



EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE UN SISTEMA DE REFUERZO PARA MUROS DE ADOBE DE EDIFICIOS HISTÓRICOS

Abraham Roberto Sánchez Ramírez¹, Julia G. Villa²

Instituto de Ingeniería – Universidad Nacional Autónoma de México, México

¹ASanchezR@iingen.unam.mx; ²JVillaM@iingen.unam.mx

Palabras clave: técnica de refuerzo estructural, malla de polipropileno, ensayo de pilas

Resumen

México cuenta con un amplio inventario de construcciones de adobe catalogadas como monumentos históricos, lamentablemente las alteraciones arquitectónicas para la adecuación de sus espacios, la pérdida de prácticas constructivas tradicionales para su correcta intervención, su localización en regiones de alta vulnerabilidad sísmica y sobre todo la falta de mantenimiento, han provocado el colapso de muchas de ellas y otras más se encuentran susceptibles a eventos extraordinarios como son los sismos. En el presente artículo se muestran los resultados del programa experimental para estudiar la contribución de un sistema de refuerzo utilizando materiales sintéticos, para el reforzamiento estructural de muros de adobe de inmuebles históricos, con el propósito particular de resistir cargas laterales como las generadas por los sismos. Como parte del programa experimental se construyeron cuatro muros de adobe a escala natural, con un arreglo de las piezas similar al que se emplea en varias regiones del país. Todos los especímenes fueron sometidos a una combinación de carga axial con carga lateral. Los resultados del programa experimental muestran que la técnica de refuerzo estudiada incrementa ligeramente la resistencia a fuerza cortante, pero sobre todo aumenta la capacidad de deformación de los muros y, en la etapa próxima a la falla, el refuerzo actúa como elemento confinante. Ante carga máxima se observó una distribución uniforme de las grietas, asociado con un comportamiento más eficiente de los muros para tomar cargas laterales, esto en comparación con muros de mampostería del mismo material pero sin el confinamiento.

1 INTRODUCCIÓN

En México, desde Chiapas, al sur, hasta Chihuahua, al norte, se construyó una gran cantidad de edificios de adobe. Las características arquitectónicas relevantes de muchos de ellos han hecho que sean clasificados, con justa razón, como monumentos históricos. El Estado de Chiapas, localizado en una zona de alta sismicidad, tiene un amplio inventario de inmuebles catalogados como históricos y, de éstos el 60% es de adobe; tan sólo la zona de San Cristóbal de las Casas posee el 40% del total de estos edificios. Las construcciones de dos niveles, así como capillas y templos representan cerca del 9% de estos monumentos (Villa, 2019). Actualmente más del 90% de estos edificios se encuentran en uso. Con el paso del tiempo muchos de estos inmuebles han sido objeto de alteraciones arquitectónicas para adecuar sus espacios a nuevos usos y en ciertos casos además se han remplazado total o parcialmente los sistemas de entrepiso, con ello se ha modificado su desempeño estructural. Asimismo, muchos de estos edificios han tenido un comportamiento deficiente ante sismos, esto, aunado a la falta de conocimiento sobre técnicas de rehabilitación y a las restricciones que suelen imponerse a las mismas para su aplicación, en ciertos casos, ha dado como resultado el abandono del inmueble y, en otros, a considerarlos poco dignos, insalubres y peligrosos.

Esta situación ha despertado diversas inquietudes, especialmente de instituciones y centros de investigación en distintas partes del mundo. Una de las corrientes en la investigación ha sido la búsqueda de aditivos estabilizadores para mejorar la resistencia del adobe. Países como El Salvador (Catalán Quiroz, 2013) o Italia (Parisi et al., 2015) han elaborado investigaciones enfocadas a mejorar la capacidad estructural del adobe. Sin embargo, la alta variabilidad de los componentes del adobe de un lugar a otro dificulta la aplicación de los resultados en otros lugares. Por otro lado, se han realizado investigaciones respecto al

refuerzo del sistema constructivo, es decir, incluir elementos de refuerzo para mejorar su comportamiento estructural. Los primeros esfuerzos para reforzar los muros de adobe mediante fibras naturales se realizaron en Perú (Blondet et al., 2011) y El Salvador (Peña; López; Morales, 2008), sin embargo, por las características del refuerzo fueron concebidas para construcciones nuevas, por lo que se dificulta su implementación en edificios existentes. Posteriormente, para mejorar la capacidad estructural de muros existentes se desarrollaron amplios programas de investigación para entender la influencia que, en este tipo de muros, podrían tener capas de mortero reforzadas con malla de gallinero o malla electrosoldada, adheridas a ellos, para mejorar su desempeño. En 1999 Alarcón y Alcocer, en México, realizaron pruebas en muros de adobe recubiertos con capas de mortero cemento-arena reforzado con estas últimas mallas, obteniendo un aumento de más de ocho veces su resistencia a cortante del muro sin refuerzo (Alarcón; Alcocer, 1999). De 1994 a 1999 en Perú también se desarrollaron y aplicaron técnicas de refuerzo con este material en viviendas de adobe existentes, dicho refuerzo probó su efectividad en el sismo de 23 de junio de 2001 (San Bartolomé et al., 2003). Aunque se obtuvieron notables resultados experimentales, la aplicación de esta técnica ha tenido poca aceptación en el campo de la restauración, con el argumento de que este refuerzo no es compatible con el adobe, en particular porque evita la transpiración de la humedad que suele acumularse en la base de estos muros.

No hace más de dos décadas se comenzaron a buscar materiales con mayor compatibilidad con las obras de tierra. Se ha descartado el uso de mallas plásticas económicas por sus características mecánicas poco confiables (Blondet et al., 2011) y también las cuerdas sintéticas que forman una malla por la dificultad de su implementación y por lo poco estético para un monumento histórico (Calixto; Vilcanqui, 2013). En 2002, en Perú inició el empleo de mallas de polipropileno para un proyecto semilla de investigación experimental para construcciones históricas de adobe, comprobando su eficiencia por su compatibilidad con el material y su durabilidad (Torrealva, 2009).

Las variantes en el uso de mallas sintéticas de polipropileno residen en el modo de sujeción de éstas al muro de adobe. Las primeras experiencias se han realizado con clavos de metal, clavijas de plástico con tiras de PVC sujetos con hilos de nylon (Figueiredo et al., 2013); en busca de mejores resultados se ha recurrido a colocar rafias durante el asentado para unir la geomalla a los muros de adobe en sus dos caras. De estas mismas experiencias se ha demostrado la importancia de que los refuerzos estén embutidos en un recubrimiento con lo que se consigue un mejor desempeño del refuerzo (Blondet et al., 2011).

