

COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE MUROS CONFINADOS CONSTRUIDOS CON LADRILLOS DE CONCRETO Y DE ARCILLA

Por: Ángel San Bartolomé y Paola Angles
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

RESUMEN

Se analizó la influencia del tipo de ladrillo: de concreto vibrado y de arcilla cocida, en el comportamiento sísmico de la albañilería confinada, para lo cual, en el Laboratorio de Estructuras de la PUCP, se efectuaron ensayos de carga lateral cíclica en dos muros con las mismas características, pero contruidos cada uno con los ladrillos indicados.



1. INTRODUCCIÓN

Los muros de albañilería confinada tradicionalmente se construyen en nuestro medio utilizando ladrillos de arcilla, sin embargo, en la fabricación de esas unidades se emplea suelo de cultivo, lo que depreda nuestros recursos agrícolas. Esa fue la principal razón que motivó el desarrollo de esta investigación, aparte que la albañilería confinada hecha con ladrillos de concreto aún no ha sido ensayada sísmicamente, por lo que en este trabajo se pretende determinar sus propiedades a fin de incorporarlas en la Norma E.070 (Ref.1).

Con el objetivo indicado, y además con fines comparativos, se ensayaron a carga lateral cíclica dos muros confinados: uno construido con ladrillos de arcilla cocida (MA) y otro hecho con ladrillos de concreto vibrado (MC). Ambos muros presentaron las mismas dimensiones, refuerzo y mano de obra, aunque, por el hecho de que los ladrillos de concreto deben asentarse en su estado natural (secos), hubo que modificar el tipo de mortero. Los ladrillos de concreto no pueden regarse por su baja succión y, también, porque debido a su alta variación volumétrica se expandirían, para luego contraerse al secar, lo que podría generar fisuras en el muro.

2. CARACTERÍSTICAS DE LOS LADRILLOS

Se utilizaron ladrillos industriales de arcilla y de concreto con las mismas dimensiones: 24 cm de longitud, 9 cm de altura y 13 cm de espesor. En la Tabla 1 se resume las propiedades de estos ladrillos, provenientes de los ensayos realizados, con las cuales, de acuerdo a la Ref.1, los ladrillos de arcilla calificaron como clase V y los de concreto como clase IV, sólidos y aptos para ser empleados en la construcción de muros portantes y, por supuesto, en no portantes.

Tabla 1. Propiedades de los Ladrillos.		
ENSAYO	ARCILLA 	CONCRETO 
Variabilidad Dimensional (longitud, ancho y altura)	-0.39% , -0.43%, 0.03%	-0.09%, 0.01 %, 0.40%
Alabeo (mm)	0	0
Compresión (f'b en kg/cm ²)	197	146
Succión (gr/(200cm ² -min))	47	12
Absorción	14 %	6 %
Área de Huecos	32 %	29 %

3. MORTERO y TRATAMIENTO PREVIO DE LOS LADRILLOS

La albañilería (prismas y muros) hecha con ladrillos de concreto y de arcilla, fue construida siguiendo las especificaciones de la Ref.1. En ambos casos las juntas de mortero tuvieron 1cm de espesor. En la Tabla 2 se indica las especificaciones seguidas para el mortero y el tratamiento previo de los ladrillos.

Tabla 2. Mortero y Tratamiento Previo de las Ladrillos.		
Ladrillo	ARCILLA	CONCRETO
Mortero cemento-cal-arena	1: 0: 4	1: ½ : 4
Tratamiento del ladrillo	Regado durante ½ hora, la tarde anterior al asentado	Asentado en su estado natural, previa limpieza.

4. PROPIEDADES DE LA ALBAÑILERÍA SIMPLE

Para determinar la resistencia a compresión de la albañilería ($f'm$) y la resistencia a corte puro ($v'm$), se construyeron 4 pilas (13x24x60cm) y 4 muretes (13x60x60cm) por cada tipo de ladrillo. Las pilas se ensayaron a compresión axial y los muretes a compresión diagonal, en ambos casos los prismas tuvieron 28 días de edad. Mediante el empleo de dos LVDT en cada pila, pudo obtenerse el módulo de elasticidad de la albañilería (E_m). Los resultados aparecen en la Tabla 3, mientras que en las figuras 1 y 2 se muestra la falla típica que tuvieron los prismas.

