

Caracterización experimental de las propiedades mecánicas de la mampostería de adobe del sur de México

Arroyo Matus Roberto¹, Sánchez Tizapa Sulpicio¹, Catalán Quiroz Policarpo¹

Fecha de recepción: 21 de junio de 2013 – Fecha de aprobación: 05 de noviembre de 2013

RESUMEN

En este artículo se presenta la caracterización de las propiedades mecánicas de los adobes de viviendas representativas de la región sur de México. Se muestran además, las características arquitectónicas de este tipo de vivienda, sus tipos de daños más comunes y los resultados de pruebas del comportamiento mecánico en piezas, pilas y muretes de adobe. Se presentan los resultados de la variación de la resistencia del adobe bajo diferentes contenidos de humedad y los de pruebas de carga cíclica reversible en dos muros a escala real. Las piezas fueron tomadas de muestras representativas de la vivienda guerrerense de adobe. Las débiles características mecánicas de este material, así como el intemperismo al que las viviendas se han sometido durante su vida útil, revelan su alta vulnerabilidad ante la ocurrencia de eventos sísmicos y la urgente necesidad de implementar técnicas simples, económicas y efectivas para su refuerzo.

Palabras Clave: Vivienda, adobe, resistencia a la compresión, terremotos, vulnerabilidad.

Characterization of the mechanical properties of southern Mexico's adobe masonry

ABSTRACT

In this paper, a characterization of the mechanical properties of southern Mexico's adobe masonry is presented. General architectonic characteristics and most common damage types for adobe dwellings in this region are presented. The results of experimental tests conducted to determine the mechanical behavior of prisms, piles and walls made of adobe are also shown. Furthermore, a series of experimental tests designed to define the adobe compression strength's variation under different humidity contents are also described. The weak mechanical characteristics found on experimental tests, in addition to the high weathering process of the existing adobe structures, shown the need to increase their poor structural performance in order to satisfactorily bear, in the future, medium and strong earthquakes. Thus, retrofitting of adobe dwellings, taking into account the application of safer and cheaper techniques, is extremely urgent and necessary.

Keywords: Dwelling, adobe, compressive strength, earthquakes, vulnerability.

¹ Unidad Académica de Ingeniería, Universidad Autónoma de Guerrero, México. Correo electrónico: arroyomatus@hotmail.com

Nota: El período de discusión está abierto hasta el 1° de julio de 2014. Este artículo de investigación es parte de Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 17, No. 3, 2013, ISSN 1665-529-X.

INTRODUCCIÓN

El presente estudio tiene como objetivo primordial presentar los resultados de las características mecánicas del adobe empleado en las viviendas de adobe del sur de México. De acuerdo a estudios previos (Hernández *et al.*, 1979), las viviendas de adobe típicas de los estados de Guerrero, Oaxaca y Chiapas, guardan similitudes tanto materiales y arquitectónicas, como en el nivel de riesgo sísmico al que están expuestas, por lo que se tomó como vivienda de adobe representativa del Sur de México a la del estado de Guerrero. Los experimentos, desarrollados en el Laboratorio Regional de Estructuras y Mecánica de Materiales de la Universidad Autónoma de Guerrero (LREMM-UAGro), consistieron en la aplicación de cargas monotónicas de compresión y tensión por flexión sobre piezas, pilas y muretes de adobe recolectados en las siete regiones de este estado. También se aplicaron cargas cíclicas reversibles controladas en desplazamiento sobre muros de adobe para obtener ciclos histeréticos y observar la degradación de la rigidez, así como su potencial de disipación de energía. Dichos estudios serán la base para proponer las estrategias de rehabilitación y refuerzo más idóneas que permitan disminuir la vulnerabilidad de la vivienda de adobe en el sur de México. El estado de Guerrero, dividido en siete regiones económicas, se encuentra ubicado en la zona de más alta peligrosidad sísmica del país. Esta sismicidad se asocia directamente a la brecha sísmica de Guerrero, la cual se extiende a lo largo de una parte de su costa (Figura 1).

Según García y Suárez (1996), durante los eventos sísmicos acontecidos en este estado en 1820, 1874, 1894, 1899, 1902, 1907 y 1957, se presentaron daños estructurales severos principalmente en viviendas de adobe. Además, varios de los epicentros de los sismos más recientes han ocurrido cerca de esta brecha sísmica.

El estado de Guerrero se ubica en los últimos lugares de desarrollo social y económico a escala nacional y regional. Según el Consejo Nacional de Población (Anzaldo y Prado, 2005), el estado se ubicaba en el primer lugar en marginación. Además, aun cuando en el país se construye cada vez más con mampostería industrializada, de acuerdo a estimaciones del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI 2010), la tercera parte de la población de este estado habita en vivienda de adobe elaborado artesanalmente, especialmente en las regiones rurales. La Tabla 1 presenta, según datos del XII y XIII censos de población y vivienda (INEGI 2000 y 2010), los porcentajes de viviendas de adobe para cada una de las siete regiones económicas del estado de Guerrero. En la mayoría de estas regiones, al menos el 30% de la población habita en viviendas de adobe. Por estas razones, este material tiene una importancia muy relevante y contrariamente a lo que podría pensarse, este tipo de vivienda continúa vigente. Las condiciones de rezago y pobreza de la población, conjugada con las características de las viviendas y del suelo en el que se desplantan, posicionan a Guerrero como un estado con un elevado peligro y vulnerabilidad sísmica.

