

Propuesta de refuerzo sísmico con carrizo para mamposterías de adobe en construcciones patrimoniales

Proposal for seismic reinforcement with common reed for adobe masonries in heritage buildings

Gema Mariela Zamora Cedeño (*), María del Cisne Aguirre Ullauri (**), César David Cajamarca-Zúñiga (***), Juan Gabriel Barbecho (****)

RESUMEN

La experiencia mundial sobre la pérdida de bienes históricos corrobora que los asentamientos urbanos patrimoniales construidos con tierra se encuentran en evidente riesgo sísmico. Esta problemática posiciona a las intervenciones de refuerzo estructural como una alternativa para proteger estas edificaciones. En el presente artículo se plantea una propuesta arquitectónica para el refuerzo sísmico con carrizo (*Phragmites australis*) para muros de mampostería de adobe; el proceso metodológico incluye la caracterización del material, construcción de arquetipos, diseño y validación del refuerzo a partir de ensayos físicos que representen el efecto de cargas horizontales en arquetipos con y sin refuerzo estructural. Los resultados experimentales muestran que el ángulo de inclinación de los arquetipos reforzados supera a aquellos sin refuerzo en 17,49%, y el ancho de las fisuras se reduce en 71,47%. También se incrementa la capacidad a flexión y se adapta en 87,32% para uso según criterios de autenticidad, mínima intervención y compatibilidad.

Palabras clave: construcción en tierra; patrimonio arquitectónico; refuerzo sísmico; seguridad sísmica; vulnerabilidad sísmica.

ABSTRACT

World experience on the loss of historic assets corroborates that urban heritage settlements built with earth are at evident seismic risk. This problem positions structural interventions of seismic reinforcement as an alternative to protect this type of buildings. This paper presents an architectural proposal for seismic reinforcement with common reed (*Phragmites australis*) for adobe masonry walls in heritage buildings; the methodological process includes material characterization, archetype construction, design and validation of the reinforcement by the test of physical models that represent the horizontal action of lateral loads on archetypes with and without structural reinforcement. The experimental results show that the angle of inclination of the reinforced archetypes exceeds those without reinforcement by 17.49% and the width of the cracks is reduced by 71.47%, increasing the bending capacity. The project is also 87.32% adapted for use according to criteria of authenticity, minimum intervention and compatibility.

Keywords: architectural heritage; earth construction; seismic safety; seismic reinforcement; seismic vulnerability.

(*) Arquitecta. Libre Ejercicio, Manta (Ecuador).

(**) Arquitecta. Doctora en Patrimonio Arquitectónico por la Universidad Politécnica de Madrid, Madrid (España). Profesora Titular. Universidad Católica de Cuenca, Cuenca (Ecuador).

(***) Ingeniero Civil. Investigador de Doctorado. National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscú (Rusia). Especialista Estructural. Profesor Titular. Universidad Católica de Cuenca, Cuenca (Ecuador).

(****) Ingeniero Civil. Profesor contratado. Universidad Católica de Cuenca, Cuenca (Ecuador).

Persona de contacto/Corresponding author: maguirreu@ucacue.edu.ec (M.C. Aguirre Ullauri).

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9422-7526> (G. Zamora); <https://orcid.org/0000-0002-3179-7839> (M.C. Aguirre Ullauri); <https://orcid.org/0000-0001-8796-4635> (D. Cajamarca-Zúñiga); <https://orcid.org/0000-0002-3524-4019> (J. Barbecho).

Cómo citar este artículo/Citation: Gema Mariela Zamora Cedeño, María del Cisne Aguirre Ullauri, César David Cajamarca-Zúñiga, Juan Gabriel Barbecho (2023). Propuesta de refuerzo sísmico con carrizo para mamposterías de adobe en construcciones patrimoniales. *Informes de la Construcción*, 75(569): e480. <https://doi.org/10.3989/ic.90666>

Copyright: © 2023 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).

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Los eventos sísmicos son amenazas para las construcciones actuales, futuras y sobre todo para las más antiguas debilitadas por el paso del tiempo y la acción de lesiones físicas, químicas, antrópicas, biológicas y mecánicas. La vulnerabilidad de los inmuebles aumenta cuando los sistemas constructivos no responden a las sollicitaciones laterales y de torsión que genera un sismo (1), como es el caso del adobe (2, 3), sin embargo, la tierra y sus múltiples ventajas constructivas extiende su uso y difusión desde las primeras civilizaciones (4-6) llegando a formar parte de la identidad e historia de muchas regiones (7).

Desde la academia se incursiona en las soluciones compatibles para este sector vulnerable: edificaciones de centros históricos localizados en zonas sísmicas, en donde, si bien es cierto, no se provoca el colapso, sí se generan fisuras y desplazamientos que van en incremento, creando un escenario propicio para fallas estructurales irreversibles ante terremotos de alta intensidad. En respuesta, varias técnicas describen soluciones viables (3, 8-16) para el refuerzo estructural de edificaciones patrimoniales contribuyendo a que la investigación actual proponga alternativas que cubran las necesidades del contexto y validen resultados previos.

Actualmente, la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) (17, 18) expone que las intervenciones de refuerzo estructural en edificaciones patrimoniales deben alinearse a normativas internacionales, sin puntualizar intervenciones específicas adaptadas a la realidad local (19). En ese contexto, las soluciones propuestas en estudios previos permiten orientar las acciones y proteger los inmuebles, aunque comprometen sus valores patrimoniales al ser mayormente invasivos. Sobre esta deficiencia el presente estudio contribuye con el desarrollo de una alternativa compatible y de mínima intervención que prioriza dichos valores (20) y mitiga la vulnerabilidad del inmueble.

En este trabajo se plantea el diseño, construcción y evaluación de un arquetipo de mampostería de adobe con refuerzo de fibras vegetales (*Phragmites australis* o carrizo) en edificaciones patrimoniales construidas en tierra cruda emplazadas en zonas sísmicas. Según la realidad sísmica ecuatoriana, el postergar las intervenciones de refuerzo en inmuebles vulnerables puede ser catastrófico, e incluso puede ser considerado como negligencia. Varios autores consideran que se deberá apuntar al campo de la investigación en la búsqueda oportuna de soluciones que se adapten al contexto regional, con materiales y técnicas constructivas locales e incentive la construcción de la cultura de seguridad sísmica.

2. METODOLOGÍA

La presente investigación se fundamenta en el estudio de caso, para lo cual se selecciona la Iglesia de El Sagrario (siglo XVI) (21) en la ciudad de Cuenca (Ecuador) por su capacidad inferencial y exponer daños estructurales evidentes, es decir, supone un escenario ideal para ilustrar un método para combatir las falencias estructurales y posibles pérdidas a causa de las acciones sísmicas. Se parte del diagnóstico del estado de conservación mediante levantamientos planimétricos, altimétricos y de patología estructural para dar a conocer problemas y causas del deterioro.

El estudio se apoya en el análisis de evolución histórica del caso de estudio desde los materiales y sistemas constructivos, lo cual refleja la complejidad y las variables a tomar en cuenta en el análisis de soluciones potenciales en los bienes patrimoniales. En adelante, al conocer la vulnerabilidad se propone la estimación de cargas según los materiales identificados y los usos con la finalidad de definir potenciales zonas de falla en la estructura; por último, se plantea la solución de refuerzo estructural sísmico en muros de mampostería de adobe de carácter patrimonial. La base es un arquetipo con mejor comportamiento a flexión en los ensayos por volteo, así como en la generalización metodológica que se define desde el caso de estudio hacia los bienes con características semejantes.

