



UNIVERSIDAD NACIONAL  
DE INGENIERÍA



CENTRO PERUANO JAPONÉS DE  
INVESTIGACIONES SÍSMICAS Y  
MITIGACIÓN DE DESASTRES

**CONFERENCIA INTERNACIONAL EN  
INGENIERIA SÍSMICA**  
Lima - Perú, 20, 21 y 22 de agosto del 2007

## **LA ALBAÑILERÍA TUBULAR Y SU USO EN VIVIENDAS EN ZONAS SÍSMICAS**

**Rafael SALINAS<sup>1</sup>, Fernando LÁZARES<sup>2</sup>**

### **Resumen**

En Lima ha venido ocurriendo un proceso de crecimiento poblacional en los últimos decenios, produciendo una expansión urbana desorganizada. La capital del Perú ha tenido particularmente una expansión horizontal con una proliferación de viviendas y edificaciones de pocos pisos, construidos mayoritariamente con ladrillos tubulares de arcilla cocida. Estos ladrillos, denominados "pandereta", fueron introducidos en el mercado para su uso en la construcción de tabiques (muros divisorios sin función portante). El diseño de las edificaciones construidas con este material no contó muy probablemente con la participación de un ingeniero civil. El ladrillo pandereta no cubre los requisitos normativos nacionales para su uso en muros portantes, tiene una proporción elevada de vacíos y sus dimensiones externas e internas son ligeramente menores que los de un ladrillo macizo o sus similares para muros portantes. El uso tan extensivo de estas unidades para las viviendas y edificaciones de diverso uso en zonas de expansión de la ciudad, hace necesario el estudio del comportamiento de estas edificaciones. Para este propósito, se realizaron ensayos en muestras de unidades, pilas y muretes, utilizando ladrillos elaborados en forma "industrial" (con procesos de fabricación controlados) y en forma "artesanal" (sin control de procesos). También se ejecutaron ensayos en 4 muros de dimensiones 2,65 x 0,12 x 2,55 m, sometidos a fuerzas laterales coplanares y ortogonales al plano del muro, obteniéndose diferencias significativas entre el comportamiento de los muros construidos con el ladrillo industrial y aquellos con el ladrillo artesanal. Se compararon los resultados obtenidos con el comportamiento registrado en muros convencionales, construidos a base de unidades calificadas con las normas vigentes. Se presenta un análisis sobre el comportamiento del sistema evaluado frente a los sistemas convencionales, y una evaluación de la factibilidad, por cuestiones de seguridad frente a sismos, de seguir construyendo edificaciones con este tipo de ladrillo.

### **Abstract**

A process of population growth in the last decades has been occurring in Lima, producing an urban expansion without any order. The capital of Peru has had particularly a horizontal expansion with many low-high buildings, built mainly with clay tubular masonry. These bricks, called "pandereta", were launched to be used only in partition walls. The design of the buildings with this material did not have the participation of a civil engineer. Actually, this kind of tubular masonry does not cover the requirements of the Masonry National Code for their use in structural walls. The extensive use of these bricks in house buildings in several expansion zones of the city made necessary the study of the behavior of these buildings. For this purpose, some tests were carried out, using "industrial" bricks (with controlled

<sup>1</sup> Laboratorio de Estructuras, CISMID-FIC-UNI.

<sup>2</sup> Departamento de Planeamiento y Mitigación de Desastres, CISMID-FIC-UNI.

production processes) and "craft" bricks (without controlled processes). In addition to, tests in 4 walls were carried out, submitting them by both planar and orthogonal lateral forces, getting remarkable differences among the behavior of the walls built with the industrial brick and those with the craft brick. The results obtained were compared with the recorded behavior in conventional walls, built with solid bricks. An analysis on the behavior of the system in study in comparison with that of the conventional systems is presented, as well as an evaluation of the feasibility of constructing those buildings, taking into account security against earthquakes.

## INTRODUCCIÓN

El uso masivo de estos ladrillos empieza aproximadamente en la década de 1990, siendo mayor su empleo en los llamados conos de Lima, en la periferia de la ciudad.

Una encuesta realizada por los autores en los distritos de San Martín de Porres y Los Olivos, ubicados en el Cono Norte de la Ciudad de Lima, refleja un porcentaje importante de viviendas construidas con el ladrillo pandereta, llegando a alcanzar en promedio el 57% del total de viviendas encuestadas (Tablas 1 y 2). Debido a que en su gran mayoría han sido autoconstruidas, es decir construidas sin la dirección y/o supervisión de un ingeniero civil, se pueden observar en ellas defectos de estructuración y de procesos constructivos, como se muestra en la Figura 1.

Tabla 1. Número de viviendas según el ladrillo utilizado en muros portantes.

| Manzana | M1 | M2 | M3 | Total |
|---------|----|----|----|-------|
| LP      | 36 | 39 | 21 | 96    |
| LC      | 20 | 36 | 16 | 72    |
|         | 56 | 75 | 37 | 168   |

LP = ladrillo pandereta y mixto (pandereta y común).  
 LC = ladrillo común (king-kong, macizo).

