Marcial Blondet; Malena Serrano; Álvaro Rubiños; Elin Mattsson

**A terra na confecção de tinta, que através das cores, promove integração e mudanças na universidade**

Gustavo Fardin Broglie; Murilo Roberto Arthuso; Narah Cristina Israel dos Santos

**El proyecto PIRATE: formación profesional y certificación en construcción con tierra, desde Europa al Mundo**

María Brown Birabén; Mariana Mas Gómez

**La construcción con tierra en Ecuador y la necesidad de la norma**

Patricio Cevallos Salas

**Transformando através da terra: a experiência no Galpão das Artes em Poços de Caldas, MG, Brasil**

Aline Prado Costa; Ana Paula de Oliveira Ribeiro; Daniel Moura Vieira da Silva

**La enseñanza del diseño de la arquitectura con tierra**

Alejandro Ferreiro; Helena Gallardo; Javier Márquez

**Prototipo de vivienda social sostenible. Bahareque prefabricado con tierra. Una alternativa técnica, cultural y ecológica**

Lucía Esperanza Garzón

**Reconstrucción y mejoramiento de la vivienda de adobe en la Montaña de Guerrero, México**

Isadora Hastings García; Gerson Huerta García

**Videoterra, nuevos formatos de difusión del conocimiento en arquitectura con tierra**

Mario Hidrobo Mera; Raquel Martínez Fernández; María Rosa Juárez

**La Red Protierra-Chile y sus proyecciones**

Rodolfo Jiménez Cavieres; Natalia Jorquera Silva; Selene López Camerás; Hugo Pereira Gigogne

**Arquitetura e aspectos construtivos afro-brasileiros em Porto Novo, Benin: ações de requalificação profissional entre os jovens de origem agudá**

Alexandre Ferreira Mascarenhas; Luana Lara Safar Redini; Rock Kiki Gbénahou

**El Santuario de Pachacamac, educación para la conservación**

Denise Pozzi-Escot; Rommel Angeles; Carmen Rosa Uceda

**Recuperación de técnicas constructivas tradicionales de la Parroquia Chuquiribamba, Ecuador**

Gabriela Pacají Ruiz; Wilson Tapia Chocho; Isabel Cristina Bustamante

**Reconstrucción post-terremoto de la atmósfera identitaria en la arquitectura de tierra al sur del Chile**

Leonardo Seguel Briones; Patricio Morgado Uribe

**Arquitectura de tierra en Nuevo México, participación comunitaria yuxtapuesta por una arquitectura de alto costo**

Efthimios Maniatis; Francisco Uviña-Contreras

# ANEXO 1

Publicación de más dos artículos presentados en el 14º SIACOT



14º SIACOT  
Arquitectura de Tierra:  
Patrimonio y sustentabilidad en regiones sísmicas  
El Salvador, 24 al 28 de noviembre 2014



## PATRIMONIO Y CONSERVACIÓN

**Restauración del edificio de las columnas en el Parque Arqueológico Tazumal, El Salvador, C.A.**

Shione Shibata; Masakage Murano

**Técnicas tradicionales en la práctica de la restauración y la conservación de estructuras de tierra en San Andrés, Valle de Zapotitán, La Libertad, El Salvador, C.A.**

Oscar Camacho

# ANEXO 2



**INFORMACIÓN GENERAL DE TALLERES  
DE TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA  
PATRIMONIO Y CONSERVACIÓN**



# MATERIALES Y CULTURAS CONSTRUCTIVAS

## ANALISIS ESTRUCTURAL DE DOS MUROS DE ADOBE CON DIFERENTE SISTEMA DE APAREJO

**Johnny Agüero Benites<sup>1</sup>, Javier Cerón Uribe<sup>2</sup>, Juan Carlos González Lévano<sup>3</sup>**  
**María Teresa Méndez Landa<sup>3</sup>**

Universidad Ricardo Palma, Perú.

<sup>1</sup>jhonny\_1456@hotmail.com, <sup>2</sup>javii,ceron@hotmail.com, <sup>3</sup>jk\_ma\_3032@hotmail.com, <sup>4</sup>mmendez47@hotmail.com

**Palabras claves:** adobe, sistema de aparejo, comportamiento estructural, restos arqueológicos.

### Resumen

A lo largo del tiempo, en casi todo el mundo, se ha empleado la tierra para edificar. El Perú cuenta con importantes restos arqueológicos de tierra (Chan Chan, Pachacamac, Pucllana, entre otros) que, desafiando el paso de los años y los movimientos sísmicos, forman parte importante del pasado cultural del país. Actualmente, dentro de las nuevas tendencias de sostenibilidad arquitectónica, la tierra está recobrando un importante papel como material constructivo, esto debido a las ventajas que ofrece frente a otros materiales como: retardo de trasmisión térmica, que permite brindar confort bajo diversas condiciones climática; ser un material reciclable, no contaminante, inocuo, accesible en todo el mundo, y fácil de trabajar. La durabilidad de los restos arqueológicos respecto a esta nueva tendencia de conciencia ambiental, ha promovido el interés de estudiar algunos sistemas constructivos ancestrales, basados en estudios previos que relacionan la rigurosidad del proceso constructivo con la optimización de las propiedades mecánicas de los muros de adobe. Para ello, se plantea realizar un estudio que permite identificar las características constructivas de las edificaciones precolombinas, a partir de un análisis comparativo del comportamiento estructural de un sistema no convencional de aparejo de adobe respecto al sistema establecido en la normativa peruana, tomando como referencia el complejo arqueológico Huaca Pucllana, ubicado en la ciudad de Lima. El análisis del comportamiento estructural está basado en una prueba de esfuerzos laterales al muro, que determina su rigidez y nivel de falla y cuyos resultados son contrastados mediante una comprobación teórica y basados en la normativa vigente del país. Los resultados permiten realizar propuestas sobre sistemas de aparejos con comportamiento apropiado a la problemática sísmica del Perú, para su empleo en construcciones actuales en adobe.

### 1. INTRODUCCIÓN

La permanente agresión del hombre al Medio Ambiente ha ocasionado graves problemas que afectan a alrededor de 1 billón de personas en el mundo, lo que está conllevando a buscar alternativas, como parte de una actitud de conservación del medio ambiente, para evitar que continúe su deterioro.

La tierra es un material de construcción que responde grandemente a estas expectativas debido a que es el único material constructivo cuyo consumo energético es casi nulo, a la poca contaminación que genera, al confort térmico que brinda, su inocuidad, capacidad de reciclaje, accesibilidad en todo el mundo y su fácil elaboración.

A lo largo de la historia se han realizado diversidad de edificaciones con tierra (adobe y tapial) en el mundo y en especial en el Perú. Como se puede apreciar, muchas de estas han desafiado el tiempo y los movimientos sísmicos, sin mostrar daños significativos. Así se tiene a la Huaca Pucllana, perteneciente a la Cultura Lima y construida hace 1.500 años, como expresión de una adecuada manera de construcción con adobe, a pesar de que el Perú, y, en especial la costa central y sur, debe afrontar un alto grado de vulnerabilidad sísmica. Esto, debido a que el país se encuentra ubicado en el área de influencia del Cinturón de Fuego del Pacífico, así como, por la presencia de fallas geológicas como es el caso de la Placa de Nazca, que trae como consecuencia permanentes sismos de gran intensidad y que causan considerables daños en las construcciones, con la consiguiente pérdida de vidas humanas y económicas.

En la actualidad, en el Perú, la tierra aún es un importante material de construcción. Según los resultados de los censos de vivienda realizados en el país, en los últimos 30 años se observa que, a nivel nacional, existe gran cantidad de viviendas construidas con tierra cruda (40% aproximadamente), tanto con tapial como con adobe. Por este motivo, surgió la preocupación de realizar estudios que permitan mejorar las técnicas constructivas en adobe, a fin de brindar mejores condiciones de habitabilidad a los usuarios de estas edificaciones.

La revista en línea Perú Ecológico en su edición de setiembre del 2007 cita a la arqueóloga Isabel Flores Espinoza, quien en su libro "Pucllana: Esplendor de la Cultura Lima" señala que

"...Han pasado 1.500 años desde que Pucllana fuera construida: el monumento sigue en pie mientras que construcciones coloniales, republicanas y recientes han sido destruidas por sismos a pesar de las técnicas constructivas 'modernas'..."

Basados en esta afirmación y conocedores del estado de conservación que tienen estos restos arqueológicos se tomó en consideración, para el presente estudio, el sistema de aparejo empleado en estos restos arqueológicos según se observa en la figura1.



Figura 1. La técnica del librero: adobes colocados verticalmente (Crédito: Agüero, 2014)

Debido a la escasa información sobre estudios realizados en las construcciones ancestrales en tierra, se planteó la necesidad de llevar a cabo un estudio que permita rescatar las técnicas constructivas de la cultura Lima. El análisis del sistema de colocación de adobe ayudará a resolver la controversia de por qué las edificaciones ancestrales no han colapsado con los últimos sismos, en especial, en los años 2001 y 2007; siendo el caso contrario en las edificaciones modernas construidas con tierra.

De esta manera, el Centro de Estudios para Comunidades Saludables de la Universidad Ricardo Palma podrá elaborar y proponer un sistema constructivo en adobe con el sistema de colocación más eficiente que responda de la mejor manera a las condiciones geográficas de nuestra zona.

## 2. OBJETIVOS

El estudio tiene como objetivo realizar un análisis comparativo del comportamiento estructural de un sistema no convencional de aparejo tipo librero de adobe, simulando el existente en el complejo arqueológico Huaca Pucllana, respecto al sistema de aparejo considerado en la normativa peruana.

### 3. ANTECEDENTES

Los sistemas constructivos empleados en los restos arqueológicos en el Perú no han sido mayormente estudiados respecto a su comportamiento, más aún en las culturas pre-incas, por lo que el conocimiento constructivo ancestral no ha sido rescatado.

Respecto al sistema peruano ancestral de construcción de muros de adobe con sistema de aparejo tipo librero, empleado en el complejo arqueológico Huaca Pucllana, es definido por Flores, mencionada en Perú Ecológico (2007, p.1) de la siguiente manera.

Pucllana fue construida usando pequeños adobitos rectangulares. La técnica mediante la cual se construyó es bastante particular: consiste en colocar los adobitos en posición vertical, con la argamasa sólo en la parte superior e inferior, sin ponerla entre los adobes; esta técnica fue bautizada por el estudioso Pedro Villar Córdova como la 'Técnica del Librero' por la similitud que tienen los muros con un estante con libros.

En cuanto a sismo-resistencia de las construcciones en tierra, un estudio sobre los centros arqueológicos de Pachacámac y Huaca Pucllana menciona que "...es importante analizar cómo se mejoró la resistencia mecánica de los adobes empleando técnicas constructivas que permitiesen mejorar su desempeño sismo-resistente..." En cuanto al uso de juntas verticales como una posible solución sismo-resistente se menciona que "...esta técnica habría logrado darle cierto nivel de ductilidad a la estructura permitiendo el desplazamiento de las masas estructurales en caso de fuerzas sísmicas..." (Pozzi-Escot et al, 2009, p.4).

Así también, en referencia a los restos arqueológicos de adobe, Gallegos (2002, p.3) menciona que:

los antiguos peruanos construían con adobe en la costa y casi exclusivamente con piedra en la sierra. Muchas de sus edificaciones costeras han perdurado...Sus altos y gruesos muros, que forman en casi todas ellas un continuo sin fin de muros, han sufrido daños producidos por la lluvia y por la acción directa del hombre, pero han sido inmunes a los sismos.

Las actuales edificaciones en adobe han producido en el Perú enormes daños, tanto económicos como de vidas humanas, en los sismos ocurridos en los últimos años, como es el caso del último sismo registrado en el año 2007 en la costa sur del Perú, que causó grandes daños en el departamento de Ica. Una serie de equipos de investigadores realizaron estudios al respecto. Así se tiene el informe del equipo de investigación de Japón, encargado de evaluar los daños causados por el sismo de 2007, el que menciona que: "...el 20% de las casas en las áreas afectadas colapsaron completamente...", siendo los sistemas constructivos predominantes el adobe (52%) y la albañilería confinada (39%) (INDECI, 2009).

En una entrevista realizada al Dr. Hernando Tavera investigador y director de sismología del Instituto Geofísico del Perú, acerca del tiempo de duración de un sismo afirma que "...dependerá si se trata de la ruptura producida en el foco en cuyo caso será de milisegundos hasta 2 o 3 minutos para los grandes sismos..." (IGP, 2012).

### 4. MARCO TEÓRICO

Respecto a los efectos estructurales de un sismo en una edificación de adobe Grohmann (1998), mencionado por Minke (2001, p.6) considera que "...la fuerza de destrucción de un sismo y sus efectos dependen de parámetros entre los que se encuentran la duración y frecuencia en el lugar..." En cuanto al comportamiento de las edificaciones de adobe respecto a los sismos, considera que "...son afectadas mayormente por los impactos horizontales ocasionados por los movimientos de la tierra en el plano horizontal, los impactos verticales ocasionados por la actividad sísmica equivalen a menos del 50%..."

El comportamiento de una estructura durante un sismo es definido de la siguiente manera:

cuando los impactos horizontales del sismo alcanzan el muro perpendicularmente éste tiende a colapsar. Solamente los muros de gran espesor, tienen la capacidad de resistir estas cargas laterales sin requerir elementos de estabilización adicionales... Hoy en día viviendas de este tipo ya no se construyen debido al tiempo de ejecución requerido para construir muros de 60 a 100 cm de espesor. Por ello, es necesario buscar nuevas soluciones. (Minke, 2001 p.15).

Grohmann (1998), mencionado por Minke (2001, p.7) afirma que "...de acuerdo al método de la fuerza equivalente, la resistencia contra fuerzas horizontales está determinada por una fuerza estática..." Así también menciona que:

cuanto mayor es la ductilidad disponible tanto menor es la fuerza equivalente. Concluyendo así que las construcciones antisísmicas deben disponer de una ductilidad mayor y deben ser capaces de asumir parte de la energía con las deformaciones plásticas.

En la búsqueda de una teoría que fundamente el posible comportamiento estructural de los espacios vacíos en el sistema de construcción de muro de adobe tipo librero, se encontró que el CEC de la Universidad de Chile (2010, p.1) considera que la teoría de disipación de energía está basada en:

la colocación, en la estructura, de dispositivos que tienen por objetivo aumentar la capacidad de perder energía de una estructura durante un sismo, esto debido a que toda estructura disipa o elimina la energía de un sismo mediante deformaciones. Mediante estas fuertes deformaciones se incrementa notablemente la capacidad de disipar energía de la estructura con una reducción de las deformaciones de la estructura.

Por otro lado, en cuanto a la construcción en adobe, el Perú cuenta con una norma especializada Norma E0.80 RNE (Vivienda, 2006) como parte del Reglamento Nacional de Edificaciones, aprobada por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú, la que define los lineamientos constructivos siguientes:

#### Artículo 2.- REQUISITOS GENERALES

2.1. El proyecto arquitectónico de edificaciones de adobe deberá adecuarse a los requisitos que se señalan en la presente Norma.

2.2. Las construcciones de adobe simple y adobe estabilizado serán diseñadas por un método racional basado en los principios de la mecánica, con criterios de comportamiento elástico.

#### Artículo 3.- DEFINICIONES

a. Adobe.- Se define el adobe como un bloque macizo de tierra sin cocer, el cual puede contener paja u otro material que mejore su estabilidad frente a agentes externos...

b. Mortero Material de unión de los adobes.- Puede ser barro con paja o con arena, o barro con otros componentes como asfalto, cemento, cal, yeso, bosta, etc.

En lo referente a las características de los bloques de adobe la Norma E0.80 da las siguientes pautas:

#### Artículo 4.- UNIDAD O BLOQUE DE ADOBE

4.1. Requisitos Generales.- La gradación del suelo debe aproximarse a los siguientes porcentajes: arcilla 10-20%, limo 15-25% y arena 55- 70%, no debiéndose utilizar suelos orgánicos. Estos rangos pueden variar cuando se fabriquen adobes estabilizados. El adobe debe ser macizo y sólo se permite que tenga perforaciones perpendiculares a su cara de asiento, cara mayor, que no representen más de 12% del área bruta de esta cara. El adobe deberá estar libre de materias extrañas, grietas, rajaduras u otros defectos que puedan degradar su resistencia o durabilidad.

4.2. Formas y Dimensiones.- Los adobes podrán ser de planta cuadrada o rectangular y en el caso de encuentros con ángulos diferentes de 90°, de formas especiales. Sus dimensiones deberán ajustarse a las siguientes proporciones:

- Para adobes rectangulares el largo sea aproximadamente el doble del ancho.
- La relación entre el largo y la altura debe ser del orden de 4 a 1.
- En lo posible la altura debe ser mayor a 8 cm.

Según la Norma E0.30 RNE (Vivienda, 2014), que define los lineamientos constructivos de diseño sismorresistente tenemos que

Artículo 15.- Desplazamientos Laterales

15.1 Desplazamientos Laterales Permisibles

El máximo desplazamiento relativo de entrepiso, calculado según el Artículo 16 (16.4) no deberá exceder la fracción de la altura de entrepiso que se indica en la Tabla N°8

Tabla N° 8	
LÍMITES PARA DESPLAZAMIENTO LATERAL DE ENTREPISO	
Estos límites no son aplicables a naves industriales	
Material perdominante	(D <sub>i</sub> /h <sub>e</sub> <sub>i</sub> )
Concreto armado	0,007
Acero	0,010
Albañilería	0,005
Madera	0,010

Figura 2. Límites para desplazamiento lateral de entrepiso (Vivienda, 2014)

Conceptos que han sido considerados como fundamento teórico en el planteamiento y desarrollo del estudio.

## 5. METODOLOGÍA

Se empleó una metodología experimental, realizado mediante una prueba de esfuerzos laterales, el cual implementa pruebas de comportamiento estructural simulando la fuerza sísmica que actúa en el muro con un pistón hidráulico de doble efecto el cual opera hasta una presión de 20 MPa, a dicha presión el pistón realiza una fuerza de empuje de hasta 50 tf, fuerza que se consigue mediante la fórmula: Fuerza=presión×área del cilindro. Éste sistema se encuentra especialmente diseñado con el fin de analizar el comportamiento estructural y determinar la rigidez y nivel de falla de cada uno de los sistemas constructivos.

La toma de datos se realizó mediante sensores colocados en el extremo del muro opuesto al de la aplicación de la fuerza. Los sensores empleados son de distancia ultrasónica, código hc-sr04. Miden una distancia eficaz de 2 cm a 4,5 m con una resolución de 3 cm, operando a una frecuencia de 40 kHz, lo que permite conocer la deformación producida en dicho extremo del muro. Estos sensores fueron colocados a 73 cm de separación de dicho lado. El sistema permite registrar datos de presión y deformación simultáneamente mediante la utilización de la tarjeta de control Arduino, Ethernet (SD) y Matlab.

### La construcción de los muros

Para el estudio se construyeron dos muros de adobe con diferente sistema de aparejo de 0,25 m x 2,60 m x 2,10 m. El primero de ellos empleando el sistema tipo librero, replicando los existentes en los restos arqueológicos de la Huaca Pucllana, y, el otro, siguiendo los sistemas de aparejo tradicionales. Previo al inicio de la construcción, se hizo un ensayo granulométrico del tipo de suelo a utilizar, según la Norma ASTM D422-63, ensayo que permite clasificar las partículas del suelo según su diámetro, mediante el empleo de tamices

seleccionados. Con la información del tipo de suelo apropiado se pasó a la preparación de adobes de dimensiones: 0,28 m x 0,25 m x 0,10 m para su utilización en la construcción de ambos muros.

El muro en sistema de aparejo tipo librero se construyó colocando el adobe en posición vertical y de canto, dejando un espacio libre de 1,5 cm aproximadamente entre cada uno de los bloques. Los adobes se unieron solamente en sentido horizontal con mortero de barro. Para el sistema de aparejo tradicional, se colocaron los adobes de manera horizontal con mortero tanto en las juntas verticales como en las horizontales. Ambos muros fueron levantados sobre un sobre cimiento de concreto de 30 cm de altura (figura 3).

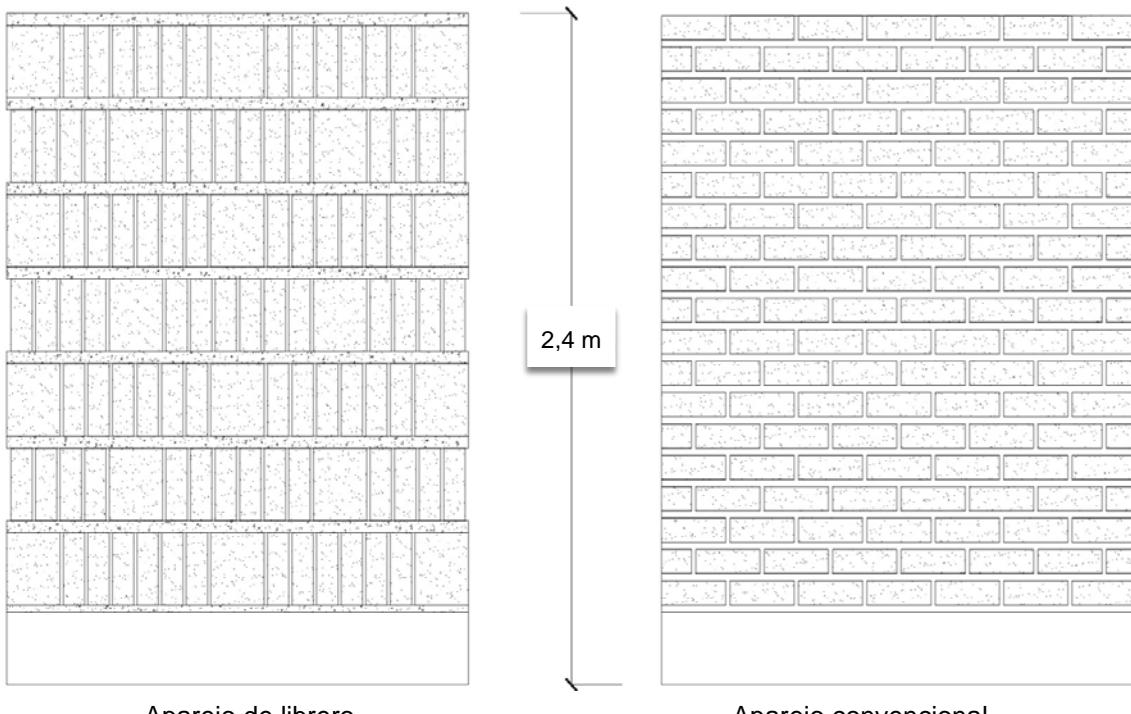


Figura 3. Técnicas de aparejo estudiadas (Fuente: CECOS-BRIGURP, 2015)

### La prueba

Una vez construidos cada uno de los muros, se realizaron las pruebas de comportamiento estructural simulando la fuerza sísmica que actúa en el muro, aplicada mediante el pistón hidráulico de doble efecto. Este pistón ejerció sobre el primer muro prototípico (aparejo de librero) una fuerza de 1,171 kN y en el segundo caso una fuerza de 48,32 kN. Las fuerzas fueron aplicadas, en ambos casos, en la parte superior de los muros a 2,10 m desde el nivel de piso terminado.

Para la toma de datos se colocaron ocho sensores de distancia ultrasónica en el extremo del muro opuesto al de la aplicación de la fuerza, los cuales cuentan con capacidad de medición de una distancia eficaz de 2 cm a 400 cm con una resolución de 3 cm, información que fue almacenada de forma paralela con los datos de presión obtenidos del transductor de presión. Una vez terminada la prueba, se procedió al retiro de la memoria SD de la tarjeta Arduino, y, posteriormente conectada a la PC se realizó la interpretación de datos (corrección y gráficos), los que se exportaron a una tabla en excel. Este procedimiento permitió conocer con precisión la deformación producida en el extremo de ambos muros y evaluar la rigidez y nivel de falla de éstos, así como también el comportamiento de cada sistema de aparejo respecto a la ductilidad que presentan.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Luego de realizados los dos ensayos y aplicada una fuerza horizontal en la corona del muro, se obtuvieron los resultados presentados en la tabla 1.

Tabla 1. Desplazamientos laterales en el muro de aparejo tipo librero

Tiempo (s)	Presión Aplicada	Fuerza	Sensor 1		Sensor 7	
			MPa	kN	Lo (m)	Δ (m)
0,000	0,000	0,000	0,720	0,000	0,720	0,000
0,125	0,000	0,000	0,720	0,000	0,720	0,000
0,250	0,000	0,000	0,720	0,000	0,710	0,010
0,375	0,000	0,000	0,720	0,000	0,710	0,010
0,500	0,000	0,000	0,720	0,000	0,710	0,010
0,625	0,000	0,000	0,720	0,000	0,710	0,010
0,750	0,000	0,000	0,720	0,000	0,710	0,010
0,875	0,000	0,000	0,720	0,000	0,710	0,010
1,000	0,000	0,000	0,720	0,000	0,710	0,010
64,000	0,046	1,171	0,610	0,110	0,690	0,030
64,125	0,046	1,171	0,620	0,100	0,680	0,040
64,250	0,046	1,171	0,610	0,110	0,690	0,030
64,375	0,046	1,171	0,620	0,100	0,680	0,040
64,500	0,046	1,171	0,620	0,100	0,690	0,030
64,625	0,046	1,171	0,620	0,100	0,690	0,030
64,750	0,046	1,171	0,610	0,110	0,690	0,030
64,875	0,046	1,171	0,610	0,110	0,690	0,030
65,000	0,046	1,171	0,620	0,100	0,690	0,030
65,125	0,046	1,171	0,620	0,100	0,690	0,030
Deformación total relativa $\Delta$ (m)					0,070	
Deriva de entrepiso					0,0212	

Según se observa en la tabla 1 el ensayo dio como resultado un desplazamiento absoluto medido por el sensor 1 de 10 cm y el medido por el sensor 7 de 3 cm, obteniéndose como resultado final un desplazamiento relativo de 7 cm. El artículo 15º de la norma E.030 (Vivienda, 2014) considera el desplazamiento lateral permisible para albañilería de 0,005, el cual se tomó como referencia debido a que no se cuenta con parámetros establecidos para adobe.

Los resultados de la prueba permitieron calcular una deriva de entrepiso de 0,0212.



Figura 4. Falla del muro de adobe en aparejo de librero (Crédito: CECOS-BRIGURP, 2015)

Tabla 2. Desplazamientos laterales en muro de aparejo convencional

Tiempo (s)	Presión Aplicada	Fuerza	Sensor 1		Sensor 7	
			MPa	kN	Lo (m)	Δ (m)
0,0000	1,19316	29,0523	0,5588	0,0000	0,5309	0,0000
0,1818	1,98448	48,3202	0,5559	0,0029	0,5245	0,0064
0,3636	1,98448	48,3202	0,5493	0,0095	0,5245	0,0064
0,5455	1,98448	48,3202	0,5503	0,0085	0,5229	0,0080
0,7273	1,98448	48,3202	0,5437	0,0151	0,5224	0,0085
0,9091	1,98448	48,3202	0,5437	0,0151	0,5214	0,0095
1,0909	1,98448	48,3202	0,5416	0,0172	0,5194	0,0115
1,2727	1,98448	48,3202	0,5389	0,0199	0,5131	0,0178
1,4545	1,98448	48,3202	0,5353	0,0235	0,5131	0,0178
1,6364	1,98448	48,3202	0,5336	0,0252	0,5131	0,0178
1,8182	1,98448	48,3202	0,5309	0,0279	0,5131	0,0178
2,0000	1,98448	48,3202	0,5289	0,0299	0,5131	0,0178
2,1818	1,98448	48,3202	0,5231	0,0357	0,5131	0,0178
2,3636	1,98448	48,3202	0,5255	0,0334	0,5131	0,0178
2,5455	1,98448	48,3202	0,5255	0,0334	0,5131	0,0178
2,7273	1,98448	48,3202	0,5255	0,0334	0,5131	0,0178
2,9091	1,98448	48,3202	0,5255	0,0334	0,5131	0,0178
3,0909	1,98448	48,3202	0,5255	0,0334	0,5131	0,0178
3,2727	1,98448	48,3202	0,5255	0,0334	0,5131	0,0178
3,4545	1,98448	48,3202	0,5255	0,0334	0,5131	0,0178
3,6364	1,98448	48,3202	0,5255	0,0334	0,5131	0,0178
3,8182	1,98448	48,3202	0,5255	0,0334	0,5131	0,0178
4,0000	1,98448	48,3202	0,5255	0,0334	0,5131	0,0178
4,1818	1,98448	48,3202	0,5255	0,0334	0,5131	0,0178
4,3636	1,98448	48,3202	0,5255	0,0334	0,5131	0,0178
4,5455	1,98448	48,3202	0,5255	0,0334	0,5131	0,0178
4,7273	1,98448	48,3202	0,5255	0,0334	0,5131	0,0178
4,9091	1,98448	48,3202	0,5255	0,0334	0,5131	0,0178
5,0909	1,98448	48,3202	0,5255	0,0334	0,5131	0,0178
5,2727	1,98448	48,3202	0,5255	0,0334	0,5131	0,0178
5,4545	1,98448	48,3202	0,5255	0,0334	0,5131	0,0178
5,6364	1,98448	48,3202	0,5255	0,0334	0,5131	0,0178
5,8182	1,98448	48,3202	0,5255	0,0334	0,5131	0,0178
6,0000	1,98448	48,3202	0,5255	0,0334	0,5131	0,0178
Deformación total relativa Δ (m)						0,0156
Deriva de entrepiso						0,0047

Según se observa en la tabla 2, el ensayo dio como resultado un desplazamiento absoluto medido por el sensor 1 de 3,34 cm y el medido por el sensor 7 de 1,78 cm, obteniéndose como resultado final un desplazamiento relativo de 1,56 cm. El artículo 15º de la norma E.030 (Vivienda, 2014) considera el desplazamiento lateral permisible para albañilería de 0,005 el cual se tomó como referencia debido a que no se cuenta con parámetros establecidos para adobe.

Los resultados de la prueba permitieron calcular una deriva de entrepiso de 0,0047.



Figura 4. Falla del muro de adobe en aparejo convencional (Crédito: CECOS-BRIGURP, 2015)

La prueba realizada en el muro con aparejo de librero cumple con lo expresado por Grohmann (1998), mencionado por Minke (2001, p.6) respecto a los efectos estructurales de un sismo en una edificación de adobe de los que menciona "...la fuerza de destrucción de un sismo y sus efectos dependen de parámetros entre los que se encuentran la duración y frecuencia en el lugar..." así también con lo expresado por el Dr. Hernando Tavera del Instituto Geofísico del Perú, acerca del tiempo de duración de un sismo, quien afirma que "...dependerá si se trata de la ruptura producida en el foco en cuyo caso será de milisegundos hasta 2 o 3 minutos para los grandes sismos..." pues durante 3 min soportó 1,17 kN deformándose 7 cm sin colapsar mostrando una alta ductilidad, cumpliendo con lo mencionado por Minke (2001, p.7) respecto al comportamiento de los muros de adobe que "...cuanto mayor es la ductilidad disponible tanto menor es la fuerza equivalente. Concluyendo así que las construcciones antisísmicas deben disponer de una ductilidad mayor..."

Según la tabla nº 8 del artículo 15 – Desplazamientos Laterales de la norma E0.30 RNE (Vivienda, 2014), el límite para desplazamiento lateral de entrepiso para albañilería debe ser 0,005, valor tomado como referencia debido a la falta de parámetros establecidos para adobe. La prueba del muro con aparejo de librero dio un valor de deriva de entrepiso de 0,0212, el cual supera los límites para este tipo de estructuras. Pese a estos valores, el muro construido con este sistema no colapsó, llegando a tolerar mayores deformaciones que un muro de mampostería, como del que se está tomando los valores referenciales.

El muro con aparejo convencional presentó mayor rigidez que la anterior, al ser sometida a una fuerza de 48,32 kN en un tiempo de 6 segundos. La prueba del muro con aparejo convencional dio un valor de deriva de entrepiso de 0,0047, el cual es menor que el requerido por la norma E.030 (0,005) para este tipo de estructuras. Se comprobó así que el sistema de construcción de adobe tradicional tiene un nivel de desplazamiento menor antes de fallar comparado con un muro de mampostería convencional.

## 7. CONCLUSIONES

El estudio mostró que el muro con aparejo de librero tuvo mejor comportamiento ante la aplicación de una fuerza horizontal en la parte superior, zona más sensible del muro.

El sistema constructivo de aparejo de librero aumentó la ductilidad del muro, permitiendo mayores deformaciones y disipación de energía.

Este sistema constructivo de aparejo de librero, empleado por la cultura Lima, cumplió con el RNE del Perú, Norma E.080 (Vivienda, 2006) para construcciones en adobe, como es soportar sismos de intensidad media, permitiendo la evacuación de los habitantes, al haber soportado 3 min sin colapsar.

Así también este sistema constructivo, de aparejo de librero, superó los requerimientos mínimos que el Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú, Norma E.030. (Vivienda, 2014) exige, respecto al desplazamiento del entrepiso que llegó a tener el muro, además de permitir regresar a su condición inicial con daños leves.

Como consecuencia se concluye que en los restos arqueológicos pertenecientes a las culturas Pre-Incas (cultura Lima) de Lima se manejaron conceptos relacionados a la solución de la problemática sísmica de la costa del Perú.

El sistema de aparejo de librero presenta algunas dificultades para su empleo en edificaciones actuales, que deben ser resueltas en estudios posteriores.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society for Testing and Materials. ASTM International (s/f). Norma ASTM D422-63 Standard test methods for particle-size analysis of soils. ASTM.
- CEC Universidad de Chile (2010) Aislación sísmica. Universidad de Chile. Disponible en <<http://www.cec.uchile.cl/~dicesco/aislacion.html>> Acceso en 15-07-2015
- Gallegos, H. (2002). La nobleza del adobe. Pontificia Universidad Católica del Perú PUCP. *Lima*. p.3
- Grohmann (1998). Introducción al diseño sismorresistente, viviendas sismorresistentes (Informe no publicado). En: Laboratorio de Construcción Experimental, Universidad de Kassel, Alemania.
- Instituto Geofísico del Perú. (S/F) Servicios institucionales. Preguntas frecuentes 28/02/12. Portal del Instituto Geofísico del Perú. IGP 2012. Disponible en <[http://www.igp.gob.pe/portal/images/documents/sismos/preguntas\\_frecuentes/8.pdf](http://www.igp.gob.pe/portal/images/documents/sismos/preguntas_frecuentes/8.pdf)> Acceso en 06-09-2015
- Instituto Nacional de Defensa Civil (2009) Informe del equipo de investigación de Japón. Sismo 2007. INDECI.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2006). Norma E.0.80. Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú. VIVIENDA. Perú.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2014). Norma E.0.30. Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú. VIVIENDA. Perú.
- Minke, G. (2001). Manual de construcción para viviendas antisísmicas de tierra. Kassel. Alemania.
- Perú Ecológico (S/F) Los sismos y las construcciones de adobe-Perú Ecológico. Disponible en: <[http://www.peruecologico.com.pe/esp\\_sismosadobes.htm](http://www.peruecologico.com.pe/esp_sismosadobes.htm)> Acceso en 12-07-2015
- Pozzi-Escot, D.; Bernuy, K.; Torres, H. P; Aching, J. V. (2009). Sismo-resistencia de las construcciones en tierra del santuario arqueológico de Pachacamac. Disponible en: [http://www.academia.edu/6067224/SISMO-RESISTENCIA\\_DE\\_LAS\\_CONSTRUCCIONES\\_EN\\_TIERRA\\_DEL\\_SANTUARIO\\_ARQUEOLOGICO\\_DE\\_PACHACAMAC](http://www.academia.edu/6067224/SISMO-RESISTENCIA_DE_LAS_CONSTRUCCIONES_EN_TIERRA_DEL_SANTUARIO_ARQUEOLOGICO_DE_PACHACAMAC)

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece de manera especial al Doctor Iván Rodríguez Chávez, Rector de la universidad Ricardo Palma, por el apoyo económico brindado para la construcción del sistema de pruebas.

A los miembros del Centro de Estudios de Comunidades Saludables (CECOS-BRIGURP), en especial a Gustavo Sosaya del Carpio, Oscar Paz Cáceres, Luis Felipe Camones Alegría, Cesar Zamora Zelada, Renato Flores Biggio y Cristina Arias Gutiérrez y demás miembros voluntarios por su apoyo en la elaboración y desarrollo del trabajo.

## AUTORES

Johnny Agüero Benites, alumno de Arquitectura. Universidad Ricardo Palma. Miembro voluntario, Coordinador de alumnos del Centro de Estudios para Comunidades Saludables CECOS-BRIGURP.

Javier Cerón Uribe, egresado de Ingeniería Civil. Universidad Ricardo Palma. Asistente Técnico en estructuras en HOB Consultores S.A., ex Practicante de estructuras en el Ministerio Transportes y Comunicaciones del Perú. Coautor de ponencia Edificaciones con tapia apisonada reforzada con entramado de carizo (*Arundo donax L.*) TerraBrasil 2012. Miembro voluntario, ex Coordinador de alumnos del Centro de Estudios para Comunidades Saludables CECOS-BRIGURP.

Juan Carlos Miguel Ángel Gonzáles Lévano, alumno de Ingeniería Electrónica. Universidad Ricardo Palma. Miembro voluntario, Ex Coordinador de alumnos del Centro de Estudios para Comunidades Saludables CECOS-BRIGURP. Tesista ganador del concurso FINCYT proyecto Sistema electromecánico de simulación sísmica con movimiento reproducido mediante software basado en registros sísmicos del Perú para evaluar el comportamiento sismo-resistente de sistemas constructivos en general””.

María Teresa Méndez Landa, Doctora en Educación por la Universidad San Martín de Porres. Arquitecta por la Universidad Nacional de Ingeniería. Profesora Asociada en facultades de Arquitectura e Ingeniería de la Universidad Ricardo Palma, Lima-Perú. Coordinadora y directora de proyectos de investigación del Centro de Estudios para Comunidades Saludables y Jefe del Instituto de la Construcción de la Facultad de Ingeniería. Universidad Ricardo Palma. Directora de ponencias presentadas al TerraBrasil 2008, 2010 y 2012, SIACOT 2009, NOCMAT 2013, Ekotectura 20014 y TerraBrasil 2014.

# CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LAS UNIDADES DE ADOBE DEL COMPLEJO ARQUEOLÓGICO HUACA DE LA LUNA MEDIANTE ENsayos DE ULTRASONIDO

Rafael Aguilar<sup>1</sup>; Cristhian Saucedo<sup>2</sup>; Mijail Montesinos<sup>3</sup>; Eduardo Ramírez<sup>4</sup>; Ricardo Morales<sup>5</sup>;  
Santiago Uceda<sup>6</sup>

Departamento de Ingeniería, Sección Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica del Perú - PUCP  
<sup>1</sup>raguilar@pucp.pe; <sup>2</sup>cgsaucedo@pucp.pe; <sup>3</sup>mijail.montesinos@pucp.pe; <sup>4</sup>jeramirez@pucp.pe

Facultad de Ciencias Sociales, Universidad Nacional de Trujillo, Perú  
<sup>5</sup>rimoga07@yahoo.es; <sup>6</sup>santiago\_ucedo@hotmail.com

**Palabras clave:** Adobe, ultrasonido, ensayos no destructivos, tomografía, propiedades mecánicas.

## Resumen

El complejo arqueológico Huaca de la Luna es una construcción masiva de adobe construida entre los años 100 y 650 D.C. por la civilización Moche y actualmente es considerado como uno de los sitios arqueológicos más importantes del Perú. Dada su ubicación en la costa peruana, este complejo es vulnerable a los efectos de los sismos que se producen constantemente por la interacción entre las placas de Nazca y Sudamericana. Debido a los peligros a los que se encuentra expuesto, la conservación y protección de este monumento requiere un diagnóstico estructural exhaustivo. Esto implica una apropiada identificación de su condición actual, materiales y sistema estructural. El artículo presenta una metodología innovadora para determinar las características mecánicas del adobe mediante la aplicación de ensayos de ultrasonido complementados con ensayos de compresión simple. Mediante esta metodología se logró obtener satisfactoriamente el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson de unidades representativas del adobe de Huaca de la Luna. Se realizaron también ensayos de tomografía ultrasónica para evaluar cualitativamente la variabilidad de cada una de las unidades estudiadas. Los resultados de este estudio se usarán para posteriores análisis integrales de la seguridad sísmica del complejo y como una línea base para procesos posteriores de determinación in-situ del estado de daño del sistema de albañilería.

## INTRODUCCIÓN

La evaluación estructural de construcciones patrimoniales requiere de un estudio detallado de las propiedades mecánicas de los materiales que componen el sistema estructural. Caracterizar apropiadamente los materiales permite elaborar modelos numéricos representativos, realizar un diagnóstico apropiado y posteriormente plantear medidas de intervención para garantizar la integridad del patrimonio.

Una de las principales dificultades durante la etapa de estudio de construcciones patrimoniales es la obtención de muestras del material que las constituyen. Los principios establecidos en la carta de ICOMOS/ISCARSAH (2005) indican que debe evitarse la alteración de la edificación por lo que la aplicación de técnicas no-destructivas resulta de gran interés.

La presente investigación está centrada en Huaca de la Luna, el cual es un complejo arqueológico que se encuentra ubicado en la costa norte del Perú, a ocho kilómetros de la ciudad de Trujillo, y que fue construido entre los años 100 y 650 D.C. Este monumento fue uno de los templos más importantes de la cultura Moche y destaca por la técnica constructiva de superposición de templos en diferentes períodos (al menos cinco sucesivas etapas se encontraron durante el proceso de excavación). La Huaca tiene una base cuadrada de 87 metros de lado y una altura de 21 metros. En la Figura 1a se muestra la reconstrucción 3D hipotética de la Huaca en su etapa final y además se indican los sectores estudiados en esta investigación. Como se aprecia en la Figura 1b, los relieves en sus pinturas murales de cinco colores son los componentes artísticos más destacados (Uceda; Paredes, 1994).

El presente estudio tiene como objetivo determinar las propiedades mecánicas (resistencia y módulo de elasticidad) de las unidades de adobe del complejo arqueológico Huaca de la Luna. Este trabajo se integró con la campaña de excavación arqueológica que se viene realizando desde inicios de la década de los 90s y para esto se extrajo en 2014 un grupo de 80 adobes de la zona denominada como Templo Nuevo. Los adobes fueron recolectados de la parte media de esta construcción y después fueron trasladados cuidadosamente al laboratorio de estructuras de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Las Figura 2a y Figura 2b muestran el proceso de extracción y embalaje/transporte de los adobes. Cuatro unidades de este grupo fueron escogidas como representativas para determinar su densidad, contenido de humedad, resistencia a compresión y módulo de elasticidad. Adicionalmente se realizaron medidas de variabilidad dimensional y tomografías ultrasónicas para determinar la homogeneidad de todo el grupo de adobes.



Figura 1. Complejo arqueológico Huaca de la Luna: (a) esquema 3D; y (b) mural característico

## CARACTERIZACIÓN FÍSICA

### Ensayos realizados y material utilizado

El tipo de material predominante que conforma los adobes de Huaca corresponde a un suelo arenoso arcilloso que tiene 85% de arena y un 15% de finos (PHLL, 2008). Para complementar la caracterización física de los adobes de este complejo arqueológico se realizó un estudio de variabilidad dimensional, densidad y contenido de humedad.

Tal y como muestra la Figura 2c, los adobes de Huaca de la Luna presentan un geometría irregular. Para estudiar la variabilidad dimensional se realizó un proceso continuo de medida con cinta métrica en las 80 unidades de adobe. La medición se llevó a cabo por dos meses en laboratorio siendo las temperaturas máxima y mínima registradas de 28,3°C y 22,5°C, respectivamente. Por otro lado, para la determinación de la densidad y del contenido de humedad se seleccionaron cuatro adobes de donde se extrajeron 14 prismas regulares de aproximadamente 110 mm x 51 mm x 45 mm (ya previendo los ensayos posteriores de caracterización mecánica) con un proceso de corte manual, tal y como se muestra en la Figura 2d. La densidad de estos prismas se determinó siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM D7263 (2009), mientras que el contenido de humedad se realizó tomando en consideración la norma ASTM D4643 (2008).



Figura 2. Especímenes de adobe de la Huaca de la Luna (a) proceso de obtención (b) protección para el traslado (c) adobe típico; y (d) preparación de especímenes para los ensayos de caracterización

## Resultados y discusión

De la medición del tamaño del grupo total de 80 adobes se obtuvo que en promedio estos tienen un largo de 320 mm con un coeficiente de variación (CV) del 5,2% con un máximo y mínimo de 360 mm y 280 mm respectivamente, un ancho de 220 mm con un CV del 7,4% con un máximo y mínimo de 270 mm y 180 mm respectivamente y una altura de 120 mm con un CV del 11,9% con un máximo y mínimo de 150 mm y 75 mm respectivamente.

La densidad promedio encontrada fue de  $1750 \text{ kg/m}^3$  con un CV del 4% con un máximo y mínimo de  $1941 \text{ kg/m}^3$  y  $1664 \text{ kg/m}^3$  respectivamente. Estos valores son similares a los reportados en informes previos en los cuales se estudia la densidad de los adobes de los sectores conocidos como Frontis Norte, Plaza 2A, Plataforma III y Salas Hipóstilas, encontrándose valores de 1800, 1880, 1830 y  $1970 \text{ kg/m}^3$  respectivamente (PHLL, 2008).

Los valores calculados para el contenido de humedad están en el rango de 1,7% a 2,1% con un promedio de 1,9% y presentan un CV del 14%. Valores similares fueron reportados para los sectores Frontis Norte, Plaza 2A, Plataforma III y Salas Hipóstilas que muestran valores del contenido de humedad de 1,69%, 2,38%, 1,78% y 2,62%, respectivamente (PHLL, 2008).

## CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

### Ensayo de compresión uniaxial

Los ensayos de compresión permiten obtener curvas esfuerzo-deformación del material a partir de las cuales se calculan los parámetros mecánicos de resistencia y módulo de elasticidad. Los datos obtenidos son parte fundamental del diagnóstico de la estructura y

servirán como datos de entrada para la generación de modelos numéricos que ya se vienen implementando con el objetivo de predecir el comportamiento sísmico de la Huaca.

En la configuración de los ensayos de compresión se utilizaron las recomendaciones de la norma ASTM C469/C469M, (2014) y referencias a artículos científicos donde estudian materiales similares (Illampas; Charmpis; Ioannou, 2014; Piattoni; Quagliarini; Lenci, 2011; Adorni; Coisson; Ferretti, 2012; Silveira; Varum; Costa, 2012). Con esta base, se decidió cortar las unidades para obtener especímenes prismáticos regulares con dimensiones promedio de 110 mm x 51 mm x 45 mm. Para corregir imperfecciones en los prismas resultantes, se lijó las superficies para uniformizar y dar paralelismo a las caras que entrarían en contacto con el equipo de ensayo.

Para el ensayo, se utilizó un procedimiento de control de desplazamientos con la finalidad de registrar el comportamiento post pico del material (Vasconcelos, 2005). En la revisión de la literatura se encontraron diferentes criterios para definir la velocidad de aplicación de la carga. Por ejemplo, Silveira, Varum y Costa (2012) utilizan una tasa de deformación de 1,5 mm/min, mientras que Illampas, Charmpis y Ioannou (2014) realizan ensayos de compresión a una tasa de 4,5 mm/min. Por otro lado, Parisi et al (2015) utiliza una tasa de 0,6 mm/min en ensayos de compresión de especímenes cúbicos de adobe de 70 mm de lado. En base a los trabajos mencionados se determinó realizar el ensayo con una velocidad de desplazamiento de 0,5 mm/min.

Los especímenes se ensayaron empleando una máquina universal Zwick/Roell Z050 (<http://www.zwick.com>) donde las muestras se colocaron en contacto directo con la máquina. Para medir las deformaciones locales se utilizó un sistema de análisis de deformación óptico Aramis (GOM mbH, 2010). En la Figura 3a se muestra la configuración del ensayo y la forma de falla típica de uno de los especímenes ensayados.

### Ensayos de ultrasonido

El ensayo de ultrasonido es un método no destructivo que permite estimar las propiedades dinámicas de un material así como detectar la existencia de defectos internos. En este ensayo se genera una onda con un contenido de frecuencias mayor a 20 KHz empleando un transductor ultrasónico. La onda viaja a través del material y finalmente es detectada por un receptor como se muestra en la Figura 3b. La velocidad de propagación de la onda está en función al material que atraviesa y es por ello que este parámetro se puede relacionar con propiedades mecánicas como el módulo de elasticidad, densidad y módulo de Poisson (Krautkramer; Krautkramer, 1990).

Existen dos tipos de ondas mecánicas producidas por un pulso ultrasónico: ondas *P* y *S*. Las ondas *P*, u ondas de compresión longitudinal, son ondas que atraviesan el sólido desplazando las partículas del material a lo largo de la dirección de propagación de la onda. Las ondas *S*, son ondas de corte y desplazan a las partículas en forma perpendicular a la dirección de viaje de la onda. La velocidad de la onda *P* y *S* se calcula dividiendo la longitud de recorrido entre el tiempo que toma en llegar al receptor en el extremo opuesto, tal como se muestra en la ecuación (1).

$$V_{P,S} = \frac{L}{t_{P,S}} \quad (1)$$

En la ecuación (1)  $V_p$  y  $V_s$  representan la velocidad de propagación a través del material de la onda *P* y *S* expresados en [m/s]. La longitud de recorrido está representada por  $L$  en [m], mientras que  $t_p$  y  $t_s$  es el tiempo en [s] que demora en atravesar la onda el material. Complementariamente, las ecuaciones (2) y (3) consideran que las ondas *P* y *S* atraviesan un sólido elástico isotrópico y por lo tanto es posible establecer una relación de la velocidad con el módulo de elasticidad dinámico, densidad y módulo de Poisson (Krautkramer; Krautkramer, 1990). En estas ecuaciones el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) está expresado en [ $N/m^2$ ], la densidad ( $\rho$ ) en [ $kg/m^3$ ] y el módulo de Poisson ( $\nu$ ) es adimensional.

Finalmente, si  $V_p$  y  $V_s$  son conocidas, el módulo de Poisson se puede estimar con la ecuación (4).

$$V_p = \sqrt{\frac{E_d(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E_d}{\rho 2(1+\nu)}} \quad (3)$$

$$\frac{V_s}{V_p} = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}} \quad (4)$$



Figura 3. Adobe de Huaca de la Luna, ensayos de caracterización mecánica: (a) configuración del ensayo a compresión y falla típica en prisma sometido a compresión; y (b) procedimiento de ensayo de ultrasonido

La determinación adecuada y precisa del tiempo de propagación de las ondas es de gran importancia en el ensayo de ultrasonido. Sin embargo, cierto grado de incertidumbre es considerado sobre el momento exacto de llegada de la onda cuando se determina manualmente. Granja (2011) reporta que existen casos particulares donde es posible considerar diferentes estimaciones del tiempo de arribo de la onda  $S$  en la señal adquirida. Es por esto que el tiempo de propagación varía en función de la experiencia y conocimiento del operador pues la elección del punto exacto se lleva a cabo de manera subjetiva (Viana da Fonseca; Ferreira; Fahey, 2009).

Cuando se realizan ensayos de ultrasonido para la medición de la velocidad de ondas de corte, las ondas  $P$  generadas por los transductores de ondas  $S$  dificultan la determinación del tiempo de propagación. Este fenómeno se observa en la Figura 4a, siendo en todos los casos la onda  $P$  la primera en ser registrada incluso cuando se usaron transductores de corte. La identificación del tiempo de viaje de la onda  $S$  se determinó realizando un barrido manual de frecuencias que permitió distinguir la llegada de ambos tipos de ondas. Para esto, se asume que dentro del rango de frecuencias utilizadas en este método, el tiempo de viaje se mantiene independiente de la frecuencia de entrada aplicada (Viana da Fonseca et al, 2009). En la Figura 4a la línea punteada vertical a la derecha indica el tiempo de arribo de la onda  $S$  al transductor.

En el presente caso de estudio se realizaron ensayos de ultrasonido directo utilizando el equipo de medición PunditLab+. La frecuencia de muestreo a la cual se registraron las señales fue de 2 MHz con lo que se tiene una aproximación en el tiempo a 0,5  $\mu$ s. Se utilizaron transductores de 54 kHz para evaluar la velocidad de onda  $P$  y transductores de 250 kHz para registrar la onda  $S$ . Siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM C597 (2009) se utilizó gel acoplante para mejorar el registro.

La longitud de recorrido de la onda usada para los ensayos ultrasónicos fue aproximadamente de 110 mm (longitud del lado largo en los prismas ensayados). Aunque la norma ASTM D2845, (2008) presenta dimensiones mínimas para ensayos de roca, no existen recomendaciones para ensayos de tierra. En este sentido, diversas investigaciones recomiendan que la longitud mínima de recorrido debe ser dos veces la longitud de onda en el material (Santamarina; Klein; Fam, 2001; Leong; Yeo; Rahardjo, 2004), la cual está a su vez relacionada con la frecuencia y la velocidad de propagación por la siguiente expresión:

$$\lambda = \frac{V_{P,S}}{f} \quad (5)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda en [mm],  $f$  es la frecuencia en [kHz] y  $V_{P,S}$  es la velocidad de onda  $P$  o  $S$  en [m/s].

En ensayos preliminares en adobes de Huaca de la Luna se obtuvo una velocidad de onda  $P$  de 1300m/s utilizando una frecuencia de 54 kHz. Utilizando estos resultados y aplicando la ecuación (5), se determinó que la longitud de onda es aproximadamente 24 mm por lo que la longitud mínima de ensayo sería de 48 mm. Este resultado valida los resultados de estos ensayos en los prismas de 110 mm.

Cuando se calculan las velocidades en diversos puntos del elemento en estudio gráficos en 2D o 3D (dependiendo de si se realizan ensayos directos o indirectos) denominados tomografías ultrasónicas. Una tomografía es una herramienta que reproduce la estructura interna de un elemento a partir de mediciones recogidas en su superficie externa (Binda; Saisi; Tiraboschi, 2000). Los resultados de una tomografía pueden ser presentados como mapas de velocidades que están asociadas a la heterogeneidad del material o la presencia de grietas y defectos.

Para el caso de este estudio, se realizaron ensayos con fines de tomografía en el grupo total de 80 adobes disponibles en laboratorio. Debido a la variabilidad de las dimensiones de los adobes, se utilizaron 3 tipos de mallas para realizar los ensayos: tipo 1 (65 mm x 60 mm), tipo 2 (60 mm x 50 mm) y tipo 3 (60 mm x 60 mm) siendo los valores en paréntesis el espaciamiento entre puntos en dirección X y Y respectivamente (ver Figura 4b). En las mallas tipo 1 y 2 se graficaron 5 y 4 puntos en dirección X y Y, respectivamente, mientras que en la malla tipo 3 fueron necesarios 5 y 3 puntos para cada eje. La Figura 4c muestra el procedimiento de ensayo en cada punto.

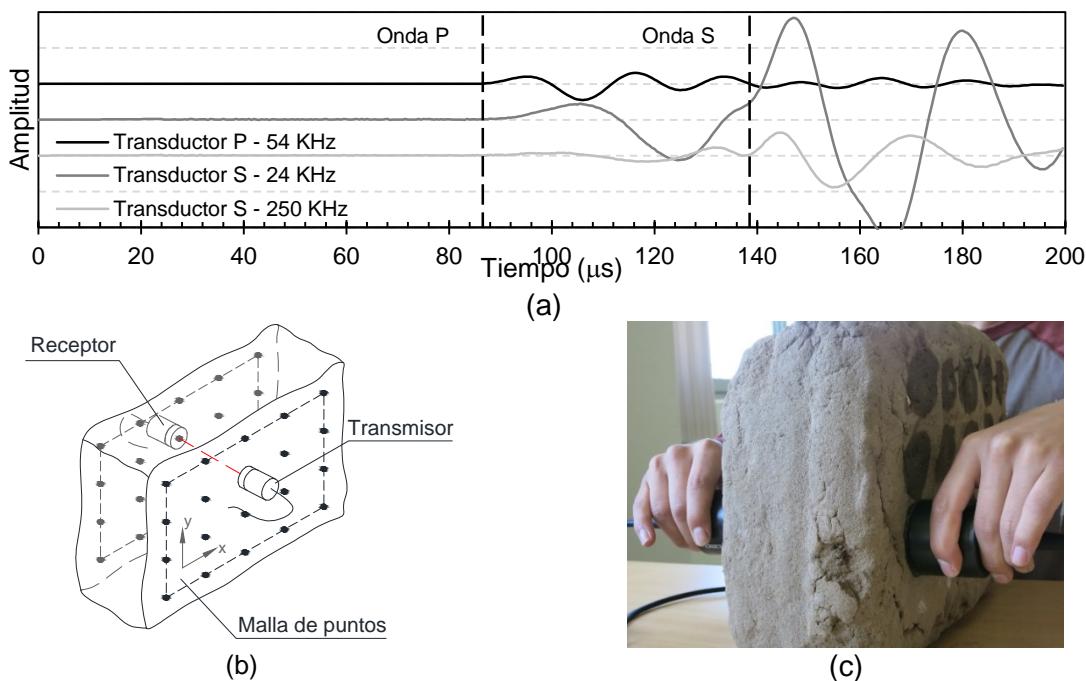


Figura 4. Ensayos de ultrasonido (a) Resultados de onda P para 54 kHz y onda S para 24 kHz y 250 kHz (b) configuración de ensayo de tomografía ultrasónica(c) Toma de datos para la tomografía

## Resultados y discusión

### a) Ensayos de compresión uniaxial

De los ensayos realizados se construyeron las curvas esfuerzo-deformación a partir de los cuales se pudieron obtener parámetros mecánicos como la resistencia a compresión y módulo de elasticidad. En la Tabla 1 se muestran los resultados correspondientes al presente estudio. Como se muestra, la resistencia promedio a compresión obtenida fue de 1,28 MPa con un CV del 18%. Este valor de resistencia es coincidentemente similar al obtenido por Adorni, Coisson y Ferretti (2012) quien obtiene un valor aproximado de 1,04 MPa en adobes de una antigüedad de 2000 años del centro arqueológico de Nisa Partica en Turkmenistán. Asimismo, los resultados coinciden con el estudio realizado por Silveira, Varum y Costa (2012) en adobes de mediados del siglo XX de la ciudad de Aveiro en Portugal, quien determinó una resistencia a la compresión de 1,18 MPa. Los resultados también coinciden con informes internos del grupo de trabajo de Huaca de la Luna (PHLL, 2008, 2010) que reportan resistencias parecidas en adobes del Frontis Norte los cuales muestran una resistencia de 1,15 MPa. Sin embargo no concuerdan con el promedio hallado, el cual proporciona un valor de resistencia de 0,63 MPa. Este es un indicador de la heterogeneidad del material que constituye la Huaca.

El módulo de elasticidad secante ( $E_{\text{Secante}}$ ) se estimó haciendo uso del criterio propuesto por Silveira, Varum y Costa (2012) que establece que es igual a la pendiente de la recta trazada desde el origen al tercio de la resistencia máxima a compresión. El  $E_{\text{Secante}}$  promedio obtenido en este estudio fue de 901 MPa con un CV del 43%. El estudio de este parámetro en otras investigaciones de adobe reporta CV similares (ej. Almeida, 2012).

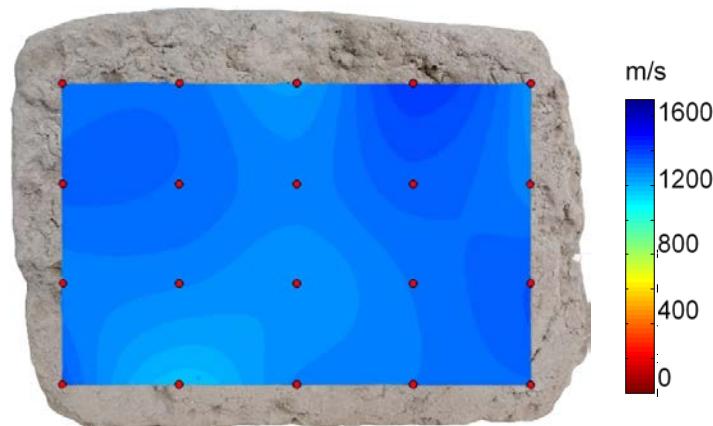
### b) Ensayos de ultrasonido

El resumen de los resultados de los ensayos de ultrasonido se presenta también en la Tabla 1. Como se ve, la velocidad promedio de la onda  $P$  tiene un valor de 1350 m/s con un CV de 3,5% con valores mínimos y máximos de 1270 m/s a 1450 m/s, respectivamente. Por otro lado, la velocidad de onda  $S$  promedio fue de 850 m/s con un CV de 5,6%, en este caso la velocidad mínima fue de 750 m/s y la máxima de 950 m/s. Los bajos coeficientes de variación obtenidos confirman la robustez del método. Haciendo uso de la ecuación (4) se calculó el módulo de Poisson para cada una de las muestras. En este caso, el valor promedio hallado fue de 0,16 con un CV de 22%. Además, haciendo uso de la ecuación (2) y el valor de densidad promedio de 1750 kg/m<sup>3</sup>, se calculó que  $E_{\text{dinámico}}$  promedio es de 2960 MPa con un CV de 9%.

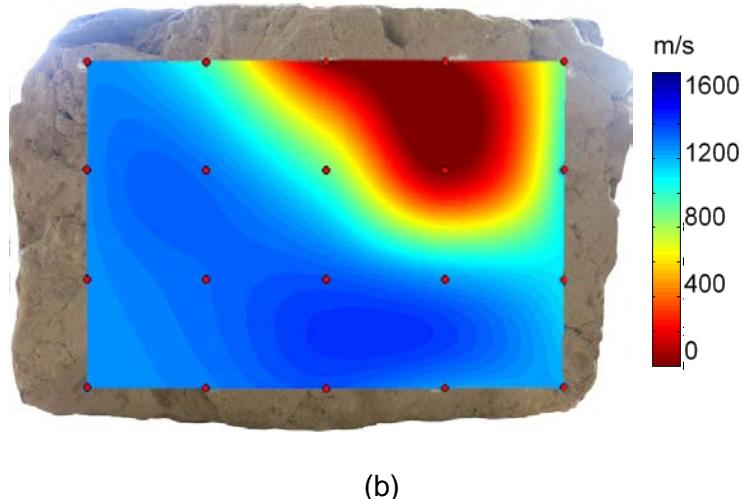
Por otro lado, los ensayos directos de ultrasonido en las caras de las unidades de adobe permitieron generar imágenes 2D de velocidades. En la Figura 5 se muestran los resultados de dos unidades, la primera representativa de la mayoría de especímenes ensayados y la segunda representativa de un espécimen con problemas de heterogeneidad. La Figura 5a representa a un adobe con velocidades de onda  $P$  que varían entre 1250 m/s y 1350 m/s. La imagen indica que el adobe es homogéneo y que posiblemente se encuentra en buen estado ya que no presenta diferencias significativas de velocidades. Por otro lado, en la Figura 5b se observa un cambio notable en la parte superior derecha del adobe. Este cambio indica que en dicha zona existen defectos internos que provocan una atenuación de la velocidad de onda. Este tipo de información evidenciaría la existencia de un daño parcial en esta región de la unidad. Los resultados de estos ensayos muestran que, a excepción del adobe que se muestra en la Figura 5b, la velocidad máxima registrada fue igual a 1650 m/s y la velocidad mínima fue 900 m/s. Las velocidades más comunes registradas en los puntos ensayados en todos los adobes estuvieron en el rango de 1300 m/s a 1400 m/s. Se determinó que un 25% de los adobes tienen valores promedio de velocidad de entre 1000 m/s y 1200 m/s, el 66% varía entre 1200 - 1400 m/s y solo el 10% presenta velocidades mayores a 1400 m/s.

Tabla 1. Resumen de las propiedades mecánicas de los adobes ensayados de Huaca de la Luna

Unidad	Espécimen	Dimension mm <sup>3</sup>	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$E_{\text{Secante}}$ (MPa)	$V_p$ (m/s)	$V_s$ (m/s)	$E_{\text{Dinámico}}$ (MPa)	$\nu$
Adobe 1	1-3	90x50x41	1,57	915	1364	903	3167	0,11
	1-4	98x47x42	1,08	697	1384	916	3261	0,11
	1-5	99x45x42	1,30	453	1443	952	3536	0,11
	Promedio		1,32	688	1397	924	3321	0,11
Adobe 2	2-1	102x50x50	0,93	398	1272	816	2680	0,15
	2-2	109x49x46	1,00	857	1296	836	2797	0,14
	2-3	109x49x48	1,27	860	1312	857	2898	0,13
	2-4	108x49x42	1,07	958	1273	746	2411	0,24
	2-6	109x47x44	1,41	433	1330	814	2783	0,20
	Promedio		1,14	701	1296	814	2714	0,17
Adobe 3	3-3	112x48x46	0,98	1299	1371	857	3032	0,18
	3-5	110x50x46	1,24	1399	1361	891	3126	0,12
	3-7	111x46x46	1,50	1009	1345	856	2972	0,16
	Promedio		1,24	1236	1359	868	3043	0,15
Adobe 4	4-2	109x63x49	1,58	871	1370	802	2788	0,24
	4-3	110x64x49	1,46	1782	1344	845	2931	0,17
	4-4	110x65x49	1,52	684	1386	872	3121	0,17
	Promedio		1,52	1112	1367	840	2947	0,19
Promedio		104x51x45	1,28	901	1346	854	2965	0,16
Desviación estándar			0,23	389	47	52	277	0,04
CV (%)			18%	43%	4%	6%	9%	22%



(a)



(b)

Figura 5. Tomografías ultrasónicas (a) Unidad de adobe con velocidades típicas (b) Adobe con características heterogéneas

## CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El presente trabajo muestra la caracterización mecánica de unidades de adobe de un sector del complejo arqueológico Huaca de la Luna con el uso complementario de técnicas tradicionales de carácter destructivo e innovadoras de carácter no-destructivo. Se desarrollaron satisfactoriamente ensayos de compresión uniaxial controlados por desplazamiento que fueron complementados con medidas de un sistema de video-correlación lo cual permitió caracterizar el comportamiento mecánico del material incluso después de alcanzar el rango no lineal. Se desarrollaron también ensayos de ultrasonido que permitieron caracterizar cuantitativamente el comportamiento dinámico y que sirvieron también para un análisis cualitativo de homogeneidad de las unidades de adobe.