Según lo previo, no se ahonda en el caso de estudio en sí, y se limita a indicar que se trata de una edificación religiosa de época colonial de construcción mixta, aunque predomina el adobe, e incluye pintura mural. Esta edificación puede ser descrita como un bien patrimonial de alta vulnerabilidad sísmica debido a su configuración arquitectónica, morfológica y estructural (11, 22). A su vez, las patologías estructurales evidenciadas muestran un nivel de afección con urgencia de mantenimiento y acciones de mitigación (11). También muestra predominio de elementos arquitectónicos y estructurales de configuraciones inadecuadas (12, 14, 15) que incrementan la vulnerabilidad sísmica.

Los procedimientos particulares del estudio experimental conllevan: 1) la caracterización del material (adobe), tanto el existente en el bien, como el disponible en el territorio; 2) el diseño y construcción de los arquetipos; 3) los ensayos de los modelos físicos para comprobar cualitativamente la viabilidad de la propuesta.

3. REFUERZO ESTRUCTURAL SÍSMICO

3.1 Caracterización del material

En primera instancia se analizan los bloques de adobe mediante la inspección organoléptica y contraste entre variables definidas como adecuadas e inadecuadas (23) como se indica en la Tabla 1. A continuación, se ejecutan los ensayos de laboratorio para determinar la densidad, porcentaje de humedad, porcentaje de absorción, resistencia a la compresión y flexión. Según la NEC (18, 19), este procedimiento fundamentado en la normativa peruana E.080 sobre *Diseño y construcción con tierra reforzada* (24) está vigente en Ecuador, además, describe la cantidad de muestras que deben analizarse y los valores promedio que se obtiene con las pruebas.

Para la caracterización de las propiedades físico-mecánicas de los bloques de adobe nuevo se utilizan: báscula digital modelo SEK con capacidad de 30kg (0,2942 kN), prensa ACCU TEK 50 con capacidad de 110 T (1078,73 kN).

La selección de la materia prima para la construcción de los arquetipos exige el cumplimiento eficiente de los ensayos físico-mecánicos, resaltando sobre el comportamiento a flexión puesto que, los sistemas a base de tierra como el adobe carece de una adecuada respuesta frente a los esfuerzos de tracción (3, 16, 21, 25). De ello, al considerar que existen escasos sitios de producción de adobe en Cuenca y sus proximidades, y que, existen sitios de producción histórica como Sigcho

Tabla 1. Resultados de la caracterización de los bloques de adobe.

Variables de caracterización	Material nuevo	
	Material Tipo 1	Material Tipo 2
Descripción básica		
Procedencia	Sigcho (parroquia rural de Sinincay)	Racar (San Sebastián, parroquia urbana de Cuenca)
Ubicación exacta	2°50 37,9 S; 79° 1 29,6 O	2°50 30,56 S; 79° 1 28,45 O
Tipo de producción	Disponible y bajo pedido	Disponible
Geometría [mm]	400 x 200 x 170	410 x 210 x 180
Inspección organoléptica		
Olfato	Sin olor particular	Leve olor a tierra
Gusto	Arcilloso	Arenoso
Tacto	Sensación homogénea	Limoso, sensación moderadamente cohesiva y áspera
Vista	Arcilloso con grietas expuestas	Limoso con abundantes partículas finas
	Color pardo amarillento, posible presencia de hierro y materia orgánica	Color oscuro con presencia de materia orgánica, y tal vez hierro y magnesio.
Propiedades físico-mecánicas		
Densidad [kN/m ³]	15,323	15,721
Peso húmedo (Wh) [kN]	122,49	87,475
Peso seco (Ws) [kN]	117,31	81,562
Carga máxima de compresión [kN]	81,545	92,557
Resistencia a la compresión [MPa]	0,983	1,195
Carga máxima en 3 puntos (flexión) [kN]	5,157	4,495
Esfuerzo normal de tracción [MPa]	0,576	0,428

(Sinincay) y Racar (San Sebastián), la selección del material parte de estos sitios.

Con el propósito de evitar la afección del inmueble por tratarse de patrimonio construido, la resistencia a compresión de los adobes de la iglesia fue determinada mediante una prueba no-destructiva de ultrasonido con el equipo PULSAR-2.1, obteniendo una resistencia a compresión de 0,98 MPa. De este modo se estableció una magnitud base para la selección del material nuevo y su similitud con aquellas del material del edificio (Tabla 1). En función de lo indicado, se establece que los adobes elaborados en Sigcho (Sinincay) presentan propiedades similares a los adobes de la edificación.

En el caso del carrizo (*Phragmites australis*) se consideran resistencias a compresión, flexión y tracción respectivamente de 10,812MPa, 42,305MPa y 2,647MPa valores expuestos en investigaciones realizadas en la región (26-28).

3.2 Diseño y construcción del arquetipo

Debido a limitaciones en equipos e instrumentos de laboratorio se plantea la ejecución de pruebas físicas en las que la inclinación proporcionada a los muretes genere la aparición de cargas perpendiculares al plano principal del muro y lo someta a un trabajo fuera del plano que permita evaluar cualitativamente el comportamiento de la propuesta planteada.

El diseño, planificación, construcción y refuerzo de los arquetipos empieza al determinarse la geometría (largo, ancho y alto), puesto que se considera que constituye una

variable significativa que influye en el comportamiento mecánico al momento de los ensayos, misma que deberá ser estudiada a cabalidad en futuras investigaciones. Se parte de los siguientes criterios: si el largo es menor al alto, se genera un elemento esbelto y el arquetipo colapsará con pocos grados de inclinación sin poder identificar el desarrollo de los esfuerzos; si el arquetipo es más largo que alto, se genera un elemento rígido y se necesitará un mayor grado de inclinación para visualizar los daños y el ensayo presentará resultados erróneos (Figura 1). Además, la edificación en estudio posee paredes de mampostería de adobe de una altura de 6,45 m y espesor de 1 m, lo que equivale a una relación $h/e = 6,45$; al aplicar esta relación al arquetipo cuyos adobes poseen 250 mm de espesor, se establece una altura de 1612 mm.

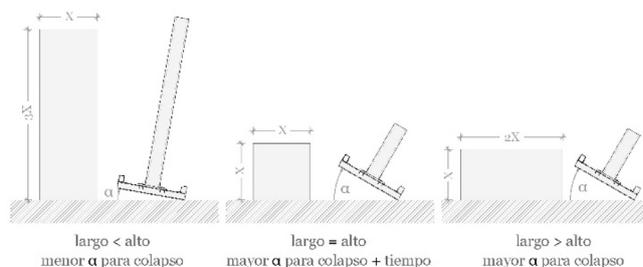


Figura 1. Comportamiento del arquetipo según la geometría.

Se construyen arquetipos de 1000 mm de largo que permiten estudiar el comportamiento de un metro lineal de longitud de muro, 250 mm de espesor en función de la geometría de los adobes utilizados y una altura de 1600 mm, con el propósito de eva-

luar el comportamiento de las muestras ante la acción de cargas laterales.

El arquetipo se levanta con un aparejo simple en sog a con dos a cuatro centímetros de costura de barro entre hiladas y adobes, tomando en cuenta que se construye apenas 5 hiladas (970 mm) el primer día y, las cuatro restantes (630 mm) en días posteriores para alcanzar la altura propuesta de 1600 mm (Figura 2); este proceso constructivo evita asentamientos a causa del peso propio del material (29).



Figura 2. Proceso constructivo del refuerzo.

El proceso de construcción empieza con la preparación del barro puesto que, antes de ser utilizado para las costuras entre adobes y en el revoque final, debe haberse *podrido* al menos quince días; para ello, se mezcla tierra seca y agua hasta tener una consistencia plástica, posteriormente se agrega melaza, paja y cola plástica con la finalidad de mejorar la cohesión entre los materiales². Finalmen-

te se bate hasta conseguir homogeneidad (Figura 2). La práctica de construcción local establece que el periodo de *podrición* del barro sirve para que la mezcla adquiera la resistencia necesaria y requiere batido periódico.