Estos sistemas de refuerzo se han aplicado en edificios históricos en Perú y Chile, posterior a los sismos del 15 de agosto de 2017 de magnitud Mw igual a 8.0 y del 27 de febrero de 2010 de magnitud 8.8 (Mw), respectivamente. Recientemente, con la ejecución del proyecto denominado Tren Eléctrico Urbano de Guadalajara, el Instituto de Ingeniería de la UNAM (IIUNAM) ha colaborado en el diagnóstico de la integridad de los edificios históricos que flanquean la parte subterránea de dicha línea. Durante su participación identificó que varios de estos edificios se encuentran construidos con adobe y que algunos de ellos presentan problemas estructurales (Sánchez; Rodríguez; Meli, 2018). Esta situación despertó el interés por implementar soluciones que resultaran compatibles con las construcciones de adobe, especialmente en edificios históricos de dos niveles. Con las experiencias de El Salvador, Perú, Portugal y México se generó un programa experimental en el laboratorio de estructuras del mismo instituto para estudiar, en cuatro muros a escala natural, la influencia de un sistema de refuerzo formado por una capa de mortero provista de una malla de polipropileno. El programa experimental, así como los principales resultados obtenidos del mismo se comentan en este artículo.

2 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL MATERIAL

El programa experimental contempló la construcción de cuatro muros con adobe nuevo obtenidos de una zona cercana a la localización del laboratorio, por su disponibilidad y elaboración artesanal se eligió un productor de Oxtotipac, Otumba, Estado de México. Para

obtener datos cuantitativos se realizaron mediciones en las proporciones utilizadas para la elaboración de las piezas de adobe así como algunas pruebas de campo recomendadas, como la de “el cigarro” y de “la pastilla” (Carazas Aedo, 2002). También se realizaron pruebas físicas al suelo que corresponde a dos estratos diferentes, Estrato 1, desde la superficie hasta 0,70 metros y Estrato 2, de 0,70 a 1,50 metros, así como pruebas mecánicas para tener la resistencia a compresión axial y cortante.

2.1 Características físicas del adobe

Estas pruebas se realizaron en el laboratorio de Mecánica de Suelos del IIUNAM, bajo las normas ASTM D 2487 – 17 (2017) y ASTM C 136-01 (2001). La clasificación del suelo para el estrato 1 fue ML (limo de baja compresibilidad café oscuro con alto contenido de materia orgánica y presencia de arena media-fina) y para el estrato 2 como MH (limo de alta compresibilidad café claro con bajo contenido de materia orgánica y presencia de arena fina). Las proporciones del suelo del proyecto presentan un alto contenido de suelo fino, más del 82%, la literatura no lo recomienda. Sin embargo, la adición de fibras mejora el comportamiento de un suelo de esta composición, en este caso se recurrió a esta opción usando fibras naturales (zacate y estiércol de caballo).

2.2 Características mecánicas de adobe

Las pruebas se realizaron en el laboratorio de Estructuras y Materiales del IIUNAM empleando la máquina universal y un sistema de captura de movimiento de alto grado compuesto por 2 cámaras conectados a un sistema de adquisición de datos.

a) Ensayo para la determinación de la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad

Este ensayo se realizó de acuerdo a la norma mexicana NMX-C-464-ONNCCE (2010) para determinación de la resistencia a compresión axial (f_m) y módulo de elasticidad (E_m) de pilas de mampostería y se aplicó en nueve pilas con las características geométricas promedio de 12,5 x 60,2 x 25,9 cm (figura 1). El esfuerzo resistente promedio (\bar{f}_m) resultó de 2,14 MPa, superior a resultados en México de 1,31 MPa o 1,21 MPa (Catalán Quiroz, 2013; Meli, 1998) e incluso a resultados internacionales de Portugal (0,33 MPa), China (0,79 MPa), Colombia (1,10 MPa) y Perú (0,86 MPa) (Silveira et al., 2015). El módulo de elasticidad fue calculado con una deformación unitaria axial correspondiente al 15% de f_m y resultó de 76,63 MPa.

b) Ensayo para la determinación de la resistencia a compresión diagonal y módulo

La resistencia a compresión diagonal (v_m) y el módulo de elasticidad a cortante (G_m) se obtuvieron de seis muretes. Las pruebas se realizaron siguiendo la norma mexicana NMX-C-464-ONNCCE (2010) pero por las características de la máquina universal no se aplicaron las velocidades señaladas, las dimensiones promedio de los muretes fueron de 12,5 x 41,0 x 40,8 cm (figura 2). El esfuerzo promedio a compresión diagonal (\bar{v}_m) fue de 0,025 MPa. El módulo de cortante promedio de los muretes (MT-1, MT-2, MT-7) fue de 2,95 MPa.

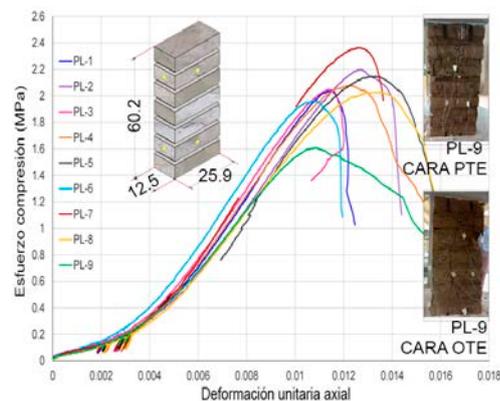


Figura 1. Características geométricas y resultados obtenidos de pilas ensayadas (Crédito: IIUNAM)

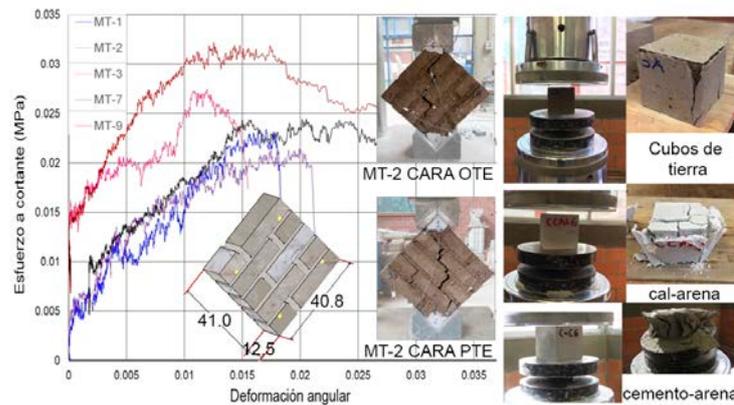


Figura 2. Características geométricas y resultados obtenidos de muretes ensayados, lado derecho pruebas en cubos de mortero (Crédito: IIUNAM)

c) Ensayo para la determinación de la resistencia a compresión de piezas de adobe y morteros

