

PARÁMETROS ESTRUCTURALES DE LAS VIVIENDAS DE ADOBE (CUSCO, PERÚ) PARA LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO SÍSMICO

Nicola Tarque¹, Helen Crowley², Humberto Varum³ y Rui Pinho⁴

¹ Estudiante de Doctorado. ROSE School, IUSS, Pavia, Italia (starque@roseschool.it)

Profesor Contratado, Sección Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú

² Investigadora. Centro Europeo de Estudios e Investigación en Ingeniería Sismorresistente (EUCENTRE), Pavia, Italia (helen.crowley@eucentre.it)

³ Profesor Auxiliar, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Aveiro, Portugal (hvarum@ua.pt)

⁴ Profesor Auxiliar, Departamento de Mecánica Estructural, Universidad de Pavia, Italia (rui.pinho@unipv.it)

Palabras claves: viviendas de adobe, características estructurales, riesgo sísmico.

Abstract

This paper looks at the structural properties of adobe buildings in Cusco, Peru, for use in seismic performance and seismic risk assessment. The geometrical properties (typology) of adobe dwellings from Cusco have been established according to a building-by-building survey. Cusco has been chosen for this study as, according to the national census, around 80% of the building stock in this town is constructed with adobe. Furthermore, this region of the country is relatively seismically active and thus seismic risk assessment studies are warranted. Additional structural information of adobe buildings has been obtained from experimental tests carried out at the Catholic University of Peru. These tests have allowed the inter-storey drift capacity and the period of vibration of adobe buildings to be derived. A database containing the principal geometrical properties of 30 dwellings has been created which has allowed the mean, standard deviation and probability density functions (PDF) to be defined for each parameter such as storey height, wall length, etc. These properties are of use in a recently proposed probabilistic displacement-based earthquake loss assessment method (DBELA) which generates random populations of buildings based on this input data. The structural capacity of each random building is then predicted based on structural mechanics principles, and by comparing this capacity with the demand from earthquakes, estimates of the probability of damage can be made.

Resumen

En este trabajo se evalúan las propiedades estructurales de las construcciones de adobe en Cusco, Perú, para ser usadas como parámetros en la evaluación de la capacidad y del riesgo sísmico. Las propiedades geométricas (tipología) de las viviendas de adobe han sido determinadas a través de encuestas de campo en un trabajo anterior. Con la información recopilada se creó una base de datos resaltando la media, desviación estándar y funciones de distribución de probabilidad (FDP) de cada uno de los parámetros como la altura de la vivienda, ancho de muros, dimensiones de los adobes, etc. La ciudad del Cusco ha sido seleccionada para este estudio por ser una de las ciudades con mayor cantidad de viviendas de tierra en el Perú, país con intensa actividad sísmica. La información sobre el comportamiento sísmico de las construcciones de adobe ha sido obtenida a través de ensayos experimentales realizados en la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Los resultados de estos ensayos han permitido desarrollar expresiones para el cálculo de la deriva (capacidad de deformación) y del período de vibración de las viviendas de adobe. En base a estas ecuaciones, la capacidad sísmica de las viviendas de tierra del Cusco ha sido calculada y usada en una reciente propuesta probabilística de la estimación de pérdidas por terremotos basada en desplazamientos (acrónimo DBELA). Esta metodología plantea la generación de una población aleatoria de viviendas siguiendo la información estadística de las propiedades geométricas. Luego, la capacidad estructural de cada vivienda aleatoria es calculada (capacidad de desplazamiento vs. período de vibración) y comparada con la demanda sísmica, obteniéndose de esta forma probabilidades de daños (curvas de vulnerabilidad).

1. INTRODUCCIÓN

El colapso de las construcciones de tierra durante terremotos ha causado considerables pérdidas de vidas en muchos países en vías de desarrollo. Desde el

punto de vista estructural, la alta vulnerabilidad sísmica de las construcciones de adobe se debe a las características negativas de sus muros de tierra, pues son masivos y generan grandes fuerzas de inercia, son débiles y no pueden resistir estas fuerzas, tienen falla frágil y colapsan sin aviso previo (Blondet *et al.*, 2006).

El adobe como material de construcción es un material barato y muchas veces el único disponible en muchas zonas rurales (Bariola y Sozen, 1990). Cada vez que ocurre un terremoto en zonas donde la construcción con tierra es masiva muchas casas y monumentos históricos de tierra colapsan, causando de esta forma trágica pérdida de vidas. Recientemente esto ha sido confirmado una vez más el 15 de agosto del 2007 durante el terremoto de Pisco –Perú- de M_w 8, donde más de 500 personas perdieron la vida y más de 37 500 viviendas colapsaron, siendo la mayoría de estas construidas de adobe.