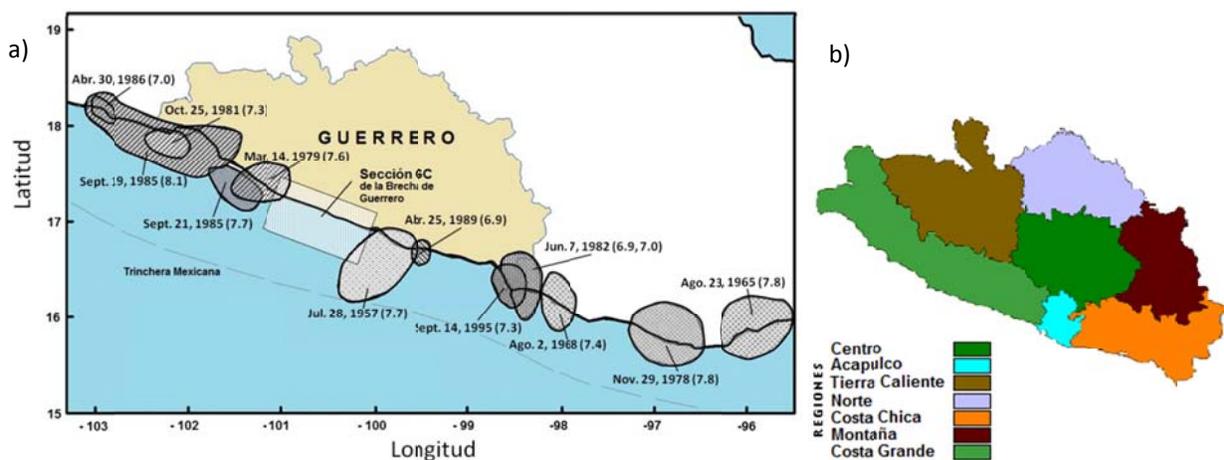


Figura 1. a) Estado de Guerrero, México y sismos recientes (Kostoglodov *et al.*, 1996)
 b) División económica regional

Tabla 1. Porcentaje de viviendas de adobe y su ocupación en Guerrero (INEGI 2000 y 2010).

Región	Viviendas de adobe (%)		Población en vivienda de adobe (%)	
	Censo 2000	Censo 2010	Censo 2000	Censo 2010
Norte	32.8	30.6	35.2	34.7
Acapulco	6.1	5.9	12.4	10.6
Centro	37.2	36.5	42.1	39.4
Tierra	43.9	41.8	46.7	44.9
Costa Chica	54.0	53.8	58.3	49.4
Costa Grande	17.7	19.9	26.7	22.8
Montaña	59.0	61.2	62.5	66.4

El adobe artesanal es ampliamente utilizado por la abundancia de sus componentes, su bajo costo, y la excelente protección que brinda ante condiciones climáticas adversas. Su proceso de fabricación consiste en elegir una zona cercana al predio de construcción para excavar y extraer la tierra, la cual se combina con pasto seco y agua hasta lograr una consistencia pastosa. La mezcla es vertida en moldes de madera y se deja secar al aire libre (Figura 2). La compactación manual o en prensas, o el empleo de estabilizantes o cementantes en la pasta son poco comunes. La Figura 3a presenta las configuraciones arquitectónicas típicas más comunes de la vivienda de adobe que son de un solo nivel y tienen una superficie entre 30 a 60 m². Generalmente los muros perimetrales no poseen sistema de refuerzo en las esquinas.

Actualmente, el ancho común de los muros de adobe llega a ser de hasta 30 cm (Figura 3b), a diferencia de las construcciones de más de 50 años de antigüedad, en las que los muros eran en promedio de 60 cm de ancho. El espesor de las juntas de lodo va de 2.5 a 3.5 cm. La cimentación comúnmente está compuesta por zapatas corridas de piedra braza junteada con lodo (Figura 3c).

El sistema de cubierta más común es a dos aguas, con inclinaciones de entre 30 y 40 por ciento (Figura 4).

Se compone de elementos generalmente de madera: Una viga principal longitudinal apoyada en la cúspide de los muros cabeceros y en uno o dos puntales verticales denominados “pilares”. Éstos transmiten la carga a vigas transversales conocidas como “puentes”, las cuales se apoyan en los tercios de los muros longitudinales. Sobre la viga principal y los muros longitudinales descansan polines denominados “madrinas”. En dirección transversal se colocan fajillas para sostener a la cubierta a base de tejas de barro, lámina metálica o de asbesto.

De acuerdo a Hernández *et al.* (1979), el comportamiento de las viviendas de adobe bajo solicitaciones sísmicas está regido por la flexión de los muros en la dirección normal a su plano, produciéndose un agrietamiento vertical principalmente en las esquinas o encuentro de muros. También es común el agrietamiento diagonal en las zonas aledañas a las esquinas, el agrietamiento vertical en la zona central de muros largos restringidos sólo en los extremos, y la erosión de su base producida por humedad, viento y escurrimientos de agua (Figura 5). En este estudio en las siete regiones del estado de Guerrero, de una muestra de 760 viviendas de adobe seleccionadas por muestreo aleatorio simple, 273 (36%) presentaron problemas de erosión en la base de los muros.



Figura 2. Adobes guerrerenses: a) Elaboración, b) Secado y, c) Almacenamiento.

Sin embargo, el daño más frecuente corresponde al agrietamiento de los muros (Figura 6). Al menos 63% de las viviendas consideradas en el estudio estadístico presentaron alguna combinación de los agrietamientos mostrados en la Figura 6.

intensidad sísmica MSK (IMSK) de VI. El agrietamiento severo y el colapso parcial pueden ocurrir bajo una IMSK de VII; mientras que el colapso general podría ocurrir bajo una IMSK de VIII. El escenario es desalentador si se considera que las IMSK previstas para esta zona pueden ser superiores a VIII (Salgado 2002).

