

REFUERZO SÍSMICO DE MALLAS DE SOGAS SINTÉTICAS PARA CONSTRUCCIONES DE ADOBE

**Marcial Blondet¹; Julio Vargas²; Nicola Tarque³; Jonathan Soto⁴;
Carlos Sosa⁵; Javier Sarmiento⁶**

Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP)

¹mblondet@pucp.pe, ²jhvargas@pucp.pe, ³sntarque@pucp.edu.pe,
⁴jonathan.soto@pucp.pe, ⁵carlos.sosa@pucp.pe, ⁶javier.sarmiento@pucp.pe

Palabras clave: adobe, terremotos, reforzamiento e integridad estructural

Resumen

Las construcciones de adobe, durante los terremotos, son generalmente las más afectadas. Sufren daños significativos o colapsos parciales y totales debido a que los muros son muy débiles y frágiles. Sin embargo, las más graves consecuencias son las pérdidas de vidas, la gran cantidad de heridos y las familias damnificadas. Una manera efectiva de evitar estos daños en viviendas es confinar las paredes de adobe con mallas hechas con materiales compatibles con el material tierra. La PUCP viene investigando diversas formas de mejorar el comportamiento sísmico de las casas de adobe; por ejemplo, se ha visto que una malla exterior de polímero (geomalla) es efectiva en prevenir el colapso de las estructuras de adobe sometidas a excitación sísmica severa. Sin embargo, en la mayor parte del territorio peruano, la geomalla es difícil de obtener. Este artículo presenta los resultados de una nueva técnica de refuerzo sísmico que utiliza mallas externas de drizas (sogas sintéticas), accesibles en las zonas rurales. Como trabajo preliminar se ensayó un modelo de vivienda típica de adobe sin refuerzo, a escala natural, sobre la mesa vibradora de la PUCP. Durante el movimiento, los muros de adobe se agrietaron y algunos bloques de adobe se desplomaron. Luego, la casa fue reparada (con inyección de barro tamizado) y reforzada con una malla externa de cuerdas de driza en cada cara de los muros, templadas manualmente. Las drizas sujetaban también una viga collar de madera. Después de someter el modelo reforzado a un nuevo ensayo sísmico más exigente, se observó que el refuerzo brindó integridad estructural y estabilidad al modelo pues evitó el colapso parcial de los bloques. Además, se elaboró una guía preliminar de diseño de refuerzo. Actualmente, se está realizando un modelo numérico no lineal y un modelo basado en análisis dinámico de bloques rígidos. Los resultados serán comparados con lo observado en el laboratorio. Se espera que estos resultados conlleven al desarrollo de un sistema de refuerzo simple, accesible y barato que permita proteger las construcciones de adobe localizadas en áreas sísmicas.

1 INTRODUCCIÓN

En muchas partes del mundo, los terremotos ocasionan grandes daños a las viviendas y monumentos históricos construidos con tierra. Las casas de adobe dañadas pueden ser reconstruidas. Sin embargo, los monumentos históricos deben ser reparados y reforzados para asegurar su estabilidad ante futuros terremoto. La tarea es muy complicada ya que requiere de una mínima intervención estructural, un aspecto recomendado por las cartas internacionales de conservación (ICOMOS, 1964).

El grupo de investigación GERDIS de la sección Civil de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) está estudiando procedimientos de refuerzo para muros de adobe de acuerdo con los principios universales de conservación: mínima intervención, refuerzo compatible y solución reversible.

Primero, se estudió la reparación mediante la inyección de barro líquido, *grout*, (Blondet et al, 2007). La reparación restauró la resistencia original de muros de adobe sometida a compresión diagonal y carga estática cíclica. No obstante, el procedimiento no fue exitoso en un modelo de adobe a escala natural sometido a simulación sísmica en la mesa vibradora de la PUCP (Groenenberg, 2010; Blondet et al, 2012). Posteriormente, se construyó otro modelo a escala natural que fue sometido a la misma simulación sísmica para inducir daño en la estructura. Luego, las grietas fueron reparadas mediante la inyección de barro líquido y los muros fueron reforzados con una malla externa ortogonal de drizas (nylon) tensada manualmente con templadores. Finalmente, el modelo fue ensayado nuevamente en la mesa vibradora. Su comportamiento sísmico fue satisfactorio porque el refuerzo controló los desplazamientos relativos de las partes de los muros agrietados, evitó el colapso parcial y preservó la integridad estructural del modelo (Blondet et al, 2014).

Adicionalmente, este trabajo contempla el desarrollo de una guía preliminar de diseño basado en el análisis dinámico de bloques rígidos y el estudio numérico del comportamiento sísmico de las viviendas reforzadas.

Este artículo resume los resultados experimentales obtenidos de los ensayos experimentales y el trabajo del grupo de investigación GERDIS de la PUCP para mejorar la técnica de refuerzo propuesta.

2 CONTRUCCIÓN DEL MODELO

Un modelo de adobe a escala natural (figura 1) fue construido en el Laboratorio de Estructuras de la PUCP para ser ensayado en la mesa vibradora. Fue similar al modelo reparado solamente con barro líquido que no tuvo respuesta dinámica satisfactoria durante un proyecto previo (Groenenberg, 2010; Blondet et al., 2012). El objetivo fue evaluar la eficacia de un sistema de refuerzo de drizas complementario a la inyección con barro líquido.

