

Obtención de las propiedades mecánicas de la mampostería de adobe mediante ensayos de laboratorio

Obtention of the mechanical properties of the adobe masonry using (lab based) experimental test

Policarpo Catalán Quiroz¹, Jatziri Y. Moreno-Martínez^{2*}, Arturo Galván², Roberto Arroyo Matus³

¹ Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

² Programa de Licenciatura en Ingeniería Civil, Departamento de Ingeniería Agroindustrial, División de Ciencias de la Salud e Ingenierías, Campus Celaya-Salvatierra, Universidad de Guanajuato, Av. Ing. Javier Barros Sierra No. 201 Esq. Av. Baja California, Colonia Ejido de Santa María del Refugio, C.P. 38140, Celaya, Gto. México. Correo electrónico: jatziri.moreno@ugto.mx

³ Unidad Académica de Ingeniería, Universidad Autónoma de Guerrero.

*Autor de correspondencia:

Resumen

En este artículo se presentan los resultados obtenidos de pruebas experimentales realizadas a una muestra aleatoria de pilas y muretes de adobe. Se describen los procedimientos de construcción de las piezas de adobe, probetas, especificaciones de ensaye, análisis de resultados y caracterización de las principales propiedades mecánicas del adobe: módulo de elasticidad, resistencia a la compresión, cortante y flexión. Esto, debido a la necesidad primordial de una norma, pues actualmente no existe, para realizar los ensayos en este tipo de material, resaltando que el 50% de la población en países en desarrollo viven en construcciones de tierra. Asimismo, se describen las características principales de la vivienda de adobe en el estado de Guerrero (zona Sureste de México), sus materiales de construcción y componentes estructurales de las viviendas típicas de esta región de la República Mexicana. Se concluyó que el 40% del esfuerzo de compresión máximo especificado en la norma NMX para calcular el módulo de elasticidad y el módulo de rigidez al corte no representa el valor que se debe utilizar para la mampostería de adobe. Esto debido a que el adobe mantiene su rama elástica en valores de aproximadamente 15%-20% el valor del esfuerzo de compresión máximo.

Palabras clave: Propiedades mecánicas; adobe; pilas; muretes.

Abstract

The results from experimental tests applied to a random group of adobe piers and square wallets are depicted in this paper. The process involved in the making of adobe pieces, test pieces, the tests specifications, the analysis of results and characterization of the main mechanical properties of adobe, such as: elasticity modulus, compressive, shear and flexional strength, are described in this paper. This, due to the fundamental need of a code, because currently does not exist, to perform the experimental tests in this type of material, highlighting that 50% of the population in developing countries live in land constructions. The main features of adobe houses in Guerrero (Southeastern zone of Mexico), their construction materials, and the structural components of the typical households in this zone of Mexico are also described in the paper. It was concluded that 40% of the maximum compression stress specified in the Mexican Testing Code NMX for calculating the elasticity modulus and the shear modulus does not represent the value that should be used for adobe masonry. This is because the adobe maintains its elastic branch in values of approximately 15%-20% the value of the maximum compression stress.

Keywords: Mechanical properties; adobe; piers; square wallets.

Recibido: 23 de marzo de 2017

Aceptado: 20 de septiembre de 2018

Publicado: 10 de abril de 2019

Como citar: Catalán-Quiroz, P., Moreno-Martínez, J. Y., Arroyo Matus, R., & Galván, A. (2019). Obtención de las propiedades mecánicas de la mampostería de adobe mediante ensayos de laboratorio. *Acta Universitaria* 29, e1861. doi: <http://doi.org/10.15174/au.2019.1861>

Introducción

Alrededor del 30% al 50% de la población del mundo vive o trabaja en construcciones hechas con tierra, por ejemplo, mampostería de adobe (Houben & Guillaud, 1994; Varum *et al.*, 2014). Mientras que el 50% de la población en países en desarrollo (incluyendo la mayoría de la población rural y al menos el 20% de la población urbana y suburbana) viven en construcciones de tierra (Houben & Guillaud, 1994). Es decir, la mampostería de adobe es un material tradicional muy común en estos países que se caracterizan por su baja economía y alto grado de marginación; principalmente porque los materiales con los que se construyen estas viviendas son básicamente: tierra, paja y agua para los muros, y madera en el sistema de techo, los cuales se encuentran en el entorno que habitan, propiciando que sea factible su edificación.

El adobe es un tipo de mampostería artesanal muy simple, compuesto por tierra, paja y agua. Para su elaboración, primero se elige una zona cercana al lugar de construcción, de donde se extraerá la tierra, luego se combina con paja y agua hasta lograr una mezcla uniforme y maleable. Por último, la mezcla es colocada en moldes de madera para crear las piezas de adobe y posteriormente se dejan secar al aire libre de 30 días a 60 días. Cabe mencionar que el adobe es un material con múltiples desventajas comparado con materiales como la mampostería de barro recocido y concreto. Entre otros, su capacidad resistente a esfuerzos de flexión, cortante y compresión axial es muy baja. Además, el grado de intemperización al que están expuestos los adobes durante su vida útil, le genera una degradación física. Por todo esto, el adobe es uno de los materiales de construcción más vulnerables.