Tabla 2. Porcentaje de viviendas según el ladrillo utilizado en muros portantes.

| Manzana | M1 (%) | M2 (%) | M3 (%) | Total |
|---------|--------|--------|--------|-------|
| LP      | 64     | 52     | 57     | 57    |
| LC      | 36     | 48     | 43     | 43    |



Figura 1. Construcciones de 2 a 4 pisos con ladrillo pandereta.

Este tipo de ladrillos se produce en el Perú, siendo diversas las fábricas dedicadas a su elaboración. Por ello, se ha tomado como muestra de estudio dos tipos de ladrillos mayoritariamente utilizados en la construcción formal e informal (autoconstrucción). La calidad y el precio de estas unidades varían en el mercado, predominando en varios casos el aspecto económico para su selección. Los ladrillos utilizados en este trabajo son conocidos como marca Rex y Huachipa, siendo ésta última de fabricación no estandarizada, es decir, no se puede asegurar que los procesos utilizados para su elaboración cumplan con las normas y especificaciones técnicas vigentes. En la Figura 2 se muestra el proceso de almacenamiento de ladrillos en una fábrica de este tipo, donde aquellos son expuestos a la intemperie sin mayor cuidado.



Figura 2. Almacenamiento de ladrillos de fabricación no estandarizada.

### CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL USADO EN LOS ENSAYOS

Como se mencionó en el acápite anterior, los ladrillos usados para este estudio fueron de dos tipos. El primero correspondió a la marca Rex, fabricado mediante procesos industriales estándar – denominado en adelante ladrillo industrial – y el segundo fue obtenido de una fábrica en Huachipa (al este de Lima) – denominado ladrillo artesanal. La forma de estos ladrillos tubulares es la misma, y tienen seis huecos horizontales y caras externas bruñadas (Figura 3). Las dimensiones de las unidades presentan variaciones, como se muestra en la Tabla 3, donde los ladrillos industriales tienen altura y longitud mayores, pero espesores de paredes externas e internas menores. Ello genera en los ladrillos industriales un área neta de la superficie a compresión menor, de 53,3 cm<sup>2</sup> frente a 87,8 cm<sup>2</sup> para los ladrillos artesanales, es decir, una diferencia de 64,7%.

Tabla 3. Dimensiones de los ladrillos pandereta.

| Tipo de ladrillo | Dimensiones (cm) | Pared exterior (cm) | Pared interior (cm) | Área neta (cm <sup>2</sup> ) |
|------------------|------------------|---------------------|---------------------|------------------------------|
| Industrial       | 11.0x11.5x22.8   | 0,8                 | 0,5                 | 53,3                         |
| Artesanal        | 10,0x11,4x23,1   | 1,0                 | 0,9                 | 87,8                         |

Fueron ejecutados ensayos de resistencia a la compresión en 10 unidades de ladrillos, 5 industriales y 5 artesanales. Los resultados se muestran en la Tabla 4. Las resistencias a compresión de las unidades obtenidas no difieren mucho, siendo del orden de 40 a 43 kg/cm<sup>2</sup>, aunque la forma de falla es diferente.

Mientras que los ladrillos industriales llegan a colapsar con grietas y rotura de paredes externas, los artesanales fallan presentando fisuras y grietas de menor espesor, sin rotura (Figura 4).



Figura 3. Ladrillos pandereta típicos en vistas lateral y frontal. Artesanal (izquierda) e industrial (derecha).

Tabla 4. Resultados de los ensayos a compresión en unidades.

| Tipo de ladrillo | Area bruta (cm <sup>2</sup> ) | f <sub>b</sub> promedio (kg/cm <sup>2</sup> ) | Desviación estándar (kg/cm <sup>2</sup> ) |
|------------------|-------------------------------|---|---|
| Industrial       | 263,6                         | 43,3  | 7,7                                       |
| Artesanal        | 263,3                         | 40,4  | 2,5                                       |

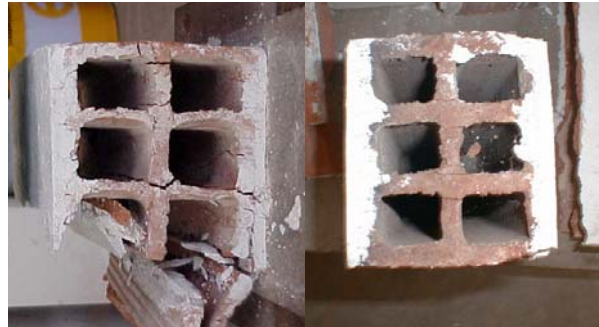


Figura 5. Falla a compresión en unidades de albañilería. Artesanal (izq.) e industrial (der.).