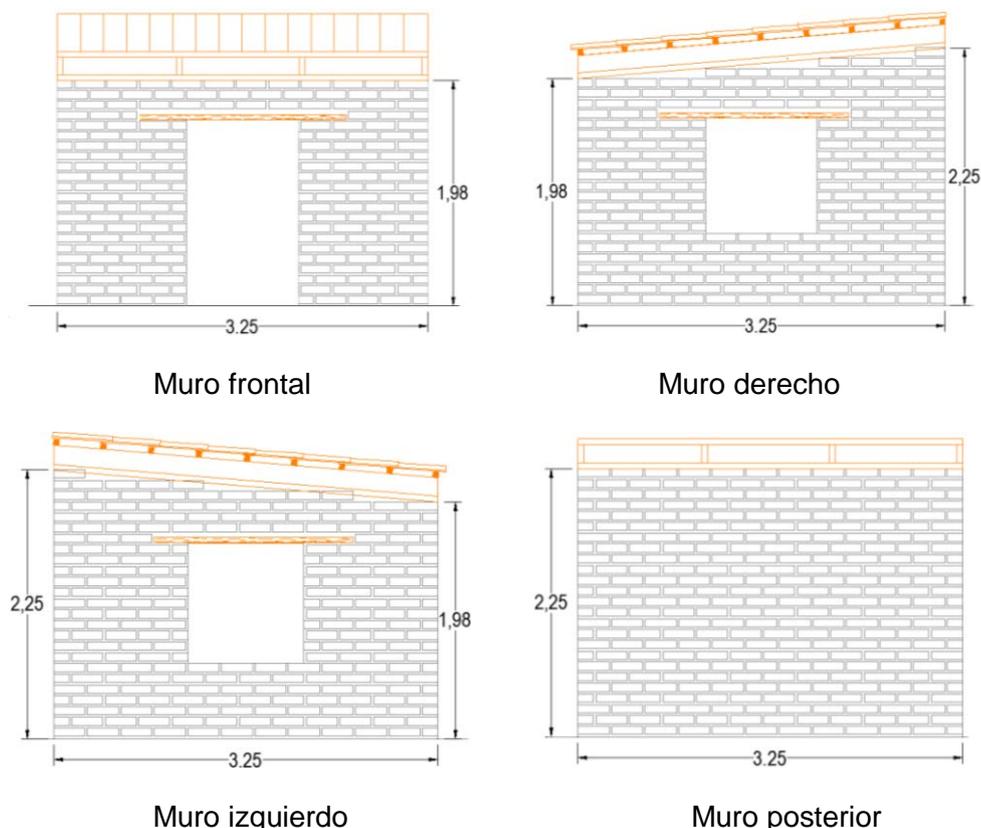


Figura 1. Esquema del modelo de adobe a escala natural. Las dimensiones se dan en metros

La construcción de adobe constó de un ambiente de cuatro muros ortogonales de adobe. Las unidades de adobe midieron 0,25 m x 0,25 m x 0,09 m (se utilizaron unidades enteras y mitades). Los adobes se fabricaron usando suelo, paja y arena (proporción 5:1:1 en volumen). Los bloques de adobe se unieron con mortero de barro (aproximadamente 0,020 m de espesor) hecho con suelo, paja y arena (proporción 3:1:1 en volumen). El vano de puerta se ubicó en la pared frontal. Los muros laterales (derecho e izquierdo) contaron con una abertura de ventana central. El techo fue unido a los muros mediante una viga collar de madera para contribuir a la respuesta estructural. La puerta y las ventanas tuvieron dinteles hechos con caña unidas con alambres. Estos dinteles son ligeros y flexibles para evitar el efecto de golpeo en los muros de adobe durante terremotos. La casa se construyó sobre un anillo de concreto (cimentación rígida), usado para unir el modelo a la mesa vibradora y como soporte para el transporte de la casa a la mesa vibradora (Blondet et al, 2013).

Los ensayos de compresión en pilas de adobe dieron un valor promedio del módulo tangente de elasticidad de 400 MPa. La densidad de los bloques de adobe fue 1700 kg/m³.

3 PROTOCOLO DE ENSAYO E INSTRUMENTACIÓN

La señal de comando de desplazamiento de la mesa vibradora en los ensayos fue derivada de la componente longitudinal registrada en el terremoto del día 31 de mayo de 1970 en Lima, Perú. La figura 2 muestra la aceleración de la mesa registrada durante un ensayo de simulación correspondiente a un desplazamiento de comando pico D= 130 mm. La aceleración pico de la mesa A0 fue 1,53 g.

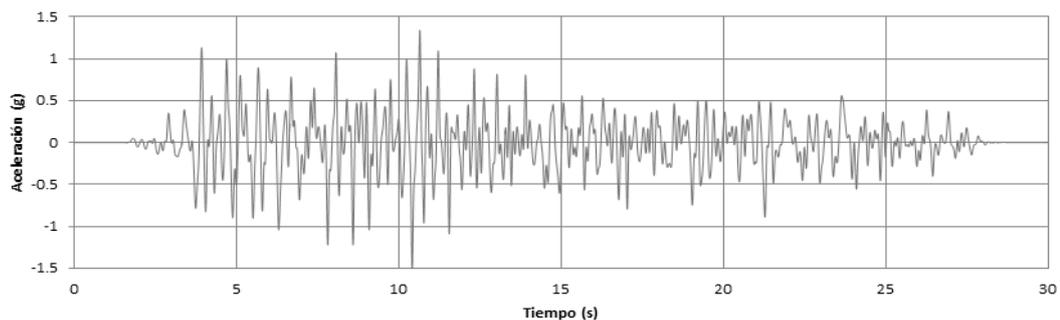
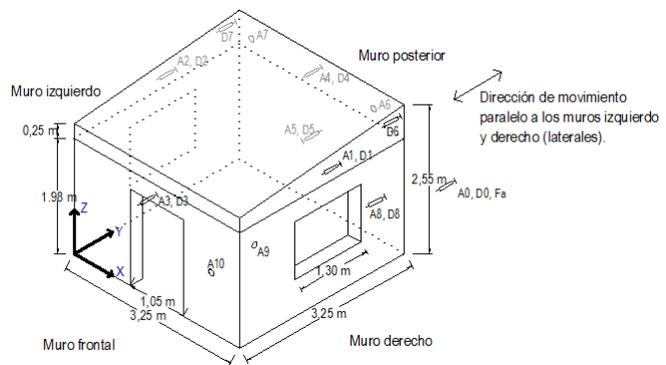


Figura 2. Aceleración en la mesa vibradora medida en ensayo con desplazamiento pico D = 130 mm

La instrumentación incluyó acelerómetros para medir aceleraciones absolutas y transductores diferenciales lineales variables (LVDTs) para medir desplazamientos absolutos (figura 3). Se midieron la aceleración y el desplazamiento de la mesa vibradora; se registró la fuerza en el actuador hidráulico. La frecuencia de muestreo de todos los instrumentos fue 200 Hz (intervalo de tiempo de 0,005 s).



Modelo en la mesa vibradora



Ubicación de la instrumentación

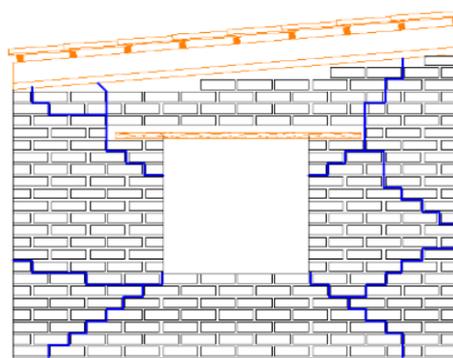
Figura 3. Aceleración en la mesa vibradora medida en ensayo con desplazamiento pico D = 130 mm

4 ENSAYOS DINÁMICOS PARA GENERAR DAÑO SÍSMICO

El ambiente de adobe (no dañado) fue sometido a una secuencia de tres fases para generar daño sísmico representativo como se observa en las construcciones de adobe. La primera fase, con desplazamiento pico de comando $D=30$ mm (desplazamiento pico de la mesa $D_{0max}=28,90$ mm y aceleración pico $A_{0max}=0,31$ g), no produjo ningún daño visible en el modelo. Luego de la segunda fase con $D=60$ mm ($D_{0max}=58,50$ mm y $A_{0max}=0,64$ g), el modelo presentó muchas fisuras. Grandes diagonales de corte fueron visibles en los muros laterales, empezando en las esquinas de la ventana y propagándose hacia afuera. Debido a que las fisuras eran muy delgadas (3 mm o menos), se decidió llevar a cabo una tercera fase $D=60$ mm ($D_{0max}=58,50$ mm y $A_{0max}=0,64$ g) para inducir mayor daño; las fisuras se ensancharon. Esta última fase fue detenida después de 15 segundos para evitar daño irreparable (Groenenberg, 2010). La figura 4 muestra los patrones de daño en el muro derecho, representativo del daño sísmico en construcciones de adobe.