La gran vulnerabilidad estructural que poseen las viviendas de adobe ha originado la preocupación y atención de diversos investigadores, que los ha llevado a estudiar de forma experimental y analítica el comportamiento de las viviendas de adobe ante eventos sísmicos, así también como las propiedades mecánicas del adobe: Alarcón & Alcocer, 1999; Arroyo, 2010; Arroyo, Sánchez & Catalán, 2013; Bazán, Padilla & Meli, 1978; Blondet, Villa & Brzev 2003; Hernández, Meli, Padilla & Valencia, 1981; Moreno & Martínez, 2011; Quiun, San Bartolomé, Zegarra & Giesecke, 1999; Salgado, 2002; San Bartolomé, Quiun & Zegarra, 2003; Torrealva, 2003; Yamin, Rodríguez, Fonseca, Reyes & Philips, 2005; Zegarra, San Bartolomé & Quiun, 2001; etc. Por estas razones, se ha realizado un estudio de las propiedades mecánicas de la mampostería de adobe utilizado para la construcción de viviendas en el estado de Guerrero, México, permitiendo retomar los estudios necesarios para continuar con la acumulación de información y poder coadyuvar en la mitigación de la vulnerabilidad estructural de las viviendas de adobe en la región sur de la República Mexicana.

Peligro sísmico de la región

En el estado de Guerrero se registra una actividad sísmica elevada y son muchos los eventos sísmicos que han dejado evidencias de los daños provocados en las viviendas de adobe. Por ejemplo; el 20 de marzo de 2012 se registró un sismo con magnitud $M_w = 7.4$, localizado en las cercanías de Ometepec, Guerrero y Pinotepa Nacional, Oaxaca. En cifras oficiales preliminares se reportaron aproximadamente más de 1000 viviendas con diversos tipos de daños; las más afectadas fueron las viviendas de adobe.

Tipología de la vivienda de adobe

Las viviendas de adobe en el estado de Guerrero se caracterizan por ser de un solo piso, con planta rectangular de 33 m^2 a 50 m^2 de área en promedio, muros longitudinales con una altura de 2.4 m a 2.7 m y muros transversales de 3 m a 3.9 m de altura. Por lo regular, no cuentan con muros divisorios intermedios.

Suelen tener dos puertas de acceso, ubicadas una en cada muro longitudinal, con dimensiones de 0.7 m a 1.2 m de ancho y con una altura en promedio de 2 m (figura 1). Por lo regular presentan una ventana de 0.3 m^2 a 1 m^2 de área, ubicada en algún muro longitudinal. En puertas y ventanas se colocan dinteles de madera

(figura 1) de 3 cm a 5 cm de espesor y con una longitud de apoyo sobre muros de 20 cm a 30 cm en promedio. El material empleado para juntar las piezas de adobe se hace con un mortero compuesto por tierra, agua y pasto seco para formar un lodo cuyo espesor de la junta va de 2.5 cm a 3.5 cm. La cimentación comúnmente está compuesta por zapatas corridas de piedra braza desplantada a una profundidad de entre 60 cm y 80 cm, y sobresalen del terreno natural entre 30 cm y 40 cm para evitar la intemperización de la parte inferior de los muros de adobe (Arroyo, 2010).

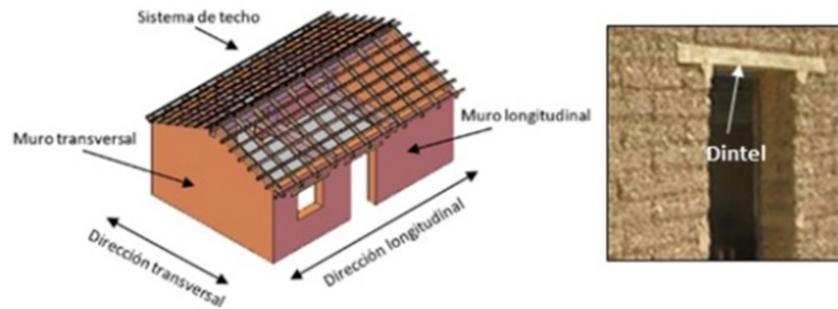


Figura 1. Tipología de la vivienda de adobe (izquierda). Detalle de dintel (Derecha).
Fuente: Elaboración propia

El sistema de techo es a dos aguas con inclinaciones de 13 grados a 25 grados. Su cubierta es de teja de barro recocido y los elementos que lo componen son una viga longitudinal robusta de madera que se apoya en los muros transversales (muros cabeceros) y en dos puntales de madera, estos últimos se conectan a una viga transversal ubicada a cada tercio del claro y se apoyan sobre los muros longitudinales. Sobre los muros y viga longitudinal descansan polines de madera, también conocidos como "madrinas o listones", los cuales se colocan a una separación promedio de 60 cm. Transversalmente a los polines se colocan fajillas de madera a cada 25 cm, que sostendrá las tejas de barro recocido (figura 2).