Las casas de adobe son típicas construcciones en la sierra peruana. El adobe es un material con muy buenas propiedades térmicas, retiene el calor del ambiente durante el día y lo libera en la noche, manteniendo de esta forma una temperatura agradable aun en estaciones invernales.

En el Perú, el porcentaje de viviendas de tierra (en mayoría adobe que tapial) respecto al total de viviendas peruanas no es despreciable (INEI, 2005). De acuerdo al último censo (INEI, 2005), las viviendas de tierra han decrecido desde 1993 al 2005 del 43% al 37% a nivel nacional (Figura 1a). Sin embargo, el departamento del Cusco (con más de 1 171 500 habitantes) mantiene casi el 80% de viviendas de tierra (Figura 1b). En la provincia del Cusco (con más de 348 500 habitantes), las viviendas de tierra han decrecido de un 80% a un 72% al 2005 (Figura 1c). A pesar de esta poca reducción en porcentaje, es evidente que la población de la sierra peruana mantiene el adobe como principal material de construcción y los ladrillos de arcilla como segundo material.

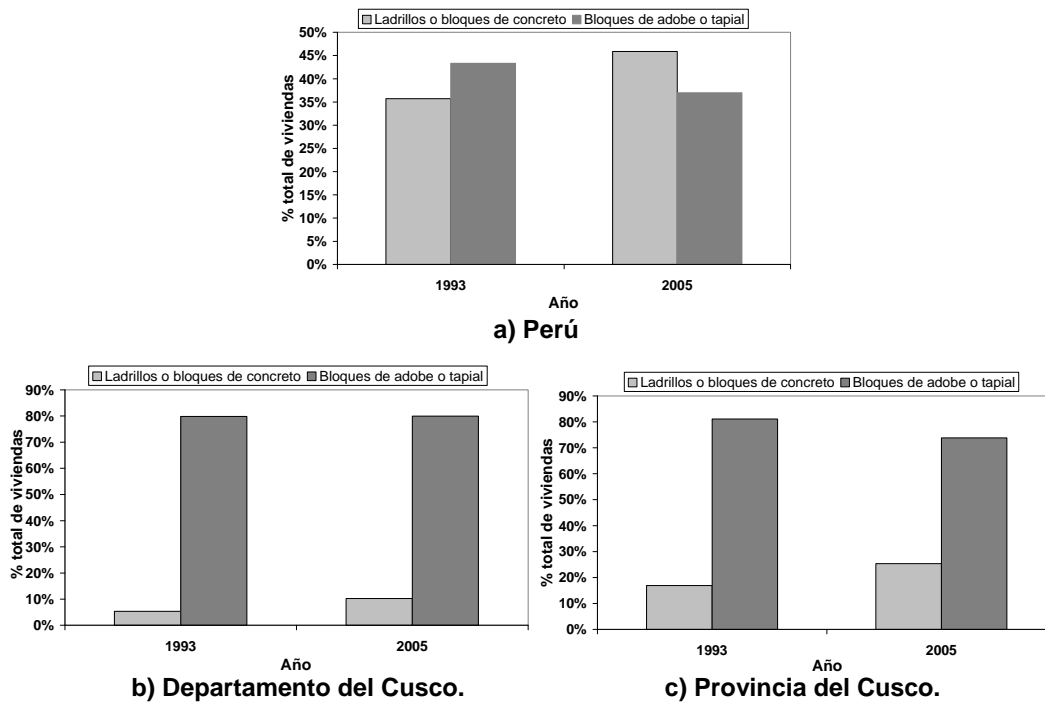
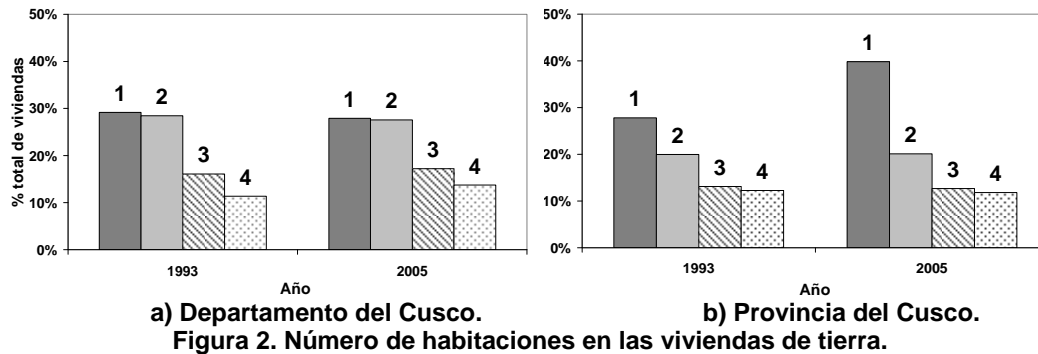


Figura 1. Porcentaje de viviendas de tierra y de arcilla cocida en 1993 y 2005.