Muro derecho



Esquema de fisuras del muro derecho

Figura 4. Daño en el ambiente de adobe luego de la segunda fase de ensayo ($D=60$ mm).

5 ENSAYO DINÁMICO EN EL MODELO REFORZADO

Procedimiento de reparación

El ambiente de adobe fue reparado mediante inyección de barro líquido. Ello requirió que las grietas sean abiertas para la completa penetración del barro. En este proyecto, debido a limitantes de tiempo, se decidió abrir todas las grietas del ambiente de adobe simultáneamente. Las grietas con ancho mayor a 1 mm se abrieron hasta 8 mm aproximadamente usando taladro y cuchillo eléctrico (figuras 5a y 5b). Luego, las grietas fueron selladas con una capa de silicona en ambas caras, dejando aberturas de aproximadamente 100 mm de separación. El barro fue inyectado en las grietas. Consistió en una mezcla de suelo tamizado en la malla #10 (2 mm de abertura), 50% en volumen de paja finamente cortada (10 mm de longitud aproximadamente) y 35% de agua en peso. La mezcla fue inyectada en las grietas hasta estar completamente llenas (figura 5c).



a) Uso de taladro eléctrico



b) Uso de cuchillo eléctrico



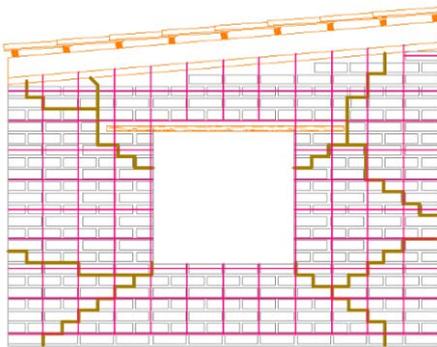
c) Inyección de barro líquido

Figura 5. Abertura de grietas sísmicas e inyección de barro líquido

Después de que las grietas fueran reparadas con barro líquido, el modelo se dejó al aire libre por dos meses para un adecuado secado del barro. .

Procedimiento de refuerzo

Después del secado, los muros fueron reforzados con una malla ortogonal de cuerdas de nylon (drizas) de $\frac{1}{4}$ " de diámetro. Ensayos de laboratorio indicaron una resistencia última de 2 kN (esfuerzo nominal último de 63 MPa) y un módulo de elasticidad de 100 MPa. La figura 6a) muestra la configuración de malla usada. Las cuerdas verticales fueron colocadas a intervalos de 250 mm (la longitud de un bloque de adobe) en dos partes. La parte baja de la cuerda vertical se colocó a través de la primera hilada (inferior) del mortero. Para ello se colocó un tubo de plástico por el cual pasar la cuerda. La malla en la parte superior se colocó sobre los muros, clavada a la viga collar. Las cuerdas horizontales se colocaron también a intervalos de 250 mm (dos unidades y media de adobe). Todas las cuerdas fueron tensadas con los templadores (figura 6b). La tensión estimada de los templadores fue 200 N al momento del tensado. Las mallas ortogonales se colocaron a ambos lados de los muros unidas por cuerdas de $\frac{1}{8}$ " (crossties), elementos que atraviesan los muros en lugares seleccionados. La figura 6c muestra el detalle de los elementos de refuerzo. La figura 6d presenta el ambiente de adobe reforzado listo para ser ensayado nuevamente en la mesa vibradora.



a) Esquema del refuerzo con driza



b) Templado de refuerzo horizontal



c) Detalle de refuerzo



d) Ambiente de adobe reparado y reforzado

Figura 6. Refuerzo con drizas del ambiente de adobe reparado con barro líquido

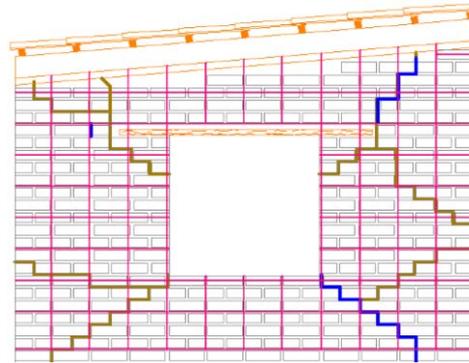
6 EVALUACIÓN DE LA TÉCNICA DE REFORZAMIENTO

El ambiente de adobe reparado y reforzado fue ensayado nuevamente en la mesa vibradora siguiendo el protocolo de ensayo del modelo original no dañado. Durante la primera fase ($D=30$ mm; $D_{0max}=29,40$ mm; $A_{0max}=0,30$ g), no existió daño visible en la estructura. La figura 7b muestra el esquema de daños que corresponde a la segunda fase de ensayo ($D=60$ mm; $D_{0max}=58,40$ mm; $A_{0max}=0,71$ g). Las líneas marrones muestran las grietas que

no se abrieron; las líneas azules muestran las nuevas grietas que se generaron debido a la simulación sísmica.



a) Inspección de daños



b) Esquema de fisuras (en azul)

Figura 7. Modelo reparado luego de la segunda fase de ensayo ($D = 60$ mm).

La tercera fase de ensayo ($D= 90$ mm; $D_{0max}= 89,30$ mm; $A_{0max}= 1,08$ g) probó la efectividad del refuerzo. Una reparación sin refuerzo hubiese producido el colapso como en el ensayo de Groenenberg (2010). El refuerzo de nylon mantuvo juntos los bloques que se habían fracturado. Posteriormente, se decidió someter el modelo a dos fases adicionales de movimiento intenso ($D= 130$ mm; $D_{0max}= 128$ mm; $A_{0max}= 1,53$ g), un hecho que produjo un daño significativo: todas las grietas reparadas se abrieron y nuevas grietas aparecieron en los muros (figura 8a). Sin embargo, el refuerzo y la viga collar trabajaron muy bien en mantener la integridad de la estructura (figura 8b). Las cuerdas horizontales, localizadas en el mortero cerca de la base de la ventana, cortaron el mortero.



a) Esquema de daños



b) Daños en el ambiente de adobe

Figura 8. Esquema de daños y vista general del ambiente después de todas las fases de ensayo.