Figura 2. Tipología de la vivienda de adobe.
Fuente: Elaboración propia.

Materiales y Métodos

El estado de Guerrero se compone por siete regiones: Acapulco, Costa Grande, Eduardo Neri y Costa Chica (ubicadas en la zona D, zona altamente sísmica). Mientras que en la zona C (zona sísmica) se ubican Norte, Tierra Caliente y Montaña. Se tienen instrumentadas 22 viviendas en total (tabla 1).

Tabla 1. Viviendas de adobe instrumentadas en el Estado de Guerrero, México.

Estado	Zona Sísmica	Región	Lugar	No. de viviendas instrumentadas	
Guerrero	D	Acapulco	Xaltianguis	4	
		Costa Grande	Atoyac de Álvarez	3	
		Costa Chica	San Luis Acatlán	3	
		Eduardo Neri	Zumpango del Río	3	
	C	Norte	Iguala	3	
		Tierra Caliente	Arcelia	3	
		Montaña	Tlapa de Comonfort	3	
		Total =			22

Fuente: Elaboración propia

De cada una de estas regiones, se obtuvieron las dimensiones del ladrillo de adobe que se utiliza para la construcción de viviendas en el estado de Guerrero, México (tabla 2).

Tabla 2. Dimensiones del adobe en el estado de Guerrero.

Estado	Región	Población representativa	Dimensiones del adobe (cm)			Viviendas muestreadas
			Largo	Ancho	Espesor	
Guerrero	Acapulco	Xaltianguis	40	28	9	4
	Costa Grande	Atoyac de Álvarez	45	30	9	3
	Costa Chica	San Luis Acatlán	50	30	5	3
	Centro	Zumpango del Río	50	35	10	3
	Norte	Iguala	40	30	9	3
	Tierra Caliente	Arcelia	40	30	9	3
	Montaña	Tlapa de Comonfort	40	30	9	3

Fuente: Elaboración propia.

Primero se obtuvo un promedio por región y posteriormente se obtuvo un promedio de las siete regiones para obtener finalmente las dimensiones de las piezas de adobe utilizadas en este trabajo. Las dimensiones del ladrillo de adobe resultaron de 45 cm de largo, 30 cm de ancho y 9 cm de espesor. De acuerdo con esto, se mandaron a elaborar piezas de adobe escaladas en 1:2, con dimensiones de 22.5 cm de largo, 15 cm de ancho y 4.5 cm de espesor (figura 3). Las piezas de adobe fueron elaboradas en el estado de Guerrero, México, por personas dedicadas a la elaboración artesanal del adobe y construcción de este tipo de viviendas; posteriormente fueron trasladadas a los laboratorios del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y de la Universidad de Guanajuato, Campus Celaya-Salvatierra.



Figura 3. Elaboración de piezas de adobe escaladas (Izquierda) y piezas trasladadas al laboratorio de estructuras y materiales de la Universidad de Guanajuato Campus Celaya-Salvatierra (Derecha).
Fuente: Elaboración propia.

Para obtener las principales propiedades mecánicas del adobe, se construyeron nueve pilas para ser ensayadas a compresión axial, nueve muretes para ser ensayados a compresión diagonal, nueve pilas para ser ensayadas a flexión y nueve cubos del mortero para obtener su resistencia a compresión. De acuerdo con las normas expedidas por el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE), en el caso de la obtención de módulo de elasticidad es necesario ensayar al menos cinco especímenes, dos de ellos a compresión y los tres restantes para la obtención del módulo de elasticidad. No obstante, debido a las características propias del adobe (material de baja resistencia y cuasi-frágil) se decidió aumentar el número de ensayos a nueve, teniendo repetibilidad de los resultados en las pruebas experimentales. Los especímenes tuvieron un tiempo de secado de 60 días y registraron un peso volumétrico igual a 13.5 kN/m^3 (figura 4).



Figura 4. Especímenes de adobe: pilas (Izquierda), muretes (Centro) y cubos de mortero (Derecha).
Fuente: elaboración propia.