Los resultados del módulo de elasticidad dinámico obtenidos a través del ensayo de ultrasonido muestran que existe una relación de alrededor de 3,3 veces en relación a los resultados estáticos obtenidos con los ensayos de compresión uniaxial. Además, se evidencia una pequeña variabilidad de los primeros ensayos de alrededor de 10% lo cual indica la confiabilidad y repetitividad del método y abre las puertas para futuras aplicaciones incluso para verificación in-situ.

El trabajo futuro debe estar orientado a la caracterización sistemática de los diferentes sectores de la Huaca de modo que se pueda obtener un diagnóstico completo del complejo arqueológico. Es importante además integrar los resultados de este estudio con los de caracterización de morteros y los de caracterización del sistema de albañilería completo. Además, en el campo de ensayos de ultrasonido, es importante explorar las técnicas de ensayos indirectos lo cual permitirá evaluar incluso elementos y subsistemas estructurales tales como muros, columnas y pilares.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adorni, E.; Coisson, E.; Ferretti, D. (2012). In situ characterization of archaeological adobe bricks. *Construction and Building Materials*, 40, 1-9.
- Almeida, J. (2012). Mechanical characterization of traditional adobe masonry elements (M.Sc. thesis ed.). Guimarães. University of Minho.
- ASTM C469/C469M. (2014). Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression.
- ASTM C597. (2009). Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concret.
- ASTM D2845. (2008). Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock.

- ASTM D4643. (2008). Standard test method for determination of water (moisture) content of soil by microwave oven heating.
- ASTM D7263. (2009). Standard test method for laboratory determination of density.
- Binda, L.; Saisi, A.; Tiraboschi, C. (2000). Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries. *Construction and Building Materials*, 199-233.
- GOM mbH (2010). ARAMIS User Information Hardware, Braunschweig, Germany
- Granja, J. (2011). Experimental evaluation of the elastic modulus of cementitious materials at early ages. University of Minho: MSc Thesis. <http://www.zwick.com/en/products/static-materials-testing-machines/testing-machines-from-5-kn-to-250-kn/proline-testing-machine.html>
- ICOMOS/ISCARSAH Committee. (2005). Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage. Disponible en <http://www.icomos.org>. Acceso en 08/05/2015
- Illampas, R.; Charmpis, D.; Ioannou, I. (2014). Laboratory testing and finite element simulation of the structural response of an adobe masonry building under horizontal loading. *Engineering Structures*, 80, 362-376.
- Krautkramer, H.; Krautkramer, J. (1990). Ultrasonic testing of materials. Berlin: Springer Verlag.
- Leong, E.-C.; Yeo, S.-H.; Rahardjo, H. (2004). Measurement of wave velocities and attenuation using an ultrasonic test system. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(5), 844-860.
- Parisi, F.; Asprone, D.; Fenu, L.; Prota, A. (2015). Experimental characterization of Italian composite adobe bricks reinforced with straw fibers. *Composite Structures*, 300-307.
- Piattoni, Q.; Quagliarini, E.; Lenci, S. (2011). Experimental analysis and modelling of the mechanical behavior of earthen bricks. *Construction and Building Materials*, 2067-2075.
- Proyecto Arqueológico Huaca de la Luna. (2008). Informe técnico. Universidad Nacional de Trujillo: Facultad de Ciencias Sociales.
- Proyecto Arqueológico Huaca de la Luna. (2009). Informe técnico. Universidad Nacional de Trujillo: Facultad de Ciencias Sociales.
- Proyecto arqueológico Huaca de la Luna. (2010). Informe técnico. Universidad Nacional de Trujillo: Facultad de Ciencias Sociales.
- Santamarina, J.; Klein, A.; Fam, M. (2001). Soils and waves: Particulate materials behavior, characterization and process monitoring. *Journal of Soils and Sediments*, 1, 130.
- Silveira, D.; Varum, H.; Costa, A. (2012). Influence of the testing procedures in the mechanical characterization of adobe bricks. *Construction and Building Materials*, 40, 719-728.
- Uceda, S.; Paredes, A. (1994). Arquitectura y función de la Huaca de la Luna. *Revista Cultural des Indes*, 42-46.
- Vasconcelos, G. (2005). Experimental investigations on the mechanics of stone masonry: characterization of granites and behavior of ancient masonry shear walls (PhD. Thesis ed.). Portugal: University of Minho.
- Viana da Fonseca, A.; Ferreira, C.; Fahey, M. (2009). A framework interpretig bender element tests, combining time-domain and frequency-domain methods. *Geotechnical Testing Journal*, 1-17.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección de Gestión de la Investigación DGI PUCP por el financiamiento del proyecto de investigación 89-2014 dentro del cual se enmarca este trabajo. Se agradece también a CONCYTEC por el financiamiento de los alumnos de maestría (segundo, tercer y cuarto autor) a través de su programa de becas para estudios de posgrado. Finalmente, se agradece al Laboratorio de Estructuras y al Laboratorio de Materiales de la PUCP por la disponibilidad de sus instalaciones y equipos.

## AUTORES

Rafael Aguilar es Doctor en Ingeniería Civil y profesor asociado del Departamento de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú - PUCP. El profesor Aguilar dirige el grupo de investigación

de monitoreo e instrumentación de construcciones históricas - Engineering & Heritage – en la PUCP cuyas áreas principales de investigación son el diagnóstico y conservación del patrimonio histórico con tecnologías modernas, análisis estructural avanzado de edificaciones existentes y monitoreo de estructuras.

Cristhian Saucedo, Mijail Montesinos y Eduardo Ramírez son estudiantes de la Maestría en Ingeniería Civil de la PUCP y miembros del grupo de investigación Engineering & Heritage.

Ricardo Morales es docente de la Facultad de Ciencias Sociales de la Universidad Nacional de Trujillo (UNT). Con estudio de maestría y doctorado con mención en Ciencias Ambientales en la UNT. En la actualidad trabaja en programas de conservación y puesta en valor del complejo arqueológico huacas del Sol y de la Luna (Huacas de Moche).

Santiago Uceda es docente del Departamento de Arqueología y Antropología de la Universidad Nacional de Trujillo. Con estudios de doctorado en Francia. En la actualidad trabaja sobre la sociedad Mochica, en los temas de urbanismo y arquitectura pública y doméstica. Adicionalmente trabaja en programas de conservación y puesta en valor del complejo arqueológico huacas del Sol y de la Luna (Huacas de Moche).

## REFUERZOS Y PROTECCIONES SUPERFICIALES SOSTENIBLES PARA BÓVEDAS DE ADOBE RECARGADO EN MÉXICO

Ramón Aguirre<sup>1</sup>; Luis Fernando Guerrero<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Arcilla y Arquitectura, Oaxaca, México, aguirre30@msn.com

<sup>2</sup>Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco, México, luisfg1960@yahoo.es

**Palabras clave:** bóvedas recargadas, esfuerzos mecánicos, deterioro, protección superficial, cal

### Resumen

Las bóvedas vaídas realizadas con la técnica de adobe recargado tienen un alto potencial de desarrollo dado su bajo impacto ambiental y facilidad de construcción. Su diseño se deriva de las bóvedas de ladrillo a las que se conoce popularmente como “de cuña” o “del Bajío” y se han realizado de manera tradicional en el centro de México por lo menos durante los últimos dos siglos. Sin embargo, el diseño de los componentes de apoyo requeridos por la forma de sus empujes, así como sus materiales de revoque exterior cuando se utilizan como techo, resultan cruciales para garantizar su estabilidad y duración. En este texto se analizan alternativas de bajo impacto ambiental destinadas al soporte estructural y protección superficial de bóvedas vaídas que fueron hechas con la técnica de adobe recargado en varios sitios de México. El estudio se realiza a partir de la evaluación del procedimiento y resultados de la implementación de estructuras de confinamiento edificadas con “cob”, fibras vegetales y bambúreas, en combinación con componentes de tierra estabilizada con cal. Los casos analizados se construyeron en regiones de clima seco de México, aprovechando los recursos materiales locales y la ejecución se desarrolló en talleres de transferencia de tecnología.

### 1 INTRODUCCIÓN

La construcción de bóvedas en México tuvo su origen en la época virreinal pues en el mundo prehispánico era desconocida su técnica de elaboración. En la zona maya es posible encontrar estructuras cuyos entrepisos y cubiertas fueron realizados con un sistema al que se ha denominado “bóveda falsa” en el que mediante la colocación escalonada de materiales pétreos en saledizo, se lograban cubrir espacios angostos. Sin embargo, se trata de un sistema constructivo que no cumple con las condiciones de reparto radial de cargas y generación de empujes laterales que caracterizan a las bóvedas y cúpulas occidentales.

Después de la conquista española durante el siglo XVI en México se construyeron relativamente pocas bóvedas como consecuencia tanto de la falta de experiencia de la mano de obra local en la ejecución de estas estructuras, como de las condiciones sísmicas que se presentan en la mayor parte del territorio y que eran mucho más intensas que las que conocían los constructores europeos.

Un caso digno de atención es la fuente de Chiapa de Corzo, en Chiapas que sorprende por la temprana época de su construcción, la calidad de su factura y, sobre todo, la sismicidad de su localización, a pesar de la cual se preserva en sorprendentes condiciones de integridad.

El auge de la construcción de sistemas abovedados despuntó hacia el siglo XVII y posteriormente, en concordancia con el estilo barroco, se realizaron cubiertas de mayor complejidad en su trazo y con un desarrollo estructural más audaz (De la Maza, 1985).

En ese contexto se empezó a generar en diferentes localidades de la zona centro-norte del país, a la cual que se lo conoce como la región de “El Bajío”, una técnica popular de elaboración de bóvedas a partir del uso de pequeños ladrillos de dimensiones aproximadas de 20 cm x 10 cm x 5 cm llamados “cuñas”. Gracias al ingenioso acomodo de estas piezas (Ramírez, 2004) y a su proceso radial de edificación, fue posible cubrir espacios bastante amplios en tiempos relativamente cortos y empleando poca mano de obra.

Como la región posee un clima templado y seco, la madera es escasa y por lo tanto cara, por lo que los constructores buscaron la forma de evitar el uso de vigas que eran el medio más común para elaborar entrepisos y techos de duela y terrados.

Además, se implementó un procedimiento que permitiera dar forma al sistema constructivo sin requerir el empleo de una cercha o cimbra de apoyo para los ladrillos, de manera que la longitud del brazo del bovedero servía como guía y compás para su trazo. El mortero de liga se aplicaba con exceso de humedad pero los mampuestos se colocaban en seco a fin de poderse fijar en pocos segundos sin requerirse de ningún apoyo (Ver Figura 1).

Así surgió el sistema de bóvedas de ladrillos “recargados” en el que, bajo la lógica de toda mampostería, se levantan hiladas con unidades traslapadas, pero con la inclinación necesaria para generar una superficie curva capaz de dispersar las componentes de las fuerzas de carga gravitatoria.



Figura 1. Trazo de las hiladas de las bóvedas de adobes recargados (Foto: L. Guerrero, 2015).

La geometría de estas bóvedas es muy apropiada porque al ser poco peraltadas, se optimiza al máximo el aprovechamiento de la resistencia a la compresión de cada componente constructivo. Además, como las “cuñas” inicialmente se colocan sobre su área de imposta con una inclinación aproximada 45°, los esfuerzos se transmiten de manera continua hacia las estructuras sobre las que descansan y también con respecto a las piezas que se conectan a lo largo de las directrices y generatrices. Esta condición, por la que se le da el nombre de “bóveda de ladrillos recargados”, le confiere una gran estabilidad al sistema porque las cargas se dispersan en todos sentidos (Ramírez, 2002).

En años recientes se empezaron a realizar de manera experimental algunas bóvedas recargadas substituyendo el uso de cuñas de ladrillo cerámico, por las mismas piezas pero sin cocer, es decir, empleándolas como adobes de pequeñas dimensiones. Asimismo, el mortero que se emplea para las bóvedas convencionales de ladrillo y que se realiza con cal, cemento y arena, se adecuó para contener simplemente tierra con un poco de cal, (Aguirre, 2007) a fin de poder generar un sistema prácticamente monolítico y por lo tanto más estable.

Esta aportación abrió una nueva tendencia en el desarrollo de este tipo de bóvedas y en diversos talleres realizados en varios países, se implementaron soluciones a partir de la experimentación de mampuestos de tierra usados como alternativa a las “cuñas” mexicanas. Se han construido bóvedas con bloques de tierra comprimida (BTC) de diferentes perfiles y texturas o bien, con adobes tradicionales pero de dimensiones menores a las que se usan en muros, a fin de facilitar su manejo y adherencia durante el proceso constructivo.

Las bóvedas de adobes recargados evidentemente representan una solución sumamente viable desde la perspectiva de la sostenibilidad por el bajo impacto ambiental del sistema al no emplear mampuestos horneados, además de ser más económicos y notablemente fáciles de realizar, lo que permite el desarrollo de la autoconstrucción asistida para su empleo en vivienda o espacios comunitarios (Figura 2).



Figura 2. Cierre de una bóveda de adobe y mortero de barro con cal (Foto: L. Guerrero, 2015).

## 2 REFUERZOS ESTRUCTURALES SOSTENIBLES

Pero la geometría curva de estos componentes estructurales, genera empujes radiales sobre los elementos portantes perimetrales, a los que se les denominan fuerzas de “coceo”. Es por eso que históricamente las bóvedas de ladrillos recargados se han construido sobre muros muy anchos, cuya masa absorbe los esfuerzos. Otro recurso empleado en edificios tradicionales de menores dimensiones ha sido la inserción de soleras de arrioste perimetral realizadas con vigas o tablones que servían para conectar las coronas de muros de diferentes longitudes. Finalmente, para bóvedas muy peraltadas los muros tenían que ser reforzados adicionalmente mediante machones o contrafuertes.

Durante la evolución que tuvo esta tecnología constructiva a lo largo del siglo XX este requerimiento estructural se resolvió mediante la integración de refuerzos en forma de anillo de concreto armado que remataban los muros y que transforman los esfuerzos de coceo en componentes de carga axial que permiten disminuir el espesor de los muros. Existen muy diversos ejemplos realizados durante la segunda mitad del siglo XX y lo que va del presente, en edificios de diferentes dimensiones y grados de complejidad, en los que las bóvedas han probado su eficacia y economía, con respecto a entrepisos y cubiertas de concreto armado (Aguirre; Guerrero, 2011).

Estas soleras perimetrales funcionan muy bien en edificios que cuentan con muros de piedra, ladrillo cerámico o incluso block de cemento. Sin embargo, si los apoyos son de adobe o tapia pueden llegar presentar problemas estructurales por la elevada discrepancia entre sus coeficientes relativos de contracción y dilatación térmica, pero sobre todo, por las diferencias de resistencia a la compresión y flexión que se vuelven críticas en condiciones dinámicas como las que caracterizan a los sismos.

Por otra parte, para evitar el posible fisuramiento del delgado perfil de las bóvedas, el cual resulta vulnerable ante posibles asentamientos diferenciales, cambios de temperatura, vibraciones cotidianas y sobre todo, movimientos telúricos, convencionalmente se ha acostumbrado colocarles en su extradós una malla metálica electrosoldada que se recubre con concreto (Aguirre, 2004).

Lógicamente, estos refuerzos que incluyen materiales como el acero y el cemento cuya fabricación es tan demandante de energía y que además genera tantos contaminantes a la tierra, aire y agua, restan sostenibilidad a un sistema tan eficiente como el de las bóvedas de adobe cuyo impacto ambiental podría considerarse cercano a cero.

Adicionalmente, el precio de la colocación de estos componentes de hormigón armado disminuye la rentabilidad del sistema, y lo vuelve inoperante en sitios rurales remotos en los que la mayor parte de las veces no se tiene acceso a materiales industrializados.

No obstante, el sistema de las bóvedas de cuña aún con estos materiales, resulta significativamente menos impactante y costoso que los entrepisos o techos de hormigón

armado que lamentablemente se emplean en la mayor parte de la construcción convencional de todo el país. (Aguirre; Guerrero, 2011).

Por esta razón, con el fin de realizar una disminución todavía mayor en el impacto al medio ambiente, el consumo de energía y el costo, se ha puesto en práctica la implementación de una serie de mecanismos que permitan substituir el empleo de los componentes estructurales de concreto armado tanto en el anillo perimetral como en la capa superior de las bóvedas de adobe recargado.

A partir de los exitosos resultados del diseño de *domocañas* en Perú, Honduras y Colombia, así como de los innumerables ejemplos de edificios de pacas de paja y de cob en la bioconstrucción, se tomó la decisión de substituir al concreto por mezclas de tierra arcillosa y al acero de refuerzo, por fibras vegetales y tallos de bambúceas que también resultan resistentes a la flexión y tracción (Figura 3).



Figura 3. Anillo de refuerzo realizado con carizos, haces de paja bañada en tierra arcillosa y cob  
(Foto: L. Guerrero, 2013).

El sistema superficial de control de fisuración se puede realizar simplemente mediante la colocación de capas sobrepuertas alternadas de pajas largas sobre revoques de tierra arcillosa (Figura 4). Es necesario cuidar que se repartan las fibras de manera que formen una especie de entramado en varios sentidos con lo que se garantiza la flexibilidad del sistema.



Figura 4. Capas sucesivas y alternadas de paja colocada sobre revoques frescos de tierra arcillosa.  
(Foto: L. Guerrero, 2013).

### 3 PROTECCIONES SUPERFICIALES

Finalmente, un componente clave del éxito de las bóvedas vaídas de adobes recargados que se emplean como techo, incluso las que se construyen en zonas de bajos regímenes pluviales, es su sistema de impermeabilización.

En áreas urbanas o periurbanas existe una tendencia a colocar sobre los techos capas de morteros de cemento y a emplear sistemas comerciales de impermeabilización normalmente consistentes en la aplicación de emulsiones bituminosas sobre textiles poliméricos. Estos sistemas que, al igual que las estructuras de concreto resultan caros y generan una profunda huella ecológica, tienen una duración limitada. Incluso hay fabricantes que no garantizan su permanencia por más de tres años. Además tienen la enorme desventaja de que encapsulan la humedad en su interior y si llega a presentarse alguna infiltración por pequeña que sea, el sistema se empieza a degradar a gran velocidad, efecto especialmente grave en estructuras realizadas con tierra.

Es por eso que la recuperación de la tradición ancestral del empleo de revoques realizados con morteros de cal y arena se convierte en una destacada alternativa para este tipo de sistemas (Ver Figura 5). Como se sabe, estos recubrimientos presentan una porosidad muy adecuada para impedir el flujo del agua en estado líquido pero permiten su evaporación por lo que son plenamente compatibles con las necesidades de “transpiración y respiración” de los componentes de tierra.



Figura 5. Acabado final con un revoque de cal y arena. (Foto: L. Guerrero, 2015).

Para zonas geográficas con mayor pluviosidad es posible mejorar el sistema colocando protecciones superficiales realizadas con capas sucesivas y alternadas de jabón y alumbre en disolución.

Asimismo, se le puede dar un tratamiento final a las superficies mediante un enlucido fino de cal y arena mezclada con materiales puzolánicos (Guerrero; Soria, 2014) como puede ser el polvo de ladrillo que se pule o bruñe con ayuda de una piedra lisa y dura o simplemente con una botella de vidrio (Ver Figura 6).



Figura 6. Pulido del enlucido de cal, arena y polvo de ladrillo. (Foto: L. Guerrero, 2015).

#### 4 CONSIDERACIONES FINALES

Los resultados derivados de la implementación de materiales naturales como refuerzo y protección de bóvedas de adobe recargado han sido muy alentadores porque han permitido demostrar que es posible eliminar por completo el uso de cemento y acero de refuerzo con lo que se logra una notable disminución en los gastos, el impacto ambiental y la dependencia de materiales ajenos a las localidades.

Las protecciones superficiales materializadas con la combinación de tierra estabilizada con cal y puzolanas, e impermeabilizadas con jabón y alumbre, ayudan a mitigar los efectos

climáticos de estos componentes, prolongando su duración y reduciendo notablemente las acciones de mantenimiento preventivo.

Se trata en ambos casos de sistemas plenamente sostenibles porque permiten que los usuarios participen en su realización sin tener que recurrir a tecnologías o materiales sofisticados. Son métodos fácilmente apropiables por las comunidades, especialmente las de origen rural como se ha podido comprobar a partir del desarrollo de talleres de transferencia de tecnología en los que se han puesto en práctica durante el último año en diferentes sitios de México e incluso fuera del país.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, R. (2004). Bóvedas autoportantes. En Memorias del IV Congreso Desarrollo Local en Municipios de Ecosistemas Frágiles, Santiago de Cuba. CD-ROM
- Aguirre, R. (2007). Bóvedas mexicanas. En: Anuario de Investigación de Construcción con Tierra y del Diseño Sustentable. Tampico: Universidad Autónoma de Tamaulipas. p. 171-177.
- Aguirre, R.; Guerrero, L. (2011). Las bóvedas de cuña. Una tradición con futuro. En: La Gaceta del Instituto del Patrimonio Cultural, n. 19. Oaxaca: Instituto del Patrimonio Cultural. p. 5-11.
- De la Maza, F. (1985). La ciudad de México en el siglo XVII. México: FCE
- Guerrero, L.; Soria, F.J. (2014) Estabilización de suelos con cal y puzolanas. En: Construcción con tierra, n. 6, Buenos Aires Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de Buenos Aires. p. 15-24.
- Ramírez, A. (2002). Bóvedas de suspiro y barro. En: Revista Bitácora, n. 7, México D.F.: Facultad de Arquitectura de la UNAM.
- Ramírez, A. (2004). Arquitectura propia. Cubiertas de ladrillo recargado. Portal Vitruvius. Abril, Disponible en [http://www.vitruvius.com.br/arquitextos/arq047/arq047\\_03\\_e.asp](http://www.vitruvius.com.br/arquitextos/arq047/arq047_03_e.asp) consultado el 20/5/2014.

## AUTORES

Ramón Aguirre Morales, Arquitecto por la UNAM, Catedrático de la Universidad Autónoma “Benito Juárez” de Oaxaca sobre seminario de tesis y Geometría Descriptiva. Su investigación y práctica se ha centrado en el diseño de Bóvedas Mexicanas de adobe y ladrillo asociado a sistemas constructivos regionales. Miembro de la Red Iberoamericana PROTERRA. Ha impartido cursos en Argentina, Brasil, Colombia, Cuba, España, Francia, Guatemala, México, Paraguay, Perú, Uruguay, Venezuela. Actualmente es director de diseño de la firma “Arcilla y Arquitectura”.

Luis Fernando Guerrero Baca, doctor en diseño con especialidad en conservación del patrimonio edificado, maestro en restauración, arquitecto, profesor investigador de tiempo completo en la UAM-Xochimilco. Jefe del área de Conservación y Reutilización del Patrimonio Edificado. Miembro de la Red Iberoamericana PROTERRA, miembro de la Cátedra UNESCO “Arquitecturas de tierra, culturas constructivas y desarrollo sostenible”.

## CULTURAS CONSTRUCTIVAS DE TIERRA EN MONFORTE DE LEMOS, GALICIA, ESPAÑA

Laura Álvarez-Testa Sánchez<sup>1</sup>; Mariana Correia<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ESG - Escola Superior Gallaecia - Portugal, España, lauratesta@hotmail.es

<sup>2</sup> ESG – Escola Superior Gallaecia – Portugal, Portugal, marianacorreia@esg.pt

**Palabras clave:** Culturas constructivas, patrimonio urbano, inventario de construcciones de tierra.

### Resumen

En Galicia, noroeste de España, predomina la construcción en piedra, aunque haya un gran número de patrimonio de tierra poco conocido, en áreas sedimentarias, como es el caso de Monforte de Lemos. Existe un vacío en el conocimiento sobre las culturas constructivas en tierra en Galicia, por parte de investigadores, constructores y agentes técnicos locales, teniendo como consecuencia directa la pérdida de información del patrimonio tangible. Por este motivo, la investigación se basó en la realización de un inventario de las construcciones en tierra en el patrimonio urbano de Monforte, y en el estudio de las culturas constructivas locales. El profundo estudio del patrimonio urbano de Monforte de Lemos, posibilitó localizar y inventariar doscientas edificaciones construidas con tierra y seleccionar y analizar en mayor profundidad, nueve casos de estudio. Como resultado, se constató la existencia de una tipología con pocas variantes espaciales, pero con diversas culturas constructivas en tapia. Se observa en la tapia, la presencia de cantos rodados, elementos horizontales de madera a lo largo del muro perimetral, así como láminas de pizarra. En definitiva, el estudio ha contribuido a esclarecer, la existencia de un patrimonio urbano de tierra en Monforte de Lemos y comprender la tipología espacial, los materiales y los sistemas constructivos de las edificaciones de tierra.

### 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el patrimonio de tierra existente en Galicia, España, se encuentra en avanzado estado de deterioro a lo que se suma un vacío de conocimiento asociado a la falta de documentación y/o catalogación de dicho patrimonio. En consecuencia se tiene una población que desconoce la existencia de arquitectura de tierra en la comunidad gallega, desconocimiento que se verifica por parte de los autores y de las autoridades locales.

El objeto de estudio, la ciudad de Monforte de Lemos, se seleccionó al cruzar la información obtenida de la escasa información encontrada a través de la revisión de la literatura; del mapa geológico de Galicia, para delimitar las zonas con cuencas terciarias, las idóneas para la construcción con tierra; y el interés de que la investigación se desarrolle en un ámbito urbano para obtener mayor impacto en el futuro inmediato de este tipo de arquitectura.

#### 1.1 El objeto de estudio: Monforte de Lemos

Galicia es una comunidad autónoma española situada en el noroeste de la Península Ibérica. La comunidad gallega (figura 2) está formada por cuatro provincias, A Coruña, Lugo, Pontevedra y Ourense. La ciudad objeto de estudio de la investigación, Monforte de Lemos, se sitúa en la zona más meridional de la provincia de Lugo, siendo un partido judicial colindante con la provincia ourensana.

La comarca monfortina se caracteriza por una fuerte diferenciación entre sus partes llanas y montañosas, emplazándose la ciudad en el valle de Lemos, el más extenso de la comunidad de Galicia. La ciudad ocupa una extensión de 170 km<sup>2</sup> y se encuentra a 363 metros sobre el nivel del mar. La ciudad se desarrolla en paralelo a ambos márgenes del río cabe, así como siguiendo las dos principales vías de comunicación que atraviesan la ciudad de norte a sur y de sureste a noroeste. Monforte de Lemos tiene un clima templado húmedo, las temperaturas son suaves todo el año, teniendo 13,9º de media anual. La precipitación media anual es de 700 mm (Martínez; Pérez, 1999, p. 205).

Destacar que la ciudad se asienta en una zona sin riesgo sísmico. La norma de construcción sismorresistente NCSE-94 (1995) establece para el noroeste de la Península Ibérica un valor de aceleración sísmica básica por debajo de 0,04 g (aceleración de la gravedad). Asimismo, considera que una aceleración sísmica de 0,06 g puede ser soportada por cualquier estructura sin necesidad de cálculos Sismorresistente. Para Monforte de Lemos, la citada norma establece un valor de aceleración sísmica básica de 0,025 g.

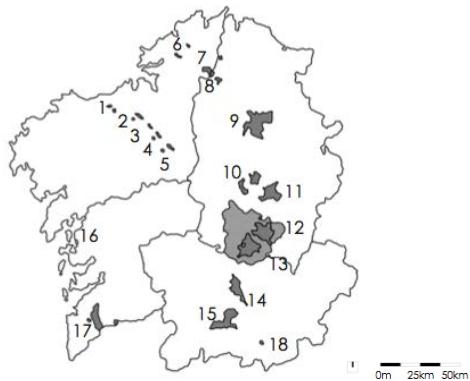


Figura 1. Mapa de situación de las cuencas terciarias de Galicia – Monforte de Lemos (13)

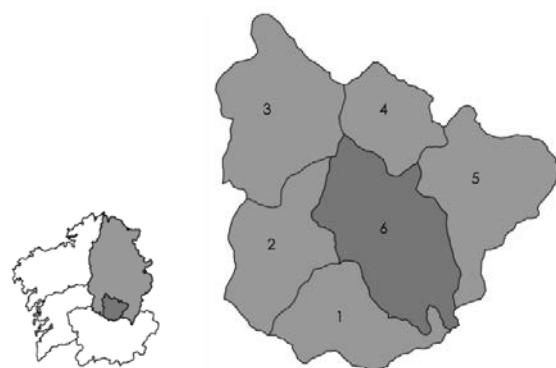


Figura 2. Planos de localización y del Ayuntamiento de Monforte de Lemos (6)

## 1.2 Descripción geológica del Valle de Lemos

La composición del suelo de un determinado lugar es una de las características geográficas más importantes para el conocimiento del mismo. El mapa geológico (figura 1) de Monforte de Lemos y los materiales que lo forman, facilitaron la comprensión del lugar y el porqué de sus construcciones.

Aunque el territorio gallego esté compuesto predominantemente por piedra, con presencia de granito y gneis, existe un 4% de la comunidad de suelo sedimentario, dentro del cual se encuentra el valle de Lemos. En el entorno físico más cercano a la ciudad de Monforte de Lemos predomina el terreno de transición, con la presencia de pizarra arcillosa, la caliza o el Grauwake; el terreno secundario y el terciario. Dentro del terreno de transición se encuentra la pizarra arcillosa, caracterizada por su color verdoso, si se extrae de la zona norte, y por su color negruzco si se extrae de la zona meridional. Además, de los terrenos terciarios se pueden obtener guijarros cuarzosos, peñas redondas de cuarcita, arena menuda y barro (Schulz, 1835, p. 31).

## 2. OBJETIVOS

En el seguimiento de la revisión de la literatura sobre la arquitectura de tierra en España, se verificó un vacío en el conocimiento en lo referente a Galicia. El citado desconocimiento se verifica por parte de los autores, de las autoridades locales y de los propietarios, para los cuales no existía arquitectura de tierra en Galicia.

Para seleccionar el objeto de estudio se cruzó la información obtenida de la escasa información encontrada en la revisión de la literatura, del mapa geológico de Galicia, y el interés por parte de los autores de que fuese de ámbito urbano el estudio, por lo que tras cruzar los tres factores, se seleccionó la ciudad de Monforte de Lemos.

Se observa un avanzado estado de abandono y falta de preocupación por el futuro más próximo del patrimonio urbano de tierra de Monforte de Lemos; motivo por el cual se plantea como primer objetivo: la realización de un inventario de las edificaciones de tierra, para sentar la base de la investigación, ya que actualmente no existe ningún tipo de inventario o catalogación del referido patrimonio de tierra. Gracias al trabajo de campo de inventariado de las construcciones de tierra existentes, se pudo realizar la selección de los casos de estudio.

El segundo objetivo, profundizará en las culturas constructivas en tierra de Monforte de Lemos a través de los casos de estudio seleccionados, analizándolos en función de su interés tipológico, material, y en cuanto a los sistemas constructivos. Los resultados del estudio podrán contribuir a evitar la pérdida de un eslabón en la cadena del conocimiento, dotando de una base teórica a las nuevas generaciones, al profundizar en las culturas constructivas utilizadas en Monforte de Lemos, desde el siglo XIX, hasta la actualidad. La investigación favorecerá la transmisión del conocimiento a los agentes técnicos locales y municipales, pretendiendo sensibilizarlos sobre la relevancia que tiene este patrimonio vernáculo.

### 3. METODOLOGÍA

Para dar respuesta a los objetivos de la investigación se utilizó el multi caso de estudio de naturaleza comparativa, en el que se estudiaron nueve edificaciones construidas en tierra, seleccionadas a través de los formularios, de las entrevistas estructuradas y del análisis documental.



Figura 3. Cuadro resumen de la metodología de la investigación

#### 3.1 Estructura metodológica

El estudio multi caso se desenvuelve en fases, que se llevan a cabo tanto con la ayuda de las distintas técnicas de recogida de información como del tratamiento de los datos.

En la primera fase se realizó el análisis documental, a través de las diversas fuentes de documentación escritas para asentar la base teórica, fundamental para el adecuado desarrollo de la investigación.

En la segunda fase se recopilaron los datos obtenidos a través del trabajo de campo, realizándose el inventario de las edificaciones de tierra existentes en el patrimonio urbano.

En la tercera fase se seleccionaron los nueve casos de estudio de entre las 200 edificaciones inventariadas anteriormente. El criterio de selección se basó en la presencia de sistemas constructivos de tierra visibles en la fachada.

En la cuarta fase, se llevó a cabo la realización de fichas individuales de cada uno de los casos de estudio, en las que se dieron respuesta a cuestiones referentes con la tipología espacial, materiales y sistemas constructivos. Se aplicaron para su realización diversas técnicas de recogida de información.

En la quinta fase se realizó el tratamiento y el análisis de la información obtenido a través de los casos de estudio.

En la sexta, y última, fase se hizo la correlación de los resultados obtenidos con la información expuesta en la fundamentación teórica, obteniendo en consecuencia las conclusiones de la investigación.

### **3.2 Técnicas de recogida de datos**

Las técnicas de recogida de información para la identificación e inventario de las edificaciones de tierra y para el desarrollo de los nueve casos de estudio fueron:

- Observación directa: se trata de una de las herramientas más importantes para la identificación de las edificaciones, debido a la importancia del trabajo de campo en la investigación. Se realizó previamente una ficha técnica de inventario para guiar la observación y el registro de los edificios seleccionados.
- Notas de campo.
- Análisis documental: permitió un óptimo desarrollo del estudio y favoreció la estructura ordenada e interligada del mismo.
- Fotografías: realizadas por la investigadora, que funcionaron como complemento a la recogida de datos, así como a plasmar las tipologías espaciales, los materiales y los sistemas constructivos de las edificaciones de tierra inventariadas.
- Entrevistas estructuradas: se orientaron para la obtención de datos proporcionados oralmente por los entrevistados, realizadas en base a un guión previamente establecido de autoría propia.

### **3.3 Resultados de la recogida de datos**

Los resultados obtenidos a través de las técnicas de recogida de datos permitieron realizar las fichas de las 200 edificaciones de tierra que forman el inventario, ofreciendo una respuesta sistemática en cuanto a la tipología espacial, los materiales y los sistemas constructivos. Asimismo, los referidos resultados favorecieron el desarrollo de las fichas de formulario de los 9 casos de estudio, en las cuales se vuelve a dar respuesta, con mayor profundidad a los ítems anteriormente referidos. La respuesta sistemática a cada uno de los apartados permite obtener unos resultados rigurosos que sustentan la investigación.

## **4. CASOS DE ESTUDIO**

### **4.1 Marco muestral**

La ciudad de Monforte de Lemos no tenía inventario de las edificaciones de tierra en el patrimonio urbano, por lo que el primer objetivo de la investigación fue llevarlo a cabo.

Con la realización del inventario se situaron e identificaron cada una de las construcciones de tierra existentes en la ciudad. La identificación se llevó a cabo a través de diversos criterios de selección con los que se obtuvieron 200 edificaciones.

El primer criterio de selección que se llevó a cabo fue el de presencia visible de tierra en la fachada de algún material y/o sistema constructivo de tierra, con el cual se identificaron 29 edificaciones. Al analizarlas en profundidad se obtuvieron unos patrones repetitivos en todas ellas, que se tuvieron en cuenta para identificar las 171 edificaciones restantes que formaron finalmente parte del inventario.

Las similitudes constructivas identificadas fueron la morfología de la fachada, la combinación de colores en el revestimiento exterior, las carpinterías de madera y el zócalo perimetral de piedra sobre el que se asentaba la tapia.

En cuanto a la morfología de la fachada se verificó alineación de los vanos superiores con los inferiores, así como el predominio de la puerta principal situada en el extremo de la planta baja, cuando era inferior a 1,20 m, o en el centro de la planta baja cuando la puerta era de ancho superior a 1,20 m.

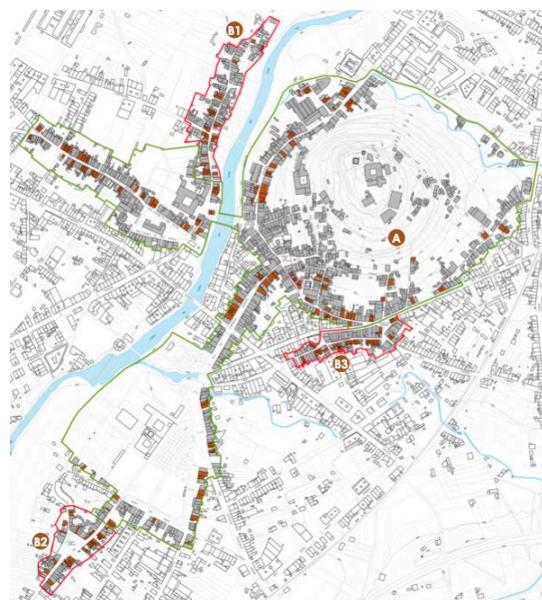


Figura 4. Plano de Monforte de Lemos dividido en las zonas Histórico-Artístico (A), Ramberde (B1), Carude (B2) y Praza do Piñeiro (B3)

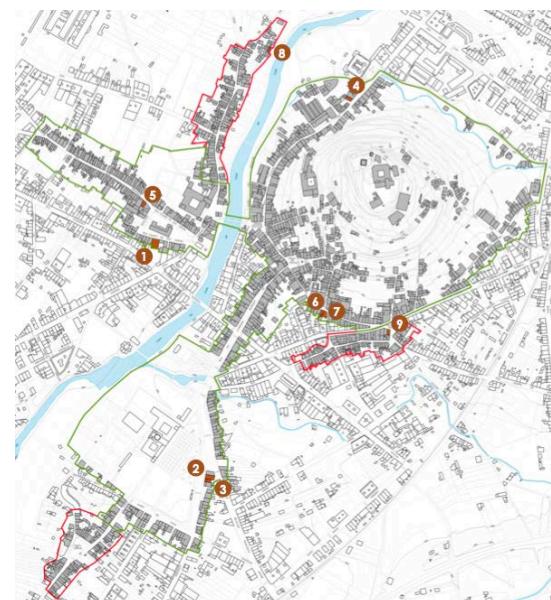


Figura 5. Plano de Monforte de Lemos con la situación de los nueve casos de estudio

Todas las edificaciones estaban revestidas con pintura combina en dos colores. El color que predominaba en las fachadas era el blanco o el crema, dejando los colores azul, marrón o verde para la franja perimetral de los vanos y del zócalo, incluso en algunos casos para la carpintería, las cuales eran habitualmente de madera.

Por último, se verificó similitud en las edificaciones inventariadas en cuanto al arranque del muro, ya que todas las construcciones contaban con un zócalo perimetral de piedra sobre el cual se asentaba posteriormente la tapia. La altura del zócalo era variable, oscilando desde los 70 cm hasta el alto total de la primera planta. La citada altura estaba relacionada con la altura total de la construcción, identificándose los zócalos más bajos en las viviendas de planta baja y los más altos para edificaciones de dos alturas o dos alturas y desván.

MORFOLOGÍA FACHADA	REVESTIMIENTO EXTERIOR	CARPINTERÍA MADERA	ZÓCALO PERIMETRAL
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puerta principal en extremo de la planta baja (&lt;1,20m).</li> <li>• Centro de la planta baja (&gt;1,20m)</li> <li>• Vanos superiores alineados con vanos inferiores</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dos colores.</li> <li>• Predominio blanco o crema.</li> <li>• Azul, marrón o verde para franja perimetral de los vanos y zócalo, y a veces la carpintería.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Predominio de las carpinterías de madera.</li> <li>• 7 edificaciones combinan madera y aluminio.</li> <li>• 1 carpintería de aluminio.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altura variable.</li> <li>• Desde los 70 cm al alto total de la planta baja.</li> <li>• Relación de la altura del zócalo con la altura total de la edificación.</li> </ul>
 	 	 	 

Figura 6. Cuadro resumen de las similitudes constructivas identificadas en el inventario

#### 4.2 Casos de estudio

De las 29 edificaciones inventariadas con el criterio de selección expuesto anteriormente, presencia visible de tierra en la fachada, se seleccionaron nueve construcciones para ser analizadas en profundidad y, por lo tanto, formar parte de los casos de estudio de la investigación.

Los nueve casos de estudio se escogieron en función de su estado de conservación, de sus intervenciones y de la autorización por parte de los propietarios a ser estudiadas. En base a

esto, se descartaron las viviendas en avanzado estado de deterioro, las que habían sufrido intervenciones que modificaron su matriz primitiva y las construcciones de los propietarios que no permitieron que fuesen estudiadas. Se realizó previamente una ficha para dar respuesta sistemática a cuestiones relacionadas con la tipología espacial, los materiales y los sistemas constructivos utilizados en cada una de las nueve construcciones que forman parte de los casos de estudio.

#### 4.3 Tipologías

Las construcciones vernáculas siguen unas premisas en cuanto a los materiales disponibles y los sistemas constructivos que se aplican. La arquitectura vernácula del patrimonio urbano de Monforte de Lemos tiene una fuerte relación con el medio físico, obteniendo los materiales utilizados en las construcciones de su entorno inmediato. En consecuencia, la población construye sus propias viviendas con las características tipológicas y constructivas que le ofrece la tierra como material de construcción.

Tras analizar los casos de estudio tipológicamente se pueden distinguir tres tipos. El primero de ellos está formado por el caso de estudio 8 (figura 7), dividido en planta baja, planta primera y planta segunda. La planta baja era utilizada como cuadra (1) y almacén (2), mientras que la vivienda se establecía en las plantas superiores. Se trata de la tipología espacial más simple de las estudiadas en los casos de estudio.

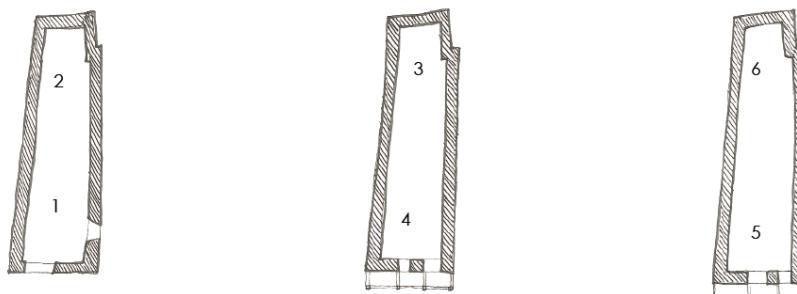


Figura 7. Planta baja, planta primera y planta segunda del caso de estudio 8 – Tipología 1

El acceso al piso superior se hacía a través de las escaleras, que probablemente también fuesen de madera, ya que era el material que se utilizaba para construirlas. No se puede asegurar con certeza el material ni el lugar exacto de emplazamiento ya que en la actualidad no queda ningún resto que lo indique. En la planta primera y en la planta segunda se desarrollaba la vivienda. La cocina (3) estaba situada en el primer piso, junto a los dormitorios (4), mientras que en el piso superior se situaría el salón (5), un dormitorio (4) y el baño (6). En este caso la cocina no contaba con lareira, teniendo en su defecto cocina de leña.

El segundo de los tipos (figura 8) está formado por los casos 3, 4, 5 y 9, los cuales se desarrollan en dos alturas, en planta térrrea y en planta alta. Generalmente la planta baja estaba destinada a bodega, almacén y a la cuadra, mientras que la planta alta se utilizaba como vivienda. Se trata de edificaciones antiguas, construidas entre 1850 y 1900, que han sufrido más deterioro con el paso del tiempo. La planta térrrea suele estar destinada a almacén (3) y bodega (2), antiguamente, se utilizaba también como cuadra. Almacenaban en ella víveres y herramientas utilizadas en el campo. El acceso al piso superior se hacía a través de unas escaleras interiores de madera, situadas normalmente en el eje central de la planta. Las escaleras transcurrían por una caja cerrada de madera, llegando incluso a colocar puertas en los accesos a la misma. Probablemente se cerrasen para evitar corrientes de aire y ruido entre las dos alturas de la edificación.

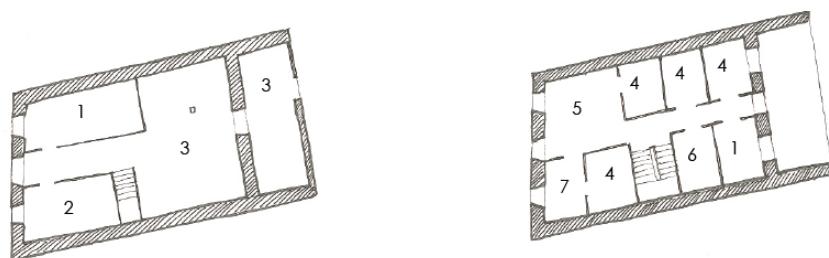


Figura 8. Planta baja y planta alta del caso de estudio 4 – Tipología 2

El piso superior estaba destinado a vivienda, destacando entre todas las estancias la cocina (1), la cual solía tener un lar, sustituyéndose posteriormente, en la mayoría de los casos por cocina de leña. En ninguno de los casos de estudio de la tipología tipo 2 se conserva actualmente la lareira. La cocina se situaba en uno de los extremos de la planta superior, y en el otro extremo el salón (5). Entre las referidas habitaciones se situaban los dormitorios (4) y el baño (6). Los dormitorios solían ser estancias de tamaño reducido, ya que solamente se utilizaban para dormir. Por lo general, la vida se desarrollaba en la cocina.

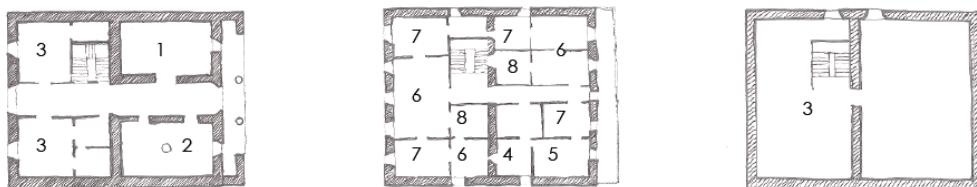


Figura 9. Planta baja, planta alta y planta bajo cubierta del caso de estudio 1 – Tipología 3

El tercero, y último de los tipos (figura 9), está formado por los casos 1, 2, 6 y 7. Son las construcciones más antiguas, construyéndose entre 1750 y 1880. Se trata de volúmenes de gran tamaño organizados en tres alturas, la planta baja, la planta alta y la planta bajo-cubierta. La planta bajo-cubierta es el espacio que queda entre la planta alta y la cubierta, y que se destina normalmente a almacén, debido a que la altura no suele alcanzar los dos metros, y el techo mantiene la inclinación propia de la cubierta. La planta térrrea de los casos de estudio englobados en la tipología espacial 3 suele estar destinada a almacén (3), a bodega (2) y antiguamente, se utilizaba también como cuadra (1). Almacenaban en ella víveres y herramientas que utilizaban en el campo. En el caso de estudio 1 (figura 9), la cuadra estaba a una cota inferior respecto a la cota de la planta baja, para, tal y como cuenta el propietario, retener al ganado en ese espacio.

El acceso al piso superior se hacía a través de una escalera interior de madera, situada normalmente en el eje central de la planta. Al igual que ocurría con el tipo anterior, las escaleras transcurrían por una caja cerrada de madera, llegando incluso a colocar puertas en los accesos a la misma. Probablemente se cerrasen para evitar corrientes de aire y ruido entre las dos alturas de la edificación.

El piso superior estaba destinado a vivienda, destacando entre todas las estancias la cocina (4), la cual solía tener un lar (5), sustituyéndose posteriormente, en la mayoría de los casos por cocina de leña. El caso 1 es el único que aún cuenta con la lareira en su lugar original.

La cocina se situaba en uno de los extremos de la planta superior, y en el otro extremo el salón (6). Entre las referidas habitaciones se situaban los dormitorios (7) y los baños (8). Los dormitorios solían ser estancias de tamaño reducido, ya que solamente se utilizaban para dormir. Por lo general, la vida se desarrollaba en la cocina.

#### 4.4 Materiales

Los sistemas tradicionales utilizados en las construcciones vernáculas, son consecuencia directa de la herencia cultural recibida de generaciones anteriores, dotando al hombre del

conocimiento profundo de los materiales, permitiendo además, el perfeccionamiento de su uso con la propia experiencia (Caamaño, 1997, 2006).

El desconocimiento teórico de las características de los materiales y de la incompatibilidad entre sí de alguno de ellos, hace que las construcciones vernáculas sufran un fuerte deterioro estructural, al dejar de funcionar correctamente.

En el análisis de esta degradación ocurrida en algunos casos de estudio, se constata que este deterioro es consecuencia de la acción humana, manifestándose especialmente con la introducción de materiales incompatibles con los característicos de esta región, como es la introducción de ladrillo en algunos huecos de la tapia o revestirla con cemento, lo que produce la falta de ventilación de la misma, generando en consecuencia humedad.

Una vez finalizado el análisis sistemático y consistente de las fichas de los casos de estudio, se constata que los materiales utilizados en las construcciones de tierra del patrimonio urbano de Monforte se pueden agrupar en función de su origen (Tabla 1): Materiales de origen mineral (piedra y tierra), materiales de origen vegetal (madera y paja) y materiales conglomerantes y transformados (cemento, cal, vidrio y ladrillo).

Tabla 1. Tabla de clasificación de los materiales identificados en los casos de estudio

Caso	Material de origen mineral			Material de origen vegetal		Material de origen mineral			
	Esquisto	Granito	Tierra	Madera	Paja	Cemento	Cal	Vidrio	Teja
1		○	○	○	○	○		○	○
2		○	○	○	○	○	○	○	○
3	○	○	○	○		○	○	○	○
4		○	○	○	○		○	○	○
5		○	○	○	○	○	○	○	○
6		○	○	○	○		○	○	○
7		○	○	○	○	○	○	○	○
8		○	○	○	○	○		○	○
9		○	○	○	○		○	○	○

Tras el análisis de los casos de estudio se encontraron dos tipos de piedra diferentes, el esquisto y el granito. La piedra aparece formando parte del zócalo perimetral en el que se asienta posteriormente el resto del muro realizado con tierra, así como muro exterior en la planta alta.

Se construían los zócalos en el arranque de la edificación para impedir que los muros sufrieran humedad por capilaridad, además de proteger al muro del impacto de la lluvia y del agua. Éstos se construían con cantos rodados, mampuestos de granito o bloques de reducidas dimensiones de pizarra, ya que realizar muros de sillería estaba sólo al alcance de familias muy adineradas.

El acceso al esquisto era más factible que el acceso al granito, debido a la existencia de este material pétreo en el entorno físico cercano. Se trata de variedad pétreas con una característica tonalidad oscura, donde predomina el color azulado y grisáceo. A pesar de esta facilidad de acceso al esquisto, solamente se ha identificado su uso en el piso superior del caso de estudio 3.

Se ha detectado el uso del granito en los zócalos hasta la altura del primer piso de los casos de estudio 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8 y 9, mientras que en el caso de estudio 3, el zócalo solamente subía 70 centímetros de la cota de la calle. Se constata la presencia de sillería de granito en los casos de estudio 2, 6, 7 y 9, todos ellos en formando el muro perimetral de la planta baja. Asimismo, la mampostería de granito se ha identificado en los casos de estudio 1, 3, 4, 5 y

8, formando el muro perimetral de la planta baja, a excepción del caso 3 que solamente aparece en el arranque del muro.

La tierra aparece en las edificaciones vernáculas monfortinas en los muros exteriores de los edificios, a través de la técnica constructiva de la tapia. Además, la tierra está presente en el interior de la vivienda, formando parte de las paredes divisorias y del suelo en la planta.

Tras analizar los casos de estudio, se verifica la presencia de tierra en los muros de tapia del caso 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9. Asimismo, tienen solera de tierra compactada en la planta baja de la construcción los casos de estudio 1 y 4. En cuanto a la albañilería interior, los casos 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8 y 9 tienen tabiques interiores con presencia de tierra. Siendo tabiques de barrotillo (Figura 10), formados por láminas de madera con tierra, los casos 1, 2, 4 y 5. El resto de los casos de estudio, 6, 7, 8 y 9, los tabiques son de pallabarro (Figura 11).



Figura 10. Barrotillo en el interior del caso de estudio 1



Figura 11. Pallabarro en un tabique interior del caso de estudio 7

Se localiza el material de origen vegetal, la madera, tras el análisis de los casos de estudio, apareciendo en la estructura que sustenta la cubierta, en las vigas, en los pavimentos, en la tabiquería interior además de encontrarla en las escaleras y en las carpinterías.

Tras analizar el armazón de las cubiertas de los casos de estudio, se constata que todo ellos se construyeron en madera, siendo construidas con el referido material el entramado, las vigas y las viguetas.

En cuanto a los pavimentos, se identificó madera de castaño en el pavimento del caso de estudio 1, 4, 5, 6, 7, 8, y 9. Existe madera en los tabiques interiores de los casos de estudio 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8 y 9, ocurriendo lo mismo que con los pavimentos, en los casos de estudio 2 y 3 no existe tabiquería interior a consecuencia del avanzado estado de deterioro de las edificaciones.

El cemento es actualmente uno de los materiales más utilizados en las construcciones, tanto de obra nuevas como de rehabilitación, por lo que se encuentra en pequeñas obras de consolidación de los muros estructurales de tapia. La utilización de este material con ese fin, es consecuencia del desconocimiento de la incompatibilidad del mismo con la tierra, que al no dejar pasar el aire hace que lo tapia sufra humedades, disminuyendo su capacidad estructural. Se ha encontrado cemento al analizar los casos de estudio 1, 2, 3, 5, 6, 7 y 9.

La cal se ha utilizado durante siglos como conglomerante en la construcción, así como para encalar muros y fachadas de los edificios de adobe y tapia. Su color es el blanco y también blanco grisáceo. En los casos de estudio se encuentra en el revoco exterior de los casos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, y 9, aunque, exceptuando el caso 4, 5, 7 y 9, se encuentra en un avanzado estado de deterioro, dejando grandes superficies sin revoco. Se ha identificado mortero de cal en la tabiquería interior de los casos de estudio 1, 2, 4, 5, 6, 7, y 8.

#### 4.5 Sistemas constructivos

Una vez analizados los casos de estudio sistemáticamente se constata que los sistemas constructivos utilizados en las construcciones de tierra del patrimonio urbano de Monforte de Lemos se pueden agrupar en los componentes edificatorios de muros exteriores y divisiones interiores.

Tabla 2. Tabla de clasificación de los sistemas constructivos identificados en los casos de estudio

Caso	Muros exteriores		Material de origen vegetal	
	Albañilería de piedra	Tapia	Pallabarro	Barrotillo
1	○	○		○
2	○	○		○
3	○	○	○	
4	○	○		○
5	○	○		○
6	○	○	○	
7	○	○	○	
8	○	○	○	○
9	○	○	○	

Tras analizar los casos de estudio, los muros exteriores de las construcciones pueden dividirse en dos sistemas constructivos, por un lado los muros de albañilería de piedra, y por otro, los muros de tapia.

En los casos de estudio, los muros de piedra solamente se levantaban hasta la altura del primer piso, exceptuando el caso de estudio 3, en el que el zócalo solamente llegaba a los 70 cm desde el arranque de la construcción. Esta situación puede ser consecuencia de la falta de material pétreo ya referida, pero también para evitar la humedad por capilaridad de terreno y para soportar la carga estructural de los muros de tapia.

El aparejo utilizado variaba en función de la cantidad de piedra de la que se disponía, así como de la calidad del corte. En función de lo anteriormente referido, dentro de la albañilería de piedra se identificaron dos aparejos, los muros de sillería y los muros de mampostería.

La sillería estaba formada por piedras de grandes dimensiones, cortadas regularmente en las canteras. Los casos de estudio, en los que se verificó el uso de este aparejo, son el 2, el 6, el 7 y el 9. En ellos se verifica que la construcción del muro se realizó con piedras de gran tamaño, oscilando entre los 50 cm y 80 cm de largo, los 30 cm a 70 cm de ancho, y entre los 30 cm y 45 cm de alto. Estos bloques de piedra ya venían cortados desde las canteras.

La mampostería consistía en colocar los mampuestos a hueso y en seco, variando en cuanto a tamaño y forma. Este tipo de aparejo varía en función del tamaño de la construcción y en función de la forma y tamaño de los cachotes, por lo que en consecuencia, los muros varían entre 40 cm y 70 cm de espesor dependiendo de las referidas condiciones.

Los muros exteriores, en la planta baja de los casos de estudio, eran construidos con aparejo de mampostería en el 1, 4, 5, 8. En cuanto a los casos 2, 6, 7 y 9, la planta baja se construyó con aparejo de sillería. Cabe destacar el caso de estudio 3, donde el muro era de mampostería pero situado en la planta alta de la edificación, probablemente tras sufrir una ampliación.

Las plantas bajas y los arranques de los muros estaban hechos de albañilería de piedra, mientras que los pisos superiores eran construidos con muros de tapia. Estos, se realizaban del modo tradicional, colocando los tapiales con el ancho deseado y rellenándolos de tierra

para posteriormente apisonarla. Este proceso se repetía hilada tras hilada, hasta conseguir la altura deseada.

Dependiendo del tamaño de la edificación los muros de tapia oscilaban entre 50 cm y 75 cm de ancho. Asimismo, tras el análisis de los casos se estudio, se observó que algunos de ellos contaban con elementos horizontales de madera entre las distintas tongadas para reforzar el muro (Figura 12).

Además también se verificó el uso de estos elementos de madera horizontales en las esquinas de los muros, previsiblemente por una adaptación de la manera de construcción de los muros de piedra. Los maestros constructores de piedra utilizaban tizones en las esquinas de las construcciones para favorecer el correcto funcionamiento de la estructura, por lo que se pudo adaptar a la construcción del muro de tapia.

El ancho de las tongadas variaba dependiendo del constructor y del tamaño de la edificación (Figura 13). Además del número de tongadas y elementos horizontales de madera colocadas entre las mismas, variaba el tipo de tierra utilizada para la tapia. Esto ocurría dependiendo del constructor y probablemente del lugar de donde se extrajese la tierra, ya que varía desde la tonalidad más clara del caso 8 hasta la tonalidad más oscura del caso 6.



Figura 12. Tapia con elementos horizontales en madera del Caso de Estudio 8

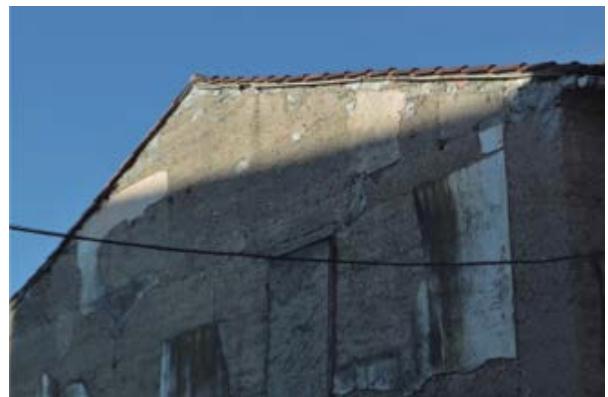


Figura 13. Tapia en el Caso de Estudio 4

## 5. CULTURAS CONSTRUCTIVAS

Al analizar los materiales y los sistemas constructivos que se utilizaron en los casos de estudio, se constataron variantes dentro de los mismos, lo que pone de manifiesto la presencia de culturas constructivas en el patrimonio vernáculo de Monforte.

Las culturas constructivas son el resultado de un proceso de evolución sometido a múltiples influencias, producto de la experimentación a lo largo de los siglos y de los procesos de degradación de los materiales producidos por el clima y el paso del tiempo (Ferreira, 2014).

En los casos de estudio, las culturas constructivas están relacionadas con los materiales utilizados en Monforte, la tierra, y sus técnicas de aplicación, la tapia, el pallabarro, y el barrotillo, las cuales no se consideran actuales, sufriendo en consecuencia rechazo y desuso frente a las materiales y sistemas constructivos contemporáneos. Tras estudiar y analizar la tapia en los muros exteriores de los casos de estudio, se observa una evolución de los sistemas constructivos, obteniendo en consecuencia una cultura constructiva.

A través de la observación directa de este sistema constructivo se ven dos claras diferencias en cuanto a los refuerzos estructurales, por un lado están los muros de tapia con refuerzos estructurales a través de elementos horizontales de madera, como son el Caso 1, el 5, el 6 y el 8. Y, por otro, están los muros de tapia sin refuerzos estructurales, como son los casos de estudio 3, el 4 y el 9.

En el caso 2 y en el 7, no se puede afirmar que posea algún tipo de refuerzo estructural con elementos horizontales de madera, debido a que el revoco del muro exterior está en mejores condiciones que el revoco del resto de los casos de estudio, por lo que no existe una superficie sin revoco en la fachada de suficiente tamaño como para comprobarlo.

Se constata una evolución de la cultura constructiva, por la inserción en algunas edificaciones de los elementos horizontales de madera, y por la utilización de diferentes tierras para construir el muro de tapia.

Los referidos elementos de madera aparecían colocados entre las tongadas y como refuerzo en las esquinas de las construcciones. Se puede suponer que la utilización de refuerzos estructurales a través de elementos horizontales de madera en las esquinas fuese influencia de los maestros constructores de piedra, los cuales utilizaban los tizones como refuerzo en las esquinas para mantener unida la estructura en estos puntos conflictivos.

Probablemente las edificaciones de los nueve casos de estudio fueron construidos por tres tipos de constructores diferentes, debido a que se observan tres maneras distintas de realizar la misma técnica constructiva. Los constructores estaban acostumbrados a trabajar de manera semejante, del modo en que les habían enseñado, por lo que casi nunca abandonaban sus costumbres, aplicando de manera igualitaria y repetitiva los mismos materiales y técnicas constructivas.

Así, había un tipo de tapia A en la que pertenecen los casos 3, 4 y 9, en los que no existe ningún tipo de refuerzo estructural a través de elementos horizontales de madera, y en los que existía uniformidad en cuanto a la composición de la tierra, la cual estaba mezclada con una mayor proporción de elementos pétreos que las otras dos culturas constructivas.

La tapia B que se llevó a cabo en las construcciones de los casos de estudio 1 y 5, se diferencia del anterior, en que en ambos muros de tapia colocaba, entre cada tongada, elementos de madera para reforzar la estructura. Además, la tapia poseía elementos de madera adicionales en las esquinas de los muros, para mejorar aún más la estructura. Las tongadas tenían aproximadamente 40 centímetros de alto, colocándose entre ellas los referidos elementos de madera, incrementándose éstos en las esquinas y en los vanos, cada 10 o 15 centímetros.

Y por último, la tapia C, la de las edificaciones de los casos 6 y 8. Se podría pensar que fue construida por el mismo constructor que la anterior, debido a la utilización de elementos horizontales de madera entre las tongadas, pero en este caso, las tongadas tienen un alto mucho mayor, llegando a los 70 centímetros entre ellas. En esta tapia no se utilizaba refuerzos en las esquinas, como el anterior, con elementos horizontales de madera. Además, la tierra tenía menos cantidad de elementos pétreos que las anteriores.

## 6. CONSIDERACIONES FINALES

A través de la realización del inventario se puede verificar y demostrar la existencia de construcciones de tierra en la comunidad gallega, concretamente en la ciudad de Monforte, pese a las premisas climatológicas y la tradición constructiva con materiales pétreos predominante. Se demuestra así que la arquitectura de tierra es posible en Monforte gracias al suelo sedimentario en el que se asienta, pudiendo obtenerse material de tierra para la construcción de tapia. Además, es posible gracias a los constructores que generación tras generación utilizaron y mejoraron, con su propia experiencia, el sistema constructivo de la tapia.

Se constata la riqueza constructiva de las edificaciones de Monforte de Lemos, debido a la coexistencia de diversos materiales y sistemas constructivos, en mayor o menor medida, como son la piedra y la tierra, la albañilería de piedra y la tapia. Además de verificarse la presencia de culturas constructivas en la técnica de tapia, donde cada constructor adaptaba la técnica a su experiencia, sus recursos y sus necesidades.

Se verifica la variedad en cuanto a la tipología espacial de las edificaciones de tierra, en función de las necesidades de sus propietarios. Esto da lugar a construcciones de diversos tamaños, de distintas distribuciones espaciales y alturas.

Se comprueba la construcción sistemática del zócalo perimetral de piedra en el arranque de la edificación de todos los casos de estudio, para evitar la humedad por capilaridad y la proyección de agua de lluvia al muro de tapia.

Se observa el empleo sistemático de la tapia en los muros exteriores de las construcciones, así como una variedad del sistema constructivo dando lugar a diversidad de culturas constructivas.

Se evidencia la presencia de tres variantes del sistema constructivo de la tapia, identificándose en consecuencia tres culturas constructivas. La presencia de las tres culturas constructivas utilizadas en la tapia de los muros exteriores puede ser consecuencia de la llegada a la ciudad de habitantes procedentes de la zona más oriental de la península ibérica, donde el sistema constructivo de la tapia era muy utilizado, y en consecuencia muy desarrollado y evolucionado.

Asimismo, es importante exponer la importancia de este patrimonio urbano de tierra en Monforte de Lemos, ya que se trata de la única ciudad en el territorio gallego que cuenta con construcciones de tierra en gran parte de sus límites urbanos. A través de la investigación se pretende valorizar el referido patrimonio a través del conocimiento de sus construcciones de tierra, y conseguir que la población se identifique con su patrimonio de tierra y en consecuencia lo preserve y lo mantenga.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Caamaño, M. (1997). A casa popular. Cadernos Museo do Pobo Galego 8. A Coruña: Fundación Caixa Galicia.
- Caamaño, M. (2006). As construccíons da arquitectura popular: patrimonio etnográfico de Galicia. A Coruña: Hércules.
- Ferreira, T. (2014). Traditional and contemporary constructive cultures: A comparison between building process en Vernacular Heritage and Earthen Architecture: Contributions for Sustainable Development, eds. M. Correia, G. D. Carlos & S. Rocha, Taylor & Francis Group, London, pp.153-158.
- Martínez, A; Pérez, A. (1999). Atlas climático de Galicia. Santiago de Compostela: Xunta de Galicia.
- Schulz, G. (1835). Descripción geognóstica del Reino de Galicia. Madrid: Imprenta de los Herederos de Collado.

## AUTORES

Laura Álvarez-Testa Sánchez, maestra por la ESG-Escola Superior Gallaecia, licenciada en arquitectura por la ESG. Ganadora de becas internacionales para participar en workshops: "VERNADOC 2013-Portugal", celebrado en Viana do Castelo en 2013; "Festival Culturel International de Promotion des Architectures de Terre Archi'Terre", celebrado en Argelia en 2013; "Proyecto de Arquitectura en Tierra" celebrado en el Alentejo y en Vila Nova de Cerveira (Portugal) en 2011.