La resistencia a compresión de las piezas de adobe se determinó mediante la norma mexicana NMX-C-036-ONNCCE (2013). Se sometieron a ensayo 8 piezas con una edad promedio de 228 días, se obtuvo un peso volumétrico promedio de $12,75 \text{ N/m}^3$ y una resistencia a compresión axial promedio de $3,18 \text{ MPa}$, superior a la resistencia a compresión axial de las pilas ensayadas. También se ensayaron cubos de los morteros (figura 2) empleados en los muros de acuerdo a la norma NMX-C-061- ONNCCE (2015). Los cubos de tierra tuvieron un peso volumétrico de $13,93 \text{ N/m}^3$ a 177 días de secado y una resistencia a compresión axial entre $2,61$ y $2,96 \text{ MPa}$. El mortero a base de cal y arena empleado en los muros M-1 y M-2 tuvo una resistencia a compresión axial promedio de $0,86 \text{ MPa}$ y el peso volumétrico fue de $12,56 \text{ N/m}^3$. La resistencia a compresión axial del mortero a base de cemento y arena estuvo entre $23,92$ – $25,68 \text{ MPa}$ y peso volumétrico promedio de $17,36 \text{ N/m}^3$. El mortero a base de cemento y arena es ocho veces más resistente que el mortero de tierra y casi 30 veces más resistente respecto al mortero a base de cal y arena.

d) Malla de refuerzo

Estas mallas son un producto comercial y es generalmente empleada en proyectos geotécnicos. La malla de polipropileno se ha utilizado en varios proyectos de refuerzo de muros de adobe en Perú y Portugal (Figueiredo, 2009; Solís et al., 2015; Torrealva; Acero, 2005) con características mecánicas cada vez mayores. La malla utilizada para el presente proyecto es de tipo biaxial, con distancias entre costillas de 4 cm en ambos sentidos, posee una resistencia a daño químico del 100% y a rayos UV de 90% , con una resistencia a tensión de 16 KN/m . La malla de acero tiene una resistencia a tensión de 36 KN/m con una elongación del 6% .

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

De acuerdo al análisis de las características geométricas y constructivas de los muros de edificios históricos se eligió un espesor de 40 cm y se consideró la aplicación de un aparejo compuesto. Las dimensiones generales del muro se determinaron de acuerdo a antecedentes de pruebas de muros de adobe en marcos de carga, es decir, para tener una relación de esbeltez cercana a 1 como en los ensayos realizados en México, Perú y Portugal (Alarcón; Alcocer, 1999; Ojeda Simborth, 2012; Figueiredo, 2009).

3.1 Prototipo de muros y proceso constructivo

Los cuatro muros tuvieron las mismas características geométricas, un espesor de $0,40 \text{ m}$, una altura de $2,43 \text{ m}$ y una longitud de $2,80 \text{ m}$, acompañado de elementos de concreto en la base y en la parte superior para efectos de instrumentación, implementación del marco de

carga y sujeción de la malla. El primer muro, denominado Muro testigo M-1, no tuvo ningún tipo de refuerzo ni recubrimiento; el segundo, Muro reforzado M-2, tiene el sistema de refuerzo a base de malla biaxial de polipropileno en todas las caras, sujetas entre sí con barras de latón en forma de “Z” de 3.18 mm, dispuestas en tres bolillo cada 30 cm de acuerdo a la norma E.080 (2017). Las perforaciones se realizaron en las juntas del muro para evitar dañar las piezas de adobe. Posterior al refuerzo se aplicó un recubrimiento de 3 cm, compuesto de un mortero a base de cal y arena en proporción 1:3 con la adición de fibras de polipropileno en proporción de 8,83 N/m³; el tercer muro, Muro Reforzado M-3, tuvo la misma técnica de refuerzo que el muro anterior, la diferencia residió en el recubrimiento, el cual tuvo zonas circulares definidas que representaron el 43% de la superficie del muro y el resto fue con mortero a base de cemento y arena. El cuarto muro, Muro reforzado M-4, se reforzó con malla electrosoldada sujeta al muro con pasadores de alambre recocido cal. 16, colocados en la misma disposición que los especímenes anteriores. Este sistema de sujeción se contempló en la búsqueda de un mejor comportamiento de la conexión de la malla a través del muro de adobe debido a que algunas de las barras en “Z” de latón, en el ensaye del muro M-2, mostraron un comportamiento medianamente eficiente. El recubrimiento empleado fue a base de cemento-arena y fibra de polipropileno. En la figura 3 se observa el muro tipo, así como los esquemas de refuerzo explicados.

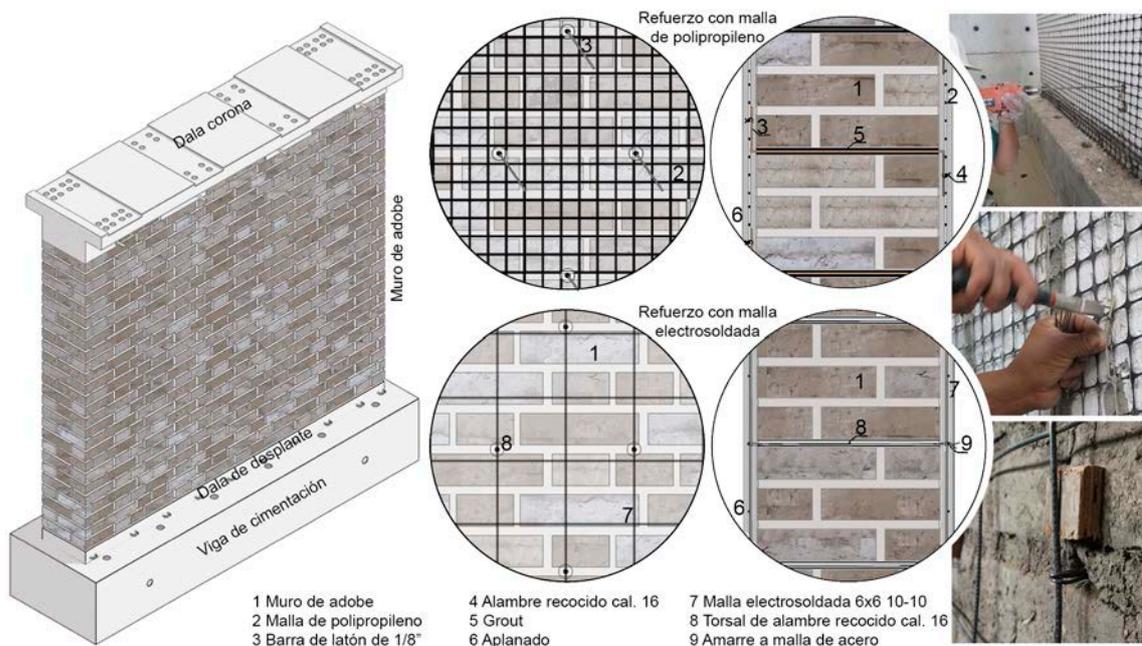


Figura 3. Representación esquemática del sistema de refuerzo e imágenes del recubrimiento (Dibujo: J. Villa, 2018)

3.2 Instrumentación de prototipos

Los cuatro prototipos tuvieron la misma instrumentación para registrar desplazamientos y deformaciones más representativos del espécimen, que son los desplazamientos laterales y las deformaciones verticales y diagonales. Se contempló dos tipos de instrumentación, el primero fueron 11 transductores de desplazamiento variable lineal (LVDT) y el segundo, denominado arreglo óptico, que consta de tres cámaras Optotrak Certus, marcadores led y un sistema de adquisición de datos, por las condiciones técnicas de este equipo se instrumentó solo la cara Oeste del muro. Ambos tipos de instrumentación tuvieron una velocidad de adquisición de datos de 35 datos por segundo, los resultados presentados en este artículo corresponden al sistema óptico.