En el Cusco no existe una clasificación de viviendas de tierra por pisos; sin embargo, de acuerdo a la Figura 2 se aprecia que la mayoría de viviendas de tierra están

constituidas de una o dos habitaciones. Indirectamente se puede concluir que estas viviendas, o al menos la mayoría de estas, son de un solo piso. Considerando esta premisa se puede decir que en el departamento del Cusco más del 50% de las viviendas de tierra son solo de un piso (Figura 2a). Este porcentaje se incrementa a nivel provincial, donde las casas de un solo piso llegan a ocupar hasta un 60% (Figura 2b).



Según Carazas (2001), las casas rurales de tierra del Cusco (*i.e.* periferia de la ciudad) tienen una gran influencia pre-hispánica. Esto significa que las viviendas de tierra tienen solo un piso y están formadas por dos habitaciones, una de ellas usada para actividades sociales como cocina y comedor, y la otra como dormitorio. La entrada principal se encuentra generalmente entre las dos habitaciones. La Figura 3 muestra ejemplos de viviendas típicas del Cusco.



Figura 3. Viviendas rurales de tierra en Cusco (Blondet *et al.*, 2004).

Considerando la alta concentración de viviendas de tierra en el Cusco y la moderada peligrosidad sísmica (Figura 4), esta ciudad fue elegida para realizar una recopilación de datos sobre las características geométricas de las viviendas (Blondet *et al.*, 2004) y de esta forma tener datos para evaluar las propiedades estructurales de las casas de adobe. El mapa de peligro sísmico, mostrado en la Figura 4, fue elaborado por Tarque

(2008) considerando el tipo de suelo del Cusco. Los resultados en términos de máxima aceleración del suelo (PGA en inglés) se muestran para un período de retorno de 475 años.

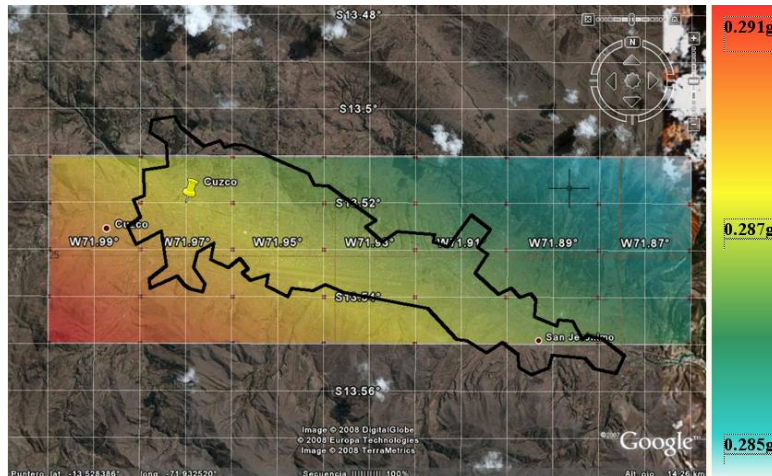


Figura 4. Mapa de peligro sísmico para el Cusco – máxima aceleración del suelo para un período de retorno de 475 años (Tarque, 2008).

Este artículo muestra cómo los parámetros estructurales (capacidad de desplazamiento en el plano de muros y período de vibración), usados para la evaluación de pérdidas por terremotos, han sido derivados. La estimación de daños se realiza comparando la capacidad de desplazamiento de cada estructura aleatoria con la demanda sísmica de desplazamiento. Esta metodología fue desarrollada e implementada por Crowley *et al.* (2004), y es conocida con el acrónimo de DBELA (Displacement Based Method for Earthquake Loss Assessment, en inglés). La generación aleatoria de viviendas de tierra, la cual es usada en DBELA, se realiza con la simulación de Monte Carlo. Esta simulación se basa en la distribución probabilística de las propiedades geométricas y materiales definidas en un paso previo a través de las encuestas *in situ*.