De acuerdo a Zegarra *et al.* (2002), en las viviendas de adobe se pueden producir grietas leves bajo una

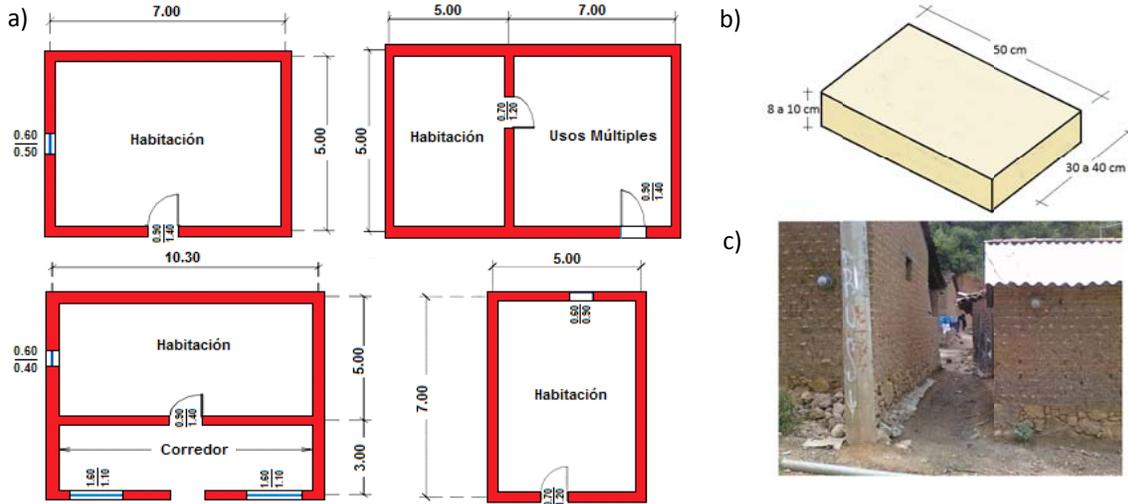


Figura 3. Vivienda de adobe: a) Características geométricas en planta, b) Dimensiones típicas de las piezas, c) Cimentación común de los muros.

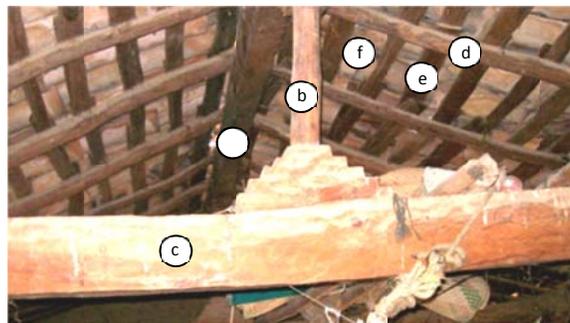


Figura 4. Vista interior de los elementos de un sistema de techo típico de vivienda de adobe: a) Viga longitudinal principal, b) Pilar, c) Puente, d) Madrinas, e) Fajillas, y f) Tejas.



Figura 5. Erosión en a) la base de los muros, b) en el cemento, y c) colocación de pantalla protectora de mortero en la base de un muro contiguo a una ladera.

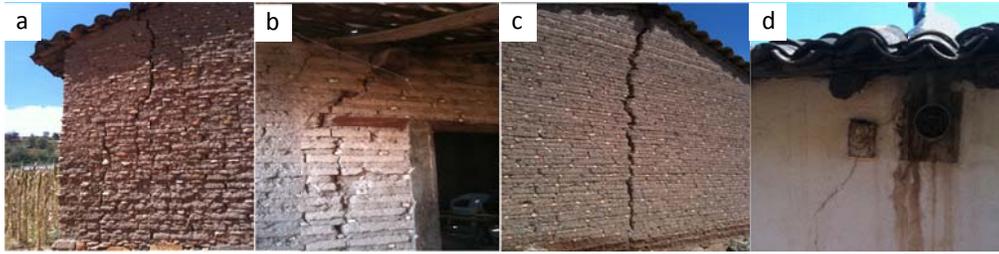


Figura 6. Agrietamientos: a) 29% en esquinas de muros, b) 26% esquinas de vanos, c) 14% en zona central de muros y d) 19% debido al debilitamiento del adobe a causa de escurrimientos.

A fin de mitigar estos probables efectos, Hernández *et al.* (1979) estudiaron varias propuestas de rehabilitación y refuerzo sísmico. Una de las más efectivas consiste en la aplicación de mallas a base de refuerzo metálico combinadas con morteros de buena calidad sobre zonas críticas de los muros. San Bartolomé *et al.* (2002) y Quiun *et al.* (2005), demostraron, en pruebas de laboratorio y en construcciones peruanas de adobe de 1 ó 2 entrepisos, que este tipo de refuerzo sísmico puede ser un método de refuerzo práctico muy efectivo para evitar daños y colapsos. Además, Alarcón y Alcocer (1999) realizaron una serie de pruebas experimentales para identificar la idoneidad de varias técnicas de rehabilitación para mejorar la respuesta de viviendas de adobe ante sismos de intensidades media y alta. Vera y Miranda (2005) valoraron experimentalmente la efectividad de recubrimientos a base de mortero cemento-arena y geomalla sintética como método de refuerzo para muros de adobe y de suelo-cemento. En el aspecto analítico, Arroyo *et al.* (2010) desarrolló un modelo numérico tridimensional, basado en el método del elemento finito, para simular el proceso de ruptura y separación entre los muros cabeceros y longitudinales, así como los niveles de concentración de esfuerzos bajo cargas sísmicas. Sin embargo, en México no se ha dado suficiente continuidad al trabajo experimental y analítico sobre el comportamiento de las viviendas de adobe iniciado por Hernández *et al.* (1979), y sólo han sido desarrolladas algunas investigaciones aisladas como las citadas previamente, principalmente en Sudamérica. Aun cuando la construcción de viviendas de adobe sigue vigente, no existe en México un programa de investigación sobre estructuras de adobe que permita conocer sus propiedades mecánicas más relevantes, ni se han definido técnicas de refuerzo y rehabilitación para mejorar su inadecuado desempeño sísmico actual.