Resultados

Resistencia a compresión

Las propiedades geométricas y parámetros de ensaye se definieron tomando en cuenta los requisitos del anteproyecto de la norma mexicana: determinación de la resistencia a compresión y módulo de elasticidad

de pilas y resistencia a compresión diagonal y módulo de cortante de muretes de mampostería de barro y concreto (ONNCCE, 2005). Cabe mencionar que no existe una norma para este tipo de material (adobe). En la tabla 3, se muestran las características geométricas de las nueve pilas construidas para determinar la resistencia a compresión axial (f_m) y módulo de elasticidad (E_m) del adobe.

Tabla 3. Características geométricas de pilas a compresión axial.

Espécimen	Espesor (cm)	Longitud (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Altura/espesor	Factor correctivo
PL-1	14.7	21.5	57.0	316.05	3.9	0.99
PL-2	14.6	21.5	47.5	313.90	3.3	0.93
PL-3	14.5	21.5	54.0	311.75	3.7	0.97
PL-4	14.5	21.5	54.0	311.75	3.7	0.97
PL-5	14.5	21.5	55.0	311.75	3.8	0.98
PL-6	14.5	21.5	55.0	311.75	3.8	0.98
PL-7	14.5	21.5	50.0	311.75	3.4	0.94
PL-8	14.5	21.5	53.5	311.75	3.7	0.97
PL-9	14.5	21.5	52.5	311.75	3.6	0.96

Fuente: Elaboración propia.

Las pilas construidas tuvieron una relación de altura/espesor aproximadamente igual a 4, ensayadas a una velocidad de carga de 10 kN/min con 3 ciclos de precarga del orden del 15% de la carga máxima esperada, de esta manera se fijó una carga máxima 0.5 kN para los 3 ciclos de precarga y en el cuarto ciclo se llevó a la falla el espécimen (figura 5).



Figura 5. Ensayo de pila y falla del espécimen.
Fuente: Elaboración propia.

De la carga axial máxima (P) dividida entre el área bruta de la pieza se obtuvo el esfuerzo a compresión axial (f_m); en la tabla 4 se puede apreciar los esfuerzos obtenidos ya multiplicados por su respectivo factor correctivo de esbeltez.

Tabla 4. Esfuerzos resistentes en compresión (f_m) y módulos de elasticidad (E_m) en pilas.

Espécimen	P (kN)	f_m (MPa)	E_m (MPa)
PL-1	43.16	1.35	230.92
PL-2	43.21	1.28	219.24
PL-3	40.99	1.28	275.89
PL-4	43.84	1.36	210.86
PL-5	35.60	1.12	200.94
PL-6	37.66	1.18	197.64
PL-7	40.06	1.21	273.23
PL-8	38.36	1.19	317.67
PL-9	34.65	1.07	242.08
Promedio	39.73	1.23	240.94

Fuente: Elaboración propia.

El módulo de elasticidad se obtuvo a partir de las gráficas esfuerzo deformación de las pilas ensayadas a compresión y se calculó como la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria axial, medida dentro del comportamiento elástico. La pendiente que define al módulo de elasticidad, se tomó como la rigidez inicial de la curva esfuerzo - deformación que quedó definida entre dos puntos, los cuales son el esfuerzo correspondiente para una deformación unitaria axial igual a 50 millonésimas (0.000050) y la correspondiente deformación unitaria axial para un esfuerzo que va del 15% al 20% del esfuerzo máximo a compresión. Finalmente, de las resistencias medidas en las pilas ensayadas (figura 6), se obtuvo un promedio de dichos parámetros, de esta manera se tiene un esfuerzo a compresión axial (f_m) de 1.2 MPa y un coeficiente de variación de 0.08. Para el módulo de elasticidad (E_m) se obtuvo un promedio igual a 236.2 MPa con un coeficiente de variación de 0.16.

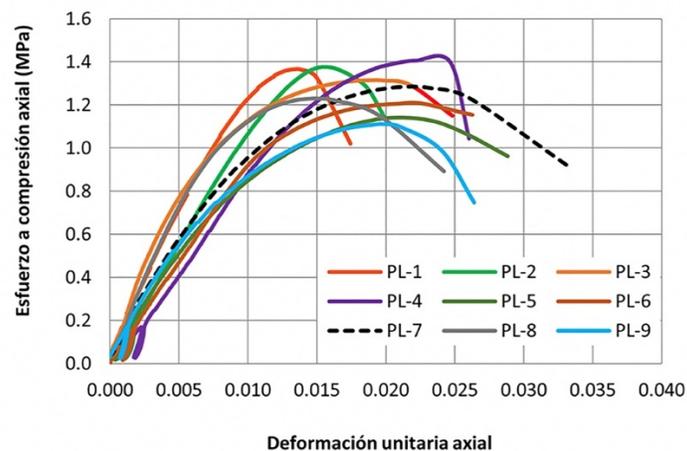


Figura 6. Curvas esfuerzo deformación en pilas a compresión axial.

Fuente: Elaboración propia.