3.3 Protocolo de ensayos

Los especímenes fueron sometidos a una combinación de carga axial con carga lateral. Por medio de un marco de carga con la aplicación de la carga lateral a través de un actuador

hidráulico MTS (A1), con capacidad de 490,5 KN, con ± 180 mm de carrera, anclado al muro de reacción. La carga axial fue inducida a través de una viga doble I de acero A-36 de fabricación en taller en la que se conectaron dos actuadores hidráulicos MTS (A3 y A4), con capacidad de 981 KN, con ± 180 mm de carrera, en ambos extremos como se observa en la figura 4.

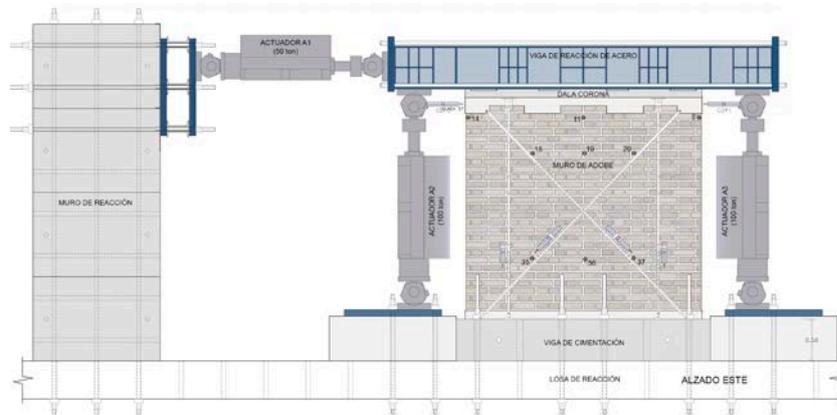


Figura 4. Esquema de aplicación de cargas e instrumentación (Dibujo: J. Villa, 2018)

Para el protocolo de aplicación de cargas laterales se recurrió a la recomendación del apéndice A.7 Protocolo de ensayo de las NTC (2017) referentes a mampostería, basados en cargas calculadas de esfuerzos de fluencia de la mampostería, en una primera etapa en fracciones de este esfuerzo (25% y 50%) y en una segunda etapa, la plástica, se comienza el ensayo por distorsiones, para realizar el máximo posible de repeticiones de carga.

La fuerza cortante resistida por la mampostería se calcula con la ecuación 1 en el apartado 5.4.2 de la NTC (2017). Se tomó $v'_m = 0,015$ MPa, obtenida del murete con menor capacidad a cortante. El esfuerzo axial ejercido a todos los especímenes fue constante durante toda la prueba, considerando 0,26 MPa, obtenido con datos del edificio del Museo de las Artes Gráficas de Guadalajara.

$$V_{mR} = F_R [(0.5v'_m A_T + 0.3P)f] \leq 1.5F_R v'_m A_T f \quad (1)$$

Dónde: V_{mR} : fuerza cortante de diseño que toma la mampostería (N)

F_R : factor de resistencia (1)

v'_m : resistencia a compresión diagonal de la mampostería, referida al área bruta (MPa)

A_T : área bruta de la sección transversal del muro o segmento del muro (mm²)

P : carga axial total que obra sobre el muro, sin multiplicar por el factor de carga (N)

f : factor que toma en cuenta la relación de aspecto del muro (H/L) para calcular la resistencia al agrietamiento por tensión diagonal, se toma como la unidad para este caso

De esta forma se obtuvo el valor al cual se esperaba el primer agrietamiento a cortante;

$$V_{mR} = 80.84 \text{ KN (8 241 kg)}$$

El muro testigo M-1 tuvo un par de ciclos con el 25% de V_{mR} , posteriormente un segundo par de ciclos con el 50% de V_{mR} . Posterior a los cuales se comenzó el control por distorsión, a partir de una distorsión de 0,001 y realizando incrementos de 0,001, por tratarse de un material con mayor fragilidad que una mampostería convencional. El historial de cargas de los muros reforzados incluyó un par de ciclos más, con el 100% de V_{mR} , y el control por distorsión se siguió de acuerdo a la recomendación de la norma con incrementos de 0,002.

4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Las pruebas de los cuatro prototipos se realizaron en los últimos meses del año 2018: el ensayo del muro Testigo M-1 se realizó a los 190 días de construido el muro; el muro reforzado M-2 a los 204 días y con 82 días de edad del recubrimiento; el muro M-3 a los 137

días de secado y el aplanado una edad de 56 días y el muro M-4 a los 132 días y 19 días del recubrimiento.

4.1 Resultados

A continuación, se presentan los daños relevantes de los muros, registrando el momento de la aparición de las primeras grietas a cortante, el desarrollo de los daños durante la prueba y el estado del muro en el último ciclo aplicado.

a) Muro sin refuerzo M-1

La prueba comenzó con la aplicación de la carga axial (260 kPa) y durante esta etapa no se observó ningún daño ante una deformación unitaria axial de 0.0006. Con una distorsión de 0,25% y una carga lateral de 72,99 KN (7.44 ton), apareció una fisura de trayectoria diagonal por las juntas, la carga lateral experimental difiere en un 10% respecto a la fuerza cortante resistente, V_{mR} , calculada. La carga lateral máxima fue de 101,44 KN (10,34 ton) y se presentó con una distorsión de 0,59%. Las grietas se generaron principalmente en las juntas, y en los ciclos con distorsión mayor hubo rotura de piezas. La distorsión máxima aplicada fue de 0,77%, durante el cual los daños consistieron en la apertura de las grietas de los ciclos anteriores (figura 5).