METODOLOGÍA

A fin de determinar las propiedades mecánicas más relevantes de la mampostería de adobe representativa del sur de México desde el punto de vista sísmico, se emprendió un estudio en el LREMM-UAGro para

obtener los valores medios así como la variabilidad de dichas propiedades en las siete regiones del estado de Guerrero. Para este fin, se recolectaron muestras de adobes de cada una de las regiones, seleccionándolas directamente de lotes de piezas empleadas para la construcción local. Las muestras fueron tomadas de almacenes al aire libre, procurando siempre escoger piezas de la parte superior, media e inferior de los lotes. Posteriormente se transportaron –en condiciones protegidas–, a la ciudad de Chilpancingo para someterlas a las pruebas descritas a continuación:

Pruebas de compresión y de cortante (compresión diagonal) en especímenes de adobe. Se realizaron 84 pruebas sobre piezas de adobe para determinar la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión por tensión (seis piezas por región y por tipo de prueba). Las dimensiones de las piezas de adobe fueron 8x15x15 cm. La Figura 7 muestra el arreglo experimental de las pruebas de compresión realizadas en piezas de adobe.

A fin de obtener las curvas del comportamiento mecánico a la compresión y el módulo de elasticidad de la mampostería de adobe guerrerense, se realizó también una serie de ensayos de compresión axial sobre 28 pilas de adobes junteados con mortero de lodo de 2 cm de espesor. Se elaboraron cuatro especímenes para cada región del estado, de cuatro adobes cada uno, con una relación de altura a espesor de la pila igual a 2, por lo que se empleó un factor correctivo de la resistencia obtenida igual a 0.75. También se efectuaron pruebas de cortante en compresión diagonal de unidades de mampostería y muretes de adobe. En este caso se probaron 28 piezas de 8x30x30 cm y 28 muretes de 15x60x60 cm. La Figura 8 muestra los dispositivos de prueba.

Pruebas de compresión en material de las juntas de muros de adobe. También se tomaron muestras del lodo empleado para elaborar las juntas tanto de las pilas como de los paneles con el fin de determinar su resistencia a la compresión y módulo de elasticidad. Se elaboraron 42 especímenes (6 probetas de 5 x 5 x 5 cm por región).

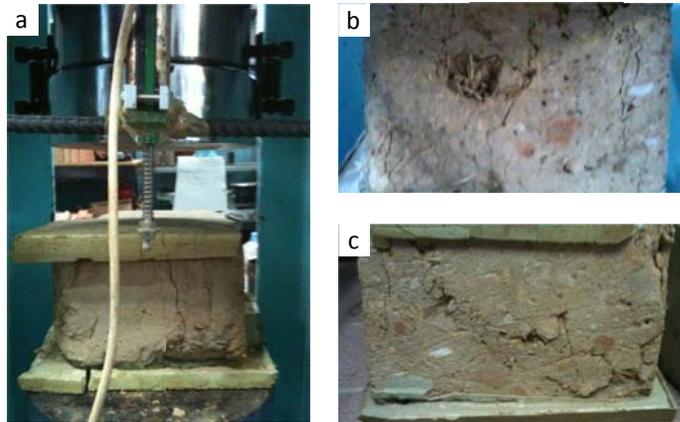


Figura 7. a) Prueba a compresión en piezas de adobe, b) y c) Grietas verticales y diagonales.

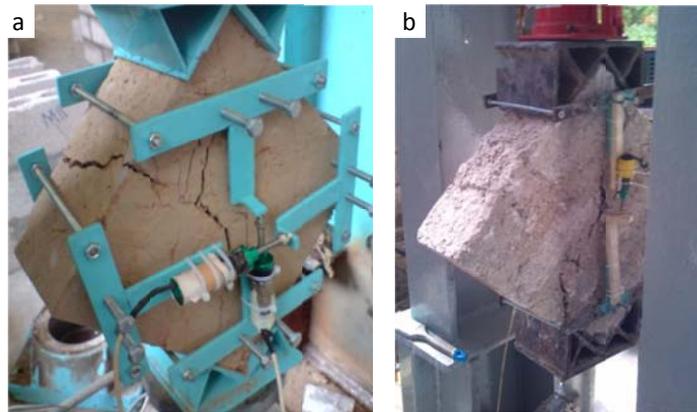


Figura 8. Pruebas de cortante en compresión diagonal y modo de falla de: a) Piezas y b) Muretes.