Los gráficos de cortante basal versus desplazamiento global que corresponden a la primera fase de movimiento ($D= 30$ mm) para el ambiente en su condición original y reparada se muestran en la figura 9. La técnica de reparación y reforzamiento fue efectiva en recuperar las características mecánicas del ambiente original. En ambos casos, el máximo cortante basal soportado por el modelo fue cercano a 47 kN. El ambiente reforzado-reparado tuvo alrededor del 70% de la rigidez lateral de la original (60 kN/mm versus 87 kN/mm).

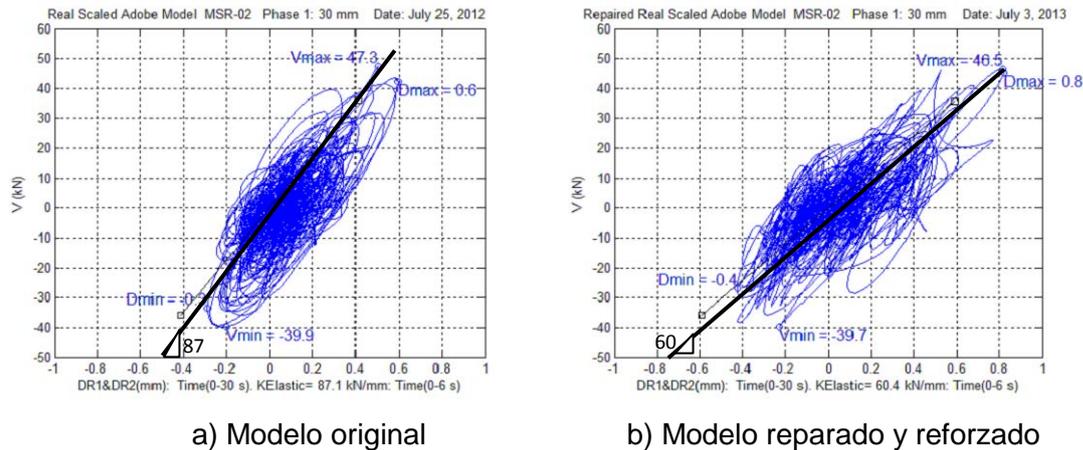


Figura 9. Cortante basal vs. máximo desplazamiento para la primera fase de ensayo (D = 30 mm)

Para una señal de comando D= 60 mm, hubo respuesta no lineal significativa en el ambiente original y el reparado-reforzado. El refuerzo fue efectivo en mantener la integridad estructural. Los gráficos de fuerza lateral versus desplazamiento (figura 10) muestran que el refuerzo garantizó una respuesta dinámica estable con menor abertura de grietas (lazos histeréticos más cerrados). En la figura 10, se observa también que en el modelo reforzado la resistencia lateral disminuyó aproximadamente 33% (de 149 kN a 100 kN) y que la rigidez disminuyó aproximadamente 54% (de 98 kN/mm a 45 kN/mm).

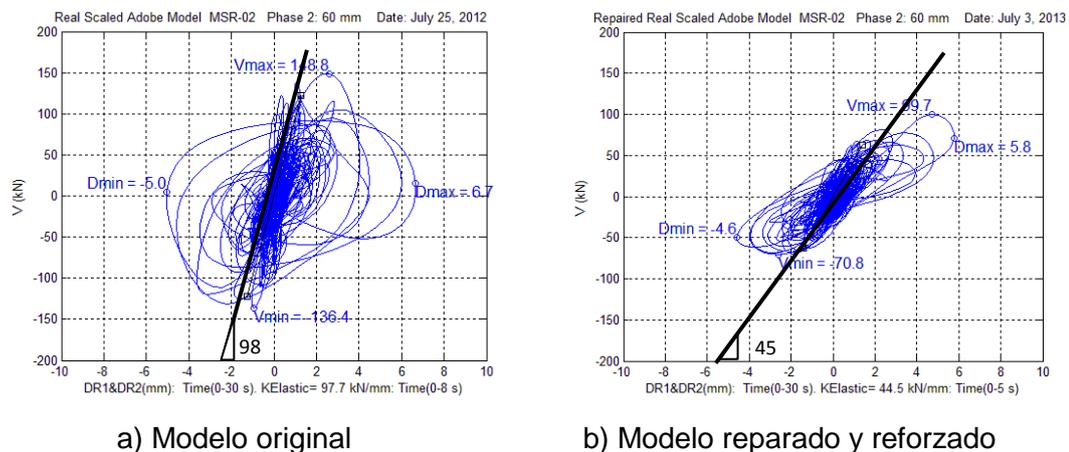


Figura 10. Cortante basal vs. máximo desplazamiento en la segunda fase de ensayo (D= 60 mm)

La respuesta sísmica para movimientos de mayor intensidad (D= 130 mm; D0max= 128 mm; A0max= 1.53 g) en la vivienda reforzada fue muy buena. El refuerzo mantuvo la integridad estructural entre el techo y los muros, controló los desplazamientos excesivos y evitó colapsos parciales. En conclusión, se preservó la integridad estructural.

7 PROCEDIMIENTO NUMÉRICO DE ANÁLISIS PRELIMINAR

En la mayoría de ensayos realizados en estructuras de adobe en la PUCP, se observó que los muros de adobe se rompen en grandes pedazos, que se separan y colapsan por volteo. En este proyecto, una porción del muro posterior (sombreada en la figura 11a) se separó de la estructura durante ensayos de simulación en el ambiente de adobe reforzado.

Un modelo numérico simplificado considera la estructura principal (bloque A) y el bloque B separado como se muestra en la figura 11b. Las cuerdas horizontales evitan el volteo del bloque B, situación expresada en el modelo dinámico de interacción.

