

Hacia una metodología para la caracterización experimental del comportamiento a compresión de la mampostería de adobe

Towards a methodology for experimental characterization of mechanical behavior of adobe masonry

J.D. Rodríguez-Mariscal (*), M. Solís (**)

RESUMEN

En la Península Ibérica existen numerosas viviendas y elementos patrimoniales construidos con tierra cruda. Por otro lado, actualmente hay una tendencia creciente a revitalizar el empleo de este material en la arquitectura moderna debido a su valor ecológico y arquitectónico. Sin embargo, existe aún una falta de conocimiento científico acerca de su comportamiento mecánico, así como una falta de especificaciones para realizar una caracterización rigurosa. En este artículo se realiza un análisis experimental en aras de desarrollar una metodología para la caracterización de la mampostería de ladrillos de adobe como material estructural. Se plantean cuestiones metodológicas relativas a la obtención de las deformaciones de los especímenes y se analizan las propiedades mecánicas de la mampostería de adobe y los mecanismos de fallo. La presente investigación estudia concretamente el comportamiento mecánico de mampostería de adobe fabricada con tierra proveniente de la rivera del Guadalquivir en Sevilla (España) a compresión simple.

Palabras clave: Adobe, mampostería de tierra, compresión, caracterización mecánica.

ABSTRACT

In the Iberian Peninsula there are numerous houses and heritage sites built with earthen materials. Nowadays, there is also a significant revival of the use of raw earth in modern architecture due to its ecological value and architectural performance. However, there is still a lack of scientific knowledge about its mechanical behavior, as well as specifications for a rigorous characterization. In this paper, an experimental analysis is carried out in order to develop a methodology for the characterization of the adobe masonry as a building material. Methodological issues for obtaining the strain field of the specimens and the choice of the Young module estimators are considered. The mechanical properties of the adobe masonry and the failure mechanisms are analyzed. In the present study, the mechanical behavior of the adobe masonry coming from the Guadalquivir riverbank in Seville (Spain) is specifically studied under compressive loads.

Keywords: Adobe, earthen masonry, compression test, mechanical characterization.

(*) Ingeniero Industrial. Doctorando. Universidad de Sevilla, Sevilla (España)

(**) Doctor Ingeniero Industrial. Profesor Titular. Universidad de Sevilla, Sevilla (España)

Persona de contacto / Corresponding author: msolis@us.es (M. Solís)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7183-0106> (J.D. Rodríguez-Mariscal); <https://orcid.org/0000-0002-4482-0145> (M. Solís)

Cómo citar este artículo/Citation: Rodríguez-Mariscal, J.D.; Solís, M. (2020). Hacia una metodología para la caracterización experimental del comportamiento a compresión de la mampostería de adobe. *Informes de la Construcción*, 72(557): e332. <https://doi.org/10.3989/ic.67456>

Copyright: © 2020 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Recibido/Received: 13/09/2018
Aceptado/Accepted: 29/03/2019
Publicado on-line/Published on-line: 10/03/2020

1. INTRODUCCIÓN

El empleo de la tierra cruda en las construcciones está ampliamente extendido a través de la geografía mundial y su origen se remonta a asentamientos humanos primitivos. Existen numerosos ejemplos de su utilización tanto en viviendas como en patrimonio histórico-artístico mediante la aplicación de las distintas técnicas constructivas consolidadas: tapia, adobe, cob, quincha, etc.

El uso extensivo de la tierra cruda como material de construcción se debe a que presenta características atractivas. Se trata de un material sostenible con cualidades térmicas y acústicas adecuadas para la edificación y un bajo impacto ambiental. Aun así, la construcción en tierra, y en particular, las construcciones realizadas con mampostería de adobe tienen unas propiedades mecánicas bajas y no presentan un comportamiento adecuado cuando están sometidas a acciones sísmicas (1, 2, 3, 4, 5, 6), también presentan sensibilidad al grado de humedad (7, 8, 9) y a las condiciones ambientales (10) y aunque se trata de un material con baja resistencia a la tracción (11), no es una propiedad despreciable.

La alta heterogeneidad de la tierra supone una dificultad a la hora de establecer metodologías para caracterizar el material, profundizar en el estudio del comportamiento mecánico de la mampostería de adobe y definir coeficientes para un diseño estructural seguro. No obstante, existen diferentes normativas en el mundo (12) que marcan de una manera no exhaustiva los requerimientos estructurales de las construcciones en tierra.

En la actualidad no hay un consenso científico que especifique la elección de las dimensiones de los especímenes a ensayar, el tipo de control del ensayo (fuerza o desplazamiento), la ubicación de sensores o la metodología de cálculo de las constantes elásticas. Esto sumado a la dispersión observada en resultados de caracterización mecánica a compresión de la tierra cruda cuando son comparados entre sí (13), motiva la necesidad de la creación de recomendaciones para la realización de ensayos mecánicos específicos para este material.

De forma general, las principales características que afectan a la resistencia a compresión de un ladrillo de adobe son: las propiedades del suelo, las propiedades de las fibras de refuerzo, la densidad seca, la geometría del espécimen y el contenido de humedad (14). Asimismo, el comportamiento a compresión de la mampostería de adobe se caracteriza por un mecanismo de fallo con agrietamiento vertical similar a la mampostería de ladrillo cocido, poca influencia de la resistencia a compresión del mortero en la resistencia compresión de la mampostería y por el aumento de la rigidez de la mampostería con el incremento de la resistencia a compresión del ladrillo de adobe (15, 16).

Esta investigación centra su análisis en la caracterización mecánica del comportamiento a compresión de mampostería de adobe usando tierras seleccionadas de la rivera del Guadalquivir en Sevilla (España) llevando a cabo un estudio metodológico para la obtención de las propiedades mecánicas de los muros de adobe. Específicamente, materiales elaborados en base a suelos procedentes de la misma zona han sido evaluados y analizados mecánicamente en estudio previos (17) y forman parte de una línea estratégica en desarrollo para impulsar su empleo en construcciones hechas de tierra cru-

da en el sur peninsular. La caracterización experimental del comportamiento estático a compresión permite la obtención de relevantes parámetros mecánicos para estimar el comportamiento estructural frente a acciones externas.

La mampostería como sistema constructivo presenta según su disposición y trabado distintas propiedades mecánicas en función de la dirección de las cargas soportadas, es decir, su comportamiento no es estrictamente isotrópico ni homogéneo debido a que las juntas de unión establecen planos débiles de rigidez. Sin embargo, en el presente artículo, la mampostería de adobe es tratada como un medio continuo y homogéneo para la obtención de sus propiedades desde un punto de vista macro mecánico.