Pruebas de resistencia a compresión en adobes húmedos. A fin de conocer la variabilidad del contenido de humedad en los muros de adobe, se realizaron mediciones durante la temporada de lluvias del año 2012, en una vivienda de adobe localizada en el poblado de Xilotepec, en la región de la Montaña de Guerrero. Los resultados de este estudio permitieron definir que el contenido de humedad promedio durante las épocas de estiaje y de lluvias son del 2% y el 10%, respectivamente. Para estudiar el efecto de la variación del contenido de humedad en la resistencia a compresión de los adobes guerrerenses, se efectuó una serie de ensayos de compresión axial sobre 56 piezas de adobe (ocho por región) de 5x5x15 cm con una relación de esbeltez de 3 en las que se hizo variar el contenido de humedad entre el 2 y el 12%. Dicho contenido se trató de conservar constante en los especímenes mediante la aplicación de una capa de parafina.

Pruebas de carga cíclica reversible en muros de adobe. Se ensayaron 2 muros de 30x180x180 cm a carga lateral cíclica. Éstos fueron elaborados con adobes de dos regiones guerrerenses con los valores más bajos de resistencia a la compresión y módulo de

elasticidad: Costa Chica (muro MCH) y Norte (Muro MN). El junteo de piezas se realizó con lodo del material de las respectivas regiones. Las pruebas fueron realizadas en un marco de carga dispuesto sobre una losa de reacción de concreto reforzado de 70 cm de espesor. A fin de eliminar la posibilidad de falla por flexión o el punzonamiento local del muro de adobe, y para generar exclusivamente la falla por tensión diagonal, en los extremos de los muros fueron adosados elementos verticales confinantes y uno horizontal superior de 30 x 30 cm a base de concreto reforzado. Las cargas, controladas en desplazamiento, fueron aplicadas mediante gatos hidráulicos de 200 kN de capacidad.

RESULTADOS

Pruebas de compresión en especímenes de adobe. La Tabla 2 muestra los resultados de las pruebas de compresión y tensión por flexión de piezas de adobe para cada región del estado de Guerrero. Los valores presentados son resultados medios, por región. Los adobes poseen en general una resistencia a la compresión (f_a) muy baja, en promedio de 1.10 MPa. Los coeficientes de variación (C.V.) de cada región se ubican entre 0.21 y 0.28, mientras que el C.V. entre

regiones es igual a 0.26. El valor máximo de deformación bajo la carga de ruptura por compresión fue en promedio de $\mu = 0.0055$. En el caso de la resistencia a tensión por flexión (f_b), el valor promedio para las siete regiones fue de 0.27 MPa, con un C.V. igual a 0.31. Los valores máximos de deformación bajo la carga de ruptura de tensión por flexión fueron en promedio de $\mu = 0.0005$, resultando un cociente, entre las deformaciones por compresión y tensión por flexión, igual a 11.

Los resultados anteriores muestran que el comportamiento de los adobes estudiados presenta gran variabilidad. Sin embargo, en todos los casos se obtuvieron resistencias a la compresión y tensión por flexión que no sobrepasan 1.46 y 0.41 MPa, respectivamente. Al comparar estos resultados con los obtenidos por Hernández *et al.* (1979) para el estado de Guerrero y otros lugares de México, se corroboró que los adobes son frágiles y poco resistentes. La Figura 9 muestra los diferentes comportamientos observados. En general, las curvas esfuerzo-

deformación exhiben no linealidad prácticamente desde el inicio de las pruebas.

La Tabla 3 muestra que la resistencia promedio a la compresión resultó de 0.97 MPa. Los coeficientes de variación (C.V.) de cada región se ubicaron entre 0.21 y 0.26; y un C.V. entre regiones igual a 0.26. Los módulos de elasticidad de las piezas mostrados en la Tabla 3 fueron calculados empleando la secante de la curva promedio de comportamiento a compresión axial de cada región. Para ello, se intersectó la resistencia obtenida a una deformación igual a 0.0005 y la correspondiente al 40% de la resistencia última.

El módulo de elasticidad promedio de las regiones fue de 312 MPa y el cortante resistente por compresión diagonal promedio resultó de 0.182 MPa, con un C.V. entre regiones de 0.34, mientras que para los muretes, el valor promedio del cortante resistente por compresión diagonal resultó de 0.155 MPa, con un C.V. entre regiones de 0.38.

Tabla 2. Resistencia a compresión y tensión por flexión de piezas de adobe.

Región	Resistencia promedio a la compresión, f_a (MPa)	C.V.	Resistencia promedio a la Tensión por Flexión, f_b (MPa)	C.V.
Norte	0.79	0.28	0.20	0.24
Tierra	1.46	0.22	0.41	0.25
Montaña	1.19	0.25	0.33	0.21
Centro	1.29	0.27	0.32	0.20
Acapulco	1.16	0.24	0.23	0.21
Costa	0.59	0.21	0.13	0.26
Costa	1.27	0.26	0.29	0.23

$\mu = 1.10, C.V. = 0.26$

$\mu = 0.27, C.V. = 0.31$

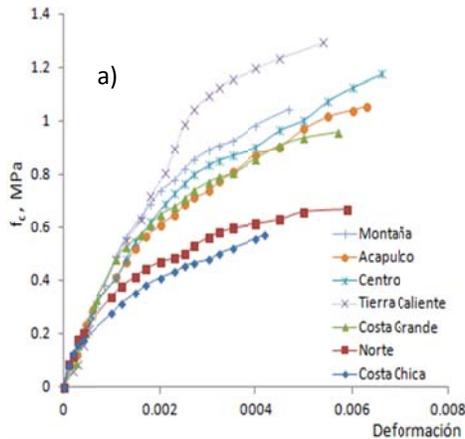


Figura 9. a) Curvas de resistencias a la compresión de pilas de mampostería, b) Dispositivo de prueba de compresión en pilas de adobe.