Tabla 3. Ensayos de Prismas de Albañilería.		
Ladrillo	ARCILLA	CONCRETO
Pilas: $f'm$ (kg/cm ²)	131	136
Muretes: $v'm$ (kg/cm ²)	17.2	10.2
Ref.1: $v'm < \sqrt{f'm}$ (kg/cm ²)	11.4	10.2
E_m (kg/cm ²)	62500	86300
$E_m / f'm$ (experimental)	477	636
$E_m / f'm$ (Ref.1)	500	700



Fig.1. Pilas.



Fig.2. Muretes.

En la Tabla 3 puede apreciarse que no existe mayor diferencia en la resistencia a compresión ($f'm$) para los dos tipos de albañilería; asimismo, la relación $E_m/f'm$ reglamentaria (Ref.1) tuvo menos de 10% de error respecto a los valores experimentales. Por otro lado, si bien la resistencia a corte puro ($v'm$) de los muretes con ladrillos de arcilla superó en 69% al de los ladrillos de concreto, producto de la forma de falla (Fig.2), en la Ref.1 se indica que para efectos de diseño, $v'm$ no debe ser mayor que $\sqrt{f'm}$, con lo cual, la diferencia se atenúa de 69% a 12%.

5. CARACTERÍSTICAS Y CONSTRUCCIÓN DE LOS MUROS

Las características de los dos muros confinados: MA (con ladrillos de arcilla) y MC (con ladrillos de concreto), aparecen en la Fig.3. La única variante que tuvieron fue el tipo de ladrillo, y por ende, de acuerdo a la Ref.1, también cambió el tratamiento de la unidad antes del asentado, así como el mortero empleado (Tabla 2). En la Fig.4 aparecen secuencias de la construcción de los dos muros, cuyas propiedades comunes fueron:

- Las dimensiones. Los muros tuvieron un aparejo de soga con 13cm de espesor.
- La resistencia del concreto: $f'c = 175\text{kg/cm}^2$.
- La conexión columna-albañilería: a ras con mechas de anclaje de $\frac{1}{4}$ " cada 2 hiladas, embutidas 40cm en la albañilería y 15cm en las columnas doblando 10cm a 90° .
- El refuerzo en las columnas: $4 \phi \frac{1}{2}$ " estribados con $\square \frac{1}{4}$ " $1@ 5, 4@10, r @ 20\text{cm}$.
- El refuerzo en la solera: $4 \phi \frac{3}{8}$ " estribados con $\square \frac{1}{4}$ " $1@ 5, 4@10, r @ 20\text{cm}$.