Para la obtención de los desplazamientos y deformaciones se emplearon dos métodos. El primero está basado en el uso del actuador de la máquina de ensayo y mide los desplazamientos globales durante el ensayo. El segundo método se apoya en el uso de sensores de desplazamiento, colocados en las direcciones vertical y horizontal, que mide desplazamientos relativos entre distintos puntos del espécimen.

En el presente trabajo son tenidas en cuenta las correcciones de los valores de resistencia a compresión aparente (f_{ck}) de la mampostería de tierra que plantea la norma neozelandesa para muros de adobe y tapia, estabilizada y no estabilizada (18). Esta norma propone una corrección lineal dado el coeficiente de corrección (k_c) para la estimación de la resistencia a compresión no confinada del muro (f_{uc}) en función de su relación de aspecto ($r.a.$), definida esta última como el cociente entre la altura del muro y la longitud del lado menor de la sección transversal. Los valores de resistencia a compresión no confinada del muro son comparados con la resistencia a compresión del material constituyente de los ladrillos de adobe.

Se analizan tres estimadores para la obtención del módulo de Young a partir de la evolución de la ley de comportamiento de la mampostería de adobe sometida a compresión. Se proponen también dos ajustes polinómicos por tramos de la ley de comportamiento de los muros de adobe a compresión a partir de los valores medios de tensión y deformación. Cada ajuste corresponde a cada una de las metodologías empleadas para la obtención de las deformaciones, globales y locales. Adicionalmente, se ha calculado la evolución del módulo de Poisson con la carga de compresión aplicada y se ha realizado un análisis del mecanismo de fallo de la mampostería de adobe.

En ambiente de laboratorio han sido fabricados y ensayados a compresión simple seis muros de mampostería de adobe y siete especímenes cúbicos, extraídos de ladrillos de adobe con la misma composición y tiempos de secado que los empleados en la ejecución de los muros. Las características de los materiales, dimensiones de los especímenes, procedimientos de los ensayos, resultados obtenidos, análisis y conclusiones son presentadas en las siguientes secciones.

2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

Un adobe es un ladrillo de tierra cruda, arena y fibra natural que ha sido moldeado y, finalmente, secado al aire. La composición y la proporción de arena y arcilla presentes en la tierra influyen de forma notable en la cohesión del material y las propiedades mecánicas. Usualmente, las proporciones en peso empleadas en la fabricación de adobes oscilan entre el

20 % y el 40 % de limos y entre el 10 % y el 25 % de arcillas (14). Asimismo, el tamaño y contenido de la fibra añadida y su longitud también afectan directamente a las propiedades mecánicas (19).

Para la selección de suelos fue elaborado un mapeado de explotaciones mineras activas de la aglomeración urbana de Sevilla (Andalucía) a partir del seguimiento y extracción de muestras representativas en explotaciones de tierras arcillosas inscritas en un radio de 50 km.

La tierra seleccionada contiene un 60 % de arena fina (diámetros comprendidos entre [2,20] mm), un 20 % de suelo limoso y un 20 % de suelo arcilloso de baja plasticidad. Los límites líquido y plástico del suelo seleccionado son 23.1 y 17.2 respectivamente (20, 21). Para la elaboración de los adobes fue empleada paja de trigo con una proporción en peso del 1 % con una longitud aproximada de la fibra de 5 cm.

El contenido de humedad de los adobes empleados para la fabricación de la mampostería es de 1.29%, en peso, y la densidad seca es de $\rho_{seca} = 1679.0 \text{ kg/m}^3$. El contenido de humedad relativa adecuada para la fabricación de especímenes de adobe debe estar comprendido entre 1% y 3% dependiendo de la cantidad de arcilla. Valores de humedad relativa fuera de este rango afecta a la resistencia a compresión del material (9).

2.1. Construcción de especímenes

Los adobes y los muros o mampostería de adobe fueron elaborados en el laboratorio de Estructuras de la ETSI de la Universidad de Sevilla, siguiendo para su elaboración las recomendaciones de la norma peruana (22) y de la norma UNE-EN ISO para ensayos a compresión de mampostería de ladrillo cocido (23). Los adobes fueron secados al aire libre (Figura 1) y, posteriormente, almacenados entre 90 y 105 días en un ambiente estable a condiciones de laboratorio, aproximadamente a 24 °C y 50 % de humedad relativa. Adicionalmente, los muros fueron almacenados entre 45 y 108 días antes de someterlos a los ensayos de compresión para que tuviera lugar un adecuado secado del mortero de unión.

Las dimensiones de los adobes fabricados fueron de [320x160x80] mm y las de los muros de adobe ejecutados de [600x500x160] mm. El dimensionado de los ladrillos y de la mampostería cumple las especificaciones de diseño que es



Figura 1. Secado al aire de las unidades de adobe.

sugerida por la norma europea para la construcción de especímenes de mampostería de ladrillo cocido en ensayos de compresión simple (23). Las juntas de mortero de unión fueron añadidas con la misma dosificación que las unidades de adobe, incluyendo la paja. Cada muro estaba formado 6 filas de adobes con 1'5 unidades por fila y el espesor de las juntas de mortero de unión alcanzaba los 20 mm.

Con objeto de caracterizar el comportamiento a compresión de los ladrillos de adobe se ensayaron a compresión 7 especímenes cúbicos de [80x80x80] mm, obtenidos mediante corte en seco de ladrillos con la misma composición y tiempos de secado que los empleados en ejecución de los muros. En dimensiones nominales, cada cubo corresponde a una octava parte de un ladrillo. La dirección de aplicación de la carga en los especímenes cúbicos fue la misma que se le hubiera aplicado si la unidad formara parte de la mampostería sometida al ensayo de compresión, (Figura 2).

2.2. Configuración de los ensayos experimentales

Para la preparación y determinación de los parámetros que configuran los ensayos a compresión de la mampostería de adobe y especímenes cúbicos fueron tenidas en cuenta las especificaciones técnicas que se indican en las normas para ensayos de compresión de piezas de fábrica de ladrillo y de mampostería de ladrillo cocido (23, 24).

Una máquina universal de ensayo mono-axial de 50 kN de capacidad fue usada para ensayar todos los especímenes cúbicos. La velocidad del ensayo adoptada fue de 3 mm/min, obteniéndose la carga máxima entre 2 y 3 minutos, cumpliendo con los requerimientos de la norma de ensayos de compresión de piezas de fábrica de ladrillo cocido (24) que indica llegar a la carga máxima a partir de 1 minuto.