Mariana Correia, doctora por Oxford Brookes University; maestra por FAUTL, Portugal; DPEA-Terre en CRAterre-ENSAG; posgraduado del Conselho da Europa; licenciada en arquitectura en la FAUTL; Presidente del Consejo de Dirección de la ESG; directora del CI-ESG; Miembro del Consejo de Coordinación de PROTERRA; Miembro especialista del ICOMOS-CIAV e ICOMOS-ISCEAH; y de la Cátedra UNESCO *Earthen Architecture & Sustainable Development*.

## ANALISIS DE LA ESTABILIDAD DE ARCILLAS DE ALTA PLASTICIDAD POR MEDIO DE LA DIMENSION FRACTAL

**Yolanda G. Aranda-Jiménez<sup>1</sup>; Edgardo J Suarez- Domínguez<sup>2</sup>; Victor Garcia Izaguirre<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>. Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo. Universidad Autónoma de Tamaulipas. Campus Tampico-Madero, Circuito interior S/N.Tampico, Tamaulipas. México. <sup>1</sup>yoli212@yahoo.com.mx; <sup>3</sup>vgarci@uat.edu.mx

<sup>2</sup>. Mexican Institute of Complex Systems. Calle Tlaxcala 111, Col. Unidad Nacional. Ciudad Madero, Tamaulipas, México. jsd@mics.edu.mx

**Palabras clave:** tierra vertida, arcillas expansivas, estabilizantes, dimensión fractal.

### Resumen

En los diferentes sistemas constructivos que involucra la arquitectura con tierra se busca trabajar con el suelo idóneo compuesto por arcillas de tipo caolinitas o de baja plasticidad, arena y limo; sin embargo, la realidad es muy diferente encontrándose en el área a construir arcillas expansivas, o suelos ricos en limo y todos los elementos adversos, por lo que es fundamental investigar acerca de aquellos elementos que se han denominado no aptos para la construcción con tierra. El análisis fractal de las superficies permite conocer la complejidad que puede tener un sistema y evaluarlo; se ha utilizado para análisis de rugosidad y porosidad, en este caso se correlaciona la uniformidad de una superficie sólida con la imagen analizada según el programa Image J la cual proporciona dicha dimensión. En el presente trabajo se realizó un análisis de estabilidad de cuatro tipos de arena mezclada con arcilla del tipo montmorilonita adicionadas o estabilizadas con cal y cemento, a partir de las uniformidades producidas en la superficie y cuantificadas con la dimensión fractal. Se encontró que el tamaño de partícula de arena interviene en los resultados y que la cal en un 3% y el cemento en un 6% no hay diferencia significativa de evolución temporal sino hasta los 28 días.

### 1. INTRODUCCIÓN

La arquitectura de tierra es cada vez más aceptada a nivel mundial para construir sustentablemente hoy en día, sin embargo requiere de investigación, tanto de los suelos a utilizar como de los sistemas constructivos, así mismo es fundamental investigar sobre las arcillas, componente principal de este tipo de arquitectura. Encontrar suelos expansivos en el área de trabajo, llevó a la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es el efecto, en cuanto a la estabilidad, respecto al análisis fractal de superficie, de una arcilla del tipo montmorilonita con cal y cemento y así utilizarlas en la arquitectura de tierra?

### 2. DESARROLLO

Partiendo de los numerosos minerales (principalmente silicatos) que se encuentran en las rocas ígneas y metamórficas, los agentes de descomposición química llegan a un producto final: la arcilla (Juarez-Badillo; Rico-Rodrigues, 2000). Sin embargo, ésta puede encontrarse naturalmente como parte del suelo.

En México, los suelos expansivos ocupan el 8% del territorio, concentrándose la mayor parte al centro de la República; las arcillas se clasifican en arcillas de alta plasticidad y baja plasticidad. También pueden clasificarse como: caolinitas, llitas y montmorilonitas.

Se han documentado investigaciones experimentales donde se estabilizan las montmorilonitas solo con cal (Houghua; Chunji; Bi-Wei, 2013), empleando métodos que se describen en los fundamentos teóricos para la identificación de arcillas como: rayos X, microscopio electrónico y el método químico, sin que a la fecha se haya documentado una investigación con cal y cemento a la vez potencializando las ventajas de ambos.

En un estudio, Hossain y Mol (2011) analizan las propiedades de durabilidad de 14 mezclas de suelo arcilloso expansivo, adicionado con puzolanas o bien utilizando cenizas volantes

con alto contenido en calcio y cemento, otro estudio, realizado por Kolia, Kasselouri-Rigopoulou y Karahalios (2005) se demuestra la eficacia de la utilización de estas cenizas reduciendo el cemento, en pavimentos. Dos años después se prueba la estabilidad de las arcillas en pavimentos estabilizándolo con cemento en el estudio de Giannattasio y Gustavo (2006) para viviendas de interés social, sin embargo solo se analizan las propiedades físicas, dejando a un lado el aspecto económico.

Por otro lado Jommi (2011) reporta resultados exitosos tras estabilizar suelos expansivos con hidróxido de calcio, menciona que se comporta como un limo. Otros han utilizado la lechada de cal para estabilizar las arcillas tales como Rao y Thyagaraj (2003).

Se ha utilizado la dimensión fractal para medir la porosidad de muestras de tierra vertida, encontrando una mayor uniformidad (Suárez-Dominguez; Aranda-Jiménez, 2013).

## 2.1 Objetivo

### Objetivo general

Determinar la dimensión fractal a las superficies de mezclas arena-arcillas expansivas adicionadas con cal y cemento y mostrar las diferencias con respecto a una muestra sin cemento.

### Objetivos específicos

- Encontrar proporciones de agua adecuadas para la elaboración de mezclas.
- Analizar con la dimensión fractal las superficies de las muestras
- A partir de los resultados obtenidos mencionar los posibles usos en la arquitectura con tierra.

## 2.2 Hipótesis

Las mezclas estabilizadas con cal y cemento presentan menor dimensión fractal, que indica menor número de fisuras que aquellas estabilizadas con un solo estabilizante mineral.

## 2.3 Metodología

La presente investigación es experimental debido a que consiste en manipular de forma intencional una o más variables independientes (las cuales se consideran la causa en una relación de variables) y el efecto provocado por dicha causa se le llama variable dependiente (consecuente o efecto). Para este caso la variable independiente será la cantidad de bentonita empleada y la variable dependiente será las fisuras o rugosidad presentada.

El alcance del trabajo es exploratorio pues se pretende examinar una problemática poco estudiada desde la perspectiva fractal se ha abordado suavemente en tierra vertida. También es correlacional pues se desea conocer la relación entre dos o más variables en un determinado contexto y explicativo debido a que se tratará de explicar por qué ocurre un fenómeno, en qué condiciones se manifiesta o la razón por la que se relacionan dos o más variables que en este caso.

## 2.4 Procedimiento

Para el desarrollo de las pruebas se obtuvieron diferentes muestras de arena a utilizarse en la elaboración de mezclas: arena de río lavada, arena de mar y arena de Ottawa. A la arena de río se le retiraron todos los carbonatos presentes con lavado de ácido clorhídrico al 15% dejando reposar durante 24 horas. Posteriormente se retiró el exceso de ácido a partir de enjuagues con agua destilada y se escurrió durante 1 hora. La arena de Ottawa fue adquirida en grado industrial. La arena de mar se enjuagó completamente con agua desionizada. Todas las muestras se secaron a 110°C de temperatura durante un periodo de 3 horas.

Se realizaron mezclas de acuerdo a las proporciones señaladas en la Tabla 1.

Tabla 1.- Proporciones en peso para la elaboración de mezclas estabilizadas con cemento y cal

Componente	Proporciones (%)			
	Mezcla 1 arena de Otawa	Mezcla 2 arena de río <sup>1</sup>	Mezcla 3 arena de mar <sup>2</sup>	Mezcla 4 <sup>3</sup> arena de río
Cemento	6	6	6	0
Arena	87	87	87	87
Cal	3	3	3	3
Bentonita	4	4	4	4

<sup>1</sup> sin carbonatos;<sup>2</sup> lavada<sup>3</sup> amostra control

Para determinar la cantidad de agua necesaria para la mezcla se buscó un revenimiento de 6,5 mediante el uso de conos invertidos. Esta varió en función a la arena utilizada, de tal manera que para la mezcla 1 se utilizaron 12,5%; en la mezcla 2, 16%, y en la mezcla 3, 15,5%.

En todos los casos, se añadió el agua en volumen posterior al mezclado de todos los componentes sólidos de las muestras.

Una vez realizadas las mezclas, se vertieron las cantidades indicadas en la tabla en un recipiente cilíndrico de 2,5 cm de diámetro x 1 cm de altura, vibrando manualmente en recipiente durante 2 minutos. El procedimiento se realizó por triplicado. Las muestras se dejaron secar a condiciones normales de presión y temperatura.

Para conocer el efecto de una atmósfera de CO<sub>2</sub> se repitió lo anterior pero introduciendo las muestras en un reactor cilíndrico donde se inyectó dióxido de carbono en cápsulas a 3 psi. En este caso, primero se desplazó por vacío el aire presente para posteriormente permitir el ingreso del CO<sub>2</sub> grado reactivo marca infra contenidos en cápsulas de alta presión.

Se tomaron fotografías a las muestras de sólido obtenidas, después de 1, 7 y 28 días. A dichas muestras se les determinó la porosidad y se caracterizó la superficie por el método de la dimensión fractal. Las superficies se observaron con un microscopio Konus College #5302, ocular WF 15x, con aumento 10X. Los patrones fueron fotografiados con una cámara Sony DSC-W530 Cyber Shot 14.1 megapixeles, lente Carl Zeiss y zoom óptico 4X con una resolución de 7 megapixeles.

A los patrones tomados se les determinó la dimensión fractal por conteo de caja mediante el programa Image J v 1,40 g en el cual cada imagen a color se convirtió en una imagen de 8 bits, a partir de la cual se obtiene una imagen binaria del patrón a la cual se le determinó la dimensión fractal vertical y horizontal de las imágenes, así como su rugosidad.

#### - Dimensión fractal

Los patrones que forman los sólidos, como los aquí estudiados, se caracterizaron a través de la dimensión fractal de capacidad ( $\Gamma_c$ ), definida como:

$$\Gamma_c = -\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln N_0(r)}{\ln(1/r)}$$

Donde  $r$  es el tamaño de los  $N$  sitios en los cuales se divide la imagen en 2D y  $N_0$  es el número de sitios en los cuales se detecta la presencia de sustancia.

El valor de la dimensión fractal en un sistema que puede variar en dependencia de los procesos dinámicos que tienen lugar y de su naturaleza aleatoria por lo que puede describir un sistema a partir de su morfología. En este trabajo, las morfologías correspondieron a las imágenes obtenidas de acuerdo a la parte experimental anteriormente descrita, los procesos dinámicos son referidos a las interacciones entre las partículas que conforman a la tierra vertida así como las características de las mismas, principalmente su tamaño.

En este sentido se correlacionarán los resultados experimentales observados a partir de la rugosidad y fisuras con respecto a la dimensión fractal.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 2 se presentan los resultados de la dimensión fractal por conteo de caja

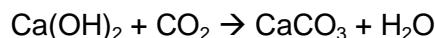
Tabla 2 – Dimensión fractal por conteo de caja

Tipo de arena	Promedio			Error de la medición		
	1 día	7 días	28 días	1 día	7 días	28 días
Arena de Otawa	1,9450	1,9450	1,9489	0,0089	0,0089	0,0094
Arena de río sin carbonatos	1,9272	1,9272	1,9304	0,0211	0,0211	0,0170
Arena de mar lavada	1,9456	1,9456	1,9346	0,0072	0,0072	0,0140
Arena con cal y bentonita sin cemento	1,9385	1,9385	1,9409	0,0149	0,0149	0,0099
<b>CO<sub>2</sub></b>						
Arena de Otawa	1,9461	1,9461	1,9266	0,0162	0,0162	0,0307
Arena de río	1,9299	1,9299	1,9372	0,0088	0,0088	0,0087
Arena de mar	1,8955	1,8955	1,8453	0,0044	0,0044	0,0069

Puede notarse que el resultado promedio aproximado para la arena de Otawa fue de 1,95, que fue estadísticamente similar que la de arena de mar lavada. Sin embargo, la arena de río sin carbonatos presentó una menor dimensión fractal al igual que la arena con cal, bentonita y cemento.

Estos resultados están en concordancia con la hipótesis de una menor complejidad para la arena de río sin carbonatos, probablemente por la ausencia de partículas no uniformes carbonatadas y por tanto homogeneidad de las partículas de arena. Para ello se hizo pasar la muestra de arena por un conjunto de tamices encontrando más del 95% de su contenido en la malla 80. En el caso de la arena de Otawa se encontró el principal contenido (más del 90%) en malla 40.

Para los resultados con respecto a las muestras sometidas a un curado en ambiente de dióxido de carbono se encontró una mayor homogeneidad en la superficie de sólido estudiada, a excepción de la arena de Otawa que no tuvo diferencias significativas. Es posible que se haya potencializado la reacción:



Experimentando entonces una homogenización temporal. En cuanto a los perfiles de rugosidad no se detectan diferencias a lo largo del tiempo, sin embargo si se visualizan en los procesos de curado con y sin CO<sub>2</sub>. Por último es necesario mencionar que aquellas muestras sometidas al ambiente de CO<sub>2</sub>, se detectaron un mínimo de fisuras

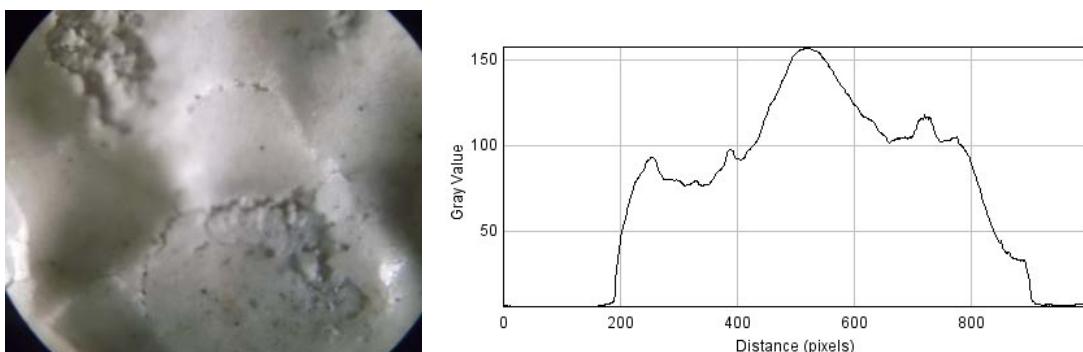
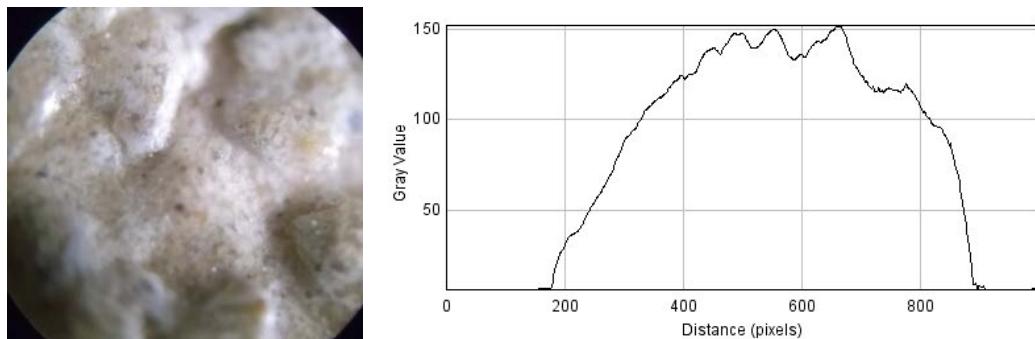
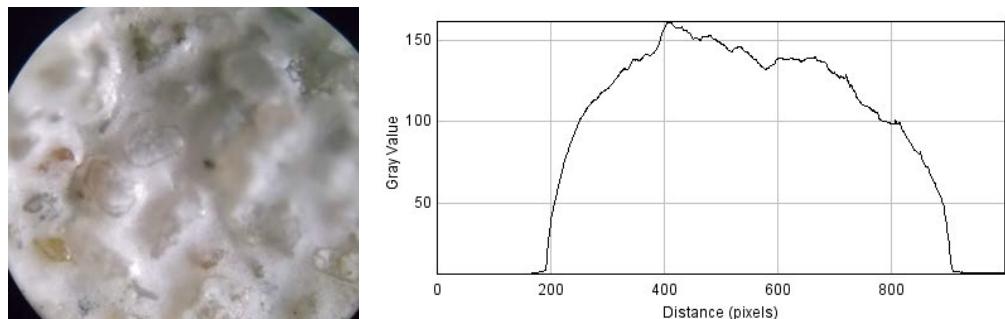
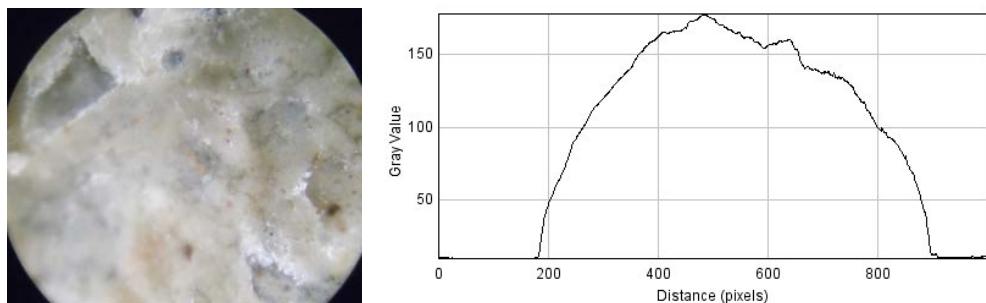


Figura 1 - Arena de Otawa y corte de la superficie sin CO<sub>2</sub>

Figura 2 – Arena de río sin carbonatos y corte de la superficie sin CO<sub>2</sub>Figura 3 - Arena de mar lavada y corte de la superficie sin CO<sub>2</sub>Figura 4 – Arena con cal y bentonita sin cemento y corte de la superficie sin CO<sub>2</sub>

La dimensión fractal sirve para determinar la uniformidad de las superficies por lo que su uso dependerá de los estudios que la correlacionan con las fisuras encontradas en las superficies. Estos estudios a futuro permitirán hacer evaluaciones preliminares de las mezclas.

#### 4. CONCLUSIÓN

En el presente trabajo se determinó la dimensión fractal por conteo de caja de diferentes mezclas encontrando valores de 1,9272 hasta 1,9489; no se encontró diferencia significativa de evolución temporal en la dimensión fractal si no hasta los 28 días.

Parece existir una modificación superficial al añadir cemento a las muestras. Se encontró que el porcentaje adecuado de agua añadido fue de 12,5% al 16% sobre la mezcla. Es necesario profundizar en el análisis de las variaciones de cemento.

Por último se hace necesario ampliar los estudios realizados para así poder determinar los usos de estas arcillas estabilizadas en la arquitectura de tierra.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Giannattasio, R.; Gustavo, V. (2006). Estabilización química de las arcillas expansivas mediante el uso de cemento a fin de emplearlo como base de pavimento rígido en el desarrollo de proyectos de viviendas de interés social. Universidad Nueva Esparta. p.1-3

- Hossain, K; Mol, L. (2011). Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes. *Construction and Building Materials*
- Houghua, Z. Jun, L. Chunji, Z. Bi-Wei, G. (2013). Reexamination of lime stabilization mechanisms of expansive clay. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 27(1). 1-34pp.
- Juarez-Badillo, Rico-Rodriguez (2000). *Mecánica de suelos. Tomo 1. Fundamentos de la mecánica de suelos*. Editorial LIMUSA. México ISBN 968-18-0069-9.
- Kolias, S.; Kasselouri-Rigopoulou V, Karahalios, A. (2005), Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement. *Cement and Concrete Composites*, 27 (2005), p301–313
- Jommi, C. (2011). Reducción de la expansión de las arcillas con el uso de cal. *Facoltà di Ingegneria Civile, Ambiente e Territoriale*. p.1-126
- Rao, S.M.; Thyagaraj, T. (2003). Lime slurry stabilization of an expansive soil. *Geotechnical Engineering*. 156(3). p.139-146
- Suárez-Dominguez; Aranda-Jimenez (2013). Diferencia fractal en superficies de tierra vertida con suelo de Tamaulipas. *Revista Contexto: Universidad Autónoma de Nuevo León* <http://contexto.uanl.mx/num7.html>

## AUTORES

- Yolanda Aranda-Jimenez, Doutora en Arquitectura por la UAT. 2010, miembro de Proterra desde el 2005. Catedratica TC. Perfil Promep. Premio Tesis de Calidad 2010.
- Edgardo Suarez-Dominguez, Arquitecto por la UAT. Master en Ingenieria. Lic. en Quimica. Director del Instituto MICS. Estudiante del Doctorado en Mecanica de Fluidos UNAM.
- Victor Garcia Izaguirre, doutor en Arquitectura por la Universidad de Sevilla, miembro del CA perfil Promep

# REFUERZO SÍSMICO DE MALLAS DE SOGAS SINTÉTICAS PARA CONSTRUCCIONES DE ADOBE

**Marcial Blondet<sup>1</sup>; Julio Vargas<sup>2</sup>; Nicola Tarque<sup>3</sup>; Jonathan Soto<sup>4</sup>;  
Carlos Sosa<sup>5</sup>; Javier Sarmiento<sup>6</sup>**

Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP)

<sup>1</sup>mblondet@pucp.pe, <sup>2</sup>jhvargas@pucp.pe, <sup>3</sup>sntarque@pucp.edu.pe,

<sup>4</sup>jonathan.soto@pucp.pe, <sup>5</sup>carlos.sosa@pucp.pe, <sup>6</sup>javier.sarmiento@pucp.pe

**Palabras clave:** adobe, terremotos, reforzamiento e integridad estructural

## Resumen

Las construcciones de adobe, durante los terremotos, son generalmente las más afectadas. Sufren daños significativos o colapsos parciales y totales debido a que los muros son muy débiles y frágiles. Sin embargo, las más graves consecuencias son las pérdidas de vidas, la gran cantidad de heridos y las familias damnificadas. Una manera efectiva de evitar estos daños en viviendas es confinar las paredes de adobe con mallas hechas con materiales compatibles con el material tierra. La PUCP viene investigando diversas formas de mejorar el comportamiento sísmico de las casas de adobe; por ejemplo, se ha visto que una malla exterior de polímero (geomalla) es efectiva en prevenir el colapso de las estructuras de adobe sometidas a excitación sísmica severa. Sin embargo, en la mayor parte del territorio peruano, la geomalla es difícil de obtener. Este artículo presenta los resultados de una nueva técnica de refuerzo sísmico que utiliza mallas externas de drizas (sogas sintéticas), accesibles en las zonas rurales. Como trabajo preliminar se ensayó un modelo de vivienda típica de adobe sin refuerzo, a escala natural, sobre la mesa vibradora de la PUCP. Durante el movimiento, los muros de adobe se agrietaron y algunos bloques de adobe se desplomaron. Luego, la casa fue reparada (con inyección de barro tamizado) y reforzada con una malla externa de cuerdas de driza en cada cara de los muros, templadas manualmente. Las drizas sujetaban también una viga collar de madera. Después de someter el modelo reforzado a un nuevo ensayo sísmico más exigente, se observó que el refuerzo brindó integridad estructural y estabilidad al modelo pues evitó el colapso parcial de los bloques. Además, se elaboró una guía preliminar de diseño de refuerzo. Actualmente, se está realizando un modelo numérico no lineal y un modelo basado en análisis dinámico de bloques rígidos. Los resultados serán comparados con lo observado en el laboratorio. Se espera que estos resultados conlleven al desarrollo de un sistema de refuerzo simple, accesible y barato que permita proteger las construcciones de adobe localizadas en áreas sísmicas.

## 1 INTRODUCCIÓN

En muchas partes del mundo, los terremotos ocasionan grandes daños a las viviendas y monumentos históricos construidos con tierra. Las casas de adobe dañadas pueden ser reconstruidas. Sin embargo, los monumentos históricos deben ser reparados y reforzados para asegurar su estabilidad ante futuros terremoto. La tarea es muy complicada ya que requiere de una mínima intervención estructural, un aspecto recomendado por las cartas internacionales de conservación (ICOMOS, 1964).

El grupo de investigación GERDIS de la sección Civil de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) está estudiando procedimientos de refuerzo para muros de adobe de acuerdo con los principios universales de conservación: mínima intervención, refuerzo compatible y solución reversible.

Primero, se estudió la reparación mediante la inyección de barro líquido, *grout*, (Blondet et al, 2007). La reparación restauró la resistencia original de muros de adobe sometida a compresión diagonal y carga estática cíclica. No obstante, el procedimiento no fue exitoso en un modelo de adobe a escala natural sometido a simulación sísmica en la mesa vibradora de la PUCP (Groenenberg, 2010; Blondet et al, 2012). Posteriormente, se construyó otro modelo a escala natural que fue sometido a la misma simulación sísmica para inducir daño en la estructura. Luego, las grietas fueron reparadas mediante la inyección de barro líquido y los muros fueron reforzados con una malla externa ortogonal de drizas (nylon) tensada manualmente con templadores. Finalmente, el modelo fue ensayado nuevamente en la mesa vibradora. Su comportamiento sísmico fue satisfactorio porque el refuerzo controló los desplazamientos relativos de las partes de los muros agrietados, evitó el colapso parcial y preservó la integridad estructural del modelo (Blondet et al, 2014).

Adicionalmente, este trabajo contempla el desarrollo de una guía preliminar de diseño basado en el análisis dinámico de bloques rígidos y el estudio numérico del comportamiento sísmico de las viviendas reforzadas.

Este artículo resume los resultados experimentales obtenidos de los ensayos experimentales y el trabajo del grupo de investigación GERDIS de la PUCP para mejorar la técnica de refuerzo propuesta.

## 2 CONTRUCCIÓN DEL MODELO

Un modelo de adobe a escala natural (figura 1) fue construido en el Laboratorio de Estructuras de la PUCP para ser ensayado en la mesa vibradora. Fue similar al modelo reparado solamente con barro líquido que no tuvo respuesta dinámica satisfactoria durante un proyecto previo (Groenenberg, 2010; Blondet et al., 2012). El objetivo fue evaluar la eficacia de un sistema de refuerzo de drizas complementario a la inyección con barro líquido.

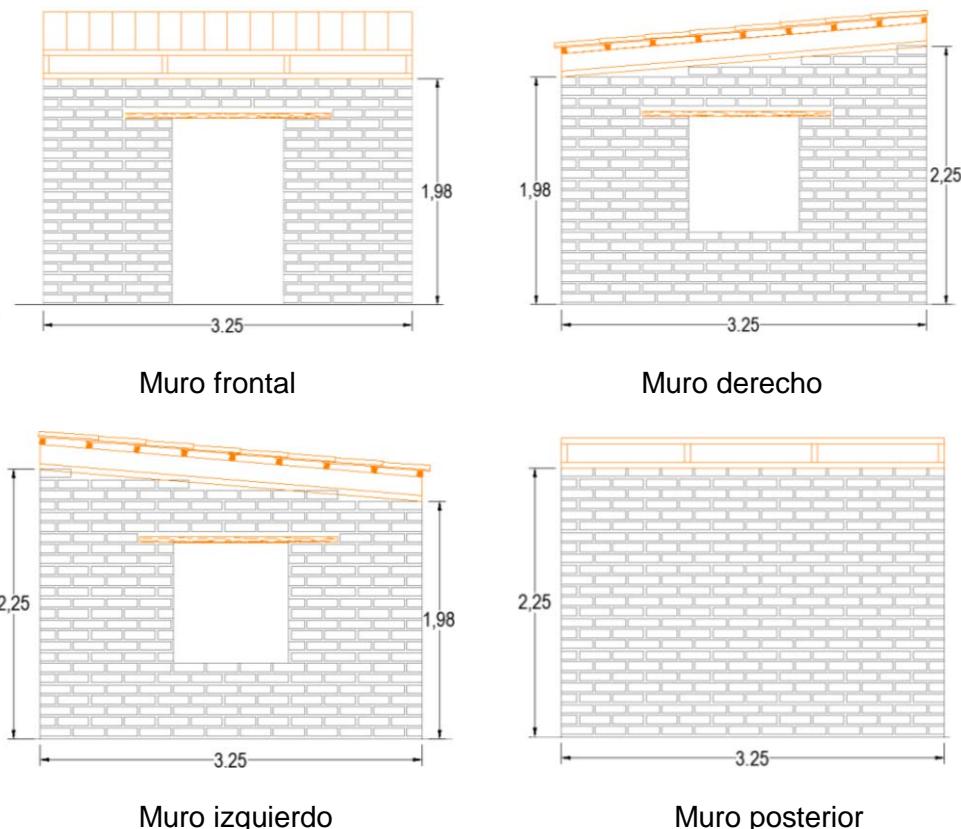


Figura 1. Esquema del modelo de adobe a escala natural. Las dimensiones se dan en metros

La construcción de adobe constó de un ambiente de cuatro muros ortogonales de adobe. Las unidades de adobe midieron 0,25 m x 0,25 m x 0,09 m (se utilizaron unidades enteras y mitades). Los adobes se fabricaron usando suelo, paja y arena (proporción 5:1:1 en volumen). Los bloques de adobe se unieron con mortero de barro (aproximadamente 0,020 m de espesor) hecho con suelo, paja y arena (proporción 3:1:1 en volumen). El vano de puerta se ubicó en la pared frontal. Los muros laterales (derecho e izquierdo) contaron con una abertura de ventana central. El techo fue unido a los muros mediante una viga collar de madera para contribuir a la respuesta estructural. La puerta y las ventanas tuvieron dinteles hechos con caña unidas con alambres. Estos dinteles son ligeros y flexibles para evitar el efecto de golpeo en los muros de adobe durante terremotos. La casa se construyó sobre un anillo de concreto (cimentación rígida), usado para unir el modelo a la mesa vibradora y como soporte para el transporte de la casa a la mesa vibradora (Blondet et al, 2013).

Los ensayos de compresión en pilas de adobe dieron un valor promedio del módulo tangente de elasticidad de 400 MPa. La densidad de los bloques de adobe fue 1700 kg/m<sup>3</sup>.

### 3 PROTOCOLO DE ENSAYO E INSTRUMENTACIÓN

La señal de comando de desplazamiento de la mesa vibradora en los ensayos fue derivada de la componente longitudinal registrada en el terremoto del día 31 de mayo de 1970 en Lima, Perú. La figura 2 muestra la aceleración de la mesa registrada durante un ensayo de simulación correspondiente a un desplazamiento de comando pico  $D = 130$  mm. La aceleración pico de la mesa A0 fue 1,53 g.

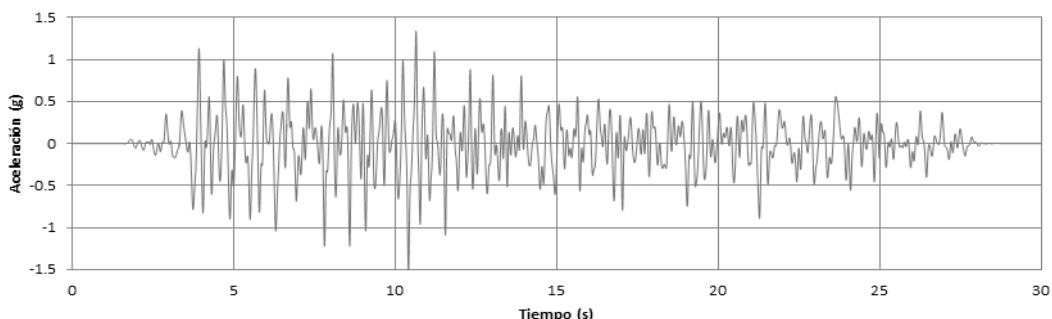
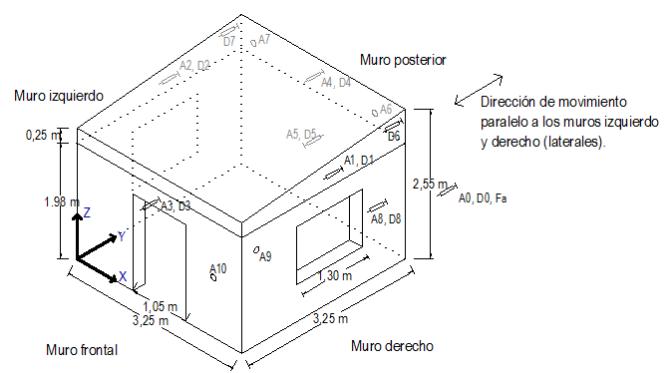


Figura 2. Aceleración en la mesa vibradora medida en ensayo con desplazamiento pico  $D = 130$  mm

La instrumentación incluyó acelerómetros para medir aceleraciones absolutas y transductores diferenciales lineales variables (LVDTs) para medir desplazamientos absolutos (figura 3). Se midieron la aceleración y el desplazamiento de la mesa vibradora; se registró la fuerza en el actuador hidráulico. La frecuencia de muestreo de todos los instrumentos fue 200 Hz (intervalo de tiempo de 0,005 s).



Modelo en la mesa vibradora



Ubicación de la instrumentación

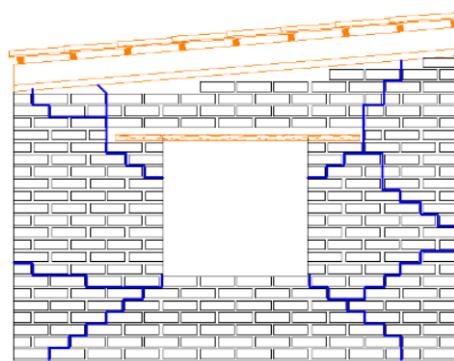
Figura 3. Aceleración en la mesa vibradora medida en ensayo con desplazamiento pico  $D = 130$  mm

#### 4 ENSAYOS DINÁMICOS PARA GENERAR DAÑO SÍSMICO

El ambiente de adobe (no dañado) fue sometido a una secuencia de tres fases para generar daño sísmico representativo como se observa en las construcciones de adobe. La primera fase, con desplazamiento pico de comando  $D= 30$  mm (desplazamiento pico de la mesa  $D0max= 28,90$  mm y aceleración pico  $A0max= 0,31$  g), no produjo ningún daño visible en el modelo. Luego de la segunda fase con  $D= 60$  mm ( $D0max= 58,50$  mm y  $A0max= 0,64$  g), el modelo presentó muchas fisuras. Grandes diagonales de corte fueron visibles en los muros laterales, empezando en las esquinas de la ventana y propagándose hacia afuera. Debido a que las fisuras eran muy delgadas (3 mm o menos), se decidió llevar a cabo una tercera fase  $D= 60$  mm ( $D0max= 58,50$  mm y  $A0max= 0,64$  g) para inducir mayor daño; las fisuras se ensancharon. Esta última fase fue detenida después de 15 segundos para evitar daño irreparable (Groenenberg, 2010). La figura 4 muestra los patrones de daño en el muro derecho, representativo del daño sísmico en construcciones de adobe.



Muro derecho



Esquema de fisuras del muro derecho

Figura 4. Daño en el ambiente de adobe luego de la segunda fase de ensayo ( $D= 60$  mm).

#### 5 ENSAYO DINÁMICO EN EL MODELO REFORZADO

##### Procedimiento de reparación

El ambiente de adobe fue reparado mediante inyección de barro líquido. Ello requirió que las grietas sean abiertas para la completa penetración del barro. En este proyecto, debido a limitantes de tiempo, se decidió abrir todas las grietas del ambiente de adobe simultáneamente. Las grietas con ancho mayor a 1 mm se abrieron hasta 8 mm aproximadamente usando taladro y cuchillo eléctrico (figuras 5a y 5b). Luego, las grietas fueron selladas con una capa de silicona en ambas caras, dejando aberturas de aproximadamente 100 mm de separación. El barro fue inyectado en las grietas. Consistió en una mezcla de suelo tamizado en la malla #10 (2 mm de abertura), 50% en volumen de paja finamente cortada (10 mm de longitud aproximadamente) y 35% de agua en peso. La mezcla fue inyectada en las grietas hasta estar completamente llenas (figura 5c).



a) Uso de taladro eléctrico



b) Uso de cuchillo eléctrico



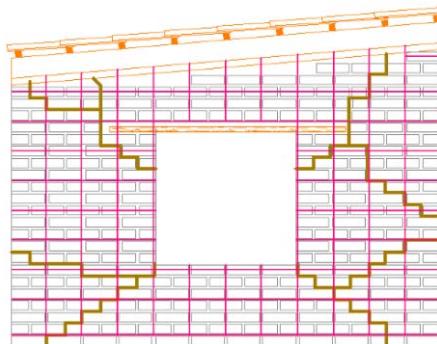
c) Inyección de barro líquido

Figura 5. Abertura de grietas sísmicas e inyección de barro líquido

Después de que las grietas fueran reparadas con barro líquido, el modelo se dejó al aire libre por dos meses para un adecuado secado del barro. .

### Procedimiento de refuerzo

Después del secado, los muros fueron reforzados con una malla ortogonal de cuerdas de nylon (drizas) de  $\frac{1}{4}$ " de diámetro. Ensayos de laboratorio indicaron una resistencia última de 2 kN (esfuerzo nominal último de 63 MPa) y un módulo de elasticidad de 100 MPa. La figura 6a) muestra la configuración de malla usada. Las cuerdas verticales fueron colocadas a intervalos de 250 mm (la longitud de un bloque de adobe) en dos partes. La parte baja de la cuerda vertical se colocó a través de la primera hilada (inferior) del mortero. Para ello se colocó un tubo de plástico por el cual pasar la cuerda. La malla en la parte superior se colocó sobre los muros, clavada a la viga collar. Las cuerdas horizontales se colocaron también a intervalos de 250 mm (dos unidades y media de adobe). Todas las cuerdas fueron tensadas con los templadores (figura 6b). La tensión estimada de los templadores fue 200 N al momento del tensado. Las mallas ortogonales se colocaron a ambos lados de los muros unidas por cuerdas de  $\frac{1}{8}$ " (crossties), elementos que atraviesan los muros en lugares seleccionados. La figura 6c) muestra el detalle de los elementos de refuerzo. La figura 6d) presenta el ambiente de adobe reforzado listo para ser ensayado nuevamente en la mesa vibradora.



a) Esquema del refuerzo con driza



b) Templado de refuerzo horizontal



c) Detalle de refuerzo



d) Ambiente de adobe reparado y reforzado

Figura 6. Refuerzo con drizas del ambiente de adobe reparado con barro líquido

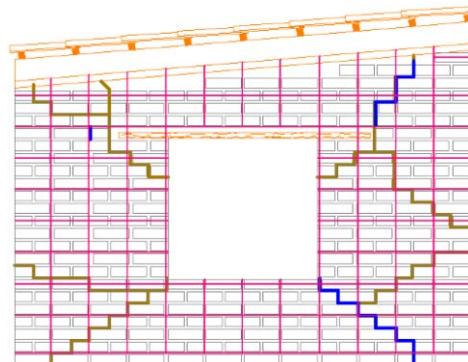
## 6 EVALUACIÓN DE LA TÉCNICA DE REFORZAMIENTO

El ambiente de adobe reparado y reforzado fue ensayado nuevamente en la mesa vibradora siguiendo el protocolo de ensayo del modelo original no dañado. Durante la primera fase ( $D=30$  mm;  $D_{0max}=29,40$  mm;  $A_{0max}=0,30$  g), no existió daño visible en la estructura. La figura 7b muestra el esquema de daños que corresponde a la segunda fase de ensayo ( $D=60$  mm;  $D_{0max}=58,40$  mm;  $A_{0max}=0,71$  g). Las líneas marrones muestran las grietas que

no se abrieron; las líneas azules muestran las nuevas grietas que se generaron debido a la simulación sísmica.



a) Inspección de daños



b) Esquema de fisuras (en azul)

Figura 7. Modelo reparado luego de la segunda fase de ensayo (D = 60 mm).

La tercera fase de ensayo (D= 90 mm; D0max= 89,30 mm; A0max= 1,08 g) probó la efectividad del refuerzo. Una reparación sin refuerzo hubiese producido el colapso como en el ensayo de Groenenberg (2010). El refuerzo de nylon mantuvo juntos los bloques que se habían fracturado. Posteriormente, se decidió someter el modelo a dos fases adicionales de movimiento intenso (D= 130 mm; D0max= 128 mm; A0max= 1,53 g), un hecho que produjo un daño significativo: todas las grietas reparadas se abrieron y nuevas grietas aparecieron en los muros (figura 8a). Sin embargo, el refuerzo y la viga collar trabajaron muy bien en mantener la integridad de la estructura (figura 8b). Las cuerdas horizontales, localizadas en el mortero cerca de la base de la ventana, cortaron el mortero.



a) Esquema de daños



b) Daños en el ambiente de adobe

Figura 8. Esquema de daños y vista general del ambiente después de todas las fases de ensayo.

Los gráficos de cortante basal versus desplazamiento global que corresponden a la primera fase de movimiento (D= 30 mm) para el ambiente en su condición original y reparada se muestran en la figura 9. La técnica de reparación y reforzamiento fue efectiva en recuperar las características mecánicas del ambiente original. En ambos casos, el máximo cortante basal soportado por el modelo fue cercano a 47 kN. El ambiente reforzado-reparado tuvo alrededor del 70% de la rigidez lateral de la original (60 kN/mm versus 87 kN/mm).

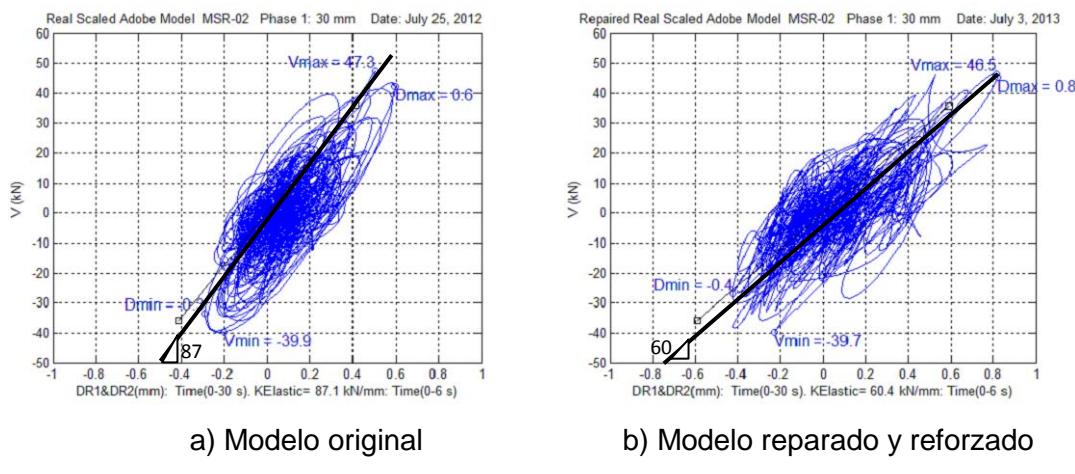


Figura 9. Cortante basal vs. máximo desplazamiento para la primera fase de ensayo ( $D = 30$  mm)

Para una señal de comando  $D = 60$  mm, hubo respuesta no lineal significativa en el ambiente original y el reparado-reforzado. El refuerzo fue efectivo en mantener la integridad estructural. Los gráficos de fuerza lateral versus desplazamiento (figura 10) muestran que el refuerzo garantizó una respuesta dinámica estable con menor abertura de grietas (lazos histeréticos más cerrados). En la figura 10, se observa también que en el modelo reforzado la resistencia lateral disminuyó aproximadamente 33% (de 149 kN a 100 kN) y que la rigidez disminuyó aproximadamente 54% (de 98 kN/mm a 45 kN/mm).

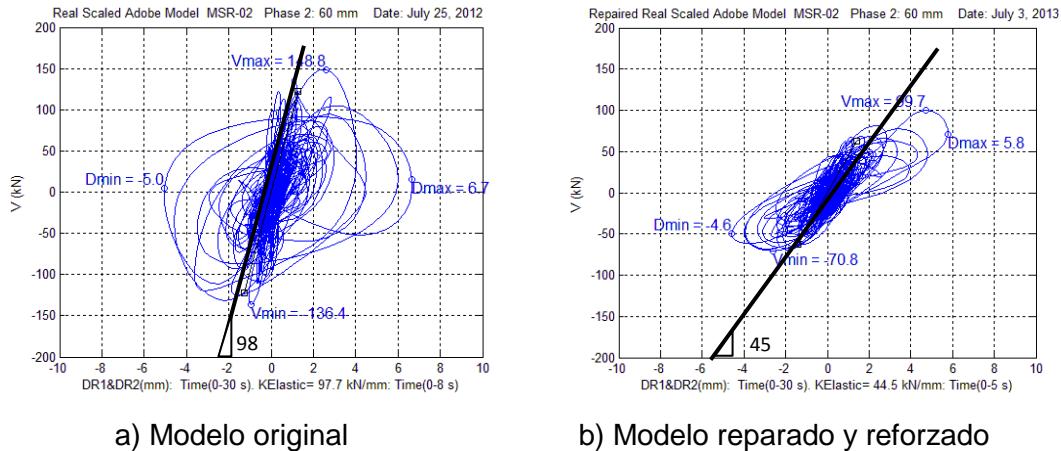


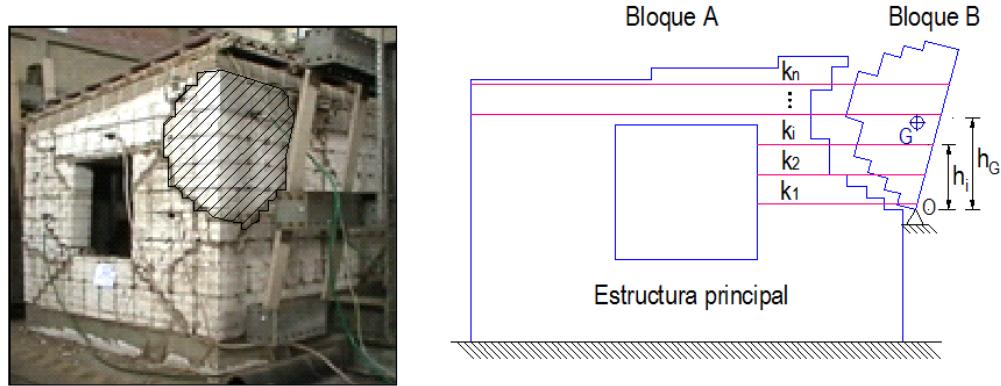
Figura 10. Cortante basal vs. máximo desplazamiento en la segunda fase de ensayo ( $D = 60$  mm)

La respuesta sísmica para movimientos de mayor intensidad ( $D = 130$  mm;  $D_{0max} = 128$  mm;  $A_{0max} = 1.53$  g) en la vivienda reforzada fue muy buena. El refuerzo mantuvo la integridad estructural entre el techo y los muros, controló los desplazamientos excesivos y evitó colapsos parciales. En conclusión, se preservó la integridad estructural.

## 7 PROCEDIMIENTO NUMÉRICO DE ANÁLISIS PRELIMINAR

En la mayoría de ensayos realizados en estructuras de adobe en la PUCP, se observó que los muros de adobe se rompen en grandes pedazos, que se separan y colapsan por volteo. En este proyecto, una porción del muro posterior (sombreada en la figura 11a) se separó de la estructura durante ensayos de simulación en el ambiente de adobe reforzado.

Un modelo numérico simplificado considera la estructura principal (bloque A) y el bloque B separado como se muestra en la figura 11b. Las cuerdas horizontales evitan el volteo del bloque B, situación expresada en el modelo dinámico de interacción.



a) Modelo a escala natural dañado      b) Modelo simplificado

Figura 11. Modelo simplificado de interacción de bloques de adobe

Este modelo simple fue usado para estimar las fuerzas en las cuerdas elásticas causadas por movimiento dinámico de la base. La figura 12 muestra el diagrama de cuerpo libre del bloque B; se incluyen las fuerzas de inercia causadas de traslación y rotación. El bloque rígido A está empotrado al terreno y tiene un desplazamiento absoluto  $X_0$ . El bloque rígido B, con masa  $m_B$  y momento central de inercia  $I_G$ , rota alrededor del punto O. El desplazamiento relativo (con respecto del punto O) de cualquier punto  $i$  localizado en el bloque B a la altura  $h_i$  está denotado por  $u_i$ . Un amortiguador viscoso (no mostrado para que el diagrama sea más entendible) con factor de amortiguamiento  $\zeta_B$  está unido al centro de masa G. Los ensayos de vibración libre realizados entre cada fase produjeron factores de amortiguamiento viscoso entre 9% y 12 %. La cuerda  $i$  tiene rigidez elástica  $k_i$  y está unida a los bloques A y B a la altura  $h_i$ .

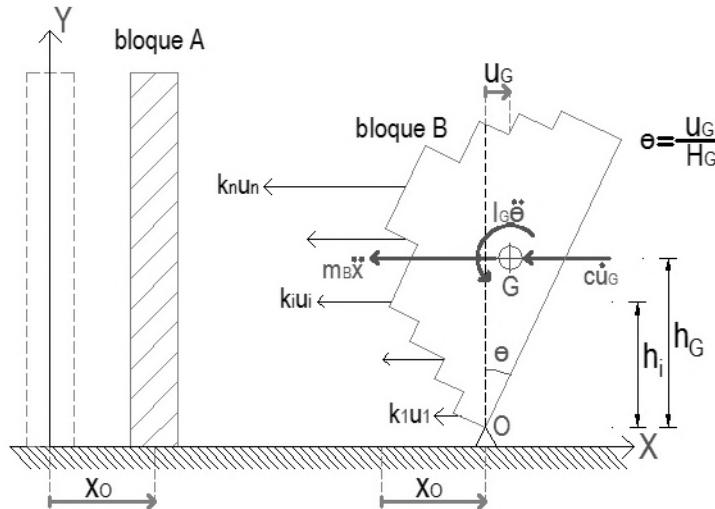


Figura 12. Diagrama de cuerpo libre del bloque B para un ángulo de rotación 'θ'.

La ecuación de movimiento del modelo, obtenido a través del equilibrio dinámico, es tal como sigue:

$$M_e \ddot{u}_G + C_e \dot{u}_G + K_e u_G = -m_B \ddot{x}_0 \quad (1)$$

$$M_e = \frac{1}{h_G^2} (I_G + m_B h_G^2) \quad (2)$$

$$K_e = \frac{\sum k_i h_i^2}{h_G^2} \quad (3)$$

$$C_e = 2\zeta_B \sqrt{K_e M_e} \quad (4)$$

donde  $M_e$  es la matriz equivalente de masa (kg),  $K_e$  es la matriz equivalente de rigidez (N/m) y  $C_e$  el coeficiente equivalente de amortiguamiento (N.s/m):

El periodo natural de vibración del sistema es el siguiente:

$$T_B = 2\pi \sqrt{M_e / K_e} \quad (5)$$

Si el espectro de respuesta de desplazamiento del terreno,  $S_d(T, \zeta)$ , es conocido, entonces el desplazamiento pico del centro de masa G del bloque es  $S_d(T_B, \zeta_B)$  y la fuerza en el cable  $i$  será la siguiente:

$$F_i = \frac{h_i}{h_G} k_i S_d(T_B, \zeta_B) \quad (6)$$

## 8 MODELO NUMÉRICO DEL AMBIENTE DE ADOBE

### Descripción del modelo numérico

Tal como se describió en la sección 4, el ambiente de adobe no presentó daño visible durante la primera fase de la simulación sísmica. Esta afirmación es corroborada con la figura 9a donde existe una tendencia lineal de la gráfica Fuerza vs Desplazamiento. Con base a estas dos afirmaciones, se asumió que el comportamiento del ambiente de adobe es aproximadamente elástico lineal durante la primera fase de simulación sísmica.

Para reproducir el comportamiento dinámico del ambiente de adobe durante la primera fase, se elaboró un modelo numérico elástico de elementos finitos. Se analizó el movimiento en la dirección Y+ (indicado en la figura 13b) análoga al ambiente de adobe. El desplazamiento y la aceleración máxima de la mesa fue  $D_{0\max} = 28,90$  mm y  $A_{0\max} = 0,31$  g respectivamente. Este modelo numérico se realizó en el programa SAP2000 (CSI, 2014). Se consideró que las unidades de adobe y el mortero forman un único material elástico, homogéneo e isotropo. El módulo de elasticidad de la mampostería de adobe del modelo fue calibrado para que el periodo del primer modo de vibración coincida con el periodo de vibración natural del ambiente de adobe (ver Tabla 1).

La figura 13 muestra el modelo numérico compuesto por elementos shell de cuatro puntos de integración (puntos de Gauss). La división de los shells fue tal que cada cuatro de ellos representen una unidad de adobe incluyendo el mortero que los une. La mayoría de los elementos para la albañilería y dinteles fueron shells de sección rectangular 70 mm x 90 mm y 0,25 m de espesor. La figura 13b muestra los listones de madera modelados como elementos shell (sección cuadrada de 50 mm de lado y 50 mm de espesor). El peso de las tejas de arcilla (24,5 N cada una) fue considerado como una carga distribuida en los nodos de los listones del modelo numérico. No se consideró el modelamiento de la cimentación de concreto y en lugar de ello se consideraron los muros empotrados a la base.

La viga collar real (figura 14a) tuvo relleno de barro dentro de los agujeros del armazón de madera para una mejor interconexión con los muros. Esta viga se modeló en SAP como un elemento de sección constante equivalente a la viga real. Las otras conexiones de los muros con los dinteles de caña y entre listones fueron del tipo rígida; es decir, perfectamente unidas.

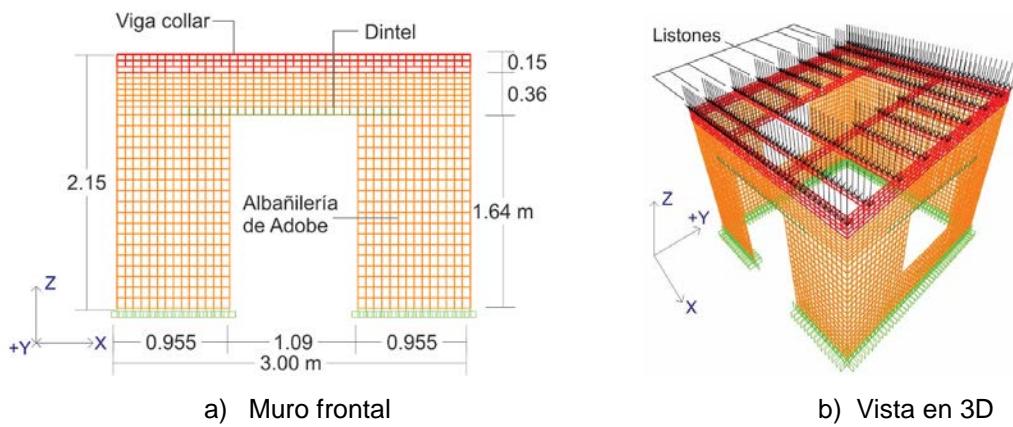


Figura 13. Modelo numérico representativo del ambiente de adobe

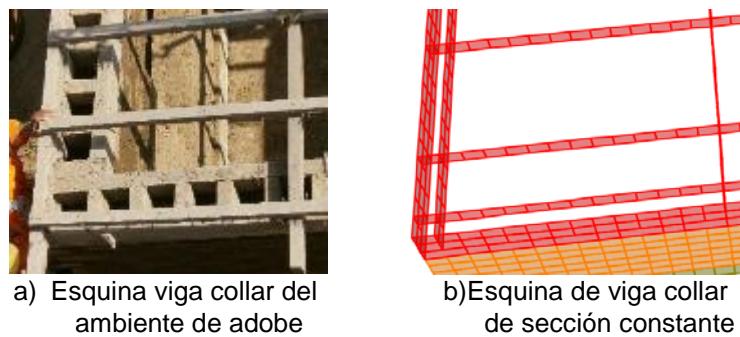


Figura 14. Modelamiento de la viga collar

En la Tabla 1 se resumen las propiedades consideradas en el modelo numérico.

Tabla 1. Propiedades elásticas de los materiales para el modelo numérico

Material	Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	Módulo de Elasticidad (MPa)	Coeficiente de Poisson	Referencia
Albañilería de adobe	16,7	250	0,20	Prototipo experimental
Madera Tornillo	7,0	12.750	0,20	(RNE Norma E.010, 2006)
Caña	6,5	6.500	0,20	(Groenenberg, 2010)

Para el análisis dinámico del modelo numérico se utilizó un amortiguamiento de 11% recomendado por Groenenberg (2010) y Tarque (2011).

La figura 15a muestra la respuesta de aceleraciones relativas a la base medida experimentalmente en la parte superior del muro derecho. La figura 15b muestra la respuesta análoga medida en el modelo numérico. De la comparación de estas figuras se puede apreciar congruencia en el instante de ocurrencia de la aceleración máxima en un sentido (aceleración positiva) y un error del 30% en el otro sentido (aceleración negativa). A pesar de esta limitación se observaron los esfuerzos en el muro transversal en el instante del máximo esfuerzo para evaluar la predicción de grietas en el modelo numérico.

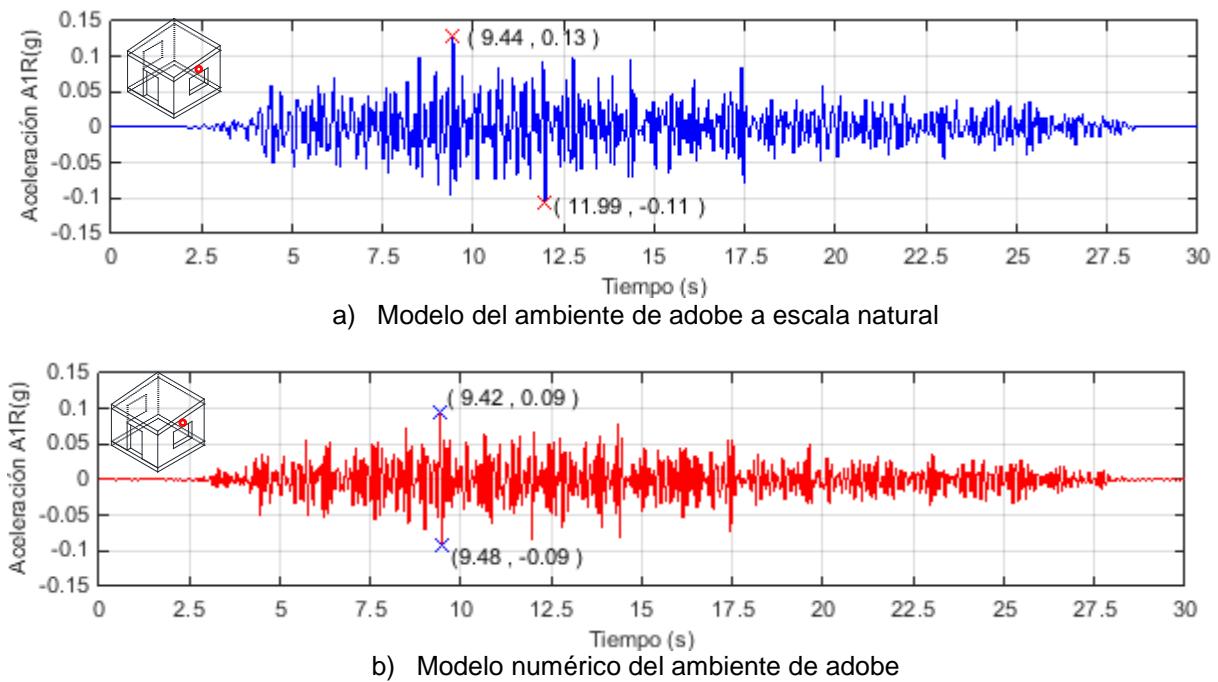


Figura 15. Respuesta de aceleraciones relativas a la base medida en la parte superior del muro derecho

### Esfuerzos máximos

La figura 16a muestra el muro derecho (vista exterior) en el instante del máximo esfuerzo principal en la esquina superior izquierda del vano (figura 16b) y en el instante del máximo esfuerzo principal en la esquina inferior derecha (figura 16c). La figura 16a no muestra el dintel ni la viga collar con el fin de visualizar solamente los esfuerzos en la albañilería de adobe.

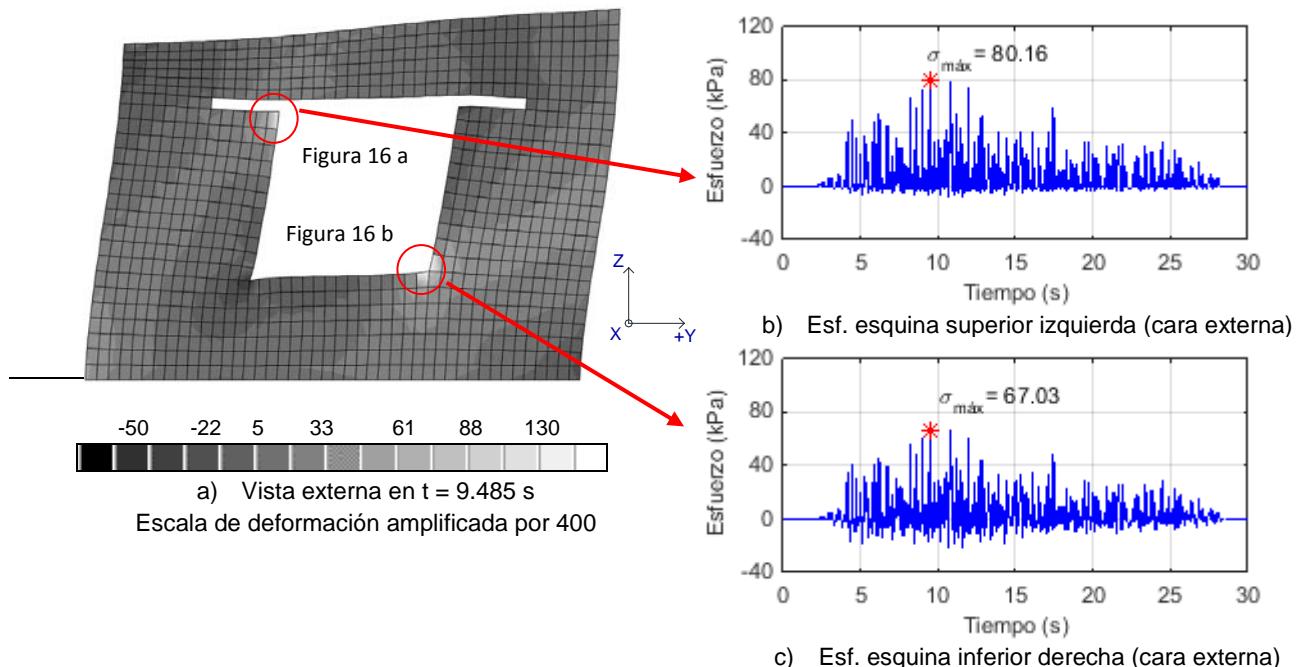


Figura 16. Esfuerzos máximos (kPa) en la cara externa del muro derecho en el instante  $t = 9.485$  s durante la primera fase de la simulación sísmica.

La escala de grises muestra la variación de esfuerzos máximos principales de tracción y compresión. Las zonas con concentración de esfuerzos máximos indican la posibilidad de

fisuración por tracción, tal como se verificó en el prototipo experimental luego de las fases 2 y 3.

### Rigidez lateral del modelo

La figura 17 muestra el comportamiento histerético real en ventanas de cada 10 s. La fuerza representa el cortante basal total del modelo y el desplazamiento es el promedio de los desplazamientos relativos medidos en la parte superior de los muros paralelos al movimiento. Cada sub-figura tiene una línea cuya pendiente representa la rigidez del sistema.

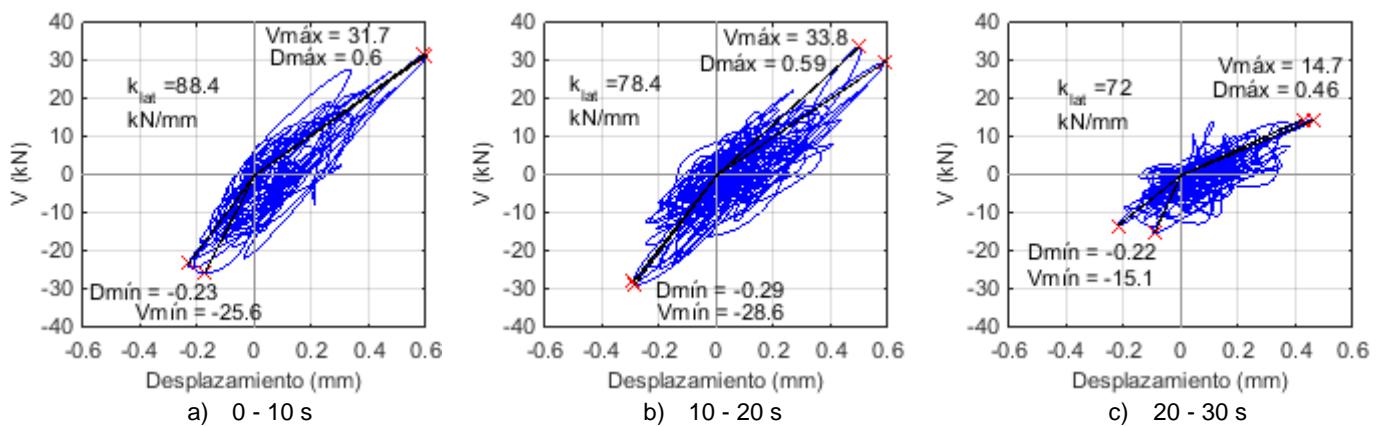


Figura 17. Cortante basal vs. desplazamiento promedio durante la primera fase de la simulación sísmica del prototipo

La figura 18 muestra la gráfica del cortante basal vs. desplazamiento promedio obtenida del modelo numérico durante los 30 s de duración del movimiento. La rigidez calculada fue 60 kN/mm, valor cercano al calculado experimentalmente especialmente en la ventana de tiempo de 20 a 30 s. El cortante máximo de 33,6 kN representa el 34.3% del peso total de la estructura. Este valor tiene relación con el 0.31 g de aceleración máxima de la fase 1. Además, el cortante máximo del modelo numérico es similar al calculado experimentalmente (ver figura 17b).