Para una mejor definición de las propiedades mecánicas de los ladrillos, se ejecutaron una serie de ensayos de compresión en pilas y de tracción diagonal en muretes. Los resultados promedio obtenidos se presentan en la Tabla 5. Los ensayos de compresión en pilas presentaron resultados diferentes según el tipo de ladrillo, tanto en magnitudes de resistencia máxima como en tipo de falla. Mientras que los ladrillos industriales tuvieron una resistencia de 22,1 kg/cm<sup>2</sup> y una falla con rotura general del espécimen, los artesanales tuvieron mayor resistencia, de 33,2 kg/cm<sup>2</sup> y una falla con rotura local (Figura 6). Los ensayos de tracción diagonal también dieron valores de resistencia al corte mayores para los ladrillos artesanales; la resistencia al corte para estos ladrillos fue de 9,6 kg/cm<sup>2</sup> y aquella para los ladrillos industriales fue de 6,7 kg/cm<sup>2</sup>.

Tabla 5. Resultados de los ensayos a compresión en pilas y de tracción diagonal en muretes.

| Tipo de ladrillo | $f'_m$ promedio (kg/cm <sup>2</sup> ) | $v'_m$ promedio (kg/cm <sup>2</sup> ) |
|------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Industrial       | 22,1                                  | 6,7                                   |
| Artesanal        | 33,2                                  | 9,6                                   |



Figura 6. Forma de falla a compresión en pilas de albañilería. Artesanal (izq.) e industrial (der.).

Los valores de resistencia al corte encontrados en ambos tipos de ladrillos son relativamente altos, si son comparados con los que usualmente se especifican para los ladrillos de muros portantes. Esto puede estar asociado a la unión que ha producido el mortero entre las caras laterales de las unidades. En la Figura 7 se presenta la forma de falla general en el ensayo de tracción diagonal y en la Figura 8 un detalle de la superficie del plano de falla, en los cuales se observa la formación de pequeños bloques de mortero que han actuado como llaves – conexiones entre caras laterales –, incrementando la resistencia al corte en el plano de falla.



Figura 7. Ensayo de tracción diagonal en muretes.



Figura 8. Detalle. Nótese las llaves de mortero en los agujeros de los bordes de la unidad.

La Norma Peruana de Albañilería NTE-070 establece valores recomendables de  $f'_m$  y  $v'_m$  para ladrillos de arcilla de uso portante, que se muestran en la Tabla 6. De estos valores es notable que, mientras las resistencias a la compresión  $f'_m$  de la Norma son mayores que las obtenidas en los ladrillos pandereta, las resistencias al corte  $v'_m$  de la Norma son menores. Lo primero está asociado a una menor área neta resistente a esfuerzos axiales, mientras que lo segundo puede deberse al efecto de las llaves de mortero en las paredes de contacto entre las unidades de albañilería, indicado en el párrafo anterior.

Tabla 6. Resistencias características de la albañilería de arcilla.

| Denominación             | $f'_b$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | $f'_m$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | $v'_m$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) |
|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| King Kong artesanal (*)  | 55                              | 35                              | 5,1                             |
| King Kong industrial (*) | 145                             | 65                              | 8,1                             |
| Pandereta artesanal      | 40.4                            | 33.2                            | 9.6                             |
| Pandereta industrial     | 43.3                            | 22.1                            | 6.7                             |

(\*): Norma E-070.

## ENSAYOS CÍCLICOS

Los ensayos realizados en los muros consistieron en una serie de cuatro ensayos con carga lateral cíclica, dos de ellos con la carga colineal y los otros dos con la carga ortogonal al plano del muro. Para obtener la respuesta del muro frente a sollicitaciones de carga cíclica lateral se utilizó un actuador lateral apoyado sobre un muro de reacción, mediante el cual las cargas laterales al muro fueron aplicadas. Adicionalmente, se confinó verticalmente el muro con una carga constante, para lo que se utilizó un pórtico de acero, de manera que sirviera de reacción a un actuador vertical que aplicaría la carga vertical de confinamiento. La fuerza lateral fue aplicada en ciclos de carga para llegar a niveles de distorsión angular en el muro progresivamente mayores.

Los especímenes ensayados fueron cuatro muros. Dos muros fueron construidos con el ladrillo industrial y dos con el ladrillo artesanal. Los muros fueron de 2,65m de longitud, 2,20m de altura. El espesor varió de acuerdo al ladrillo usado. El refuerzo de los elementos de confinamiento consistió, en los elementos

verticales, de 4 varillas de  $\phi \frac{1}{2}$ ", y, en los elementos horizontales, de 4 varillas de  $\phi \frac{3}{8}$ ". Los estribos fueron hechos con varillas de  $\phi \frac{1}{4}$ ". La Tabla N° 7 muestra las características básicas de los muros ensayados. La Figura 9 muestra los muros en construcción.

Tabla N° 7. Características de los muros ensayados.

| Calidad    | Aparejo | Largo (m) | Altura (m) | Espesor (m) |
|------------|---------|-----------|------------|-------------|
| Industrial | Soga    | 2,65      | 2,37       | 0,12        |
| Artisanal  | Soga    | 2,65      | 2,37       | 0,11        |



Figura 9. Construcción de los muros.

## RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Los resultados principales se obtuvieron a partir de la respuesta de los muros en términos de los desplazamientos y la correspondiente fuerza aplicada. En base a esta información se graficaron las curvas de histéresis y las curvas de comportamiento. La última curva sirvió de base para el cálculo de la ductilidad máxima en los muros para cargas laterales coplanares. A continuación se resumen los resultados de los ensayos cíclicos de carga lateral coplanar.

Este ensayo se ejecutó en cada muro construido con ladrillo industrial y con ladrillo artesanal. Las formas de falla fueron similares en ambos tipos de muro. En la Figura 10 se muestran las fotos de los estados finales de los muros. La falla que provocó la disminución de la capacidad resistente fue la de tracción diagonal por corte.

En el estado último, el muro con ladrillo industrial presentó grietas considerables en las unidades de ladrillo, llegando a la destrucción parcial de algunas unidades; el muro llegó a una distorsión máxima de 1/200 (0,005); en cambio, el muro con ladrillo artesanal tuvo un agrietamiento más extendido, habiendo llegado el espécimen a distorsiones de 1/166 (0,006). No obstante, el primer agrietamiento ocurrió en ambos muros a una distorsión de 1/500 (0,002), acompañado por un ruido fuerte asociado a la aparición de una grieta diagonal en los muros. Este nivel de distorsión indicaría un límite claro en términos de un nivel de servicio para los muros construidos con este material.

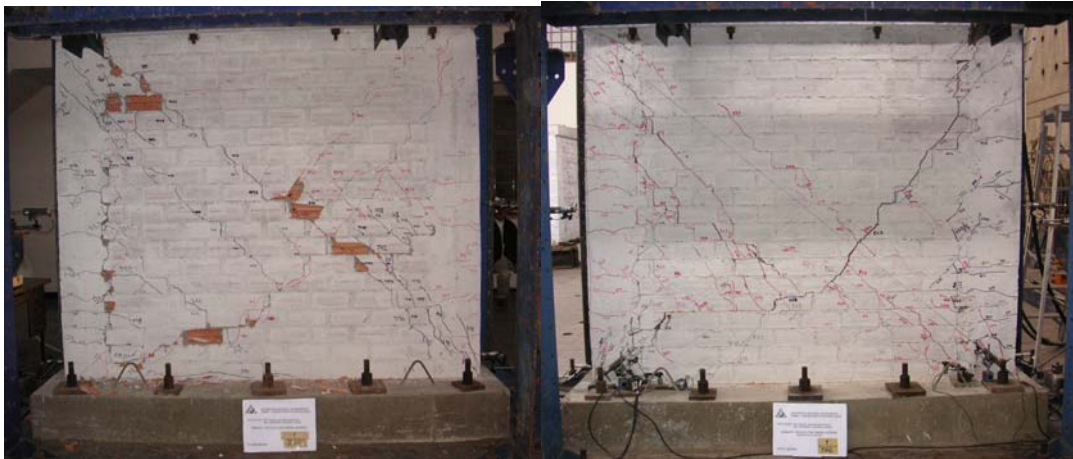


Figura 10. Estado final de muros. Izquierda: ladrillo industrial. Derecha: ladrillo artesanal.

Las curvas de histéresis para los muros se muestran en la Figura 11. En ambos casos, los lazos histeréticos son angostos y por tanto revelan la baja capacidad de disipación de energía ante cargas cíclicas de esta clase de unidad de albañilería. De las curvas de comportamiento mostradas en la Figura 12, el muro de ladrillo industrial presentó una capacidad máxima de 15,86 toneladas y una deformación máxima de 11,6mm; la deformación de fluencia fue estimada en 1,6mm. Por otra parte, el muro de ladrillo artesanal presentó una capacidad máxima de 15,27 toneladas y una deformación máxima de 13,4mm; la deformación de fluencia fue de 2,2mm.

Con estos datos se calcularon los valores de ductilidad máxima de deformación ( $\mu$ ), siendo de 7,1 para el muro de ladrillo industrial y 6,0 para el muro de ladrillo artesanal. Otro parámetro importante es el factor de reducción de la respuesta elástica,  $R$ , el cual fue estimado por dos métodos basados en la igualdad de energía, uno con un modelo elastoplástico equivalente – en función a  $\mu$  – y otro considerando la curva de comportamiento. Los valores calculados se presentan en la Tabla 8. Con el segundo criterio, que puede ser más realista, los valores de  $R$  para niveles de resistencia última son de 3,2 y 2,7 para el ladrillo industrial y artesanal, respectivamente, en tanto que para niveles de servicio – bajo distorsiones de 1/500 – son de 2,4 y 1,9 en el mismo orden.