Resistencia a cortante

Por medio de ensayos en muretes a compresión diagonal se obtuvieron el esfuerzo a compresión diagonal (V_m) y el módulo de rigidez al corte (G_m). Cada murete está formado por una pieza y media, y un número de hiladas tal que sea aproximadamente cuadrado. Las características geométricas se presentan en la tabla 5.

Tabla 5. Características geométricas de muretes a compresión diagonal.

Espécimen	Espesor, t (cm)	Longitud (cm)	Altura (cm)	L_c (cm)	$t * L_c$ (cm ²)
MT-1	14.5	35	36	50.2	728.04
MT-2	14.5	35	36	50.2	728.04
MT-3	14.5	35.5	36	50.6	733.11
MT-4	14.5	35	35	49.5	717.71
MT-5	14.5	35	35	49.5	717.71
MT-6	14.5	34.5	35	49.1	712.61
MT-7	14.5	35	37	50.9	738.50
MT-8	14.5	35	36	50.2	728.04
MT-9	14.5	35.5	36	50.6	733.11

Fuente: Elaboración propia.

Los muretes fueron ensayados a una velocidad de carga de 5 kN/min con 3 ciclos de precarga del orden del 15% de la carga máxima esperada, de esta manera se fijó una carga máxima 1.3 kN para los 3 ciclos de precarga y en el cuarto ciclo de igual forma como en las pilas se llevó a la falla el espécimen (figura 7).



Figura 7. Ensayo de muretes.
Fuente: Elaboración propia.

El esfuerzo cortante (V_m) se calculó como el cociente de la carga máxima (P) aplicada entre el área de la diagonal del murete ($t * L_c$). En la tabla 6 se puede apreciar la variación de los esfuerzos cortantes obtenidos.

Tabla 6. Esfuerzos a compresión diagonal (V_m) y módulos de rigidez al corte (G_m) en muretes.

Espécimen	P (kN)	V_m (MPa)	G_m (MPa)
MT-1	7.5	0.10	98.72
MT-2	7.68	0.11	61.72
MT-3	8.55	0.12	64.06
MT-4	8.32	0.12	65.42
MT-5	8.10	0.11	60.23
MT-6	8.48	0.12	52.57
MT-7	10.07	0.14	35.53
MT-8	7.19	0.10	55.26
MT-9	6.27	0.09	48.46
Promedio	8.02	0.11	60.22

Fuente: Elaboración propia.

El módulo de rigidez al corte (G_m) se obtuvo a partir de las gráficas esfuerzo cortante - deformación angular de los muretes ensayados a compresión diagonal (figura 8), y se calculó como la relación entre el esfuerzo y la deformación medida dentro del comportamiento elástico. Este parámetro, se tomó como la rigidez inicial de la curva esfuerzo cortante - deformación angular que quedó definida entre dos puntos, los cuales son el esfuerzo cortante correspondiente para una deformación angular igual a 50 millonésimas (0.000050) y la correspondiente deformación angular para un esfuerzo cortante del orden de 20% del esfuerzo máximo a compresión diagonal. De los muretes ensayados, se obtuvo un esfuerzo cortante (V_m) promedio de 0.11 MPa con un coeficiente de variación de 0.12 y un módulo de rigidez al corte (G_m) promedio igual a 59.04 MPa con un coeficiente de variación de 0.27.

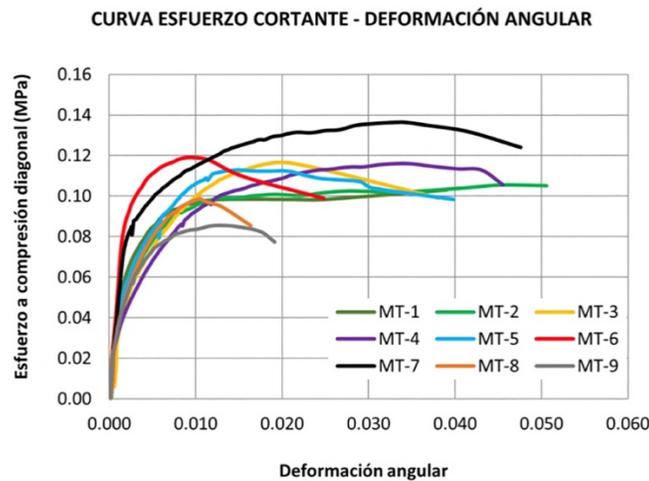


Figura 8. Curvas esfuerzo cortante – deformación angular en muretes.
Fuente: Elaboración propia.

Resistencia a flexión

Otro de los parámetros calculados fue el esfuerzo a flexión (σ), obtenido al aplicar una carga al centro de una pila, cuya orientación, y aplicación de la carga fuera similar a la fuerza inercial desarrollada durante la acción de un sismo sobre un muro sujeto a fuerzas fuera de su plano. En la tabla 7 se enlistan las características de las pilas ensayadas a flexión.