La mampostería fue ensayada con un actuador mono-axial hidráulico de 500 kN de capacidad. La velocidad del ensayo adoptada fue de 1 mm/min y se obtuvo la carga máxima entre 10 y 12 minutos, ajustándose de forma aproximada a la norma de ensayos de compresión de mampostería de fábrica de ladrillo cocido (23) la cual aconseja llegar a la carga máxima entre 15 y 30 minutos.

Durante la ejecución de los ensayos fue liberado el movimiento de la placa superior del actuador para reducir los efectos

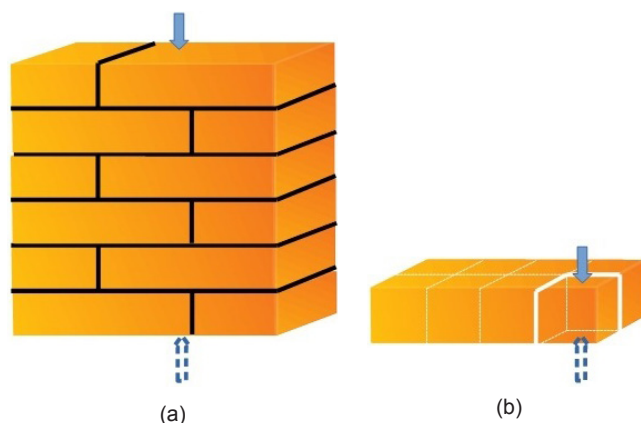


Figura 2. Esquema de (a) los muros ensayados y (b) probeta cúbica obtenida a partir de un ladrillo, con indicación de la dirección de aplicación de la carga.

de flexión en la pieza provocada por una falta de paralelismo en los apoyos de la probeta, heterogeneidades del material, etc. No obstante, conforme aumenta la carga aplicada sobre la probeta se lleva a cabo un proceso de consolidación y cohesión interna (25). Para disminuir los efectos de las irregularidades y de la fricción entre las superficies de contacto probeta-placa fueron refrentadas las caras superior e inferior de los muros de adobe con una capa de yeso.

Fueron fijados 3 sensores de desplazamiento de tipo inductivo o LVDT en cada cara del muro, 2 sensores en la dirección vertical y 1 sensor en la dirección horizontal, con el objetivo de obtener información en tiempo real de los posibles efectos de flexión durante la ejecución del ensayo, (Figura 3).

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. Resistencia a la compresión

La resistencia a compresión es uno de los parámetros más relevantes para la caracterización de cualquier material de construcción. Como criterio general en los resultados obtenidos, el cálculo de las tensiones a compresión ha sido determinado como el cociente entre la fuerza aplicada y el área de la sección transversal del espécimen, donde la sección transversal se considera invariable durante todo el ensayo. El valor de la tensión debido al peso propio se ha considerado despreciable en la base del muro (0.01 MPa aproximadamente).

La Tabla 1 muestra el rango de valores de resistencia a compresión aparente (f_{ck}) y el valor medio de resistencia a compresión aparente (\bar{f}_{ck}), así como su grado de dispersión expresado en porcentaje y determinado por el Coeficiente de Variación (CoV) para los especímenes cúbicos y para la mampostería de adobe. El CoV es definido como el valor de la desviación típica de todos los resultados dividida por el valor medio y multiplicado por 100.

Los valores de la resistencia a compresión de los especímenes cúbicos están condicionados por las imperfecciones en la muestra ensayada. Asimismo, el estado tensional de la mampostería de adobe también depende de factores relacionados con la calidad de la ejecución del muro como son el trabado de las unidades, la homogeneidad en la distribución del mortero, la aparición de ausencias de material en las llagas con motivo de la retracción en el secado y la verticalidad del muro. Las características anteriormente citadas influyen en una distribución no homogénea de la carga a compresión axial y, por ende, favorecen la aparición de efectos de flexión y de dispersión en los resultados.

La fricción entre las placas superior e inferior de la máquina de ensayo produce un efecto no deseado de confinamiento del material. Dicha fricción es directamente proporcional al área de contacto con las placas y a la esbeltez de la probeta. El grado de confinamiento del material afecta a la uniformidad en

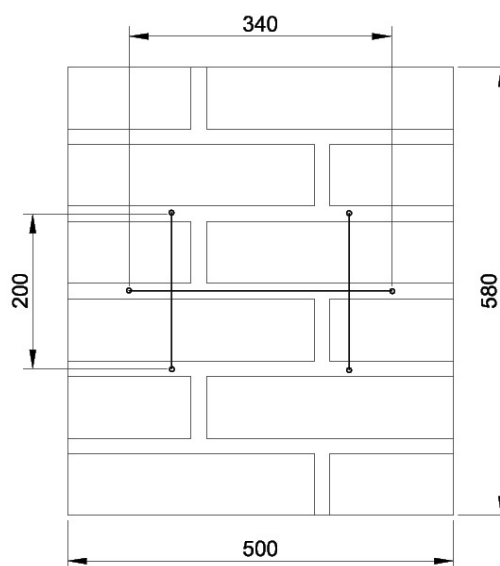


Figura 3. Ubicación de los sensores de desplazamiento en la cara del muro de adobe. Unidades en mm.

el reparto de la carga y a la distribución del estado tensional de la muestra ensayada. La normativa neozelandesa (26) define un coeficiente de corrección (k_a) de la resistencia a compresión aparente para corregir el efecto de confinamiento para muros construidos con tierra (adobe o tapia) en función de su relación de aspecto ($r.a.$).

La aplicación de estos factores lineales de corrección que eliminan los efectos de confinamiento en la resistencia de compresión aparente (f_{ck}) y que estiman el valor de la resistencia a compresión no confinada (f_{uc}) para muros de tierra cruda requieren un análisis en profundidad y el establecimiento de una metodología de cálculo. Aunque diferentes normativas internacionales dedicadas a la construcción y diseño de muros de tierra (26, 27) abordan criterios de resistencia a compresión mínimos para un cálculo estructural seguro, actualmente no existe un consenso en la metodología de cálculo para la obtención de la resistencia del material que corrija el efecto del confinamiento y por tanto, no es posible determinar la resistencia a compresión para un dimensionamiento estructural óptimo (17, 28).

Para la campaña experimental llevada a cabo, el rango de valores de la resistencia a compresión aparente y no confinada (f_{ck}) y (f_{uc}), sus respectivos valores medios (\bar{f}_{ck}) y (\bar{f}_{uc}) y Coeficiente de Variación (CoV) son mostrados en la Tabla 1.