Tabla 3. Propiedades mecánicas de mampostería de adobe.¹

Región	Compresión axial ² (MPa)	Módulo de Elasticidad (MPa)	Cortante en piezas por Compresión Diagonal ³ (MPa)	Cortante en muros por Compresión Diagonal ⁴ (MPa)
Norte	0.68	235.44	0.11	0.09
Tierra	1.29	402.21	0.30	0.26
Montaña	1.06	368.26	0.23	0.18
Centro	1.20	343.35	0.19	0.16
Acapulco	1.08	304.64	0.24	0.20
Costa	0.53	206.01	0.13	0.08
Costa	0.98	323.75	0.18	0.12
$\mu = 0.97, C.V. = 0.26$ $\mu = 312, C.V. = 0.20$ $\mu = 0.19, C.V. = 0.30$ $\mu = 0.155, C.V. = 0.38$				

¹ Las piezas fueron junteadas a base de lodo del mismo material de los adobes. Resultados promedio de 4 ensayos.

² Pilas de cuatro piezas de 8x15x15 cm.

³ Piezas de 8x30x30 cm.

⁴ Muretes de 15x60x60 cm.

Tabla 4. Propiedades mecánicas del material de las juntas de muros de adobe.

Región	Compresión axial (MPa)	Módulo de Elasticidad (MPa)
Norte	0.73	218.12
Tierra	1.31	389.42
Montaña	1.08	220.19
Centro	0.98	303.57
Acapulco	0.93	287.31
Costa Chica	0.49	194.20
Costa	1.05	275.94
$\mu = 0.93, C.V. = 0.26$ $\mu = 289, C.V. = 0.23$		

La comparación de la resistencia a la compresión axial entre la mampostería de adobe y la de la mampostería de barro recocido reportada por Sánchez (2009), muestra que esta última es 9 veces más resistente; en el caso de la resistencia al cortante por compresión diagonal, la mampostería de tabique de barro recocido es 10 veces más resistente que la mampostería de adobe.

Pruebas de compresión en material de las juntas de muros de adobe. La Tabla 4 presenta los resultados promedio obtenidos. La comparación entre las Tablas 2 y 4, así como de las Tablas 3 y 4 permite apreciar que los comportamientos a la compresión de las piezas y de las juntas son muy similares, presentándose resistencias ligeramente mayores para el caso de las piezas.

Pruebas de resistencia a compresión en adobes húmedos. La Figura 10a muestra los modos de falla de algunos de estos especímenes. La Figura 10b muestra las curvas de resistencia obtenidas para los adobes de las siete regiones guerrerenses con diferentes contenidos de humedad.

Los valores de resistencia con un contenido de

humedad menor o igual al 2%, corresponden al valor de la resistencia promedio a la compresión (mostrados precedentemente en la Tabla 3), los cuales se consideran como una condición “seca”. Los resultados de la Tabla 5, considerando un factor correctivo de la resistencia de 0.9, muestran que el adobe puede presentar una reducción muy significativa de la resistencia a la compresión durante la época de lluvias respecto a la que presentan en la época de estiaje.

Los rangos de variación van de 40% al 52% y de 74% al 79% para contenidos de humedad promedio del 6% y 12%, respectivamente. Por estos motivos, la vulnerabilidad de los muros de adobe puede incrementarse notablemente durante la temporada de lluvias.

Pruebas de carga cíclica reversible en muros de adobe. La Figura 11 muestra los muros de adobe durante las pruebas bajo carga cíclica. Pueden observarse lazos histeréticos estables bajo cargas cíclicas hasta antes de producirse el agrietamiento diagonal. A partir de este estado, el comportamiento fue inestable, produciéndose grandes deformaciones.

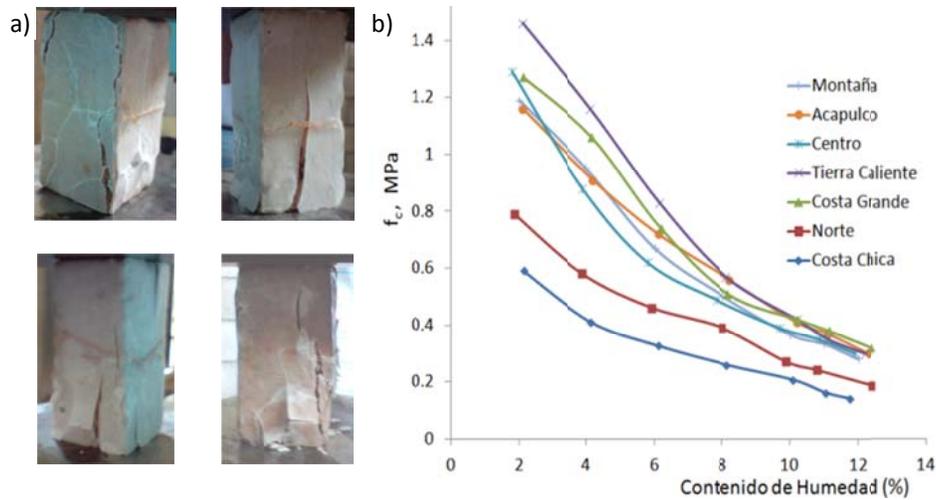


Figura 10. Modos de falla y curvas de comportamiento a la compresión de prismas de adobes con diferentes contenidos de humedad.

Tabla 5. Influencia del contenido de humedad en la resistencia a la compresión de adobes.