Tabla 7. Características geométricas de pilas ensayadas a flexión.

Espécimen	Espesor (cm)	Longitud (cm)	Altura (cm)	Volumen (cm ³)	Peso propio, P_p (kN)	Peso volumétrico (MPa)
PF-1	14.5	21.5	54.5	16,990.38	0.23	135.0
PF-2	14.5	21.5	56.5	17,613.88	0.24	137.0
PF-3	14.5	21.5	56.6	17,645.05	0.24	135.0
PF-4	14.5	21.5	55.5	17,302.13	0.23	135.0
PF-5	14.5	21.5	55.3	17,239.78	0.23	134.0
PF-6	14.5	21.5	55.5	17,302.13	0.23	134.0
PF-7	14.5	21.7	55	17,305.75	0.23	135.0
PF-8	14.5	21.7	54.5	17,148.43	0.23	135.0
PF-9	14.5	21.5	54.3	16,928.03	0.23	137.0

Fuente: Elaboración propia.

Si bien la prueba es estática y simplificada al hacerse ensayos en pilas (figura 9), al menos se desea tener un valor aproximado de la resistencia bajo este tipo de cargas, y es que uno de los principales modos de falla en los muros de adobe, es la flexión fuera del plano.



Figura 9. Ensayo de pilas a flexión.
Fuente: Elaboración propia.

Durante estas pruebas, a pesar de haber protegido cada una de las pilas con una cinta de plástico y con ello evitar la pérdida de una muestra durante la maniobra para su ensaye, se perdieron tres pilas de las nueve que se tenían con una relación de esbeltez aproximadamente igual a 4, por esta razón, dos pilas fueron ensayadas con una relación de esbeltez del orden de 2.5, lo cual permitiría una mejor maniobra para su ensaye y con ello evitar se perdiera el espécimen. Los resultados entre las pilas con relación de esbeltez del orden de 4 y 2.5, presentaron esfuerzos a flexión muy similares (tabla 8).

Tabla 8. Esfuerzos por flexión en pilas.

Espécimen	Peso propio, P_p (kN)	Módulo de sección (cm^3)	Longitud entre apoyos (cm)	Carga (kN)	$P_p +$ Carga (kN)	Momento flexionante (N-m)	Esfuerzo por flexión (MPa)
PF-1	0.23	753.40	44.4	0.1	0.33	36.64	0.049
PF-2	0.14	753.40	34.4	0.2	0.34	29.05	0.039
PF-3	--	--	--	--	--	--	--
PF-4	0.23	753.40	45.4	0.2	0.43	49.22	0.065
PF-5	--	--	--	--	--	--	--
PF-6	--	--	--	--	--	--	--
PF-7	0.23	760.40	46.4	0.1	0.33	38.72	0.051
PF-8	0.13	760.40	31.4	0.5	0.63	49.27	0.065
PF-9	0.23	753.40	45.8	0.1	0.33	38.01	0.050
Promedio							0.053

Fuente: Elaboración propia.

El esfuerzo por flexión (σ) promedio fue de 0.052 MPa y un coeficiente de variación de 0.18.

Resistencia a compresión axial del mortero de adobe

El mortero de adobe está hecho del mismo tipo de material con que fueron elaboradas las piezas. El mortero hecho en laboratorio tiene una proporción de ocho botes de tierra más un bote de paja y agua hasta lograr una mezcla uniforme y maleable, cuyo peso volumétrico resulto igual a 13 kN/m³. Para obtener la resistencia a compresión axial del mortero de adobe, se ensayaron 9 cubos de 5 cm³ × 5 cm³ × 5 cm³ (figura 10). De las pruebas realizadas se obtuvo una resistencia a compresión axial promedio de 1.9 MPa y un coeficiente de variación de 0.07.

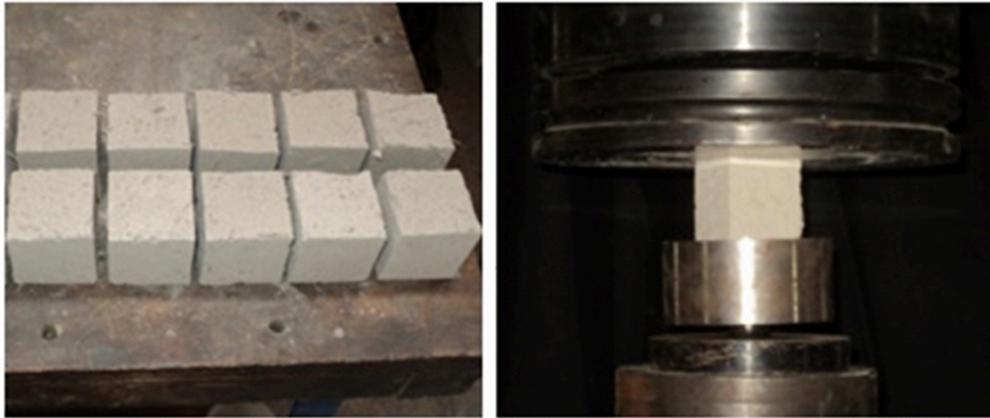


Figura 10. Ensayo de pilas a flexión.
Fuente: Elaboración propia.