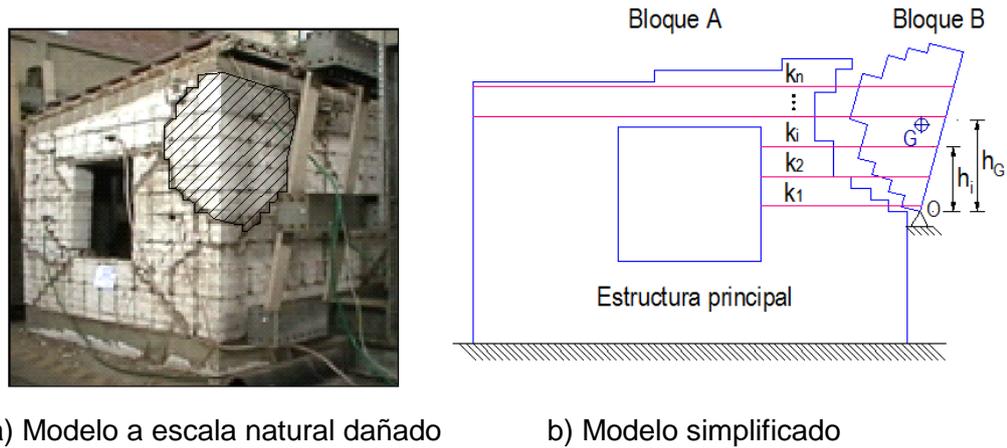


Figura 11. Modelo simplificado de interacción de bloques de adobe

Este modelo simple fue usado para estimar las fuerzas en las cuerdas elásticas causadas por movimiento dinámico de la base. La figura 12 muestra el diagrama de cuerpo libre del bloque B; se incluyen las fuerzas de inercia causadas de traslación y rotación. El bloque rígido A está empotrado al terreno y tiene un desplazamiento absoluto X_0 . El bloque rígido B, con masa m_B y momento central de inercia I_G , rota alrededor del punto O. El desplazamiento relativo (con respecto del punto O) de cualquier punto i localizado en el bloque B a la altura h_i está denotado por u_i . Un amortiguador viscoso (no mostrado para que el diagrama sea más entendible) con factor de amortiguamiento ζ_B está unido al centro de masa G. Los ensayos de vibración libre realizados entre cada fase produjeron factores de amortiguamiento viscoso entre 9% y 12%. La cuerda i tiene rigidez elástica k_i y está unida a los bloques A y B a la altura h_i .

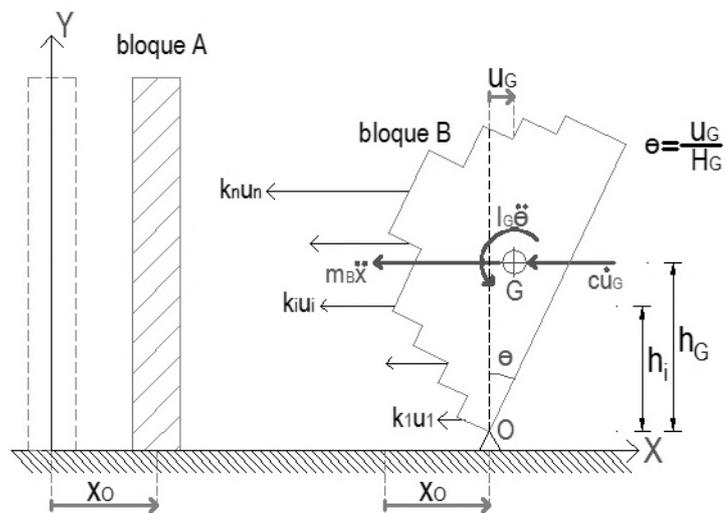


Figura 12. Diagrama de cuerpo libre del bloque B para un ángulo de rotación 'e'.

La ecuación de movimiento del modelo, obtenido a través del equilibrio dinámico, es tal como sigue:

$$M_e \ddot{u}_G + C_e \dot{u}_G + K_e u_G = -m_B \ddot{x}_0 \tag{1}$$

$$M_e = \frac{1}{h_G^2} (I_G + m_B h_G^2) \tag{2}$$

$$K_e = \frac{\sum k_i h_i^2}{h_G^2} \tag{3}$$

$$C_e = 2\zeta_B \sqrt{K_e M_e} \quad (4)$$

donde M_e es la matriz equivalente de masa (kg), K_e es la matriz equivalente de rigidez (N/m) y C_e el coeficiente equivalente de amortiguamiento (N.s/m):

El periodo natural de vibración del sistema es el siguiente:

$$T_B = 2\pi \sqrt{M_e / K_e} \quad (5)$$

Si el espectro de respuesta de desplazamiento del terreno, $S_d(T, \zeta)$, es conocido, entonces el desplazamiento pico del centro de masa G del bloque es $S_d(T_B, \zeta_B)$ y la fuerza en el cable i será la siguiente:

$$F_i = \frac{h_i}{h_G} k_i S_d(T_B, \zeta_B) \quad (6)$$

8 MODELO NUMÉRICO DEL AMBIENTE DE ADOBE

Descripción del modelo numérico

Tal como se describió en la sección 4, el ambiente de adobe no presentó daño visible durante la primera fase de la simulación sísmica. Esta afirmación es corroborada con la figura 9a donde existe una tendencia lineal de la gráfica Fuerza vs Desplazamiento. Con base a estas dos afirmaciones, se asumió que el comportamiento del ambiente de adobe es aproximadamente elástico lineal durante la primera fase de simulación sísmica.

Para reproducir el comportamiento dinámico del ambiente de adobe durante la primera fase, se elaboró un modelo numérico elástico de elementos finitos. Se analizó el movimiento en la dirección Y+ (indicado en la figura 13b) análoga al ambiente de adobe. El desplazamiento y la aceleración máxima de la mesa fue $D0_{max} = 28,90$ mm y $A0_{max} = 0,31$ g respectivamente. Este modelo numérico se realizó en el programa SAP2000 (CSI, 2014). Se consideró que las unidades de adobe y el mortero forman un único material elástico, homogéneo e isótropo. El módulo de elasticidad de la mampostería de adobe del modelo fue calibrado para que el periodo del primer modo de vibración coincida con el periodo de vibración natural del ambiente de adobe (ver Tabla 1).

La figura 13 muestra el modelo numérico compuesto por elementos shell de cuatro puntos de integración (puntos de Gauss). La división de los shells fue tal que cada cuatro de ellos representen una unidad de adobe incluyendo el mortero que los une. La mayoría de los elementos para la albañilería y dinteles fueron shells de sección rectangular 70 mm x 90 mm y 0,25 m de espesor. La figura 13b muestra los listones de madera modelados como elementos shell (sección cuadrada de 50 mm de lado y 50 mm de espesor). El peso de las tejas de arcilla (24,5 N cada una) fue considerado como una carga distribuida en los nodos de los listones del modelo numérico. No se consideró el modelamiento de la cimentación de concreto y en lugar de ello se consideraron los muros empotrados a la base.

La viga collar real (figura 14a) tuvo relleno de barro dentro de los agujeros del armazón de madera para una mejor interconexión con los muros. Esta viga se modeló en SAP como un elemento de sección constante equivalente a la viga real. Las otras conexiones de los muros con los dinteles de caña y entre listones fueron del tipo rígida; es decir, perfectamente unidas.