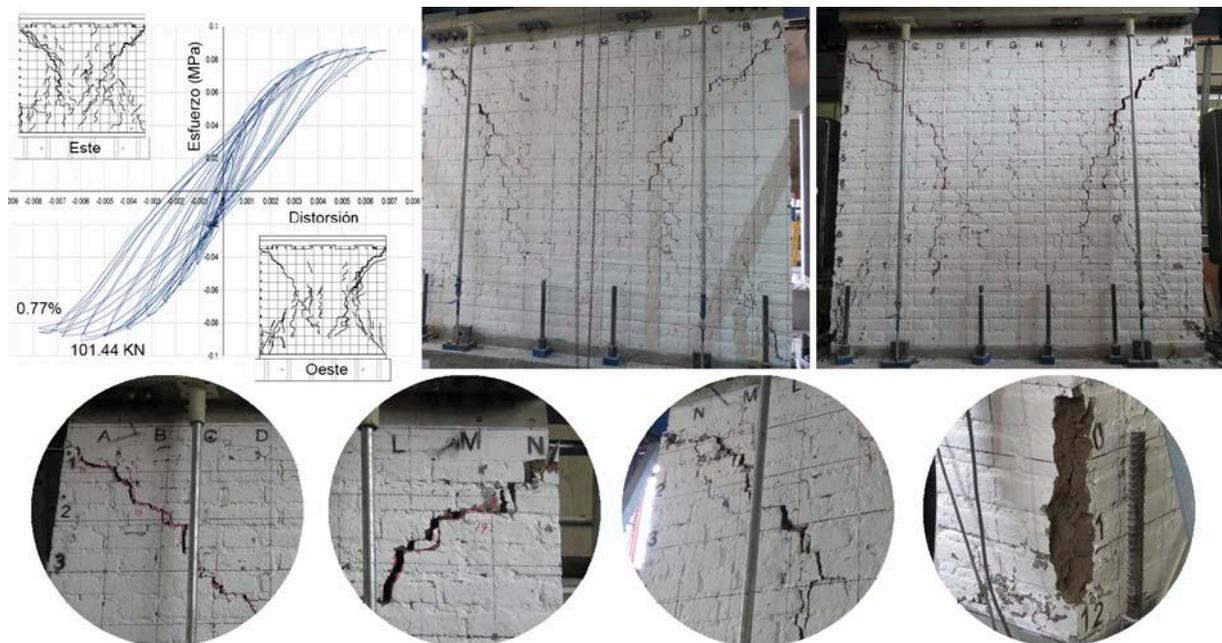


Figura 5. Esquema de curvas de histéresis y daños a cortante de muro M-1 (Crédito: IIUNAM, 2018)

b) Muro reforzado M-2

Como en el muro M-1 no se registró daño alguno por la aplicación de la carga axial. Durante la aplicación del 100% de V_{mR} en la etapa de control por carga (80,84 KN) aparecieron abombamientos del recubrimiento en la parte inferior de la cara sur, sin presentar una trayectoria. Iniciado el control por distorsión, la primera fisura a cortante observada fue con una distorsión de 0,39% y una carga lateral de 93,59 KN (9,54 ton). En los ciclos posteriores se generaron grietas con trayectoria diagonal en toda la superficie del muro. La carga lateral máxima de este muro fue de 111,64 KN (11,38 ton) con una distorsión de 1,15% (figura 6).

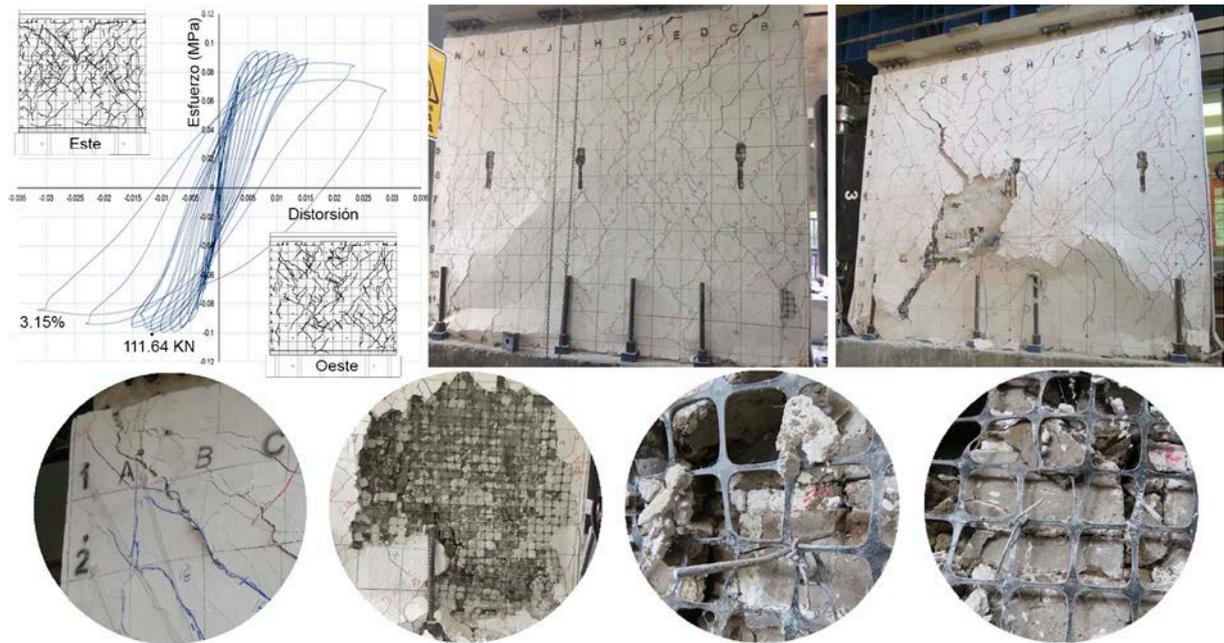


Figura 6. Esquema de curvas de histéresis y daños a cortante de muro M-2 (Crédito: IINGEN, 2018)

La distorsión máxima aplicada fue de 3,15%, donde ya se observaron abombamientos importantes y desprendimiento del recubrimiento y rotura de piezas de adobe. Algunas de las barras en “Z” que se localizaron en la falla a cortante se desprendieron del amarre de alambre recocido con la malla de polipropileno separándose así ésta del muro.

c) Muro reforzado M-3

Aparecieron fisuras horizontales durante la aplicación de la carga axial por flexión y predominaron en las zonas con recubrimiento de mortero a base de cal y arena. Con una distorsión de 0,53% y una carga lateral de 96,73 kN (9,86 ton), comenzaron a surgir fisuras de trayectoria diagonal y se registró la carga lateral máxima de 112,42 kN (11,46 ton), con una distorsión de 1,06%. En los ciclos posteriores la distribución de las grietas continuó y comenzaron a surgir abombamientos del recubrimiento en las zonas de transición de morteros y en la cara oeste se observó la influencia del patrón de las zonas de recubrimiento con las grietas generadas. La distorsión máxima aplicada fue de 2,79% (figura 7). Las barras de conexión en “Z” tuvieron un mejor comportamiento que el muro M-2.