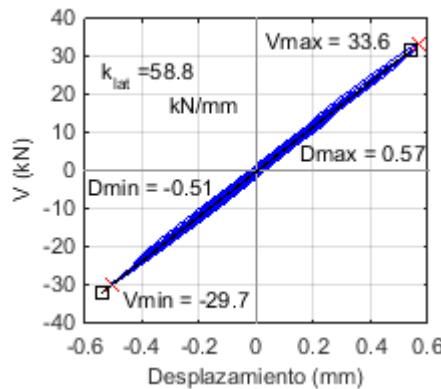


Figura 18. Cortante basal vs. desplazamiento promedio del modelo numérico al finalizar la primera fase de la simulación

La calibración del modelo utilizando el periodo del primer modo de vibración fue válida para obtener una similitud del instante de ocurrencia de la máxima aceleración de la parte superior del muro derecho. También, permitió predecir la ocurrencia de grietas en las esquinas de la ventana. Estos resultados validan la calibración del modelo numérico con las limitaciones de un análisis dinámico lineal.

## 9 CONCLUSIONES

El modelo de adobe a escala natural, ensayado bajo excitaciones dinámicas severas, fue adecuadamente protegido por una técnica de refuerzo consistente en la combinación del sellado de grietas sísmicas mediante barro líquido (grout) y un refuerzo externo de cuerdas de nylon (driza) que cubre todo los muros. La técnica combinada de reforzamiento mantiene la integridad estructural; se evita la degradación excesiva y sobretodo el colapso de los muros de adobe. Además, brinda un control de desplazamientos de la estructura fisurada durante el movimiento de alta intensidad.

El reforzamiento presentado tiene potencial para ser usado como reforzamiento sísmico de viviendas de bajo costo. Las cuerdas de nylon (driza) son relativamente baratas, de fácil uso y se encuentran en muchas zonas rurales del país.

El cálculo de la cuantía de cuerdas de nylon puede ser evaluado de una forma analítica asumiendo mecanismos de falla simplificados. Sin embargo, un modelo numérico de elementos finitos puede resolver mecanismos de falla más complejos y calcular también los esfuerzos en los que cada cuerda estaría sujeta ante un determinado evento sísmico. El modelo numérico lineal presentado en este artículo solamente da un indicio de las zonas de máximos esfuerzos a tensión y compresión; sin embargo, el desarrollo de la investigación contempla también el modelo de las cuerdas de nylon.

Por lo tanto, existe confianza que los resultados presentados aquí puedan contribuir a proteger el patrimonio de adobe y construir viviendas de adobe más seguras en países sísmicos en donde la construcción en tierra es la principal solución de vivienda de muchas familias.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Blondet M., Vargas J., and Groenenberg R. Evaluation of the efficacy of mud injection to repair seismic cracks on adobe structures via full-scale shaking table tests. 15th World Conference on Earthquake Engineering, 15WCEE. Lisbon, Portugal, 2012.
- Blondet M., Vargas J., Morales K., and Iwaki C. Estudio preliminar del uso de morteros de adobe para reparar grietas estructurales en construcciones históricas de adobe. Adobe USA 2007. El Rito, New Mexico, USA, 2007.
- Blondet M., Vargas J., Sosa C. A., and Soto, E. J. Refuerzo sísmico de construcciones de adobe mediante inyección de barro líquido y malla de cuerdas. Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra 14º SIACOT. Universidad Centroamericana José Simeón Cañas / UCA San Salvador, El Salvador. 2014.
- Blondet M., Vargas J., Sosa C. A., and Soto, E. J. Seismic simulation tests to validate a dual technique for repairing adobe historical buildings damaged by earthquakes. New Generation Earthen Architecture: Learning from Heritage. (pp. 269-276) Istanbul Aydin University. Istanbul, Turkey, 2013.
- CSI (Computers and Structures Inc.). CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, SAFE and CSiBridge, ISO No. GEN062708M1 Rev.11, Computers and Structures Inc., Berkeley, California, Estados Unidos de América, 2014.
- Tarque, N. Numerical Modeling of the Seismic Behavior of Adobe Buildings, Tesis para optar el Grado de Doctor en Filosofía en Ingeniería Sísmica, Universidad de Pavía, Pavía, Italia, 2011.
- Groenenberg R. The reparation of adobe constructions damaged by earthquake loading and development of an ATENA-GiD model to simulate shaking table tests for these structures. MSc. Thesis, PUCP, Lima, Peru, 2010.
- ICOMOS (International Council of Monuments and Sites). International letter related to Conservation and Restoration of Historical Monuments. Venice, Italy, 1964.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al personal del laboratorio de estructuras de la PUCP y a todos los que hicieron posible la realización de este proyecto.

## AUTORES

Marcial Blondet. Profesor Principal. Ingeniero Civil (PUCP, 1973), Magíster y Doctor (PhD) en ingeniería sismorresistente (UC Berkeley, 1979 y 1981). Director de programas de Doctorado en Ingeniería. Especialista en ingeniería sísmica y dinámica de estructuras. Interesado en el estudio de sistemas de protección sísmica de edificaciones, refuerzo de bajo costo para viviendas de mampostería de ladrillo y de adobe, y protección sísmica de monumentos históricos de tierra.

Julio Vargas. Profesor Principal. Ingeniero Civil (PUCP). Primer Jefe Departamento de Ingeniería 1969). Primer Investigador a Tiempo Completo en Áreas de Construcción con Tierra e Ing. Sismo Resistente (1978-1885). Miembro de Comisión Académica y Consejo Universitario en dos períodos. Premio Nacional de Cultura 1985-86 en Ciencias Aplicadas y Tecnología. Miembro de 4 Comités Científico Internacionales Permanentes del Consejo Internacional de Monumentos y Sitios, ICOMOS.

Nicola Tarque. Profesor Asociado (PUCP) y colaborador de la Sociedad de Ingeniería EWA ([www.projectewa.com](http://www.projectewa.com)). Recientemente, ha participado como investigador Post Doctoral en la Universidad de Boloña y Gabriele d'Annunzio, ambas instituciones italianas. Sus últimas investigaciones tratan sobre el análisis del riesgo sísmico de las casa de adobe, modelos numéricos de estructuras, evaluación de la amplificación sísmica de las ondas.

Jonathan Soto. Profesor contratado. Ingeniero Civil (UNSAAC), Magíster en Ingeniería Civil (PUCP, 2014). Co-investigador en la Sección Civil, PUCP. Coordinador técnico del proyecto "FISURAS V - PUCP." Miembro del grupo GERDIS. Ganador de la "Beca Aristóteles: Reconocimiento a la trayectoria académica en la escuela de Posgrado PUCP. Interesado en el estudio en ingeniería sismoresistente, protección sísmica y refuerzo sísmico de viviendas y monumentos históricos de tierra.

Carlos Sosa. Profesor contratado. Ingeniero Civil (UNSA, 2008), Magíster en Ingeniería Civil (PUCP, 2014). Co-investigador en la Sección Civil de la PUCP. Miembro del grupo "Centro tierra" de la PUCP. Interesado en investigación de protección sísmica y económica para edificaciones de tierra. Ponente en diversos talleres de capacitación de reforzamiento de estructuras de adobe dentro y fuera del Perú.

Javier Sarmiento. Investigador de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) y candidato a Magíster en Ingeniería Civil de la PUCP. Se encuentra participando en un proyecto de investigación del grupo de investigación GERDIS para determinar el reforzamiento de viviendas de adobe utilizando cuerdas sintéticas.

# DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS DE PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHOS DE TINTAS PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL MANUFATURADAS COM PIGMENTOS DE SOLOS

**Fernando P. Cardoso<sup>1</sup>; Rita de Cássia S.S. Alvarenga<sup>2</sup>; Anôr Fiorini de Carvalho<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Dep. de Engenharia Civil UFV/ Rede PROTERRA/Rede TerraBrasil, MG, Brasil, fernando.cardoso@ufv.br

<sup>2</sup> Dep. de Engenharia Civil UFV, MG, Brasil, ritadecassia@ufv.br

<sup>3</sup> Dep. de Solos UFV, MG, Brasil, afiorini@ufv.br

**Palavras-chave:** processos de produção, desempenho, tintas com pigmentos de solos.

## Resumo

Neste trabalho foram desenvolvidos processos de produção de tintas para a construção civil que utilizam os solos como fonte de pigmentos, na perspectiva da criação de uma tecnologia social. Foram coletados três solos representativos das cores e ocorrência no município de Viçosa-MG. O disco Cowles foi aperfeiçoado e usado para dispersar as partículas dos solos e selecionar as de menores tamanhos ( $<0,18$  mm). Por meio do delineamento experimental de misturas, foram produzidas misturas ternárias e quaternárias, cada qual utilizando um tipo de resina. O desempenho das misturas foi avaliado quanto aos poderes de cobertura seco e úmido e à resistência à abrasão, de acordo com os limites estabelecidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT para tintas látex da categoria econômica. A viscosidade e o pH foram medidos e relacionados ao desempenho das misturas. Os resultados obtidos indicaram que em nenhuma das misturas foi possível obter formulações que atendessem a todos os requisitos de desempenho simultaneamente, e que as misturas quaternárias proporcionaram os melhores resultados. O pH exerceu forte influência sobre o desempenho das tintas, no que se refere à viscosidade, à resistência à abrasão e aos poderes de cobertura. As misturas quaternárias e a dispersão mecânica mostraram-se como alternativas promissoras para a adoção como tecnologia social.

## 1. INTRODUÇÃO

O propósito deste trabalho é contribuir com o desenvolvimento de uma tecnologia social<sup>1</sup>, iniciado pelo projeto Cores da Terra no ano de 2005. A criação do projeto foi motivada pela situação da maioria das edificações periurbanas, que não possui pintura devido ao custo elevado dos produtos voltados para o acabamento, e a perda do conhecimento tradicional da técnica de execução de pinturas com solos, denominada popularmente de barreado.

Barrear consiste em aplicar solos argilosos, geralmente a tabatinga<sup>2</sup>, diluídos em água sobre paredes construídas com terra – pau-a-pique e adobe – com o uso de um pano. Devido à compatibilidade entre o material utilizado para a construção das paredes e aquele utilizado para a pintura, ou seja, a terra, o barreado se comporta bem, apenas requerendo manutenções periódicas como qualquer pintura (Cardoso et al, 2014). No entanto, o barreado não adere bem às superfícies de alvenaria, revestidas com argamassas à base de cimento e/ou cal, devido à redução da porosidade e à incompatibilidades físico-químicas.

Conhecida a problemática da baixa aderência, foi proposta a adição da resina poliacetato de vinila (PVA) à terra diluída em água, numa proporção em volume de 1:2:2 de PVA, terra e água, com o objetivo de produzir tintas látex. Com essa medida, o projeto passou a disseminar a “nova técnica” por meio de atividades que resultaram na capacitação de pintores que, a partir de então, prestam o serviço de pintura com terra. Os relatos dos

<sup>1</sup> Segundo Dagnino (2009), tecnologia social compreende produtos, técnicas e/ou metodologias reaplicáveis, desenvolvidas na interação com a comunidade e que represente efetivas soluções de transformação social.

<sup>2</sup> A palavra tabatinga é de origem indígena, vindo do tupi (towa'tinga) e tendo seu significado designado como barro branco ou barro esbranquiçado (Houaiss, 2001).

usuários sobre o desempenho das tintas de terra são, na maioria, satisfatórios. Porém, registrou-se a dificuldade de se obter suspensões estáveis com os solos, devido à decantação das partículas, que compromete a homogeneidade das tintas e o trabalho de pintura (Fontes et al, 2013).

Apesar da grande difusão, o conhecimento dos fatores que determinam o desempenho das tintas de terra é pouco conhecido. Portanto, o objetivo deste trabalho é desenvolver processos de produção e avaliar o desempenho de tintas manufaturadas com pigmentos de solos provenientes da região de Viçosa – MG e resinas à base de PVA, de acordo com os requisitos mínimos determinados pela norma NBR 15079 (ABNT, 2011) para tintas da categoria látex econômica.

Trata-se, contudo, de um trabalho de caráter exploratório, que propõe alternativas para uma problemática conhecida, submete-as a ensaios para medir o desempenho e avalia as respostas sem aprofundar o estudo dos fatores intrínsecos que as determinaram.

É sabido, conforme afirma Uemoto (1993), que a tinta, na forma de pigmentos suspensos em um fluido, existe desde os tempos pré-históricos como pintura decorativa. Naquela época, os desenhos eram feitos com minerais como a gibbsita ou limonita, facilmente removíveis. Posteriormente, o homem descobriu que para obter algo mais permanente era necessário fixar a cor por meio de uma camada de cola, obtida de fontes proteicas como o leite e clara de ovo. Entre os anos 3000 a 2000 a.C. os egípcios já decoravam suas paredes com têmpera, que é uma pintura constituída por cal e cola. E, no Egito, onde o clima é bem seco, utilizava-se giz, carvão, argilas vermelhas, amarelas e verdes para obtenção de diferentes cores, e, como cola, eram utilizados goma arábica, ovo, gelatina e cera de abelha.

As tintas em geral são compostas pelos componentes: solvente, resina e pigmento: os solventes são usados para solubilizar outros materiais. Em composições de tintas e de revestimentos são geralmente usados para dissolver a resina e manter todos os componentes em mistura homogênea; a resina é a parte não volátil da tinta, que serve para aglomerar as partículas de pigmentos. A resina também denomina o tipo de tinta ou revestimento empregado. Assim, por exemplo, têm-se as tintas acrílicas, alquídicas, epoxídicas, etc. Todas levam o nome da resina básica que as compõe (Fazenda, 2005); o pigmento é uma substância colorida finamente dividida, que passa seu efeito de cor a outro material, quer quando bem misturado a ele, quer quando aplicado sobre sua superfície em uma camada fina (Maier, 2006).

As tintas devem apresentar desempenho compatível com a sua finalidade. Para o caso das tintas látex, a ABNT NBR 15079: 2011 estabelece os requisitos de desempenho para três categorias de tintas, denominadas econômica, standard e premium. As tintas são enquadradas nas referidas categorias de acordo com o desempenho apresentado quando submetidas aos ensaios indicados pela referida norma.

Portanto, este trabalho tem por objetivo atender aos limites estabelecidos para a categoria látex econômica, apresentados na tabela 1, com formulações de tintas que utilizam os solos como fonte de pigmentos.

Tabela 1 – Limites mínimos dos requisitos de desempenho para a categoria látex econômica (ABNT NBR 15079: 2011).

Requisitos	Método de ensaio	Unidade	Limites mínimos
PCS <sup>1</sup>	NBR 14942	m <sup>2</sup> /L	4,0
PCU <sup>2</sup>	NBR 14943	%	55,0
RAU <sup>3</sup>	NBR 15078	Ciclos	100,0

<sup>1</sup> Poder de cobertura da tinta seca; <sup>2</sup> Poder de cobertura da tinta úmida,

<sup>3</sup> Resistência à abrasão úmida sem pasta abrasiva.

O enfoque no desenvolvimento de uma tecnologia social conduziu a realização de um estudo que adapta todos os seus materiais e processos à realidade da autoprodução, ou

seja, que utiliza materiais acessíveis e de baixo custo, e processos de fácil apreensão e replicação, conforme apresentado em Material e Métodos.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

A produção de tintas obedece a uma série de processos que envolvem a definição, o tratamento e a mistura de seus componentes de acordo com requisitos determinados por normas, como a ABNT NBR 15079: 2011.

Para realizar este trabalho, todos os processos foram desenvolvidos para um contexto de autoprodução, ou seja, em que possam ser apropriados com facilidade. As referências iniciais foram as experiências desenvolvidas pelo projeto Cores da Terra, da Universidade Federal de Viçosa – UFV, somadas aos processos desenvolvidos pela indústria de tintas e aos processos usuais em tecnologia cerâmica e ciência dos solos para a caracterização e tratamento dos solos/pigmentos.

Tais conhecimentos foram integrados, adaptados e experimentados em ensaios preliminares, que tiveram por objetivo compreender as interações dos componentes e suas influências sobre o aspecto e o desempenho das tintas, para, com isso, poder indicar os limites de consumo de cada componente das misturas, elaborar os delineamentos experimentais e gerar as séries de misturas que foram testadas.

### 2.1. Seleção, extração e dispersão mecânica dos pigmentos de solos

Os pigmentos utilizados foram extraídos de solos e serão referidos como dois tipos principais, doravante denominados como solos e pigmentos. O material denominado “solo” refere-se ao solo em seu estado natural sem nenhum tratamento prévio. O material denominado “pigmento” refere-se ao solo tratado com dispersão mecânica e posterior peneiramento.

Foram coletados três solos ocorrentes na paisagem de Viçosa-MG, representativos das cores disponíveis e adotados para produzir tintas pela população local. As amostras de solos coletadas foram denominadas: B (branca), A (amarela) e V (vermelha).

A amostra B foi obtida na Comunidade Córrego dos Barros em horizonte subsuperficial de gleissolos ocorrentes nos leitos maiores dos cursos d’água (Campos, 1999). A amostra A foi obtida no Bairro Violeira, em horizonte subsuperficial de argissolos ocorrentes nos terraços fluviais (Corrêa, 1984; Naime, 1988). E a amostra V foi obtida nas proximidades do portão de acesso à UFV pela rodovia BR 120 em horizonte subsuperficial de latossolos vermelhos ocorrentes nas elevações convexas (Corrêa, 1984).

Os solos foram submetidos à dispersão mecânica em água com disco Cowles, acoplado em furadeira com motor de 900 W, a 1500 rpm. A dispersão mecânica teve por objetivo destruir os aglomerados e os agregados naturais para expor as partículas das argilas. O tempo de dispersão foi de 30 minutos para cada solo. Em seguida, o material foi peneirado em tecido de nylon, com trama de fios soldados e orifício quadrado com lado medindo 0,18 mm (80 mesh).

### 2.2. Caracterização dos solos/pigmentos

As análises tiveram por finalidade descrever as características dos solos. As análises físicas e químicas foram realizadas antes e após a dispersão mecânica e peneiramento, com o objetivo de avaliar comparativamente os efeitos da dispersão mecânica sobre as características do material. Além das caracterizações físicas e químicas, os pigmentos também foram caracterizados quanto à cor.

A caracterização física constou das seguintes análises: Granulometria (EMBRAPA, 1997); Densidade de partículas (EMBRAPA, 1997); Argila dispersa em água (EMBRAPA, 1997); Índices de dispersão e floculação (EMBRAPA, 1997); Superfície específica (BET – Branauer; Emmett; Teller, 1938).

Também foram analisadas as principais características químicas para classificação de solos de acordo com os respectivos métodos de análise (EMBRAPA, 1997): pH em  $H_2O$  e em KCl 1 mol  $L^{-1}$ ; Fósforo disponível; Bases trocáveis; Soma de bases (valor SB); Acidez; Capacidade de troca catiônica (t e T); Percentagem de saturação por bases (valor V); Percentagem de saturação por  $Al^{3+}$  (valor m); Matéria orgânica (MO); Fósforo remanescente (P-Rem).

### 2.3. Ensaios preliminares

Os ensaios preliminares tiveram por objetivo obter os intervalos e proporções dos componentes a serem utilizados para a produção das amostras de tintas.

#### 2.3.1. Ensaio de deflocação

O objetivo de se realizar o ensaio de deflocação foi determinar a quantidade de dispersante necessária para realizar a máxima dispersão das partículas das argilas.

A dispersão química baseia-se no incremento da repulsão entre partículas. De acordo com Ruiz (2005), tal situação se dá pelo aumento da dupla camada difusa mediante a saturação do complexo de troca catiônica com  $Na^+$ . O cátion trocável  $Na^+$  tende a dispersar os aglomerados das partículas de argila no meio aquoso (Santos, 1975).

O ensaio de deflocação é realizado medindo-se a viscosidade em viscosímetros a cada adição de dispersante à massa. Com os dados obtidos, constrói-se a curva de deflocação, que relaciona a viscosidade com a massa de dispersante. O ponto mínimo de viscosidade é o que corresponde à máxima dispersão dos agregados de partículas (Santos, 1975).

A massa de pigmento defloculado foi de 200 g, o dispersante utilizado foi o NaOH da marca *Escorpião*, com 98% de pureza, e a viscosidade foi medida em viscosímetro de *Brookfield*. A curva correspondente ao pigmento B indica que são necessários 0,3 g de NaOH (3 ml de solução 2,5 mol  $L^{-1}$ ) para alcançar a viscosidade mínima e desta forma realizar a dispersão; para A são necessários 0,6 g de NaOH e para V são necessários 0,5 g de NaOH.

#### 2.3.2. Definição da quantidade de resina

A quantidade de resina foi definida de acordo com Uemoto (2005) que indica que a faixa de consumo para tintas látex é de 4,3 a 13 % em massa. Para ajustar a faixa foram produzidas amostras de tinta com variações nos consumo de resina e, em seguida, realizados ensaios para a determinação da resistência à abrasão em equipamento adaptado, baseando-se no método determinado pela NBR 15078 (ABNT, 2004).

Como o propósito deste trabalho é desenvolver uma tecnologia de baixo custo, e considerando que a resina é o componente mais caro, foram realizados testes com o objetivo de alterar o PVA, em busca de melhores resultados. O uso do PVA se deve a duas razões: ser solúvel em água e facilmente encontrado no mercado. Para realizar as alterações, também se considerou a facilidade de acesso aos demais componentes, além do processo de produção, que deve ser simples e não acarretar riscos à saúde do usuário.

Os resultados dos ensaios preliminares apresentaram resultados favoráveis apenas para o PVA e o "PVOH". Portanto, estas foram as resinas aplicadas neste estudo.

O PVA utilizado foi o da marca *Cascarez*, categoria Universal, também utilizado para produzir o "PVOH" (polivinil álcool), composto por PVA, álcool etílico e NaOH. O álcool etílico utilizado foi o de 46% GL e o NaOH foi o da marca *Escorpião*, com 98% de pureza.

#### 2.3.3. Teor de sólidos e viscosidade

A definição do teor de sólidos foi baseada em Uemoto (2005), que indica as faixas usuais para tintas látex, sendo: Teor de sólidos total: 35,6 a 52,0% em massa; Teor de pigmentos: 30,0 a 45,9% em massa.

Para determinar as faixas ideais de viscosidade, foram produzidas amostras de tinta com cada solo definido, variando-se as proporções dos componentes. Em seguida, foram escolhidas as amostras que apresentavam viscosidade aparente similar à de tintas

convencionais e, por fim, as viscosidades foram medidas no viscosímetro de Brookfield. Das medidas, definiu-se o limite máximo aceitável para a viscosidade.

#### 2.3.4. Definição dos demais componentes, intervalos e proporções

As restrições experimentais que culminaram na definição dos limites do intervalo de cada componente no delineamento foram baseadas em aspectos técnicos, testados nos ensaios preliminares. Na Tabela 2 estão apresentados os limites inferior e superior de cada fator estudado, de acordo com cada tipo de mistura.

Tabela 2 – Limites inferior e superior dos fatores água, solução de NaOH, PVA e álcool para as misturas ternárias e quaternárias determinados para experimento de mistura para produção de tintas a partir dos pigmentos B, A e V

Mistura e Fatores		Limite inferior (%)			Limite superior (%)		
		B	A	V	B	A	V
Ternária	X	56,69	56,24	56,39	64,29		
	Pigmentos	28,57			28,57		
	Y	0			0,45	0,9	0,75
	Z	7,14			14,29		
Quaternária	X	23,48	23,37	23,41	42,27	42,13	46,46
	Pigmento	26,56	26,46	26,49	26,56	26,46	26,49
	Y	0			0,42	0,84	0,7
	Z	6,64	6,61	6,62	13,28	13,23	13,25
	W	18,13	18,7	18,08	36,25	36,11	36,16

Fatores: X: Água; Y: Solução de NaOH; Z: PVA; W: Álcool

Restrições experimentais: teor de sólidos total: aproximadamente 35% em massa; teor de pigmentos: aproximadamente 30% (proporções dos pigmentos fixas); consumo de resina: entre 7% e 14% em massa, aproximadamente; consumo de solvente: entre 55% e 65%, aproximadamente (para o caso das misturas quaternárias, foi considerado o somatório de água e álcool); Consumo de dispersante: limite mínimo 0% e o máximo aquele definido pelo ensaio de deflocação para cada pigmento.

#### 2.4. Delineamento experimental

Para definir as misturas a serem testadas, foi elaborado um delineamento em vértices extremos de grau um, aumentado com pontos central e axiais, com o uso do software *Minitab 16*. O delineamento em vértices extremos é um procedimento para conduzir experimentos quando os componentes das misturas impõem restrições quanto às suas proporções, ou seja, com limites inferior e superior diferentes de zero e um, respectivamente (Mclean; Anderson, 1966).

A partir de um delineamento de misturas, a resposta ou propriedade muda somente quando são feitas alterações nas proporções dos componentes que fazem parte dessa mistura. Portanto, a finalidade principal de se utilizar essa metodologia é verificar como as respostas ou propriedades de interesse são afetadas pela variação das proporções dos componentes da mistura (Gomes et al, 2005) e, além disso, diminuir o número de experimentos necessários para determinar propriedades ótimas do sistema em estudo.

De acordo com o tipo de mistura testada (ternária ou quaternária) e o pigmento (B, A e V), os agrupamentos de misturas foram denominados misturas B1-14, A1-14 e V1-14 (ternárias) e misturas B15-31, A15-31 e V15-31 (quaternárias).

#### 2.5. Produção de amostras

Foram produzidas misturas ternárias e quaternárias com cada pigmento, sendo os componentes das ternárias a água (X), a solução de NaOH (Y) e o PVA (Z); e os das

quaternárias a água (X), a solução de NaOH (Y), o PVA (Z) e o álcool etílico (W); a proporção de pigmento foi fixada nesse estudo.

Para cada pigmento, foram produzidas 31 amostras de tinta, sendo 14 misturas ternárias e 17 quaternárias. O volume final de cada amostra produzida foi de 600 ml.

## 2.6. Medição da viscosidade e do pH

A viscosidade (V) foi medida ao final da produção de cada amostra, com viscosímetro de *Brookfield*. Foram realizadas 3 medidas em cada amostra, em intervalos de tempo definidos (5, 15 e 30 min), sendo adotado o resultado obtido na terceira medição. O pH final de cada amostra foi medido com pHmetro com eletrodo de vidro.

O limite máximo definido para a viscosidade, de acordo com os ensaios preliminares, foi de 400 cP, valor que permitiu boas condições de aplicação das tintas.

Para o caso do pH, segundo Yamak (2013), o valor ótimo para as emulsões de acetato de vinila está compreendido entre 4,5 e 5,5. Portanto, o limite máximo de 5,5 foi adotado como referência neste trabalho.

## 2.7. Ensaios de desempenho

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho de acordo com os limites estabelecidos para tintas da categoria Látex Econômica. Os requisitos avaliados são o poder de cobertura da tinta seca (ABNT NBR 14942:2012), poder de cobertura da tinta úmida (ABNT NBR 14943:2003), resistência à abrasão úmida sem pasta abrasiva (ABNT NBR 15078:2004). Os ensaios foram realizados por laboratório credenciado pelo INMETRO, com recursos do projeto “Cores da Terra Pintando o Brasil”, financiado pela FINEP.

## 2.8. Análise estatística

Após obtenção das respostas para os pontos dos delineamentos experimentais, foram ajustados modelos polinomiais de mistura aos dados experimentais.

Primeiro, ajustou-se aos dados experimentais o modelo cúbico completo e em sequência os modelos de menor grau (modelo cúbico especial, quadrático e linear).

Os termos não significativos ( $p$ -valor  $> 0,05$ ), partindo dos de maior grau para os de menor grau, foram retirados, um a um, sendo realizada nova análise a cada termo retirado. E também se recorreu ao coeficiente de determinação ( $R^2$ ), para verificar o ajustamento do modelo.

Todas as análises foram feitas no software estatístico *Minitab 16*, bem como os gráficos de frequência das respostas estimadas pelo modelo de mistura.

# 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 3.1. Caracterização física

A Tabela 3 apresenta os resultados da caracterização física dos solos e dos pigmentos correspondentes.

Tabela 3 – Resultados da caracterização física

Parâmetro	B		A		V	
	Solo	Pigmento	Solo	Pigmento	Solo	Pigmento
Granulometria	Areia grossa (%)	1	0	1	0	13
	Areia fina (%)	1	0	1	1	11
	Silte (%)	26	27	40	45	6
	Argila (%)	72	73	58	54	70
Classe textural	Muito argilosa	Muito argilosa	Argila siltosa	Argila siltosa	Muito argilosa	Muito argilosa

Densidade de partículas (kg/dm <sup>3</sup> )	2,52	2,47	2,55	2,53	2,6	2,5
Argila dispersa em água (%)	20	28	1	1	1	2
Índice de dispersão (%)	20	38	1,72	1,85	1,19	2,85
Índice de floculação (%)	62	80	98,28	98,15	97,15	98,81
Superfície específica (m <sup>2</sup> /g)	23,98	24,19	30,47	30,83	31,74	44,66

### 3.2. Caracterização química

A Tabela 4 apresenta os resultados da caracterização química dos solos e dos pigmentos correspondentes.

Tabela 4 – Resultados da caracterização química

Parâmetro	B		A		V	
	Solo	Pigmento	Solo	Pigmento	Solo	Pigmento
pH H <sub>2</sub> O	5,06	4,81	5,74	5,93	5,39	5,96
pH KCl	4,64	4,61	5,33	6,16	6,08	6,22
P (mg/dm <sup>3</sup> )	0,3	0,9	3,3	2,2	1,1	1,1
K <sup>+</sup> (mg/dm <sup>3</sup> )	2	7	7	25	9	15
Ca <sup>2+</sup> (mg/dm <sup>3</sup> )	0	0,38	0	1,27	0	1
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>ø</sub> /dm <sup>3</sup> )	0,01	0,08	0,22	0,21	0,05	0,2
Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>ø</sub> /dm <sup>3</sup> )	1,3	0,88	0,1	0	0	0
H + Al (cmol <sub>ø</sub> /dm <sup>3</sup> )	3,3	2,7	3,5	1,3	2,5	1,3
SB (cmol <sub>ø</sub> /dm <sup>3</sup> )	0,02	0,48	0,24	1,54	0,5	1,24
t (cmol <sub>ø</sub> /dm <sup>3</sup> )	1,32	1,36	0,34	1,54	0,5	1,24
T (cmol <sub>ø</sub> /dm <sup>3</sup> )	3,32	3,18	3,74	2,84	3	2,54
V (%)	0,6	15,1	6,4	54,2	16,7	48,8
m (%)	98,5	64,7	29,4	0	0	0
MO (dag/kg)	1,15	1,01	0,38	0,38	0,13	0,38
P-Rem (mg/L)	27,9	38,2	4,6	13,6	3,4	2,2

P: Fósforo disponível; K<sup>+</sup> Ca<sup>2+</sup> Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup>: Bases trocáveis; H + Al: Acidez; SB: Soma das bases; t: CTC (capacidade de troca catiônica) efetiva; T: CTC a pH 7,0; V: Percentagem de saturação por bases; m: Percentagem de saturação por Al<sup>3+</sup>; MO: Matéria orgânica; P-Rem: Fósforo remanescente.

Os resultados das caracterizações indicam que, após o processo de dispersão mecânica e peneiramento, ocorreram incrementos da CTC e da superfície específica, eliminação total da fração areia grossa e quase total da fração areia fina, incremento da fração silte e incremento da fração argila para B e V.

Os resultados indicam que, apenas com a dispersão mecânica não se obteve a estabilidade desejada, devido à tendência do material à floculação, que diminui gradualmente de V para B, justificando-se então o incremento da dispersão com o dispersante químico NaOH.

### 3.3. Cor

De acordo com a Carta de Solos de Munsell (1975), o pigmento B apresentou matiz 10YR, valor 8 e croma 2; o pigmento A apresentou matiz 10YR, valor 7 e croma 8; e o pigmento V apresentou matiz 2,5YR, valor 5 e croma 8.

### 3.4. Desempenho, viscosidade e pH

A Tabela 5 apresenta os resultados dos ensaios de desempenho e das medições de Viscosidade e pH. Estão marcados em negrito os resultados satisfatórios, de acordo com os requisitos da norma ABNT NBR 15079: 2011.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios de desempenho e medições de Viscosidade e pH

Misturas e ensaios	B						A						V					
	PCS	PCU	RAU	V	pH	PCS	PCU	RAU	V	pH	PCS	PCU	RAU	V	pH	PCS	PCU	pH
Ternárias	1	4	23	88	430	4	4	37	55	500	5	3	77	10	398	6		
	2	3	27	200	985	4	4	36	93	2400	5	4	69	496	280	6		
	3	4	25	88	970	4	4	36	12	680	5	4	65	54	340	5		
	4	4	23	26	390	4	3	35	22	900	5	4	69	319	250	5		
	5	3	25	200	975	4	4	36	41	820	5	4	69	78	208	5		
	6	5	42	6	3100	4	5	38	35	900	7	4	67	102	860	6		
	7	6	41	11	4100	5	5	34	8	230	8	4	69	496	280	6		
	8	5	43	27	2800	5	5	37	22	280	7	4	75	32	310	7		
	9	6	43	46	5400	4	5	36	67	970	7	4	65	127	840	7		
	10	5	41	10	3000	5	4	34	23	390	6	5	71	93	840	7		
	11	9	42	58	3000	5	5	34	42	1150	7	4	69	122	720	8		
	12	8	45	95	8600	4	5	33	73	735	8	4	67	33	780	7		
	13	6	40	10	1860	5	5	32	68	980	6	3	67	14	740	5		
	14	5	43	5	415	6	4	34	262	1100	6	4	76	42	800	7		
Quaternárias	15	4	35	172	4000	4	4	23	31	205	8	4	52	318	620	6		
	16	6	39	117	2400	5	4	29	304	225	7	4	26	50	460	7		
	17	7	36	6	2100	4	4	27	186	540	5	4	45	64	500	7		
	18	4	33	16	2100	5	5	29	45	278	7	3	35	118	520	7		
	19	8	33	141	990	6	4	30	27	310	7	3	25	12	600	7		
	20	7	41	89	5800	4	4	32	169	355	7	3	39	55	180	7		
	21	8	32	42	2400	5	3	31	259	420	7	3	50	247	720	5		
	22	7	33	15	275	6	5	27	11	230	8	4	40	95	600	6		
	23	8	33	87	3800	4	5	29	39	290	7	3	46	140	600	7		
	24	10	34	18	2100	5	6	30	15	195	6	4	26	161	500	6		
	25	7	32	14	615	5	5	29	152	350	6	4	48	33	520	6		
	26	6	32	7	390	6	5	26	29	175	6	3	20	141	220	7		
	27	5	35	112	2500	5	5	18	71	195	6	3	39	133	240	7		
	28	6	34	15	2200	5	5	23	28	235	6	4	33	84	255	7		
	29	9	33	8	2200	4	4	18	133	230	6	4	40	153	250	7		
	30	8	34	60	3000	5	5	22	43	200	6	4	38	50	580	7		
	31	5	33	13	1000	5	4	20	66	170	8	3	41	85	520	7		

PCS: m<sup>2</sup>/L; PCU: %; RAU: ciclos; V: cP (centipoises)

Uma avaliação geral dos resultados obtidos indicou que o limite estabelecido para o PCS foi alcançado pela maioria das misturas; o limite mínimo para o PCU foi alcançado apenas pela mistura ternária correspondente ao pigmento V; e o limite mínimo para a RAU foi alcançado em todas as misturas, mas em um número reduzido de amostras.

As dificuldades encontradas para atender aos limites dos requisitos de desempenho estabelecidos pela ABNT NBR 15079: 2011 se devem ao caráter restritivo do experimento, ou seja, para pequenas variações de consumo dos componentes, as respostas se alteram significativamente. Dado o caráter exploratório deste trabalho, tal situação é desejável, pois o que se busca é compreender a influência de cada componente sobre o desempenho e assim poder indicar as formulações mais adequadas.

#### 4. CONCLUSÕES

Os dois processos de produção desenvolvidos constaram de misturas ternárias e quaternárias com os pigmentos B, A e V e os fatores X (água), (Y) solução de NaOH, (Z) resina e (W) álcool etílico.

Atendeu-se a um número maior de requisitos com os pigmentos B e A nas misturas quaternárias, enquanto que, com as misturas ternárias, obtiveram-se melhores resultados

para o pigmento V. Os dois processos de produção, portanto, dado o caráter exploratório deste trabalho, apresentaram-se como alternativas promissoras e criaram referências para estudos mais aprofundados.

As misturas quaternárias apresentaram vantagens, pois apresentaram as menores faixas de viscosidade e o maior número de misturas com RAUs satisfatórias. Outro fator a ser considerado foi o aspecto das tintas: com as misturas quaternárias foram obtidas tintas com aparência similar à das tintas industrializadas e, além disso, homogeneidade e aplicabilidade melhores que as correspondentes às misturas ternárias.

A dispersão mecânica com o disco Cowles adaptado mostrou-se efetiva e configura-se como uma grande contribuição deste trabalho. No entanto, apenas com a dispersão mecânica foi impossível manter estáveis as dispersões de pigmentos, problema que foi solucionado com a dispersão química.

Os níveis dos fatores foram, em geral, inadequadas para alcançar faixas de viscosidade e pH desejáveis, o que demanda a redefinição dos limites: os níveis do fator X devem ser elevados, para diminuir a viscosidade, e os do fator Y devem ser reduzidos, para diminuir o pH. Ainda sobre o pH, na maioria das situações o NaOH contribuiu com a estabilidade das suspensões, também interferindo diretamente sobre a viscosidade, mas comprometeu a atuação da resina e, logo, acarretou a redução da RAU.

A única mistura que atendeu a todos os requisitos estudados foi a ternária correspondente ao pigmento V, mas com formulações discrepantes, que impedem a indicação de uma só formulação que atenda a todos os requisitos estudados. As demais misturas atenderam parcialmente aos requisitos estudados, sem atender simultaneamente àqueles determinados pela ABNT NBR 15079: 2011.

A adoção de níveis similares dos fatores das misturas para os três pigmentos, com exceção do fator Y, mostrou-se ineficaz, o que demanda equilibrar os níveis dos fatores e/ou eliminar fatores para se obter formulações que atendam a todos os requisitos de desempenho, considerando as características específicas de cada pigmento.

Os resultados obtidos representam mais um passo do projeto Cores da Terra rumo ao desenvolvimento de uma tecnologia social, ao sanar uma problemática – a da estabilidade das suspensões – e lançar as bases para estudos mais aprofundados.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14942: Tintas para construção civil. Método para avaliação de desempenho de tintas para edificações não industriais. Determinação do poder de cobertura de tinta seca. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14943: Tintas para construção civil. Método para avaliação de tintas para edificações não industriais. Determinação do poder de cobertura de tinta úmida. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15078: Tintas para construção civil. Método para avaliação de desempenho de tintas para edificações não industriais. Determinação da resistência à abrasão úmida sem pasta abrasiva. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15079: Tintas para construção civil. Especificação dos requisitos mínimos de desempenho de tintas para edificações não industriais. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. 4 p.

BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H. ; TELLER, E. Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *Journal of the American Chemical Society*, n. 60, p. 309-319, 1938.

CAMPOS, C.E.B. Indicadores de campo para solos hidromórficos do planalto de Viçosa, Minas Gerais. 1999. 102 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1999.

CARDOSO, F. P.; CARVALHO, A.F.; FONTES, M.P.F. Resistência à abrasão de tintas imobiliárias produzidas com pigmentos obtidos por dispersão mecânica de solos. In: Congresso Luso-Brasileiro

de Materiais de Construção Sustentáveis, 1, 2014, Guimarães. Anais do I CLB/MCS. Guimarães, Portugal: Universidade do Minho, 2014. 1 CD-ROM.

CORRÊA, G.F. Modelo de evolução e mineralogia da fração argila de solos do Planalto de Viçosa. 1984. 87p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1984.

DAGNINO, R. P. Tecnologia Social: Ferramenta para construir outra sociedade. Campinas: Unicamp, 2009.

EMBRAPA. Manual de Métodos de Análises de Solos. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1997.

FAZENDA, J.M.R. Tintas e vernizes: Ciência e tecnologia. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

FONTES, M. P; CARVALHO, A. F; CARDOSO, F. P. Qualidade de tintas imobiliárias produzidas à base de solos relacionada às propriedades mineralógicas, químicas e físicas. Viçosa, MG, 2013. Relatório.

GOMES, C.M. et al. Defloculação de massas cerâmicas triaxiais obtidas a partir do delineamento de misturas. Cerâmica, n. 51, p. 336-342, 2005.

HOUAIS. Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 2001.

MAIER, R. Manual do artista. 3. ed. São Paulo: Martins Fontes, 2006.

MCLEAN, R. A.; ANDERSON, V. L. Extreme vertices design of mixture experiments. *Technometrics*, v.8, p. 447-454, 1966.

MUNSELL. Munsell Soil Color Charts. Baltimore: Macbeth Division of Kollmorgen Corporation, 1975.

NAIME, U.J. Caracterização de solos de terraços nas Zonas da Mata e Rio Doce, Minas Gerais. 1988. 76 P. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1988.

RUIZ, H. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, n. 29, p. 297-300, 2005.

SANTOS, P. S. Tecnologia de argilas. v. 1: Fundamentos. São Paulo: Edgard Blucher, 1975.

UEMOTO, K. L.; SILVA, J. Caracterização de tintas látex para construção civil: diagnóstico do mercado do estado de São Paulo. *Boletim Técnico*. SP: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

UEMOTO, K. L. Pintura a base de cal. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas: Associação dos Produtores de Cal, 1993.

YAMAK, H. B. Emulsion Polymerization: Effects of Polymerization Variables on the Properties of Vinyl Acetate Based Emulsion Polymers. Chapter 2. In: *Polymer Science*, Turkey: Intech, 2013. Disponível em <http://www.intechopen.com/books/polymer-science>. Acesso em 15 jan. 2015.

## AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da UFV, pela oportunidade de cursar o mestrado; à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado; e à Finep, pelo financiamento da pesquisa, via projeto Cores da Terra Pintando o Brasil.

## NOTA

Este trabalho foi extraído da dissertação de mestrado intitulada “Desenvolvimento de processos de produção e avaliação do desempenho de tintas para a construção civil manufaturadas com pigmentos de solos” de autoria de Fernando de Paula Cardoso

## AUTORES

Fernando de Paula Cardoso: Graduado em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal de Viçosa – UFV; Mestre em Engenharia Civil (Engenharia da Construção) pela UFV; Estudante de doutorado em Engenharia Civil na UFV; Pesquisador do projeto Cores da Terra, vinculado aos Departamentos de Solos e Engenharia Civil da UFV; e membro das Redes TerraBrasil e PROTERRA.

Rita de Cássia Silva Sant'Anna Alvarenga: Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Viçosa – UFV; Mestrado e Doutorado em Engenharia Civil pela USP; Professora adjunta do Departamento de Engenharia Civil da UFV.

Anôr Fiorini de Carvalho: Graduação, mestrado e doutorado em Agronomia pela Universidade Federal de Viçosa; Coordenador do projeto Cores da Terra; Professor adjunto do Departamento de Solos da UFV; Coordenador do projeto Cores da Terra.

## ESTABILIZAÇÃO ALCALINA DE ADOBES

**Adriano da Silva Felix<sup>1</sup>; Pablo Raphael de Lacerda Ferreira<sup>2</sup>; Normando Perazzo Barbosa<sup>3</sup>;  
Khosrow Ghavami<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental – Universidade Federal da Paraíba, Brasil;  
adriano.s.felix@hotmail.com

<sup>2</sup>Arquitetura e Urbanismo – Universidade Federal da Paraíba, Brasil; pablrlf@yahoo.com.br

<sup>3</sup>Prof. Titular do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – Universidade Federal da Paraíba, Brasil;  
nperazzob@yahoo.com.br

<sup>4</sup>Prof. Emérito da Universidade Federal da Paraíba; ghavami@puc-rio.com.br

**Palavras-chave:** adobe, ativação alcalina, estabilização

### Resumo

Alvenarias de adobe estão certamente entre aquelas que menor impacto causam ao meio ambiente. No entanto, uma limitação dos adobes é sua vulnerabilidade à ação da água. Pode-se melhorar essa propriedade incorporando-se estabilizantes convencionais como cal e cimento, porém como nos adobes são usadas terras argilosas, a quantidade de estabilizante para ser efetiva, pode chegar a 8% ou mesmo 10% em massa. Neste trabalho propõe-se um novo método para estabilização da terra, através da ativação alcalina. Nesse processo, componentes mineralógicos do solo e de produtos a eles adicionados reagem internamente em um ambiente de pH elevado. A quantidade de ligante cai para 3% ou mesmo 2%. Em concretos, nos quais se requer altas resistências, utiliza-se silicato de sódio industrial, de preço elevado. No caso da estabilização da terra, utilizou-se uma mistura de sílica ativa com hidróxido de sódio para substituir o produto comercial. Para fornecer sílica e alumina amorfas, foram utilizados metacaulim e/ou resíduos cerâmicos moídos. À mistura de hidróxido de cálcio, sílica ativa, metacaulim/resíduos cerâmicos, nas proporções adequadas chamou-se de ligante geopolimérico. Foram testados os teores de 0%, 1%, 2% e 3% desse ligante em relação à massa de terra. Percebeu-se que o ligante geopolimérico modifica as propriedades reológicas da mistura terra-água. Então, a quantidade de água para moldagem dos adobes foi aquela considerada adequada para tal, variando com a quantidade de ligante adicionado. Foi avaliado o efeito do ligante geopolimérico nas resistência à compressão, resistência à ação da água e variações dimensionais dos adobes. Os resultados mostram-se promissores, indicando um grande potencial para fabricação em larga escala de adobes com propriedades melhoradas.

### 1 INTRODUÇÃO

O problema habitacional em todo o planeta, e principalmente nos países do continente africano, asiático e sulamericano está muito longe de ser resolvido. Além disso, os materiais de construção industrializados possuem valor inacessível às camadas mais pobres da humanidade, envolvendo em seu processo produtivo um grande valor energético, gerando grandes impactos ambientais.

Um produto com grande potencial para ajudar a minimizar o déficit habitacional, e com baixo custo energético, é o adobe. Este vem sendo utilizado desde as primeiras civilizações tanto para a construção de pequenas casas como de enormes templos e palácios. Barbosa e Mattone (2002) afirmam que, vários são os benefícios do uso de terra crua em construção: disponibilidade; excelente desempenho térmico; absorção e liberação de umidade mantendo o ambiente agradável; poluição mínima e baixo consumo energético; fácil reincorporação com a natureza podendo também com a terra, gerarem-se tecnologias apropriadas.

Por ser um material que não passa pelo processo de queima, o adobe tem baixa ou quase nenhuma resistência à água. Para melhorar a durabilidade dos blocos feito com terra é necessário estabilizar o solo. Existem várias maneiras para estabilização (Barbosa; Ghavami, 2007):

- Ação mecânica com equipamentos capazes de densificar a terra reduzindo poros e capilaridade;

- O uso de produtos químicos hidrofugantes para eliminar a absorção de água pelos grãos de solo, sendo, em geral, produtos caros;
- Envolvimento dos grãos de terra por uma fina camada de material impermeabilizante capaz de fazer o fechamento dos poros e canais capilares, como emulsões asfálticas;
- A formação de ligações químicas entre os cristais de argila e cal;
- Criação de um esqueleto sólido inerte que se opõe ao movimento dos grãos. É o caso dos agentes de ligação, tais como cimento Portland.

Além disso, a adição de fibras pode ser considerada como um método de estabilização, dando ductilidade ao material, mas não é capaz de dar resistência contra a ação da água.

Novos métodos de estabilização merecem ser pesquisados. A argila é constituída de sílica e alumina que pode estar, mesmo em pequena quantidade, na forma amorfa. Tal fato pode contribuir para a estabilização através da ativação alcalina, que é um método químico capaz de melhorar as propriedades de um solo.

A ativação alcalina também é conhecida como geopolimerização, termo sugerido por Davidovits (1991) para este tipo de reação, em virtude da semelhança com a síntese dos polímeros orgânicos por meio de condensação e utilização de materiais cimentícios suplementares (Pinto, 2004).

Na ativação alcalina, a coesão do material é devida aos componentes que reagem mineralógicamente no seu interior em um ambiente de pH alto.

Assim, as partículas de aluminossilicato sólidas em meio aquoso altamente alcalino produz um aluminossilicato sintético dito "geopolímérico". Dessa forma suas estruturas são designadas por polisialatos onde  $\text{SiO}_4$  e  $\text{AlO}_4$  tetraédricos estão ligadas rotativamente por partilha de átomos de oxigénio (Davidovits, 1991). A tabela 1 sumariza tais compostos.

Tabela 1. Nomenclatura do Geopolímero (Davidovits, 1982)

Designação	Símbolo	Fórmula	Fração	
			Si:Al	$\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$
Poli-sialato	PS	-Si-O-Al-	1	2
Poli-(sialato-siloxo)	PSS	-Si-O-Al-O-Si-O-	2	4
Poli-(sialato-disiloxo)	PSDS	-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-	3	6

Estudos realizados por Davidovits (1982) mostraram, que foram sintetizado geopolímeros utilizando o precursor de caulinata,  $\text{Si}_2\text{O}_5\text{Al}_2(\text{OH})_4$ , uma fonte de silício ( $\text{SiO}_2$ ), e soluções de hidróxido de sódio e/ou hidróxido de potássio com diferentes concentrações, numa temperatura da síntese de 150°C. De modo geral as temperaturas de síntese utilizadas variam de 25°C a 100°C, o que influencia tanto a cinética da reação, quanto nas propriedades que determinam o tipo de aplicação do produto sintetizado (Davidovits, 1987).

Para a obtenção do geopolímero os percursores mais utilizados são metacaulinita e também resíduos industriais provenientes da mineração e das usinas termoelétricas, onde esses materiais são compostos, na sua maioria, por sílica e alumina (argila calcinada, cinzas volantes e escória de alto forno). O grande problema na síntese dos produtos geopoliméricos são as soluções alcalinas, que muitas vezes são produtos industriais, alguns com valor bastante elevado (silicato de sódio, silicato de potássio, hidróxido de sódio e hidróxido de potássio).

O presente estudo estabelece a proposta de redução de custo do ligante geopolímérico com substituição do silicato de sódio industrial por outros tipos fabricados em laboratório. Estes serão produzidos com os materiais metacaulim, sílica ativa e resíduos de cerâmica vermelha, além de hidróxido de sódio nas proporções ideais.

## 2 OBJETIVO

O objetivo desse trabalho é desenvolver um método para estabilização da terra para aplicação em adobes através da ativação alcalina, utilizando soluções produzidas em laboratório com metacaulim, sílica ativa (microssílica), resíduos de cerâmica vermelha e hidróxido de sódio, substituindo a solução industrializada.

## 3 METODOLOGIA

Os materiais utilizados nesse estudo foram: solo local, metacaulim (MK), sílica ativa (microssílica) (MS), resíduo da cerâmica vermelha moído (RCV), silicato de sódio industrializado ( $Na_2OSiO_3$ ), hidróxido de sódio (NaOH), água da rede de distribuição pública e água destilada. Os ensaios de caracterização dos materiais foram realizados no Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas (LABEME) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

### 3.1 Caracterização do solo

A caracterização do solo no seu estado natural é indicada na tabela 2.

Tabela 2. Caracterização do solo no estado natural

Granulometria do solo in natura (%)	
Areia (0,06 mm a 2,0 mm)	60
Silte (0,002 mm a 0,06 mm)	27
Argila (< 0,002 mm)	13
Limites Atterberg (%)	
Limite de liquidez	28,2
Limite de plasticidade	19,7
Índice de plasticidade	11,3

### 3.2 Precursores geopoliméricos

Para utilizar a ativação alcalina como estabilizante em adobe foram utilizados dois precursores geopoliméricos, metacaulim e resíduos da cerâmica vermelha, a fim de verificar o desempenho na resistência à água e à compressão. A composição química dos precursores, indicado na tabela 3, foi determinada por ensaio de fluorescência de raios X (FRX).

Tabela 3. Composição química dos precursores utilizados

Composto químico	Metacaulim (%)	Cerâmica vermelha (%)
$SiO_2$	54,003	60,101
$Al_2O_3$	38,584	24,398
$Fe_2O_3$	3,585	6,814
$K_2O$	0,723	2,809
$CaO$	0,380	1,649
$Na_2O$	0,171	0,171
$MgO$	1,236	1,815
Outros	1,318	2,243

O metacaulim é um dos precursores mais utilizados para a obtenção do geopolímero devido a sua composição ser rica em sílica ( $SiO_2$ ) e alumina ( $Al_2O_3$ ) reativa. Os resíduos da cerâmica vermelha foram utilizados por questões ambientais e serem ricos naqueles óxidos.

### 3.3 Água

Para se obter a plasticidade necessária para as misturas, foi utilizada água potável ( $H_2O_{pot.}$ ) e para a fabricação das soluções alcalinas (silicato de sódio (MK, MS e RCV) foi feito o uso de água destilada ( $H_2O_{dest.}$ ).

### 3.4 Soluções alcalinas (silicato de sódio)

O silicato de sódio industrializado utilizado apresentou relação  $SiO_2/Na_2O = 2,17$  em peso e pH de aproximadamente 13.

As soluções alcalinas proposta nesse trabalho para substituir o silicato industrializado foram obtidos através da relação da massa atômica dos compostos encontrado na sílica ativa (microssílica), metacaulim, resíduo da cerâmica vermelha e hidróxido de sódio. O balanceamento estequiométrico realizado com esses composto fornecia as proporções exata de cada material.

### 3.5 Misturas

Para a produção do ligante geopolimérico o método abordado foi o sugerido por Davidovits (1982), para gerar os compostos do tipo NaPSS (polissialatosiloxo de sódio). Este método consiste em preparar uma mistura de alumino-silicatos em solução alcalina, em que a composição da mistura tenha razões molares de óxidos dentro dos valores indicado na tabela 4.

Tabela 4. Razão molar necessária para a formação de geopolímeros

Razões molares dos óxidos	
$Na_2O/SiO_2$	0,20 a 0,28
$SiO_2/Al_2O_3$	3,50 a 4,50
$H_2O/Na_2O$	15,00 a 17,50
$Na_2O/Al_2O_3$	0,80 a 1,20

Para a moldagem dos corpos de prova foram elaborado misturas com percentagens do ligante ativado alcalinamente de 0%, 1%, 2% e 3% em relação ao peso do solo. Os materiais foram misturados manualmente, as amostras para teste de absorção de água eram cilíndrico de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Os elaborados para resistência à compressão foram obtidos através de um molde cúbico com 5 cm de aresta, como pode ser visto na figura 1.



Figura 1. Mistura manual dos materiais e molde cúbico para elaboração dos corpos de prova

Após a moldagem dos corpos de prova, os mesmos eram colocados em um saco plástico para ajudar a conter a água da mistura e só era retirado após 3 dias. Em seguida eram

levados a estufa para a cura em temperatura de 65°C e retirados para o ensaio de resistência à compressão (figura 2).



Figura 2. Amostras em cura em saco plastico até o terceiro dia após remoção

As proporções dos materiais para o ligante alcalino podem ser verificadas na tabela 5.

Tabela 5. Proporções utilizadas na ativação do solo

Solo %	Ativador alcalino %	% Ativador alcalino				% $H_2O_{pot.}$
		Precursor (MK ou RCV)	$Na_2O \cdot 2SiO_3$	NaOH	Água destilada	
100	0%	-	-	-	-	18,5
100	1%	0,37	0,36	0,04	0,22	12,0
100	2%	0,74	0,73	0,08	0,44	10,4
100	3%	1,12	1,10	0,12	0,66	10,4

As etapas do processo de mistura são definidas na figura 3.

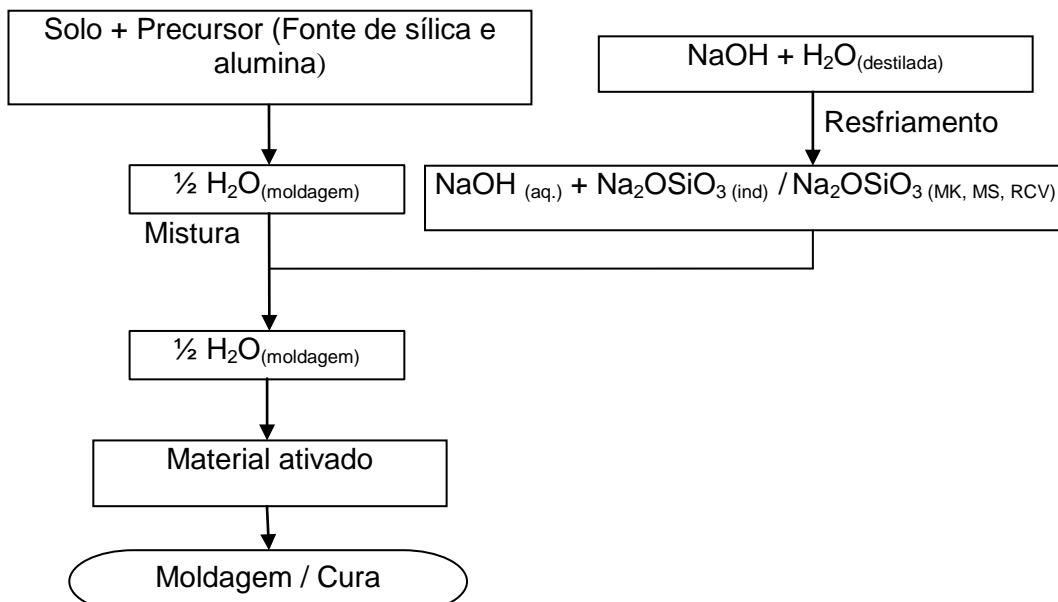


Figura 3. Processo de moldagem dos corpos de prova

### 3.6 Ensaio de resistência a ação da água, absorção de água e perda de massa

Os ensaios de resistência e absorção de água foram feitos considerando-se uma adaptação da norma NBR 8492/84 Tijolo maciço de solo-cimento: determinação da resistência à compressão e da absorção de água. A absorção dos corpos de prova foi determinada de acordo com a equação 1, nas amostras nas quais que foi possível determinar sua massa após o ensaio.

$$W = \frac{Pw - Ps}{Ps} \times 100 \quad (1)$$

Onde:  $W$ : Absorção de água (%)

$Pw$ : Massa úmido (g)

$Ps$ : Massa seco (g)

A perda de massa foi determinada pela (equação 2).

$$M = \frac{P1 - P2}{P2} \times 100 \quad (2)$$

Onde:  $M$ : Perda de massa (%)

$P1$ : Massa antes do ensaio (g)

$P2$ : Massa depois do ensaio (g)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Resistência e absorção de água

As amostras que foram estabilizadas através da ativação alcalina com as soluções propostas resistiram à ação da água, exceto as elaboradas com teor de 1% do silicato de (MK, MS e RCV). Além da resistência à água, os blocos alcalinamente ativados tiveram valores de absorção que variaram de 10% à 12%, com as amostras de 3% de silicato industrializado e o MK como precursor e 3% de silicato RCV com o resíduo cerâmico como precursor respectivamente. Na figura 3 vêem-se os corpos de prova imersos em água.



Figura 4. Amostras submetidas ao ensaio de absorção e resistência à água

Os corpos de prova que mostraram o melhor resultado de absorção entre as soluções proposta nesse estudo foi o 3% de silicato de MK e precursor de MK com teor de 11% e a amostra com 3% de silicato de MK e precursor de RCV com 10,7% de absorção, porém esse último apresentou uma perda de massa de 1,5%. Os valores de todos os corpos de prova são visto nas tabelas 5 e 6.

Tabela 5. Resultado do ensaio de resistência à água e absorção de água com precursor de metacaulin

Tipo da Amostra	Peso (g)	Resistência à água	Peso úmido (g)	Peso seco (g)	Peso da água (g)	Absorção de água (%)	Perda de massa (g)	Perda de massa (%)
Silicato IND. 1%	250	SIM	278,8	249,3	28,8	11,5	0,7	0,38
Silicato IND. 2%	250	SIM	276	249,4	26	10,4	0,6	0,30
Silicato IND. 3%	250	SIM	275	249,2	25	10,0	0,8	0,41
Silicato MK. 1%	250	NÃO	--	--	--	--	--	--
Silicato MK. 2%	250	SIM	279,3	249	29,3	11,7	1,0	0,55
Silicato MK. 3%	250	SIM	277,5	249,1	27,5	11,0	0,9	0,48
Silicato RCV. 1%	250	NÃO	--	--	--	--	--	--
Silicato RCV. 2%	250	NÃO	--	--	--	--	--	--
Silicato RCV. 3%	250	NÃO	--	--	--	--	--	--
Silicato MS. 1%	250	NÃO	--	--	--	--	--	--
Silicato MS. 2%	250	SIM	278,5	249,1	28,5	11,4	0,9	0,48
Silicato MS. 3%	250	SIM	278	248,1	28	11,2	1,2	1,04

Tabela 6. Resultado do ensaio de resistência à água e absorção de água com precursor de resíduo cerâmico

Tipo da Amostra	Peso (g)	Resistência à água	Peso úmido (g)	Peso seco (g)	Peso da água (g)	Absorção de água (%)	Perda de massa (g)	Perda de massa (%)
Silicato IND. 1%	250	SIM	278	248,58	28	11,2	1,4	0,60
Silicato IND. 2%	250	SIM	276	249,2	26	10,4	0,8	0,30
Silicato IND. 3%	250	SIM	276,4	249,3	26,4	10,5	0,7	0,30
Silicato MK. 1%	250	NÃO	--	--	--	--	--	--
Silicato MK. 2%	250	SIM	278,3	248,1	28,3	11,3	1,9	0,80
Silicato MK. 3%	250	SIM	276,7	246,3	26,7	10,7	3,7	1,50
Silicato RCV. 1%	250	NÃO	--	--	--	--	--	--
Silicato RCV. 2%	250	SIM	269	234,4	19	7,6	15,7	6,30
Silicato RCV. 3%	250	SIM	277,9	246,8	27,9	11,2	3,2	1,30
Silicato MS. 1%	250	NÃO	--	--	--	--	--	--
Silicato MS. 2%	250	SIM	277,9	247,5	27,9	11,1	2,6	1,00
Silicato MS. 3%	250	SIM	281	248,4	31	12,4	1,6	0,60

O corpo de prova com silicato de RCV com precursor de RCV teve um baixo valor de absorção de água, mas esse resultado foi obtido devido à grande perda de massa que o mesmo obteve.

Os testes feito com amostras não submetidas a cura em estufa a temperatura de 65°C não apresentaram resistência a ação da água, exceto as que tiveram silicato industrializado na sua composição.

#### 4.2 Ensaio de resistência à compressão

Nos ensaios de resistência à compressão as amostras que obtiveram melhor desempenho foram as com silicato industrializado, chegando a valores de 6,1 MPa. Porém todos os corpos de provas com o silicato proposto tiveram resistência à compressão com valores superiores aos da norma NBR 7171/2005 - Bloco cerâmico para alvenaria, para blocos não portantes classe A e B que são 1,5 MPa e 2,5 MPa, respectivamente. A grande maioria das misturas usadas também superam a resistência requerida pela norma que trata de blocos maciços de solo cimento, NBR 8491/12 – Tijolo de solo-cimento. Especificações.

Dentre as amostra elaboradas com os silicatos propostos a que obteve melhor resultado foi a com composição de 2% de silicato de MK com ambos os precursores, como visto nas figuras 5 e 6.