Si bien la resistencia en el mortero es mayor al de las pilas a compresión axial (1.23 MPa), esto es porque en las pilas existen oquedades e irregularidades no uniformes de las piezas, situación que no sucede con las muestras de mortero de adobe.

Discusión

En el sismo de 2017 en el Sureste de México (Chiapas) se dañaron aproximadamente el 70% de las construcciones, siendo la mayoría construcciones de adobe. Mientras que, en el 2018 en la misma zona, Sureste de México (Oaxaca) aproximadamente 16 000 edificios fueron afectados y alrededor de 3000 fueron severamente dañados. La zona del Sureste de México es una zona, en general, altamente sísmica, por lo que conocer las propiedades mecánicas del material en esa región ayudará a futuros estudios para mejorar la calidad de estas viviendas. Esta zona de México se caracteriza por la construcción de viviendas de adobe.

Es importante reflexionar que los lineamientos de la norma mexicana (ONNCCE, 2005) se utilizan para materiales con mejor control de calidad (concreto, mampostería de tabique, acero, etc.). Por ejemplo, en la norma se indica que el módulo de elasticidad y módulo de rigidez al cortante deben definirse por la rigidez inicial de la curva esfuerzo – deformación definida entre dos puntos; el primero, como el esfuerzo asociado a una deformación unitaria axial o angular igual a 50 millonésimas; el segundo punto, queda definido por la deformación correspondiente al esfuerzo del 40% de la carga máxima. Este criterio es apropiado para materiales donde existe un mejor control de calidad y cuyas resistencias son mayores que la del adobe, pues su respuesta elástica se mantiene en niveles de esfuerzo mayores que los alcanzados en la mampostería de adobe. Por eso no resulta adecuado aplicar estrictamente el criterio de la norma mexicana para determinar el módulo de elasticidad y de rigidez a cortante de la mampostería de adobe. Por esta razón, en esta investigación

se propuso determinar dichos parámetros mecánicos a niveles de esfuerzos del orden del 15% al 20% del esfuerzo máximo, donde se define un claro rango elástico de la curva esfuerzo – deformación del adobe. Este porcentaje (15%-20%) es una contribución importante pues en mampostería de tabique rojo recocido y en concreto las normas expedidas por el ONNCCE indican 40% (25%-20% más), pero para el adobe al ser un material menos resistente y rígido este porcentaje no es adecuado pues la respuesta elástica se obtiene en niveles de esfuerzo menor al establecido en las normas para materiales con mayor control de calidad (mampostería de tabique y concreto).

En los últimos años se han realizado investigaciones para mejorar algunas propiedades en este material. Utilizar fibras, además de consumir poca energía en su producción (Laborel-Préneron, Aubert, Magniont, Tribout & Bertron 2016; Millogo, Morel, Aubert & Ghavami, 2014), evita la propagación de grietas (Quagliarini & Lenci, 2010) en el material. Mientras que la ceniza volante (*fly ash*) mejora su capacidad de carga última (Turanli & Saritas, 2011). Por lo que conocer correctamente los métodos de ensaye para obtener las propiedades mecánicas de la mampostería de adobe ayudará a implementar las fibras o el tipo de refuerzo que mejore el adobe construido en el Sureste de México.

Conclusiones

En general, las propiedades mecánicas del adobe resultan ser muy bajas, principalmente el esfuerzo a flexión, en donde se obtuvo que la resistencia del adobe ante fuerzas inducidas fuera de su plano es muy baja. Esto es debido a la poca adherencia que existe entre las piezas y juntas de adobe. De esta manera se confirma la baja resistencia estructural del adobe a fuerzas inducidas fuera de su plano. Por lo que es importante realizar investigaciones tendientes a mejorar las propiedades mecánicas del adobe, incorporando diferentes materiales como cemento, cal u otros naturales (incluyendo residuos agroindustriales) que prevalzcan dentro del entorno en donde se construyen este tipo de viviendas, haciéndolas en la medida de lo posible segura, económica y sustentable. Por último, los resultados obtenidos tienen el alcance de ser utilizados en la elaboración de modelos analíticos para estudiar el comportamiento estructural de viviendas elaboradas con mampostería de adobe.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por los Fondos Sectoriales Secretaría de Educación Pública (SEP)-Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) para investigación básica, Clave 80983 y el financiamiento federal del proyecto de la convocatoria Institucional de Investigación 2016 (Clave: 947/2016-2017) de la Universidad de Guanajuato. Los autores agradecen a la Universidad Autónoma de Guerrero, Universidad de Guanajuato Campus Celaya-Salvatierra y al Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por su colaboración. Incluyendo el personal de apoyo del laboratorio del Instituto de Ingeniería de la UNAM y de la Universidad de Guanajuato Campus Celaya-Salvatierra (estudiantes de servicio social universitario y profesional).