Los valores medios de resistencia a compresión aparente reflejados en la Tabla 1 indican que la resistencia a compresión del material es inferior a la mampostería, aunque individualmente algunos especímenes ensayados no comparten esta tendencia. Ensayos recientemente documentados para construcción con tierra están en concordancia con la presente

Tabla 1. Rango de valores y valores medios de la resistencia a compresión aparente (f_{ck}) y (\bar{f}_{ck}) y no confinada (f_{uc}) y (\bar{f}_{uc}) [MPa], corregidos por el factor (k_a) (18) como función de la relación de aspecto ($r.a.$).

	f_{ck}	\bar{f}_{ck} (CoV)	$r.a.$	k_a	f_{uc}	\bar{f}_{uc}
Adobes	(0.75, 1.38)	1.13 (17.3)	-	-	-	-
Mampostería	(1.34, 1.57)	1.43 (6.1)	3.75	0.91	(1.22, 1.43)	1.31

caracterización y ponen de manifiesto la necesidad de profundizar en el estudio de la influencia la relación de aspecto (*r.a.*) como parámetro crítico en la determinación de la resistencia a compresión de la mampostería en tierra (29).

3.2. Mecanismos de fallo

En los ensayos de los especímenes cúbicos el modelo de fallo predominantemente está basado en la formación de grietas inclinadas 45° , (Figura 4). Esta rotura es típica para un mecanismo de fallo por cizalla y cuando existe un dominio de la orientación de las fibras (paja) en la dirección perpendicular a la aplicación de la carga (17).

El patrón de daño y de agrietamiento que aparece en los especímenes de mampostería consiste principalmente en el desarrollo de grietas verticales. Cuando la carga aplicada adquiere valores comprendidos entre el 60 % y el 70 % de la carga máxima comienzan a surgir las primeras grietas en los especímenes ensayados. Esta tipología de fallo es típica en los ensayos de compresión uniaxial de mampostería de fábrica de ladrillo cocido y también ha sido observado por otros autores en ensayos de mampostería de adobe y otros tipos de mampostería (13, 14, 16, 30).

Las orientaciones de las fisuras que se han observado han sido variadas, aunque predominantemente verticales, (Figura 5). En la distribución del daño a lo largo de la altura de los muros, las grietas se alinean con las juntas verticales de la mampostería, siguiendo a lo largo de estas uniones y prolongándose a través de las unidades de adobe intermedias. Se observa que el modo de fallo de la mampostería de adobe presenta un alto grado de homogeneidad entre los diferentes especímenes y su comportamiento monolítico justifica el cálculo de las propiedades mecánicas a nivel macroscópico.

3.3. Módulo de Young

El módulo de Young es también un parámetro crítico en la caracterización mecánica de cualquier material. La alta heterogeneidad de las tierras empleadas en la construcción e investigación, en lo referente a composición, comportamiento y por lo tanto, en las propiedades mecánicas, unida a la falta de

procedimientos que establecen una metodología de ensayos de laboratorio, hacen necesaria una estandarización del procedimiento de cálculo de esta propiedad a efectos de obtener resultados comparables.

El comportamiento de la mampostería de tierra cruda es no lineal e inelástica, por lo que una determinación de un procedimiento estándar del módulo de Young puede usarse sólo para propósitos de comparación entre diferentes muestras, pero no para definir la relación tensión-deformación. No obstante, aunque el comportamiento mecánico del material sólo puede definirse por su ley constitutiva, los valores de las diferentes estimaciones del módulo de Young proporcionan información de utilidad al respecto.

En la presente investigación, el módulo de Young es determinado en base a dos metodologías de obtención de deformaciones, denominadas en este trabajo como deformaciones *locales* y *globales*. Las deformaciones locales son obtenidas a partir de los desplazamientos relativos de los sensores fijados en cada una de las caras del muro y las deformaciones globales se obtienen a partir del desplazamiento del actuador de aplicación de carga.

En las deformaciones globales, se encuentran incluidas las deformaciones de toda la mampostería desde el inicio del ensayo, considerando las correspondientes al asentamiento de la probeta en el comienzo del ensayo sobre los apoyos. Sin embargo, el uso de sensores o metodologías locales muestran valores de deformación más representativos del material debido a la ausencia de distorsión que originan de efectos de borde que se producen en el contacto placa-probeta durante el desarrollo del ensayo.

Diferentes estándares para mampostería de tierra (18, 26), ladrillo cocido (24), rocas (31) y otros materiales (32) consideran aproximadamente lineal la parte de la curva de tensión-deformación comprendida entre $1/3$ y $2/3$ de la resistencia a compresión para la determinación del módulo de Young. De acuerdo con lo anterior, otras investigaciones sobre caracterización mecánica de adobes sugieren que el módulo de Young se determine entre el 30 % y el 60% de la tensión máxima a compresión (33, 34, 35).

En la presente campaña experimental han sido obtenidos tres estimadores del módulo Young: el módulo secante a $1/3$ y $2/3$ del valor máximo de la tensión a compresión ($E_{1/3}$ y $E_{2/3}$ res-



Figura 4. Modo de fallo en los especímenes cúbicos.

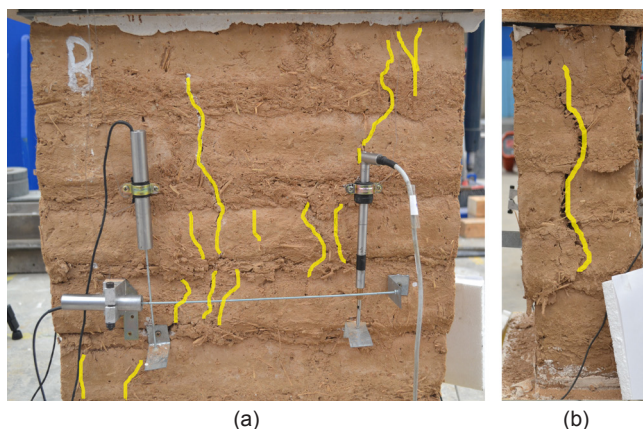


Figura 5. Modo de fallo en la mampostería de adobe: (a) vista frontal y (b) vista lateral del muro.

pectivamente) y el módulo tangente (E_m), definido este último como la pendiente de la cuerda trazada entre esos dos puntos.