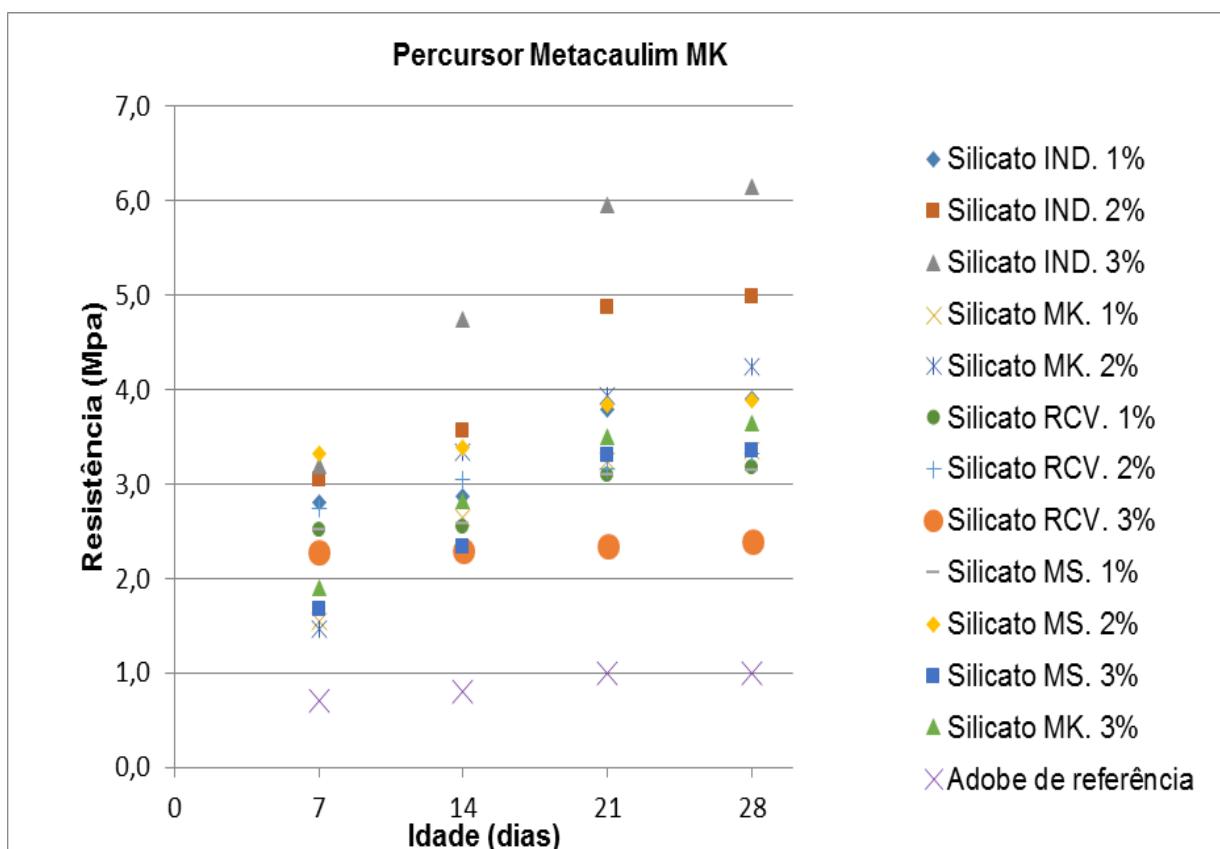


Figura 5. Resistência à compressão com as amostras do precursor de MK (média de 3 corpos de prova)

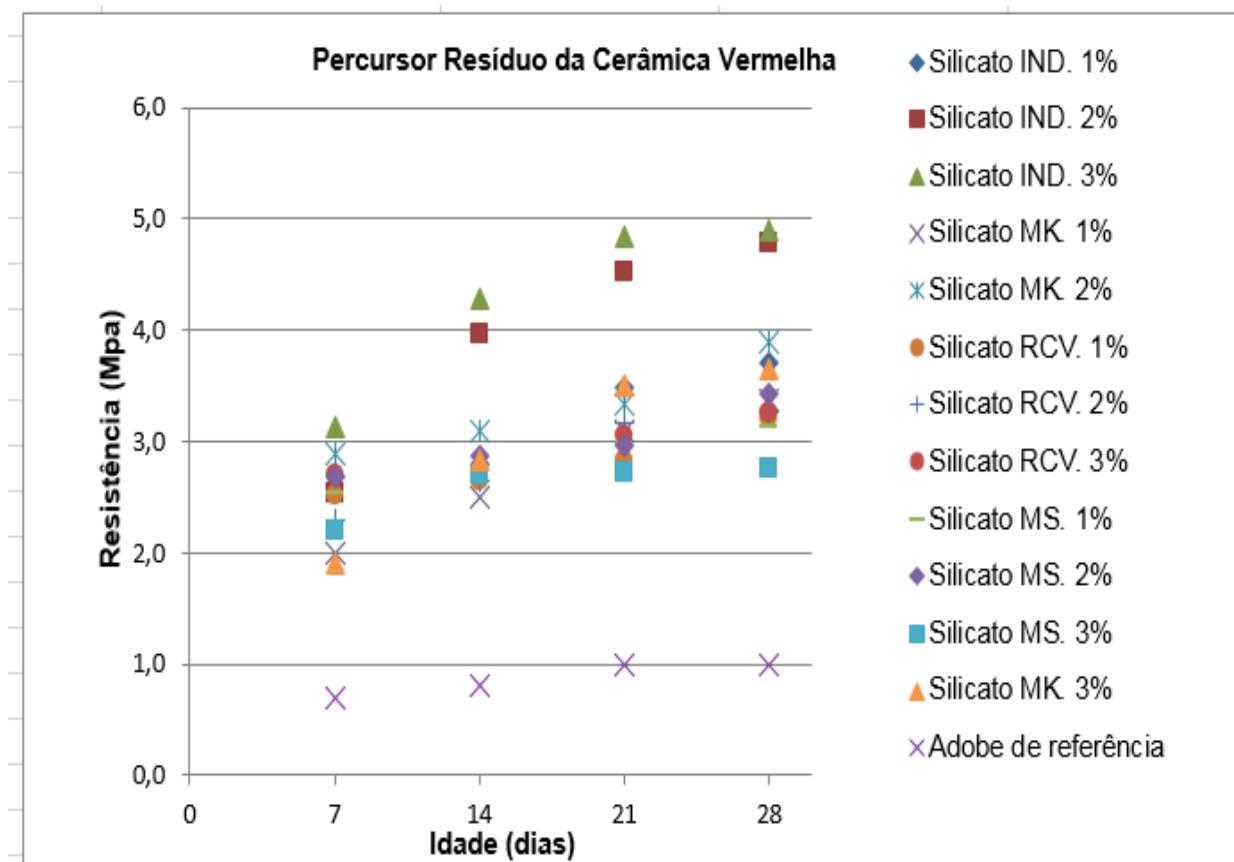


Figura 6. Resistência à compressão das amostras do precursor de RCV (média de 3 corpos de prova)

Mesmo as amostra que não resistiram à ação da água tiveram resistência adequada. Os resultados dos blocos estabilizados com o precursor da cerâmica vermelha foram inferiores aos que utilizaram o metacaulim, o que era de se esperar por conta da maior percentagem de sílica e alumina cristalina nos resíduos.

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo mostraram que é viável a substituição da solução alcalina industrializada pelo silicato de (MK, MS e RCV) na produção de adobes.

Como foi visto no estudo realizado por Oliveira et al (2014), a estabilização do solo através da ativação alcalina mostrou um bom desempenho para a fabricação de adobes.

A estabilização de adobe utilizando soluções alcalinas produzidas com resíduos minerais e hidróxido de sódio em substituição do silicato de sódio industrializado apresentou resultados interessantes quanto a resistência à compressão e os corpos de prova com teores de 2% e 3% resistiram a ação da água.

A temperatura usada para ativar as reações químicas podem ser conseguidas envolvendo-se os adobes produzidos em sacos plásticos expostos ao sol. O desenvolvimento de um sistema de cura com energia solar viável ecologicamente é o próximo passo deste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR – 7171. Bloco Cerâmico para Alvenaria –, 2005. Disponível em: < <http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=53938> > Acesso em 10 de jun de 2015.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR – 8492: tijolo maciço de solo-cimento: determinação da resistência à compressão e da absorção de água, 2012. Disponível em: <<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=193718>> Acesso em: 02 de set de 2015.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR – 8491:Tijolo de solo cimento, especificações. 2012. Disponível em: <<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=193718>> Acesso em: 02 de set de 2015.

Barbosa N. P, Ghavami K. (2007). Terra crua para edificações. São Paulo: IBRACON, 2007, v. 2, p. 1505-1538. Disponível em: <[http://www.ibracon.org.br/publicacoes/revistas\\_ibracon/riem/volumes.asp](http://www.ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/riem/volumes.asp)> Acesso em 10 de jun de 2015.

Barbosa, N. P.; Mattone, R. (2002). Construção com terra crua. I Seminário Ibero-americano de Construção com Terra. Salvador, BA, Anais Proterra/Cyted. Set 2002. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/2106795/2-terra-cap-ibracon/11>> Acesso em 10 de jun de 2015.

Davidovits, J. (1982). Mineral polymers and methods of making them. US Patent 4.349.386. 14 Set 1982. Disponível em: <<http://www.google.com/patents/US4349386>> Acesso em: 25 de jun de 2015.

Davidovits, J. (1987) Ancient and modern concretes: What's is the real difference? Concrete International, v.9, n.12, p.23-35, Dez 1987. Disponível em: <<http://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal?m=details&i=2380>> Acesso em 15 de jun de 2015.

Davidovits, J. (1991). Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials. Thermal Analysis 37: p.1633-1656. Disponível em: <<http://www.scopus.com>> Acesso em 20 de mar de 2015.

Oliveira, L.S.; Barbosa, N.P.; Carvalho, C.M.; Santos F.S. (2014). Stabilization of raw earth through alkaline activation. Key Engineering Materials, v.600, p.215-224, Mar. 2014. Disponível em: <<http://www.scientific.net/KEM.600.215>> Acesso em 20 de mar de 2015.

Pinto, A.T. (2004). Sistemas ligantes obtidos por activação alcalina do metacaulino. Tese Doutorado, Universidade do Minho, Portugal. 2004. Disponível em: <<http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/671>> Acesso em: 15 de jun de 2015.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos técnicos do Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas (LABEME) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), que com muito presteza ajudou para a conclusão desse trabalho.

## AUTORES

Adriano da Silva Félix, mestrando em engenharia civil e ambiental da Universidade Federal da Paraíba, tecnólogo em construção de edifícios. Currículo completo em: <http://lattes.cnpq.br/3616946997976293>.

Pablo Raphael de Lacerda Ferreira, estudante de arquitetura e urbanismo da Universidade Federal da Paraíba. Currículo completo em: <http://lattes.cnpq.br/1643429325282759>.

Normando Perazzo Barbosa, professor titular do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba. Currículo completo em: <http://lattes.cnpq.br/6420367558476872>.

Khosrow Ghavami, professor aposentado da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, professor emérito da Universidade Federal da Paraíba. Currículo completo em: <http://lattes.cnpq.br/1427567976681355>.

# USO DE LAS FRACCIONES LIGERAS DEL CRUDO COMO ESTABILIZANTE DE TIERRA

**Yuko Kita<sup>1</sup>, Annick Daneels<sup>2</sup>, Alfonso Romo de Vivar<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Instituto de Arquitectura, Diseño y Arte, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México, kitayuko@gmail.com

<sup>2</sup> Instituto de Investigaciones Antropológicas, Universidad Nacional Autónoma de México, México, annickdaneels@hotmail.com

<sup>3</sup> Instituto de Química, Universidad Nacional Autónoma México, México, México, aromovi@unam.mx

**Palabras clave:** biomarcadores, origen de materiales petrolíferos, tecnología prehispánica, preservación de patrimonio construido, trópico húmedo

## Resumen

La arquitectura monumental del sitio arqueológico de La Joya, Medellín de Bravo, Veracruz, ha perdurado mil años por algún tipo de estabilizante, el cual se interpretó en los trabajos anteriores como bitumen diluido en aceite vegetal. Recientemente, en el proceso de análisis químico detallado aplicando el método para caracterizar crudos e identificar origen de bitumen arqueológico, se descubrió que las muestras de construcción prehispánica carecen de las fracciones más pesadas, las de resinas (NSO) y asfaltenos. Por lo tanto, el estabilizante original no es bitumen (que contiene fracciones pesadas), sino son fracciones más ligeras (aceite) de crudo. El muro experimental de adobes que se estabilizó en enero de 2013 sólo con la pequeña proporción de aceite que soltó el bitumen sólido al calentarse en agua, ha resistido más que el muro de control y los muros estabilizados con extractos vegetales. Esto indica la eficacia de proporciones muy bajas de las fracciones ligeras de crudo. Análisis geoquímicos combinados de cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas (CG-EM) y espectrometría de masas de isótopos estables (IRMS) están en curso para confirmar el uso intencional de estas fracciones ligeras como estabilizante de tierra para la construcción prehispánica. Por otro lado, se continúan experimentos en el sitio que permiten fortalecer la investigación sobre la tecnología de arquitectura prehispánica, evaluando la efectividad de los estabilizantes, y al mismo tiempo examinar este material petrolífero como estrategia para la preservación.

## 1 INTRODUCCIÓN

Este trabajo presenta los avances de la investigación sobre el estabilizante original de la construcción de tierra del sitio arqueológico de La Joya. El sitio se encuentra en el Centro de Veracruz, en la planicie costera del Golfo de México y fue ocupado desde el periodo Preclásico por alrededor de mil años (100 - 1000 d.C.) (Daneels, 2002). Todas las estructuras fueron construidas solamente con tierra, sin utilizar piedras ni cal.

La investigación sobre el estabilizante original se ha desarrollado desde 2012; consiste en estudios químicos para identificar el estabilizante original y experimentos *in situ* para comprobar su eficacia. Se han encontrado hidrocarburos saturados y aromáticos en residuos orgánicos de materiales de construcción. Inicialmente estos componentes se interpretaron como parte de un material petrolífero, el bitumen, cuyo uso se reconoce en las culturas antiguas de la costa del Golfo (Wendt; Lu, 2006; Wendt; Cyphers, 2008). Asimismo, los experimentos en el sitio han comprobado la eficacia de materiales bituminosos como estabilizante de construcción de tierra en el ambiente de trópico húmedo (Kita et al, 2013, 2014).

### 1.1 Estudios sobre arcilla

En 2009 se realizó el análisis de la difracción de rayos X (XRD) sobre la fracción fina de los materiales de construcción. Los resultados indicaron que el tipo de arcilla fue montmorillonita, arcilla expansiva. Además, a través de los análisis de granulometría, se reconoció que todos los materiales contenían una alta concentración de fracción fina. Estas son condiciones adversas para la estabilidad de los materiales constructivos,

particularmente en condiciones de fuertes variaciones de humedad, como las que imperan en la costa del Golfo. Por lo tanto, se consideró probable que se haya usado algún tipo de estabilizante (Daneels; Guerrero-Baca, 2011).

## 1.2 Identificación de sustancias orgánicas

Mediante los análisis químicos de muestras constructivas por espectrometría de infrarrojo, de resonancia magnética nuclear, y cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas, en los extractos orgánicos en *n*-hexano se halló una cantidad relativamente alta de hidrocarburos saturados lineales y aromáticos, acompañados con triglicéridos y azelato de dibutilo. Por lo tanto, el estabilizante original se identificó inicialmente como bitumen diluido en aceite vegetal (Kita; Daneels; Romo de Vivar; 2013, 2014).

## 1.3 Experimentos en sitio

Se prepararon dos series de experimentos en sitio en 2013 y 2014 respectivamente.

La primera serie consistió en cinco muros de prueba, uno sin estabilizante (C), dos con extractos vegetales de plantas que se utilizan en construcción de tierra en la zona de trópico húmedo en Centroamérica: malva (M) y guácima (G), y dos muros estabilizados con productos bituminosos: bitumen sólido diluido (B) y producto comercial de emulsión asfáltica (A). Los extractos de malva se obtuvieron de los tallos y hojas machacados y posteriormente sumergidos en agua. Los de guácima se trajeron de la corteza sumergida en agua. En cuanto al bitumen, en principio, se pretendió diluirlo en agua caliente, sin embargo no se diluyó, solamente se reblaneció, soltando un poco de aceite transparente. Para el muro “B” se prepararon los adobes para el muro de “bitumen” con el agua en la que se hirvieron los bloques de bitumen sólido; después se utilizó el bitumen diluido en aceite de linaza para la mezcla de aplanados intermedio y fino. Para el muro y los aplanados “A” se utilizó IMPERTOP® A, un producto de emulsión asfáltica base agua de Comex™. Ambos muros con productos bituminosos fueron los más resistentes a la intemperie en el ambiente de trópico húmedo (Figura 1).

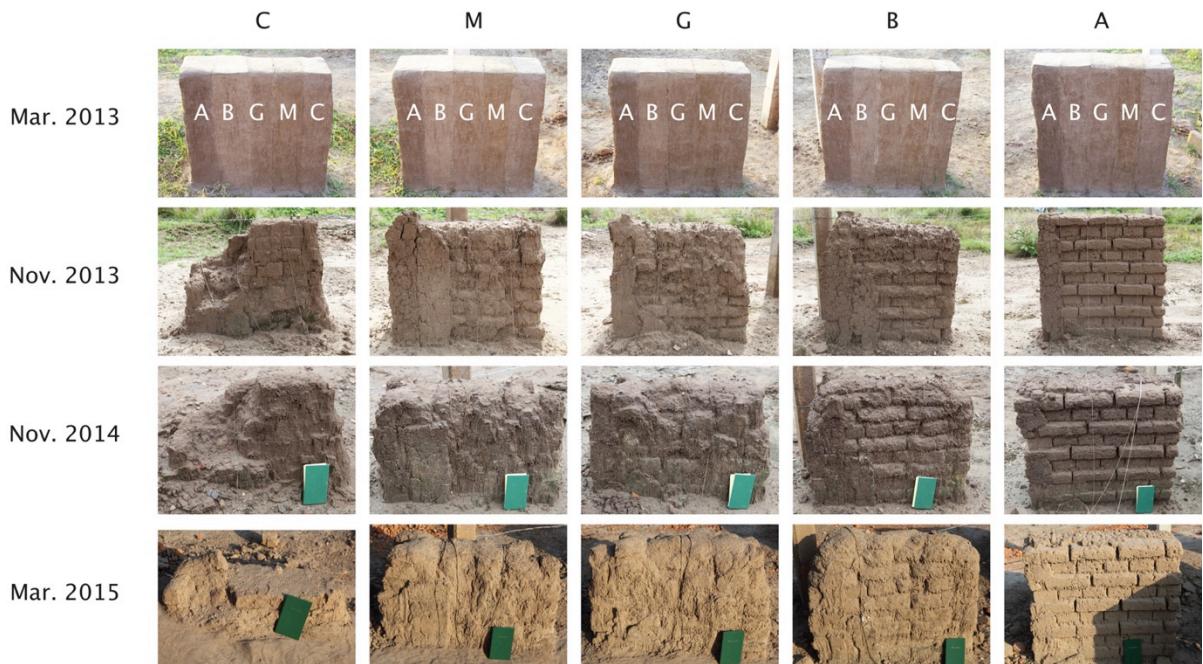


Figura 1. Monitoreo de la primera serie de los muros de prueba de la resistencia a la intemperie. C: control (sin estabilizante); M: extracto de malva; G: extracto de guácima; B: bitumen; A: emulsión asfáltica.

La segunda serie comparó diferentes preparaciones de materiales bituminosos, además de la eficacia entre materiales bituminosos y cal, material común y recomendado como

estabilizante de tierra en zonas áridas y semiáridas. Sin embargo, en el ambiente de trópico húmedo se observó que la cal tiende a guardar la humedad dentro del muro de adobes provocando la exfoliación de los aplanados por eflorescencia y el crecimiento de musgos. Entre los tres productos bituminosos (bitumen diluido en aceite de linaza, bitumen diluido en aceite de maíz y emulsión asfáltica comercial), la emulsión asfáltica fue la que se comportó homogéneamente (Kita; Daneels; Romo de Vivar, 2014; Kita; Daneels, 2014).

#### 1.4 Aplicación a la pirámide

Se ha utilizado la mezcla de tierra arcillosa con arena consolidada con un producto base a etilvinilsilicato (Wacker Chemie AG™ VINNAPAS® 5044 N) e hidrofugada con un producto de silicona (Wacker Chemie AG™ SILRES® Powder D) para la capa de sacrificio de la pirámide del sitio de La Joya desde 2010. Esta capa gruesa tiende ser rígida y poco permeable, y además de promover el crecimiento de biopelículas.

Desde 2014 se empezó a utilizar los aplanados delgados de tierra estabilizado con emulsión asfáltica (Comex™ IMPERTOP® A) al cinco por ciento en volumen de la mezcla para la capa de sacrificio. En el talud de contención nuevo al norte y parte del corte posterior se aplicó directamente sobre geotela, con buena adherencia y resistencia a la intemperie (Figura 2).



Figura 2. Capa de sacrificio de tierra estabilizada con emulsión asfáltica

## 2 TAREAS

Para confirmar que las sustancias orgánicas que se encontraron en los materiales de construcción prehispánica provienen de bitumen diluido en aceite vegetal, los extractos orgánicos de materiales de construcción se compararon con los de bitumen prehispánico pintado sobre vasijas. Por otro lado, se compararon con los de paleosuelos para discriminar los componentes orgánicos que existen naturalmente en suelo local y aclarar su uso intencional.

#### 2.1 Comparación de las sustancias orgánicas

A través de estudios químicos se reconocieron sustancias orgánicas semejantes en materiales de construcción prehispánica, bitumen prehispánico y paleosuelo, como hidrocarburos saturados y aromáticos. Sin embargo, se reconocieron también diferencias, como la ausencia de triglicéridos en el bitumen y la ausencia de azelato de dibutilo en el paleosuelo.

## 2.2 Identificación de origen de los compuestos petrolíferos

Para identificar el origen de las sustancias orgánicas que se encuentran en los materiales de construcción prehispánica, el bitumen prehispánico pintado sobre vasijas y el paleosuelo, se empezaron los estudios geoquímicos mediante cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas (CG-EM) y espectrometría de masas de isótopos estables (IRMS).

## 3 METODOLOGÍA

Se desarrolló el protocolo experimental con base en los métodos descritos principalmente para caracterizar crudos (García; Sánchez; Guzmán, 1999; GeoMark Research Ltd., 2013) e identificar el origen de bitumen arqueológico (Connan, 2012; Connan; Deschesne, 1992, Kato et al, 2008), ajustando el procedimiento a las condiciones de la infraestructura disponible (Figura 3).

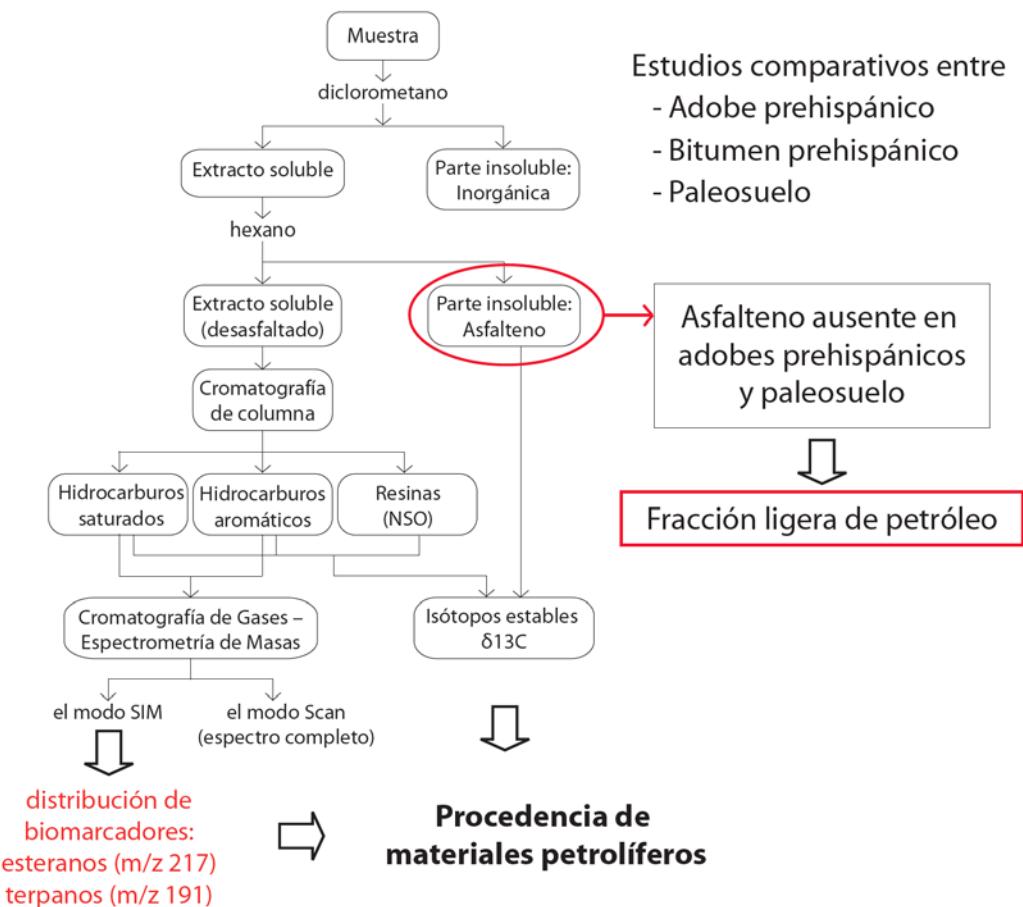


Figura 3. Protocolo experimental

### 3.1 Preparación de muestras para los análisis

Los materiales petrolíferos se separaron en las fracciones de hidrocarburos saturados, hidrocarburos aromáticos, resinas y asfaltenos. Se aplicó el siguiente procedimiento.

Primero, las sustancias orgánicas se extrajeron de las muestras (de adobe prehispánico, bitumen prehispánico y paleosuelo) con diclorometano. La parte soluble en diclorometano es bitumen, que después se separa en el extracto desasfaltado (soluble en *n*-hexano) y asfaltenos (insoluble en *n*-hexano). El extracto desasfaltado se separa luego por cromatografía de columna en las fracciones de hidrocarburos saturados, hidrocarburos aromáticos y resinas (compuestos de nitrógeno, azufre y oxígeno (NSO)).

Las fracciones de hidrocarburos saturados y aromáticos se analizan por cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas (CG-EM) y todas las fracciones por espectrometría de masas de isótopos estables (IRMS).

### 3.2 Análisis para estudiar origen de sustancias orgánicas

Mediante el análisis de CG-EM se reconocen las moléculas de los compuestos orgánicos; especialmente en el modo de detección de monitoreo selectivo de iones (modo SIM) se puede obtener información sobre el número de carbonos y la distribución de los isómeros de biomarcadores. Los marcadores biológicos o biomarcadores son moléculas fósiles presentes en las muestras geológicas y productos naturales que pueden indicar su origen biológico particular.

A parte de CG-EM, el análisis de IRMS permite reconocer el origen específico de los biomarcadores, así como reconstruir el paleoambiente. Se analiza el isótopo estable de  $^{13}\text{C}$  de cada fracción separada de las muestras.

## 4 RESULTADOS PARCIALES

En el proceso de preparación de muestras, se observó que las muestras de adobe prehispánico y paleosuelo no contenían asfaltenos. Por lo tanto, el estudio se enfocó a las fracciones ligeras: hidrocarburos saturados y aromáticos (Figura 4).

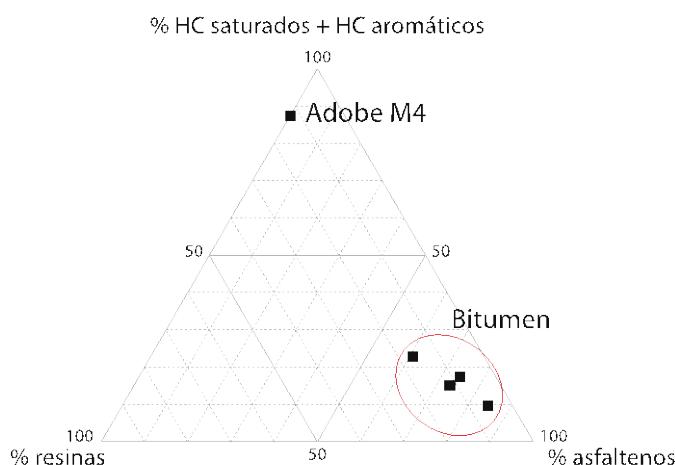


Figura 4. Composición de materiales orgánicos

Los análisis por CG-EM en el modo de barrido total del espectro (modo SCAN) proporcionaron los espectros de masas completos de las muestras. Las muestras de adobe prehispánico, bitumen prehispánico y paleosuelo contienen sustancias orgánicas parecidas, que sin embargo difieren en las concentraciones de cada compuesto (Figura 5). Las muestras de adobe prehispánico abundan en hidrocarburos saturados lineales (*n*-alcanos) e isoprenoídes. Las de bitumen prehispánico son ricas en ftalatos; por otro lado, debido a que el material está concentrado, se pudieron detectar los biomarcadores importantes para caracterizar materiales petrolíferos: terpanos y esteranos. Las de paleosuelo consisten principalmente en un triterpeno.

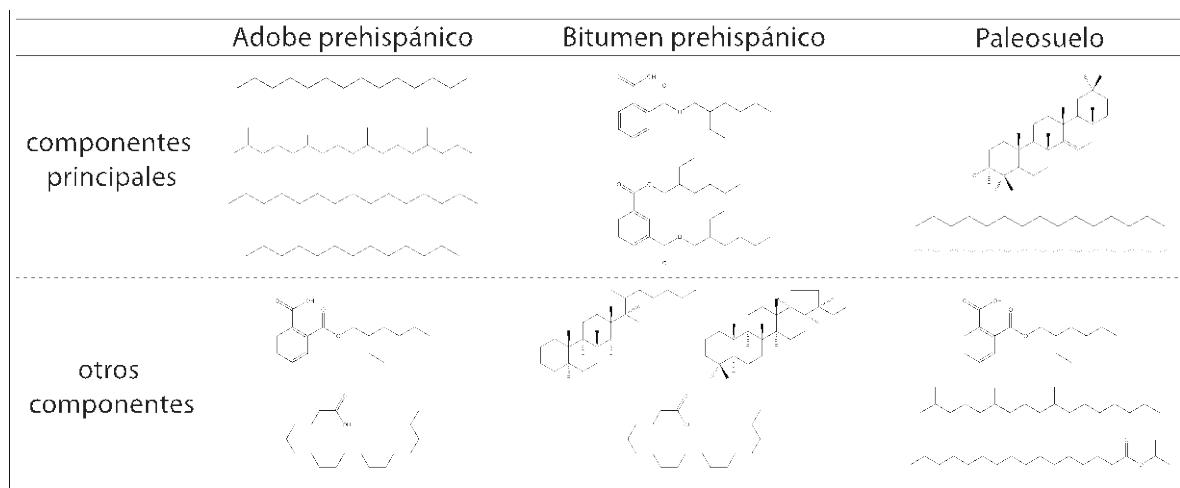
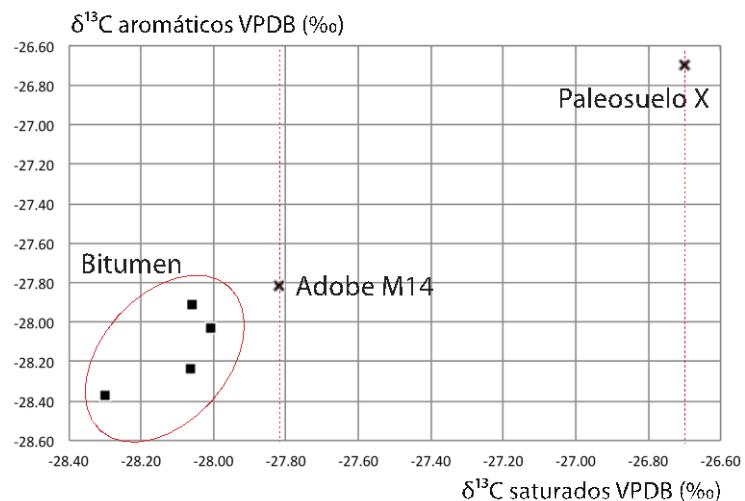


Figura 5. Estructuras identificadas por CG-EM de los extractos desasfaltados

Actualmente está pendiente el análisis por CG-EM en el modo SIM de las fracciones de hidrocarburos, que proporcionará información importante sobre los biomarcadores de materiales petrolíferos: el número de carbonos y la distribución de isómeros de terpanos y esteranos.

En cuanto al análisis por IRMS, se han obtenido resultados de la mitad de las muestras preparadas. En los resultados parciales se observa que el valor de isótopos estables de carbono 13 de una muestra de adobe prehispánico está cerca de los del grupo de bitumen prehispánico, mientras el valor de una muestra de paleosuelo está alejado de ambos (Figura 6).

Figura 6. Composición de isótopo estable de  $^{13}\text{C}$  de hidrocarburos saturados y aromáticos

## 5 DISCUSIÓN

A través del proceso de preparación de las muestras para estudiar sus orígenes, se reconoció que las sustancias orgánicas presentes en las muestras de construcción prehispánica del sitio de La Joya no provinieron de bitumen diluido en aceite vegetal como se había interpretado anteriormente, sino que podrían ser las fracciones ligeras de material petrolífero.

Se observaron diferencias en el tipo y la concentración de sustancias orgánicas entre las muestras del adobe prehispánico, bitumen prehispánico y paleosuelo mediante los análisis de CG-EM. Según la información sobre el isótopo estable de carbono 13 de las muestras, se ve que los valores de adobe prehispánico se parecen a los de bitumen (material petrolífero)

prehispánico, mientras que hay una diferencia más grande entre los de bitumen y los de paleosuelo. Esto podría indicar que los hidrocarburos que se encuentran en el adobe prehispánico y el bitumen prehispánico sean de un mismo origen. Para averiguar este punto, todavía falta realizar el análisis de CG-EM en el modo SIM para obtener información detallada sobre los biomarcadores, así como realizar el análisis de IRMS de más muestras para obtener el rango de distribución de los valores del isótopo estable de carbono 13.

Hasta ahora no se han realizado experimentos en el sitio con las fracciones ligeras de crudo, no obstante, en la primera serie de los muros experimentales se prepararon los adobes con agua en el que se hirvieron bloques de bitumen sólido. A pesar de que la concentración de aceites que soltó el bitumen hervido en agua fue muy baja, el muro construido con estos adobes “estabilizados” resistió bastante (Figura 1-B), comparando con el muro sin estabilizante y los muros estabilizados con extractos vegetales (Figura 1-C, 1-M, 1-G). Para confirmar su eficacia como estabilizante se necesitará diseñar otro experimento con las fracciones ligeras de petróleo.

A pesar de que el bitumen no fue el estabilizante original de tierra en el sitio de La Joya, la capa de sacrificio delgada estabilizada con emulsión asfáltica se ha comportado de manera compatible con el vestigio original, presentando flexibilidad y permeabilidad.

La emulsión asfáltica se ha desarrollado en los años 1930 en EE.UU., respondiendo a la necesidad de preservar patrimonio construido en tierra y se utilizó extensamente hasta los años 1950 extensamente (Charnov, 2011; NPS, 1962; Trott 1997). Después se dejó de utilizar en el área de preservación, según Charnov (2011) debido a problemas con sales, la dificultad de controlar su proporción y los cambios cromáticos del color de la mezcla. Sin embargo, estos efectos inapropiados no se han observado en el sitio de La Joya<sup>1</sup>, posiblemente porque el producto que se utiliza en el sitio de La Joya es base agua y no contiene disolventes que se evaporan más rápido que el agua. Existen también resultados favorables a largo plazo bajo el clima árido (Oliver, 2000). Por otro lado, la interrupción del uso de emulsión asfáltica podría relacionarse con la tendencia que surgió en los años 1970 de preservar a la vista las superficies originales de los bienes culturales por medio de consolidación utilizando los productos químicos que puedan penetrar a los poros de materiales originales que surgió en los años 1970s (Torraca; Chiari; Gullini, 1972).

## 6 CONSIDERACIONES FINALES

El descubrimiento de las fracciones ligeras de crudo representa un aporte importante en el estudio de las sustancias orgánicas en los materiales de construcción prehispánica del sitio arqueológico de La Joya. La aclaración de su uso intencional como estrategia prehispánica para conservar construcciones de tierra en ambientes de trópico húmedo está en curso mediante los análisis geoquímicos de biomarcadores e información isotópica.

Otra serie de experimentos en el sitio con la fracción ligera de crudo permitirá examinar su aptitud como estabilizante de tierra, así como comparar su resistencia a la intemperie con la de la emulsión asfáltica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Charnov, A. A. (2011). 100 years of site maintenance and repair: conservation of earthen archaeological sites in the American Southwest. *Journal of Architectural Conservation*, 2 (17): 59-75.
- Connan, J. (2012). *Le bitume dans l'Antiquité*. Arles: Éditions Errance.
- Connan, J.; Deschesne, O. (1992). Archaeological bitumen: identifications, origins and uses of an ancient Near Eastern material. In: *Materials Research Society Symposium Proceedings*, vol. 267. Pittsburgh: Materials Research Society.

<sup>1</sup> Solamente en el muro de bitumen diluido en aceite de maíz (aceite semi-secante) se presenta un notorio cambio cromático al color negro, después de seis meses de monitoreo.

- Daneels, A. (2002). El patrón de asentamiento del periodo Clásico en la cuenca baja del río Cotaxtla, Centro de Veracruz. Un estudio de caso de desarrollo de sociedades complejas en tierras bajas tropicales. Disertación (Doctorado en Antropología). División de Posgrado de la Facultad de Filosofía y Letras e Instituto de Investigaciones Antropológicas. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F., México.
- Daneels, A.; Guerrero-Baca, L. F. (2011). Millenary earthen architecture in the tropical lowlands of Mexico. APT Bulletin, 42 (1): 11-18.
- García, J. A.; Sánchez, J. A.; Guzmán, M. A. (1999). Esteranos y terpanos como marcadores biológicos en la prospección petrolera. Revista de la Sociedad Química de México, 43 (1): 1-6. Disponible en <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47543201>>. Acceso en 29/4/2015.
- GeoMark Ltd. 2013. OILS 2013. An Internet Enabled, Global Oil Geochemical Database, GIS Mapping System, and Associated Analytical Service Program (Reservoir Fluid Database – Oil Information Library System). Houston: GeoMark Research. Disponible en <<http://geomarkresearch.com/database-products/>>. Acceso en 20/4/2015.
- Kato, K.; Miyao, A.; Ito, J.; Soga, N.; Ogasawara, M. (2008). The search for the origin of bitumen excavated from archaeological sites in the northernmost island in Japan by means of statistical analysis of FI-MS data. Archaeometry, 50 (6): 1018-1033.
- Kita, Y.; Daneels, A. (2014). Evaluación de aditivos orgánicos para intervención de la construcción prehispánica en tierra del sitio arqueológico de La Joya, Veracruz, México, a través de experimentos en el sitio. In: Neves, C.; Nuñez, D. (Eds.). 14º SIACOT - Arquitectura de Tierra: Patrimonio y sustentabilidad en regiones sísmicas. San Salvador: Red Iberoamericana PROTERRA y FUNDASAL. p. 58-65.
- Kita, Y.; Daneels, A.; Romo de Vivar, A. (2013). Chemical analysis to identify organic compounds in pre-Columbian monumental earthen architecture. The Online Journal of Science and Technology, 3 (1): 39-45. Disponible en <<http://www.tojsat.net/index.php/tojsat/article/view/78/102>>. Acceso en 20/4/2015.
- Kita, Y.; Daneels, A.; Romo de Vivar, A. (2014). Chapopote como estabilizante de la construcción de tierra cruda. In: Román Kalisch, M. A.; Canto Cetina, R. E. (Eds.). Tecnohistoria - Objetos y artefactos de piedra caliza, madera y otros materiales. Mérida: Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de Yucatán; Dirección de Estudios Históricos del Instituto Nacional de Antropología e Historia. p. 174-193.
- National Park Service, US Dept. of the Interior. (1962). Handbook for Ruins Stabilization, Part 2: Field Methods. Washington, D.C.: NPS, US Dept. of the Interior. Disponible en <<http://npshistory.com/publications/handbook-ruins-stabilization.pdf>> Accessed 20/4/2015.
- Oliver, A. (2000). Fort Selden adobe test wall project – phase I: final report. Los Angeles: The Getty Conservation Institute, ICCROM, CRATerre-EAG. Disponible en <[http://www.getty.edu/conservation/publications\\_resources/pdf\\_publications/pdf/terraftselden.pdf](http://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/pdf/terraftselden.pdf)> Accessed 20/4/2015.
- Torraca, G.; Chiari, G.; Gullini, G. (1972). Report on mud brick preservation. Mesopotamia. Rivista di archeología, epigrafia e storia orientales antica, 7: 259-287.
- Trott, J. (1997). Ruins preservation – Pre Columbian and historic ruins preservation in the arid Southwest. Cultural Resource Management, 20 (10): 46-49. Disponible en <<http://www.nps.gov/history/CRMJournal/CRM/v20n10.pdf>> Accessed 20/4/2015.
- Wendt, C. J.; Lu, S. T. (2006). Sourcing archaeological bitumen in the Olmec Region. Journal of Archaeological Science, 31 (1): 89-97.
- Wendt, C. J.; Cyphers, A. (2008). How the Olmec used bitumen in ancient Mesoamerica. Journal of Anthropological Archaeology, 27 (2): 175-191.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al financiamiento por la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM, al proyecto PAPIIT IN 300812 “Patrimonio arquitectónico en tierra: estudio y gestión” (2012-14), siendo responsable la segunda autora quien además está a cargo del proyecto arqueológico en el sitio de La Joya. Por otro lado, los autores agradecen el apoyo económico por

parte del presupuesto del Laboratorio 2-7 del Instituto de Química de la UNAM, a cargo del tercer autor.

La primera autora agradece al programa de Becas Posdoctorales en la UNAM, Instituto de Investigaciones Antropológicas, UNAM, periodo 2011-II y 2012-II, así como a la Beca "Genaro Estrada" para Expertos Mexicanistas del Gobierno de México 2014.

Los autores agradecen al Dr. Francisco Javier Pérez Flores del Laboratorio de Espectrometría de Masas del Instituto de Química de la UNAM por los análisis de CG-EM, y al M. en C. Francisco Javier Otero Trujano, a la M. en C. Edith Cienfuegos Alvarado y al M. en C. Pedro Morales Puentes del Laboratorio de Isótopos Estables del Instituto de Geología de la UNAM por los análisis de isótopo estable de carbono 13.

La fabricación de los adobes y muros experimentales fue realizada con la ayuda de Alberto Fernández Enríquez y Miguel Soto Plata, Ciriaco Martínez del Mazo, Noel Felipe Fernández y Juan Daniel Enríquez Pérez, Ismael Felipe Fernández y Gerardo González Castañeda, y la Mtra. Rocío Velasco Fuentes.

Todos los análisis de muestras prehispánicas, experimentos en el sitio arqueológico de La Joya y las obras de preservación de la pirámide fueron realizados con los permisos del Consejo de Arqueología del Instituto Nacional de Antropología e Historia de México.

## AUTORES

Yuko Kita, doctora en arquitectura, maestra en conservación y restauración de bienes culturales inmuebles, arquitecta; profesora investigadora de tiempo completo de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Investigación posdoctoral sobre tecnología original de arquitectura prehispánica de tierra en el sitio arqueológico de La Joya, Medellín de Bravo, Veracruz y su preservación. Investigación actual sobre el patrimonio construido en tierra en la zona norte de México.

Annick Daneels, doctora en antropología, doctora en arqueología, arqueóloga; investigadora de tiempo completo de la UNAM; miembro de la Red Iberoamericana PROTERRA; editora del Anales de Antropología; responsable del proyecto Exploraciones en el Centro de Veracruz, responsable del proyecto de excavación, investigación y preservación de la arquitectura monumental del sitio arqueológico de La Joya, Medellín de Bravo, Veracruz.

Alfonso Romo de Vivar, doctor en química, químico; investigador emérito de la UNAM y del Sistema Nacional de Investigadores del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México; miembro del Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y la Conservación del Patrimonio Cultural de México.

## BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDOS CON SUELOS DERIVADOS DE CENIZAS VOLCÁNICAS Y MATERIALES RECICLABLES: UNA ALTERNATIVA ECOLÓGICA

**Gloria Milena Molina Vinasco<sup>1</sup>; Mónica Andrea Arenas Castaño<sup>2</sup>; Alejandro Londoño<sup>3</sup>; Oscar Andrés Parra<sup>3</sup>; Lina Marcela Vallejo<sup>3</sup>**

Universidad Libre Seccional Pereira

<sup>1</sup>gmmolina@unilibrepereira.edu.co, <sup>2</sup>moaca5@hotmail.com, <sup>3</sup>alondono.civil@unilibrepereira.edu.co,  
<sup>3</sup>oaparra.civil@unilibrepereira.edu.co, <sup>3</sup>lmvallejo.civil@unilibrepereira.edu.co.

**Palabras clave:** BTC, ceniza volcánica, resistencia a compresión, materiales reciclables

### Resumen

El suelo como materia prima se ha usado en la construcción de vivienda desde la antigüedad con el uso del bahareque, tapia, adobe y bloque de tierra comprimida BTC. Actualmente se adelantan investigaciones para utilizarlo en la fabricación de bloques comprimidos. Este proyecto presenta la metodología para la elaboración de BTC no estructurales con suelos, producto de la meteorización de las cenizas volcánicas y materiales reciclables, comparando su resistencia y absorción con las normas NTC para la fabricación de ladrillos no estructurales y bloques de suelo cemento. En el proyecto se realizaron 16 tratamientos con distintas dosificaciones y con los siguientes materiales: suelo/vidrio, suelo/cartón, suelo/aserrín y suelo/plástico. Se logró determinar que el tratamiento que mostro mejores resultados fue suelo/cartón, sin embargo todos tuvieron absorciones superiores al 14%. Con la adición de cal al 3% al tratamiento suelo/cartón, se obtuvo resistencias a la compresión simple hasta de 9 MPa y absorciones inferiores a 14%, que se acercan a las recomendaciones de la norma NTC 4205 y NTC 5324. El costo del bloque individual no estructural terminado fue de 9,17 centavos de dólar (septiembre de 2015), valor que resulta inferior al costo de un ladrillo común (11,67 centavos de dólar). Se concluye entonces que este BTC puede ser considerado como un material alternativo de bajo costo y alto beneficio ambiental en cuanto al ahorro de energía, durante su proceso de secado al aire sin usar proceso de combustión.

### 1 INTRODUCCIÓN

La tierra ha sido un material de construcción usado en todos los lugares y en todos los tiempos; los hombres se familiarizaron con sus características y aprendieron a mejorárlas agregándole fibras vegetales como refuerzos para mejorar su resistencia (Pons, 2001). De acuerdo con Bestraten, Hormías y Altemir (2011), la construcción con tierra durante la primera década del siglo XXI ha resurgido en todo el mundo como un material con propiedades sostenibles, de bajo impacto ambiental y de gran capacidad expresiva, en su artículo realizan un compendio de obras construidas con técnicas como el tapial, el bloque de tierra comprimida (BTC) y el adobe, haciendo énfasis en los avances de investigación y calidad en las mismas. Sin embargo en la actualidad aún existe la preocupación por su calidad y técnicas de preparación.

De acuerdo con esta problemática, se observa una tendencia a nivel latinoamericano y europeo en reutilizar la construcción con bloques de tierra comprimida fabricados con suelo y otros aditivos que cumplan con las normas de construcción y calidad de cada uno de los países. Diversas investigaciones han sido realizadas para encontrar la resistencia y/o aditivos que se pueden aplicar al suelo en el proceso de fabricación de BTC, entre ellas se pueden mencionar: comportamiento de bloques de tierra comprimida sometidos a diferentes condiciones de humedad en España en el año 2003; bloques de tierra comprimida sin adición de cemento (Galíndez, 2009); resistencia a la compresión de bloques de tierra comprimida estabilizados con materiales de sílice de diferente tamaño de partícula; hacia un avance ambiental y tecnológico de la construcción con tierra como patrimonio futuro (Yepes; Bedoya; Gómez, 2012).

Al mismo tiempo, en la literatura se encuentran normas, centros de investigación y artículos dedicados al análisis de estos materiales, entre ellos se puede mencionar: estructuras de bajo costo y el rol del CISMID en Perú (Torres, 2012); normas nacionales de sismo-resistencia en Perú en el año de 2006; Proyecto de investigación Proterra del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, CYTED, que busca difundir el uso de la tierra en la construcción de edificaciones (Garzón; Neves, 2007); el Centro Regional de Investigaciones de Arquitectura de Tierra Cruda – CRIATIC (Mellace y otros, 1992). En la década de 1950, el Centro Interamericano de Vivienda y Planeamiento de Colombia realizó un programa de investigación y construcción con tierra, desarrollando un modelo bastante simple de una prensa manual para fabricación de bloques de suelo cemento, hoy muy conocida por la denominación CINVA Ram. Además de desarrollar actividades de construcción comunitaria en programas de ayuda mutua (Bedoya, 2011).

En Latinoamérica se pueden citar ejemplos de construcciones realizadas con este material, con resultados confiables y que hasta la fecha permanecen estables, como son: Casa de campo en Maldonado (Uruguay-2003); Casita Linda CEDESA México, Guanajuato, 2007 (Cereceda, 2010), Casa Manuel Hernández (Antioquia-1996), Obras como Mesa de Yeguas y Casa Mejía, construidas por el arquitecto Darío Angulo en bloques de suelo cemento procedentes de Bogotá en Colombia (Bedoya, 2011); viviendas sector Cazucá en Bogotá construidas en bloques de tierra prensada (González, 2005).

Sin embargo en el eje cafetero en Colombia no se encuentra información sobre investigaciones dedicadas al análisis de la resistencia de estos materiales construidos con suelos de la zona, así mismo dentro de las normas y códigos sismo resistentes no existe aún aprobación para el uso de estos materiales que aún en la actualidad siguen siendo utilizados.

Por éste motivo, es necesaria la realización de investigaciones que permitan conocer si los BTC construidos en la zona cumplen con las normas de construcción vigentes; este documento presenta los resultados de la investigación realizada con suelo (cenizas volcánicas) mezclado con algunos materiales reciclables (vidrio, cartón, aserrín, plástico), como una alternativa de construcción, utilizando todos aquellos conceptos ingenieriles que permiten el desarrollo de un material constructivo.

La investigación además de encontrar la resistencia de los BTC, involucra elementos ambientales en la elaboración de los mismos, como son incorporar elementos reciclados y ahorro energético en su proceso de fabricación.

## 2. METODOLOGÍA

Esta investigación se desarrolló en la Universidad Libre Seccional Pereira, Facultad de Ingenierías Programa de Ingeniería Civil. La metodología de tipo experimental (Sampieri; Collado; Lucio, 2006) presenta las fases de trabajo realizadas para llevar a cabo el proyecto. Durante ellas se determinó para la elaboración de los BTC: el suelo a utilizar, los porcentajes de aditivos a aplicar al suelo, así como las variables relevantes en su proceso de fabricación, como son la humedad de compactación y el tiempo de secado.

### 2.1 Fase 1: Extracción y análisis de suelos

Se extrajeron muestras de suelo derivado de cenizas volcánicas, en zona rural del Municipio de Pereira Risaralda Colombia, Norte: 4° 43' 35,59", Oeste: 75° 42' 24,66", Elevación: 1449 msnm.

Se realizaron cinco perforaciones a una profundidad máxima de 2,0 m, las muestras fueron tomadas de forma aleatoria en el lugar. Se tomaron 5 kg de material alterado y muestras inalteradas en tubo Shelby.

A estas muestras se les realizaron ensayos de clasificación y de resistencia, como son: contenido de humedad (NTC 495), límites de Atterberg (NTC 4630), granulometría (NTC 1522), lavado por tamiz #200 (NTC 78), hidrómetro (INV E 124), resistencia a la compresión

inconfinada (NTC 1527), peso unitario (INV E 141), Proctor modificado (INV E 142). En la tabla 1 se presentan los resultados de los análisis de laboratorio realizados.

Tabla 1. Características de los suelos analizados

Suelo	W (%) NTC 1494	$\gamma$ (t/m <sup>3</sup> ) I.N.V.E 141	Clasificación NTC 4630				Lavado tamiz #200 NTC78	Hidrometría INV.E 124-07			Resistencia a la compresión NTC 1527		$\gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> ) INV142	w (%) INV142
			LL (%)	LP (%)	IP (%)	USCS		% Arcilla	% Limo	% Arena	qu (N/m <sup>2</sup> )	C (N/m <sup>2</sup> )		
1	56,2	1,7	64,6	52,4	12,2	MH	45,3	7,41	37,1	54,7	9,0	4,5		
2	55,7	1,7	72,8	56,9	15,9	MH	54,9	14,2	39,0	45,1	10,0	5,0		
3	74,9	1,6	50,3	47,9	2,4	ML	64,1	38,4	24,5	35,9	2,6	1,3		
4	52,6	1,6	54,5	48,6	5,9	MH	66,8	45,4	37,8	15,2	2,8	1,5	1,2	26,0
5	77,2	1,5	58,0	51,3	6,7	ML	84,8	28,5	35,6	33,2	6,1	3,0		

$\gamma_d$ : peso unitario seco máximo (t/m<sup>3</sup>); w: humedad óptima de compactación (%);

Después de haber obtenido los resultados de los análisis de laboratorios mencionados y de conocer el porcentaje de suelos finos, limos y arcillas, se escogió la muestra de suelo con mayor contenido de arcilla para la elaboración de bloques de tierra comprimida.

## 2.2 Fase 2: Dosificación de los materiales suelo/aditivos

Los aditivos elegidos para conformar los BTC son reciclables para fabricar un bloque ecológico y económico. Los materiales fueron: cartón, vidrio, plástico y aserrín; además del suelo del sitio, arena y agua.

Los porcentajes de dosificación se determinaron de acuerdo con la experiencia en fabricación de ladrillos y con base en las investigaciones realizadas en BTC que anteceden el proyecto. El BTC tiene dimensiones de 30 cm x 15 cm x 5 cm, volumen de 2250 cm<sup>3</sup>; de acuerdo con los ensayos realizados previamente a los suelos, se determinó que el peso de cada bloque es de 3,6 kg.

En la tabla 2 se describe de forma detallada el número de bloques que se realizaron para cada uno de los tratamientos escogidos, utilizando porcentajes fijos del 5%, 10% y 15%, para un número total de 120 unidades fabricadas.

Tabla 2. Dosificación de los materiales

Componentes	Unidades	Porcentajes de aditivos	Tratamiento
Arena + Suelo	4	Arena 5%	T1
	4	Arena 10%	T2
	4	Arena 15%	T3
Cartón + Arena + Suelo	4	Cartón 5%, arena 10%	T4
	4	Cartón 10%, arena 10%	T5
	4	Cartón 15%, arena 10%	T6
Aserrín + Arena + Suelo	4	Aserrín 5%, arena 10%	T7
	4	Aserrín 10%, arena 10%	T8
	4	Aserrín 15%, arena 10%	T9
Vidrio + Arena + Suelo	4	Vidrio 5%, arena 10%	T10
	4	Vidrio 10%, arena 10%	T11
	4	Vidrio 15%, arena 10%	T12
Plástico + Arena + Suelo	4	Plástico 5%, arena 10%	T13
	4	Plástico 10%, arena 10%	T14
	4	Plástico 15%, arena 10%	T15
Cartón + Arena + Cal + Suelo	40	Cartón 5%, arena 10%, cal 3%	T16

### 2.3 Fase III – Proceso de elaboración del bloque de tierra comprimida

El primer paso de esta fase consistió en la preparación de los aditivos, el cartón se utilizó en estado saturado, llevándolo hasta una consistencia acuosa, el vidrio se pulverizo hasta llegar a un tamaño máximo de 2mm, el aserrín se tamizo por un tamiz de abertura igual a 4,75 mm y la arena se tamizo por un tamiz de abertura 0,425 mm.

La fabricación del BTC se realizó con una prensa manual modelo CINVA Ram desarrollado por el Centro Interamericano de Vivienda y Planeamiento en 1963. El procedimiento consistió en realizar la dosificación por peso, determinada para cada uno de los tratamientos, para posteriormente realizar la mezcla con una humedad óptima determinada con el ensayo de Proctor modificado dejándola cubierta para evitar pérdida de humedad por un periodo mínimo de 16 horas, en el cual la mezcla alcanzara una humedad de equilibrio.

Pasado este tiempo se llevó el material a la prensa que tiene un molde de acero con las dimensiones de fabricación del BTC, por medio de la cual se realiza el ciclo de compresión. Comprimido el bloque, se dejó secar al aire libre durante un periodo de 7 días.

Para todos los bloques se realizó el mismo procedimiento y fueron fabricados el mismo día para minimizar las variables de cambio en los resultados esperados. Después de 7 días de edad, se procedió a realizar las pruebas de resistencia en la maquina universal adaptando las recomendaciones de NTC 4205 y NTC 4017 para ladrillos cocidos y NTC 5324 para bloques de suelo cemento y de absorción NTC 4205 y NTC4017 para ladrillos cocidos y NTC 5324 para bloques de suelo cemento.

Con los resultados de los ensayos de absorción y compresión simple, se determinó que para el tratamiento que cumpliera con la resistencia a la compresión promedio más alta, se le adicionaría un porcentaje de cal del 3% para aumentar la cohesión en el suelo y por ende su resistencia en seco, y evitar el desmoronamiento del bloque ante la prueba de absorción. Este porcentaje fue escogido usando los ábacos de Mc. Dowel y de Metcalf, y buscando no exceder el costo de fabricación de un ladrillo convencional macizo.

### 2.4 Fase IV. Construcción de muretes de BTC, aplicando el tratamiento 16

Se replicó el proceso para la elaboración de BTC, utilizando suelos derivados de cenizas volcánicas, seleccionados en la ciudad de Pereira, producto de la excavación para fundaciones.

Se elaboraron nueve muretes de tres unidades de mampostería unidas con mortero, como se muestra en la figura 1.



Figura 1. Elaboración de los muretes

Los muretes fueron probados siguiendo las recomendaciones de la norma NTC 3495, NTC 5324 y la norma sismo resistente NSR-10 para ensayos en muretes.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados de las pruebas de compresión y de absorción de los BTC. En los tratamientos 11–12 (vidrio) y 14–15 (plástico), no se logró obtener una

adecuada manejabilidad ya que el contenido de humedad con la mezcla de vidrio y plástico se incrementó, por tal motivo no se llegó a la compactación esperada y no fue posible elaborar el bloque propuesto.

En la figura 2 se presentan una comparación entre los valores de la resistencia a la compresión no confinada promedio, para todos los tratamientos, con un tamaño de muestra mínimo de 4 unidades y máximo de 40 unidades. Al comparar todos los tratamientos analizados, se determinó que el valor mínimo fue de 1,25 MPa (tratamiento 9) y el máximo valor de 7,28 MPa (tratamiento 16).

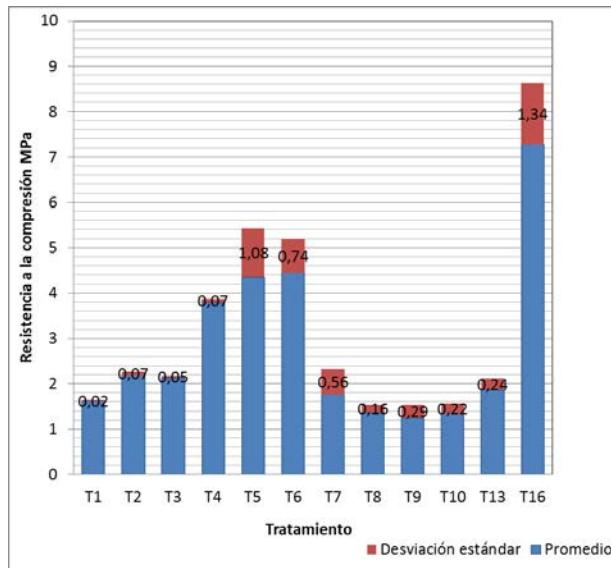


Figura 2. Resistencia a la compresión promedio de los tratamientos

De acuerdo con la norma NTC 4017, el valor de resistencia a la compresión promedio para un grupo de 5 ladrillos macizos no debe ser inferior a 10 MPa, se encontró que los tratamientos realizados sin adición de cal presentaron valores promedios inferiores en un 90%, al valor estipulado en la norma, mientras que, para el tratamiento 16 con adición de cal al 3%, se obtuvieron valores comprendidos entre 4,41 MPa y 9,59 MPa, con un porcentaje menor al aceptado en la norma desde un 1%, hasta un 50%.

Se observó que los bloques probados alcanzaron resistencias menores a las exigidas por la norma NTC 5324, las cuales no deben ser inferiores a 2MPa para BSC-20 y a 6 MPa para BSC-60. Debe tenerse en cuenta que los bloques se realizaron con suelos de textura limo y si adición de cemento; solamente el bloque con adición de cal alcanzo los valores recomendados por la norma.

Sin embargo estos resultados son superiores a los obtenidos por Roux y Olivares (2002), en bloques estabilizados con 6% de cemento y fibra de coco, elaborados con una prensa manual modelo CINVA Ram, como también que los obtenidos por Otero y Sandoval (2003) y Yetgin, Çavdar y Çavdar (2006) en bloques realizados con suelo comprimido.

Al mismo tiempo, Tejada (1993), Moromi (1993), Red Habiterra (1995) y Rodríguez, Barroso y Saroza (1997) coinciden en que la resistencia mínima que debe alcanzar una unidad debe encontrarse entre 1,00 MPa y 1,20 MPa, valores alcanzados en todos los bloques probados.

Adicionalmente se realizó una comparación entre los pesos unitarios húmedos de los bloques y la resistencia a la compresión para el tratamiento 16, mostrando el comportamiento en la figura 3. Se determinó que, con la energía de compactación aplicada por la máquina CINVA Ram, se logran obtener pesos unitarios secos comprendidos entre 0,91 t/m<sup>3</sup> y 1,58 t/m<sup>3</sup>, con un valor promedio de 1,05 t/m<sup>3</sup>, el último inferior al valor obtenido en el ensayo de Proctor modificado para el suelo, que debía ser de 1,23 t/m<sup>3</sup>.

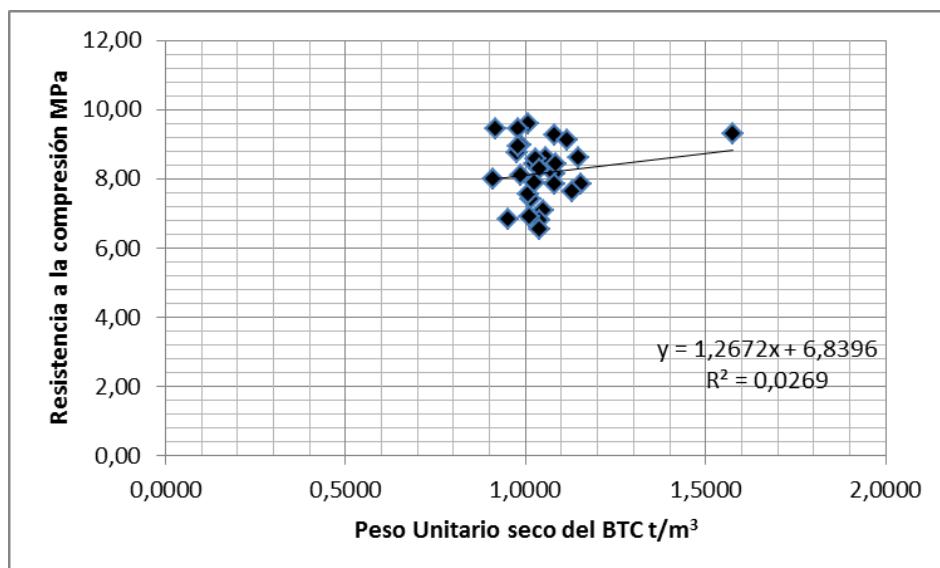


Figura 3. Comparación entre el peso unitario húmedo y la resistencia a la compresión del BTC

Los análisis de absorción mostraron que todos los tratamientos que no contenían cal, sufrirían un proceso de desmoronamiento cuando estuvieron sometidos a saturación en agua, como se observa en la figura 4, solamente el tratamiento 16 presentó un valor de absorción distinto al 100%, con un intervalo de valores entre 7,48% y 13,82%.

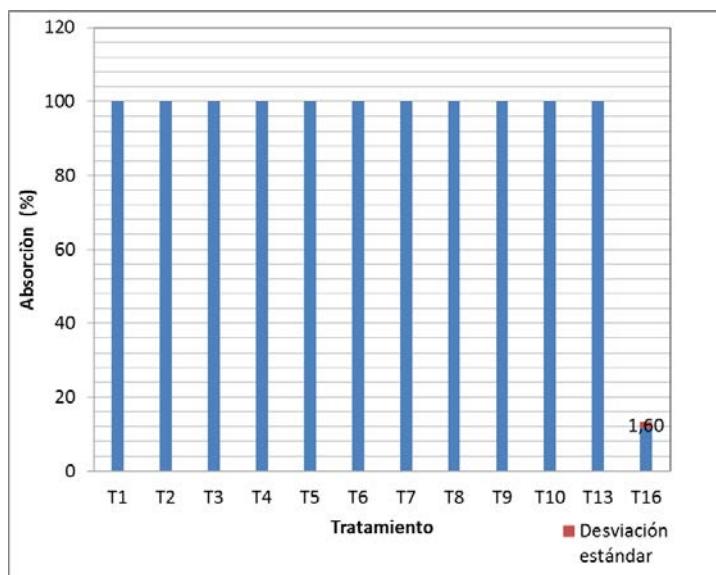


Figura 4. Comportamiento de los BTC al ensayo de absorción

Roux y Olivares (2002) encontraron valores de absorción máximos en sus ensayos de 15% para BTC estabilizados con cemento. Galíndez (2009) encontró que a mayor energía de compactación aplicada al suelo, se disminuirá la absorción de agua y se incrementará la resistencia a la compresión del mismo hasta un valor de 4,4 MPa sin adición de ningún estabilizante para suelos con altos contenidos de arcilla, también recomienda el uso de materiales hidrófugos para disminuir la absorción.

Los muretes fueron realizados con suelos producto de la meteorización de cenizas volcánicas extraídos de un sector diferente al cual se realizaron las pruebas iniciales, con el objeto de verificar si se podrían obtener réplicas del comportamiento a la compresión aún con suelos en los cuales las condiciones granulométricas y de plasticidad no fueran idénticas a las del suelo base, las demás condiciones no se alteraron.

El suelo utilizado fue clasificado como un suelo limo arenoso de baja plasticidad, ML, con un menor contenido de arcilla y mayor contenido de arena que el suelo inicial. La resistencia

promedio para los muretes individuales fue de 1,0 MPa, mucho menor a la encontrada con suelos con mayor contenido de arcilla.

En la tabla 3, se presentan los resultados obtenidos para las pruebas de resistencia de los muretes. Se observa que las resistencias de los muretes son mayores a 1,00 MPa, con un valor promedio de 1,35 MPa. Este comportamiento muestra que la resistencia de los muretes es menor a la establecida para BSC-20 establecida por la norma NTC-5324.

Tabla 3. Resultados de la resistencia de los muretes

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>a (cm)</b>	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
<b>b (cm)</b>	28,00	27,00	29,00	30,00	28,00	28,50	26,00	28,50	28,00
<b>c (cm)</b>	29,50	29,50	29,50	29,00	29,50	29,50	29,50	30,00	29,50
<b>Peso (kg)</b>	14,02	13,81	14,88	15,16	14,55	14,62	13,53	15,37	14,58
<b>Resistencia (MPa)</b>	1,04	1,04	1,18	1,10	1,24	1,44	1,70	1,92	1,48

Como se explicó en la metodología, el proceso de fabricación de los bloques es de tipo artesanal y no incluye la fase de cocción usada en la producción del ladrillo puzolánico, hecho que disminuye el gasto energético durante su proceso de fabricación, así como las emisiones de gas carbónico durante la combustión. Por eso, en esta fase de la investigación, no se determinó el valor del costo energético para la producción de los mismos.

Para tener una referencia del beneficio se consultaron investigaciones direccionaladas al cálculo del valor energético de producción de ladrillos cocidos (Oti; Kinuthia; Bai, 2009), indican que la fabricación tradicional de estos tiene un coste energético de 4186,8 MJ por cada tonelada de ladrillos producidos con una temperatura de cocción entre 900°C y 1200°C liberando a la atmósfera alrededor de 202 kg de CO<sub>2</sub>/tonelada (BDA, 2008). Por el contrario, usando sistemas artesanales de fabricación sin incluir cocción se pueden llegar a costos energéticos de 657,1 MJ/t y unas emisiones totales de 40,95 kg de CO<sub>2</sub>/t (Cabo, 2011).

#### 4. CONCLUSIONES

Con la presente investigación se comprobó que con un suelo clasificado como un limo arenoso de alta plasticidad (MH), con un límite líquido de 54,5% y un límite plástico de 48,6%, con un índice de plasticidad de 6%, es posible fabricar BTC estabilizados con cal y cartón obteniendo una resistencia promedio a la compresión de 7,2 MPa, y una absorción menor a 14%, valores que aunque no cumplen las normas NTC para ladrillos macizos no estructurales, son superiores a los obtenidos y aceptados en investigaciones realizadas a nivel mundial para BTC.