Con el barro en las condiciones descritas se procede a la levantar los muros a partir de una base de madera y acero diseñada como dispositivo de ensayo. A la base se le coloca pequeños tacos de madera separados 120 mm en sentido longitudinal y 60 mm en sentido transversal, con la finalidad de sujetar el muro a la base (Figura 2) y asumir los efectos de deslizamiento entre las interfaces.

Preparada la base, se coloca barro como la primera costura del muro y sobre esta, la primera hilada de 1000 mm de largo; las costuras verticales se realizan igual. El proceso continúa humedeciendo la hilada de adobes con una mezcla acuosa de cola plástica para permitir que la costura de barro colocada encima pueda adherirse de mejor manera. Sobre esta se ubica otro grupo de adobes trabados con el aparejo descrito y de esta forma, se avanza sistemáticamente.

El revoque del muro puede ejecutarse después de un periodo corto de secado (3 a 5 días) para que las costuras logren unificarse de forma adecuada a los adobes. Posteriormente se colocan varias capas de barro y paja (20 mm), haciendo una ligera presión contra el muro para lograr adherir los materiales; la capa final tiene un acabado diferente al pulir la superficie con la llana y agua. Este procedimiento se lleva a cabo en las dos caras del arquetipo logrando 25 mm adicionales en cada una y alcanzando un espesor de 250 mm.

La etapa de construcción de los arquetipos culmina al pintar sus caras, ya que de esta manera se facilita la visualización y análisis de las fracturas durante los ensayos. Los muros sin refuerzo se pintan de blanco y aquellos reforzados se distinguen con una trama geométrica colorida (Figura 2) que hace referencia y emula los elementos pictóricos de valor que se encuentran con frecuencia en inmuebles patrimoniales, además permite cuantificar las afecciones potenciales en la pintura mural al realizar el refuerzo propuesto.

Con los cuatro arquetipos construidos y pintados se procede a estimar el refuerzo de carrizo (*Phragmites australis*) que será implementado en dos de ellos (Figura 3). Se toma como referencia al primer ensayo del muro MSCo1 y se analiza el comportamiento mecánico ante la acción de fuerzas laterales generadas por la inclinación del sistema, se registran los daños posteriores al colapso sugiriendo las zonas que deben ser reforzadas. Finalmente, se determina que el refuerzo se armará con 3 tiras de carrizo atadas (25 mm de diámetro aproximadamente) y colocadas cada 200 mm (Figura 2).

A partir de la estimación del refuerzo se planifica la intervención, contemplando las herramientas y pruebas necesarias para verificar que su aplicación no degrade la estructural del muro. La vibración, el desgaste y desmoronamiento del arquetipo son aspectos que deben mitigarse, por lo que, se experimentan perforando adobes para entender el efecto que causa el uso del taladro. De esta forma, se resuelve que al utilizar dos distintos tipos de broca en un proceso ascendente se minimiza este efecto (Figura 4); por otra parte, es necesario recalcar que se descarta el uso de amoladora u otras

1 Hace referencia al proceso, típico de producción de adobe, en el cual la tierra humedecida se deja reposar y protege de la intemperie para mantener el nivel de la humedad. Otros términos con los cuales se conoce a esta etapa son dormido o fermentado (30).

2 Esta mezcla comúnmente se basa en la sabiduría popular (30, 31) y procede del mismo proceso de producción del adobe. En resistencia a la comprensión se enmarca en un rango que permite conciliarse con la adherencia, 2,46MPa aproximadamente. También incluye, 8% de paja cortada, 16% de agua y 6% de melaza (32).

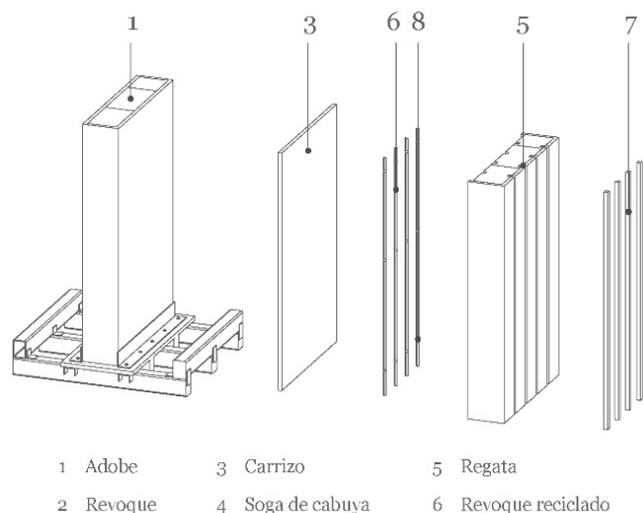


Figura 3. Refuerzo estructural de carrizo.

herramientas debido a su incompatibilidad con intervenciones en bienes patrimoniales al reportar múltiples afectaciones que contradicen el criterio de mínima intervención, y a partir de él, el respeto por la autenticidad e integridad (20). El proceso de intervención inicia con la delimitación de las regatas. Se marca con lápiz el eje cada 200 mm según lo estimado; posteriormente, se dibuja líneas paralelas a ambos lados del eje con una separación entre sí de 30 mm; este procedimiento se realiza en las dos caras del arquetipo coincidiendo en su ubicación para llevar a cabo de manera eficiente los procedimientos posteriores. La delimitación de las regatas se acentúa con herramientas de corte como sierra de mano y cuchilla, llegando a introducirse hasta 25 mm (grosor del revoque), lo cual facilita la remoción íntegra cuando el inmueble y los valores del elemento pictórico lo ameriten; de no ser el caso, el revoque extraído sirve para conformar el mortero de barro con el que posteriormente se cubre la regata (Figura 3 y 4).

Hasta esta instancia la regata tiene 25 mm de profundidad, por lo que es necesario calar en el adobe hasta que el espacio efectivo de trabajo sea de 50 mm y así ingresar tanto el refuerzo de carrizo como el barro que recubre la intervención; este proceso se repite sistemáticamente, pero se debe verificar que las regatas coincidan en ambos lados y si esto no ocurre, debe poderse identificar a tiempo para ser corregido. Ante esto, se procede con las actividades de perforación, que se realizan a tres alturas a lo largo de la regata, utilizando brocas de Ø 10 mm y Ø 16 mm sucesivamente (Figura 4).

En las perforaciones se inserta hilo chillo³ como guía con la ayuda de un alambre, lo que facilita que la soga de cabuya de Ø 10 mm atraviese el muro; se deja un excedente de 80 mm a cada lado del arquetipo para posteriormente sujetar entre sí las barras de refuerzo ubicadas en las caras opuestas del muro. De esta manera se finaliza la preparación del muro para la intervención de refuerzo y se continúa con el armado de carrizo.

³ Se trata de un tipo de hilo de color habano elaborado de poliéster y algodón. Su uso es muy común en Ecuador tanto para la construcción, como en otras actividades artesanales y domésticas. También se le conoce como hilo de chillo.



Figura 4. Proceso de refuerzo.

La implementación del refuerzo de carrizo requiere: cortar la caña longitudinalmente para conseguir varas de 15 mm de ancho aproximadamente; unir con cola plástica tres varas dejando al interior su parte lisa; amarrar a tres alturas con hilo chillo humedecido en una mezcla acuosa de cola plástica y dejar secar al menos 24 horas antes de colocar el refuerzo en las regatas, se humedece la cavidad con cola plástica y se ubica el textil de cabuya de tal forma que envuelva el carrizo cuando este sea instalado; por último, se amarran entre sí los refuerzos situados en las caras opuestas del muro con los 80 mm excedentes de la soga de cabuya (Figura 4).