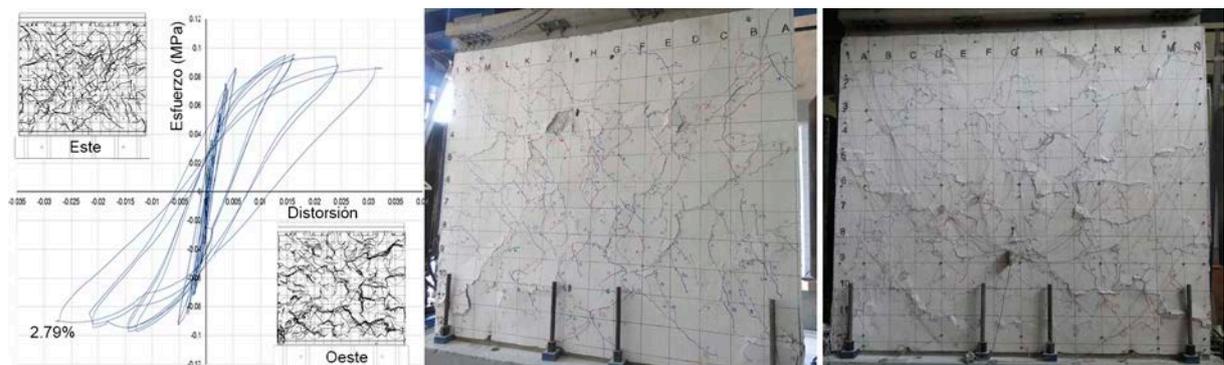


Figura 7. Esquema de curvas de histéresis y daños a cortante de muro M-3 (Crédito: IIUNAM, 2018)

d) Muro reforzado M-4

La mayor cantidad de fisuras que aparecieron en este muro fueron de trayectoria vertical y horizontal, al llegar a una distorsión de 0,50% y una carga lateral de 114,19 kN (11,64 ton) se presentaron fisuras con trayectoria diagonal en la parte central del muro. En los siguientes ciclos no figuraron las fisuras a cortante, incluso con la carga lateral máxima de 121,84 kN (12,42 ton) con una distorsión de 0,78%, este tipo de trayectorias aparecieron

nuevamente en la aplicación de la distorsión máxima. Al terminar la prueba se retiró el recubrimiento para observar el nivel de daño en el muro de adobe, el cual consistió en grietas verticales producto de la concentración de esfuerzos axiales en las esquinas inferiores. En el muro de adobe las grietas diagonales no figuraron (figura 8).



Figura 8. Esquema de curvas de histéresis y daños a cortante de muro M-4 (Crédito: IIUNAM, 2018)

4.2 Discusión

Se monitorearon las deformaciones de los muros de adobe desde la etapa constructiva, en la figura 9 se presentan los datos correspondientes al muro M-1; obtenidos por un extensómetro y con el sistema óptico durante la prueba, comparándolos con la pila PL-9. Presentó deformaciones de hasta 0,0012 durante las maniobras de montaje, con la colocación de la dala de concreto (7,27 kPa) llegó a una deformación de 0,0019 y posteriormente con el esfuerzo provocado por la viga doble I (29,64 kPa) llegó hasta una deformación de 0,0026. En el primer día de la prueba la deformación continuó hasta 0,0032 con un esfuerzo de 260 kPa, ante un incremento de seis veces el esfuerzo axial aplicado, el incremento de la deformación fue de 0,0006. En el segundo día el incremento de la deformación fue de 0,003. La deformación unitaria axial obtenida del extensómetro fue de 0,0035 que es el 32% de la deformación axial máxima de la pila PL-9 con un 13% del esfuerzo máximo de la misma.

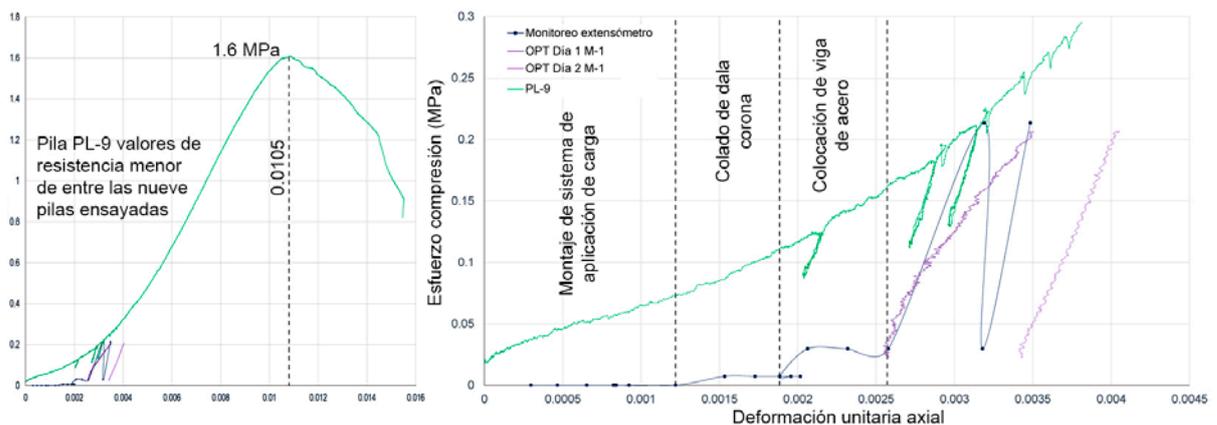


Figura 9. Esquema deformaciones por carga axial en muro M-1 comparado con pila ensayada (crédito: IIUNAM, 2018)

A continuación, se presenta el esfuerzo cortante elástico máximo con su respectiva distorsión, de los muros ensayados: muro M-1 de 26,60 kPa con una distorsión de 0,05%; muro M-2 de 45,91 kPa ante una distorsión de 0,11%; el muro M-3 presentó una resistencia de 49,90 kPa y una distorsión de 0,09% y finalmente el muro M-4 tuvo un esfuerzo de 58,73 kPa y una distorsión de 0,09%. Si bien los resultados del muro testigo están por debajo de los obtenidos en Perú para el mismo muro, registrando 50 kPa y una distorsión de 0,12% y, su muro con refuerzo 50 kPa y una distorsión de 0,13% (Ojeda Simborth, 2012). En términos generales, en este caso, se obtuvo una mayor capacidad de deformación,

ampliando la etapa elástica y permitiendo el doble de la distorsión en el caso del muro M-2 (figura 10).

El esfuerzo cortante máximo del muro M-1 fue de 90,56 kPa con una distorsión de 0,59%; el muro M-2 tuvo 99,66 kPa con una distorsión de 1,15%; el muro M-3 presentó 100,41 kPa con una similar distorsión y el esfuerzo cortante máximo del muro M-4 fue de 108,87 kPa con una distorsión de 0,78%. Con este nivel de distorsiones los daños no fueron significativos debido a que el sistema de refuerzo continuaba en su lugar, al alcanzar una distorsión de 2,0% las piezas de adobe comenzaron a romperse y la malla comenzó a tender a despegarse del muro. El esfuerzo cortante máximo obtenido por la investigación peruana fue de 85 kPa con una deformación angular de 2,5%, la deformación angular máxima fue de 4,3% con un esfuerzo de 72 kPa (muro reforzado con malla de polipropileno y con recubrimiento). El muro reforzado M-2 del presente trabajo alcanzó un mayor esfuerzo a cortante y una distorsión menor lo que representa una mayor rigidez, incluso en la etapa plástica.