Se determinó que el tratamiento 16, generó buenos resultados al elaborar los bloques de tierra comprimido mezclado con cal al 3%, cartón al 5%, y arena al 10%. Con esta dosificación se alcanzaron las resistencias y absorciones especificadas. El costo de la elaboración de éste bloque es de 9,17 centavos de dólar (septiembre de 2015), cuyo valor incluye costos directos e indirectos de fabricación. El precio encontrado en la zona para un ladrillo común es un valor de 11,67 centavos de dólar.

Se recomienda que la relación entre la longitud y la altura debe ser aproximadamente de 4 a 1 para permitir un traslape horizontal en proporción 2 a 1, lo cual brinda seguridad ante el efecto de corte producido por los sismos. Como también mantener el suelo en reposo húmedo durante 16 horas, con la humedad óptima determinada en el ensayo de Proctor modificado lo cual facilitara el mezclado y favorecerá la compactación.

Se concluye que deben fabricarse BTC con una prensa hidráulica que genere una energía de compactación mayor que la prensa manual, para disminuir los espacios vacíos y lograr una mayor cohesión entre las partículas. Este proceso aumentara la resistencia a la compresión simple y disminuirá la absorción del suelo para obviar la estabilización del suelo con cal.

Se observan valores aceptables para resistencias a la compresión de muretes, aunque sean realizados con suelos de menor contenido de arcilla, sin embargo es claro que el contenido de arcilla en el suelo a usar debe ser evaluado antes de la fabricación de los BTC.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BDA, (2008). Brick Development Association. {online} accesses on the 28/7/2008 <http://www.brick.org.uk/industry-sustainability.html>.
- Bedoya, M. C, M.(2011) Construcción sostenible para volver al camino. Biblioteca Jurídica DIKE. Universidad tecnológica de Cataluña
- Bestraten, S. Hormías, E. Altemir, A. (2011). Construcción con tierra en el siglo XXI. Earthen construction in the 21rst century. Informes de la Construcción Vol. 63, 523, 5-20, julio-septiembre 2011
- Cabo, L, M. (2011). Ladrillo ecológico como material sostenible para la construcción presentado por María Cabo Laguna Universidad Pública de Navarra Escuela Técnica Superior De Ingenieros Agrónomos Junio.
- Cereceda (2010). Construyendo con adoblock un México mejor. <http://suenamexico.com/verde-y-social/construyendo-con-adoblock-un-mexico-mejor/>
- Galíndez, F. (2009). Bloque de tierra comprimida sin adición de cemento (BTC); Aportación al ahorro energético. Seguridad y Medio Ambiente n.115. Madrid: Revista de Fundación Mapfre.
- Garzón, L, E; Neves, C. M. (2007). Investigar, formar, capacitar y transferir. Los grandes desafíos de la arquitectura y construcción con tierra. Apuntes. Volumen 20 numero 2, 324-335.
- González (2005). Incidencia de la forma y composición del bloque de tierra prensada – Caso Cazucá. Disponible en <http://es.slideshare.net/archieg/incidencia-de-la-forma-y-composicion-del-btp-en-el-uso-como-elemento-arquitectnico-para-viviendas-sector-cazucá>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (1995). NTC 78. Ingeniería civil y arquitectura. Método para determinar por lavado el material que pasa el tamiz 75 mm en agregados minerales. Bogotá: ICONTEC
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (1999). NTC 1522 - Suelos. Ensayos para determinar la granulometría por tamizado. Bogotá: ICONTEC
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (1999). NTC 4630. Método de ensayo para la determinación del límite líquido, del límite plástico y del índice de plasticidad de los suelos cohesivos. Bogotá: ICONTEC
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2000). NTC 1527. Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión inconfinada de suelos cohesivos. . Bogotá: ICONTEC
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2003). NTC 3495; Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de muretes de mampostería. Bogotá, D.C: Editada por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). 2003.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2005). NTC 4017. Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla. Bogotá: ICONTEC
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2008). NTC 5324; Bloques de suelo cemento para muros y divisiones. Definiciones. Especificacione. Métodos de ensayo. Condiciones de entrega. Bogotá, D.C: Editada por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). .
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2009). NTC 4205. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos. Disponible en: [www.sinab.unal.edu.co/ntc/NTC4205-1.pdf](http://www.sinab.unal.edu.co/ntc/NTC4205-1.pdf)

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2013). NTC 1495. Suelos. Método de ensayo para determinar en el laboratorio el contenido de agua (humedad) de suelos y rocas, con base en la masa. Bogotá: ICONTEC

Instituto Nacional de Vías (2007). INV E-124. Análisis granulométrico por medio del hidrómetro. Bogotá INVIAS.

Instituto Nacional de Vías (2007). INV E-141. Relaciones de humedad – masa unitaria seca e los suelos (ensayo normal de compactación). Bogotá: INVIAS

Instituto Nacional de Vías (2007). INV E-142. Relaciones de humedad – masa unitaria seca e los suelos (ensayo modificado de compactación). Bogotá: INVIAS

Mellace, R.; Sosa, M.; Maris, S.; Arias, L.; Alderete, C.; Ferreira, I.; Soria, R.; Rotondaro, R. (1992). Centro Regional de Investigaciones de Arquitectura de Tierra Cruda. Disponible en: [http://www.habitat.arq.una.py/ambitos/tyh/cct/crh\\_cct\\_0090.pdf](http://www.habitat.arq.una.py/ambitos/tyh/cct/crh_cct_0090.pdf)

Moromi Nakata, I. (1993). Materiales utilizados en edificaciones de bajo costo. V Curso Internacional sobre edificaciones de bajo costo en zonas sísmicas. Editado por CISMID la Universidad Nacional de Ingeniería. Perú. Octubre, 1993.

Otero B., L.A., Sandoval, J F. (2003). Comportamiento de bloques de tierra comprimida sometidos a diferentes condiciones de humedad. II Seminario Iberoamericano de Construcción con Tierra. Madrid, 18-19 de septiembre de 2003.

Oti, J.E.; Kinuthia, J.M.; Bai, J., (2009). Engineering properties of unfired clay masonry bricks. *Engineering Geology* 107 130-139.

Pons, G. (2001). La tierra como material de construcción. Disponible en: [http://ieham.org/html/docs/La\\_tierra\\_como\\_material\\_de\\_construcion.pdf](http://ieham.org/html/docs/La_tierra_como_material_de_construcion.pdf)

Red Habiterra (1995). Recomendaciones para la elaboración de normas de edificaciones de adobe, tapial, ladrillos y bloques de suelo cemento. Bolivia: CYTED/Habiterra

Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (1997). NSR-10. Título D – Mampostería estructural. Bogotá, D.C: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.

Rodríguez D., M. A.; Barroso V, Ileana J; Saroza H, B. (1997). Aplicación tecnológica del adobe estabilizado. Universidad de Oviedo.

Roux G., R.S; Olivares S., M. (2002). Utilización de ladrillos de adobes estabilizados con cemento Portland al 6% y reforzados con fibra de coco, para muros de carga en Tampico. Informes de la construcción, v. 53, n. 478, marzo-abril 2002. Disponible en: <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/viewArticle/627>

Sampieri R.; Collado, C.; Lucio, P. (2006). Metodología de la investigación. México: Ed. Mc Graw Hill

Tejada, S. U. (1993). Técnicas de preparación y estabilización del adobe. V Curso Internacional sobre edificaciones de bajo costo en zonas sísmicas. Editado por CISMID y la Universidad Nacional de Ingeniería. Perú. Octubre, 1993.

Torres, R (f.c 2012). Investigaciones de estructuras para viviendas de bajo coste y el rol del CISMID. Seminario internacional de seguridad sísmica. Para vivienda de bajo costo. México

Yepes, G. O. N.; Bedoya, M. C. M.; Gómez, E. J. D. (2012). Hacia un avance ambiental y tecnológico de la construcción en tierra como patrimonio futuro. “el bloque de suelo cemento (BSC) al bloque de suelo geopolimerizado (BSG)”. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Maestría en Construcción Modalidad Profundización, Énfasis en Construcción Sostenible.

Yetgin, Ş; Çavdar, Ö; Çavdar, A. (2006). The effects of the fiber contents on the mechanic properties of the adobes. Department of Civil Engineering, Gumushane Faculty of Engineering, Karadeniz Technical University, 29000 Gumushane, Turkey

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a La Universidad Libre de Pereira, por la financiación de la investigación, y la adecuada disposición de recursos y laboratorios para el desarrollo del trabajo.

## AUTORES

Gloria M. Molina Vinasco, Maestra en ciencias en ingeniería civil con énfasis en geotecnia, ingeniera civil; Líder del grupo de Investigación GICIVIL Pereira. Docente investigadora de La Universidad Libre Seccional Pereira. Currículo completo.

[http://scienti1.colciencias.gov.co:8081/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod\\_rh=0001361631](http://scienti1.colciencias.gov.co:8081/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001361631)

Mónica Andrea Arenas Castaño. Ingeniera civil. Egresada de la Universidad Libre Seccional Pereira.

Alejandro Londoño, Oscar Andrés Parra, Lina Marcela Vallejo, estudiantes de noveno semestre Ingeniería Civil. Universidad Libre Seccional Pereira.

## 11. LA CABUYA EN LOS REVOQUES EN TIERRA

**Mónica Pesántes Rivera**

mona9599@yahoo.com

**Palabras clave:** Acabados en tierra, fibra vegetal, agave, revestimiento, resistencia a la tensión

### Resumen

El empleo de materiales como la paja en la construcción y restauración en tierra, hoy enfrenta problemas debido a la dificultad de obtenerla; el crecimiento de este material y específicamente de la variedad propia para la construcción en tierra, se da en páramos que se encuentran generalmente protegidos legalmente, haciendo cada día más difícil su recolección. Esto unido a la necesidad de mejorar la resistencia a la tensión del revoque a través de materiales similares a la paja, lleva a buscar alternativas que sean manejables y fáciles de obtener para su uso hoy en día. Así el uso de fibras vegetales como la cabuya, producto de una planta de origen andino muy conocido en el Ecuador y que se encuentra presente en grandes cantidades en el mercado, evidencia características que la hacen idónea como ingrediente que supera las funciones y cualidades de la paja en el revoque tradicional. Así el uso de este material brinda la posibilidad ya no solo de cubrir la falencia de la paja en este proceso constructivo; su uso brinda la posibilidad de superar la capacidad de resistencia a la tensión que presenta la paja y con una preparación y empleo adecuado del barro puede generar una mejor calidad de revoque eliminando incluso la necesidad de protecciones adicionales como el conocido empañete.

### 1 INTRODUCCIÓN

En este momento, cuando se hace evidente los efectos causados por un desarrollo antagónico con el medio ambiente, la mirada de la humanidad se encamina hacia un trabajo conjunto que materialice el hoy indispensable desarrollo sostenible. En este camino surge la Agenda para el Desarrollo Sostenible<sup>1</sup>, promovida por Naciones Unidas y de cumplimiento por parte de los estados adherentes, Plan cuya aprobación definitiva se celebrará en septiembre del 2015.

Esta Agenda constituye una herramienta para planificar el desarrollo en los países suscriptores, y, a través de sus metas se pretende garantizar que el cumplimiento de los mismos se refleje en un desarrollo coherente con los recursos de su territorio, su cultura y su gente. Y es en uno de ellos, el de la construcción de la vivienda y de los asentamientos humanos (objetivo 11), donde se puede evidenciar de manera muy clara sus metas concretas en torno a esa sostenibilidad; el camino está trazado, el cómo se haga el recorrido hará la diferencia y será cada uno de los países suscriptores los que asuman ese trabajo.

Adicional, se ha desarrollado y se está desarrollando una serie de estudios vinculados directamente con la construcción de vivienda; concretamente entorno a materiales y sistemas constructivos sostenibles que contribuyan al confort y calidad de hábitat; por lo tanto aspectos como los medio ambientales, socio-económicos y culturales son parte imprescindible de sus respuestas; Universidades e instituciones encargadas de la investigación, cada día se suman en esta tarea que ya se observa como una tarea colectiva; donde materiales y sistemas constructivos son analizados desde una visión ambiental y de responsabilidad social, y sin lugar a duda es en el conocimiento ancestral donde reposa una de las respuestas más adecuadas desde hace miles de años y más específicamente en la construcción en tierra.

<sup>1</sup> Esta Agenda constituye la continuación de la Agenda para los Objetivos del Milenio cuyo año meta era el 2015; y para su implementación los países firmantes se comprometerán en realizar los cambios necesarios tanto en sus políticas económicas, sociales, culturales, de gobernabilidad, etc. Conformada por 17 objetivos y 169 metas que serán comunes para que los gobiernos del mundo se encaminen hacia un bienestar para los próximos 15 años.

En el tema de la vivienda y de la sostenibilidad ambiental en Ecuador, estos últimos años, ha venido direccionando lentamente una mirada al pasado; técnicos vinculados con el Patrimonio Cultural son los que con más fuerza han colocado “la construcción en tierra” sobre la mesa de discusión; camino que en algunos países al estar con pasos más adelantados, ya se empieza a observar su tratamiento como un material necesario a considerar hacia un desarrollo sostenible. Esto en el país aún no arranca con fuerza, sin embargo algunas universidades ecuatorianas ya han armado programas de investigación sobre la eficiencia y empleo adecuado de estas técnicas constructivas tradicionales<sup>2</sup>, pero aún en el campo oficial su tratamiento se limita al área del Patrimonio Cultural Inmueble.

Sin embargo, es precisamente en la actividad privada, en el ejercicio profesional independiente, donde se han dado pequeños, constantes pero significativos aportes en el manejo, mejoramiento e incluso innovación tanto en el uso de los materiales como en la aplicación de estas técnicas constructivas ancestrales. La práctica, la experiencia y la persistencia profesional han podido generar logros que pueden y deben ser difundidos o incluso puestos a profundizar sus estudios en los mismos centros de investigación y Universidades del país.

“Tradición e innovación” son condicionamientos imprescindibles a la hora de abordar la construcción en tierra como un camino verdadero hacia el desarrollo sostenible y es en ese marco donde el aporte de quienes día a día trabajan en contacto directo con este material, pueden y deben tomar una posición activa de reivindicación de estos saberes tan antiguos como nobles con esta sociedad, este territorio, su cultura y su tiempo.

Este trabajo se sustenta en la experiencia levantada sobre aciertos y desaciertos en el ejercicio profesional privado y donde se tiene que enfrentar nuevos problemas que se derivan de la pérdida de la memoria constructiva, problemas vinculados con la protección al medio ambiente, dificultad en la obtención de los materiales básicos para estos sistemas constructivos tradicionales.

Es en el campo de estos dos últimos problemas donde se ubica el desarrollo de este estudio; el uso de la paja, que hoy se ha convertido en un material difícil de obtener por lo que se hace indispensable brindar una nueva alternativa si se pretende recuperar las técnicas constructivas tradicionales, sin afectar ninguna de sus cualidades.

## 2 PROBLEMA CONTINUO Y CRECIENTE

Es conocido que los materiales empleados en la preparación de la materia prima para la construcción en tierra, se caracterizan por ser materiales de la localidad, regularmente éstos se obtienen sin mayor esfuerzo o complicación en el territorio donde aplicar; esta situación en el Austro empieza a ser por lo menos difícil cada vez en mayor medida, concretamente con uno de sus componentes principales: la paja; fibra conocida como paja de páramo, con el término científico de *Stipa ichu*; elemento que regularmente se lo obtiene en zonas andinas ubicadas en alturas superiores a los 3500 a 4000 metros s.n.m., zonas que concretamente en el Austro, al estar ubicados en páramos, son parte de áreas ambientalmente protegidas; esto limita considerablemente su obtención, incluso al quedar en lugares muy limitados para el abastecimiento legal de este material, y ante la pérdida del conocimiento sobre sus variedades y la identificación de la adecuada para este uso, se ha generado que se emplee paja que no posee las características necesarias y por consiguiente disminuye o se ve deteriorada la calidad del elemento al cual se vaya a aplicar.

<sup>2</sup> La Universidad de Cuenca, y su Facultad de Arquitectura, a través de su programa Vlir, viene desarrollando proyectos de investigación en torno a materiales y su aplicación en la construcción en tierra; adicional ha desarrollado talleres de intervención en viviendas patrimoniales en un barrio histórico de la ciudad.

La paja al ser una fibra vegetal, puede ser sustituida con otras como las provenientes del tamo del trigo o cebada; sin embargo es conocido que este tipo de cultivos prácticamente han disminuido a casi su extinción en la zona austral del país.

Sin lugar a dudas esto es un problema que se debe afrontar el momento en que se pretende abordar la recuperación de estas técnicas constructivas ancestrales; haciéndose indispensable buscar un sustituto de la *Stipa ichu* que cumpla con las mismas características o incluso brinde mejores cualidades en su uso.

### 3 OBJETIVO

Definir un material que sea la mejor alternativa a la paja *Stipa ichu*.

#### 3.1 Parámetros de selección del nuevo material alternativo

- De fácil acceso y obtención, tanto en zonas rurales como urbanas
- Material de la localidad
- Que tenga propiedades aglutinantes
- Que sea un material natural y renovable, amigable con el medio ambiente
- Que permita mejorar la capacidad de ductilidad y de adherencia del barro
- Que su uso y preparación no requiera equipos o procesos sofisticados
- Bajo costo

### 4 EL NUEVO MATERIAL

Para poder definir una alternativa, se hace indispensable conocer el trabajo que cumple, no solo la paja como componente del barro en la construcción; es importante conocer el trabajo y las funciones que cumplen cada uno de los elementos que lo conforman, sin olvidar el trabajo y función del elemento construido; que en este caso específico es el muro y su revoque

#### 4.1. El revoque, protección de muros en tierra

Ya son conocidas las ventajas y cualidades que tiene el construir en tierra; estas ventajas están dadas por la capacidad de contribuir cada uno de sus componentes hacia un trabajo conjunto en esta construcción; es todo un trabajo que depende de la interrelación y del equilibrio de las funciones entre ellos; por eso se hace indispensable conocer su razón de ser, su papel en este proceso que no se inicia con la construcción, continúa y se concreta con su trabajo presente en pleno funcionamiento de la edificación.

Al hablar de muros de tierra, se está hablando de una unidad conformada por dos elementos: el soporte (de abobe, bahareque o tapia) y su envolvente (revoque); dos elementos que trabajan de manera complementaria y monolítica para garantizar el correcto funcionamiento del muro.

Como ya se refirió, este documento se centra en su envolvente: el revoque; elemento que tiene como objetivo convertirse en una capa de protección para el soporte (principalmente contra la erosión) y de brindar un aspecto estéticamente agradable a la edificación. Esto implica garantizar que el soporte desarrolle de manera correcta todas y cada una de sus funciones y exprese sus cualidades, sin olvidar que junto con el soporte conforman una unidad cuyo funcionamiento y trabajo conjunto genera un muro técnicamente correcto y estéticamente agradable y acogedor.

Por lo tanto para conseguir un correcto funcionamiento, es indispensable conocer los componentes y la función de cada uno de ellos presentes en el revoque y de su vinculación con el trabajo del soporte de tierra. Solo conociendo el papel de cada una de sus partes, se podrá optimizar el funcionamiento del todo.

#### 4.2 Elementos que conforman el revoque

El revoque objeto de este análisis, es el tradicionalmente utilizado en la zona del Austro del Ecuador; es un revoque conformado por “barro reposado”, al que regularmente se agrega dos estabilizantes para mejorar su capacidad de trabajo: la “paja de páramo” y algún tipo de “aglutinante” que originalmente solía variar entre colas vegetales (mucílago de cactus, nopal, suculentas) y colas de origen animal; en la actualidad muchas de estas “colas tradicionales” han sido olvidadas, en el mejor de los casos, se mantiene la de cactus (mucílago) o simplemente se sustituye por cola blanca.

Sin embargo, cuando este revoque tradicional presenta una baja resistencia a la compresión éste puede ser mejorado a través de la incorporación de un agregado muy conocido como es la cal; producto cuyo uso es muy amplio y presenta cualidades estabilizante “que limita los efectos de absorción hídrica, dilatación y retracción de las arcillas presentes” (Guerrero, 2010, 179); y que en un trabajo conjunto, todos contribuyen a generar una mayor elasticidad, durabilidad, y permeabilidad en el revoque.

De esta manera se evidencia que cada uno de los componentes cumple una función específica que debe ser comprendida para poder generar procesos de mejoramiento o, como es en este caso, generar alternativas de nuevos elementos que los sustituyan; la Tabla 1 sintetiza las funciones de cada uno de sus componentes y las facilidades o no de conseguir los mismos.

Tabla 1 – Componentes de un revoque y sus funciones

Componente	Función	¿De fácil obtención?
Arcilla	Hace el papel de pegamento en la mezcla, tiene la capacidad de unir todos los elementos; la falta de la misma da paso a la erosión y su exceso a un fuerte agrietamiento	Si
Arena	Da dureza a la mezcla, ayuda como estabilizador frente a la humedad y la temperatura	Si
Limo	Agregado que contribuye facilitando la fricción interna, su plasticidad es muy baja	Si
Paja	Su presencia y disposición conforma una red que facilita la adherencia del barro, pero adicional absorbe y controla los efectos de cambio de temperatura del ambiente e incluso del mismo fraguado, a través de brindar mayor ductilidad <sup>3</sup> , elasticidad y resistencia evitando el agrietamiento de la tierra	No. Su cultivo se da en páramos que están declaradas zonas ambientales protegidas
Cal	Aglutinante que permite adherencia con otros materiales sin perder la capacidad de respiración del soporte y de la misma tierra que conforma el revoque, así como de permitir el balance de humedad en el aire permitiendo el intercambio del vapor de agua. La cal empleada normalmente es la cal apagada, que puede contribuir a proteger de la humedad al muro y aumenta la resistencia mecánica.	Si

#### 4.3 Explorando una alternativa

En la búsqueda del material que sustituya a la paja *Stipa ichu*, se direcciona la investigación hacia las fibras vegetales, mismas que han sido objeto de diferentes estudios para ser utilizadas en la construcción con tierra; sin embargo la mayoría de ellos se centran en la utilización para la elaboración de adobes y hasta para paneles (Abad M., Aguirre J, Pañega F. 2012) existiendo muy pocos enfocados en revoques o enlucidos y enfocándose en

<sup>3</sup> Propiedad de deformarse de un material frente a la acción de una fuerza

productos como la tuna, plátano y algarrobo, generando emulsiones para su mejoramiento, sin embargo no abordan materiales que sustituyan a la paja de cerro. (Vargas Julio y otros, 1986).

En observancia con los parámetros de selección del nuevo material, se analiza la conveniencia o no de utilizar el sisal o fibra de agave, nombres con el que se le conoce en otros países a la cabuya; se ubica estudios que plantean el uso de esta fibra en la elaboración de adobes cuyos resultados demuestran que su trabajabilidad se vuelve más difícil el momento de preparar el barro lo que aumenta el tiempo de esfuerzo físico y el tiempo de trabajo. Sin embargo se resalta el incremento en su resistencia a la tensión y compresión<sup>4</sup> (Montes B. José Luis, 2009, p.100), datos de mucho valor en la definición de este material para utilizarlo en revoques.

Una vez establecido el papel que debe cumplir el nuevo material, y conociendo de las cualidades físicas, químicas y mecánicas de la cabuya, que ha sido utilizada en algunos procesos de la misma construcción tradicional desde épocas históricas y se encuentra dentro del mismo grupo de las fibras con cualidades similares y en algunos campos superiores a los de la paja; se define a la cabuya como material alternativo sin dejar la necesidad de comparar sus cualidades físicas y mecánicas con otros materiales.

La cabuya es una fibra derivada de las hojas de una planta de género de la *Furcraea andina*, familia de las agaváceas, cultivada en zonas de temperaturas entre los 18 y 24 grados centígrados; una vez procesada y colocada en el mercado, esta fibra junto con otras conocidas, tienen en su composición química los siguientes elementos:

Tabla 2. Composición química de la cabuya comparada con otras fibras existentes en el mercado nacional (Tamayo, 2012, p. 4)

Fibra	Celulosa % peso	Hemicelulosa % peso	Lignina % peso	Pentosas % peso
Cabuya	62,7	----	15,5	17,7
Yute	61 – 71	13 – 20	8,1 – 13	----
Algodón	82 – 93	3 – 6	----	----
Cáñamo	70 – 75	17 – 22	3,7 – 5,7	----

Es necesario tener presente que otros estudios realizados por la Politécnica Nacional en la *Stipa ichu* de Albarracín (2012, p.51), establece que su composición de celulosa es del 45,9%, de lignina el 18,20%, de pentosas 5,5%, cenizas 5,6% y resinas, ceras y grasas 6,7%.

Albarracín (2012, p.5) plantea

La lignina otorga a los vegetales impermeabilización y además facilita la adhesión entre los componentes estructurales (celulosa y hemicelulosa) en el tejido vegetal. Provee a los tejidos la capacidad de resistir ataques patógenos y evitar la pérdida de agua

Si esto se compara con lo manifestado en la Tabla 2, se puede concluir que en base al porcentaje de lignina presente en la cabuya, ésta brinda mayor resistencia hacia impactos de compresión y flexión con respecto a otro tipo de fibras (excepto la paja de páramo), pero adicional es un elemento que contribuye a la impermeabilización de la cabuya, limitando la accesibilidad del agua a la celulosa y hemicelulosa. En general, su papel es el de convertirse en el elemento que facilita la adhesión entre la celulosa y la hemicelulosa; si a esto se une la

<sup>4</sup> Se pudo encontrar que las investigaciones conseguían un incremento hasta de un 7% en tensión y 24% en compresión, en concentraciones del 1% con respecto al peso del barro y con respecto a muestras con paja.

función de las Pentosas, se puede concluir en este campo que el poder de no oxidación es mayor en la cabuya que en cualquiera de las otras fibras analizadas, incluida la paja de páramo (*Stipa ichu*).

Esto se corrobora con los respectivos análisis de laboratorio con respecto a densidad, tracción, elasticidad, fractura y humedad que se han realizado en algunos estudios, evidenciándose los siguientes datos.

Tabla 3. Características mecánicas de la cabuya comparada con otras fibras existentes en el mercado nacional (Tamayo, 2012, p. 4)

Fibra	Densidad g/cm <sup>3</sup>	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Elongación a la fractura(%)	Absorción de humedad(%)
Cabuya	1,3	305,15	7,5	4,96	----
Yute	1,3	193-773	26,5	1,5-1,8	12
Algodón	1,5	393-773	27,6	7-8	8-25
Cáñamo	1,4	690	34	1,6	8

Si bien la cabuya no tiene capacidad de absorción de humedad, su módulo de elasticidad si le permite que frente al agua, no tenga alteraciones estructurales que pueda afectar al revoque en sus proceso normales de absorción y desprendimientos de humedad de la tierra, elasticidad que carece la paja de páramo y que por lo tanto constituye una ventaja<sup>5</sup>.

Todo esto contribuye a la durabilidad y sin lugar a dudas también a su no perecibilidad, lo cual es fácilmente comprobable en las edificaciones patrimoniales existentes, donde a la cabuya se le encuentra en perfecto estado en inmuebles de mucho más de cien años de construcción. Estas características, precisamente fueron observadas en el uso de este material en el campo de la artesanía y en ciertos elementos para la construcción como es el estuco de yeso, lo que contribuyó y dio luces iniciales sobre el nuevo empleo.

Finalmente la presencia de esta fibra en el mercado tanto urbano como rural, es de muy fácil acceso y muy bajo costo económico; todo esto le convierte en un producto adecuado para el objetivo planteado.

## 5 USO DE LA CABUYA EN EL REVOQUE: ANTECEDENTES

Como se ha manifestado, este estudio se levanta sobre un proceso largo de prácticas, de aciertos y desaciertos; llegando a este punto final donde el tiempo y los resultados obtenidos pueden de manera categorica concluir que la cabuya es un material adecuado a ser utilizado dentro de revoques en la arquitectura en tierra.

Su primera aplicación en el revoque se dio en el 2009, hoy, luego de varios procesos de mejoramiento y de constante control, se ha generado un procedimiento seguro a desarrollar.

### 5.1 El material

La cabuya se encuentra en el mercado en dos formas de presentación: moños y pacas, siendo el moño un atado pequeño y la paca de aproximadamente un quintal.

Partiendo el trabajo con la unidad menor de cabuya, el moño, éste debe iniciar por una etapa de escarmenado o peinado; esto consiste en pasar una porción de cabuya sobre una tabla provista de clavos para a través de este peinado obtener dos formas de presentación de la

<sup>5</sup>Este planteamiento se inicia como hipótesis, poniéndose en práctica como producto de pruebas empíricas y experimentación; incluso en obras propias donde el tiempo ha demostrado la certeza en su empleo; sin embargo fueron las pruebas de laboratorio realizados por los estudios ya citados y referidos, confirmaron de manera categorica la hipótesis inicial

cabuya, una de fibra peinada y otra de fibra enredada; es necesario resaltar que no existe desperdicio en este proceso, ya que todo el material es utilizado.

Como experiencia y luego de haber aplicado este procedimiento en varias intervenciones, tanto edificaciones nuevas como procesos de restauración, se puede concluir que la cabuya enredada trabaja de mejor manera que la peinada por la facilidad de adherencia que da al barro y a la nueva capa que se superpone; incluso se ha visto que en muros de más de 5 años la presencia de daños en el revoque, causado por golpes y que generan una separación del barro, se limita a la capa superficial del acabado ya que la misma cabuya no le permite que continúe el deterioro por el enredamiento que tienen las fibras con el barro, algo que con la paja se ha visto es todo lo contrario.

Por lo tanto la cabuya enredada es la que trabaja de mejor manera y el escarmenado es para enredar a la cabuya, este proceso produce una parte de material peinado, pero que el mismo no es desperdiciado bajo ninguna circunstancia.

Una vez clasificado el material, la cabuya peinada se corta en secciones de 20 cm y la enredada se utilizará en porciones como va saliendo de la tabla de clavos, actividad que se realiza conforme se requiere para su colocación en el revoque, sin mayor anticipación.

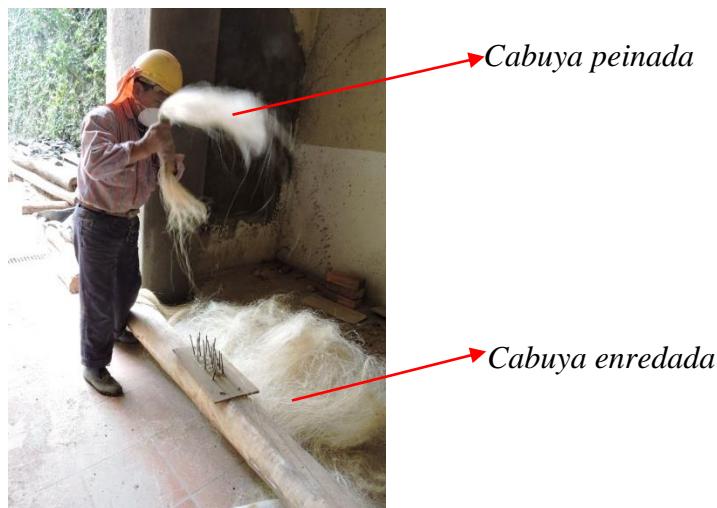


Figura 1. Preparación de la cabuya para uso en revoque

## 5.2 Aplicación de la cabuya en capas con el barro

Dado que el objetivo de esta ponencia es el uso de la cabuya, se partirá del hecho que se tiene ya el barro estabilizado y listo para su uso.

El procedimiento parte con la primera capa gruesa de barro, del espesor que permita nivelar la pared; una vez conseguida esta nivelación se coloca una primera capa de cabuya, que corresponde a la cabuya enredada; paulatinamente se va colocando de manera que cubra el revoque completamente y de manera uniforme; se nivela cubriendo esta capa con el mismo barro del soporte, constituye una especie de veladura pero con aspereza para que permita adherencia a la siguiente capa.

Luego de un reposo no mayor a 24 horas, dependiendo del clima, se procede a colocar una segunda capa de barro, allí se puede observar ya ciertas fisuras que no deben ser mayores si el barro ha sido estabilizado correctamente. Una vez colocada la segunda capa, se procede a insertar la segunda capa de cabuya, en esta ocasión es la cabuya peinada, misma que se inserta de manera ordenada pero formando una red.



Figura 2. Aplicación de la primera capa de “cabuya enredada” en un muro de adobe



Figura 3. Aplicación de la segunda capa de “cabuya peinada” en un muro de adobe

En el caso eventual de requerir una tercera capa de revoque, se recomienda que tanto la primera como la tercera capa de cabuya sea la enredada; dejando la cabuya peinada para la capa intermedia, esto con el objetivo de que las dos primeras, por la misma presencia de hilos desordenados, se enlacen entre si generando una mayor adherencia entre ellas y dando mayor ayuda a la tercera capa.

Una vez terminado el proceso de colocación de cabuya y de revoque, este sistema tiene la ventaja de no necesitar la capa final que en el Azuay se le conoce como empañete, capa que tenía como objetivo alisar el revoque y evitar la visibilidad de sus trizaduras; la capa final de barro que sujetaba la cabuya, muy bien puede terminar con una pulida con la herramienta metálica respectiva de tal manera que el muro queda listo para el fondeado.

## 6 CONSIDERACIONES FINALES

La arquitectura en tierra se caracteriza por su simplicidad en la obtención y uso de los materiales y los procesos constructivos; la necesidad de reemplazar un elemento importante como es la paja de cerro, responde a la dificultad social, ambiental de conseguirla e incluso a la cuestión económica; esto exige que la selección del nuevo material cumpla con estas necesidades.

El uso de la cabuya en los revoques, constituye sin lugar a dudas una excelente alternativa; hoy las pruebas exitosas realizadas por largo tiempo, ha demostrado que puede convertirse en el material idóneo y por qué no decirlo, mejorar sus funciones. Se debe tener presente que este planteamiento es producto del ejercicio profesional independiente y privado y que no

responde a planteamientos de laboratorio de manera inicial, éstos más bien fueron insertados en el camino frente a dudas y muchas inquietudes que surgían en el proceso, por lo que sería recomendable ingresar en procesos de validación y de certificación técnica con resistencias y análisis necesarios de estos procesos y elementos, posibilitando abrir un mayor abanico de alternativas y mejoramiento en su uso.

Sin lugar a dudas, estas iniciativas deben de ser capitalizadas por instituciones investigativas que vayan juntas de la mano con las experiencias y planteamientos del sector de profesionales independientes que han tomado iniciativas propias y muchas veces sin mayor interés de reconocimiento, justamente por el convencimiento en el material y las posibilidades infinitas que brinda la arquitectura en tierra como respuesta a las necesidades de sostenibilidad que enfrenta el planeta. Hoy la experiencia en este sector tiene a su haber muchos aportes e innovaciones que están aplicándose con éxito, pero que no son conocidos ni difundidos. "Innovación y Tradición" son campos presentes en el tema de la arquitectura en tierra sin mayor voz.

Espacios como estos del SIACOT, son los que generan una apertura al mundo no académico, a la experiencia y conocimiento popular que es donde se encuentra el origen de estos saberes ancestrales y donde los profesionales deben regresar para desde allí proyectar a la comunidad en general.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abad M. Aguirre J. Pañegas F. (2012) Diseño de paneles prefabricados en tierra. Tesis previa la obtención del título de Arquitecto. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad de Cuenca. Cuenca Ecuador.
- Albarracín T., Katty (2012). Diseño de una planta piloto para la obtención de bioetanol a partir de paja de páramo (*Stipa ichu*). Tesis previa la obtención del título en Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria. Escuela Politécnica Nacional. Quito
- Montes B. José Luis (2009). Estudio del efecto de la fibra de Bagazo de *Agave angustifolia* Haw en la resistencia a flexión y compresión del adobe compactado. Tesis de Maestría para obtener el grado de Maestro en Ciencias. Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de investigación para el desarrollo integral Regional Unidad Oaxaca. México.
- Tamayo D., Andrés (2012). Obtención y caracterización de materiales compuestos de matriz poliéster reforzados con cabuya mediante estratificación. Tesis previa a obtención del título de ingeniero mecánico. Facultad de Ingeniería Química. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Vargas J. Heredia E. Bariola J. Mehta P. (1986) Preservación de las construcciones de adobe en áreas lluviosas. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima Perú
- Social Watch. Transformando nuestro mundo: Agenda 2030 para el desarrollo sostenible. Disponible en <http://www.socialwatch.org/sites/default/files/Agenda-2030-esp.pdf>. Fecha de acceso 08/09/2015
- Guerrero, L.F.; Soria, J.; García, Beatriz. "La cal en el diseño y conservación de arquitectura de tierra". En: Arquitectura construida en tierra, Tradición e Innovación. Congresos de Arquitectura de Tierra en Cuenca de Campos 2004/2009. Valladolid: Cátedra Juan de Villanueva. Universidad de Valladolid. 2010. P. 177-186. Disponible en internet: [http://www5.uva.es/grupoterra/publicaciones/digital/libro2010/2010\\_9788469345542\\_p177-186\\_guerrero.pdf](http://www5.uva.es/grupoterra/publicaciones/digital/libro2010/2010_9788469345542_p177-186_guerrero.pdf). Acceso en 02/09/2015

## AUTOR

Mónica Pesantes Rivera, Maestría en Conservación de Monumentos y Sitios (2008), Arquitecta ecuatoriana; trabaja con temas del patrimonio desde el 2004, tanto en ejecución de obra como en estudios y gestión de proyectos de conservación del Patrimonio Cultural Inmueble. Profesional en pleno ejercicio que realiza investigaciones de manera independiente en temas vinculados con la cultura y tecnologías constructivas tradicionales.

## TECNICAS ADOPTADAS EN LA ELABORACIÓN DE HORMIGÓN PARA OBTENER UNA MATRIZ A BASE DE TIERRA

**Mirta A. Sánchez<sup>1</sup>; Silvia N. Casenave<sup>2</sup>; Javier Fornari<sup>3</sup>; Susana Keller<sup>4</sup>; Federico Amaya<sup>5</sup>;  
Lucía Belinde<sup>6</sup>; Marilina Beltramo<sup>7</sup>**

Facultad Regional Rafaela – Universidad Tecnológica Nacional, Rafaela, Argentina

<sup>1</sup>msanchp@yahoo.com.ar; <sup>2</sup>sncasenave@gmail.com; <sup>3</sup>javier.fornari@frra.utn.edu.ar; <sup>4</sup>susana.keller@frra.utn.edu.ar;  
<sup>5</sup>mmofamaya@gmail.com; <sup>6</sup>luli\_belinde@hotmail.com; <sup>7</sup>maguibeltramo-22@hotmail.com

**Palabras claves:** Material compuesto, tierra, técnicas, hormigón, sustentabilidad

### Resumen

La presente investigación busca en esta dirección sumar esfuerzos que en similar sentido vienen realizándose en la región centro sur de la provincia de Santa Fe, en lo relativo al desarrollo tecnológico de materiales de construcción que emplean tierra en su formulación y que su procedimiento tiene puntos en común con la preparación del hormigón tradicional. Asimismo se propone rescatar e incorporar mejoras a esta última técnica de construcción con tierra que suele llamarse hormigón verde o tierra vertida y que tiene aspectos similares con la tierra apisonada y con antiguas técnicas encontradas en obras patrimoniales en donde se utilizaban los lodos multigranulares de los depósitos aluvionales. La tierra surge del aprovechamiento de los lodos provenientes de excavación para pilotes cuya deposición final no es aceptada en el relleno sanitario de la ciudad de Rafaela. Se exponen resultados experimentales surgidos del análisis de las determinaciones de parámetros físicos y mecánicos de probetas cilíndricas. Los especímenes fueron elaborados con técnicas similares a las del hormigón tradicional compuestos por una matriz de tierra y cemento, agregado fino, grueso y hormigón reciclado y en alguno de ellos con la inclusión de otros agregados como puede ser el talco (Silicato de magnesio hidratado). El producto es un resultado tecnológico que se puede analizar desde distintos enfoques; por un lado el de sustentabilidad ambiental, donde el impacto de este tipo de tecnologías sobre el medio ambiente es muy bajo. Por otra parte la energía utilizada en el ciclo total de vida también es baja, utilizándose recursos locales con mínimo gasto para su extracción y transporte. Además desde la perspectiva socio económicas e obtuvo una solución de bajo costo para los sectores más desprotegidos, especialmente los de medios rurales o suburbanos que cuentan con el recurso de la materia prima al alcance de la mano.

### 1. OBJETIVOS

Los objetivos del presente trabajo son:

#### 1.1. Generales

- Determinar una misma metodología de selección y ensayo en tres escenarios diferentes correspondientes a los laboratorios de las facultades regionales intervenientes para obtener materiales comparables y aptos para construcción.

#### 1.2. Específicos

- Determinar la cantidad de agua en función de la granulometría para distintos tipos de fluidos del material en función de su uso.
- Diseñar moldes y encofrados que permitan el correcto vertido del material para diversas formas.
- Sistematizar los ensayos de resistencias a compresión y otros ensayos de durabilidad (chorro de agua) para adecuar las dosificaciones a los usos requeridos.

- Incorporar agregados y adiciones que mejoren las características del producto en una adecuada relación costo-beneficio.
- Verificar la utilización del producto en componentes constructivos (muros, revoques, contrapisos).
- Realizar la transferencia de los resultados a instituciones públicas y privadas que trabajen en el mejoramiento del hábitat, así como a microemprendimientos de economía social.

## 2. ÁMBITO DE ESTUDIO

### 2.1. Ubicación

En muchas regiones de la República Argentina, como es el caso de Rafaela, el suelo es el recurso natural más abundante, sino el único, para utilizar como material de construcción, como es la técnica del ladrillo cocido, muy difundida en la región. Con motivo del ascenso del nivel freático, disminuyó la capacidad portante de los suelos de la zona por lo que, desde hace más de 25 años, se utiliza mayoritariamente la fundación con pilotes excavados y colados in situ (Begliardo; Navarro; Salusso, 2010). La ejecución de estos involucra la generación de lodos de excavación que se constituye en un residuo de construcción y demolición (RCD) de estado inicial líquido, no siendo aceptados en el relleno sanitario de Rafaela, generando un gran problema la localización de su deposición final. (Panigatti et al, 2005). Sin embargo, este tipo de material constituye un insumo fundamental para el desarrollo de nuevos negocios relacionados con el aprovechamiento de los RCD, recurso éste que configura una solución medioambiental que traslada sus beneficios a la faz económica y social, por cuanto al presente no tienen valor monetario alguno y con ellos es posible construir componentes constructivos para atender la demanda de viviendas sociales. Este cambio de enfoque y de caracterización los valoriza, al trocar el término “residuos” por “subproductos” o materia prima para otro proceso.

Los primeros estudios sobre reutilización de residuos como es el agregado por trituración del hormigón (Tonda; Begliardo; Panigatti, 2008) y de lodos en la fabricación de ladrillos, realizados en UTN F. R. Rafaela, comenzaron en el año 2008. Como referencias más importantes se citan la utilización de lodos de excavación de pilotes con agregado de arena, reciclado de hormigón y cemento por parte de la Regional Rafaela (Sánchez et al, 2008; 2010), el proyecto bilateral entre la Regional Santa Fe y la Universidad Autónoma de Tamaulipas para obtener un material alternativo en base a tierras regionales

Contando con una selección de bibliografía escasa y de origen foráneo se plantea un proyecto de investigación entre las facultades regionales Rafaela, Santa Fe y Vendo Tuerto donde se propone rescatar e incorporar mejoras a la técnica poco utilizada y difundida como es la mezcla de agua con suelos y otros agregados trabajados de manera similar a un mortero u hormigón. Tomando las experiencias de cada regional se plantea entre las tres instituciones evaluar las propiedades físico-mecánico de probetas cilíndricas compuestas por una matriz de tierra, cemento y agregados. Para ello se definieron en primera instancia los parámetros tecnológicos a emplear en el laboratorio para hacer comparables los resultados fundamentados en las normas IRAM del Instituto Argentino de Racionalización de Materiales y acordando, entre las regionales, la norma más conveniente para ensayos específicos no comprendidos en las normas anteriormente citadas. Como primeras variables se tomó la fluidez y trabajabilidad, la retracción, la cantidad de agua, de aglomerantes y la resistencia tanto a la compresión como a los agentes climáticos e intemperismo. La propuesta de la regional Rafaela, expuesta en el presente trabajo, es utilizar una matriz de tierra proveniente de la excavación de pilotes por ser un RCD, arena fina, arena gruesa y hormigón reciclado empleando técnicas similares a las del hormigón tradicional. En instancias posteriores y de acuerdo a las evaluaciones obtenidas se trabajará con la tecnología de puesta en obra. En investigaciones futuras y partiendo de los resultados obtenidos se planteará la inclusión de fibras en su estructura como son las provenientes de bolsas plásticas obtenidas de scrap industrial.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Materiales y métodos

La investigación se desarrolló según el siguiente proceso experimental:

- Ubicación del material de estudio y cuantificación del material disponible.
- Definición de las variables de estudio e identificación de la unidad de análisis tomando como patrón los bloques realizados con barros de excavación estabilizados con cemento.
- Análisis de los requisitos de ensayos.
- Investigación de ensayos en casos de estudio similares.
- Caracterización del material utilizado.
- Determinación del porcentaje de cemento para estabilizar el suelo.
- Diseño de metodología para resguardo y almacenaje.
- Confección de planillas para la recolección de datos con codificación de las muestras para su mejor identificación.
- Ensayos de los especímenes.
- Análisis de los resultados y conclusiones.

#### 3.2. Identificación de las muestras y de las variables

Las muestras se identificaron según volumen de material y tipo de agregado designándolas conforme se indica en la Tabla 1 para su posterior identificación.

Tabla 1. Caracterización y dosificación de las muestras en volumen

MUESTRA	Suelo	Cemento	Arena		Talco <sup>1</sup>	Piedra partida	AR TM:25 mm
			fina	gruesa			
M <sub>1</sub>	4	1	2	2	1	-	2
M <sub>2</sub>	3	1	2	2	-	-	2
M <sub>3</sub>	2	1	2	3	-	2	
M <sub>4</sub>	2	1	2	3	-	-	2
M <sub>5</sub>	4	1	1	1	1	2	.
M <sub>6</sub>	4	1	1	1	1	-	2
M <sub>7</sub>	4	1	1/2	1 1/2	1	-	2

<sup>1</sup> silicato de magnesio hidratado

### 4. MATERIALES UTILIZADOS

La elaboración de las probetas y ensayos de los especímenes se realizaron en el Laboratorio de Ingeniería Civil de la Facultad Regional Rafaela de la UTN sistematizando el curado y los ensayos según la normativa vigente, obteniendo comportamientos físicos y mecánicos según las exigencias de la normativa vigente para el hormigón elaborado, para la identificación de suelos y de los agregados reciclados.

#### 4.1. Suelo

Se procedió a secar los barros de excavación profundas para pilotes (mezclas de cota -2,00 m a -13,00m), dejándolos al aire libre, posteriormente triturados y tamizados. Se caracterizaron dichos barros identificando las variables y su incidencia en las propiedades de los especímenes, con el objetivo de lograr la mejor estabilización y los modos de ejecución.

#### 4.2. Arena

Se aportó como agregado natural arena silícea mediana del río Paraná (Santa Fe) la que fue acopiada en estado seco preservándola del humedecimiento debido a condiciones atmosféricas y de la contaminación con material orgánico.

#### 4.3. Agregado reciclado

De la trituración del hormigón recogido se obtuvieron tres tamaños de agregados, designados en función de su tamaño máximo (T.M.) AR 37,5; AR 25,4 y AR 9,5 caracterización realizada en el Laboratorio de Ingeniería Civil. Se utilizó en la mezcla como agregado grueso el proveniente de hormigón triturado, utilizado como reciclado el tipo AR 9,5. Determinándose la densidad y absorción de agua según norma IRAM Nº 1520. Por otra parte se tomó como referencia las normas IRAM Nº 1512, 1531, 1533 para el análisis de la aptitud de los agregados reciclados, finos y gruesos, para hormigones de cemento.

#### 4.4. Cemento

Se utilizó cemento portland CPN 40 al que no se le incorporó aditivos de ninguna índole.

#### 4.5. Agua

Se utilizó agua potable guardando las mismas exigencias que las demandadas para la elección del agua de amasado para la elaboración de hormigones (Norma IRAM Nº 1601, Agua para morteros y hormigones de cemento pórtland). La cantidad de agua empleada se definió en base a la trabajabilidad deseada de la mezcla, la que correspondió esencialmente al de una masa con asentamientos promedios de 21 cm, por lo que el porcentaje de agua en peso de la mezcla varió entre un 16% y un 20%. Para ello se adoptó Método de ensayo de la consistencia utilizando el cono de Abrams, norma IRAM Nº 1536.

### 5. CURADO

Para asegurar un fraguado eficiente, el 50% de los especímenes se resguardaron del sol y la lluvia cubriéndolos con un nylon de 4 micrones, sometiéndolos a un riego diario de agua en forma de fina lluvia durante 7 días en la cámara húmeda del laboratorio y el otro 50% fueron sumergidas en agua durante 28 días y luego fueron colocadas en cámara húmeda de curado a 56 y 90 días, extrayéndolos a media que se realizaban los ensayos en las fechas proyectadas. La norma IRAM 1534 fue tomada como base a tener en cuenta para la preparación y curado de las probetas a ensayar en el laboratorio.

### 6. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

En el laboratorio de Ingeniería Civil se hicieron los siguientes ensayos:

- a) Identificación de suelos (límites de Atterbeg y clasificación según Casagrande S.U.C.S.). (Tabla 2). Para su clasificación se utilizaron las normas IRAM: Nº 10501 (Método de determinación del límite líquido e índice de fluidez) y Nº 10502 (Método de determinación del límite plástico e índice de plasticidad) y para la identificación de los suelos se utilizó la IRAM Nº 10521 (Suelos. Clasificación por el sistema del índice de grupo).
- b) Descripción de suelos mediante análisis tacto-visual, según IRAM Nº 10535.
- c) Determinación cuantitativa del contenido de sulfatos inorgánicos (extracción con  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  y determinación de sulfato por Método turbidimétrico con espectrofotómetro a 420 nm).
- d) Caracterización física del agregado natural y reciclado. Tanto los agregados naturales y reciclados fueron sometidos a ensayos para su caracterización registrándose sus valores en la Tabla 3 y Tabla 4. En los agregados reciclados, dada su porosidad en relación a las arenas se halló la evolución de la absorción en el tiempo, factor que ha sido de utilidad para regular la consistencia y tiempo de amasado de las mezclas para la realización de los

especímenes. Por lo expuesto se consideró que el tiempo de 10 minutos es un buen criterio de mezclado de los materiales e hidratación de la tierra. El procedimiento utilizado para la caracterización fueron los establecidos por las normas: IRAM Nº 1505, IRAM Nº 1509, IRAM Nº 1512, IRAM Nº 1533, IRAM Nº 1520. Además con igual criterio que los agregados naturales se evaluaron las propiedades del agregado reciclado (hormigón triturado) según las normas citadas.

Tabla 2. Caracterización de los suelos

Determinaciones	Ensayos clasificación	Suelos profundos (barros de excavación)
Límites de Atterberg (%)	LL	32,29
	LP	24,10
	IP	8,20
Clasificación	SUCS	ML (Limos inorgánicos de mediana compresibilidad)
Sulfatos	Determinación de azufre inorgánico	$S = 119,2 \text{ mg S/100g suelo}$ $\text{SO}_4^{\text{--}} = 357,6 \text{ mg SO}_4^{\text{--}} /100 \text{ g de suelo}$

Tabla 3. Caracterización física del agregado natural y reciclado

Designación	T.M (mm)	M.F	Absorción		
			5 min	10 min	25 h
AN (Arena)	--	2,54	--	--	0,18%
AR 37,5	37,5	7,73	3,11%	3,66%	4,43%
AR 25	25,4	6,55	3,56%	4,37%	5,19%
AR 9,5	9,5	3,90	--	--	8,46%

Tabla 4. Mortero adherido en el agregado reciclado

Designación	Mortero adherido (%)
AR 37,5	17,34
AR 25,4	41,83
AR 9,5	65,72

## 7. PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN

El procedimiento utilizado fue realizado considerando las siguientes premisas de trabajo:

- Para cada diseño (M1, M2, M3, M4, M5, M6, y M7) se elaboraron dos mezclas determinándose previamente la humedad natural de sus componentes.
- Para una mejor homogeneidad del producto se tomó como criterio colocar en la hormigonera primeramente el agregado reciclado, luego la arena, y el suelo y por último cemento procediendo al mezclado en seco. Una vez lograda la homogeneidad se le adiciona el agua en la proporción establecida para un asentamiento con Cono de Abrams comprendido entre 20 cm y 22 cm (IRAM 1536, 1978).
- Una vez incorporada el agua se deja en funcionamiento la hormigonera por 10 minutos, para posteriormente dejar descansar la mezcla por el término de 7 minutos, reanudando el mezclado durante otros 5 minutos esto permite que la matriz de tierra tenga la humedad óptima para el moldeo de las probetas, según IRAM 1524 y 1534.

## 8. ENSAYOS Y RESULTADOS

### 8.1. Probetas cilíndricas

- Compresión simple

Los cilindros ensayados a compresión simple, según la norma IRAM 1546, tienen las siguientes dimensiones 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, ensayadas a compresión

simple en el laboratorio de Ingeniería Civil de la Facultad Regional Rafaela. En la Figura 1 se muestran los resultados obtenidos a los 56 y 90 días.

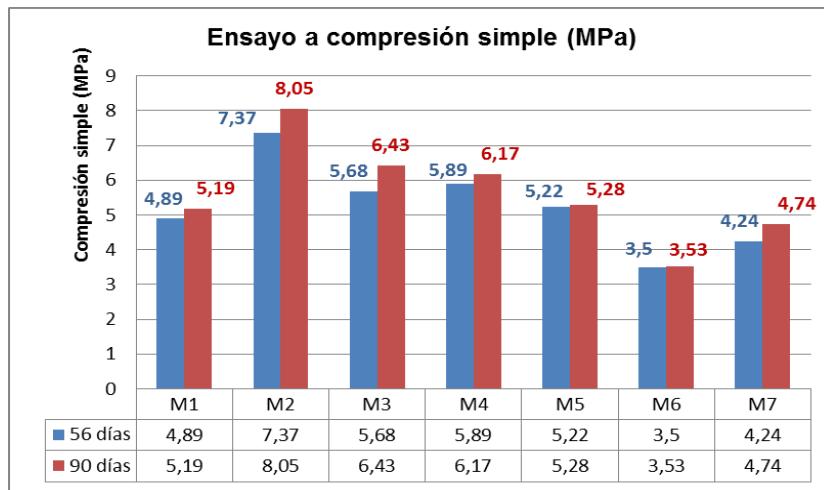


Figura 1: Ensayo compresión simple (MPa)

#### - Tracción por compresión diametral

En la Figura 2 se muestra el ensayo de tracción por compresión diametral realizado según la norma IRAM 1658 a los 90 días a los especímenes M<sub>2</sub> y M<sub>3</sub> cuya resistencia a compresión simple fue mayor.

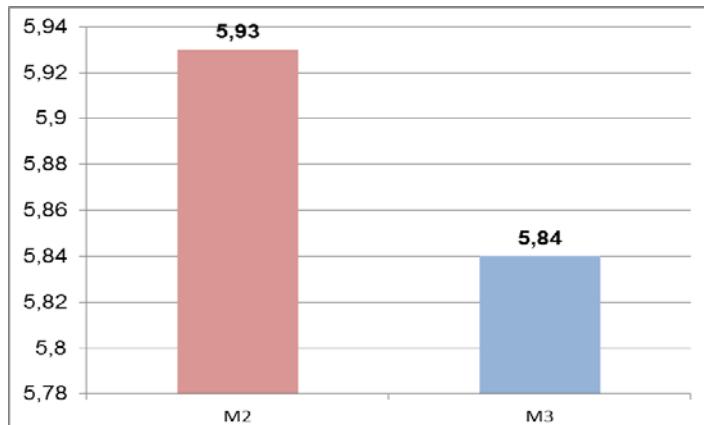


Figura 2: Ensayo tracción por compresión diametral (MPa)

## 10. CONCLUSIONES

- Los resultados de los ensayos, tanto a compresión como a tracción por compresión diametral permiten apreciar que las resistencias aumentan con el tiempo y con la inclusión de agregado reciclado, no así con piedra partida natural. Esto se debe a una mejor distribución en la curva granulométrica considerando en ella la tierra, la arena fina, la arena gruesa y el AR con inclusión de la fracción fina de este último.
- La resistencia a la tracción por compresión diametral de las probetas cilíndricas alcanzaron a los 90 días un valor que oscila entre el 85% y el 95% de la resistencia a compresión simple. Comparados con los valores medios de resistencias similares en hormigones simples, los cuales están en el entorno del 10%, se destaca el significativo incremento obtenido con materiales como los empleados en este estudio, por lo que es necesario verificación de los resultados para un número mayor de probetas.

- La presencia de sulfatos en los suelos o en el agua torna aconsejable el empleo de un cemento resistente a ellos, en prevención de deterioros con el tiempo por el ataque de este tipo de sales.
- La adición de agregado reciclado a la mezcla ha permitido obtener un material que ha experimentado menor cambio volumétrico en la dirección de las aristas mayor que aquellos elaborados sin ellos, pudiendo atribuísela a la elevada capacidad de absorción del AR debido a estar conformado por un alto porcentaje de mortero de cemento:arena (65% en peso). No obstante, en ambos casos los valores han sido bajos, registrándose una media del 1,06% y 1,13%, respectivamente.
- Todos los ejemplares (probetas cilíndricas y ladrillos) en sus distintas dosificaciones han presentado inalterabilidad al sumergirlos en agua.
- El material compuesto obtenido, además de proveer una solución al problema mediambiental de la disposición final de un residuo como son los barros de excavación y roturas de hormigón, no demanda mano de obra calificada para su ejecución y es significativamente económico para ser aplicado en la construcción vivienda de interés social debido a que la tierra y el hormigón reciclado como agregado grueso no tiene valor económico por ser un residuo que al momento no tiene disposición final en el relleno sanitario de la ciudad.
- Los resultados que arrojaron los ensayos a compresión de las probetas cilíndricas cuya resistencia promedio es de 8,07 MPa. permitió la realización de contrapisos como base de pisos de mosaicos calcáreos con excelentes resultados considerando que un hormigón de cascote para aplicaciones corrientes requiere una resistencia entre 2 a 3 MPa. Lo expuesto hace inferir la posibilidad de utilizar el material obtenido para hormigones no estructurales como las mencionadas y tambien para relleno de excavaciones, relleno en sitios de difícil acceso o reemplazo de suelos compactados,
- Los ladrillos elaborados con hormigón de tierra presentan reducido cambio volumétrico, aristas firmes, buena resistencia, un excelente acabado superficial, muy buena adherencia a los revoques y terminaciones (yeso) presentando además muy buen comportamiento a pinturas al látex. Las probetas cilíndricas elaboradas denotan una resistencia a compresión de 12,45 MPa, muy superior a la de un ladrillo común de arcilla cocida cuya resistencia a compresión es del orden de 5 Mpa. (Norma IRAM 12566-1), o un bloque hueco portante cerámico de 13,0 MPa., (Norma IRAM 12566-2), aún de un bloque hueco portante de hormigón de 13,0 MPa., (Norma IRAM 11561-5).
- El costo de contrapisos y mampostería construida con ladrillos de tierra-cemento-agregado reciclado es aproximadamente un 60 % menos que de ladrillo cerámico o bloques de hormigón, sin considerar los gastos de fletes y considerando que la mayor parte de los insumos utilizados (tierra y agregado grueso) son RCD y no tiene valor económico.
- Las resistencias de los especímenes con incorporación de talco (Silicato de magnesio hidratado) o piedra partida natural no mostraron datos relevantes frente al resto de las mezclas. Por otra parte el costo de los materiales hacen que no resulten conveniente su uso.
- Los encofrados utilizados para la realización de muros monolíticos son iguales que aquellos empleados para un hormigón estructural tradicional mientras que los moldes de los ladrillos son de madera desmontables cuyas dimensiones son 29,50 cm x 14,50 cm x 7,50 cm.
- Tomando como base los resultados satisfactorios de la presente investigación se está trabajando en la elaboración de componentes constructivos reforzados con fibras de bolsas plásticas provenientes de scrap industrial de una empresa de la ciudad de Rafaela (Pcia de Santa Fe, Argentina).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Begliardo, H.F; Navarro, V.B; Salusso, C. (2010). Estudio comparativo de pilotes excavados con lodos bentoníticos en la ciudad de Rafaela, vía método semiempírico. Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, CAMSIG 2010, Mendoza, Argentina, Anales del Congreso. Disponible en CD-ROM y <[http://www.edutecne.utn.edu.ar/publicaciones/jit2013/FR-RAFAELA/RA\\_06\\_componente\\_constructiva.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/publicaciones/jit2013/FR-RAFAELA/RA_06_componente_constructiva.pdf)>.
- IRAM 10501. Mecánica de suelos. Métodos de determinación del límite líquido y del índice de fluidez. (1968).
- IRAM 10502. Mecánica de suelos. Métodos de determinación del límite plástico e índice de plasticidad. (1968).
- IRAM 10521. Suelos. Clasificación por el sistema de índice de grupo. (1971).
- IRAM 11561-5. Bloques de Hormigón (1997)
- IRAM 12566-1. Ladrillos cerámicos macizos para la construcción de tabiques y muros.(1993)
- IRAM 12566-2. Bloques cerámicos para la construcción de tabiques y muros.(En acta 4-2002 se dividió en dos normas 1 y 2)
- IRAM 1505. Agregados. para morteros y Hormigones. Análisis granulométricos. (2003).
- IRAM 1509. Agregados para hormigones. Muestreo. (1987).
- IRAM 1512. Agregado fino natural para hormigón de cemento pórtland. (1994) Requisitos.
- IRAM 1520. Agregados finos. Método de laboratorio para la determinación de la densidad relativa real, aparente y de la absorción de agua. (2002).
- IRAM 1524 y 1534. Hormigón de cemento pórtland. Preparación y curado de probetas para ensayos en laboratorios. (1985). Revisión norma IRAM 1524:1968. Incluye Modificación 1971. Incluye Fe de Erratas 09/78)
- IRAM 1531. Agregado grueso para hormigón de cemento portland. (1994).
- IRAM 1533. Agregados grueso. Método de laboratorio para la determinación de la densidad relativa real, aparente y de la absorción de agua. (2002).
- IRAM 1536. Hormigón fresco de cemento pórtland. Método de ensayo de la consistencia utilizando el tronco de cono. (1978).
- IRAM 1546. Hormigón de cemento portland. Método de ensayo de compresión. (1992)
- IRAM 1601. Agua para morteros y hormigones de cemento pórtland.(1986)
- IRAM 1658. Hormigón. Determinación de la resistencia a la tracción simple por compresión diametral. (1995)
- IRAM 10535. Mecánica de suelos. Descripción de suelos mediante análisis tacto-visual, (1991).
- Panigatti, M.C.; Begliardo H.; Boglione, R.; Griffa, C.; Casenave, S. (2005). Relevamiento de generadores de residuos en la zona de influencia de la ciudad de Rafaela. 3er. Encuentro PROCQMA. Carlos Paz, Córdoba, 2005. Anales del Congreso CD-ROM.
- Sanchez, M.; Casenave, S.; Begliardo, H.; Garrapa, S.; Keller, S. (2010). Componentes confinados de suelo cemento, utilizando barros de excavación de pilotes, como material de baja resistencia controlada (MBRC). Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra (X SIACOT). Uruguay: Ed.: Red Proterra. CD-ROM
- Sánchez. H; Begliardo.H. H, Casenave.S, Fornero. M, Schuk. J. (2008). Ladrillos de suelo cemento comprimidos elaborados con barros de excavación para pilotes. Red Proterra, II Congresso de Arquitetura e Construção com Terra, VII Seminário Ibero-americano de Construção com Terra. Brasil, 2008. CD-ROM
- Tonda, M.; Begliardo,H.; Panigatti, M.C. (2008). Reciclado de hormigón sin preselección en origen. Anales III Congreso Internacional y 17º Reunión Técnica de la A.A.T.H., Córdoba, Argentina. 2008. Anales del Congreso CD-ROM.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al personal y becarios del Laboratorio de Ingeniería Civil de la Facultad Regional Rafaela de la Universidad Tecnológica Nacional

## AUTORES

Mirta Amalia Sánchez, Ing. en Construcciones, Especialista en scientiae en metodología de la investigación científica y técnica. (Universidad Nacional de Entre Ríos), Especialista en Docencia Universitaria, Profesor Titular Ordinario de la cátedra Ingeniería Civil II. Investigador UTN Categoría C, Investigadora MCyT Categoría III. msanchp@yahoo.com.ar

Silvia Noemí Casenave, Ingeniera en Construcciones. Especialista en Docencia Universitaria. Profesor Asociado de la cátedra Estructuras de Hormigón de la carrera de Ingeniería Civil. Docente Investigador. Investigador UTN Categoría C. Investigador MCyT Categoría III. silvia.casenave@frra.utn.edu.ar; sncasenave@gmail.com

Javier Fornari, Licenciado en Sistemas y Computación. Facultad Católica de Química e Ingeniería “Fray Roger Bacon”. Doctor en Ingeniería de Sistemas y Computación. Universidad de Málaga, España. Maestría en Administración de Negocios, Facultad Regional Rafaela – UTN. Especialista en Ingeniería Gerencial, Facultad Regional Rafaela – UTN. Docente Investigador UTN, Categoría D. Investigador MCyT, Categoría IV. javier.fornari@frra.utn.edu.ar

Susana Keller, Ing. en Construcciones. Jefe del Laboratorio de Ingeniería Civil de la Facultad Regional Rafaela. Investigadora. Investigador UTN Categoría: E. susana.keller@frra.utn.edu.ar

Federico Amaya, Estudiante 5º Nivel de Ingeniería Civil de la Facultad Regional Rafaela. Investigador UTN Categoría: G. mmofamaya@gmail.com

Lucia Belinde, Estudiante 5º Nivel de Ingeniería Civil de la Facultad Regional Rafaela. Investigador UTN Categoría: G. luli\_belinde@hotmail.com

Marilina Beltramo, Estudiante 5º Nivel de Ingeniería Civil de la Facultad Regional Rafaela. Investigador UTN Categoría: G. maguibeltramo-22@hotmail.com

# INVESTIGACION TEÓRICO-PRÁCTICA SOBRE LA CULTURA CONSTRUCTIVA REGIONAL EN LAS TERMINACIONES DE MUROS DE TIERRA CRUDA EN DOS CLIMAS DE ARGENTINA

**Giulia Scialpi<sup>1</sup>; Natacha Hugón<sup>2</sup>; Rodolfo Rotondaro<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Facultad de Arquitectura, Universidad de Roma La Sapienza - giulia.scialpi@gmail.com

<sup>2</sup> Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de Buenos Aires / centro CIDART - natachahugon@gmail.com

<sup>3</sup> Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de Buenos Aires / CONICET - rodolforotondaro@gmail.com

**Palabras clave:** revoques finos, suelos estabilizados, cultura constructiva, materiales locales, auto-construcción.

## Resumen

Este trabajo presenta una síntesis de los avances de la investigación, realizada en el marco del programa Arconti (IAA – FADU UBA), que apunta a indagar, registrar, procesar y difundir los saberes empíricos de las culturas constructivas regionales en relación a las terminaciones de muros de tierra cruda, con particular enfoque sobre los revoques finos con tierras arcillosas y arcillo-arenosas, para su utilización en los procesos constructivos contemporáneos. Los objetivos principales son dos: a) rescatar, a través de su conocimiento empírico y su estudio, las técnicas tradicionales en cuanto expresión cultural de una región que se convierten en un saber práctico estrictamente vinculado al entorno, cuya transmisión suele dificultarse por encontrarse aislada; y b) elaborar y evaluar una metodología de trabajo que permita una elección consciente de las materias primas a utilizarse en base a la situación climática-geográfica y al entorno local, dirigida tanto al auto-constructor como al profesional, quienes muchas veces suelen desconocer las potencialidades de los materiales locales y se encuentran obligados a utilizar recursos industriales o de importación. A nivel metodológico la investigación se articula en tres áreas de análisis: 1) Material – función. En este área se definen las propiedades, el proceso productivo, la disponibilidad y el costo económico de los componentes principales de los revoques; 2) Material – técnica constructiva y de aplicación. Enfocada a describir y experimentar las herramientas y las técnicas de aplicación para revoques; 3) Material – área geográfica. Restringe, en primera instancia, el campo de investigación a dos zonas bioclimáticas de Argentina y posteriormente a países limítrofes para poder intercambiar datos y examinar las experiencias de otros investigadores. Los resultados presentados permiten comparar, a través de ensayos de laboratorio y de campo, las propiedades de distintos tipos de revoques finos actualmente utilizados por profesionales y auto-constructores.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la búsqueda de bibliografía sobre la temática referida a las terminaciones en construcciones de tierra cruda se comprobó que la misma es escasa, en general. La mayoría de las veces la temática es tratada en el contexto más amplio de los manuales de construcción con tierra, sin una atención particular sobre los procesos constructivos y los materiales a disposición.