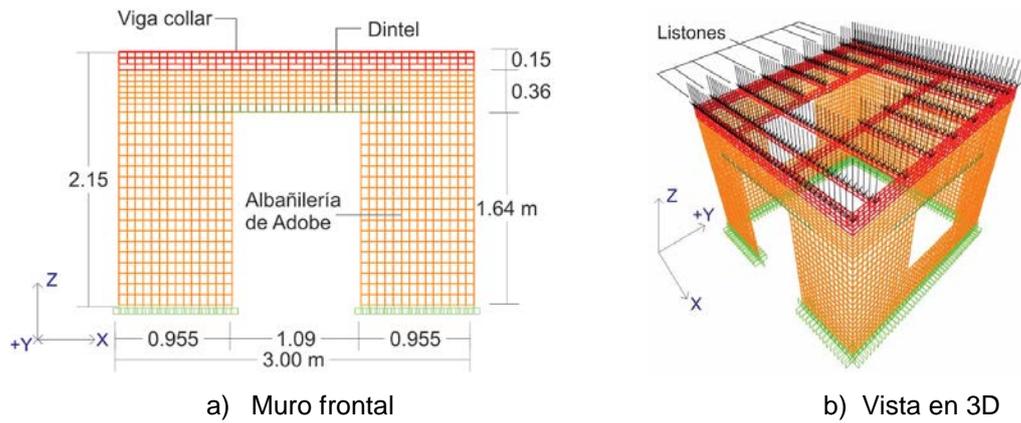


Figura 13. Modelo numérico representativo del ambiente de adobe

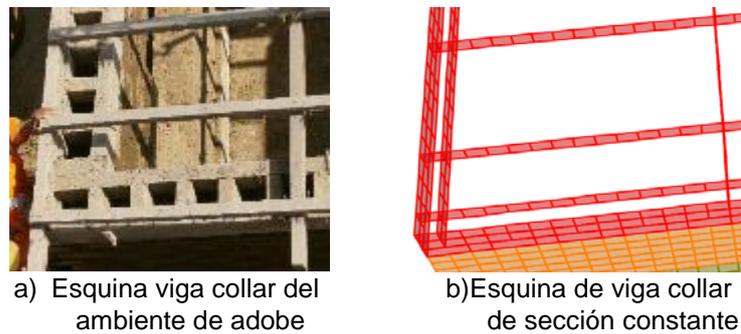


Figura 14. Modelamiento de la viga collar

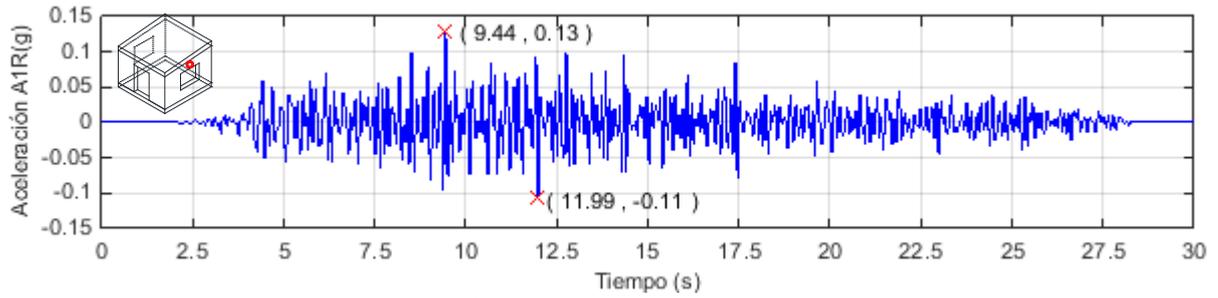
En la Tabla 1 se resumen las propiedades consideradas en el modelo numérico.

Tabla 1. Propiedades elásticas de los materiales para el modelo numérico

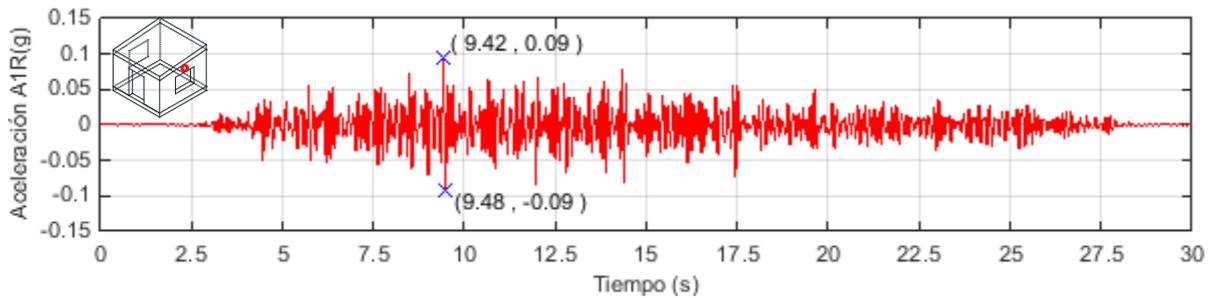
Material	Peo específico (kN/m ³)	Módulo de Elasticidad (MPa)	Coefficiente de Poisson	Referencia
Albañilería de adobe	16,7	250	0,20	Prototipo experimental
Madera Tornillo	7,0	12.750	0,20	(RNE Norma E.010, 2006)
Caña	6,5	6.500	0,20	(Groenenberg, 2010)

Para el análisis dinámico del modelo numérico se utilizó un amortiguamiento de 11% recomendado por Groenenberg (2010) y Tarque (2011).

La figura 15a muestra la respuesta de aceleraciones relativas a la base medido experimentalmente en la parte superior del muro derecho. La figura 15b muestra la respuesta análoga medido en el modelo numérico. De la comparación de estas figuras se puede apreciar congruencia en el instante de ocurrencia de la aceleración máxima en un sentido (aceleración positiva) y un error del 30% en el otro sentido (aceleración negativa). A pesar de esta limitación se observaron los esfuerzos en el muro transversal en el instante del máximo esfuerzo para evaluar la predicción de grietas en el modelo numérico.



a) Modelo del ambiente de adobe a escala natural



b) Modelo numérico del ambiente de adobe

Figura 15. Respuesta de aceleraciones relativas a la base medida en la parte superior del muro derecho

Esfuerzos máximos

La figura 16a muestra el muro derecho (vista exterior) en el instante del máximo esfuerzo principal en la esquina superior izquierda del vano (figura 16b) y en el instante del máximo esfuerzo principal en la esquina inferior derecha (figura 16c). La figura 16a no muestra el dintel ni la viga collar con el fin de visualizar solamente los esfuerzos en la albañilería de adobe.