La capacidad de desplazamiento de los muros de adobe es obtenida para diferentes estados límite de daño (derivadas), los cuales están en función al tipo de mecanismo de falla en el plano, de la geometría y de las propiedades estructurales de los muros. Las propiedades geométricas de las viviendas de tierra en Cusco son presentadas en la Sección 2. Las expresiones para la evaluación de la capacidad de desplazamiento y del período de vibración, basadas en ensayos experimentales, son presentadas en la Sección 3

2. PROPIEDADES GEOMÉTRICAS

Blondet *et al.* (2004) realizó un trabajo de recopilación de datos de 30 viviendas de tierra en Cusco. Esta recopilación incluyó información sobre las dimensiones de muros y bloques de adobe, altura de tímpanos, número de habitaciones, número y dimensiones de aberturas, etc., los que fueron organizados en una base de datos. Luego, la media y desviación estándar (DE) de las propiedades geométricas medidas en campo fueron también calculadas.

La Tabla 1a muestra las dimensiones de los muros de adobe. Se encontró que la media del espesor de muros de adobe en Cusco es 0.44m, y la media de la altura de muro es 2.45m para viviendas de un piso y 4.88m para viviendas de dos pisos.

Estos valores de altura están dados sin tener en cuenta la altura de los tímpanos. El espesor de muros es casi uniforme en todas las casas, el cual es confirmado por tener una desviación estándar de 0.04m. En otras ciudades peruanas, especialmente aquellas ubicadas en la costa, el espesor de los muros de adobe se reduce drásticamente por problemas de área de construcción (terrenos más pequeños que en la sierra). Es común encontrar muros de 0.25m, lo que resulta en relaciones de esbeltez (altura/espesor) mayores a 9, incrementando de esta forma la posibilidad de colapso fuera del plano de los muros. De acuerdo a la Norma Peruana de Construcción en adobe (MTC/SENCICO, 2000) los muros con relaciones de esbeltez igual o menores a 6 requieren solo una viga de coronación como refuerzo horizontal. Sin embargo, muros con relaciones de esbeltez mayores a 6 requieren tanto elementos horizontales como verticales de reforzamiento.

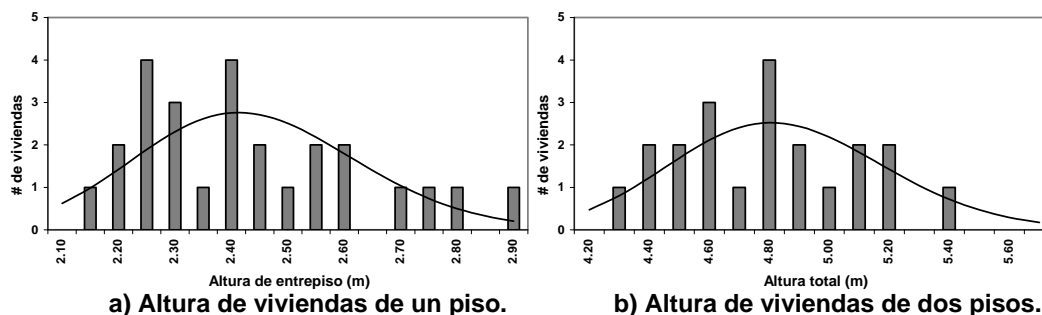
Tabla 1. Propiedades geométricas

a) Muros				b) Bloques de adobe		
	Espesor	Altura (m)		Longitud	Ancho	Altura
	(m)	1 piso	2 pisos			
Media	0.44	2.45	4.88	0.44	0.21	0.15
DE*	0.04	0.21	0.38	0.04	0.02	0.01

c) Tímpanos, aberturas y dimensiones de las habitaciones							
	Tímpanos	Aberturas				Habitaciones	
		Puerta		Ventana		Longitud	Ancho
		Ancho (m)	Altura (m)	Ancho (m)	Altura (m)		
Media	1.33	1.08	1.80	1.07	1.00	5.38	4.53
DE*	0.18	0.18	0.15	0.28	0.13	1.10	0.59

* Desviación estándar.

La Tabla 1b muestra las dimensiones promedio de los bloques de adobe. La media de la longitud, ancho y altura de los bloques son 0.44, 0.21 y 0.15m, respectivamente. La Tabla 1c muestra la media y desviación estándar de las dimensiones de tímpanos, aberturas y de las habitaciones. La media de la altura de tímpanos es 1.33m, de las dimensiones de puerta son 1.08m (ancho) y 1.80m (altura), y de las ventanas son 1.07m (ancho) y 1.00m (altura). Las habitaciones de adobe tienen dimensiones en planta alrededor de 4.53x5.38m². La variabilidad de cada uno de estos parámetros (*i.e.* dimensiones de muros, de bloques, etc.) es representada a través de histogramas y funciones de densidad de probabilidad (FDP, Figura 5).