Por otro lado, a la hora de profundizar la temática, se encuentran estudios aislados llevados a cabo en marcos institucionales (Houben; Guillaud, 1984; Guerrero Baca, 2007; Rotondaro et al, 2009; Minke, 2011, 2013; entre otros), que a veces no tienen contacto con las experiencias prácticas particulares (de la autoconstrucción y de la construcción dirigida por profesionales) que aprovechan tradiciones y usos locales.

Con este trabajo se pretende comenzar a compilar y clasificar el conocimiento existente, integrando el saber empírico local con los avances logrados por la investigación científico-tecnológica, para favorecer las buenas prácticas y la importante difusión de estos saberes.

### 1.1 Antecedentes

En la región ibero-americano existen varios centros que desarrollan actividades de

investigación sobre el tema, tanto en el ámbito público como privado.

Dentro del panorama argentino actual son antecedentes a tener en cuenta las investigaciones sistemáticas de los grupos de trabajo y centros de la Red PROTERRA en varias provincias: Jujuy, Salta, Tucumán, La Rioja, Mendoza, San Juan, Córdoba, Santa Fé, Buenos Aires, Río Negro y Chubut, principalmente. Se destaca a nivel nacional el centro CRIATIC (Centro Regional de Investigación de Arquitectura de Tierra Cruda) de la Universidad Nacional de Tucumán.

En Francia el centro internacional CRATerre de Grenoble es un referente importante en este ámbito, por su larga experiencia a nivel de formación e investigación.

En países como Italia, Alemania, Reino Unido, Canadá y Nueva Zelanda existen muchas organizaciones y empresas, la mayoría privadas, que trabajan para impulsar la utilización de revoques y pinturas naturales certificadas.

Fuera del ámbito formal se cuenta con las experimentaciones llevadas a cabo por los auto-constructores y los profesionales en las obras y con las tradiciones propias de cada lugar, muchas de las cuales aún viven y se transmiten.

## 1.2 Relevancia del tema

Para entender la relevancia de la temática es necesario analizar el rol que las terminaciones cumplen en términos de proceso constructivo (limitándonos en este trabajo a los revoques finos) y como manifestación de la identidad cultural de un lugar.

Las técnicas tradicionales en revoques, así como la elección de materiales y pigmentos, forman parte de la expresión cultural de una región que se convierten en un saber práctico estrechamente vinculado al entorno y cuya transmisión suele dificultarse, a veces, por encontrarse aislada, o incluso puede llegar a perderse.

Por otro lado las terminaciones, que corresponden a una segunda fase en el desarrollo de la obra una vez concluida la obra gruesa, cumplen un papel fundamental: garantizan la durabilidad de la construcción protegiéndola de la intemperie y aportan un valor estético la mayoría de las veces también cargado de simbolismos. En la construcción con tierra, su buena ejecución es aún más importante, para que la arquitectura de tierra se pueda visualizar alejada del prejuicio que suele desvalorarla y asociarla a una construcción de baja calidad, subestimando la innovación tecnológica que hoy en día nos permite cumplir con las exigencias de salubridad y durabilidad aceptables.

Los revoques ecológicos actuales, utilizados en bio-construcción, son similares en apariencia y técnica de aplicación a sus homólogos convencionales y al mismo tiempo aportan numerosas ventajas: un ciclo de vida ejemplar con un impacto ambiental reducido (Melia et al, 2014), un buen confort térmico, la protección de paredes contra la humedad y la ausencia de sustancias tóxicas o nocivas para personas, animales y plantas (Minke, 2013).

También se destaca el potencial de “inclusión de género” que el trabajo de revoques naturales ofrece, pues permite rescatar la presencia de las mujeres en la obra, teniendo en cuenta su rol ancestral como ejecutoras de las terminaciones del hogar.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivos generales

La investigación apunta a registrar y rescatar las culturas constructivas regionales vinculadas a las terminaciones de muros de tierra cruda a través de su conocimiento empírico y su estudio.

A partir del relevamiento y análisis de estos conocimientos, la investigación podrá elaborar una metodología que permita escoger una opción alternativa a los productos que se encuentran en el mercado, buscando una opción más saludable, de menor costo e impacto

ambiental, conforme al clima y a los materiales disponibles localmente, sin necesidad de recetas.

## 2.2 Objetivo específico

Investigar, registrar y evaluar los materiales disponibles (en relación a sus propiedades, al proceso constructivo y a los costos relativos) para lograr la composición de un revoque que responda de manera apropiada a las características requeridas por el entorno de cada caso concreto.

## 3. METODOLOGÍA

El estudio previo de metodologías referenciales y de la bibliografía específica sugirió articular la investigación en tres áreas de análisis.

### 3.1 Material – función

En esta área se definen las propiedades, el proceso productivo, la disponibilidad y el costo económico de los componentes principales de los revoques clasificados según su función:

- a) Aglutinantes: unen fragmentos de uno o más materiales para formar un conjunto compacto.
- b) Hidrófugos: reducen la absorción capilar del agua y la permeabilidad del revoque, inhibiendo en cierta medida la capacidad de transformación del revoque en barro plástico nuevamente.
- c) Estabilizantes: se agregan al barro en estado plástico para mejorar su estabilidad una vez seco, proporcionando al revoque una mejor resistencia al desgaste producido por el uso o los agentes atmosféricos y una menor retracción, reduciendo de esta forma su necesidad de mantenimiento a lo largo del tiempo.
- d) Fijadores: aplicados superficialmente garantizan la durabilidad del revoque brindándole cierta impermeabilidad y aumentando la cohesividad del material (aceite de lino, aceite de cocina reciclado, jugo de cactus fermentado, agua de arroz, etc.).
- e) Pigmentos: aportan color a la terminación (en esta investigación se utilizaron solo pigmentos minerales, los óxidos de hierro).

### 3.2 Material – técnica constructiva y de aplicación

A la hora de elegir un revoque fino se deben tener en cuenta múltiples variables:

- a) El sustrato: se debe analizar o elegir el tipo de sustrato sobre el cual se aplicará el revoque fino. Si se trabaja arriba de un revoque ya existente, deberá estar firme y sin grietas o irregularidades profundas, en caso contrario deberá repararse convenientemente ya que muchas patologías son relativas a problemáticas estructurales o a la técnica de elevación de la pared, y no directamente relacionadas al tipo de revoque.
- b) La técnica de aplicación: la técnica puede variar en función de la mano de obra a disposición o de las condiciones del sustrato, en línea general puede ser manual, fratasado, llaneado, bruñido, al fieltro.
- c) Las herramientas de mano: en la fase de preparación del revoque se puede elegir si mezclar el material manualmente o con una mezcladora mecánica, en todo caso se debe contar con tamices finos; en la fase de aplicación, en función de la técnica elegida, se necesitan distintas herramientas como baldes, cuchara, fieltro, fratacho, llana, brocha.
- d) El tipo de revoque: en primera instancia es fundamental definir si el revoque se aplica al interior o al exterior.

Para los ensayos de esta investigación se decidió utilizar como sustrato, un revoque grueso (a base de tierra, arena y paja) sobre bastidores de quincha, aplicado manualmente con fratacho. Los finos, ensayados solo para exterior, son aplicados con llana.

### 3.3 Material – área geográfica

Los revoques tradicionales son una expresión de los recursos de un lugar, al mismo tiempo nos ofrecen una alternativa más sustentable por utilizar materiales locales sin necesidad de traerlos de otros lugares. En esta investigación se decidió trabajar en dos zonas bioclimáticas de Argentina según norma IRAM 11603 (1996) en la Ciudad de Buenos Aires (zona IIIb - clima templado cálido) y en la ciudad de El Bolsón Provincia de Río Negro (zona VI - clima muy frío).

Estos dos lugares se diferencian no solo a nivel climático sino también por tratarse de una zona urbana (Buenos Aires) y de una zona rural.

Posteriormente la investigación se extenderá a países limítrofes para poder intercambiar datos y examinar las experiencias de otros investigadores.

## 4. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

### 4.1 Diseño de ensayos

Para diseñar los ensayos de esta investigación se plantearon las siguientes pautas:

- Propiedades del revoque fino: durabilidad (buena adherencia al sustrato; resistencia a los agentes de erosión); elasticidad (conforme al sustrato y a la flexibilidad de la estructura para evitar la formación de grietas); permeabilidad (para evitar fenómenos de condensación que podrían ocasionar desprendimientos o la formación de hongos).
- Variables: tipo de suelo (suelo de Buenos Aires y suelo de El Bolsón); técnica de aplicación; exposición (diferente zona bioclimática, exposición Norte y Sur).
- Constantes: sustrato constituido por un revoque grueso a base de suelo arcilloso o arcillo-arenoso, paja, arena, agua, aplicado sobre bastidores de quincha; revoque fino de base (R1) realizado con arena fina tamizada, suelo arcilloso tamizado fino, agua.
- Aditivos: se añaden a los revoques a base de tierra para mejorar sus prestaciones sin afectar su adherencia al sustrato. Los aditivos pueden variar el aspecto y el tiempo de secado de los revoques además de su durabilidad y “reversibilidad”, por ejemplo un revoque estabilizado con cemento o cal será más difícil de reciclar (Didier-Feltgen, 2005). Los aditivos se pueden añadir a la mezcla del revoque o aplicar superficialmente. Los aditivos ensayados en esta investigación se seleccionaron al ser los más utilizados por profesionales y auto-constructores de las zonas geográficas objeto de estudio (tabla 1).

Tabla 1. Aditivos utilizados

Nombre	Función	Origen	Proceso productivo	Adquisición	Precio <sup>1</sup>	Observaciones
Aceite de lino doble cocido	Hidrófugo, endurece	Aceite de lino crudo	Industrial: resultante de la cocción de aceite de lino crudo y secantes	Ferreterías, madereras	10,65 USD/1l (fuente: Sodimac)	Precio elevado. Se puede reemplazar con aceites de cocina
Cal áerea	Aumenta las propiedades mecánicas, acelera el proceso de endurecimiento	Rocas calizas, cal viva	Industrial: obtenida por calcinación de la caliza, que fragua en contacto con aire ambiente	Ferreterías, corralones	4,12 USD/20kg (fuente: Canasta materiales <sup>2</sup> )	Es muy corrosiva para el trabajo manual, debe utilizarse protección

Caseína	Aglutinante, sellador, reduce la retracción	Proteína de la leche	Se puede extraer del queso por medio de amoniaco	Se puede comprar en polvo o extraer de la leche	1,65 USD/ 0,2 kg leche en polvo (fuente: lista precios cuidados)	Difícil adquisición. Se obtiene como derivado de otro lácteo
Ceniza de madera	Reduce la retracción, aumenta la resistencia mecánica	Madera	Producto de la combustión de la celulosa	Entorno doméstico	Gratis	Mejora la textura de la mezcla. Debe estar bien fina.
Cola vinílica	Mejora la adhesión	Polímero del acetato de vinilo	Industrial	Ferreterías, corralones	5,35 USD/1kg (fuente:Easy)	Aumenta la elasticidad del revoque
Cemento	Endurece el revoque y lo hace secar más rápido, reduce la retracción	Rocas calizas, arcillas	Industrial: mezcla de rocas calizas y arcilla cocidas a temperatura elevada, luego se añade yeso y se reduce a un polvo fino	Ferreterías, corralones	4,61 USD/ 40kg (fuente: Canasta materiales <sup>2</sup> )	Es muy corrosivo para el trabajo manual, debe utilizarse protección
Emulsión asfáltica	Hidrófugo, ignífugo, mejora resistencia a la erosión	Petróleo	Industrial: mezcla de asfalto con emulsificantes	Ferreterías, corralones	27.37 USD/18kg (fuente: Easy)	Oscurece la mezcla. Puede disminuir la adhesión del revoque al
Engrudo	Aglutinante, hidrófugo, aumenta resistencia a la abrasión y	Harina, agua	Casero: resultante de la cocción de harina y agua	Tiendas alimentarias	0,70 USD/kg harina (fuente: lista precios cuidados)	Mejora la trabajabilidad de la mezcla.
Estiércol	Aumenta las propiedades mecánicas	Fibras vegetales	Digestión y excreción de fibras vegetales por un ganado	Viveros, granjas, hipódromos	Gratis	Mejora las propiedades de la mezcla si se lo deja fermentar
Jugo de cactus fermentado	Aglutinante, hidrófugo	Plantas de cactus familia Opuntia	Casero: resultante de fermentación de las hojas de cactus	Entorno natural	Gratis	Buena relación calidad – precio
Papel de diario	Reduce la retracción	Fibras de celulosa	Industrial	Puestos de diario	Gratis	Favorece la erosión
Óxido de hierro	Pigmento, agrega color	Hierro	Industrial: compuestos químicos formados por hierro y oxígeno	Ferreterías, corralones	4,41-6,60 USD/kg según color (fuente: mercado libre)	Es indispensable hidratar antes de incorporar a la mezcla
Yeso o tiza	Endurece el revoque y lo hace secar más rápido	Sulfato de calcio hidratado o piedra de aliez	Industrial: deriva de la calcinación del sulfato cálcico	Ferreterías, corralones	8,21 USD/ 25 kg (fuente Canasta materiales <sup>2</sup> )	Fácil de adquirir. Listo para usar

<sup>1</sup> Los precios en pesos argentinos fueron convertidos a dólares estadounidenses según el cambio oficial en la fecha de redacción del artículo 1 USD= AR\$9,06.

<sup>2</sup> Canasta materiales para la construcción CABA y GBA

Tabla 2. Materiales y probetas

Probeta <sup>2,3</sup>	Sustrato: revoque grueso sobre quincha mejorada											
	Dosificación (porcentaje en volumen) <sup>1</sup>											
	Aditivos											
Probeta	Aceite de lino d.c.	Aceite reciculado	Estírcol	Cal-Caseína (2:1)	Cal-Mucilago	Cemento	Ceniza de madera	Co.I.ca.	Emulsión asfáltica	Engrudo	Papel de diario	Pigmento (óxido de hierro)
RF1.1	4%		30%							30%		X
RF1.2.4	4%								4%			
RF1.2.6	4%								6%			
RF1.3			30%	20%								X
RF1.4	4%							30%				
RF1.5	4%		30%				50%			30%	X	25%
RF1.6		4%				8%				30%		
RC1.1	4%		30%							30%		X
RC1.2.4	4%								4%			
RC1.2.6	4%								6%			
RC1.3			30%	20%								X
RC1.4					30%							
RC1.5	4%		30%				50%			30%	X	25%
RC1.6	4%					8%				30%		

<sup>1</sup> Los porcentajes son en función de la cantidad de suelo

<sup>2</sup> RF1 (suelo tamizado, arena fina tamizada, agua) mezcla base clima muy frío

<sup>3</sup> RC1 (suelo tamizado, arena fina tamizada, agua) mezcla base clima templado-cálido:

#### 4.2 Selección del suelo

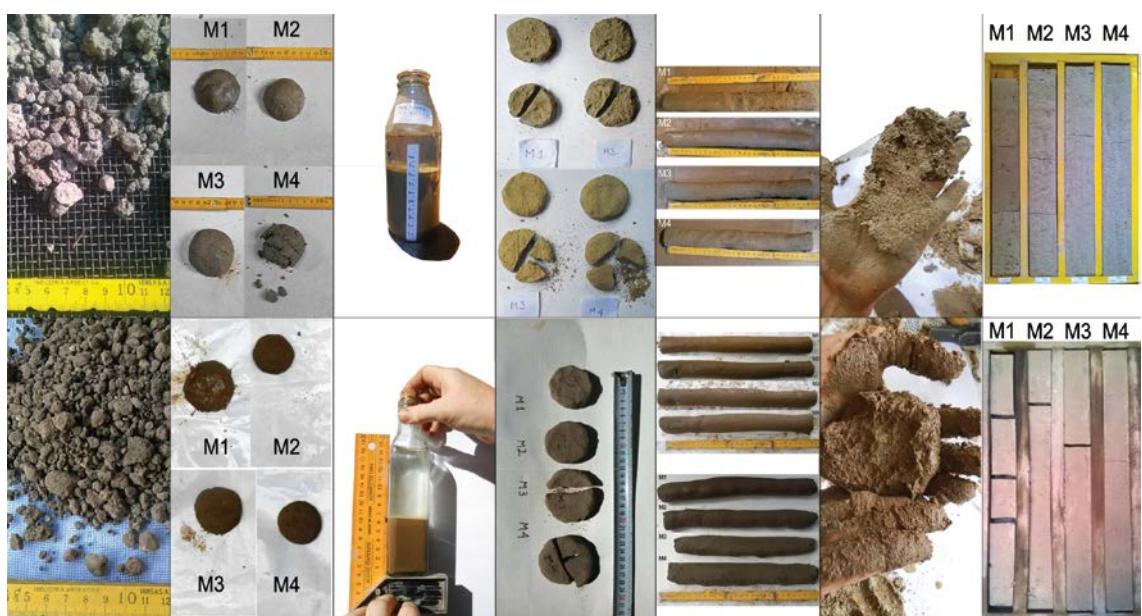


Figura 1. Ensayos sensoriales: arriba suelo de El Bolsón; abajo suelo de Buenos Aires

Antes de empezar con los ensayos sobre revoques se procede a la identificación del suelo a utilizarse. Sobre las muestras M1 (suelo solo); M2 (1 suelo, 1 arena); M3 (1 suelo, 2 arena); M4 (1 suelo, 3 arena) se realizan los siguientes testeos preliminares: test táctil-visual, test de

la caída de la bola, test de sedimentación, test de resistencia en seco, test de plasticidad, test de exudación, test de retracción lineal (figura 1).

Estos testeos permiten además de establecer el contenido de arena necesario para estabilizar las mezclas base de los revoques (RF1 y RC1).

A partir de estos ensayos se obtuvieron los siguientes resultados: a través del test táctil-visual, del test de sedimentación y de exudación, se supuso que ambos suelos son de alta plasticidad, ricos en partículas finas y bastante cohesivos en estado húmedo. La proporción adecuada de arena para estabilizarlos, correspondiente al doble del suelo (muestra M3), fue sugerida por el test de caída de la bola, test de resistencia en seco, test de plasticidad y de retracción lineal, aunque en el suelo de Buenos Aires las muestras parecen oponer más resistencia a la ruptura y ser menos cohesivas comparadas con las de El Bolsón.

#### 4.3 Preparación de los materiales

Ambos suelos se tamizaron en seco con tamiz IRAM número 18 (1 mm) y se hidrataron con agua por lo menos 15 días antes de su utilización. La arena utilizada en Buenos Aires es de río, tan fina que no necesitó ser tamizada. En cambio la arena utilizada en El Bolsón es arena de cantera, que se tamizó con tamiz IRAM número 35 (0,5 mm).

#### 4.4 Realización del test de abrasión

Ubicación: laboratorio J. Belanko (El Bolsón, Río Negro).

Equipo y herramientas: moldes para baldosín-probeta (10 cm x10 cm x2 cm); balanza electrónica; calibre electrónico; cronómetro; máquina con cepillo metálico (figura 2).

Materiales y técnicas: probetas de baldosas con cara vista plana (10 cm x10 cm x2 cm) de mezclas para revoques finos con diferentes aditivos (tabla 2).

Descripción del ensayo: el ensayo consiste en ejercer una presión y una velocidad constante por medio de un cepillo metálico (de bronce) contra la superficie de la probeta, durante un tiempo establecido.

Las probetas se pesan antes de comenzar el ensayo y al finalizarlo y la diferencia de peso establece el valor de la abrasión. Según la ecuación:

$$\Delta_a = P_i - P_r \quad (1)$$

Donde:

$P_i$  = peso inicial de la probeta (g)

$P_r$  = peso resultante de la probeta ensayada (g)

$\Delta_a$  = peso material desprendido (g)

Para el ensayo de desgaste por abrasión se suele utilizar la Máquina Dorry. Ya que en laboratorio no se cuenta con dicha máquina, se utilizó un dispositivo que si bien no replica exactamente su funcionamiento, nos permite homologar los resultados, pudiendo comparar diversos prototipos ensayados de esta forma. Para esto es necesario que el dispositivo asegure idénticas condiciones en cada una de las posibles variables (granulometría del abrasivo, presión ejercida en la zona ensayada, velocidad de rotación del abrasivo y duración del ensayo). El dispositivo utilizado se compone de un soporte para un cepillo metálico con peso propio de 2,2 kg, regulado para que efectúe 20 rotaciones por minuto (Minke, 2011). Como duración del ensayo se establecieron tres minutos (60 rotaciones).

#### 4.5 Realización del test de goteo

Ubicación: laboratorio J. Belanko (El Bolsón, Río Negro); laboratorio centro CIDART (CABA, Buenos Aires).

Equipo y herramientas: batea plástica contenedor; cronómetro; equipo para administración de soluciones de macro-goteo (guía); ladrillos de apoyo para probetas; tanque de diez litros de capacidad (figura 2).

Materiales y técnicas: probetas de baldosas con cara vista plana (20 cm x20 cm x2 cm) de mezclas para revoques finos con diferentes aditivos (tabla 2).

Descripción del ensayo: el ensayo de goteo sirve para comprobar la resistencia a la erosión hídrica de los revoques. Dentro de una batea plástica de suficiente capacidad se colocan dos ladrillos de canto que sostendrán las probetas en forma horizontal evitando que quede sumergida por el agua vertida. Se instala un tanque, lleno de agua, con capacidad de mínimo diez litros conectado a una manguera con regulador de goteo, colocada a una altura de dos metros y medio. La tapa del tanque permanece abierta para permitir el flujo de aire. El goteo suministrado sobre la probeta es de una gota por segundo. Se toma el tiempo necesario para que la probeta sea perforada y atravesada completamente, momento en el cual el ensayo se da por terminado. Estos ensayos se deben realizar en un local cerrado para evitar las corrientes de aire que pueden desviar la caída de la gota y alterar el resultado (Corporación de Desarrollo Tecnológico, CDT, 2012).

#### 4.6 Realización del test de retracción lineal

Ubicación: laboratorio J. Belanko (El Bolsón, Río Negro); laboratorio CIDART (CABA, Buenos Aires).

Equipo y herramientas: cajón de Alcock; calibre electrónico (figura 2).

Materiales y técnicas: se ensayan mezclas para revoques finos con diferentes aditivos (ver tabla 2). Los componentes de las mezclas se miden en seco. El contenido de agua será el suficiente para lograr una buena plasticidad, en lo posible homogéneo en todas las mezclas ya que cuanta más agua contienen mayor es la contracción.

Descripción del ensayo: la mezcla se coloca en unos cajones de madera tratada con fondo (cajón de Alcock), cada cajón se divide en compartimentos cuyas dimensiones interiores son (8,5x60x3,3 cm). Cada compartimiento podrá contener una mezcla diferente. Las mezclas se dejan secar en un lugar ventilado, protegidas de la radiación solar directa y de toda variable que pueda comprometer o acelerar excesivamente el proceso de secado (mayor a siete días). La retracción lineal se mide, una vez completado el proceso de secado, parando el cajón y midiendo el espacio que se generó entre las muestras y la parte superior y lateral del cajón. La medida se toma con calibre electrónico. Es posible también apreciar cualitativamente las fisuras que se pueden generar. El porcentaje de retracción representa la relación entre el largo de la muestra después del testeо y el largo de la muestra en el estado original (Ashour; Derbala, 2010). Se puede calcular con la ecuación:

$$\text{retracción}(\%) = (\Delta L \div L) \cdot 100\% \quad (2)$$

Donde:

$\Delta L$ = diferencia del largo de la muestra en estado húmedo y seco

$L$ = largo de la muestra en estado húmedo

#### 4.7 Armado de bastidores para el ensayo de resistencia a la intemperie

Ubicación: laboratorio J. Belanko (El Bolsón, Río Negro); El Cobijo Urbano (San Martín, Buenos Aires).

Equipo y herramientas: baldes; cuchara; clavos; fratacho; martillo; regla; sierra (figura 2).



Figura 2. Dispositivos de ensayo: 1) Ensayos sensoriales; 2) Moldes para probetas; 3) Cajón de Alcock y calibre electrónico; 4) Bastidores; 5) Tanque capacidad 10 litros; 6) Máquina con cepillo metálico y balanza electrónica.

**Materiales y técnicas:** se realizan bastidores con la técnica de la quincha. El bastidor queda orientado sobre el eje Este-Oeste para que las superficies queden expuestas a la orientación Norte y Sur, al fin de comparar la resistencia del revoque en las dos orientaciones opuestas. Se aplican las mezclas de finos que dieron los mejores resultados en los ensayos de laboratorio.

**Descripción del ensayo:** además de las pruebas de laboratorio, cuyos resultados pueden ser parciales debido a la escala reducida de las muestras y a la imposibilidad de volver a crear las mismas condiciones climáticas y de uso, se realizaron unos bastidores de quincha cuya dimensión es de un metro de ancho por dos metros de altura. En cada bastidor se aplican dos mezclas diferentes sobre ambas caras. Estos bastidores se expondrán a la intemperie, colocados por arriba de un sobre-cimiento y protegidos por un alero de mínimo 50 cm, para simular las condiciones reales de la pared. El ensayo dura un año para que se puedan registrar los resultados de la exposición del revoque a las cuatro estaciones.

**Monitoreo:** el monitoreo del ensayo, que tiene la finalidad de relevar los cambios ocurridos en las muestras, se efectúa una vez por semana durante el periodo de secado, en el curso del segundo mes una vez cada 15 días, a partir del tercer mes una vez cada 30 días.

**Ánalisis de los resultados:** se analiza de forma comparativa la durabilidad, la fisuración, la adherencia al sustrato, la resistencia a la erosión de los agentes atmosféricos (lluvia, viento, granizo, heladas). Al momento de la redacción de este artículo se armaron los bastidores en el área de El Bolsón listos para recibir los revoques finos.

## 5. PRINCIPALES RESULTADOS

Los principales resultados obtenidos se presentan en la siguiente Tabla 3. Los aditivos ensayados brindaron una resistencia a la abrasión parecida en ambos suelos. Algunos, como la emulsión asfáltica y la ceniza de madera mejoraron la resistencia tanto a la abrasión como a la erosión hídrica. La ceniza en particular es un material atractivo, por ser barato y

fácil de conseguir sobre todo en zonas rurales, por eso en este momento se están realizando ensayos sobre la tierra estabilizada únicamente con ceniza. Por otro lado, la observación de revoques contenientes emulsión asfáltica en las obras ubicadas en el área de El Bolsón demostró una escasa adhesión al sustrato en el caso de una infiltración de agua, ya que la emulsión genera una película que tiende a despegarse en láminas grandes.

Tabla 3. Comparación de los resultados obtenidos según materiales y ensayos

Probeta	Aditivos <sup>1</sup>	Abrasión (g)	Goteo (min)	Retracción lineal (%)
RF1	200% arena	35	220	0,21%
RF1B	200% arena, 30% estiércol	25	135	0,3%
RF1.1	200% arena, 30% estiércol, 4% aceite de lino doble cocido, 30% engrudo	66	266	0,3%
RF1.2.4	200% arena, 4% aceite de lino doble cocido, 4% emulsión asfáltica	33	68	-
RF1.2.6	200% arena, 4% aceite de lino doble cocido, 6% emulsión asfáltica	13	240	0,5%
RF1.3	200% arena, 30% estiércol, 20% cal-caseína	105	780	0%
RF1.4	200% arena, 30% estiércol, 4% aceite de lino doble cocido, 30% colca	86	635	0,26%
RF1.5	200% arena, 30% estiércol, 4% aceite de lino doble cocido, 50% ceniza, 25% tiza, 30% engrudo	13	95	0,25%
RF1.6	200% arena, 4% aceite de cocina reciclado, 8% cemento, 30% pulpa de papel de diario	80	170	0,21%
RC1	200% arena	17	305	0,26%
RC1.1	200% arena, 30% estiércol, 4% aceite de lino doble cocido, 30% engrudo	6	416	0,32%
RC1.2.4	200% arena, 4% aceite de lino doble cocido, 4% emulsión asfáltica	52	-	-
RC1.2.6	200% arena, 4% aceite de lino doble cocido, 6% emulsión asfáltica	-	285	0,48%
RC1.3	200% arena, 30% estiércol, 20% cal-caseína	93	816	0,08%
RC1.4 <sup>2</sup>	200% arena, 30% cal-mucilago	189	398	-
RC1.5	200% arena, 30% estiércol, 4% aceite de lino doble cocido, 50% ceniza, 25% tiza, 30% engrudo	4	172	0,18%
RC1.6	200% arena, 4% aceite de cocina reciclado, 8% cemento, 30% pulpa de papel de diario	66	105	0,17%

<sup>1</sup> Los porcentajes son en función de la cantidad de suelo.

<sup>2</sup> La probeta RC1.4 se disgrgó en el curso del ensayo de abrasión.

El estiércol brindó una mejor resistencia a la abrasión pero no mejoró la resistencia a la erosión hídrica, probablemente por absorber más rápidamente el agua.

El engrudo aumentó la resistencia a la abrasión, sin embargo es un aditivo complejo de manejar por su necesidad de ser añadido a la mezcla poco antes del uso para evitar que se pudra, las probetas contenientes engrudo secaron más lentamente en los dos climas y en muchos casos dieron resultados muy variables debido a la fermentación a lo largo del proceso de secado.

La cal-caseína reaccionó muy bien a las pruebas de erosión hídrica y retracción lineal, redujo la pulverización y puede ser utilizada con éxito como base para una pintura por su color claro pero no dio buenos resultados en el test de abrasión. Además resulta difícil

conseguir caseína en polvo y su preparación es más elaborada: para estos ensayos se recurrió en Buenos Aires al uso de queso fresco y en El Bolsón cortando la leche en polvo con limón, sin substanciales diferencias en los resultados.

El aceite de lino doble cocido en el área de El Bolsón fue difícil de conseguir, teniendo que ser remplazado por aceite para madera sin diferencias en los resultados. Utilizado como sellador, pintado sobre probetas de suelo estabilizado solo con arena, dio muy buenos resultados al test de abrasión (desgaste de uno a dos gramos) y resistió más de 12 horas al test del goteo sin presentar ninguna marca de la gota, unos resultados parecidos se lograron con el aceite de cocina reciclado que constituye una alternativa interesante y más ecológica al aceite de lino.

Es importante señalar que el ensayo al goteo es un ensayo económico realizable aunque no se disponga de un laboratorio, no obstante requiere un seguimiento muy estricto ya que las guías suelen desregularse con el paso del tiempo debido al cambio de presión ejercido por el agua contenida en el tanque. Otro dato a tener en cuenta es la disminución de la eficacia del impacto de la gota sobre la superficie de la probeta, debido a la acumulación de agua al interior del hueco producido por la misma, para obviar a este problema se podría reducir el espesor de la probeta a un centímetro o inclinarla.

## 6. CONCLUSIONES

Los ensayos realizados hasta ahora permitieron probar y analizar las propiedades de algunos materiales, mezclas y aditivos de uso común. En particular su capacidad de proporcionar al revoque fino resistencia a la erosión hídrica y a la abrasión, y de reducir los fenómenos de contracción y fisuración.

Al ser similar la composición de los suelos en ambos climas, no se encontraron diferencias significativas en los resultados de los ensayos de laboratorio, a exclusión del tiempo de secado de las probetas, mucho mayor en clima frío, que sugiere descartar ciertos aditivos o inclinarse a la selección de los que reduzcan los tiempos de secado. No obstante se espera observar un mayor rango de comportamiento en los materiales en el ensayo a la intemperie, al ser el clima la variable más notable.

La metodología y el desarrollo de la investigación sugieren un paso a paso que a partir del análisis de las características del suelo, permite establecer si hace falta y en qué medida estabilizarlo primariamente con arena y sucesivamente, según las variables dadas, qué aditivos agregarle. Es notorio que algunos aditivos, por su proceso productivo, parecen adaptarse mejor al cronograma y a la logística de una obra de autoconstrucción más que a los de una obra profesional.

Sin embargo los resultados obtenidos permiten evaluar especialmente la interacción entre aditivos e inducen a realizar nuevos ensayos sobre el suelo estabilizado con un solo aditivo a la vez para obtener resultados enfocados en las propiedades de cada uno.

Los ensayos se completarán con el ensayo a la absorción de humedad y el ensayo de lluvia simulada, y con el monitoreo anual del ensayo a la intemperie, con los cuales se podrán obtener resultados comparativos completos en cuanto al comportamiento de los prototipos de revoques diseñados y ensayados.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ashour, T.; Derbala, A. (2010). Shrinkage of natural plaster materials for straw bale buildings affected by reinforcement fibers and drying. CIGR Journal vol. 12 n°1. Disponible en <http://www.cigrjournal.org>. Acceso Diciembre 2014.

Corporación de Desarrollo Tecnológico, CDT (2012). Evaluación de daños y soluciones para construcciones en tierra cruda. Documento técnico n°32. Disponible en <http://www.cdt.cl>. Acceso Junio 2015.

- Didier-Feltgen, L. (2005). *Les enduits en terre*. Mémoire DSA-Terre 2002-2004. École d'architecture de Grenoble. Laboratoire CRATerre-EAG.
- Guerrero Baca, L.F. (2007). *Arquitectura en tierra. Hacia la recuperación de una cultura constructiva*. Revista Apuntes, vol. 20, N° 2: 182-201. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá. Colombia. Disponible en <http://apuntes.javeriana.edu.co/>. Acceso Junio 2015
- Houben, H.; Guillaud, H. (1984). *Earth Construction Primer*. CRATerre/UNCHS-PCD-CRA-AGCD. Brussels. Belgium.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (1996). IRAM 11603 - Acondicionamiento térmico de edificios - Clasificación bioambiental de la República Argentina.
- Melia, P.; Ruggieri, G.; Sabbadini, S.; Dotelli, G. (2014). *Environmental impacts of natural and conventional building materials: a case study on earth plasters*. ELSEVIER. Disponible en <http://www.journals.elsevier.com/journal-of-cleaner-production>. Acceso Junio 2015.
- Minke, G. (2011). *Shrinkage, abrasion, erosion and sorption of clay plasters*. Informes de la Construcción Vol. 63. Disponible en <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es>. Acceso Septiembre 2014
- Minke, G. (2013). *Revoques de barro: mezclas, aplicaciones y tratamientos*. Bariloche: BRC ediciones.
- Rotondaro, R.; Cacopardo, F.; Patrone, J.C.; Rolón, G. (2009). *El empleo de la tierra cruda en áreas urbanas pobres. Algunas propuestas para mejorar la vivienda auto-producida en barrios de Buenos Aires y Mar del Plata, Argentina*. CD VIIIº SIACOT- IIº SAACT "Arquitectura de tierra y hábitat sostenible". Tucumán, Argentina. 8 al 13 de junio 2009.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Nora y Jorge Belanko que pusieron a disposición su laboratorio ubicado en la ciudad de El Bolsón (Río Negro) para el desarrollo de esta investigación.

## AUTORES

Giulia Scialpi, arquitecta; investigadora en el Programa ARCONTI-FADU UBA, Buenos Aires; responsable del área de proyecto en el grupo ECOHACER Bioarquitectura y Bioconstrucción, El Bolsón.

Natalia Hugón, docente en la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de la Universidad de Buenos Aires; investigadora de proyecto en el Programa ARCONTI- Instituto de Arte Americano- Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de la Universidad de Buenos Aires; Co-directora del Centro CIDART( Capacitación, investigación y diseño en arquitecturas de tierra).

Rodolfo Rotondaro, doctor arquitecto, profesor adjunto e investigador CONICET en la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de la Universidad de Buenos Aires. Director del Programa ARCONTI-IAA, FADU UBA. Responsable temático Cátedra UNESCO "Arquitectura de Tierra, culturas constructivas y desarrollo sostenible"(CRATerre/UNESCO. Realiza tareas de investigación, docencia, diseño, transferencia y extensión en el campo de la Arquitectura de Tierra y las Tecnologías Sociales.

# COMPARACIÓN ENTRE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE ADOBES TRADICIONALES Y BTC ESTABILIZADOS QUÍMICAMENTE

Marcelo Vázquez<sup>1</sup>; Daniel Sebastián Guzman<sup>2</sup>; Jorge Mateo Iñiguez<sup>3</sup>

Universidad de Cuenca- Ecuador

<sup>1</sup>marcelo.vazquez@ucuenca.edu.ec; <sup>2</sup>sgf\_9g@hotmail.com; <sup>3</sup>mit\_2110@hotmail.com

**Palabras claves:** bloques de tierra comprimida, estabilización, cloruro de sodio, cal, cáscara de arroz

## Resumen

La crisis energética suscitada en la década de los 70 obligó a los países a buscar soluciones ecológicas en el campo de la construcción para reducir su consumo desmedido, en este contexto, los sistemas constructivos conformados por bloques de tierra adquirieron mayor importancia desplegándose investigaciones que buscan lograr mejoras técnicas tanto del sistema como de los materiales que lo constituyen. Desde esta visión la investigación pretende contribuir al desarrollo tecnológico, proponiendo una combinación de materiales alternativos que reemplacen a los empleados comúnmente como estabilizantes para la producción de bloques de tierra y así generar una técnica constructiva benéfica para el medio ambiente. De manera concreta se utiliza el prensado hidráulico para lograr piezas de tierra que mejoren las características mecánicas del material. Para su estabilización se experimenta con fibras vegetales alternativas a las que se han venido utilizando. Adicionalmente, en la investigación se experimenta con estabilizantes que cumplen características ecológicas y de menor impacto ambiental en su obtención. El reciclado es otra particularidad que se contempla en el estudio, partiendo de las disponibilidades del mercado y su costo de obtención. Para la elección del estabilizante óptimo se utiliza una matriz basada en parámetros ponderados que den como resultado el que mejor cumpla con los objetivos de la investigación. La producción de los bloques experimentales ha sido sometida a estudios físico-mecánicos utilizando normas internacionales de construcción en tierra; el método comparativo ha permitido lograr resultados entre los adobes tradicionales y los adobes mejorados. El resultado de los ensayos físico-mecánicos, demostrarán la eficacia de los estabilizantes experimentales, en el caso concreto de la investigación nos referimos a la cáscara de arroz y al cloruro de sodio con cal.

## 1. INTRODUCCIÓN

La presente investigación desarrolla una propuesta de mejoramiento de los bloques de tierra. Se da esta denominación a los mampuestos de tierra sin cocer que pueden contener una fibra vegetal u otros materiales para optimizar sus propiedades técnicas.

El sistema constructivo en adobe ha sido utilizado por distintas culturas a lo largo de la historia, en el caso de Ecuador y más concretamente en la región del austro los pueblos pre-hispánicos empleaban la tierra (adobe y bahareque) como material predominante para la construcción de sus viviendas (Pesantes; González, 2011). Sin embargo, en la actualidad, estas prácticas constructivas han caído en desuso debido a la introducción de nuevas técnicas de construcción que han provocado una subvaloración y desprestigio de estos sistemas.

A partir de esta problemática surge el interés por revalorizar el sistema constructivo de bloques de tierra debido a sus ventajas como sistema constructivo, además la tierra -insumo principal para la elaboración de los bloques- es de fácil obtención y no necesita de mano de obra especializada para su extracción.

Con el fin de desarrollar una propuesta de mejoramiento del material que constituye dichos bloques, se realiza un estudio práctico donde se emplean 3 tipos de estabilización que buscan optimizar las propiedades físico-mecánicas del bloque. Primero se emplea la estabilización física donde se realiza un correcto diseño de mezclas para la tierra con el fin de tener una composición granulométrica óptima; la estabilización mecánica en la cual se

somete a la mezcla de tierra a una prensa hidráulica; y finalmente la estabilización química donde para empezar se realiza el estudio de estabilizantes que modifiquen las propiedades del suelo. Posteriormente se realiza la elección del compuesto óptimo para la estabilización química mediante una matriz capaz de calificarla en cuatro aspectos: impacto ambiental, materiales reciclados, economía y mejora técnica.

## 2. OBJETIVOS

El objetivo de esta investigación es aplicar la estabilización física, mecánica y química a una propuesta de mejora de bloques de tierra, estudiar sus propiedades físico-mecánicas y compararlas con las propiedades físico-mecánicas de los adobes – bloques de tierra fabricados de forma tradicional.

## 3. METODOLOGÍA

Para la elaboración de la propuesta de mejora se ha realizado un análisis granulométrico por tamizado del suelo que conforma la materia prima principal para la elaboración de los bloques de tierra, con el fin de conocer su composición. Este análisis se ha realizado aplicando la norma ASTM D-422.

Para la determinación del índice de plasticidad se ha realizado ensayos de límite líquido y límite plástico de muestras de suelo siguiendo la norma ASTM D-4318.

A continuación se han analizado varias posibilidades de estabilización física en las mezclas que conformarían los bloques, esto debido a que en el ensayo granulométrico el suelo con el que se han de realizar los bloques de tierra y los adobes tradicionales cuentan con un porcentaje de arena de del 39% y un porcentaje de finos (arcilla y limos) del 61%. Según Saroza y otros (2008) no existe un consenso al momento de determinar el porcentaje óptimo de arcillas en una muestra para realizar bloques de tierra, sin embargo, el porcentaje mínimo debería ser un 15%. Barrios y otros (1986) mencionan que un porcentaje de arena es admisible entre el 55% a 65%. Al conocer estas connotaciones se ha decidido elaborar bloques de tierra cuya composición granulométrica se encuentre alrededor del 60% de arena y 40% de finos (arcilla y limos). Para esto se tuvo que adicionar arena en el suelo elegido con el fin de conformar una mezcla de tierra que alcance dicha composición granulométrica.

Posteriormente se ha determinado que los bloques se elaborarán mediante el uso de una prensa hidráulica con el fin de compactar la mezcla y determinar si existe una mejora en la resistencia a compresión (Figura 1). La comparación entre el bloque prensado de tierra se realiza con los adobes realizados por métodos tradicionales en el sector donde se realiza el estudio, en Cuenca, Ecuador. Con la finalidad de realizar el análisis comparativo se ha recurrido a un productor de adobes donde se ha elaborado dichos bloques de tierra por métodos tradicionales cuya composición granulométrica es igual a la de los bloques prensados (Espínola; Valderrama, 2011).



Figura 1. Máquina para fabricar bloque prensado y muestras de bloque prensado

Con el fin de optimizar las propiedades físicas y mecánicas del bloque de tierra se ha decidido incorporar estabilizantes químicos para probar su comportamiento al mezclarlos con tierra. Para la elección de los estabilizantes se ha realizado una clasificación según su tipo; posteriormente se ha procedido a elaborar una lista de parámetros mediante los cuales se califica cada compuesto. Los dos agregados con mayor puntuación serán los empleados en la mezcla de tierra que conformarán los bloques.

Para cumplir los objetivos propuestos en esta investigación los parámetros elegidos para calificar a los estabilizantes son los siguientes:

Impacto Ambiental – el impacto ambiental o la denominada huella de carbono se calcula considerando la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera, autores como Wiedmann y Minx (2008, apud Espíndola; Valderrama, 2011), mencionan que para el cálculo del impacto ambiental se toma en cuenta un gas único ( $CO_2$ ). Con el fin de evaluar el consumo energético en la elaboración de un material se debe tomar en cuenta la energía incorporada en su construcción que considera todos los procesos que fueron necesarios para llevar un material hasta el lugar donde se lo va a utilizar, esto comprende desde extracción hasta energía incorporada por transporte, logrando una calificación a cada material presente en la clasificación según dicho coste energético.

Uso de materiales reciclados y/o reutilización de materiales – se buscan materiales de bajo impacto ambiental o en su defecto materiales que aporten soluciones para reducir el despilfarro energético en la actualidad, se han considerado materiales reciclados como componentes para la estabilización del adobe, es decir, materiales que en su proceso de elaboración usen materia prima reciclada y/o procesada para la conformación de compuestos. También se considera como positivo la re-utilización de desechos.

Economía – se califica el costo extra que significa el agregar el estabilizante para la elaboración de un bloque. Además se califica la disponibilidad del material en el medio en el que se realiza el estudio, en Cuenca, Ecuador.

Mejora de propiedades técnicas del suelo – se realiza una revisión bibliográfica con el fin de identificar si existen estudios que mencionen el uso de cada uno de los estabilizantes en los suelos. Se califica de manera positiva estudios que mencionen el uso de los estabilizantes en suelos para mejorar la resistencia a la compresión y/o resistencia al agua, con el fin de mejorarlas propiedades físico-mecánicas.

Se califica cada apartado con puntajes que va de uno hasta cinco puntos siendo este puntaje el mayor. Se realiza una ponderación con el fin de dar más peso a los parámetros de impacto ambiental y mejora de propiedades técnicas en consideración de ser los más importantes. Estas valoraciones obedecen a un estudio de cada uno de los estabilizantes en la ciudad de Cuenca, Ecuador y la puntuación ha sido otorgada por los autores de este artículo después de conocer las distintas condicionantes presentes en el medio (Tablas 1-2).

Después de identificados los procesos para elaborar los bloques en la prensa hidráulica se ha procedido a su fabricación. Con el fin de identificar si los estabilizantes químicos producen una mejora, se realiza una primera muestra de 25 bloques que no contienen ningún estabilizante químico, cuya composición granulométrica contiene un 60% de arena y un 40% de finos (arcilla y limos). Posteriormente se realizan muestras de igual cantidad de bloques prensados con una similar composición granulométrica y se adiciona en la mezcla en seco el estabilizante químico elegido en porcentajes del 3%, 6% y 10%, es decir, se han realizado muestras cada una con 20 a 30 bloques prensados que contienen 60% de arena 40% de finos (arcilla-limos) y 3%, 6% y 10% de estabilizante. Los estabilizantes empleados en la mezcla son cáscara de arroz y cloruro de sodio. En el caso de los bloques estabilizados con cloruro de sodio se agrega un 2% de cal a la mezcla de tierra ya que después de consultar algunos autores, estos indican que al mezclar este compuesto con cal se estabiliza aún más. La dosificación utilizada para cada una de las propuestas se muestra en la tabla 3.

Tabla 1. Matriz para calificación de precio de estabilizantes

Estabilizante	Precio por kg	Peso específico kg/m <sup>3</sup>	Precio por m <sup>3</sup>	Ratio precio (RP)	Puntaje	Para la calificación del precio se aplica un ratio o relación entre los estabilizantes. Se obtiene el precio de cada estabilizante por kg y se calcula el precio para 1 m <sup>3</sup> . Posteriormente se toma el precio del estabilizante de mayor costo (resinas acrílicas) para 1 m <sup>3</sup> ; este se divide para el precio de cada uno de los otros estabilizantes. De esta manera se consigue una relación de precio entre todos los compuestos estudiados. Esta relación se establece en porcentajes, dando un puntaje de uno a cinco puntos a cada estabilizante según el porcentaje conseguido	
Cascara de arroz	0,004	780	3,12	100%	5		
Escorias de fundición	0,010	1500	15	100%	5		
Puzolana	0,017	1100	18,7	100%	5		
Cabuya	0,913	60	54,78	80%	4		
Cal	0,105	1000	105,4	80%	4		
Cloruro de sodio	0,090	1200	108	80%	4		
Cemento	0,144	1200	172,8	60%	3		
Yeso	0,162	1250	203	60%	3		
Almidón de yuca	0,760	500	380	60%	3	Precio por m <sup>3</sup>	Puntaje
Silicato de sodio	0,900	1380	1242	40%	2	%RP>90	5
Bitumen	2,950	800	2360,0	40%	2	60<%RP<90	4
Resinas acrílicas	2,639	1010	2665,5	40%	2	40<%RP<60	3
Aceite de linaza	7,149	940	6720	20%	1	20<%RP<40	2
Resina epoxica	6,247	1170	7308,6	20%	1	RP<20%	1

Tabla 2. Matriz para calificación y elección de estabilizantes

Estabilizante	Impacto ambiental	Material reciclado	Disponible	Mejora técnica	Precio	Total	Total ponderado	Ratio calidad
Cascara arroz	5	5	4	3	5	22	21,00	84%
Cloruro de sodio	4	1	5	3	4	17	18,00	72%
Cal	2	1	4	5	4	16	18,00	72%
Escorias de fundición	4	5	1	3	5	18	17,00	68%
Cabuya	4	1	4	3	4	16	17,00	68%
Cemento	1	1	5	5	3	15	17,00	68%
Almidón de yuca	4	1	4	3	3	15	16,00	64%
Silicato de sodio	3	1	4	4	2	14	15,50	62%
Yeso	1	1	5	3	3	13	14,00	56%
Puzolana	3	1	2	2	5	13	13,50	54%
Aceite de linaza	5	1	1	4	1	12	13,50	54%
Resinas acrílicas	1	1	4	4	2	12	13,50	54%
Resina epoxica	1	1	4	3	1	10	11,00	44%
Bitumen	1	1	3	3	2	10	11,00	44%
	20%	10%	20%	30%	20%			

Tabla 3. Dosificaciones de mezclas para la elaboración de bloques prensado

	Estabilizante	% Estabilizante	% Arena	% Arcilla y limo
Bloque Tipo	Ninguno	0	60	40
Bloque A	Cáscara de arroz	3	60	37
Bloque B	Cáscara de arroz	6	60	34
Bloque C	Cáscara de arroz	10	60	30
Bloque D	Cloruro de sodio	3	60	35
	Cal	2		
Bloque E	Cloruro de sodio	6	60	32
	Cal	2		
Bloque F	Cloruro de sodio	10	60	28
	Cal	2		

Con el fin de conocer las propiedades físico-mecánicas de los bloques fabricados se efectúan ensayos de compresión, absorción por capilaridad y humectación. El ensayo de humectación se realiza siguiendo la norma UNE-EN 41410:2008, donde se emplean dos bloques: uno para realizar el ensayo y un segundo como referencia. Para realizar este ensayo se coloca la cara del bloque que va a ser remojada sobre 3 piezas de apoyo de 3 mm de altura. Se añade agua hasta que quede sumergida 10 mm. Se mantiene sumergida 30 segundos. Se deja secar al aire hasta igualar al color del bloque de referencia y se observa su estado, anotando si aparecen las condiciones de rechazo como: grietas aleatorias, hinchamiento, pérdida de capacidad de suelo, penetración de agua en más del 70% de la anchura, pérdida de fragmentos mayores a 50 mm. Se debe repetir el proceso seis veces. Se consideran bloques aptos a los que después de pasados los 6 ciclos no presenten ninguna condición de rechazo de las antes mencionadas. Los ensayos de compresión y absorción por capilaridad al igual que el anterior sigue los lineamientos expuestos por la Normativa UNE-EN 41410:2008 para bloques de tierra comprimida por ser la más completa y está acorde a la definición del bloque realizado (BTC). Los ensayos de compresión se han realizado a los 15, 25, 32 días de elaborados los bloques prensados con el fin de identificar la influencia del tiempo de secado en la resistencia a compresión y de esta manera conocer el tiempo óptimo de secado para conseguir una mayor resistencia de las piezas. La variación de tiempo en el desarrollo de los ensayos obedeció a la disponibilidad de la máquina y del laboratorio para realizarlos.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 4 se exponen los resultados conseguidos de los ensayos a compresión, absorción y humectación.

Los bloques de tierra estabilizados mecánicamente (bloques prensados) sin ningún tipo de estabilizante se los denominarán “bloques tipo”. Estos obtuvieron resistencias aceptables a la compresión. La normativa española UNE-EN 41410:2008 no estipula un mínimo aceptable para la resistencia a la compresión de bloques. Por esta razón, se toma en cuenta el esfuerzo mínimo admisible para adobes simples o estabilizados estipulados en la normativa peruana E.080, que especifica que la resistencia mínima debe ser superior a 1,17 MPa (12 kgf/cm<sup>2</sup>). La resistencia promedio conseguida al ensayar una muestra de 6 “bloques tipo” ha sido 2,03 MPa (20,71 kgf/cm<sup>2</sup>). La desviación estándar obtenida al realizar dicho ensayo ha sido de 0,31 MPa. Es necesario puntualizar que la Norma NEC (2011) para el caso de sistemas constructivos en tierra dispone la observancia de la Norma E.080.

Al agregar a la dosificación cáscara de arroz como estabilizante químico existe una mejora en la resistencia a la compresión, esto si comparar con los bloques tipo. Al agregar el 3% del

estabilizante se produce una mejora en la resistencia a compresión del 23%, 2,61 MPa (26,63kgf/cm<sup>2</sup>). La dosificación de 6% produce una mejora del 14%, 2,30 MPa (23,47 kgf/cm<sup>2</sup>). La dosificación que generó mejores resultados fue la correspondiente a la dosificación de 10% que obtuvo una mejora de su resistencia en casi un 50%, 2,84 MPa (29,05kgf/cm<sup>2</sup>).

Tabla 4. Promedio de resistencia a compresión, resultados de ensayo de absorción y humectación de bloques prensado

Material	Resistencia a la compresión (MPa)	% de absorción	Humectación	Desviación estandar
Adobe tradicional	0,518	sin ensayo	No cumple	
Adobe tradicional, estabilización física	0,673	sin ensayo	No cumple	
Bloque prensado tipo	2,031	19%	Cumple	0,31
Bloque prensado, Cáscara de arroz (3%)	2,612	19%	Cumple	0,30
Bloque prensado, Cáscara de arroz (6%)	2,302	15%	Cumple	0,40
Bloque prensado, Cáscara de arroz (10%)	2,849	28%	Cumple	0,32
Bloque prensado, Cloruro de sodio (3%)+Cal (2%)	1,708	16%	Cumple	0,34
Bloque prensado, Cloruro de sodio (6%)+Cal (2%)	1,159	21%	Cumple	0,29
Bloque prensado Cloruro de sodio (10%)+Cal (2%)	0,765	28%	Cumple	0,33

En cuanto al tiempo de secado de las piezas, después de realizar los ensayos a los 15, 25 y 32 días, se ha identificado la influencia directa sobre la resistencia a la compresión. Después de ensayar a los 15 días de secado los “bloques tipo”, así como, los bloques con dosificaciones del 3%, 6% y 10% de cáscara de arroz, se ha podido determinar que bloques que contienen 10% de cáscara de arroz obtuvieron resistencias superiores. Mediante el tacto de las piezas, se ha identificado que, internamente, estos bloques contenían menor humedad, esto a diferencia del resto de muestras ensayadas que se ha podido constatar que constaban con mayor humedad, condición que puede haber influido en la resistencia final obtenida. Sin embargo, no existen datos suficientes que permitan corroborar dicha hipótesis. Posteriormente con los ensayos realizados a los 25 y 32 días, la resistencia a la compresión tanto de los “bloques tipo” como de las muestras elaboradas con dosificaciones del 3% y 6% de cáscara de arroz, se demuestra su incremento de modo sustancial. Los especímenes llegan a un pico de resistencia a los 25 días de secado en el caso de bloques empleados con el 3% de cáscara de arroz; y, a los 32 días para los bloques prensados con 6% de cáscara de arroz y los “bloques tipo”.

En el caso de las muestras que contienen 10% de cáscara de arroz si bien existió una mejora en la resistencia a compresión a los 25 y 32 días de secado, ésta resulta insignificante ya que aumentó alrededor del 7%.

Para el caso de las muestras estabilizadas con cloruro de sodio y sal, el ensayo a los 15 días de secado no ha podido ser realizado debido a que los bloques contenían un alto porcentaje de humedad. A los 25 días de secado, se observó que los bloques, cuya dosificación contenían un 3% de cloruro de sodio y 2% de cal, podían ser sometidos a los ensayos de compresión porque se encontraban con menor porcentaje de humedad. No obstante, los bloques con el 6% y 10% de cloruro de sodio aún se hallaban húmedos. A los 32 días de secado los bloques con el 6% y 10% de cloruro de sodio todavía contenían un

porcentaje de humedad significativo, que se evidenciaban en sus cantos, sin embargo, se procedió al ensayo de compresión con el fin de conocer su resistencia.

Los bloques prensados con el 3% de cloruro de sodio a los 15 días de secado y curado, obtuvieron resistencias superiores a la especificada en la normativa E.080, 1,70 MPa (17,42 kgf/cm<sup>2</sup>), sin embargo, estas fueron inferiores a las obtenidas por los “bloques tipo”; a los 32 días la resistencia a la compresión fue similar.

Los bloques prensados con el 6% y 10% de cloruro de sodio ensayados únicamente a los 32 días -las muestras seguían húmedas a los 15 y 25 días- dieron como resultado resistencias extremadamente bajas que no cumplen con los mínimos especificados en la normativa E.080, 1,15 MPa y 0,76 MPa (11,82 kgf/cm<sup>2</sup> y 7,80 kgf/cm<sup>2</sup> respectivamente).

Ulteriormente a los ensayos, se ha observado que todas las piezas de bloque prensado estabilizadas con cloruro de sodio, internamente contenían un alto porcentaje de agua aún a los 32 días de producción debido a que el estabilizante mantiene la humedad de la pieza y dificulta su secado.

Finalmente, de los ensayos realizados a los 15, 25 y 32 días se concluye que en el caso de los bloques estabilizados con cáscara de arroz, el tiempo adecuado de secado se encuentra entre los 15 y 25 días, a su vez, la tendencia evidenciada en los sondeos indican que al agregar mayor cantidad del estabilizante se necesita menor tiempo de secado, sin embargo, si existe una mayor cantidad de material, esta repercute en una menor resistencia debido a la absorción de agua de la pieza.

#### **4.1 Ensayos de humectación**

En los ensayos de humectación se ha observado que a excepción de la pieza estabilizada con un 10% de cáscara de arroz -que presentó condiciones de rechazo-, el resto piezas de bloque prensado cumplen con la normativa. Se ha identificado que a mayor porcentaje de cáscara de arroz agregada a la mezcla menor es la resistencia ante la humedad.

#### **4.2 Ensayos de absorción**

El ensayo ha permitido determinar que el porcentaje de humedad promedio de los “bloques tipo” es del 19%.

En cuanto a los bloques estabilizados con cáscara de arroz, los que contienen un 10%, absorben mayor cantidad de agua, llegando a un porcentaje promedio del 28%. Sin embargo, las muestras que contienen el 3% y 6%, tienen un porcentaje de absorción del 19% y 15% respectivamente. Según Minke (2001), esto se debe a la cantidad de poros generados en la mezcla de tierra con fibras vegetales. Las muestras estabilizadas con el 3% de cloruro de sodio y 2% de cal reducen la absorción del agua en un 3% con respecto a los “bloques tipo”.

Las muestras estabilizadas con 6% y 10% de cloruro de sodio y un 2% de cal en ambos casos tienen un porcentaje de absorción promedio mayor, siempre comparando con el “bloque tipo” que no contiene ningún estabilizante.

La normativa UNE-EN 41410:2008, que se ha tomado como referencia para realizar los ensayos, no especifica un porcentaje máximo admitido. Sin embargo, después de la investigación realizada, se puede concluir que los porcentajes de absorción obtenidos por las piezas elaboradas en esta investigación son aceptables, ya que, bloques de tierra prensada con patente registrada y calidad comprobada – similares a los realizados en esta investigación (como BTC con patente registrada como Cannabric o Bioterre)- tienen porcentajes de absorción que oscilan entre el 30% y 40%.

#### **4.3 Comparación de propiedades técnicas entre adobe tradicional y propuesta de mejoramiento**

La resistencia a la compresión de los bloques prensados supera en alrededor del 500% a los adobes tradicionales.

En el caso de los adobes tradicionales, no se han realizado ensayos de absorción debido a que distintos autores mencionan que la pieza tradicional fracasa antes de terminar dicha prueba. La resistencia a la humedad entre los adobes tradicionales y los propuestos en la investigación demuestran un incremento significativo en este orden, la razón, el prensado reduce la cantidad de poros, consiguiéndose menor absorción.

## 5. CONCLUSIONES

La compactación en prensa hidráulica genera un aumento significativo en la resistencia a la compresión y absorción de humedad de la pieza. Este aumento es concluyente si se compara con el adobe realizado por métodos tradicionales.

Al aplicar la compactación en una prensa hidráulica se ha constatado que existe una mejora sustancial en cuanto al tiempo de producción de las piezas. La máquina empleada al contar con una mezcladora mecánica y una prensadora con un molde múltiple -3 bloques simultáneamente- puede producir de 70 a 100 bloques prensados por hora con la participación de 4 obreros.

La estabilización química cumple un papel preponderante en la realización de una propuesta de mejoramiento para el adobe. La combinación del barro con materiales alternativos (estabilizantes) a los empleados en la construcción tradicional (paja) influye de manera directa en sus propiedades físico-mecánicas.

De los estabilizantes adicionados, se concluye que la cáscara de arroz funciona como material de mejoramiento y optimiza las propiedades técnicas del bloque prensado. Su bajo precio, así como, el poco volumen necesario de material para realizar el mejoramiento, hace que el costo de optimizar la resistencia sea casi nulo.

En cuanto al cloruro de sodio, se debe descartar su utilización como material de mejoramiento para el bloque prensado, ya que ralentiza el tiempo de secado, siendo incluso superior al de los adobes tradicionales. En cuanto a la resistencia a la compresión, tampoco se podría considerar como un compuesto que mejore su propiedad mecánica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Asociación Española de Normalización y Certificación (2008). UNE 41410 – Bloque de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo. Madrid: AENOR.

ASTM International D-4318-10 e1 (2010) Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. DOI: 10.1520/D4318

ASTM International D-422-63 (2007) e2. Standard test method for particle-size analysis of soils. DOI: 10.1520/D0422-63R07E02

Barrios, G.; Alvarez, L.; Arcos, H.; Marchant, E.; Rosi, D. (1986). Comportamiento de los suelos para la confección de adobes. *Informes de la Construcción*, 37(377), 44-49.

Espíndola, C.; Valderrama, J. (2011). Huella del carbono. Parte 1: conceptos, métodos de estimación y complejidades metodológicas. *Información Tecnológica*, 163-176. Disponible en: [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-07642012000100017](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642012000100017)

Minke, G. (2001). Manual de construcción para viviendas antisísmicas de tierra. Kassel: Forschungslabor fur Experimentelles Bauen.

Norma Técnica de Edificación (1999) NTE E.080. Adobe. Lima: SENCICO

Norma Ecuatoriana de Construcción (2011). NEC – SE – VIVIENDA. Vivienda de hasta 2 pisos con luces de hasta 5 m. MIDUVI

Pesantes, M.; González, I. (2011). Arquitectura tradicional en Azuay y Cañar. Técnicas, creencias, prácticas y saberes. Cuenca: INPC Regional 6

Saroza, B.; Rodriguez, M.; Menendez, J.; Barroso, I. (2008). Estudio de la resistencia a compresión simple del adobe elaborado con suelos procedentes de Crescencio Vladés, Villa Clara, Cuba. *Informes de la Construcción*, 60(511), 41-47.

Wiedmann, T.; J. Minx. (2008). A definition of carbon footprint In: C. C. Pertsova, *Ecological Economics Research Trends*, n. 1, p. 1-11, Nova Science Publishers, Hauppauge NY, USA. Disponible en: [http://www.censa.org.uk/docs/ISA-UK\\_Report\\_07-01\\_carbon\\_footprint.pdf](http://www.censa.org.uk/docs/ISA-UK_Report_07-01_carbon_footprint.pdf)

## AUTORES

Marcelo Vázquez Solórzano, Arquitecto, Docente Titular del Área de Construcciones, Facultad de Arquitectura y Urbanismo-Universidad de Cuenca. 3er lugar premio ODEBRECHT edición 2014. Director de la Investigación “La Arquitectura y la construcción de Ecuador involucrada en el quehacer de la construcción sostenible” desarrollado en la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Cuenca.

Sebastián Guzmán Freire, Egresado de la Facultad de Arquitectura Universidad de Cuenca (2014), Auxiliar Investigación en proyecto de investigación “La Arquitectura y la construcción de Ecuador involucrada en el que hacer de la construcción sostenible” desarrollado en la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Cuenca.

Mateo Iñiguez Tinoco, Egresado de la Facultad de Arquitectura Universidad de Cuenca (2014).