Al colocar los ocho refuerzos correspondientes a cada arquetipo se lleva a cabo el relleno de las regatas y posterior revoque (Figura 3 y 4), con lo cual concluye la intervención de refuerzo. Frente a esto es necesario recalcar la importancia de reutilizar la tierra de los escombros resultados de calar el muro, la cual se mezcla con agua y cola plástica hasta que tenga una consistencia acuosa para rellenar el interior de la regata; sobre este barro *pobre* se añade el utilizado en las costuras y revocos de la etapa de construcción. De esta manera se termina rellenando y cubriendo la intervención.

De los procedimientos destaca el último, debido a las afectaciones provocadas en la emulación de una pintura mural en el arquetipo cuando las regatas fueron rellenadas y revocas; la técnica presenta falencias porque el 57,5% del elemento pictórico fue afectado, excediéndose en un 38% lo esperado y, por ende, incidiendo en los valores patrimoniales. A diferencia, el proceso de las regatas tan sólo el 12% de la pintura mural se perjudica.

3.3. Ensayos de resistencia a fuerzas laterales

El ensayo se realiza con la ayuda de un dispositivo que inclina el arquetipo y permite generar componentes de carga longitudinal y transversal respecto al plano del muro, a partir de la carga gravitacional vertical. La descomposición de la carga gravitacional provoca flexión negativa en el arquetipo y por consiguiente esfuerzos normales de compresión y tracción en las respectivas fibras de cada cara del arquetipo. De esta manera se simula la acción de fuerzas laterales inerciales que provocan esfuerzos de flexión y corte en el elemento en voladizo (Figura 5).

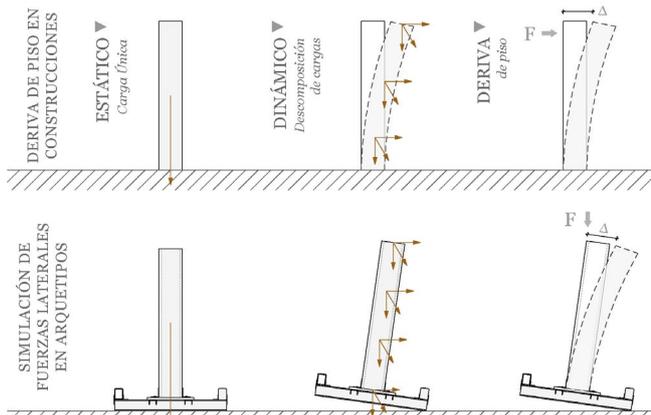


Figura 5. Esquema de simulación de deriva de piso.

Este ensayo permite visualizar el comportamiento del muro, los mecanismos de falla y el registro de fracturas posterior al colapso. Una segunda variante del ensayo incluye un punto de apoyo en la parte superior, generando flexión positiva (Figura 6). Se plantea y describen dos tipos de ensayos para interpretar cualitativamente el comportamiento del arquetipo reforzado. Sin importar el tipo de ensayo, la preparación conlleva la instalación del sistema en el arquetipo, la colocación de la gata hidráulica, las prensas mecánicas y la plomada (Figura 7).

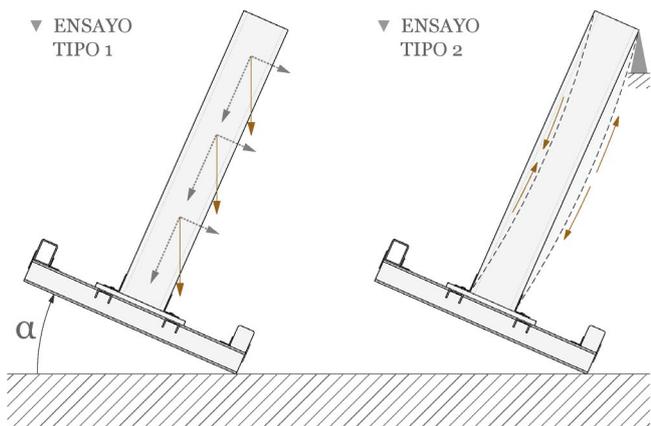


Figura 6. Esquema de los tipos de ensayos.

En cuanto al registro de los resultados, se instala un dispositivo en la estructura metálica para medir los ángulos de inclinación (α); el ensayo se documenta mediante tres cámaras ubicadas estratégicamente para evidenciar desde cada ángulo cómo el muro colapsa y el proceso mecánico asociado (Figura 8).



Figura 7. Actividades previas a ensayos mecánicos de simulación.



Figura 8. Registro y documentación de resultados.

4. RESULTADOS

Los ensayos realizados sobre cuatro arquetipos, dos sin refuerzos y dos reforzados, sometidos cada par opuesto al mismo tipo de ensayo, generan los siguientes resultados:

- MSC01 (arquetipo sin refuerzo y pintura)

En este muro se aplica el ensayo tipo 1 (sin apoyo), y a partir del registro videográfico se identifica que se inclina y colapsa. La fractura principal que ocasiona el desplome se localiza en la base de contacto entre el arquetipo y el sistema metálico. Cuando el ángulo de inclinación es $9,3^\circ$ falla del muro alcanza la amplitud y profundidad máximas.

Se aprovecha el ensayo para observar que en el muro colapsado se visualizan tres grietas a 490 mm, 970 mm y 1430 mm desde la base. Cada una describe cómo el arquetipo se comporta al impactar con el suelo y con la vigueta metálica del sistema. Al desprenderse de la base, cae e impacta en primer lugar con la vigueta generando una fuerza reactiva de impacto que agrieta considerablemente el muro, el elemento restante que cae se impacta con el suelo, y al no estar en el mismo plano, se fractura para lograr asentarse. Las fallas en la zona superior son mínimas y se forman por el impacto del colapso. La grieta a 490 mm de la base recorre la totalidad de la longitud del muro, el ancho es de 192 mm y la profundidad de 158 mm; a pesar del ancho, la profundidad no fue la suficiente para dividir el muro. La grieta ubicada a 970 mm describe que la abertura se presenta desde la cara inferior y tiene un ancho de 237 mm y atraviesa la totalidad del espesor del

Tabla 2. Resultados en ensayos de resistencia a fuerzas laterales.

Descripción		Arquetipos			
Elemento ensayado		MSCo1	MSCo2	MCCo1	MCCo2
Descripción	Sin apoyo	X		X	
	Con apoyo		X		X
	Sin refuerzo	X	X		
	Con refuerzo			X	X
Ángulo máximo de inclinación		9,3°	8,1°	10,6°	9,8°
Fractura	Ubicación (mm desde la base)	(1) 490; (2) 970; (3) 143	(1) 510; (2) 830	(1) 470; (2) 950; (3) 138	(1) 580; (2) 800
	Longitud	1. Recorre la totalidad del muro, 1000 mm. 2. Atraviesa 438 mm desde el extremo derecho. 3. Inicia a partir de 380 mm desde el extremo derecho y culmina entre 381 mm y 761 mm.	1 y 2. Recorre la totalidad del muro y se fractura por la curvatura.	1. Recorre 920 mm desde el extremo derecho. 2. Tanto solo 800 mm desde el extremo derecho. 3. Inicia a los 170 mm desde el extremo derecho y culmina hasta los 800 mm.	1 y 2. Recorre la totalidad del muro y se fractura por la curvatura.
	Ancho	1. 192 mm de abertura desde la cara externa. 2. 237 mm de abertura desde la cara interna. 3. 20 mm en la cara externa.	1. Logra 180 mm de abertura desde la cara interna hasta que fragmenta el muro. 2. Con 70 mm de abertura desde la cara interna logra el colapso.	1. 32 mm de abertura desde la cara externa. 2. 28 mm de abertura desde la cara interna. 3. 19 mm de abertura desde la cara externa.	1. 23 mm en la cara interna. 2. 31 mm en la cara interna. Resultados obtenidos hasta el fracaso del soporte y colapso del muro.
	Profundidad	1. No logra dividir el muro, llega a 158 mm. 2. Igual al ancho del muro, 250 mm. 3. Superficial debido al impacto.	1 y 2. Atraviesan el ancho del muro, 250 mm.	1. No divide el muro puesto que llega hasta 131 mm de forma inclinada. 2. Logra 180 mm de profundidad de forma inclinada. 3. Superficial	1. Se prolonga hasta 138 mm. 2. Atraviesa el muro hasta 210 mm.
Deformada final		Se asienta y se deforma con un perfil poligonal debido a las fracturas.	Sin deformación definida debido a la fragmentación del muro.	Deformación continua y controlada sin marcados ángulos de fractura.	