Los valores medios obtenidos a partir de las deformaciones locales y globales para los diferentes estimadores y sus correspondientes Coeficientes de Variación (CoV) son mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores de módulo de Young medios a partir de deformaciones globales o locales para los estimadores secantes ($E_{1/3}$ y $E_{2/3}$) y el estimador tangente (E_m). [MPa]

	E_m (CoV)	$E_{1/3}$ (CoV)	$E_{2/3}$ (CoV)
Globales	147.50 (24.8)	105.48 (27.8)	122.02 (24.9)
Locales	460.32 (35.4)	641.72 (53.3)	496.73 (30.7)

En la Tabla 2 se aprecia que la diferencia entre los estimadores del módulo Young es significativa. Los valores medios globales suponen un 32%, 16% y un 25% inferior de los valores medios locales para los estimadores E_m , $E_{1/3}$ y $E_{2/3}$, respectivamente. Asimismo, a partir de las deformaciones globales, el valor medio del estimador E_m es mayor que $E_{2/3}$ y éste, a su vez, es mayor que $E_{1/3}$, ($E_m > E_{2/3} > E_{1/3}$).

Las deformaciones correspondientes al asentamiento del muro, y el efecto de las irregularidades de las superficies de contacto con las placas producen valores de rigidez inferiores para los estimadores del módulo de Young secantes ($E_{2/3}$, $E_{1/3}$) cuando son obtenidos a partir de las deformaciones globales. Al contrario ocurre con los valores medios a partir deformaciones locales, donde el módulo de Young tangente (E_m) es inferior a los módulos de Young secantes ($E_m < E_{2/3} < E_{1/3}$).

Las dispersiones que resultan de los cálculos de los estimadores del módulo de Young, representadas por el coeficiente de variación (CoV), varían entre el 24.8 % y el 27.8 % para el uso de las deformaciones globales y entre 30.7 % y el 53.3 % para el cálculo con deformaciones locales (Tabla 2). La magnitud de la dispersión entre los módulos de Young obtenidos localmente está condicionada por la progresión de la deformación y el comienzo del agrietamiento de cada muro. Debido a que los sensores han sido fijados en la misma ubicación del muro para cada ensayo, variaciones de respuesta de la mampostería a la carga aplicada provoca deformaciones locales diferentes. Esto se ha producido fundamentalmente en las etapas iniciales del ensayo como muestra la dispersión del estimador $E_{1/3}$. Sin embargo, los estimadores del módulo de Young (E_m , $E_{2/3}$) difieren aproximadamente un 7 % entre sí y los valores de CoV para E_m y $E_{2/3}$ son 35.4 y 30.7 respectivamente.

Los estimadores tangentes del módulo Young (E_m) son representados gráficamente para cada metodología de medición de deformaciones (Figura 6).

Existen diferentes propuestas para especímenes de tierra cruda de correlación lineal para la estimación del módulo de Young a partir de la resistencia a compresión, $E = \alpha \cdot f_{ck}$, donde el coeficiente lineal (α) varía entre 160 y 200 (35, 36, 37). La normativa neozelandesa (26), sugiere que el valor del módulo de Young sea tomado como $E_{NZS} = 300 \cdot f_{uc}$ para muros de tierra (tapia o adobe), donde la resistencia a compresión no confinada (f_{uc}) debe ser obtenida a través del factor de corrección (k_a) (18). Para la presente campaña experimental se han obtenido los valores de la correlación lineal (α) a partir del estimador tangente del módulo de Young y la resistencia a compresión no confinada (Tabla 3).

Tabla 3. Valores de la correlación lineal (α) para la estimación del módulo de Young tangente (E_m) a partir del rango de valores y valores medios de la resistencia a compresión no confinada (f_{uc}) y (\bar{f}_{uc}) para la mampostería de adobe según la metodología de obtención de deformaciones.

	α_{global}	α_{local}
E_m / \bar{f}_{uc}	112.60	351.38
E_m / f_{uc}	(103.14, 120.90)	(321.90, 377.31)

El valor del módulo de Young que se obtiene usando el estimador E_m (local), Tabla 2, es un 6.8 % menor que el valor que sugieren las recomendaciones de diseño de la normativa neozelandesa (26), $E_{NZS} = 300 \cdot \bar{f}_{uc} = 429$ MPa. Siendo este valor del estimador el más próximo a la citada especificación técnica cuando son usados métodos locales de medición de las deformaciones.

3.4. Relación tensión-deformación de la mampostería

De los resultados tensión-deformación obtenidos en los ensayos de compresión simple de los seis muros de adobes han sido determinadas dos leyes de comportamiento de compresión mediante aproximaciones polinómicas por tramos. Una propuesta adecuada de las leyes de comportamiento provee una información relevante para describir el comportamiento a compresión de las probetas ensayadas y ofrece la posibilidad de estimar sus propiedades mecánicas.

Son obtenidos dos ajustes polinómico definidos por partes para aproximar la curva media experimental tensión-deformación del ensayo de compresión de la mampostería de ado-

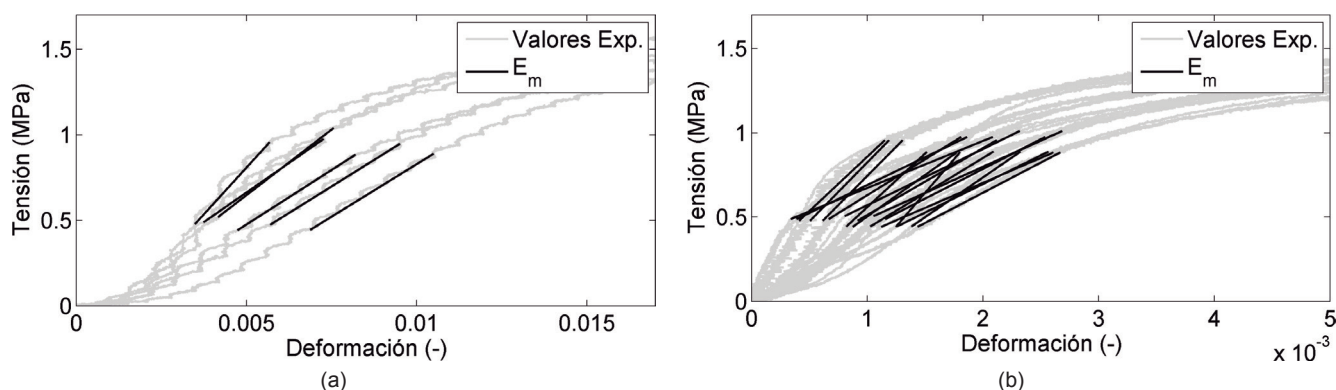


Figura 6. Estimadores tangentes del módulo Young (E_m) para las metodologías de medición de deformaciones (a) global y (b) local.

be para cada una de metodologías de obtención de deformaciones, locales y globales. El ajuste ha sido definido en tres intervalos de deformaciones:

1. El primero corresponde a las deformaciones iniciales, comprendidas en el intervalo entre cero y la deformación a un tercio de la resistencia a compresión aparente $[0, \epsilon_{1/3f_{ck}}]$, es aproximado por un tramo lineal para las deformaciones obtenidas localmente y un tramo definido por un polinomio de segundo orden para las deformaciones globales.
2. La segunda tramo es aproximada por un polinomio de cuarto orden y es definido entre la deformación a un tercio de la resistencia a compresión aparente y la deformación correspondiente a la resistencia a compresión aparente $[\epsilon_{1/3f_{ck}}, \epsilon_{f_{ck}}]$.
3. El último tramo es también aproximado por un polinomio de cuarto orden y es definido entre la deformación correspondiente a la resistencia a compresión aparente y la deformación a la tensión última representada $[\epsilon_{f_{ck}}, \epsilon_{f_{ult}}]$.