Referencias

- 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 Facultad de ingeniería Universidad Autónoma de Yucatán*, 17(3), 167-177.
- Arroyo, M. R. (2010). *La vivienda guerrerense de adobe, características geométricas y estudio de vibración ambiental*. México: Universidad Autónoma de Guerrero.

- Alarcón, P., & Alcocer, S. (noviembre, 1999). Ensayos experimentales sobre rehabilitación de estructuras de adobe. *XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Michoacán-Morelia, México.
- Bazán, E., Padilla, M., & Meli, R (1980). Seguridad de casas de adobe ante sismos: estudios analíticos. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Blondet, M., Villa García, G., & Brzev, S. (2003). *Construcciones de Adobe Resistentes a los Terremotos: Tutor*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Hernández O., Meli R., Padilla M., & Valencia, E. (1981). *Refuerzo de la vivienda económica en zonas sísmicas. Estudios experimentales*. Distrito Federal, México: Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de México Series del Instituto de ingeniería No. 441.
- Houben, H., & Guillaud, H. (1994). *Earth Construction: A Comprehensive Guide*. London, United Kingdom: Intermediate Technology Publications.
- Laborel-Préneron, A., Aubert, J. E., Magniont, C., Tribout, C., & Bertron, A. (2016). Plant aggregates and fibers in earth construction materials: A review. *Constr. Build. Mater.*, 111(2016), 719–734. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.119>
- Millogo, Y., Morel, J. C., Aubert, J. E., & Ghavami, K. (2014). Experimental analysis of Pressed Adobe Blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers. *Construcción and Building Materials*, 52(2014), 71–78. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.094>
- Moreno, J., & Martínez, J. (2011). *Estudio de las propiedades mecánicas del adobe mejorado con diferentes materiales para su empleo como material alternativo en la dirección general de ingenieros*. (Tesis de licenciatura). Escuela Militar de Ingenieros de la Universidad del Ejército y Fuerza Aérea, México
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE) (2005). Anteproyecto de Norma Mexicana: Determinación de la resistencia a compresión y módulo de elasticidad de pilas y resistencia a compresión diagonal y módulo de cortante de muretes de mampostería de barro y concreto. México.
- Quagliarini, E., & Lenci, S. (2010). The influence of natural stabilizers and natural fibres on the mechanical properties of ancient Roman adobe bricks. *Journal of Cultural Heritage*, 11(3), 309–314. doi: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2009.11.012>
- Quiun, D., San Bartolomé, A., Zegarra, L., & Giesecke, A. (1999). *Adobe reforzado con mallas de alambre: Ensayos de simulación sísmica y aplicación a construcciones reales*. Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Salgado, A. (2002). *Seguridad Sísmica de la Vivienda Económica en el Estado de Guerrero*. México: Universidad Autónoma de Guerrero.
- San Bartolomé, A., Quiun, D., & Zegarra, L. (2003). Técnicas para el reforzamiento sísmico de viviendas de adobe, *XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Guanajuato-León*, México. doi: <https://doi.org/10.13140/2.1.1861.9840>
- Torrevalva, D. (2007). *Caracterización de daños, reparación y refuerzos en construcciones de adobe*. Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Turanli, L., & Saritas, A. (2011). Strengthening the structural behavior of adobe walls through the use of plaster reinforcement mesh. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1747–1752. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.092>
- Varum, H., Tarque, N., Silveira, D., Camata, G., Lobo, B., Blondet, M., Figueiredo, A., Rafi, M. M., Olivera, C., & Costa, A. (2014). Structural Behaviour and Retrofitting of Adobe Masonry Buildings. *Building Pathology and Rehabilitation*, 2, 37–75. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-39686-1_2
- Yamin, L., Rodríguez, A., Fonseca, R., Reyes, J., & Philips, C. (2005). Comportamiento sísmico y alternativas de rehabilitación de edificaciones en adobe y tapia pisada con base en modelos a escala reducida ensayados en mesa vibratoria. *Revista de Ingeniería*, 18, 175-190. doi: <https://doi.org/10.16924%2Fria.v0i18.492>
- Zegarra, L., San Bartolomé, A., & Quiun, D. (2001). *Comportamiento ante el terremoto del 23-06-2001 de las viviendas de adobe reforzadas en Moquegua, Tacna y Arica*. Lima, Perú: GTZ-Centro Regional de Sismología para América del Sur- Pontificia Universidad Católica del Perú.