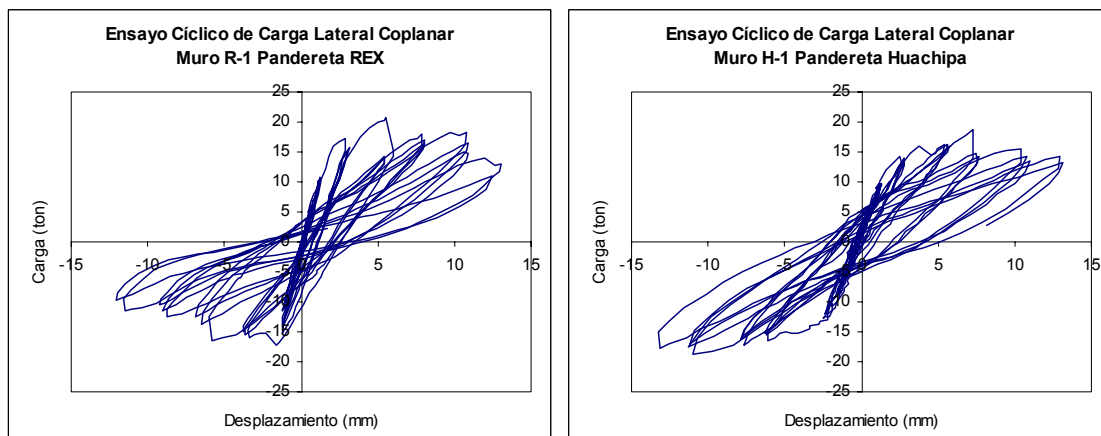


Figura 11. Curvas de histéresis. Izquierda: ladrillo industrial. Derecha: ladrillo artesanal.



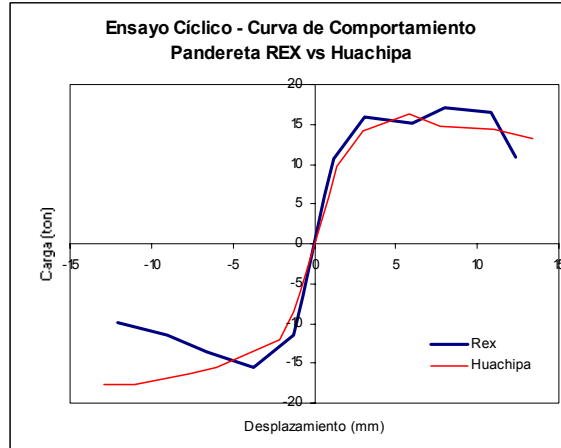


Figura 12. Curvas de comportamiento. Cargas cíclicas coplanares.

Tabla N°8. Parámetros de ductilidad y Factores R calculados.

| Calidad    | Ductilidad máxima ( $\mu$ ) | R (a base de $\mu$ ) | R (servicio) | R (resistencia última) |
|------------|-----------------------------|----------------------|--------------|------------------------|
| Industrial | 7,1                         | 3,6                  | 2,4          | 3,2                    |
| Artesanal  | 6,0                         | 3,3                  | 1,9          | 2,7                    |

Los valores de R obtenidos resultan claramente diferentes a los que se consideran para muros con unidades sólidas de albañilería confinada. En la Norma E-030 se establece un valor de R de 6, en estado de resistencia última. En el caso de las unidades tubulares estudiadas, este valor se reduce a la mitad. Ello es un indicativo de la baja ductilidad de este material. Sin embargo, es necesario complementar esta información con más ensayos similares, con ladrillos tubulares de procedencia diversa, para obtener valores promedio con más precisión estadística.

## COMPORTAMIENTO SÍSMICO

Una de las interrogantes acerca del uso del ladrillo tubular en edificaciones de baja altura construidas en el sector informal de la construcción es su comportamiento frente a sismos, como los que ya ha sufrido la ciudad de Lima en 1940, 1966 y 1974, para citar solamente los más notables de los últimos decenios. Se presenta a continuación una comparación del comportamiento sísmico de este sistema con aquel constituido por ladrillos macizos King Kong, en base a los resultados de ensayos en muros efectuados en el Laboratorio de Estructuras del CISMID en años anteriores, recopilados por Zavala et al (2006).

En la Figura 13 se presentan las curvas de comportamiento para los muros construidos con ladrillo sólido King Kong y con ladrillo tubular pandereta, tanto industrial como artesanal. En los muros de ladrillo tubular destacan claramente la menor resistencia en términos de esfuerzo cortante, del orden de 60 a 70 % de la resistencia del muro de ladrillo sólido, así como la menor distorsión de entrepiso, del orden de 50 % de la máxima obtenida en el muro de ladrillo sólido. En base a los resultados de los ensayos descritos en el acápite anterior y considerando que, de acuerdo a la Norma de Diseño Sismorresistente E-030, la distorsión máxima admisible para las estructuras con muros de albañilería sólida es de 0,005, interpretando los valores observados en la Figura 13, puede establecerse que la distorsión máxima admisible para las estructuras con muros de ladrillo tubular sería de 0,0025.