Los tramos fueron establecidos según las tres etapas de evolución que se observan durante los ensayos de compresión de mampostería. Inicialmente, hay un ajuste y asentamiento de los platos de carga sobre el muro aproximadamente entre el 0 y el 30 % de la carga máxima. En esta etapa inicial hay una influencia de las irregularidades y falta de paralelismo entre las superficies superior e inferior de la probeta. Durante la segunda etapa, se logra una compresión más uniforme en toda la mampostería, la rigidez aumenta y se alcanza la resistencia máxima. La tercera y última etapa corresponde a la fase de ablandamiento, en esta fase aumenta la dispersión de los resultados y depende de la aparición de daños de cada muro.

Las ecuaciones 1, 2 y 3 muestran los coeficientes de ajuste polinómico para la curva media $\sigma_c(\epsilon_c)$ obtenida a través de las mediciones locales de las deformaciones, donde $\epsilon_{1/3f_{ck}} = 0.003$, $\epsilon_{f_{ck}} = 0.011$ y $\epsilon_{f_{ult}} = 0.03$

$$[1] \quad \sigma_c(\epsilon_c) = 5.470e2 \epsilon_c + 2.763e-17; \text{ si } 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{1/3f_{ck}}$$

$$[2] \quad \sigma_c(\epsilon_c) = -3.263e8\epsilon_c^4 + 1.053e7\epsilon_c^3 - 1.259e5\epsilon_c^2 + 6.721e2\epsilon_c - 0.160e-2; \text{ si } \epsilon_{1/3f_{ck}} < \epsilon_c \leq \epsilon_{f_{ck}}$$

$$[3] \quad \sigma_c(\epsilon_c) = -3.043e7\epsilon_c^4 + 2.430e6\epsilon_c^3 - 7.047e4\epsilon_c^2 + 8.424e2\epsilon_c - 2.133; \text{ si } \epsilon_{f_{ck}} < \epsilon_c \leq \epsilon_{f_{ult}}$$

Las ecuaciones 4, 5 y 6 muestran los coeficientes de ajuste polinómico para la curva media $\sigma_c(\epsilon_c)$ obtenidas a través de las mediciones globales de las deformaciones, donde $\epsilon_{1/3f_{ck}} = 0.0044$, $\epsilon_{f_{ck}} = 0.018$ y $\epsilon_{f_{ult}} = 0.03$

$$[4] \quad \sigma_c(\epsilon_c) = 2.637e4\epsilon_c^2 - 7.644 \epsilon_c - 2.747e-4; \text{ si } 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{1/3f_{ck}}$$

$$[5] \quad \sigma_c(\epsilon_c) = 7.957e6\epsilon_c^4 - 3.009e5\epsilon_c^3 - 1.795e3\epsilon_c^2 + 1.756e2\epsilon_c - 0.244; \text{ si } \epsilon_{1/3f_{ck}} < \epsilon_c \leq \epsilon_{f_{ck}}$$

$$[6] \quad \sigma_c(\epsilon_c) = 1.519e8\epsilon_c^4 - 1.396e7\epsilon_c^3 + 4.693e5\epsilon_c^2 + 6.888e3\epsilon_c + 38.841; \text{ si } \epsilon_{f_{ck}} < \epsilon_c \leq \epsilon_{f_{ult}}$$

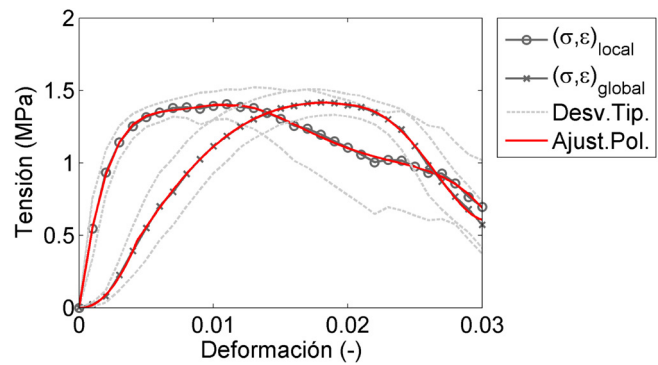


Figura 7. Representación de los ajustes polinómicos de las leyes comportamiento de mampostería de adobe a compresión, valores medios de la curva tensión-deformación y la desviación típica, para cada metodologías de obtención de deformaciones.

Los ajustes polinómicos son representados para las dos metodologías de obtención de las deformaciones empleadas, locales y globales. La desviación típica correspondiente a los valores experimentales ha sido añadida y sustraída a la curva media para cada una de las metodologías (Figura 7).

Como se observa en las curvas que aproximan las leyes de comportamiento de la mampostería de adobe (Figura 7), para las curvas obtenidas por deformaciones locales tiene lugar una menor dispersión en la zona creciente de la curva, específicamente para niveles de tensión en torno a 1 MPa hay aproximadamente 25 % menos dispersión que empleando métodos globales. Asimismo, los muros ensayados llegan a la carga máxima para deformaciones unitarias del orden de 0.01 cuando éstas son calculadas localmente, siendo las deformaciones locales 10 veces menores que las deformaciones globales.

Debido a la naturaleza de la mampostería de adobe, para obtener resultados fiables y comparables con otros resultados es necesario el empleo de métodos locales de medición de desplazamientos, como confirman los trabajos realizados previamente en este sentido (33). La variabilidad de estos resultados depende fundamentalmente de la ejecución de la mampostería, el adecuado reparto del mortero en las uniones, las irregularidades propias de cada ladrillo y la correcta aplicación de la carga durante el ensayo.