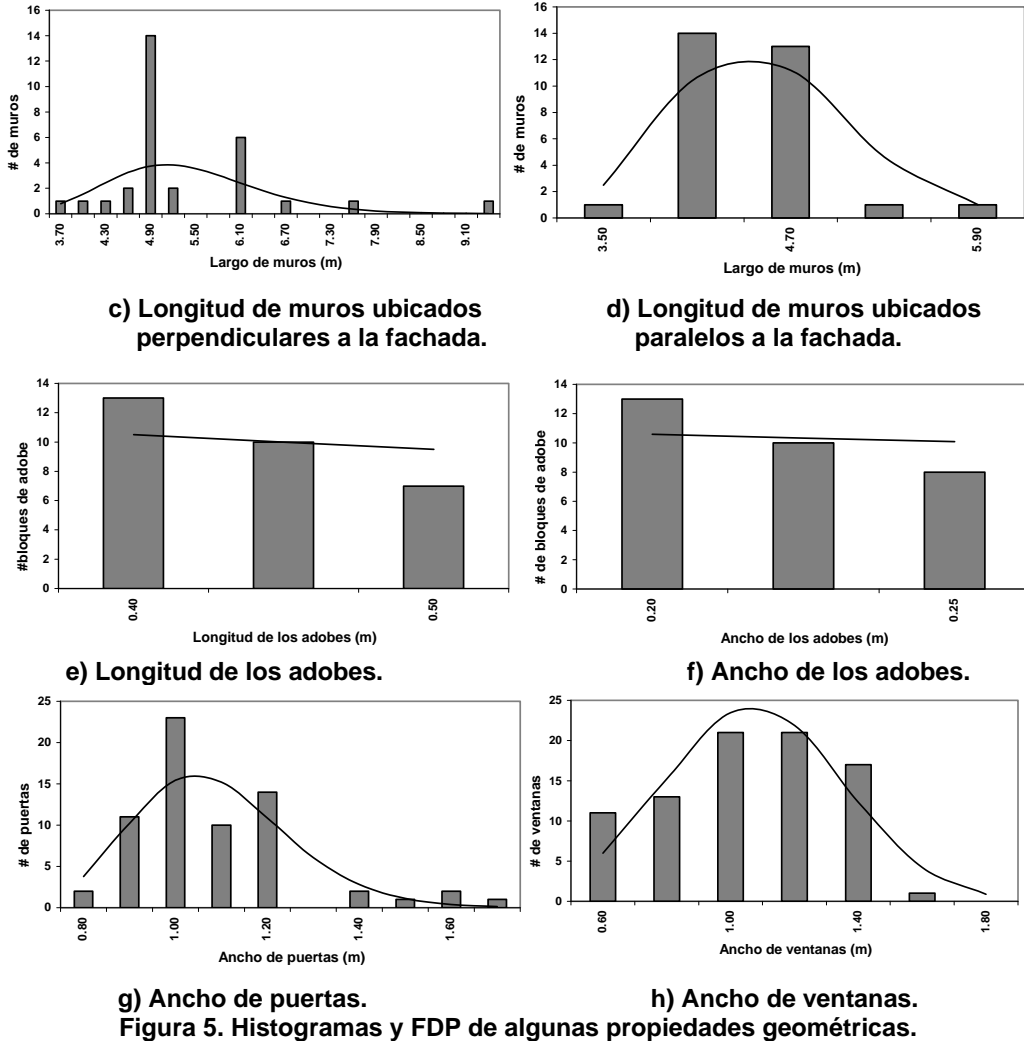


Figura 5. Histogramas y FDP de algunas propiedades geométricas.

De las 30 viviendas encuestadas, 25 eran de dos pisos y sólo 5 de un solo piso. En la Figura 5b se aprecian datos de altura de sólo 21 viviendas de dos pisos ya que la información de las 4 restantes era errónea. Para tener una mayor muestra y calcular la media y desviación estándar de la altura de las viviendas de un solo piso, la altura de entrepiso de las casas de dos niveles fue añadida a la información anterior, de esta forma se tuvieron 26 datos de altura (Figura 5a).