muro, pero su longitud apenas alcanza 438 mm desde el extremo derecho y no consigue fracturar íntegramente al muro. Por último, la grieta ubicada a 143 mm se identifica como superficial al no registrar una profundidad destacable.

La posición de colapso del muro revela un perfil poligonal, evidenciando las fracturas generadas a partir del impacto con el suelo. Así, el arquetipo MSCo1 describe el patrón de comportamiento frágil, ya que las grietas se presentan en la cara traccionada de la sección transversal, e incluso es a partir de este que se estima el refuerzo estructural contemplando las falencias y buscando aumentar la inclinación y control del agrietamiento.

- MCCo1 (arquetipo con refuerzo y pintura)

El muro es reforzado con carrizo mediante una metodología que respeta los criterios de conservación y se proyecta a resolver el comportamiento estructural sísmico inadecuado en las mamposterías de adobe; a través del ensayo se corrobora alentadores resultados. La documentación videográfica revela que se mantiene un comportamiento monolítico en el muro hasta el colapso y encuentro con la vigueta metálica y el suelo en su última etapa. El muro

presenta fracturas a tres alturas: 470 mm, 950 mm y 1380 mm, pero en la descripción de las mismas se encuentran las diferencias y el mejoramiento obtenido en el comportamiento y la resistencia del muro.

A través del registro del ángulo de inclinación se observa que el muro soporta 10,6° antes de que la fractura en la base genere el colapso, es decir, incrementa el 13,97% en comparación con MSCo1. En cuanto a las grietas el ancho también es considerablemente menor. En el MCCo1 las grietas tienen anchos de abertura de 32 mm, 28 mm y 19 mm respectivamente para las alturas ubicadas a 470 mm, 950 mm y 137 mm desde la base respectivamente, lo que representa un 86% menor ancho de grietas respecto al muro no reforzado. En cuanto, a la profundidad de las grietas, ninguna sobrepasa el ancho del muro para dividirlo o fracturarlo como se visualiza en MSCo1 (Tabla 2 y Figura 9).

La posición deformada de colapso revela un resultado significativo para comprobar la efectividad del refuerzo. Se presenta continua y controlada, sin marcados ángulos de quiebre, lo que denota el trabajo del refuerzo. La eficiencia del refuerzo destaca que incluso al tratar de apartar el arquetipo para realizar el siguiente ensayo, no se pudo movilizarlo por

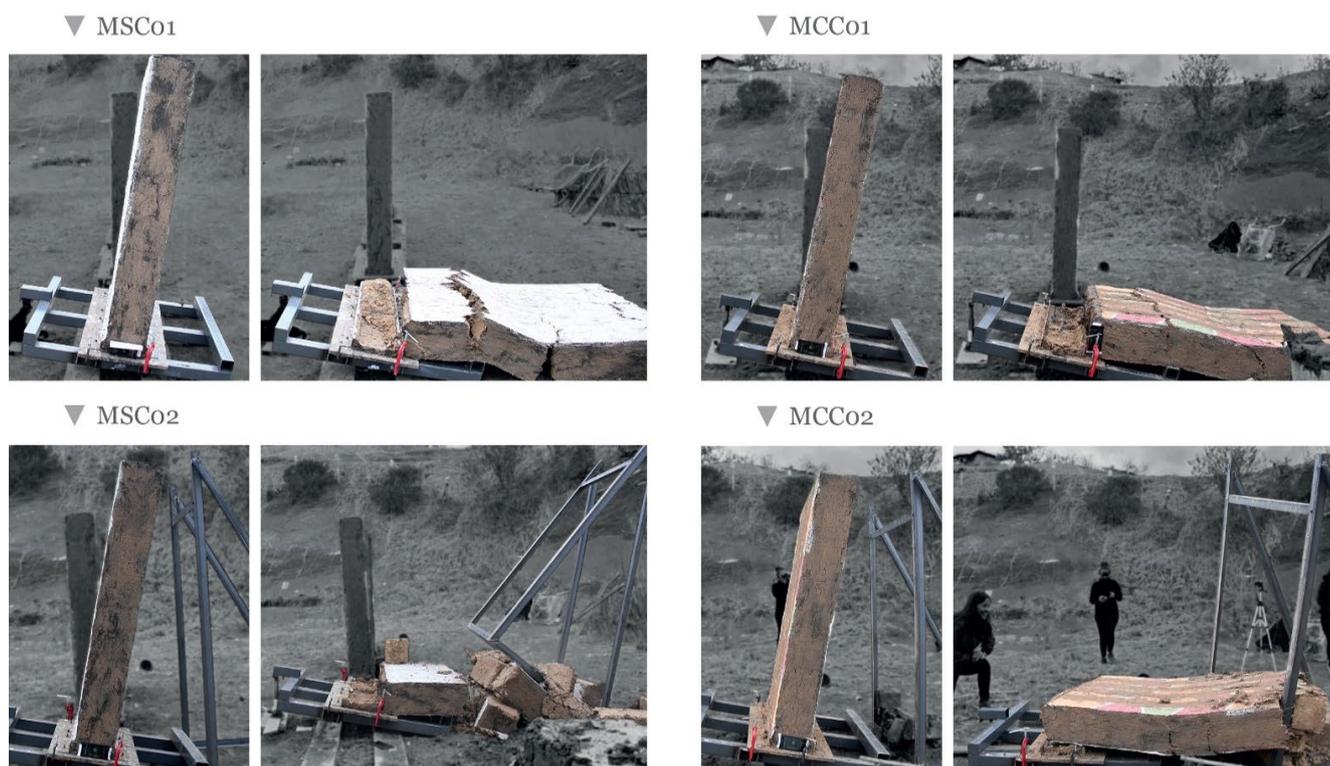


Figura 9. Resultados en ensayos de resistencia a fuerzas laterales.

partes, ya que el refuerzo ni el adobe estaban lo suficientemente fracturados.

- MSC02 (arquetipo sin refuerzo y pintura)

El segundo muro no reforzado se somete al ensayo tipo 2 con un apoyo en la parte superior (Tabla 2 y Figura 9). Al alcanzar un ángulo de inclinación de $8,1^\circ$, el arquetipo se fractura en la base, se desplaza y entra en contacto con el apoyo de la parte superior de un caballete diseñado para dicha actividad. Conforme se incrementa la inclinación, las fibras de la cara superior se comprimen y las inferiores se traccionan. En pocos segundos el arquetipo colapsa y se desploma totalmente disgregado al suelo. El ensayo describe dos fracturas, una a 510 mm y a 830 mm desde la base, ambas inducidas por la acción de las componentes transversales de la carga gravitacional y el apoyo externo. Antes del colapso describen un ancho de 180 y 70 mm respectivamente, con una longitud y profundidad que recorre la totalidad del muro y atraviesa los 250 mm de espesor fragmentándolo completamente. El impacto contra el suelo y el caballete disgrega el muro en varios fragmentos.