3.5. Módulo de Poisson

El módulo de Poisson proporciona información relativa al comportamiento mecánico de la mampostería. Concretamente, permite analizar la evolución de las deformaciones del muro en las direcciones longitudinal y transversal a la aplicación de la carga. El módulo de Poisson es definido para un determinado valor de carga y se calcula aplicando la expresión $\nu = -\epsilon_h / \epsilon_v$, donde ν es el módulo de Poisson y donde ϵ_h y ϵ_v son las deformaciones horizontales y verticales, respectivamente, para un nivel de tensión establecido.

Se han obtenido diferentes valores del módulo de Poisson para determinar la evolución de la propiedad mecánica en función la carga aplicada sobre la mampostería. Para ello, se ha calculado el módulo de Poisson para diferentes niveles de tensión a compresión, definiendo para ello el ratio entre la tensión a compresión y la resistencia a compresión aparente del muro de adobe (σ_c / f_{ck}). Los valores medios y CoV de la campaña experimental de mampostería de adobe son mostrados en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores del módulo de Poisson en función del ratio definido por la tensión de compresión y la resistencia a compresión aparente de la mampostería.

σ_c / f_{ck}	$\nu (CoV)$
0.1	0.0477 (43.7)
0.2	0.0918 (24.3)
0.3	0.1138 (31.4)
0.4	0.1336 (29.6)

Los valores de módulo de Poisson obtenidos demuestran una relación aproximadamente lineal con el nivel de tensión, en concordancia con estudios previos tanto para mampostería de tierra (11, 13) como para suelo-cemento (16). En estos casos los valores del módulo de Poisson también presentan una proporcionalidad aproximadamente lineal con la carga aplicada.

4. CONCLUSIONES

En el presente artículo se ha analizado el comportamiento mecánico a compresión y la metodología de obtención de propiedades mecánicas de compresión para la mampostería fabricada con ladrillos de adobe.

Siete especímenes cúbicos obtenidos mediante corte en seco de ladrillos de adobe y seis muros de mampostería de adobe fueron fabricados y ensayados a compresión simple en los laboratorios de la Escuela de Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla.

De los resultados de la campaña experimental ha sido posible calcular y analizar las propiedades mecánicas de resistencia a compresión aparente y no confinada, módulo de Young y módulo de Poisson. Se han hallado la relación tensión-deformación experimental completa para el ensayo de compresión de la mampostería, así como, un ajuste polinómico por partes para aproximar la ley de comportamiento. Asimismo, han sido estudiadas las singularidades del modelo de daño de las probetas ensayadas.

Durante la ejecución de los ensayos de mampostería se han llevado a cabo dos metodologías para la obtención de las deformaciones, mediante el desplazamiento del actuador de la máquina de ensayos y a través de la colocación de sensores de desplazamiento de tipo LVDT ubicados en caras opuestas de la probeta.

La mampostería fabricada con tierra cruda presenta un comportamiento cuasi-frágil. El modo de agrietamiento que aparece durante los ensayos está compuesto por la aparición de grietas alineadas predominantemente con las juntas verticales de la mampostería, realizando una progresión a través de las unidades de adobe intermedios.

Ha sido aplicado un factor lineal de corrección para eliminar los efectos de confinamiento en los valores de resistencia a

compresión aparente y se han usado los resultados obtenidos para la estimación del módulo de Young a partir de una propuesta de correlación lineal con la resistencia a compresión no confinada.

El módulo de Young se ha obtenido mediante tres estimadores diferentes, dos módulos de Young secantes a 1/3 y 2/3 del valor máximo de la tensión la compresión y un módulo de Young tangente entre esos dos puntos. La diferencia entre los diferentes estimadores empleados para la obtención del módulo Young es significativa.

En el presente estudio han sido analizadas las correlaciones lineales entre el módulo de Young y la resistencia a compresión no confinada. Los resultados obtenidos son comparados con el coeficiente lineal que propone la normativa neozelandesa para muros de adobe y tapia observándose una variación de un 7 % para el estimador del módulo de Young tangente empleando metodologías locales de medición de las deformaciones.

Se han obtenido polinomios de ajuste por tramos a partir de los resultados tensión-deformación seis muros de adobes sometidos a compresión simple. La dispersión de los resultados ha sido comparada para las dos metodologías de medición de las deformaciones, proporcionando menor diferencia con el uso de métodos locales en el tramo creciente de la carga.

Por último, se ha observado que la evolución del módulo de Poisson con respecto a la aplicación de la carga tiene una relación aproximadamente lineal, en concordancia con otras investigaciones y campañas de ensayos de compresión de mampostería de tierra cruda.

Este artículo aporta aspectos de relevancia para la consecución de estándares metodológicos para la caracterización mecánica del comportamiento a compresión de la mampostería de tierra cruda. Asimismo, muestra que es necesario profundizar en esta línea de investigación en aras de establecer criterios normalizados para una obtención de propiedades mecánicas de la tierra cruda que permita la comparación de las mismas y un diseño estructural seguro de este tipo de construcciones. En la actualidad se están complementado estas investigaciones con nuevas campañas experimentales, así como el diseño de modelos numéricos para validar los resultados experimentales de la mampostería de adobe.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido apoyado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades bajo el proyecto BIA2017-91964-EXP, y el Ministerio de Economía y Competitividad, Secretaría de Estado de Investigación, Desarrollo e Innovación a través del proyecto de investigación BIA2016-75042-C2-1-R.