Procedencia del adobe	Resistencia a la compresión (MPa)			% de reducción de resistencia	
	Contenido de humedad			Con 6% de contenido de humedad	Con 12% de contenido de humedad
	<2%	6%	12%		
Costa Chica	0.59	0.35	0.14	40	76
Costa Grande	1.27	0.74	0.32	41	74
Centro	1.29	0.62	0.30	52	76
Acapulco	1.16	0.72	0.30	37	74
Montaña	1.19	0.67	0.28	43	76
Tierra Caliente	1.46	0.83	0.30	43	79
Norte	0.79	0.46	0.18	41	77

Ambos especímenes presentaron una capacidad muy baja para resistir la carga lateral. La falla por tensión diagonal en los muros MCH y MN ocurrió bajo un esfuerzo cortante de 0.071 y 0.075 MPa, respectivamente. La deformación angular bajo el esfuerzo cortante promedio resultó igual a 0.0022. El módulo de cortante promedio, de 51.5 MPa, fue calculado considerando la secante de las curvas esfuerzo cortante-deformación angular mostradas en la Figura 11a. Las curvas de comportamiento muestran que el desempeño de los muros de adobe bajo carga cíclica reversible es inadecuado, presentándose degradación de rigidez inmediata tras apenas dos ciclos de carga. Al mismo tiempo se presentó una disminución de casi el 30% del esfuerzo

cortante resistente. Las curvas muestran además, que la capacidad de disipación de energía de los muros de adobe es prácticamente despreciable. El patrón de fisuras, con un espesor máximo de 0.6 cm, correspondió principalmente a la falla de las juntas, aunque varias piezas presentaron fisuras por tensión diagonal (Figura 11b). Considerando la variabilidad del origen de los suelos y el proceso de elaboración de los adobes, se consideró un valor de la resistencia que tuviera una probabilidad del 2% de no ser alcanzado. Así, los valores de la resistencia a la falla de la mampostería de adobe resultaron: para la resistencia a la compresión, 0.58 MPa; para la resistencia en tensión por flexión, 0.15 MPa; y para la resistencia al cortante, 0.08 MPa.

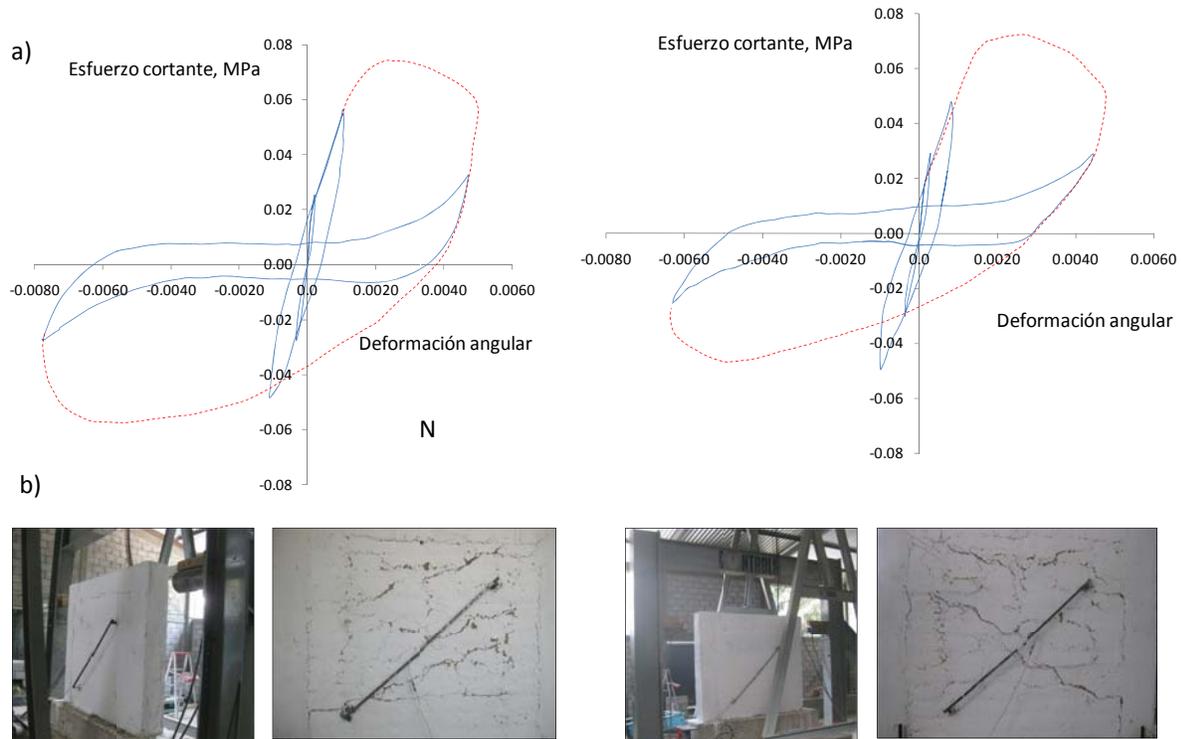


Figura 11. Muros de adobe de las regiones Norte (MN) y Costa Chica (MCH) sometidos a carga cíclica reversible: a) Comportamiento esfuerzo cortante–deformación angular y b) Modos de falla.

CONCLUSIÓN

En este artículo se presentan los resultados de un trabajo de investigación para caracterizar las propiedades mecánicas de adobes representativos del sur de México. La mampostería de adobe posee una resistencia mecánica extremadamente baja: Hasta 10 veces menor que la obtenida respectivamente en pruebas de compresión axial y cortante de mampostería de arcilla recocida. Además, los coeficientes de variación pueden alcanzar valores de hasta el 40%. Los valores de la resistencia a la falla de la mampostería de adobe son: para la resistencia a la compresión, 0.58 MPa; 0.15 MPa para la resistencia en tensión por flexión, y de 0.08 MPa para el caso de la resistencia al cortante. Para el módulo de elasticidad y el de rigidez al cortante pueden considerarse valores de 210 y 50 MPa respectivamente. Además, la resistencia de los muros de adobe depende directamente de la cantidad de humedad presente en las piezas. La resistencia a la compresión puede ser abatida hasta un 50% en caso de que el contenido de humedad en el adobe exceda el 6%. La falla por tensión diagonal en los muros ocurre bajo un esfuerzo cortante promedio de 0.070 MPa, mientras que la deformación angular bajo este nivel de esfuerzos es igual a 0.0022.