La fractura primaria se visualiza en la base y en este caso, se separa la primera hilera de adobe de la primera junta de mortero sin ningún inconveniente, evidenciando la unión ineficiente del muro con el elemento de soporte. Los resultados del ensayo de este arquetipo presentan una deformada particular; es el único caso en el que el muro se disgrega y no presenta un perfil definido debido a la baja resistencia ante las acciones involucradas. En conclusión, es necesario ubicar el refuerzo en ambas caras, tanto para arriostrar los refuerzos y generar algún nivel de confinamiento del elemento, como para asumir la inversión de esfuerzos propia de las cargas sísmicas.

- MCC02 (arquetipo con refuerzo y pintura)

El arquetipo reforzado se somete al ensayo tipo 2. El comportamiento mecánico del arquetipo es igual al descrito en MSC02, en donde se identifica un ángulo máximo de inclinación y un punto de apoyo en la parte superior que genera la aparición de momentos flectores y fuerzas cortantes (Tabla 2 y Figura 9).

El arquetipo alcanza $9,8^\circ$ de inclinación antes de la fractura principal en la base, soporta un 21% más de inclinación y la correspondiente magnitud de fuerza lateral en comparación con MSC02. Con el incremento del ángulo, el arquetipo colapsa, pero esta vez no se registran fracturas múltiples o grandes áreas disgregadas. Se localizan dos fracturas a 580 mm y 800 mm desde la base, las cuales recorren la totalidad de la longitud del muro en su cara inferior, con anchos de 23 mm y 31 mm respectivamente, y profundidades de 138 y 210 mm, sin llegar a atravesar el espesor del muro. El arquetipo reforzado controla de mejor manera los estados límite de fisuración y fractura; dichos factores permiten que la deformada final sea continua, incluso más que MCC01.

Concluidos los ensayos, los resultados (Tabla 2 y Figura 9) muestran que el refuerzo con carrizo representa una mejora significativa en el comportamiento estructural de muros de mampostería de adobe. Por otra parte, se evidencia el respeto a los valores patrimoniales y la intervención estructural puede conjugarse efectivamente con ellos para lograr la correcta mitigación de los riesgos asociados.

5. DISCUSIÓN

Existen diversas técnicas constructivas basadas en tierra cruda, llegando a considerarse distintas en cada localización

geográfica. Esta aseveración puntualiza que, los inmuebles de tierra no sólo tienen un valor histórico por la antigüedad, sino por llevar consigo el patrimonio inmaterial de la población. De esta manera, al ser la construcción de adobe parte del patrimonio material e inmaterial, se enfatiza en su estudio para entender cómo mitigar su vulnerabilidad y garantizar cierta seguridad sísmica (14, 16, 20).

El comportamiento deficiente de las construcciones en tierra cruda lo define la relativamente baja resistencia del material a esfuerzos de tracción y corte. Se estima que los daños pueden ser mitigados si se implementan refuerzos que aporten y mejoren la capacidad ante tales sollicitaciones. Asimismo, los inmuebles construidos en tierra pueden sobrellevar las acciones sísmicas si son diseñados y construidos con regularidad en planta, contrafuertes, distancias vano-vano y vano-esquina adecuadas, cubiertas y entresijos livianos, apoyos eficientes de la estructura de cubierta-muro y esquinas confinadas (17, 22); además, el mantenimiento periódico se presenta como una alternativa eficiente para conservar el inmueble y mejorar su comportamiento ante actividad sísmica.

Este aspecto es fundamental para precautelar el estado de los inmuebles puesto que, si bien no se puede modificar su configuración arquitectónica y estructural para cumplir con las determinantes descritas, se dirigen los esfuerzos a intervenciones puntuales que prevean y solucionen lesiones con incidencia en la resistencia de la estructura.

Hasta este punto se presenta especial énfasis en la vulnerabilidad del material, pero, para que pueda considerarse un riesgo relevante es necesario conocer la amenaza. Se ha encontrado coincidencia geográfica de las zonas de alto peligro sísmico con las regiones de construcción en tierra, localizando las zonas de actividad sísmica permanente a nivel mundial coincidentes con ciudades Patrimonio Cultural de la Humanidad (16). Esto permite establecer la relevancia de las consecuencias negativas que tendrán que sobrellevar los monumentos históricos en caso de ocurrir un sismo de alta intensidad. Tal como se indica, el problema es generalizado y frente a este, se proponen soluciones que aporten a los muros de mampostería de adobe de diferentes edificaciones la resistencia a tracción que carecen, mediante fibras vegetales como el carrizo.

Según investigadores (1, 2, 16, 33) y la experiencia multidisciplinar, la propuesta planteada es una alternativa compatible y eficiente como refuerzo, misma que merece ser estudiada a profundidad y mejorada, sobre todo al considerar que no hay constancia de ensayos a escala real de muros gruesos de adobe como los de adobe que se encuentran comúnmente en Europa y América, y que el comportamiento de los muros fuera del plano y la respuesta sísmica de los muros de esquina no se conocen del todo, a pesar de su gran importancia en la respuesta sísmica de los edificios históricos de adobe (16).

El presente trabajo ha priorizado y seleccionado el carrizo como la fibra vegetal para diseñar el refuerzo debido a que posee alta resistencia a tracción, existe disponibilidad en el contexto local, es de bajo costo, no es una especie protegida y principalmente, porque forma parte de la cultura constructiva local.

Múltiples investigaciones proponen refuerzos estructurales en obras nuevas y patrimoniales con distintos materiales y técnicas, unas más invasivas que otras (16, 18, 20, 34-39). La discusión de la efectividad y validez para su uso en el patrimonio construido en tierra define que la aplicación del metal, plástico o materiales similares comprometen los criterios de compatibilidad y autenticidad; por otra parte, las acciones agresivas con herramientas y métodos que requirieren una considerable modificación en los elementos patrimoniales descartan los criterios de mínima intervención y reversibilidad.

A través de esta valoración se entienden los errores y se construyen alternativas que aporten al mejoramiento estructural, sin comprometer los criterios patrimoniales, la identidad y el valor del inmueble. Así, se reconoce la importancia de la elección o diseño de la intervención y su desarrollo en un contexto y condición singular, ya que cada edificación posee diferentes requerimientos para minimizar los efectos sísmicos (14, 15, 20). Con este objetivo se plantea un método que descarta materiales y soluciones de poca efectividad mediante ensayos e interpretación de dichos resultados, definiendo las estrategias antes de ser aplicadas.

En cuanto a la intervención de refuerzo estructural sísmico, se establece que es apto para la aplicación en edificaciones de valor patrimonial ya que respeta los criterios de conservación (7). El criterio de autenticidad se cumple en un 98,78%, debido a que únicamente el 4,8% de la totalidad del volumen de material del arquetipo es extraído al momento de realizar las regatas y el 3,58% del volumen total es devuelto para el relleno del reforzamiento, es decir, se pierde únicamente el 1,21% del material original debido a la inclusión de los carrizos. El criterio de mínima intervención se mantiene en un 90%, el 10% de la totalidad de la superficie es afectada en la delimitación de las regatas, la perforación del muro no se contempla en el porcentaje ya que describe efectos no considerables.