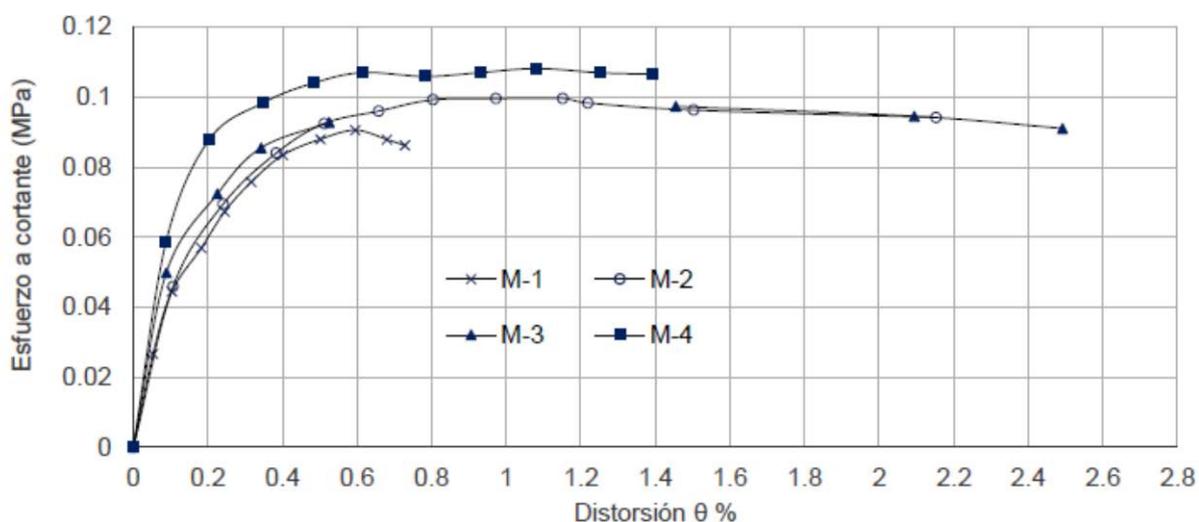


Figura 10. Esquema de envolventes de esfuerzos máximos en cada ciclo vs distorsión (Crédito: IIUNAM, 2018)

El incremento de la resistencia a cortante del muro reforzado M-2 fue de 10,1%, la técnica de refuerzo en el muro M-3 aumenta en un 10,8% la resistencia, mientras que el muro reforzado M-4 incrementa la resistencia en un 20,8%. Los tres casos están por debajo de resultados de pruebas similares. Tomando como referencia los casos realizados en Portugal y Perú, ambas experiencias con un refuerzo de malla de polipropileno y con recubrimiento de mortero a base de tierra, los incrementos de resistencia fueron de 20% y de 32,4% respectivamente.

De los tres muros reforzados, el muro con mayor rigidez fue el muro M-4 (57,62 MPa) más del doble que la rigidez de los muros M-2 y M-3 y 50% más que el muro sin refuerzo. La degradación de rigidez en los muros M-2 y M-3 es prácticamente igual, a partir del ciclo 11 con una distorsión de 0,0025 el muro tiene una pérdida de rigidez similar a los muros reforzados anteriores. El muro reforzado con malla electrosoldada presentó una degradación de rigidez del 78,38% con una distorsión del 0,0080. Mientras que los muros reforzados con malla de polipropileno tuvieron una pérdida de rigidez de 63,45% con igual distorsión (figura 11).

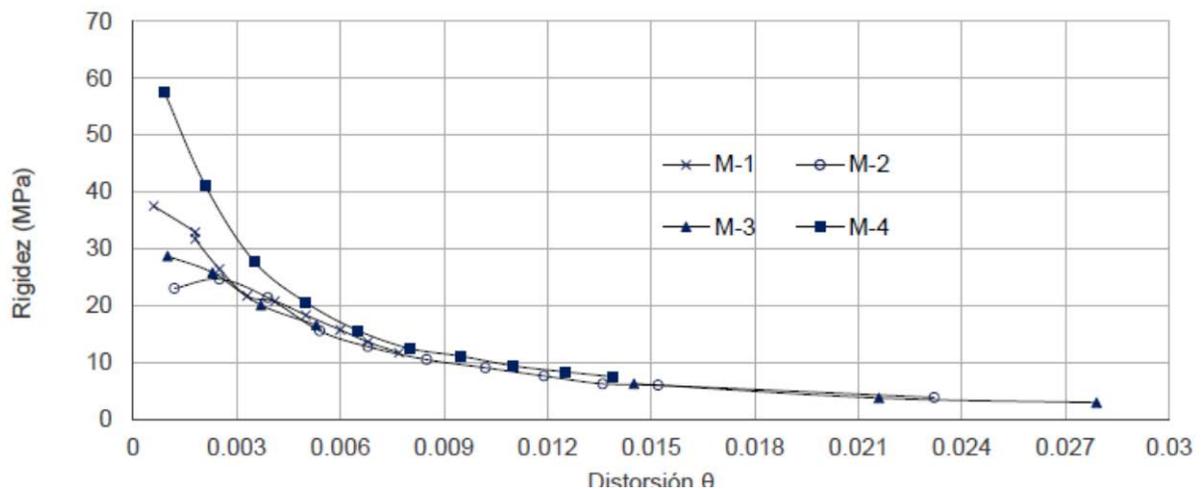


Figura 11. Esquema de degradación de rigidez de ciclo (Crédito: IIUNAM, 2018)

5 CONCLUSIONES

Se observan importantes aportaciones del sistema de refuerzo en la capacidad de deformación de los muros. El muro reforzado M-2 permitió tres veces más distorsión que el muro sin refuerzo, 3,15% y 0,77%, respectivamente. Los otros dos muros, M-3 y M-4, tienen aproximadamente el mismo porcentaje de aumento en la distorsión. El muro M-1 tuvo una resistencia residual de 95,2%, el muro M-2 de 88% (esta resistencia residual es 3% menor al esfuerzo cortante máximo del muro sin refuerzo), el muro M-3 solo tuvo una pérdida de resistencia del 9,3% y el muro M-4 de 4,9%, la resistencia residual de estos dos muros es incluso mayor que la resistencia máxima del muro M-1.

Las barras de sujeción de la malla la mantienen pegada al muro lo que permite que la capa de mortero trabaje en conjunto con el muro de adobe; en cuanto la malla comienza a separarse del muro los daños en éste también se propagan. En el muro M-2, la baja resistencia del mortero de cal provoca que, a niveles altos de distorsión, superiores a 3,0%, el aplanado comience a abombarse y posteriormente a desprenderse. Ante este escenario se concluye que la eficiencia del sistema se incrementa si los puntos de unión están recubiertos con mortero de mejor calidad que el de cal y arena, esto evita que las mallas tiendan a desprenderse.