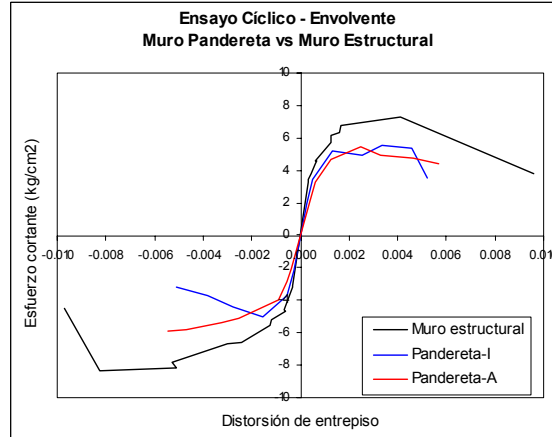


Figura 13. Curvas de comportamiento.  
Muro Pandereta (este estudio) vs Muro Estructural (Zavala et al, 2006).

Fue evaluado el comportamiento global del sistema de muros con ladrillo tubular en contraste con el sistema de muros de ladrillo King Kong. Los casos analizados corresponden a edificios de 2 y 4 pisos, con densidades de muros entre 2 y 6% del área construida total.

Los modelos utilizados son modelos elastoplásticos equivalentes de un grado de libertad, considerando modelos de parámetros globales de masa y rigidez con una estructuración regular y un primer modo preponderante (Zavala et al, 2006). En estos modelos se realizaron análisis tiempo-historia con el acelerograma del sismo de Lima del 10 de octubre de 1966, componente NS, escalado para considerar demandas de aceleración máxima progresivamente incrementada, desde 100 gals hasta 500 gals. Este sismo presenta la mayor aceleración máxima registrada en toda la historia de los datos instrumentales en Lima Metropolitana, con 269 gals (Figura 14). De este modo, se obtuvieron las respuestas de los sistemas estructurales, para tener una idea global del comportamiento de las estructuras con muros de ladrillos sólido y tubular, fabricados tanto en forma industrial como artesanal.

En la Figura 15 se presentan los gráficos de cortante en la base versus distorsión máxima de entrepiso, para un edificio representativo de cuatro pisos, con densidades de 4 y 6%. Para una densidad de 4%, el comportamiento sísmico del sistema en estudio es tal que las distorsiones máximas son de 0,0034 y 0,0044, mayores que el límite establecido para el ladrillo tubular. Para una densidad de 6%, el comportamiento sísmico se encuentra en un estado de incertidumbre, puesto que la distorsión en el ladrillo artesanal excede el valor límite de distorsión máxima, mientras que la distorsión en el ladrillo industrial se encuentra cercana a dicho valor.

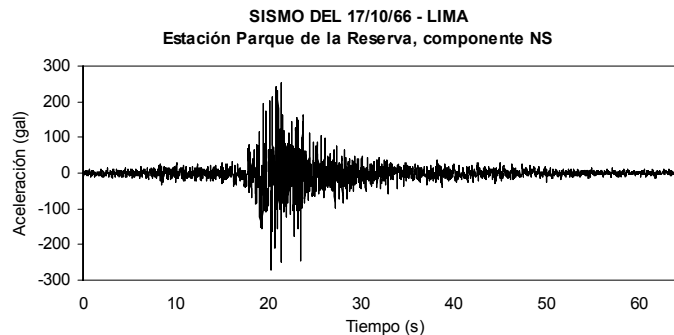


Figura 14. Acelerograma en el Cercado de Lima. Sismo del 17 de Octubre de 1966.

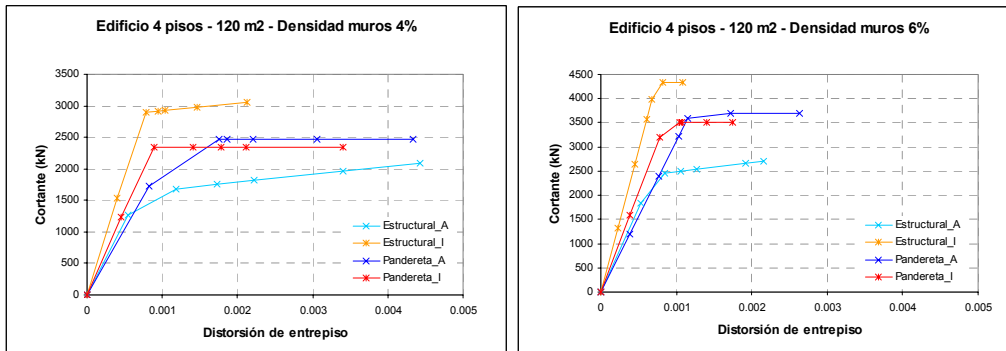


Figura 15. Cortante vs distorsión. Edificio de 4 pisos.