Las distribuciones de probabilidad normal y lognormal representan muy bien la variabilidad de la altura de las casas de tierra. El ancho de las ventanas y puertas, así como las dimensiones de los bloques de adobe son representados por distribuciones de probabilidad uniforme. Para el caso de las longitudes de muros paralelos o perpendiculares a la fachada ni la distribución normal o lognormal parecen ser las más adecuadas (Figura 5c y 5d). Sin embargo, ha sido comprobado que diferentes formas de histogramas pueden ser obtenidas cambiando el tamaño del intervalo en análisis (intervalo en el eje X), de esta forma la distribución normal o lognormal podrían representar mejor las características geométricas consideradas.

3. PROPIEDADES DEL MATERIAL ADOBE Y PROPIEDADES DINÁMICAS

En el 2005, un ensayo cíclico de carga y descarga bajo desplazamiento controlado fue realizado a un muro de adobe en el Laboratorio de Estructuras de la Pontificia

Universidad Católica del Perú, PUCP (Blondet *et al.*, 2005). El muro tenía forma de I (Figura 6a) en planta y fue construido sobre un anillo de concreto armado. En la parte superior una viga de concreto armado fue construida para simular el peso del techo de una vivienda típica de un solo piso. En el 2006, un modelo de vivienda de adobe a escala natural fue sometido a un ensayo dinámico sobre la mesa vibratoria unidireccional de la PUCP (Blondet *et al.*, 2006, Figura 6b). Este último módulo también fue construido sobre un anillo de concreto armado.



a) Ensayo cíclico (Blondet *et al.*, 2005) b) Ensayo dinámico (Blondet *et al.*, 2006)
Figura 6. Ensayos realizados en la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).

Teniendo como base el ensayo cíclico del muro de adobe mostrado en la Figura 6a, cuatro estados límite de daño (LS) fueron obtenidos (Figura 7). Hasta un 0.052% de deriva (desplazamiento horizontal sobre altura del edificio), la estructura es considerada como elástica (LS1); es decir, que la estructura se encuentra completamente operacional. Después de este nivel de daño, la estructura puede sufrir fisuración pero se mantiene aun funcional (LS2) hasta alcanzar un 0.1% de deriva. Luego, el nivel de desempeño de seguridad a la vida es alcanzado para una deriva de 0.26% (LS3). Finalmente, la estructura es considerada como cerca al colapso o colapsada, cuando se alcanza la deriva de 0.52%. Estos valores de deriva son muy similares a los obtenidos en los muros de mampostería (por ejemplo: Calvi, 1999).

La rigidez elástica k es calculada directamente de la curva de capacidad (Figura 7). Con este parámetro fue posible calcular el módulo de elasticidad, E , cuyo valor resultó alrededor de 135MPa. Además, conociendo el peso del muro (135kN) y la rigidez elástica, el período de vibración fue calculado con la siguiente expresión $T_y=2\pi(m/k)^{1/2}$. El valor para el período fue $T_y=0.15s$. Del ensayo dinámico (Figura 6b), el período de vibración obtenido directamente mediante un ensayo de vibración libre fue alrededor de $T_y=0.16s$.

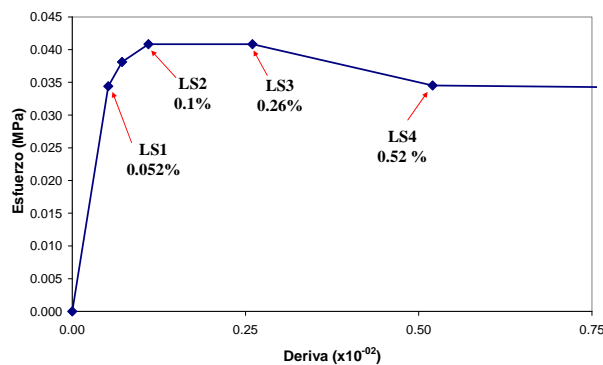


Figura 7. Curva de capacidad para muros de adobe sujetos a cargas en su plano.

Los períodos de vibración obtenidos de los ensayos experimentales fueron comparados con los resultados numéricos de modelos elásticos desarrollados en el programa SAP2000, para diferentes tipos de configuración de viviendas de adobe (Figura 8). El módulo de Young, E , utilizado en estos modelos fue de $0.6E$, ya que se consideró que inclusive durante el primer estado límite de daño (LS1) los muros de adobe pueden haber sufrido micro fisuración debido a contracción por secado, cambios térmicos por condiciones ambientales, falta de mantenimiento, etc. Modelos analíticos con diferentes configuraciones en planta y elevación (considerando los datos obtenidos en el trabajo presentado en la Sección 2) fueron desarrollados para estudiar la influencia de parámetros como el módulo de elasticidad y la altura del edificio en la variación del período de vibración. En la Figura 9 se muestran los valores de los períodos de vibración, tanto experimentales como los analíticos, en función a la altura del edificio. Tal como se puede observar en la Figura 9, existe correlación entre el período de vibración y la altura de las casas de tierra estudiadas.