REFERENCIAS

- (1) Blondet, M. (2007, August 15). Behavior of Earthen Buildings. In *Pisco Earthquake*. Oakland: Earthquake Engineering Research Institute.
- (2) Aguilar, R., Marques, R., Sovero, K., Martel, C., Trujillano, F. y Boroschek, R. (2015). Investigations on the structural behaviour of archaeological heritage in Peru: From survey to seismic assessment. *Engineering Structures*, 95: 94-111. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.03.058>
- (3) Blondet, M., Vargas, J., Tarque, N. y Iwaki, C. (2011). Seismic resistant earthen Construction: The contemporary experience at the Pontificia Universidad Católica del Perú. *Informes de la Construcción*, 63(523): 41-50. <https://doi.org/10.3989/Ic.10.017>
- (4) Che, A., Wu, Z., Sun, J. y Qi, J. (2009, September 8-10). Seismic damage characteristics of rural adobe-wood building in Gansu province induced by the Wenchuan great earthquake. *Proceedings of the International Symposium on Geoenvironmental Engineering in Hangzhou, China*.
- (5) Solís, M., Torrealva, D., Santillán, P. y Montoya, G. (2015). Análisis del comportamiento a flexión de muros de adobe reforzados con geomalla. *Informes de la Construcción*, 67(539): e092. <https://doi.org/10.3989/ic.13.141>
- (6) Torres Gilles, C. y Jorquera Silva, N. (2018). Técnicas de refuerzo sísmico para la recuperación estructural del patrimonio arquitectónico chileno construido en adobe. *Informes de la Construcción*, 70(550): e252. <https://doi.org/10.3989/ic.16.128>
- (7) Champiré, F., Fabbri, A., Morel, J.-C., Wong, H. y McGregor, F. (2016). Impact of relative humidity on the mechanical behavior of compacted earth as a building material. *Construction and Building Materials*, 110: 70-78. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.027>
- (8) Yetgin, Ş., Çavdar, Ö. y Çavdar, A. (2008). The effects of the fiber contents on the mechanic properties of the adobes. *Construction and Building Materials*, 22(3): 222-7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.08.022>
- (9) Sasui, S., Watcharin, J. y Sirimas, H. (2017). Variation in Compressive Strength of Handmade Adobe Brick. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 7(9): 38-43.
- (10) González-Sánchez, B., Rosell Amigó, J.R. y Navarro Ezquerria, A. (2017). Influence of ambient conditions into rammed earth compressive strength (pp. 783-788). In *Vernacular and earthen Architecture: Conservation and Sustainability*. Leiden (The Netherlands): Crc Press/Balkema.
- (11) Varum, H., Costa, A., Fonseca, J. y Furtado, A. (2015). Behaviour Characterization and Rehabilitation of Adobe Construction. *Procedia Engineering*, 114: 714-721. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.015>
- (12) Cid, J., Mazarrón, F.R. y Cañas, I. (2011). Las normativas de construcción con tierra en el mundo. *Informes de la Construcción*, 63(523): 159-69. <https://doi.org/10.3989/ic.10.011>
- (13) Silveira, D., Varum, H., Costa, A. y Carvalho, J. (2015). Mechanical Properties and Behavior of Traditional Adobe Wall Panels of the Aveiro District. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(9): 1-14. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001194](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001194)
- (14) Wu, F., Li, G., Li, H.-N. y Jia, J.-Q. (2012). Strength and stress-strain characteristics of traditional adobe block and masonry. *Materials and Structures*, 46(9): 1449-1457. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9987-y>
- (15) Walker, P. (2004). Strength and Erosion Characteristics of Earth Blocks and Earth Block Masonry. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(5): 497-506. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2004\)16:5\(497\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:5(497))
- (16) Reddy, B.V.V., Lal, R. y Rao, K.S.N. (2009). Influence of Joint Thickness and Mortar-Block Elastic Properties on the Strength and Stresses Developed in Soil-Cement Block Masonry. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21(10): 535-542. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2009\)21:10\(535\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:10(535))
- (17) Rodríguez-Mariscal, J.D., Solís, M. y Cifuentes, H. (2018). Methodological issues for the mechanical characterization of unfired earth bricks. *Construction and Building Materials*, 175: 804-814. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.118>
- (18) NZS. (1998). *NZS 4298 Materials and workmanship for earth buildings*. New Zealand Technical Committee.
- (19) Parisi, F., Asprone, D., Fenu, L. y Prota, A. (2015). Experimental characterization of Italian composite adobe bricks reinforced with straw fibers. *Composite Structures*, 122: 300-307. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.11.060>
- (20) AENOR-CEN. (1994). *UNE 103103:1994. Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de casagrande*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).
- (21) AENOR-CEN. (1993). *UNE 103104:1993. Determinación del límite plástico de un suelo*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).
- (22) SENCICO. (2017). NTE 0.80 Diseño y construcción con tierra reforzada. *Reglamento Nacional de Edificaciones*. Servicio Nacional de Capacitación para la Industrial de la Construcción (SENCICO).
- (23) AENOR-CEN. (1998). *UNE-EN 1052-1. Métodos de ensayo para fábricas de albañilería. Parte 1: Determinación de la resistencia a compresión*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).
- (24) AENOR-CEN. (2011). *UNE-EN 772-1. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 1: Determinación de la resistencia a compresión*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).
- (25) Illampas, R., Ioannou, I. y Charmpis, D.C. (2014). Adobe bricks under compression: Experimental investigation and derivation of stress-strain equation. *Construction and Building Materials*, 53: 83-90. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.103>
- (26) NZS. (1998). *NZS 4297 Engineering design of earth buildings*. New Zealand Technical Committee.
- (27) ASTM. (2010). *ASTM E2392-10: Standard guide for design of earthen wall building systems*. ASTM International
- (28) Aubert, J.E., Fabbri, A., Morel, J.C. y Maillard, P. (2013). An earth block with a compressive strength higher than 45 MPa!. *Construction and Building Materials*, 47: 366-369. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.068>

- (29) Aubert, J.E., Maillard, P., Morel, J.C. y Al Rafii, M. (2016). Towards a simple compressive strength test for earth bricks?. *Materials and Structures*, 49: 1641–1654. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0601-y>
- (30) Kaushik, H.B., Rai, D.C. y Jain, S.K. (2007). Stress-Strain Characteristics of Clay Brick Masonry under Uniaxial Compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(9): 728–39. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:9\(728\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:9(728))
- (31) AENOR-CEN. (1993). *UNE 22-950-90, Parte 3. Propiedades mecánicas de las rocas. Ensayos para la determinación de la resistencia. Parte 3: Determinación del módulo de elasticidad (Young)*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).
- (32) ASTM. (2004). *ASTM E111-04: Standard Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus*. ASTM International
- (33) Aguilar, R., Montesinos, M. y Uceda, S. (2017). Mechanical characterization of the structural components of Pre-Columbian earthen monuments: Analysis of bricks and mortar from Huaca de la Luna in Perú. *Case Studies in Construction Materials*, 6: 16–28. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2016.11.003>
- (34) Oliveira, D., Varum, H., Silva, R., Pereira, H., Lourenço, P., y Costa, A. (2007). Caracterização experimental do comportamento diferido de alvenaria de adobe. En *V Seminário de Arquitetura em Terra em Portugal*, 71–74. Aveiro, Portugal.
- (35) Caporale, A., Parisi, F., Asprone, D., Luciano, R. y Prota, A. (2015). Comparative micromechanical assessment of adobe and clay brick masonry assemblages based on experimental data sets. *Composite Structures*, 120: 208-220. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.09.046>
- (36) Adorni, E., Coisson, E. y Ferretti, D. (2013). In situ characterization of archaeological adobe bricks. *Construction and Building Materials*, 40: 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.004>
- (37) Silveira, D., Varum, H., Costa, A., Martins, T., Pereira, H. y Almeida, J. (2012). Mechanical properties of adobe bricks in ancient constructions. *Construction and Building Materials*, 28(1): 36-44. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.046>

* * *