La reversibilidad es el criterio más comprometido, conserva el 77% del material, ya que en el proceso de relleno de las regatas, la superficie es afectada en un 23%, variando en función de la prolijidad con la que se realice dicha actividad. La compatibilidad de la intervención de carácter patrimonial es determinada por la potencial semejanza entre las características mecánicas de los adobes existentes en el inmueble y los utilizados en los arquetipos. Debido a esto el criterio se cumple en el 83,5%.

Los resultados comprueban la factibilidad de la propuesta de refuerzo desde el aspecto patrimonial. Además, en la comparativa de los ensayos realizados destaca la deformada final y a partir de la primera observación se determina que los arquetipos reforzados (*MCCo1* y *MCCo2*) presentan mejor comportamiento frente a los arquetipos sin refuerzo (*MSCo1* y *MSCo2*). Es decir, se establece que el refuerzo planteado tiene cualitativamente la capacidad de disminuir considerablemente el riesgo de colapso repentino de bloques enteros del muro, que es un mecanismo de daño muy común resultante de la respuesta de flexión fuera del plano de los muros durante un sismo (16).

El análisis de las fracturas provocadas en el colapso y el ángulo máximo de inclinación muestra resultados favorables para los arquetipos reforzados. En cuanto al ancho de la fractura

se destaca que al ensayarse sin apoyo (*MSC01* y *MCC01*) estas logran reducirse en promedio en un 58,84% en el caso de los muros reforzados, siendo aquella localizada a los 970mm (*MSC01*) y 950 mm (*MCC01*) la que presenta mejores resultados reduciéndose en un 88,18%. Los arquetipos ensayados con apoyo (*MSC02* y *MCC02*) reducen el ancho de las fracturas en un 71,47%, siendo aquella localizada a los 510mm (*MSC02*) y 580 mm (*MCC02*), la que presenta mejores resultados reduciéndose en un 87,22% (Tabla 2 y Figura 9).

Se comprueba la efectividad del refuerzo de carrizo al evidenciar que los arquetipos *MCC01* y *MCC02* logran superar el ángulo de inclinación de *MSC01* y *MSC02* en un 17,49% en promedio. El 13,98% corresponde a los muros en voladizo (*MSC01* y *MCC01*), y 20,99 % a los apoyados (*MSC02* y *MCC02*) (Tabla 2 y Figura 9). Es decir, la propuesta de refuerzo evidencia cualitativamente un mejor comportamiento estructural de los modelos ante la acción de fuerzas horizontales que general solicitaciones fuera del plano del muro.

6. CONCLUSIONES

El patrimonio construido lleva inmerso identidad e historia. Ante esto, es alarmante asentar la probabilidad de impacto y pérdida ante terremotos que configuran una amenaza permanente. Dicha condición se convierte en riesgo sólo si ante la amenaza se describen vulnerabilidades como la antigüedad de las construcciones, sistemas y materiales con resistencias inadecuadas, configuración morfológica y estructural ineficiente, entre otras.

REFERENCIAS

- (1) Vargas, J. (1983). Terremotos y estructuras de tierra. En Mutal, S. (coom). *Simposio Internacional y curso – taller sobre conservación del adobe. Simposio Internacional y curso - taller sobre conservación del adobe* (pp. 75-82). Lima-Cuzco: PNUD/UNESCO e ICOMOS. Retrieved from https://www.icrom.org/sites/default/files/2018-02/1983_mutal_adobe_spa_32420_light.pdf
- (2) Blondet, M., Vargas, J., Tarque, N. y Iwaki, C. (2011). Construcción sismorresistente en tierra: la gran experiencia contemporánea de la Pontificia Universidad Católica del Perú. *Informes de la Construcción*, 63(523), 41-50. <https://doi.org/10.3989/ic.10.017>
- (3) Yamín Lacouture, L., Phillips Bernal, C., Reyes Ortiz, J., y Ruiz Valencia, D. (2007). Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas de adobe y tapia pisada. *Apuntes: Revista de Estudios sobre Patrimonio Cultural – Journal of Cultural Heritage Studies*, 20 (20), 286–303. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1657-97632007000200009&script=sci_abstract&lng=es
- (4) Rojo, S. (1983). Construcción en adobe. Ejemplos de restauración, 61 – 65. En Mutal, S. (coom). *Simposio Internacional y curso – taller sobre conservación del adobe (61-65)*. Lima-Cuzco: PNUD/UNESCO e ICOMOS. Retrieved from https://www.icrom.org/sites/default/files/2018-02/1983_mutal_adobe_spa_32420_light.pdf
- (5) Vieira Hoffmann, M., Negrini Minto, F., y Falleiros Heise, A. (2011). Tapia. En Neves, C. y Borges, O. (org). *Técnicas de construcción con tierra* (46-61). Bauru: FEB-UNESP y PROTERRA. Retrieved from https://www.academia.edu/35702284/T%C3%A9cnicas_de_construcci%C3%B3n_con_tierra
- (6) Hernández, J. (2016). *Construcción con tierra: Análisis de conservación y mejora. Un caso práctico en Senegal* (Trabajo de fin de grado). Universidad Politécnica de Catalunya. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2117/107822>
- (7) Correia, M. (2007). Teoría de la conservación y su aplicación al patrimonio en tierra. *Apuntes: Revista de Estudios sobre Patrimonio Cultural*, 20, 202-219. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/apun/v20n2/v20n2a03.pdf>
- (8) Mavroulis, S., Alexoudi, V., Grambas, A., Taflampas, I., Lekkas, E., y Carydis, P. (2019). Protection of Historical Structures and Interventions for Repair and Strengthening with emphasis on Antiseismic Conservation. En Aguilar R., Torrealva D., Moreira S., Pando M.A. y Ramos L.F. (eds). *Structural Analysis of Historical Constructions (2133-2141)*, Vol. 18. Springer, Cham: RILEM Bookseries. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99441-3_229
- (9) Hernández, F.A. (2016). *Intervención post terremoto en edificaciones de adobe con protección patrimonial* (Tesina de fin de Master). Universidad Politécnica de Catalunya. Retrieved from <https://n9.cl/jry5f>
- (10) Carazas, W. (2002). *Adobe: Guía de construcción parasísmica*. Ediciones CRATerre: Francia. Retrieved from <http://repo.fundasal.org.sv/id/eprint/56>
- (11) Ministero per i Beni e le Attività Culturali. (2006). Linee guida per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni (Inf. Téc.). Luglio: Ministero per i Beni e le Attività Culturali. Retrieved from <https://n9.cl/yxn7v>

La experiencia internacional sobre la pérdida del patrimonio construido en tierra corrobora que los inmuebles de carácter religioso tipo iglesia son los más vulnerables. Por ello, la delimitación y contextualización de esta problemática se enmarca la investigación para ampliar la visión de la conservación de bienes con valores relevantes, más cuando, antecedentes sísmicos como los ecuatorianos, recalcan que la amenaza es permanente, inevitable y muy probable, e incluso el hecho de que, la pérdida del patrimonio construido por esta causa no es justificable.

Los resultados de este estudio se presentan como un hito en la generación de conocimientos para mitigar la vulnerabilidad sísmica de inmuebles patrimoniales construidos con adobe y presencia de pintura mural. El planteamiento del refuerzo y metodología de experimentación fueron ideados por el tercer autor como un paso inicial para obtener información de partida que permita justificar una consiguiente investigación y el desarrollo de la propuesta a nivel estructural con el uso de modelos matemáticos y validación experimental.

El reforzamiento propuesto respeta los criterios de conservación en un 87,32%. La efectividad del refuerzo determina que los arquetipos reforzados reducen el ancho de las fracturas en un 88,18% y logran obtener un ángulo de inclinación 13,98% mayor respecto a los no reforzados. Se demuestra que la propuesta mejora el comportamiento de muros de mampostería de adobe ante la acción de cargas laterales.