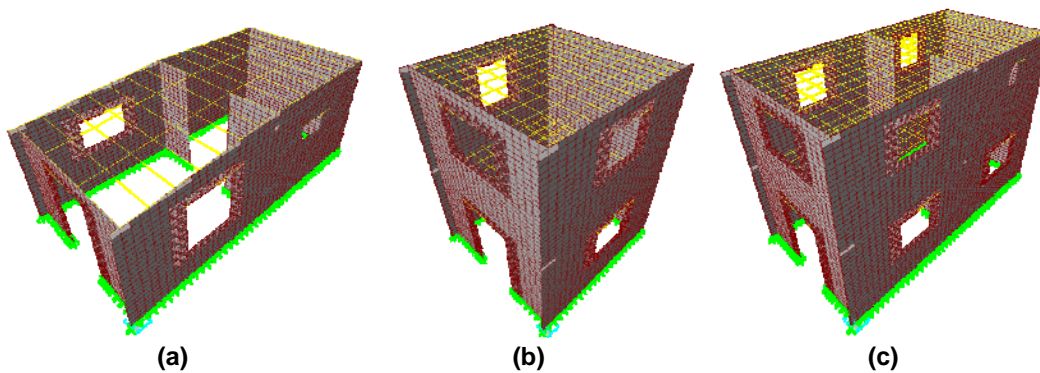


Figura 8. Modelos analíticos para viviendas: (a) de un piso con dos habitaciones, (b) de dos pisos con dos habitaciones, y (c) de dos pisos con cuatro habitaciones.

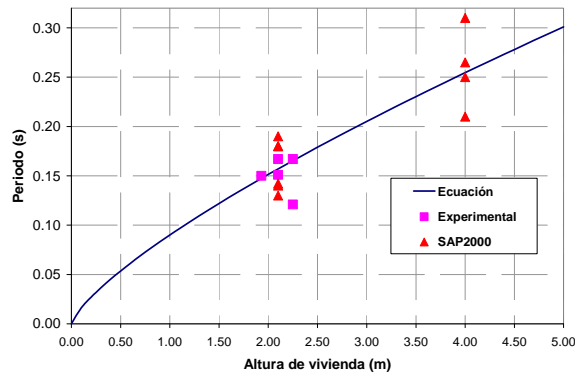


Figura 9. Variación del período de vibración respecto a la altura de las viviendas.

Los valores del período de vibración fueron ajustados mediante un análisis de regresión. La fórmula aplicada tiene la forma $T_y = aH^\beta$, la que resultó en $T_y = 0.09(H)^{3/4}$. Los valores de período de vibración dados por esta correlación son mayores a los valores propuestos en muchos códigos para mampostería (la cual es generalmente tomada como $T_y = 0.05(H)^{3/4}$), porque esta última fue deducida para períodos de vibración de muros con carga vertical a bajos niveles de movimientos de terreno y ha sido calibrada para subestimar el período por 10% ó 20%, en el que se espera grandes fuerzas del espectro elástico de aceleraciones, inversamente proporcional al período (Goel y Chopra, 1998). Sin embargo, el período de vibración derivado en este estudio -el cual es usado para una evaluación de daños- considera la presencia de

fisuras en los muros; por lo tanto, se espera que el periodo de vibración sea mayor a los usados para diseño.

4. CONCLUSIONES

En este artículo se analizan las características geométricas de 30 viviendas de adobe localizadas en el Cusco, Perú, y los resultados de ensayos experimentales sobre un muro y un módulo de vivienda de adobe, construidos y ensayados en el Laboratorio de Estructuras de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Estos resultados permitieron crear expresiones para conocer la capacidad sísmica de los muros de adobe en el plano (período de vibración y capacidad de desplazamiento) en base sólo a sus características geométricas.

La relación de esbeltez de las viviendas de tierra del Cusco es alrededor de 6, valor más bajo comparado con la relación de esbeltez (generalmente mayor a 9) de las viviendas de tierra de la costa peruana. Muros de adobe sin refuerzo sísmico y con relación de esbeltez mayor a 6 son mucho más vulnerables frente a cargas perpendiculares a su plano. Esto último se ha visto durante el terremoto de agosto del 2007 en Pisco, donde más de 30 000 viviendas de tierra colapsaron debido al volteo de sus muros.