Durante este estudio se observó un elevado deterioro en la mayoría de las viviendas de adobe. La precaria situación económica imperante en el sur de México desde hace varias décadas ha limitado la conservación y el mantenimiento de este tipo de estructuras; es común encontrar viviendas que han perdido porciones importantes de la parte inferior de los muros perimetrales debido principalmente al intemperismo. Esta situación se está complicando con el paso del tiempo pues se detectaron reducciones del espesor de los muros de hasta el 30%.

Por las razones expuestas, las viviendas de adobe presentan un nivel de vulnerabilidad muy elevado, principalmente las ubicadas dentro de la región sísmica D. De esta forma es urgente implementar un programa de rehabilitación de las viviendas de adobe en el que empleen técnicas simples, económicas y efectivas para su refuerzo. El empleo de mallas, a base de tela de gallinero y electro-soldadas, combinadas con aplanados de mortero puede mejorar significativamente el desempeño de los muros de adobe. Los valores promedio de la resistencia del adobe presentados en este documento pueden emplearse en la elaboración de modelos analíticos para estudiar el comportamiento de las viviendas de este material. Se requieren trabajos adicionales de

investigación con el fin de establecer estrategias de rehabilitación y refuerzo más idóneas, así como métodos de estabilización de las piezas de adobe, que

permitan disminuir la vulnerabilidad de la vivienda de adobe en el sur de México.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el CONACYT según convenio No. 80983 de los Fondos Sectoriales SEP-CONACYT para investigación básica.

REFERENCIAS

Alarcón P., Alcocer S. (1999). *Ensayos experimentales sobre rehabilitación de estructuras de adobe*. En “Memoria del XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Morelia Michoacán”, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, 209-217, SMIS, México.

Anzaldo C., Prado M. (2005). “*Índices de marginación 2005*”, 1ª ed., CONAPO, México.

Arroyo R., Guinto E., Sánchez S., Corona J. (2010). *Earthquake disaster mitigation through experimental and analytical studies on southern Mexican adobe houses located in urban areas*. En “Urban Habitat Constructions under Catastrophic Events - COST Action C26 Conference”, F. Mazzolani (ed.), 1011-1016, Taylor & Francis, Londres, Reino Unido.

García A., Suárez G. (1996). “*Los sismos en la historia de México*”. 1ª ed., UNAM-CIESAS-FCE, México.

Hernández O., Meli R., Padilla M. (1979). “*Refuerzo de vivienda rural en zonas sísmicas*”, Proyecto 8167, Instituto de Ingeniería, UNAM, México.

INEGI (2000). “*XII Censo General de Población y Vivienda 2000*”, 1ª ed., Instituto Nacional de Geografía y Estadística, México.

INEGI (2010). “*XIII Censo General de Población y Vivienda 2010*”, 1ª ed., Instituto Nacional de Geografía y Estadística, México.

Kostoglodov V., Bandy W., Domínguez J., Mena M. (1996). *Gravity and seismicity over the Guerrero seismic gap, Mexico*. “*Geophysical Research Letters*”, 23, 3385–3388.

Quiun D., San Bartolomé A., Zegarra L., Giesecke A. (2005). *Adobe reforzado con mallas de alambre: Ensayos de simulación sísmica y aplicación a construcciones reales*. En “Seminario Internacional Arquitectura, construcción y Conservación de Edificaciones de Tierra en Áreas Sísmicas, SismoAdobe 2005”, Politécnica Universidad Católica del Perú, PUCP, Lima, Perú.

Salgado A. (2002). “*Seguridad sísmica de la vivienda económica en el estado de Guerrero*”, 1ª ed., Universidad Autónoma de Guerrero, México.

Sánchez S. (2009). “*Étude expérimental et numérique des murs en maçonnerie confinée chargés dans leur plane. Cas: État de Guerrero (Mexique)*”, Thèse de Doctorat, Université Paris Est, France.

San Bartolomé A., Quiun D., Zegarra L. (2004). *Effective system for seismic reinforcement of adobe houses*. En “13th World Conference on Earthquake Engineering”, WEEC, paper 3321, Vancouver, Canada.

Vera R., Miranda S. (2005). *Reparación de muros de adobe con el uso de mallas sintéticas*. En “Seminario Internacional Arquitectura, construcción y Conservación de Edificaciones de Tierra en Áreas Sísmicas, SismoAdobe 2005”, Politécnica Universidad Católica del Perú, PUCP, Lima, Perú.

Zegarra L., Quiun D., San Bartolomé A., & Giesecke A. (2002). *Reforzamiento de viviendas de adobe existentes. Segunda parte: Ensayos sísmicos de módulos*. En Memorias del XI Congreso Nacional de Ingeniería, 155, 177-181.

Este documento debe citarse como: Arroyo Matus R., Sánchez Tizapa S, Catalán Quiroz P. (2013). **Caracterización experimental de las propiedades mecánicas de la mampostería de adobe del sur de México**. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 17-3, pp 167-177, ISSN 1665-529-X.