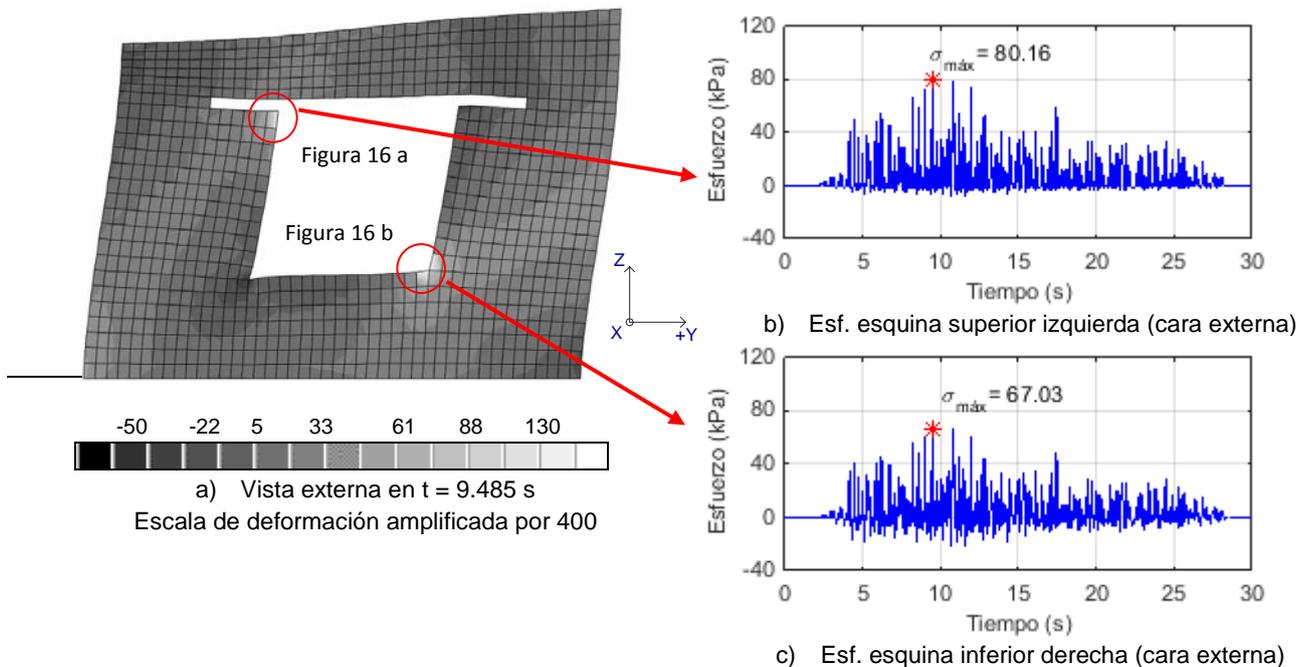


Figura 16. Esfuerzos máximos (kPa) en la cara externa del muro derecho en el instante $t = 9.485$ s durante la primera fase de la simulación sísmica.

La escala de grises muestra la variación de esfuerzos máximos principales de tracción y compresión. Las zonas con concentración de esfuerzos máximos indican la posibilidad de

fisuración por tracción, tal como se verificó en el prototipo experimental luego de las fases 2 y 3.

Rigidez lateral del modelo

La figura 17 muestra el comportamiento histerético real en ventanas de cada 10 s. La fuerza representa el cortante basal total del modelo y el desplazamiento es el promedio de los desplazamientos relativos medidos en la parte superior de los muros paralelos al movimiento. Cada sub-figura tiene una línea cuya pendiente representa la rigidez del sistema.

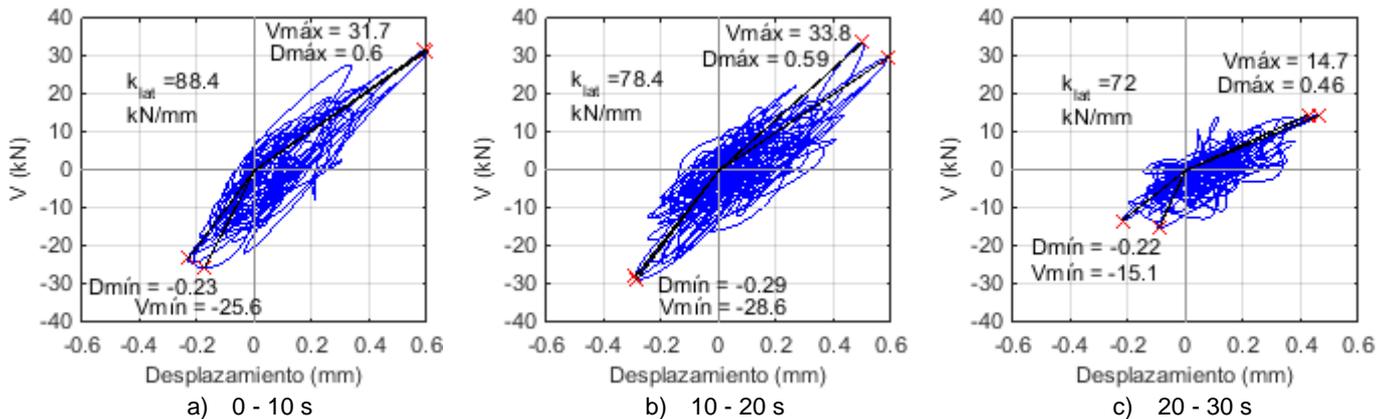


Figura 17. Cortante basal vs. desplazamiento promedio durante la primera fase de la simulación sísmica del prototipo

La figura 18 muestra la gráfica del cortante basal vs. desplazamiento promedio obtenida del modelo numérico durante los 30 s de duración del movimiento. La rigidez calculada fue 60 kN/mm, valor cercano al calculado experimentalmente especialmente en la ventana de tiempo de 20 a 30 s. El cortante máximo de 33,6 kN representa el 34.3% del peso total de la estructura. Este valor tiene relación con el 0.31 g de aceleración máxima de la fase 1. Además, el cortante máximo del modelo numérico es similar al calculado experimentalmente (ver figura 17b).

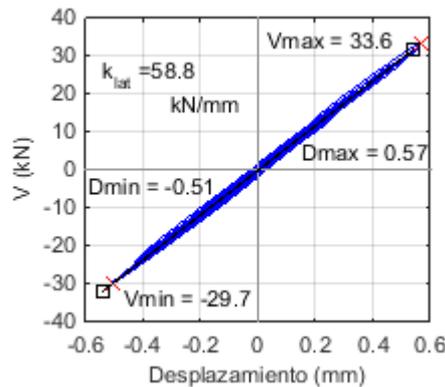


Figura 18. Cortante basal vs. desplazamiento promedio del modelo numérico al finalizar la primera fase de la simulación

La calibración del modelo utilizando el periodo del primer modo de vibración fue válida para obtener una similitud del instante de ocurrencia de la máxima aceleración de la parte superior del muro derecho. También, permitió predecir la ocurrencia de grietas en las esquinas de la ventana. Estos resultados validan la calibración del modelo numérico con las limitaciones de un análisis dinámico lineal.