En la Figura 16 se presentan los gráficos de cortante en la base versus distorsión máxima de entrepiso, para un edificio representativo de dos pisos, con densidades de 2 y 4%, índices comunes en los edificios construidos con ladrillos tubulares. Para una densidad de 2%, el comportamiento sísmico del sistema en estudio se encuentra en un estado de incertidumbre, debido a que las distorsiones máximas en el ladrillo artesanal y el ladrillo industrial se encuentran cercanas al valor admisible. Para una densidad de 4%, el comportamiento sísmico del sistema se encuentra en un estado de relativa seguridad, al no exceder los límites de distorsión.

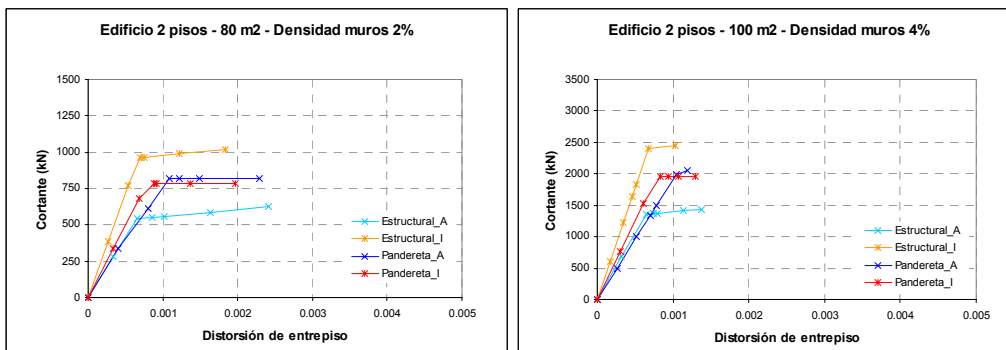


Figura 16. Cortante vs distorsión. Edificio de 2 pisos.

En todos los casos analizados, el comportamiento de los modelos correspondientes a los sistemas con muros de ladrillo macizo es satisfactorio, como es de esperar en este tipo de material. Aunque en algunos casos, la distorsión máxima es mayor a la del sistema con ladrillo tubular, la distorsión máxima admisible del primer sistema resulta mayor a las distorsiones de demanda estimadas.

En lo que concierne al sistema con muros de ladrillo tubular, el caso de los edificios de cuatro pisos es particularmente crítico, debido a que las distorsiones de demanda para densidades relativamente altas se encuentran cerca al límite de distorsión admisible, el mismo que puede ser excedido por irregularidades en la estructuración u otros efectos de orden local no contemplados en los modelos globales. Los edificios de dos pisos con una densidad baja de muros también presentarían esta situación de incertidumbre en su seguridad. Como se aprecia en los análisis mostrados, no hay gran diferencia en la rigidez de los sistemas comparados, pero sí en la capacidad al cortante en la base y sobre todo, en las demandas de distorsión máxima en comparación a la distorsión máxima admisible. Aunque en algunos casos, las demandas de distorsión máxima en el sistema con ladrillo tubular son menores a las del sistema con ladrillo macizo (estructural), tales demandas de distorsión resultan mayores o cercanas a las distorsiones admisibles.

Los resultados presentados corresponden a un sismo en particular, por lo que sería necesario realizar análisis similares con otros registros sísmicos obtenidos en la región (Cornell, 2005), tales como el sismo de Lima del 3 de octubre de 1974, caracterizado por una mayor duración, por lo que las demandas de distorsión podrían ser mayores.

## CONCLUSIONES

En la ciudad de Lima y otras ciudades, el uso de los ladrillos tubulares o “pandereta” se ha extendido a la construcción de edificios de baja altura de hasta cuatro y cinco pisos, básicamente en el sector informal de la construcción y en la periferia de la zona urbana consolidada. Los ladrillos pandereta son producidos de manera industrial, en fábricas con procesos estandarizados y en fábricas sin estos procesos. En este estudio se tomaron ladrillos de una fábrica del primer tipo (“industrial”) y de una del segundo (“artesanal”) para la preparación de los especímenes de ensayo. Las dimensiones de las unidades de los ladrillos pandereta presentan variaciones, de acuerdo a su procedencia.

La Norma Peruana de Albañilería NTE-070 establece valores recomendables de  $f'_m$  y  $v'_m$  para algunos ladrillos de arcilla para uso portante. De estos valores, es notable que mientras las resistencias a la compresión  $f'_m$  sean mayores que las obtenidas en los ladrillos pandereta, las resistencias al corte  $v'_m$  sean menores. Sin embargo, esta resistencia al corte mayor en muretes de ladrillo tubular no se refleja en una mayor capacidad en los muros.

En los ensayos de carga lateral cíclica coplanar, la falla que provocó la disminución de la capacidad resistente en todos los casos fue la de tracción diagonal por corte. En el estado último, el muro con ladrillo industrial presentó grietas considerables en las unidades de ladrillo, llegando a la destrucción parcial de algunas unidades; el muro llegó a una distorsión máxima de 1/200 (0,005). En cambio, el muro con ladrillo artesanal tuvo un agrietamiento más extendido, habiendo llegando el espécimen a distorsiones de 1/166 (0,006).