- (12) Giuffrida, G., Caponetto, R., Nocera, F. y Cuomo, M. (2021). Prototyping of a Novel Rammed Earth Technology, *Sustainability*, 13, 11948. <https://doi.org/10.3390/su132111948>.
- (13) Blondet, M., Tarque, N., Vargas, J. y Vargas, H. (2019). Evaluation of a Rope Mesh Reinforcement System for Adobe Dwellings in Seismic Areas. En Aguilar, R., Torrealva, D., Moreira, S., Pando, M.A. y Ramos, L.F. (eds). *Structural Analysis of Historical Constructions*. RILEM Bookseries, vol 18. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99441-3_43
- (14) Tarque, N., Blondet, M., Vargas-Neumann, J. y Yallico-Luque, R. (2022). Rope mesh as a seismic reinforcement for two-storey adobe buildings. *Bull Earthquake Engineering*, 20(3), 1-26. <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01346-7>
- (15) Webster, F. y Tolles, L. (2000). Earthquake damage to historic and older adobe buildings during the 1994 Northridge, California Earthquake. *Proceedings of 12th World conference on earthquake engineering*, (pp. 1-8) Auckland, New Zealand. Retrieved from <http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/0628.pdf>.
- (16) Reyes, J., Galvis, F., Yamin, L., Gonzales, C., Sandoval, J. y Heresi, P. (2019). Out-of-plane shaking table tests of full-scale historic adobe corner walls retrofitted with timber elements, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 48(8), 888-909. <https://doi.org/10.1002/eqe.3168>
- (17) Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2014). Norma Ecuatoriana de la Construcción. Acuerdo ministerial 0028. Retrieved from <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/documentos-normativos-nec-norma-ecuatoriana-de-la-construccion/>
- (18) Muñoz, P. (2015). La construcción con tierra en el Ecuador y la necesidad de la norma. En Achig Balarezo, M. (coord). *15° Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra*. (631-642). Cuenca: Universidad de Cuenca. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6086019>
- (19) Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, Secretaría de Gestión de Riesgos (2015). Guía práctica para evaluación sísmica y rehabilitación de estructuras. Norma Ecuatoriana de la Construcción. Retrieved from https://www.ecp.ec/wp-content/uploads/2017/08/GUIA_5.pdf
- (20) Valluzzi, M.R., Sbrogiò, L. y Saretta, Y. (2021). Intervention strategies for the seismic improvement of masonry buildings based on FME Validation: The Case of a Terraced Building Struck by the 2016 Central Italy Earthquake. *Buildings*, 11, 404. <https://doi.org/10.3390/buildings11090404>
- (21) Vega, P. y Lloret, G. (2006). Memoria Técnica: Proyecto de Restauración “Catedral Vieja”. Cuenca. *Documento no publicado*.
- (22) Zamora Cedeño G. M. y Aguirre Ullauri, M. del C. (2020). Consideraciones sobre la vulnerabilidad del patrimonio arquitectónico. Estudio de caso: la iglesia de El Sagrario, Cuenca, Ecuador. *Intervención*, 1(21), 257-32. Retrieved from <http://200.188.19.41/index.php/intervencion/article/view/6299>
- (23) Hernández Pocero, J. (2016). *Construcción con tierra: Análisis de conservación y mejora. Un caso práctico en Senegal* (Trabajo de fin de grado). Universidad Politécnica de Catalunya. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2117/107822>
- (24) Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción -SENCICO-. (2000). Diseño y construcción con tierra reforzada. NTE E.080. Lima, Perú: SENCICO. Retrieved from https://procurement-notice.undp.org/view_file.cfm?doc_id=109376
- (25) Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica –AIS–. (2010). *Manual para la rehabilitación de viviendas construidas en adobe y tapia pisada*. Bogotá: AIS. Retrieved from <https://n9.cl/wxvhh>
- (26) Cueva, E. y Altamirano, M. (2011). *Estudio y experimentación de paneles estructurados y derevestimiento en base a la caña de la sierra* (Tesis de pregrado). Universidad de Cuenca. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/587>
- (27) Rivera, R. (2005). *Análisis de las propiedades y características del carrizo para su aplicación como material de refuerzo de la construcción* (Tesis profesional). Instituto Tecnológico de la Construcción. Retrieved from https://infonavit.janium.net/janium/TESIS/Licenciatura/Rivera_Nunez_Ricardo_44549.pdf
- (28) Cancho Tapia, V., Castillo Muñoz, C., Mendoza Calderón, E. y Saravia Huamán, K. (2010). *Proyecto de investigación “caña - carrizo”*. Universidad Alas Peruanas. Ica. Retrieved from https://www.academia.edu/27985847/Ca%C3%B1a_Carrizo
- (29) Viñuales, G. (2007). Tecnología y construcción con tierra. *Apuntes: Revista de Estudios sobre Patrimonio Cultural*, 20, 220-231. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/apun/v20n2/v20n2a04.pdf>
- (30) Guerrero Baca, L. (2007). Arquitectura en tierra. Hacia la recuperación de una cultura constructiva, *Apuntes*, 20 (2), 182-201. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/apun/v20n2/v20n2a02.pdf>
- (31) Muñoz, P. (2015). *Arquitectura popular en Azuay y Cañar 1977-1978: cuadernos de trabajo de Patricio Muñoz Vega y compilación gráfica*, Cuenca: Centro de Artesanías y Artes Populares.
- (32) Reay, K. y Thomson, J. (2014). *Earthen Floors: A modern approach to an ancient practice*. Gabriola: New Society Publishers.
- (33) Garzón, L. (2011). Técnicas mixtas. En Neves, C. y Borges, O. (org). *Técnicas de construcción con tierra* (pp. 62-71). Bauru: FEB-UNESP y PROTERRA. Retrieved from https://www.academia.edu/35702284/T%C3%A9cnicas_de_construccion%C3%B3n_con_tierra
- (34) López Pérez, C., Ruiz Valencia, D., Jérez Barbosa, S., Quiroga Saavedra, P., Uribe Escamilla, J. y Muñoz Díaz, E. (2007). Rehabilitación sísmica de muros de adobe de edificaciones monumentales mediante tensores de acero. *Apuntes. Revista de estudios sobre patrimonio cultural*, 20 (2), pp. 304-317. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/apun/v20n2/v20n2a10.pdf>
- (35) Vargas, J., Blondet, M. y Iwaki, C. (2013). La intervención del patrimonio edificado en tierra en áreas sísmicas y las cartas de conservación. *digitAR - Revista Digital de Arqueología, Arquitectura e Artes*, 1, 53-61. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.133-134.727>
- (36) Blondet, M., Vargas, J., Tarque, N., Soto, J., Sosa, C. y Sarmiento, J. (2015). Refuerzo sísmico de mallas de sogas sintéticas para construcciones de adobe. En Achig Balarezo, M. (coord). *15° Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra SIACOT* (pp. 1-14). Cuenca: Universidad de Cuenca. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6085973>

- (37) Torres, C., Jorquera, N., & 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>
- (38) Allahvirdizadeh, R. (2019). Modelling of the seismic behaviour of TRM-strengthened rammed earth walls. Recuperado el 13 de junio de 2019. Retrieved from <https://blog.msc-sahc.org/modelling-of-the-seismic-behaviour-of-trm-strengthened-rammed-earth-walls/>
- (39) Pei, L. (2021). The current situation a prospect of the management of anti-seismic protection of historical buildings. En *E3S Web of Conferences*, 253, 02086 (1-5). Retrieved from https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2021/29/e3sconf_eem2021_02086.pdf