9 CONCLUSIONES

El modelo de adobe a escala natural, ensayado bajo excitaciones dinámicas severas, fue adecuadamente protegido por una técnica de refuerzo consistente en la combinación del sellado de grietas sísmicas mediante barro líquido (grout) y un refuerzo externo de cuerdas de nylon (driza) que cubre todo los muros. La técnica combinada de reforzamiento mantiene la integridad estructural; se evita la degradación excesiva y sobretodo el colapso de los muros de adobe. Además, brinda un control de desplazamientos de la estructura fisurada durante el movimiento de alta intensidad.

El reforzamiento presentado tiene potencial para ser usado como reforzamiento sísmico de viviendas de bajo costo. Las cuerdas de nylon (driza) son relativamente baratas, de fácil uso y se encuentran en muchas zonas rurales del país.

El cálculo de la cuantía de cuerdas de nylon puede ser evaluado de una forma analítica asumiendo mecanismos de falla simplificados. Sin embargo, un modelo numérico de elementos finitos puede resolver mecanismos de falla más complejos y calcular también los esfuerzos en los que cada cuerda estaría sujeta ante un determinado evento sísmico. El modelo numérico lineal presentado en este artículo solamente da un indicio de las zonas de máximos esfuerzos a tensión y compresión; sin embargo, el desarrollo de la investigación contempla también el modelo de las cuerdas de nylon.

Por lo tanto, existe confianza que los resultados presentados aquí puedan contribuir a proteger el patrimonio de adobe y construir viviendas de adobe más seguras en países sísmicos en donde la construcción en tierra es la principal solución de vivienda de muchas familias.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Blondet M., Vargas J., and Groenenberg R. Evaluation of the efficacy of mud injection to repair seismic cracks on adobe structures via full-scale shaking table tests. 15th World Conference on Earthquake Engineering, 15WCEE. Lisbon, Portugal, 2012.

Blondet M., Vargas J., Morales K., and Iwaki C. Estudio preliminar del uso de morteros de adobe para reparar grietas estructurales en construcciones históricas de adobe. Adobe USA 2007. El Rito, New Mexico, USA, 2007.

Blondet M., Vargas J., Sosa C. A., and Soto, E. J. Refuerzo sísmico de construcciones de adobe mediante inyección de barro líquido y malla de cuerdas. Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra 14° SIACOT. Universidad Centroamericana José Simeón Cañas / UCA San Salvador, El Salvador. 2014.

Blondet M., Vargas J., Sosa C. A., and Soto, E. J. Seismic simulation tests to validate a dual technique for repairing adobe historical buildings damaged by earthquakes. New Generation Earthen Architecture: Learning from Heritage. (pp. 269-276) Istanbul Aydin University. Istanbul, Turkey, 2013.

CSI (Computers and Structures Inc.). CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, SAFE and CSiBridge, ISO No. GEN062708M1 Rev.11, Computers and Structures Inc., Berkeley, California, Estados Unidos de América, 2014. Tarque, N. Numerical Modeling of the Seismic Behavior of Adobe Buildings, Tesis para optar el Grado de Doctor en Filosofía en Ingeniería Sísmica, Universidad de Pavía, Pavía, Italia, 2011.

Groenenberg R. The reparation of adobe constructions damaged by earthquake loading and development of an ATENA-GiD model to simulate shaking table tests for these structures. MSc. Thesis, PUCP, Lima, Peru, 2010.

ICOMOS (International Council of Monuments and Sites). International letter related to Conservation and Restoration of Historical Monuments. Venice, Italy, 1964.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al personal del laboratorio de estructuras de la PUCP y a todos los que hicieron posible la realización de este proyecto.

AUTORES

Marcial Blondet. Profesor Principal. Ingeniero Civil (PUCP, 1973), Magíster y Doctor (PhD) en ingeniería sismorresistente (UC Berkeley, 1979 y 1981). Director de programas de Doctorado en Ingeniería. Especialista en ingeniería sísmica y dinámica de estructuras. Interesado en el estudio de sistemas de protección sísmica de edificaciones, refuerzo de bajo costo para viviendas de mampostería de ladrillo y de adobe, y protección sísmica de monumentos históricos de tierra.

Julio Vargas. Profesor Principal. Ingeniero Civil (PUCP). Primer Jefe Departamento de Ingeniería 1969). Primer Investigador a Tiempo Completo en Áreas de Construcción con Tierra e Ing. Sismo Resistente (1978-1885). Miembro de Comisión Académica y Consejo Universitario en dos períodos. Premio Nacional de Cultura 1985-86 en Ciencias Aplicadas y Tecnología. Miembro de 4 Comités Científico Internacionales Permanentes del Consejo Internacional de Monumentos y Sitios, ICOMOS.

Nicola Tarque. Profesor Asociado (PUCP) y colaborador de la Sociedad de Ingeniería EWA (www.projectewa.com). Recientemente, ha participado como investigador Post Doctoral en la Universidad de Boloña y Gabriele d'Annunzio, ambas instituciones italianas. Sus últimas investigaciones tratan sobre el análisis del riesgo sísmico de las casa de adobe, modelos numéricos de estructuras, evaluación de la amplificación sísmica de las ondas.

Jonathan Soto. Profesor contratado. Ingeniero Civil (UNSAAC), Magíster en Ingeniería Civil (PUCP, 2014). Co-investigador en la Sección Civil, PUCP. Coordinador técnico del proyecto "FISURAS V - PUCP." Miembro del grupo GERDIS. Ganador de la "Beca Aristóteles: Reconocimiento a la trayectoria académica en la escuela de Posgrado PUCP. Interesado en el estudio en ingeniería sismoresistente, protección sísmica y refuerzo sísmico de viviendas y monumentos históricos de tierra.

Carlos Sosa. Profesor contratado. Ingeniero Civil (UNSA, 2008), Magíster en Ingeniería Civil (PUCP, 2014). Co-investigador en la Sección Civil de la PUCP. Miembro del grupo "Centro tierra" de la PUCP. Interesado en investigación de protección sísmica y económica para edificaciones de tierra. Ponente en diversos talleres de capacitación de reforzamiento de estructuras de adobe dentro y fuera del Perú.

Javier Sarmiento. Investigador de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) y candidato a Magíster en Ingeniería Civil de la PUCP. Se encuentra participando en un proyecto de investigación del grupo de investigación GERDIS para determinar el reforzamiento de viviendas de adobe utilizando cuerdas sintéticas.