Con los resultados de los ensayos de carga lateral cíclica coplanar se calcularon los valores de ductilidad máxima de deformación y los factores de reducción, R. Los valores de R para niveles de resistencia última fueron calculados en 3,2 y 2,7 para el ladrillo industrial y artesanal, respectivamente. Estos valores son del orden de la mitad de los que la Norma E-030 establece para la albañilería de uso estructural.

Se realizó un análisis del comportamiento global del sistema de muros con ladrillo tubular en contraste con un sistema de muros de ladrillo macizo. Los casos analizados corresponden a edificios de 2 y 4 pisos, con densidades de muros entre 2 y 6% del área construida total. Para ello, se prepararon modelos elastoplásticos equivalentes de un grado de libertad, sometidos a análisis tiempo-historia considerando el comportamiento no-lineal, con el registro del sismo de Lima del 10/10/1966. En base al análisis realizado, en lo que concierne al sistema con muros de ladrillo tubular, el caso de los edificios de cuatro pisos es particularmente crítico, debido a que las distorsiones de demanda se encuentran cerca al límite de distorsión admisible, el mismo que puede ser excedido por irregularidades en la estructuración u otros efectos de orden local no contemplados en los modelos globales. Los edificios de dos pisos con una densidad baja de muros también presentarían esta situación de incertidumbre en su seguridad.

Aunque no hay gran diferencia en la rigidez de los sistemas comparados, sí se presenta una diferencia apreciable en la capacidad al cortante en la base y sobre todo, en las demandas de distorsión máxima en comparación a la distorsión máxima admisible. Ello limita las posibilidades de uso de este material para edificaciones de más de dos pisos. Incluso para estos edificios, la densidad de muros debería ser alta para conseguir un comportamiento adecuado frente a un evento sísmico.

Se recomienda complementar el estudio de este material con muestras de otros fabricantes, para conseguir una mayor precisión estadística respecto a los resultados obtenidos en este trabajo. Es recomendable asimismo analizar el comportamiento sísmico de estas edificaciones en otras clases de suelos, para observar la influencia de efectos de sitio en las demandas sísmicas. Por otra parte, se recomienda realizar

un ensayo de carga cíclica a una edificación de dos pisos construida con estos ladrillos, a fin de obtener resultados con mayor detalle a los conseguidos en el presente estudio.

### AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo brindado por el Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería, sin cuyo aporte económico no hubiera sido posible la realización de este estudio. La ejecución de los ensayos en las unidades, muretes y muros se llevó a cabo en el Laboratorio de Estructuras del CISMID. Se reconoce al personal profesional y técnico del Laboratorio por su participación en la ejecución de los ensayos. En especial se agradece la participación del Dr. Carlos Zavala en la dirección de los ensayos de carga cíclicos, así como la ayuda de la Srta. Jenny Taira en la preparación de la base de datos de los sistemas equivalentes de las edificaciones estudiadas.

### REFERENCIAS

- Alcocer, S. (1997). Comportamiento sísmico de estructuras de mampostería: una revisión. Memorias del XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Veracruz, México.
- Cornell, A. (2005). On earthquake record selection for nonlinear dynamic analysis. Memorias del Simposio en honor al Dr. Luis Esteva. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, México.
- Kato, H., Goto, T., Mizuno, H., Iiba, M. (1992). Cyclic loading tests of confined masonry wall elements for structural design development of apartment houses in the Third World. Memorias del 10º Congreso Mundial de Ingeniería Sísmica, Madrid, España.
- Manfredi, G., Mazzolani, S., Masi, A. (1992). Review of existing in experimental testing of masonry structures subjected to horizontal loads. Memorias del 10º Congreso Mundial de Ingeniería Sísmica, Madrid, España.
- Meli, R., Reyes, A. (1971). Propiedades mecánicas de la mampostería. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- San Bartolomé, A. (1994). Construcciones de albañilería – Comportamiento sísmico y diseño estructural. Fondo editorial PUCP. Lima, Perú.
- SENCICO (2000). Reporte del Proyecto D/120: Estudio experimental de la influencia del área neta en ladrillos de arcilla y su influencia en el comportamiento sismorresistente de muros confinados. Preparado por C. Zavala y M. Ramírez. Lima, Perú.
- Zavala, C. (1996). Técnicas de ensayos en laboratorios de estructuras. Memorias del Curso Internacional sobre Edificaciones de Bajo Costo en Zonas Sísmicas. CISMID, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.
- Zavala, C., Gibu, P. y Salinas, R. (2006). Seismic response diagnosis on masonry housing using experimental models on a screening method. Reporte interno para el Proyecto EDES\_B, del International Institute of Seismology and Earthquake Engineering IISEE, Japón.