El refuerzo implementado en el muro M-3 resultó poco efectivo, aunque se reconoce que los daños, ante las mismas distorsiones que el muro M-2, fueron menores, a reserva de hacer estudios complementarios por ahora no se recomienda su uso en la práctica, debido a su baja contribución en comparación con el trabajo que implica realizarlo. Esto, en tanto no se realicen estudios experimentales que avalen la conveniencia de incluirlos como elemento de refuerzo para una construcción existente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alarcón, P.; Alcocer, S. (1999). Ensayos experimentales sobre rehabilitación de estructuras de adobe. XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Memorias. Morelia, Michoacán, México: SMIS. p. 209-217.
- ASTM C 136-01 (2001). Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates USA: ASTM International.
- ASTM D 2487-17 (2017). Standar practice for classification of soils for engineering purses (Unifield soil classification system). USA: ASTM International.
- Blondet, M.; Vargas, J.; Tarque, N.; Iwaki, C. (2011). Construcción sismorresistente en tierra: la gran experiencia contemporánea de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Informes de La Construcción, 63(523), p. 41-50. Disponible en: <https://doi.org/10.3989/ic.10.017>
- Calixto, I.; Vilcanqui, Y. (2013). Técnica dual para reparación y reforzamiento de muros históricos de

- adobe. *Revista Civilizate*, 3, 49–52. Disponible en <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/civilizate/article/view/10129/10566>
- Carazas Aedo, W. (2002). *Adobe. Guía de construcción parasísmica*. Villefontaine Cedex, Francia, CRAterre.
- Catalán Quiroz, P. (2013). *Comportamiento sísmico de la vivienda de adobe basado en pruebas en mesa vibradora de dos modelos a escala*. Tesis de maestría. México: Instituto de Ingeniería, UNAM. Disponible en: <https://doi.org/10.1029/2010JD015435>
- Figueiredo, A. J. P. (2009). *Caracterização de uma solução de reforço sísmico de paredes de adobe*. Grau de Mestre. Portugal: Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro.
- Figueiredo, A.; Varum, H.; Costa, A.; Silveira, D.; Oliveira, C. (2013). Seismic retrofitting solution of an adobe masonry wall. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 46(1–2), p. 203–219. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9895-1>
- Meli, R. (1998). *Ingeniería estructural de los edificios históricos*. México: Fundación ICA.
- NMX-C-036-ONNCCE (2013). *Industria de la construcción - Norma mexicana para la determinación de la resistencia a la compresión de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones y adoquines*. México: Organismo Nacional de Normalización Certificación de la Construcción y Edificación.
- NMX-C-061-ONNCCE (2015). *Industria de la construcción - Norma mexicana para la determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos*. México: Organismo Nacional de Normalización Certificación de la Construcción y Edificación.
- NMX-C-464-ONNCCE (2010). *Industria de la construcción - Norma mexicana para la determinación de la resistencia a compresión diagonal y módulo de cortante de muretes, así como la determinación de la resistencia a compresión y módulo de elasticidad de pilas de mampostería de arcilla*. México: Organismo Nacional de Normalización Certificación de la Construcción y Edificación.
- Norma E.080 (2017). *Diseño y construcción con tierra reforzada*. Perú: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Disponible en: http://procurement-notices.undp.org/view_file.cfm?doc_id=109376
- NTC (2017). *Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería*. México: Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 15 de diciembre de 2017, p.614-688. Disponible en: <https://www.smig.org.mx/archivos/NTC2017/normas-tecnicas-complementarias-reglamento-construcciones-cdmx-2017.pdf>
- Ojeda Simborth, S. F. (2012). *Evaluación del comportamiento estructural de módulos de adobe durante ensayos de simulación sísmica*. Tesis de Magister. Perú: Escuela de Posgrado, PUCP.
- Parisi, F.; Asprone, D.; Fenu, L.; Prota, A. (2015). Experimental characterization of Italian composite adobe bricks reinforced with straw fibers. *Composite Structures*, 122, p. 300–307. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.11.060>
- Peña, E.; López, R. E.; Morales, N. G. (2008). *Informe de resultados de la investigación del sistema constructivo adobe sismo-resistente*. El Salvador, TAISHIN.
- San Bartolomé, A.; Zegarra Ciquero, L.; Quiun Wong, D. (2003). *Técnicas para el reforzamiento sísmico de viviendas de adobe*. XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Retos de la Ingeniería Sísmica en el siglo XXI. Memorias. León, Guanajuato, México: SMIS.
- Sánchez R., A. R.; Rodríguez, M.; Meli, R. (2018). *Estudios de ingeniería estructural para la protección y monitoreo de edificios históricos cercanos a la excavación del túnel para la línea 3 del tren ligero de Guadalajara*. México: Gaceta del Instituto de Ingeniería UNAM, 7–9. Disponible en <http://www.iingen.unam.mx/es-mx/Publicaciones/GacetaElectronica/Documents/GacetaNoviembreDiciembre2018.pdf>
- Silveira, D.; Varum, H.; Costa, A.; Carvalho, J. (2015). Mechanical properties and behavior of traditional adobe wall panels of the Aveiro District. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(9), 04014253. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001194](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001194)
- Solís, M.; Torrealva, D.; Santillán, P.; Montoya, G. (2015). Análisis del comportamiento a flexión de muros de adobe reforzados con geomalla. *Informes de La Construcción*, 67(539), p. 1–10. <https://doi.org/10.3989/ic.13.141>
- Torrealva, D.; Acero, J. (2005). *Uso de materiales naturales y de polímeros en el refuerzo sísmico de*

construcciones de adobe del Proyecto Getty Conservation Institute (GCI) y la PUCP. Lima, Perú.

Torrealva, D. (2009). Diseño sísmico de muros de adobe reforzados con geomalla.

Villa Montes, J. G. (2019). Uso de mallas sintéticas en el refuerzo de muros de adobe de edificios históricos. Tesis de Licenciatura. México: ESIA Zacatenco, IPN.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al señor Aquilino Morales Sánchez su valioso apoyo en la construcción de pilas, muretes y muros de adobe; al señor García Hernández Jorge y a sus colaboradores por participación en la construcción de los adobe; a los estudiantes Alejandro Pérez Araujo, Mariana Matilde Luna Martello, Daniel Sangrador Jacinto, Fidel Martínez Ruíz, Isidro Arenas Toledano, Felipe Martínez Vazquez, Fernando Castro Carrera, María Berenice Hernández Olmos, Hazel Jesus Huerta Santiago, Jennyfer Rodríguez Acosta por su apoyo en el desarrollo del programa experimental. Asimismo, se agradece al Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPED, por facilitar sus vigas de cimentación para el desarrollo de las pruebas y en general al personal del laboratorio de Estructuras y Materiales del IIUNAM por su disposición en la realización de las pruebas.

AUTORES

Abraham Roberto Sánchez Ramírez, Ingeniero Civil, egresado de la facultad de ingeniería de la UNAM; miembro del Instituto de Ingeniería de la UNAM, dedicado a la rehabilitación de construcciones patrimoniales desde hace casi tres décadas.

Julia G. Villa Montes, arquitecta y pasante de licenciatura en ingeniería civil; becaria del Instituto de Ingeniería UNAM, con una investigación enfocada al sistema de refuerzo de muros de adobe.