Los datos de las viviendas encuestadas (Blondet *et al.* 2005) han servido para calcular valores representativos, tales como la media, desviación estándar y funciones de densidad de probabilidad (FDP) de varios parámetros geométricos (*i.e.* altura de vivienda, longitud de muros, dimensiones de adobes, etc.). Las funciones de densidad de probabilidad describen cómo varían los valores representativos dentro de una población de casas de tierra y se utilizaron para crear poblaciones aleatorias de las viviendas de adobe mediante la simulación de Monte Carlo.

Los resultados de ensayos experimentales y los de modelos analíticos han sido usados para estudiar la variación del período de vibración en función a la altura de las viviendas: $T_y=0.09(H)^{3/4}$. Con esta relación se obtuvieron períodos de vibración del orden de 0.15s para viviendas de un piso y de 0.25s para viviendas de dos pisos. La capacidad de desplazamiento de un muro de adobe fue analizada mediante un ensayo de carga cíclica y fue definida en base a cuatro estados límite de deformación.

Tanto el período de vibración como la capacidad de desplazamiento definen la capacidad sísmica de los muros de adobe para cada estado límite de daño. En una reciente investigación, la capacidad de desplazamiento de los muros de adobe y su período de vibración han sido utilizados, conjuntamente con la demanda sísmica, para evaluar el riesgo sísmico de las viviendas de tierra de un solo piso ubicadas en Cusco (Tarque, 2008). Los resultados muestran un moderado nivel de daño en muros debido a cargas perpendiculares al plano y un alto riesgo sísmico debido a fuerzas paralelas al plano. Es decir, que los muros de adobe en el Cusco son más propensos a sufrir agrietamiento en su plano como primer mecanismo de falla y luego se produce el volteo de los bloques de muros

Investigaciones futuras deberían considerar la estimación de pérdidas económicas debido al colapso de las casas de tierra, calculando la razón de costo de reparación sobre costo total de reposición, y una estimación de pérdida de vidas frente a uno o varios escenarios de riesgo sísmico. Con esto se pone en alerta a las autoridades a fin de mitigar el elevado riesgo sísmico de las construcciones existentes en tierra.

BIBLIOGRAFÍA

- Bariola J., Sozen M. Seismic Tests of Adobe Walls, *Journal of Earthquake Spectra*, Vol. 6, No. 1, 1990, pp. 37-56.
- Blondet M., Tarque N., Acero J. Estudio de Vulnerabilidad Sísmica de las Viviendas Informales de las Sierra Peruana, Proyecto conjunto SENCICO-PUCP, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú. 2004.
- Blondet M., Madueño I., Torrealva D., Villa-García G., Ginocchio F. Using industrial materials for the construction of safe adobe houses in seismic areas, *Memorias de Earth Build 2005*, Sydney, Australia. 2005.
- Blondet M., Vargas J., Torrealva D., Tarque N., Velázquez J. Seismic reinforcement of adobe houses using external polymer mesh, *Memorias del Primer Congreso Europeo sobre Ingeniería Sismorresistente y Sismología ECEE*, Ginebra, Suiza, 2006.
- Calvi G.M. A displacement-based approach for vulnerability evaluation of classes of buildings, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 3, No. 3, 1999, pp. 411-438.
- Carazas W. *Vivienda Urbana Popular de adobe en el Cusco*, UNESCO, Grenoble, France. 2001.
- Crowley H., Pinho R., Bommer J.J. A probabilistic displacement-based vulnerability assessment procedure for earthquake loss estimation, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 2, No. 2, 2004, pp. 173-219.
- Goel R.K., Chopra A.K. Period formulas for concrete shear wall buildings, *ASCE Journal de Structural Engineering*, Vol. 124, No. 4, 1998, pp. 426-433.
- INEI. Censo 2005, Instituto Nacional de Estadística e Informática, Lima, Perú. Disponible a Julio del 2007 en www.inei.gob.pe. 2005.
- MTC/SENCICO, *NTE E.080 – Norma Técnica de Edificación: Norma Peruana de Adobe*, Ministerios de Transporte y Comunicación, SENCICO. Perú. 2000.
- Tarque N. Seismic Risk Assessment of Adobe Dwellings, *Tesis de Maestría*, Centro de Estudios de Post-grado e Investigación en Ingeniería Sismorresistente e Ingeniería Sismológica (ROSE School), Universidad de Pavia, Pavia, Italia. 2008.