## PROUESTA DE PANELES ESTRUCTURALES MODULARES DE BAHAREQUE PREFABRICADO DE MADERA

**Juan Pablo Astudillo Cordero<sup>1</sup>; Nina Vacacela Albuja<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca; A+P Proyectos. InLab\_Cuenca Laboratorio de Innovación de Cuenca. juan.astudillo@ucuenca.edu.ec; juanpa\_ascor@hotmail.com; Inlab.cue@hotmail.com

<sup>2</sup>Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca. ninav103@hotmail.com

**Palabras clave:** panel estructural de bahareque, construcción modular

### Resumen

La experimentación con tierra comienza con la puesta en valor de las técnicas constructivas tradicionales, el bahareque realizado en obra pero adaptado a estéticas contemporáneas o a nuevas formas de habitar, han sido ejemplos realizados en las áreas rurales de la provincia del Azuay. Uno de ellos merecedor del 2do premio en la Bienal Panamericana de Arquitectura de Quito, año 2012. Construcciones colectivas y sociales, en las que, tanto el arquitecto como los propietarios forman parte del proceso intelectual y material de la obra. Con éstas experiencias y una vez legitimado el sistema, se plantea una propuesta de investigación de pregrado que debía buscar: un sistema versátil, tradicionalmente conocido, que no requiera mano de obra especializada, que no contamine, antisísmico, de bajo costo y que genere empleo, permitiendo la construcción artesanal familiar o comunitaria. El bahareque lo cumple y la tierra es el material idóneo, pues, es factible utilizarla en todas las regiones del país. Se proyectó un panel (60 cm x 240 cm x 10 cm), modular y estructural, se estudiaron materiales, mediciones, pruebas y simulaciones virtuales, maquetas y prototipos a escala real que sometidos a carga, dieron como resultado una resistencia mayor a los 250 kg/panel. Se concluyó con un sistema constructivo completo, desde los cimientos hasta la cubierta, haciendo uso para el entrepiso y contrapiso de una loseta prefabricada de madera resultado de una investigación de post grado. Para comprobar su aplicación, docentes y estudiantes en conjunto con el Municipio de Saraguro-Loja, realizaron un taller de construcción y lectura de planos, enfocado al público obrero de la zona antes nombrada, quienes en un futuro posible, serán los usuarios del panel, retroalimentando la propuesta con sus saberes empíricos y construyendo al finalizar un prototipo de 9m<sup>2</sup>, que demostró la facilidad de armado, reducción de tiempos, resistencia y que la estandarización de un sistema tradicional es posible.

### 1 INTRODUCCIÓN

Las soluciones planteadas en el Ecuador y Latinoamérica para la vivienda social y económica han generado propuestas de baja calidad ambiental y estética, basando su economía en la reducción de espacios o en la producción en serie de modelos y técnicas, importando, para esto, materiales que lo permitan o la materia prima para elaborarlos, generando contaminación en sus procesos y un costo adicional en su transporte. Peor aún, dichas soluciones habitacionales no reconocen la diversidad cultural en los hábitos de uso del espacio o la realidad climática de cada región del país.

La legitimidad de la propuesta se fundamenta en la versatilidad del sistema, generada a partir del uso de un material como la tierra, abundante e históricamente responsable y resistente, que permita su uso en todas las regiones y climas del Ecuador, así como su adaptabilidad a varios sistemas de arrostramiento como la madera, el hormigón y el metal. Establece la modulación y estandarización en la construcción reduciendo la contaminación en todos sus procesos, tomando como punto de partida el rescate de los conocimientos arquitectónicos ancestrales del bahareque, transformados en una propuesta constructiva sencilla, con materiales al alcance de todos y que reduce el tiempo en la construcción y los costos; inserta en el sistema productivo nacional materiales renovables y reciclados y que pueden ser autofabricados o elaborados en pequeñas industrias.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo general

Ofrecer una alternativa de construcción sustentable, saludable para la sociedad y el medioambiente, de fácil armado, transporte y colocación, que permita la autoconstrucción, sea económica y autoportante y que tenga en cuenta parámetros térmicos y acústicos.

### 2.2 Objetivos específicos

- a) Mejorar la técnica del bahareque, sistematizando su construcción, optimizando su estructura, armado, aplicación, relleno y recubrimiento.
- b) Demostrar su sostenibilidad ambiental, económica y social en contraste al sistema constructivo tradicional de bloque y ladrillo.
- c) Elaborar un modelo flexible que pueda construirse en cualquier parte del Ecuador, en pequeñas fábricas y/o a pie de obra.
- d) Ofrecer diferentes posibilidades de panel con diversas opciones de uso, acabado y aplicación rural/urbana.

## 3 ALCANCE

El panel podrá ser aplicado en todo el territorio ecuatoriano por su versatilidad, ya que para la elaboración del mismo se utiliza la tierra propia del lugar con mejoras en sus proporciones y características, (ver dosificación del recubrimiento). Por sus propiedades estructurales: se pueden construir viviendas de uno a tres pisos y por su recubrimiento: en cualquier clima, pues “el barro posee la propiedad de regular la humedad ambiental y la temperatura interior; absorbiendo y expulsando la humedad más rápido y en mayor cantidad, que los demás materiales de construcción” (Minke, 2001, p. 36).

## 4 FUNDAMENTO TEÓRICO

El bahareque o quincha es un sistema constructivo tradicional de Sudamérica y Panamá, que consiste fundamentalmente en una estructura fija y estable de madera anclada al cimiento, cubierta con palos delgados, carrizo o caña y barro (figura 1). Frente a los demás sistemas constructivos en tierra, éste presenta las siguientes ventajas: menor peso, menor sección, mejor comportamiento ante sismos y la utilización de cualquier tipo de tierra, pues esta es usada solamente como relleno.



Figura 1 – Pared de bahareque (Crédito: Valeria Bustos)

En pocos sectores del Ecuador y en algunos países, se están buscando nuevas soluciones, como la quincha prefabricada y el bahareque encementado. La quincha prefabricada

consiste en paneles modulares de madera y carrizo (no portantes), que son colocados dentro de una estructura puntual de madera y recubiertos en obra con una capa de barro y mortero de cemento. El bahareque encementado es un muro de guadua y/o madera, recubierto con malla de gallinero y mortero de cemento.

Ninguno de los sistemas anteriores generan un sistema modular ni prefabricado; no incentivan la pequeña industria y utilizan cemento para su mejoramiento; pero sin duda son un aporte para la revitalización e innovación de los sistemas constructivos tradicionales.

## 5 PROBLEMÁTICA A ABORDAR

La construcción de vivienda con materiales que generan contaminación mediante las emisiones de CO<sub>2</sub>, generados por la sobreutilización de energía en los procesos desde su creación hasta su desmaterialización; la utilización de materiales importados en los cuales se incluye un gasto energético innecesario y un incremento en los costos. Cabe destacar que: "el sector de la edificación es el responsable de casi el 40% de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera debido a los elevados niveles de consumo energético del mismo<sup>1</sup>". Además, la mayoría de los recursos utilizados en la actualidad no son renovables, con sólo el 5% del flujo de material procedente de fuentes renovables, a excepción de la madera y los productos de fibras y plantas (Borsanii, 2011, p.15).

## 6 METODOLOGÍA Y HERRAMIENTAS

Se buscó un sistema versátil de construcción, tradicionalmente conocido, que no requiera mano de obra especializada, que no contamine, que se comporte bien ante sismos, que reduzca costos y genere empleo a otra escala y permita la construcción artesanal familiar o comunitaria a través de la minga. Mediante la investigación previa se confirmó que el bahareque cumplía con todo lo anterior; que la tierra era el material idóneo para esto y que su utilización es factible en todas las regiones del país.

Por lo tanto se genera un sistema constructivo alternativo, mediante la Indagación de materiales y proporciones y la elaboración de pruebas, mediciones y simulaciones virtuales con programas adecuados, lo cual lleva a la solución del proyecto.

## 7 RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este apartado, se exponen las etapas en la fabricación del panel, justificando técnicamente el uso de materiales, así como las soluciones constructivas, para ello se subdividen sus procesos en: estructura del panel, la aplicación de preservantes sobre ella, escogiendo el menos tóxico, el entramado interno y que sujetará en lo posterior al acabado, así como el aislante térmico y acústico que será sujeto a mediciones para determinar sus cualidades. Se detallará el acabado final, así como los detalles de armado del panel. Así al final se demostrará con las pruebas apropiadas la versatilidad y validez del sistema.

### 7.1 Estructura

Ecuador se encuentra en una zona de alta actividad sísmica, por lo que la estructura de madera representa una solución óptima y económica. Se escoge el pino radiata, pues proviene de bosques implantados que no generan problemas de deforestación

---

<sup>1</sup> Certificaciones energéticas y proyectos (<http://certificarq.es/?p=423>)

Tabla 1 – Ficha técnica de la madera de pino (PADT, 1984)

Nombre científico	<i>Pinus sylvestris</i>
Dureza	media
Secado	fácil y lento al aire libre, presentando deformaciones leves
Resistencia a la deformación	media
Trabajabilidad	fácil, presentas defectos muy leves en el cepillado y moldurado
Durabilidad	no es resistente al ataque de hongos e insectos
Usos	estructura de viviendas, muebles, envases, tableros, aglomerados y contrachapados
Densidad	0,4 g/cm <sup>3</sup>
Módulo de elasticidad de flexión	110,2 kgf/cm <sup>2</sup>
Módulo de ruptura de flexión	1780 kgf/cm <sup>2</sup>
Compresión paralela	299 kgf/cm <sup>2</sup>
Compresión perpendicular	74 kgf/cm <sup>2</sup>

Se utilizan dos tablones de madera de 10 cm x 240 cm, unidos entre sí mediante transversales cortafuegos, con uniones y destajes a caja y espiga, o pasadores de madera, evitando clavos o tornillos, facilitando así su armado por mano de obra no calificada (figura 2).



Figura 2 – Imagen de la estructura y detalle de unión con pasadores

## 7.2 Preservantes

Son esenciales, debido a las características del pino.

De los diversos métodos y sustancias para proteger la madera, se escogen los menos tóxicos. Por lo tanto se utiliza bórax<sup>2</sup> y ácido bórico mediante el método de inmersión<sup>3</sup> y por último se aplica una capa de aceite de linaza para proteger la madera de las inclemencias del tiempo (ver tabla 2 toxicidad de los preservantes). El tiempo de inmersión son 48 horas y por cada litro de agua se colocan 10 g de bórax y 10 g de ácido bórico (Salazar, Díaz, 2001, p.3).

<sup>2</sup>según EPA lo ha calificado como un pesticida seguro p. 255.  
[http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/gdwq3\\_es\\_12.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_12.pdf)

<sup>3</sup>el cual presenta menos riesgos industriales y produce menos contaminación, debido a que pueden reutilizarse los residuos líquidos (Berrocal; Muñoz; González, 2004, p.2)

Tabla 2 – Toxicidad de los preservantes

Nombre	Composición	Toxicidad	Contaminan agua y suelos	Carcinogénica
Sales CCA	dicromato de potasio	x	x	x
	sulfato de cobre	x	x	
	pentóxido de arsénico	x	x	x
Sales CCB	dicromato de potasio	x	x	x
	sulfato de cobre	x	x	
	boro	x		
Creosota	diferentes compuestos químicos	x	x	x
Preservante 1	bórax	x		
	ácido bórico	x		
	dicromato de sodio	x	x	x
Preservante 2	ácido bórico	x		
	sulfato de cobre	x	x	
	dicromato de sodio	x	x	x
Preservante 3	aceite de linaza	x		

### 7.3 Aislante y entrampado

El aislante, esencial para el confort acústico y térmico, será realizado con materiales naturales y/o reciclados que dependen de su accesibilidad, temporada y precio, como: el pucón (hoja que envuelve la mazorca de maíz), hojas de habas, hojas de arveja, viruta, residuos de tela, etc. comprimiéndolo con el material de entrampado adecuado para el lugar de construcción (figura 3).



Figura 3 – Imagen del aislante de viruta y pucón



Figura 4 – Imagen del entrampado de caña guadua o malla de gallinero

Para el entramado alternativas como la caña guadua (gramínea de gran altura) o el carrizo (gramínea que crece cerca del agua), colocando diagonales de madera para rigidizar su estructura (figura 3) o malla de gallinero, sin diagonales pues estructural (figura 4).

#### 7.4 Recubrimiento

Se eligió la tierra, gracias a sus propiedades y facilidad de obtención, ya que por ser un material de recubrimiento, no requiere características específicas y puede ser obtenida de cualquier lugar.

La dosificación del recubrimiento planteada es de cada 6 kg de tierra -75% arena y 25% arcilla (Abad; Aguirre; Pañega, 2011-2012)- se añaden, en volumen, 8% cabuya, 8% de estiércol de caballo y 4% de engrudo. La cantidad de agua depende de la humedad de los materiales, y se irá añadiendo hasta obtener una mezcla pastosa.

Se pueden colocar una o dos capas de revoque dependiendo del fisuramiento que se haya producido después del secado, capas de revoque (figura 5).



Figura 5 – Primera y segunda capa de revoque

#### 7.5 Propiedades del barro

- Regula la humedad ambiental; pues absorbe y expulsa la humedad más rápido y en mayor cantidad, que los demás materiales de construcción. Almacena calor; en zonas climáticas donde las diferencias de temperatura son amplias, el barro regula el clima interior.
- Ahorra energía y disminuye la contaminación ambiental; ya que el barro necesita el 1% de la energía requerida para la preparación, transporte y elaboración del hormigón armado o ladrillos cocidos.
- Es reutilizable; pues solo necesita ser triturado y humedecido con agua.
- Es un material apropiado para la autoconstrucción; pues puede ser preparado con herramientas sencillas, por personas no especializadas.
- Preserva la madera y otros materiales orgánicos en contacto directo con él, debido a su bajo equilibrio de humedad de 0.4-6% en peso y su alta capilaridad, por lo que insectos y hongos no pueden destruir el elemento, pues necesitan como mínimo el 14% y 20% de humedad para vivir (Minke, 2001, p.17).

Se comprueba este último punto mediante la elaboración de 3 bolas de barro de 10 cm de diámetro con viruta en la mitad (figura 6), luego se parten a los 15, 30 y 60 días (figura 7), y se observa que la viruta está totalmente seca y no presenta inicios de pudrición.



Figura 6 – Bola de tierra



Figura 7 – Tierra-viruta

Se realizan recubrimientos impermeables diferentes, aceite de linaza<sup>4</sup>, capa de revoque al fuego con aditivos, con suero y con sábila. El procedimiento consistió en la elaboración de esferas de barro con las sustancias antes detalladas y que por observación según el tiempo de inmersión en agua modificaron sus características y morfología, pudiéndose obtener el cuadro siguiente (figuras 8 y 9):

Tabla 3 – Aceite de linaza como impermeabilizante

Aditivos	Presenta burbujas	Se fisura	Se disgrega
Sin aditivo	al instante	al min	a los 5 min
Suero	al min	10 min	a los 15 min
Sábila	a los 5 min	10 min	a los 7 días
Aceite de linaza	no	20 días	no



Figura 8 – Muestras de tierra



Figura 9 – Tierra en inmersión

## 7.6 Comportamiento térmico y acústico

No todos los aislantes térmicos son buenos absorbentes acústicos, pues estos aislantes incorporan en su estructura mucho aire, por lo que tienen poca masa. Sin embargo, si el impermeabilizante tiene una estructura porosa como las fibras naturales (celda abierta), tiene buenas propiedades de absorción acústica y la capacidad de convertir en calor parte de la energía que incide sobre ellos (Cecor, 2011).

En el ECOTEC<sup>5</sup> se realizó una comparación entre el panel de bahareque de 10 cm de espesor que contempla 2,5 cm de tierra a cada lado, mejorado (impermeabilizado con fibras naturales), el ladrillo de 14 cm de espesor y el bloque de 15 cm de espesor y enlucido con mortero en dosificación 1-3 y de 1,5 cm de espesor (figuras 10-12), obteniendo mejores resultados térmicos el panel de bahareque (tabla 4).

<sup>4</sup>es utilizada en las construcciones en tierra, pues es resistente a las inclemencias del tiempo y a la abrasión (Minke, 2001, p.50)

<sup>5</sup> ECOTEC: programa utilizado para realizar análisis de radiación solar, porcentajes de sombra, diagramas de trayectorias solares interactivas y análisis de la iluminación natural y artificial y para diseñar elementos bioclimáticos pasivos.

El procedimiento para la elaboración de las pruebas térmicas se genera a partir de la introducción de los datos de las cualidades del muro, es decir, espesor, características y coeficientes de absorción de los materiales que incluye el software antes citado. Además se simulan las características ambientales y climáticas de la provincia austral de Loja-Ecuador, lugar de emplazamiento del prototipo para la medición real.

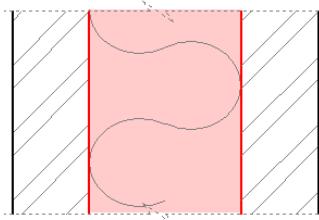


Figura 10 – Panel de bahareque

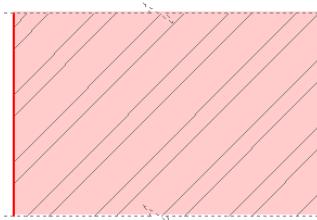


Figura 11 – Pared de ladrillo

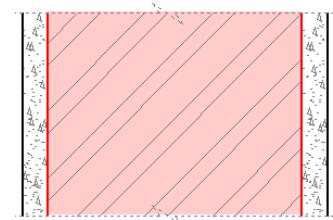


Figura 12 – Pared de bloque enlucido

Tabla 4 – Resultados térmicos

Panel/Pared	Bahareque	Ladrillo	Bloque
Valor U (W/m <sup>2</sup> .K)	0,91	3,14	4,68
Acceso (W/m <sup>2</sup> .K)	2,55	4,38	5,51
Absorción térmica (0-1)	0,495	0,495	0,545
Disminución térmica (0-1)	0,92	0,82	0,85
Aislante térmico (h)	4	4	5

La transmisión de ruido se comprobó empíricamente, a través de una prueba de impacto, resultando la tierra la que obtuvo el mejor comportamiento. Para la comparación se establece lo siguiente: el coeficiente de absorción de la madera es la mitad que la del hormigón y que la del ladrillo (tabla 5).

Tabla 5 – Coeficientes de absorción acústica  
Centro de Investigación y Transferencia en Acústica (CINTRA), Argentina.

Material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Madera	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Bloque enlucido		0,02	0,03	0,04	0,05	
Ladrillo	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07

Por lo tanto y luego de la comparación establecida en los cuadros anteriores, se determina que: el material con mejor comportamiento térmico y acústico es el panel prefabricado de bahareque, pues por similitud, la madera y la tierra transmiten teóricamente la misma intensidad de sonido. Determinándose por tanto que dicho panel estaría por sobre la construcción común en paredes de bloque y ladrillo.

#### 7.6.1 Comportamiento real: térmico, acústico y de humedad

Para realizar las pruebas térmicas, acústicas y de humedad, se realizaron ensayos durante una semana en tres módulos con materiales diferentes: paneles de bahareque (M1), ladrillo (M2) y bloque (M3) (figuras 13-15 y tabla 6).



Figura 13 – Módulo 1

Figura 14 – Módulo 2

Figura 15 – Módulo 3

Tabla 6 – Características de los módulos

Parámetros	Módulo 1 M1	Módulo 2 <sup>1</sup> M2	Módulo 3 <sup>1</sup> M3
área (m <sup>2</sup> )	13	15	13
distancia a la Panamericana Cuenca-Loja (m)	60	20	10
material de pared	paneles de madera, con aislante de fibras naturales y recubrimiento de barro	estructura de madera y relleno de ladrillo sólido	bloque enlucido y pintado
material de piso	losas prefabricadas con madera y MDF, recubiertas con una lámina de vinil	ladrillo	hormigón
cubierta	losas prefabricadas con madera y MDF, protegidas con planchas de zinc	vigas de madera, duelas y teja	losa de hormigón
distancia a M1 (m)		170	200
altura (metros sobre el nivel del mar)	2886	2876	2866

<sup>1</sup> Los módulos de bloque y ladrillo son módulos habitados

Para realizar las mediciones y establecer las comparaciones se utilizaron los instrumentos presentados en la tabla 7. Los ensayos térmicos, acústicos y de humedad relativa se realizan al interior y al exterior de cada módulo, tres veces al día (6:00h, 13:00h y 20:00h).

Tabla 7 – Equipos utilizados

Equipo	Descripción
Anemómetro	Aparato meteorológico que se usa para la predicción del clima y específicamente, para medir la velocidad del viento. Permite medir temperatura, humedad relativa, humedad específica, punto de rocío, punto de evaporación y presión barométrica
Pirómetro	Medidor de temperatura de una porción de superficie de un objeto a partir de la emisión de luz del tipo cuerpo negro que produce
Sonómetro	Aparato que mide el nivel de ruido que existe en un determinado lugar y en un momento dado. La unidad con la que trabaja el sonómetro es el decibelio

### 7.6.2 Pruebas térmicas

Considerando que la sensación de satisfacción térmica se alcanza entre los 21°C y 25°C, se observa, en los gráficos (figura 16), que ningún módulo llega a la temperatura de confort, sin embargo, el panel de barro (bahareque) obtiene mejores condiciones térmicas y un rango de

variación constante. De esta manera cuando los cambios de la temperatura exterior son grandes, su temperatura interior se encuentra sobre los valores mínimos y bajo los valores máximos.

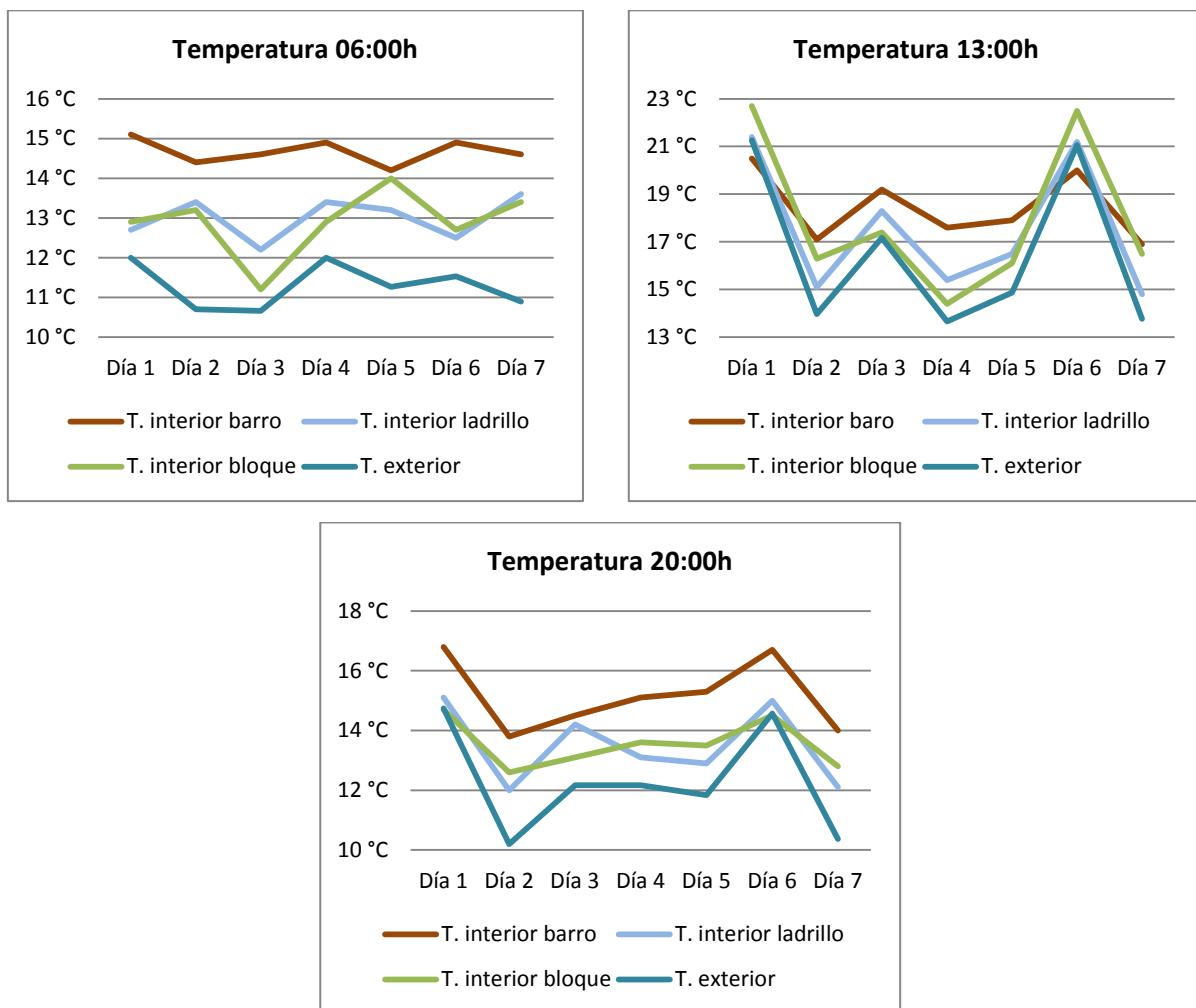


Figura 16 – Valores de la temperatura de los módulos obtenidos durante 7 días

La temperatura exterior se obtiene al sacar un promedio de los valores obtenidos en los tres módulos

### 7.6.3 Pruebas de humedad

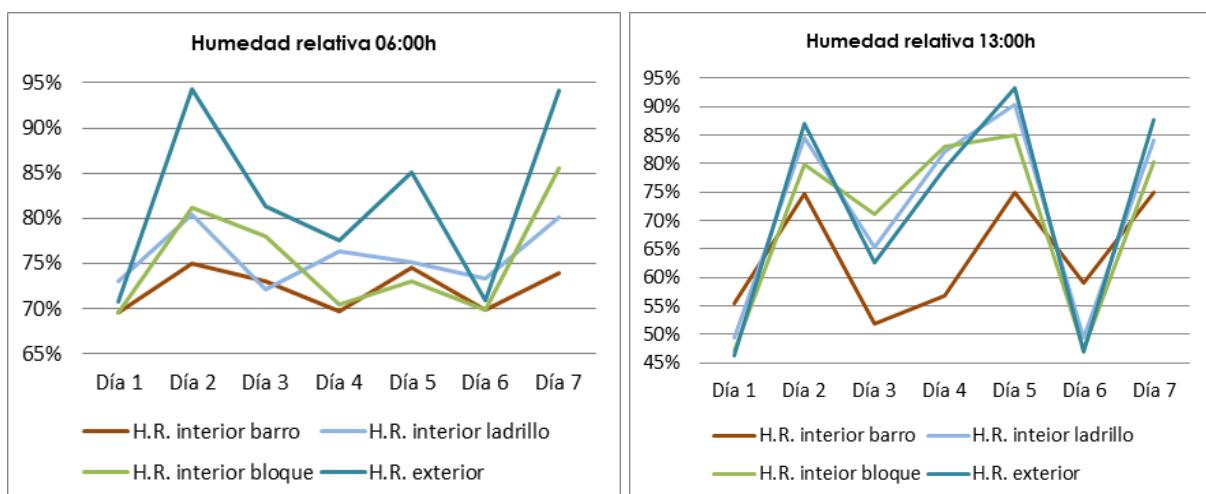


Figura 17a – Valores de la humedad de los módulos obtenidos durante 7 días

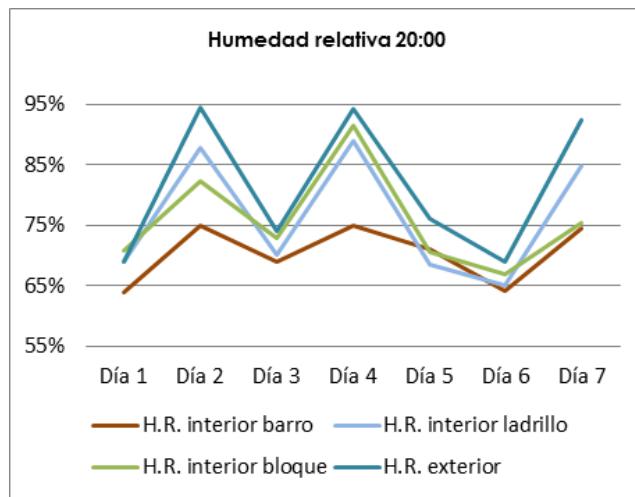


Figura 17b – Valores de la humedad de los módulos obtenidos durante 7 días

Considerando que los límites de confort de la humedad relativa admitidos por el cuerpo humano oscilan entre 20% y 75%, se observa, en los gráficos (figuras 17a e 17b), que los valores de humedad relativa son altos, sin embargo, solamente el panel de barro (bahareque) se encuentra dentro del rango de confort.

La humedad relativa exterior se obtiene al sacar un promedio de los valores obtenidos en los tres módulos

#### 7.6.4 Pruebas acústicas

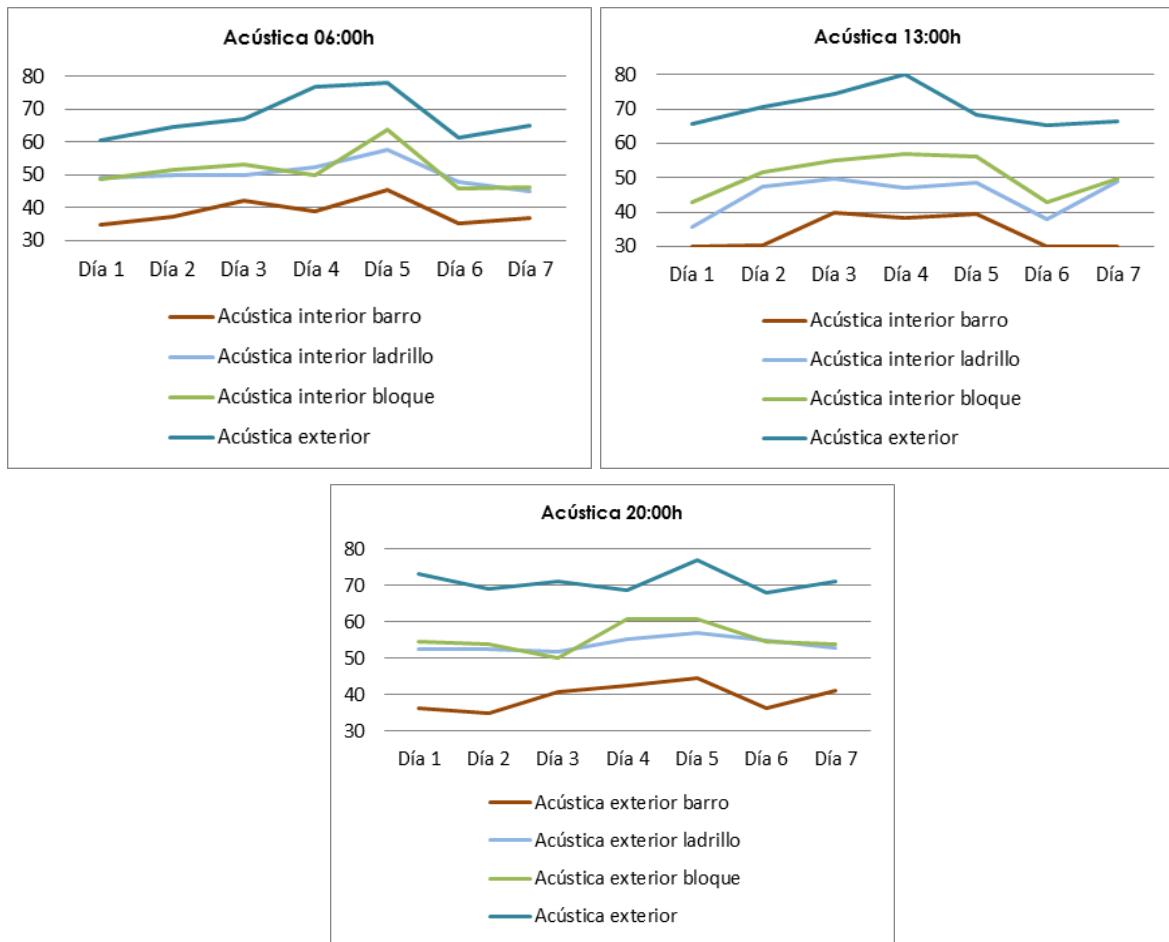


Figura 18 – Valores de los decibelios de los módulos obtenidos durante 7 días

La fuente de ruido que pasa cerca de los módulos de prueba, es la Panamericana Cuenca-Loja con un valor teórico de 80 decibelios. Los niveles de ruido establecidos para una zona residencial son de 65db en el día y 45db en la noche.

En este caso, no se puede una comparación directa entre los tres módulos ya que estos se encuentran a diferentes distancias de la vía principal. Sin embargo, en los gráficos (figura 18), se observa que los módulos de bloque y ladrillo tienen valores similares mientras que el panel de barro (bahareque) tiene mejores condiciones acústicas y se encuentra dentro del rango de confort.

Para calcular la acústica exterior de los tres módulos, se adoptó los datos obtenidos al exterior del módulo de bloque, pues este es el más cercano a la Panamericana (10m).

### 7.7 Detalles constructivos del panel definitivo

A continuación se presenta el dimensionamiento del panel, así como los detalles de armado, unión y composición de los materiales que lo forman (figura 19).

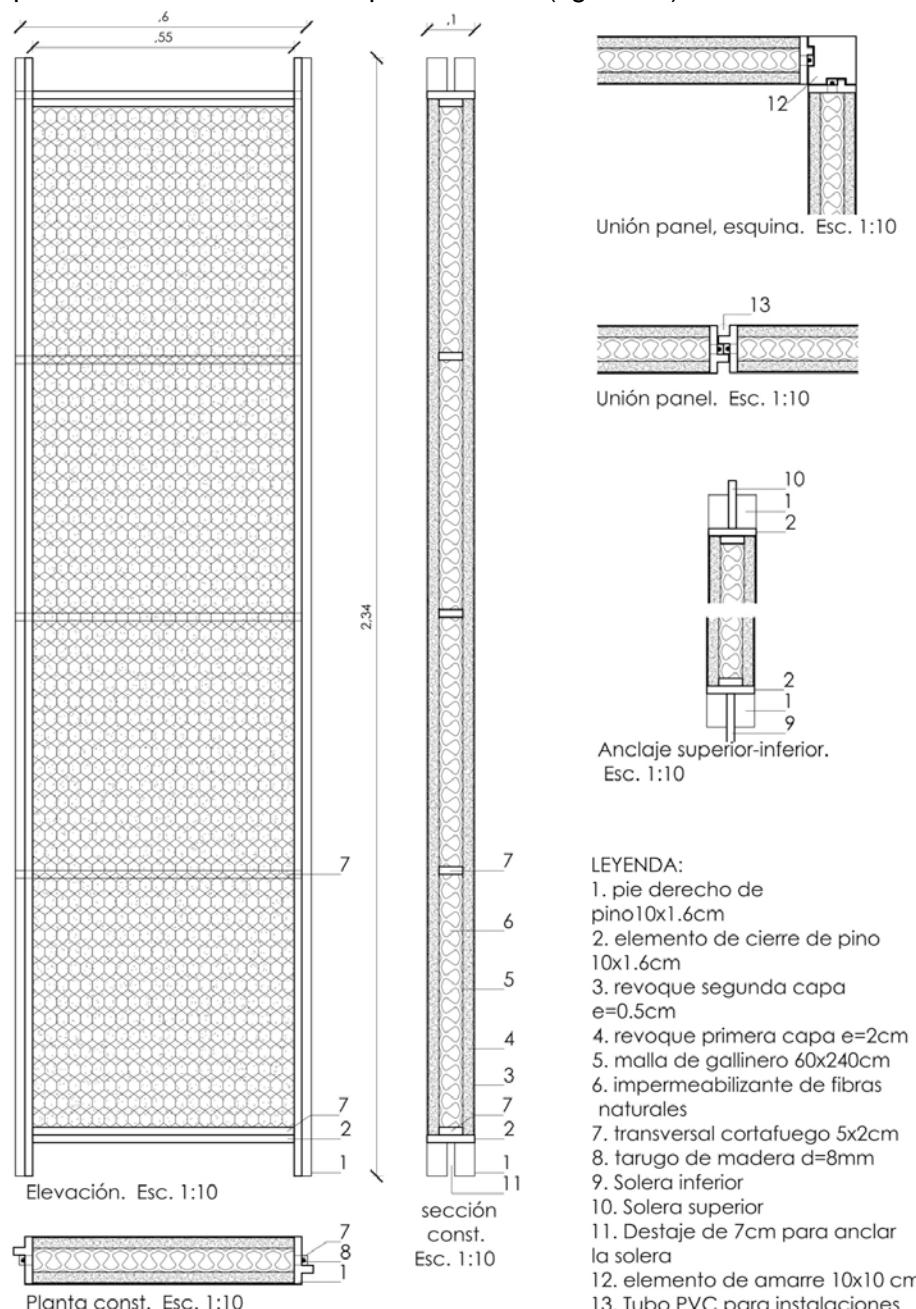


Figura 19 – Detalles del painel de bahareque

## 7.8 Anclajes

Los paneles se pueden adaptar a cualquier tipo de estructura de arriostramiento, con uniones: madera-madera, madera-metal y madera-hormigón (figura 20).

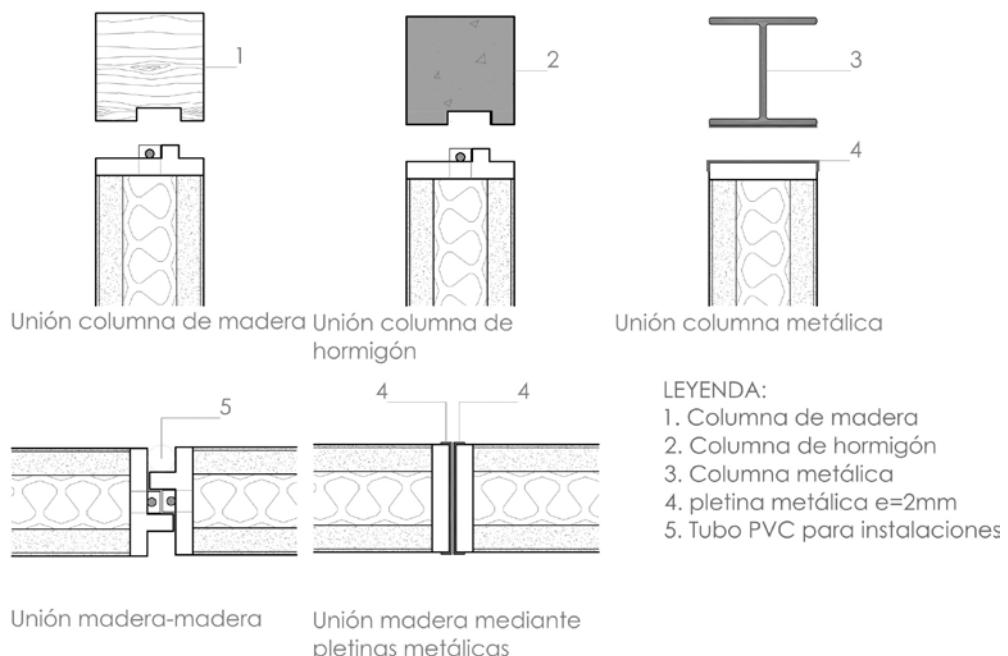


Figura 20 – Detalles de anclajes

## 7.9 Prueba de rotura

Para comprobar la resistencia estructural del panel, se aplicaron 250 kg de peso en 10 sacos de arena de 25 kg cada uno (figura 21). Está es una prueba empírica desarrollada en laboratorio, pues no se tenía forma alguna de probar un panel de las dimensiones reales del prototipo. El panel no presentó ningún cambio en su estructura ni en su recubrimiento (esta prueba se hizo con los tres tipos de entramados).



Figura 21 – Prueba de rotura con sacos de arena

## 7.10 Comparación de costos

Este proyecto es una alternativa económica por sus materiales, la facilidad de armado y puesta en obra va en concordancia con el planteamiento de que “las necesidades del hábitat en los países en vías de desarrollo solo se pueden encarar utilizando materiales de construcción locales y técnicas de autoconstrucción” (Minke, 2001, p.13).

Se puede afirmar que la utilización de materiales industrializados como el ladrillo, hormigón y acero, no solo que no ha podido solucionar los requerimientos del hábitat sino que, además, han contribuido a la contaminación del planeta y al consiguiente deterioro del ecosistema.

En la tabla 8 se demuestra la viabilidad del proyecto mediante su comparación con los sistemas tradicionales de bahareque, bloque y ladrillo, se detallan en resumen cada uno de los análisis realizados en los cuadros anteriores, introduciendo además la variable del costo por  $m^2$  determinada de un presupuesto referencial generado en el presente estudio.

Tabla 8 – Comparación de los diferentes sistemas constructivos

Sistema constructivo		Bahareque	Panel mejorado	Ladrillo	Bloque
Referencia					
Propiedades	Térmicas	bueno	bueno	media	mala
	Acústicas	bueno	bueno	media	mala
	Ignífugas	mala	media	bueno	bueno
	Higroscópicas	bueno	bueno	mala	mala
	Impermeabilidad	mala	media	media	media
Consumo energético	mínimo	mínimo	alto	alto	alto
Generación de escombros	cero	mínimo	alto	alto	alto
Reciclable	si	si	no	no	no
Costo/ $m^2$		46,48	46,98	48,22	

En el cuadro se puede ver que el precio del panel mejorado es más caro, sin embargo, este ya contiene la estructura, mientras el bloque y ladrillo son solo recubrimiento.

El panel propuesto, no es una solución a la crisis ecológica, pero es un recurso para convivir en el futuro. “Tenemos que darnos cuenta, que la crisis de la agresión al medio ambiente, no es una causa. La causa es el modelo de civilización que hemos montado. Y lo que tenemos que revisar es nuestra forma de vivir”<sup>6</sup>.

## 8 CONSIDERACIONES FINALES

Entre los aportes que el sistema puede generar están:

- el cambio del sistema constructivo, de estructura puntual a estructura autoportante modular
- las uniones del panel (entre paneles, a la estructura, al cimiento, al entepiso y a la cubierta, los pasadores)
- el aislamiento térmico y acústico dentro de los paneles de bahareque con materiales de temporada como el pucón, los deshechos de las habas, arveja, porotos, etc.
- y las proporciones de la mezcla de barro que tomando como base otros autores fueron modificadas en las pruebas.

Por tanto, se creó un panel autoportante, que evita la construcción de una estructura independiente<sup>7</sup>, modular y prefabricado reduciendo costos y tiempos de construcción. Puede ser elaborado a pie de obra o en pequeñas empresas, lo que resulta socialmente sustentable, además rescata las técnicas constructivas tradicionales y utiliza los materiales del lugar, reciclados, reciclables, reutilizables y biodegradables, sin generar contaminación. Complementa su construcción con un núcleo de fibras naturales que dan al panel características térmicas y acústicas únicas.

<sup>6</sup> José Mujica, Presidente de Uruguay, [https://www.youtube.com/watch?v=Pa9Iz7SV\\_7Q](https://www.youtube.com/watch?v=Pa9Iz7SV_7Q)

<sup>7</sup> la cual representa “un gasto energético del 44,58% en viviendas unifamiliares” (Cepeda; Mardaras, 2004)

Contribuye al cuidado del medioambiente ya que reduce en un 80% la contaminación por emisiones de CO<sub>2</sub> y brinda nuevas oportunidades para la obtención de vivienda digna a las personas de bajos recursos.

De acuerdo con la bibliografía estudiada no existe un sistema completo con las características antes descritas y que además sea socialmente incluyente. La creatividad e innovación del proyecto es la inclusión de varios recursos naturales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abad, Mateo; Aguirre, José; Pañega, Freddy (2011-2012). Diseño de paneles prefabricados en tierra. Universidad de Cuenca. Facultad de Arquitectura y Urbanismo.
- Berrocal, Alexander; Muñoz, Freddy; Gonzalez, Guillermo (2004). Ensayo de penetrabilidad de dos preservantes a base de boro en madera de melina (Gmelinaarborea) crecida en Costa Rica. Costa Rica: Kurú: Revista Florestal
- Borsanii, María Silvia (2011). Materiales ecológicos: estrategias, alcance y aplicación de los materiales ecológicos como generadores de hábitats urbanos sostenibles. Universitat Politècnica de Catalunya.  
<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/13759/1/Borsani,%20Mar%C3%ADa%20Silvia.pdf>.  
Acceso: 7 agosto 2014
- Centro de Estudio y Control del Ruido (2011). Materiales absorbentes acústicos: aislantes que no aportan aislamiento acústico. Valladolid: CECOR. <http://www.cecorsl.com/materiales-absorventes-acusticos-aislantes-que-no-aportan-aislamiento-acustico>
- Cepeda, Mikel; Mardaras, Iker (2004). Cuantificación energética de la construcción de edificios y el proceso de urbanización. Revista ConArquitectura, n. 12, p.65. Madrid: conarquitectura ediciones.
- Minke, Gernot (2001). Manual de construcción en tierra. Montevideo: Nordan-Comunidad
- Proyectos Andinos de Desarrollo Tecnológico – PADT (1984). Manual de diseño para maderas del grupo andino. Perú: Junta del acuerdo de Cartagena.
- Salazar, Jaime; Díaz, Gustavo (2001). Inmunización de la guadua. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia

## AUTORES

Juan Pablo Astudillo Cordero, magister en proyectos arquitectónicos; arquitecto; especialidad en diseño y planificación urbana; administrador y director del Proyecto Cuenca Ciudad Universitaria; arquitecto planificador para la Universidad de Cuenca; docente de la Facultad de Artes; docente de la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Cuenca; Investigador de PVS\_Proyecto de Vivienda Social / Universidad de Cuenca; director de In\_Lab Cuenca Laboratorio de Innovación de la Universidad de Cuenca; segundo lugar en la Bienal Panamericana de Arquitectura de Quito 2012/Quinta López Cordero; segundo lugar en la Bienal Panamericana de Arquitectura de Quito 2012/ Aulario Universidad de Cuenca; premio Ornato Cañar 2012/ Quinta López Cordero; plataforma arquitectura; Quinta López Cordero, Aulario Universidad de Cuenca, Readecuación del Teatro Carlos Cueva Tamariz; Revista Trama Quinta López Cordero. Currículum completo en <http://portafolio.ucuenca.edu.ec/webPortafolio/faces/frmPerfil.xhtml>

Nina Pani Vacacela Albuja, egresada de la Carrera Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca; Participación y Sustentación en la Exposición de los mejores trabajos estudiantiles, en la “Casa Abierta Arquitectura” (Mayo 2013); participación “Paneles prefabricados de bahareque y aplicación a una vivienda” en el proyecto de investigación Allpacamp de la Universidad de Cuenca; participación “Paneles Prefabricados de bahareque y aplicación a una vivienda” en el concurso del Premio Odebrecht para el Desarrollo Sostenible; Ayudante para la rehabilitación de inmuebles patrimoniales de la comunidad de Jima con el Ministerio Coordinador de Patrimonio (Junio 2012 – Agosto 2012); ponente en el taller “Arquitectura Ancestral” dictado en Saraguro (Agosto 2015- Septiembre 2015).

## CARACTERIZACIÓN CONSTRUCTIVA DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES EN EL BAHAREQUE: FIBRAS, AMARRES Y ATADURAS COMO REPRESENTACIÓN CULTURAL DEL AZUAY

Freddy Espinoza Figueroa<sup>1</sup>; Álvaro Maldonado Valverde<sup>2</sup>; Paulina Mejía Coronel<sup>3</sup>

Ante Consultores, Cuenca, Ecuador,

<sup>1</sup>freddyespinozaf@gmail.com; <sup>2</sup>garq@live.com; <sup>3</sup>mepauli1@hotmail.com

**Palabras clave:** Caracterización constructiva, uniones y amarres, bahareque, arquitectura tradicional

### Resumen

Históricamente la utilización de fibras, ya sean animales o vegetales para la construcción popular ha formado parte de la caracterización constructiva de diversos asentamientos humanos. El reconocimiento de su valor estructural, resistencia y duración, así como las facilidades para su aprovisionamiento permitió su amplia utilización; conforme aparecieron nuevos materiales constructivos, en conjunción con la aparición del fenómeno migratorio, campo-ciudad, las técnicas, los materiales y la mano de obra calificada, se pierden paulatinamente, al igual que la transmisión de saberes, el conocimiento de la arquitectura tradicional e incluso las especies vegetales propias del sitio. El objetivo de estudio es conocer los tipos amarres o ataduras típicas que se utilizan entre los elementos fundamentales del entramado del bahareque como pies derechos, diagonales, soleras y vigas; definiendo su caracterización, determinación territorial de utilización, uso formal y estructural. La metodología utilizada es de tipo transversal orientado al análisis y observación in situ mediante fotografías, mapas y tablas elaboradas por el equipo. Los resultados demuestran que el amarre más utilizado corresponde al tipo redondo seguido por el oblicuo, siendo los más sencillos de realizar, mientras que el amarre diagonal y el cuadrado se emplean escasamente, posiblemente por el tiempo que toma realizarlos y la elasticidad de la fibra. Se concluye que existe una falencia en el inventario de la Dirección de Áreas Históricas y Patrimoniales, debido a que las edificaciones reconocidas en bahareque superan a las documentadas, adicionalmente persiste la falta de injerencia en planes y proyectos que se dirijan a la conservación de tan valiosa técnica.

### 1. INTRODUCCIÓN

En la ciudad de Cuenca, existen varios tipos de usos del sistema constructivo de bahareque, el mismo se aprecia en culatas, en paredes divisorias internas, en paredes de servidumbre, en espacios de entrecubiertas, bases de cubiertas, claraboyas; cabe mencionar que a simple apreciación se puede evidenciar en algunos casos de edificaciones patrimoniales la utilización de adobe en la primera planta y bahareque en la segunda planta, también adobe en primera y segunda planta en conjunto con el uso de bahareque en culatas y enhagcleados. Cabe señalar que los bienes patrimoniales del Centro Histórico de Cuenca que poseen bahareque están en condición de fragilidad, alterados o en vías de desaparición, estos demuestran intervenciones sobre elementos de bahareque, con actividades de eliminación, alteración o aplicación de materiales incompatibles con la técnica, dichas acciones son motivo de análisis, crítica y reflexión.

El bahareque es un sistema constructivo existente previo a la colonización española, es importante hablar de su uso en la cultura cañari. En sus distintas fases culturales tales como la Tacalshapa y Cashaloma (Quille, 2010, p.34). Es factible reflexionar acerca de este sistema constructivo, que tiene una raíz tecnológica muy cercana a la zona de Azuay y Cañar. Es importante la influencia de los cambios socio – culturales en la ciudad, que afectan a la técnica, y están relacionados a fenómenos de la modernidad, globalización y comportamiento del mercado. En consecuencia estos fenómenos han contribuido para estudiar la viabilidad de los sistemas y técnicas constructivas de otras latitudes del mundo.

El estudio se enmarca en la ciudad de Cuenca, enfocándose en varias muestras, que la misma tiene pues la ciudad al ser un elemento vivo, se modela y transforma de acuerdo a

cambios en factores socioculturales, medioambientales y económicos. El bahareque no está exento de estos cambios puesto que si cambian las personas, por lógica cambia su entorno. Así nace la necesidad de buscar estrategias para su conservación como un legado para nuevas generaciones.

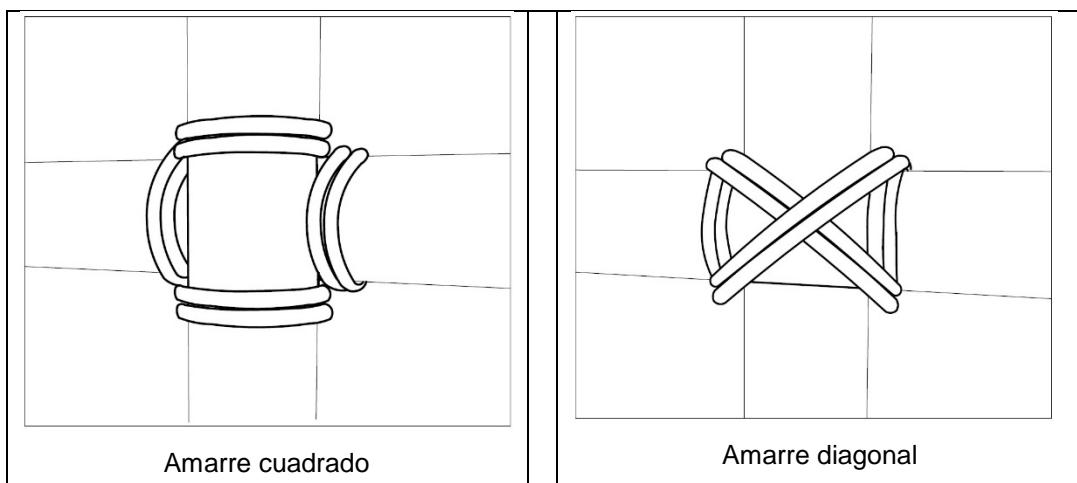
Es importante resaltar que existen aspectos inmateriales presentes en la transmisión cultural del bahareque, factores ligados a la continuidad de la técnica que refuerzan la identidad de nuestro pueblo y que se dan en la transferencia generacional; si estos no son valorados de manera acertada, pueden afectar a la cultura constructiva y por ende a la perdida de la técnica. Dicho lo anterior cabe mencionar que se han realizado varios estudios sobre el bahareque, más la incipiente preocupación sobre este sistema constructivo, son las fibras para amarres del mismo que en nuestro medio es amplia y facilita la construcción y posee varias características, entre las más comunes existe la cabuya, el sisal, mora andina, cuero animal, arpillera y en la actualidad caucho, alambre galvanizado y plástico. Cabe indicar que Pinos y Baculima (2014, p.40), destacan cuatro tipos de amarre, redondo, diagonal, redondo y oblicuo.

## 2. METODOLOGÍA

El estudio es de tipo transversal, se ha orientado a realizar un análisis en el Centro Histórico de la ciudad de Cuenca, en base al inventario de áreas patrimoniales y valoración realizado por la Dirección de Áreas Históricas y Patrimoniales (DAHP) del Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) Municipal de Cuenca. La muestra de estudio está enfocada en el Área de Primer Orden (1) y el Área Especial (2) solamente de la calle Rafael María Arízaga.

Cabe indicar que este estudio parte de la identificación de edificaciones de bahareque en el Centro Histórico de Cuenca por parte de la DAHP, 44 en total, sin embargo por razones de identificación, intervenciones o porque el propietario no brindaba información ni acceso a los bienes inmuebles, se logró identificar 23 bienes de bahareque según la información recabada en la DAHP. Adicionalmente se identificaron 26 bienes inmuebles de bahareque en el área de estudio antes mencionada, (1, 2), (Figura 2) demostrando que existen falencias en la información de la DAHP. Es necesario precisar que se tomó información del Censo de Población y Vivienda (2010) realizado por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos para efectuar una relación entre el cantón Cuenca y el área de estudio, para luego tener un resultado solamente del área de estudio.

Así también, se consideró la tesis de Pinos y Baculima (2014) titulada Recuperación del sistema constructivo en la técnica del bahareque en la contemporaneidad, el mismo describe en un apartado las fibras utilizadas para la realización del bahareque, así como el tipo de amarre, que viene a ser el interés principal de este estudio (Figura 1).



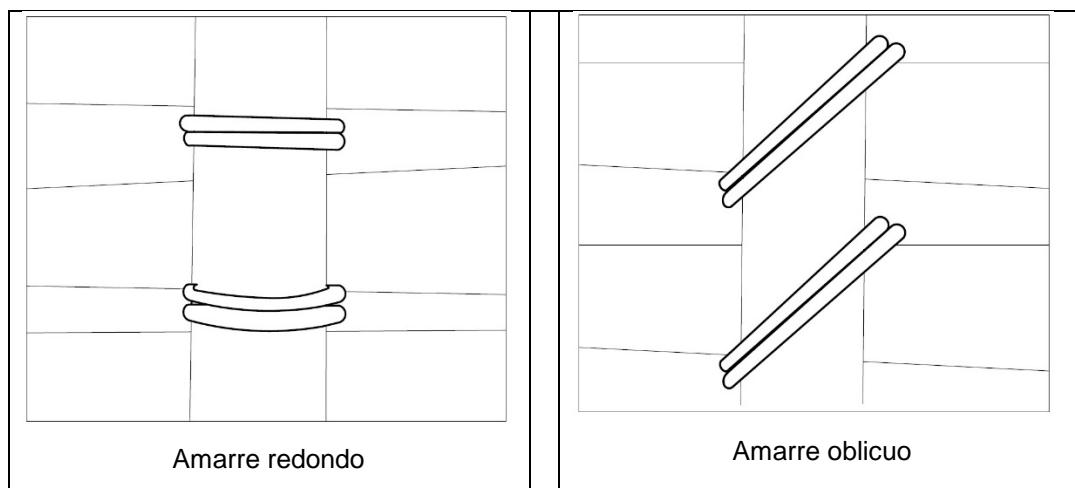


Figura1. Tipos de amarres (adaptado de Pinos y Baculima, 2014)

A partir de la información mencionada se realizaron recorridos y observación de campo, logrando así la identificación de bienes inmuebles de bahareque, mediante la observación de culatas, y entrecubiertas, comprobando la información de la DAHP e identificando otras edificaciones con el sistema constructivo mencionado y por último visualizando el tipo de amarres mediante fotografía, para posteriormente analizarlo entre los autores en base al estudio mencionado y experiencia del equipo de trabajo.

Tabla.1 Equipos, herramientas y software implementados en la investigación.

Equipos	Herramientas	Software	Características	Descripción
Cámara réflex Canon Rebel T5.		Lente 70 – 300mm		Registro fotográfico de los detalles de amarres del bahareque
Cámara réflex Nikon D3100.		Lente 18-55mm		Registro fotográfico de las edificaciones
Impresora Konika Minolta		Impresora A3 Laser		Impresión de mapas
Binoculares Canon		Binoculares		Observación de detalles de amarres
Mapas impresos A3 del Centro histórico de Cuenca		Áreas del Centro Histórico, catastral, predial		Constatar y buscar información predial, catastral. Trazo de recorridos
Material de registro		Esferos, lápices, marcadores, etc.		Escritura, señalización, marcas, etc.
Microsoft Office		Word, Excel		Documento
Redatam		Ecuador en Cifras		Información del censo de población y vivienda
Arc GIS		Layers		Mapas
Photoshop		Tipos de amarre		Gráficos

Los recorridos para la obtención de fotografías se realizaron entre tres personas, una a cada lado de la calle (aceras) observando culatas y entrecubiertas con binoculares y el zoom de las cámaras y fotografiando detalles, la tercera persona registra la información predial y hace una aproximación al tipo de amarre. Es necesario mencionar que se tomó como punto de referencia y encuentro la plaza de Santo Domingo, teniendo en consideración el área de primer orden del Centro Histórico y posteriormente el área especial de la calle Rafael María Arízaga; en primera instancia el recorrido se extendió hacia el oeste de la mencionada plaza, cubriendo las calles Tarqui, General Torres, Coronel Talbot, etc. Luego se cubrió el

norte de la plaza en cuestión, recorriendo las calles Gran Colombia, Gaspar Sangurima, Mariscal José Lamar, Antonio Vega Muñoz, etc. Posteriormente se recorrió el lado este de la plaza considerando las calles Padre Aguirre, Benigno Malo, Luis Cordero, Hermano Miguel, etc. Luego se cubrió el lado oeste de la plaza, Simón Bolívar, Mariscal Sucre, Juan Jaramillo, Calle Larga, etc. Finalmente se realizó el recorrido de la calle Rafael María Arizaga.

Existieron ciertos puntos de altura y acceso interior tal es el caso de parqueaderos, hoteles, edificaciones como la Alcaldía, la Catedral de la Inmaculada Concepción, la Iglesia de Todos los Santos, viviendas, y otros.

### 3. RESULTADOS

La investigación se aplica sobre las 9925 edificaciones que existen actualmente en el Centro Histórico de Cuenca (Ilustre Municipalidad de Cuenca, 2011, p.136), sobre las cuales se conoce que 44 de ellas son de bahareque, según la Dirección de Áreas Históricas y Patrimoniales. Se pudo reconocer 26 inmuebles adicionales que también cuentan con dicho sistema constructivo, por otra parte no se pudo confirmar el sistema constructivo de algunos de las edificaciones reconocidas oficialmente en el inventario debido a que poseen revestimientos o modificaciones que impiden observar.

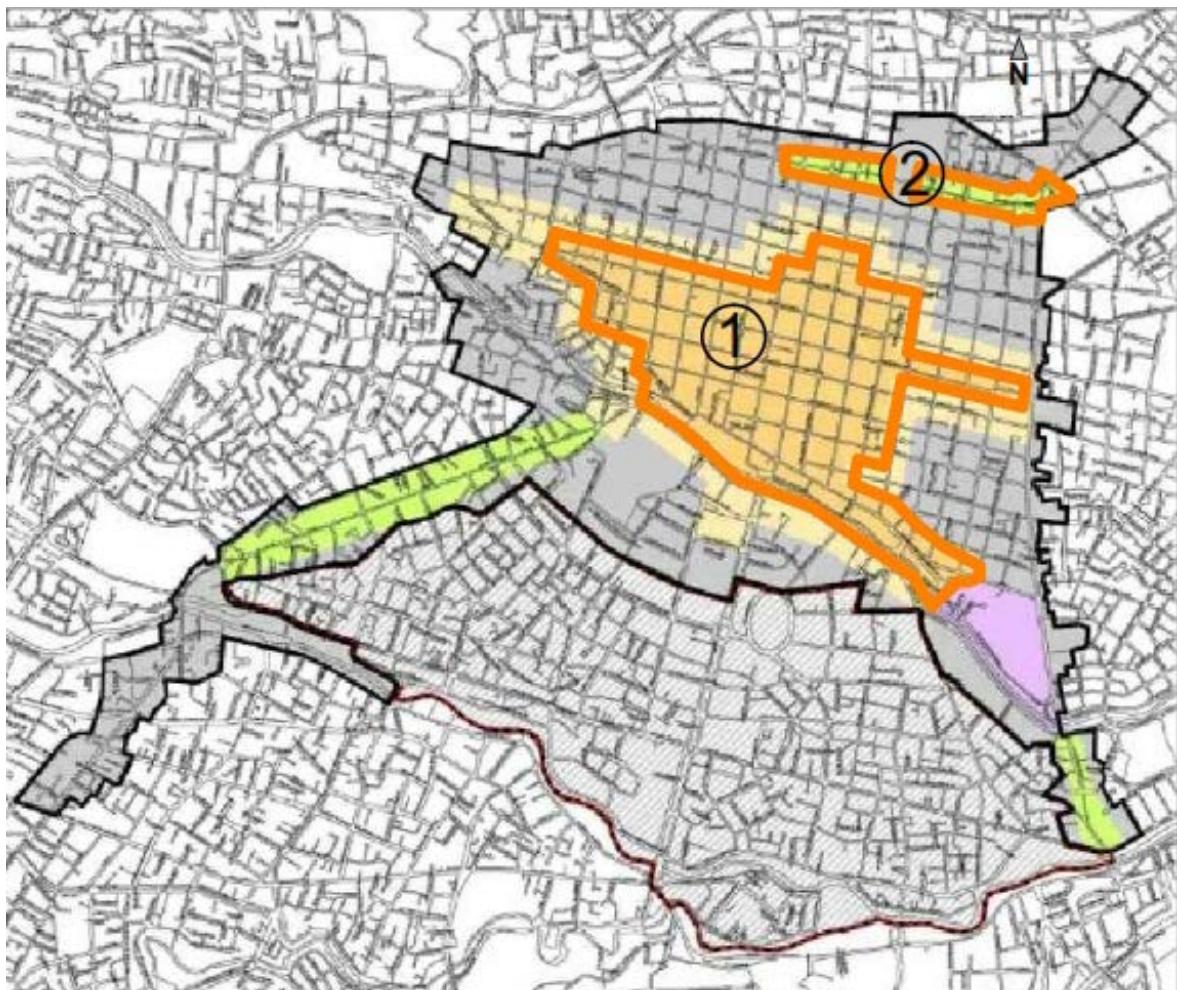


Figura 2. Área de estudio (adaptado de DAHP, 2010)

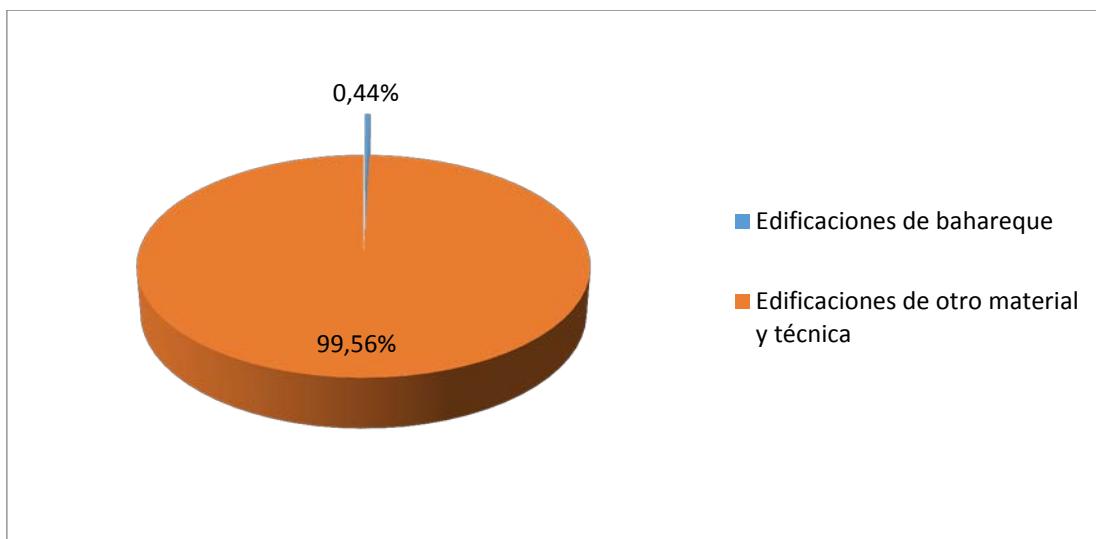


Figura 3. Porcentaje de edificaciones de bahareque en el Centro Histórico de Cuenca.

Tabla 2. Tipo de amarres en carrizos identificados de edificaciones en bahareque en el área de primer orden el Centro Histórico de Cuenca

	Número de edificaciones	Número de edificaciones de bahareque	Número de edificaciones de otro material y técnica
Cantón Cuenca	86317	189	86128
Centro Histórico	9925	44	9881

Edificaciones de bahareque en el área de primer orden del Centro Histórico de Cuenca (DAHP, 2010).

Edificaciones identificadas de bahareque en área de primer orden del Centro Histórico de Cuenca



Figura 4. Comparativa de edificaciones de bahareque dentro del área de estudio