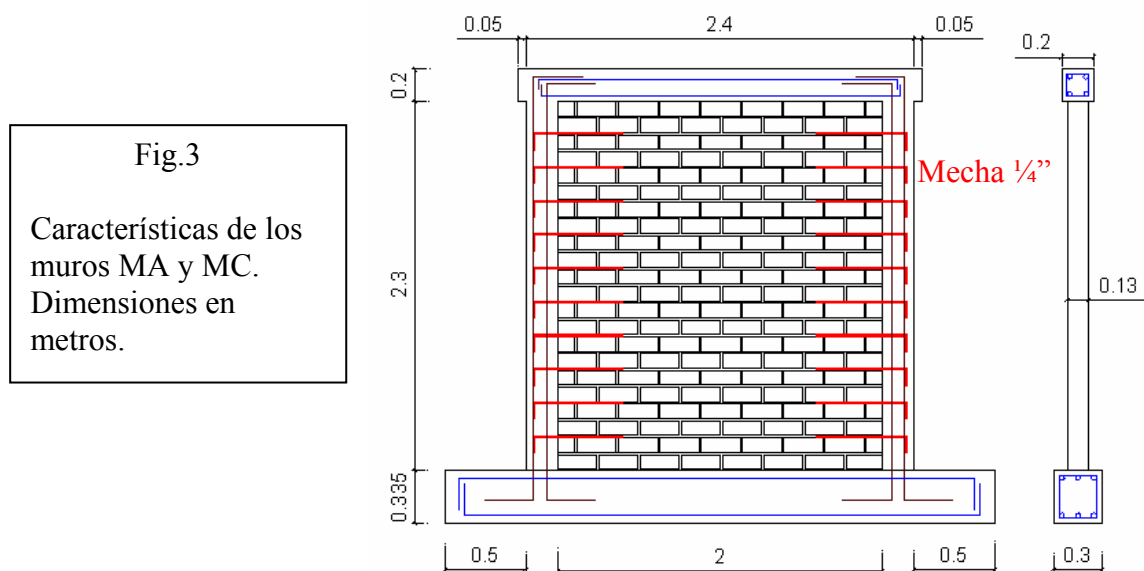


Fig.4
Secuencia en la construcción y mecha empleada.



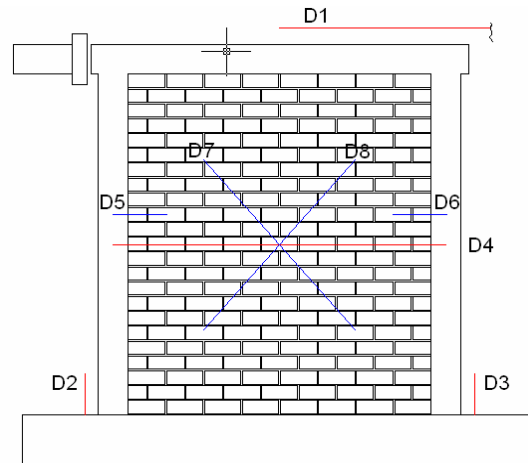
6. ENSAYO DE CARGA LATERAL CÍCLICA

Los dos muros de albañilería fueron sometidos a carga lateral cíclica con desplazamiento horizontal controlado en varias fases (Tabla 4), aplicándose en las fases inelásticas 3 ciclos a una velocidad de 1 ciclo en 4 minutos. Los dispositivos empleados (actuador dinámico y 8 LVDT) aparecen en la Fig.5.

Tabla. 4. Desplazamiento lateral y número de ciclos en cada Fase.										
Fase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Dl (mm)	0.5	1.0	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0
Ciclos	1	2	2	3	3	3	3	3	3	3



Fig.5. Instrumentación.



6.1. Comportamiento Cualitativo de los Muros

Ambos muros fallaron por corte (Fig.6), con grietas predominantemente escalonadas para el muro MC con fisuras que preferentemente pasaban por la cara lisa de los ladrillos de concreto, y con grietas que atravesaron los ladrillos de arcilla para el muro MA. Al terminar el ensayo, la cantidad de fisuras y el grado de deterioro en MC fue mayor que en MA. En la Tabla 5 se describe el comportamiento más relevante que tuvieron los muros en las distintas fases.

Tabla 5. Comportamiento Cualitativo de los Muros.		
Fases	Muro MA (ladrillos de arcilla)	Muro MC (ladrillos de concreto)
Fase 1	Comportamiento elástico. No hubo fisuras.	
Fase 2	Aparecieron fisuras de tracción por flexión en la zona intermedia inferior de las columnas.	
Fase 3	Fisuras escalonadas y otras que atravesaron ladrillos en la parte intermedia inferior.	Fisuras escalonadas en la parte intermedia inferior de la albañilería.
Fase 4	Agrietamiento diagonal. La grieta más considerable, cruzó 15 hiladas de ladrillos.	Agrietamiento diagonal escalonado a través de las juntas.
Fase 5	La grieta diagonal se extendió en mayor proporción.	Las fisuras se extendieron en forma escalonada y cortando las esquinas de los ladrillos.
Fase 6	Se extendieron las fisuras.	Aparecieron fisuras en los talones del muro.
Fase 7	Aparecen fisuras en la base de la columna.	Apareció nueva grieta diagonal escalonada y siguieron triturándose los talones del muro.
Fase 8	Fisuras en el nudo superior de la columna. Se inició la trituración de los talones.	La trituración fue mayor en la parte central de la albañilería
Fase 9	Se trituraron los ladrillos en el cruce de las dos grietas diagonales.	Se trituraron los ladrillos ubicados en la grieta diagonal, desprendiéndose del muro.
Fase 10	Se desprendió el ladrillo en el nudo superior.	Se trituraron y desprendieron los ladrillos a lo largo de las dos diagonales.

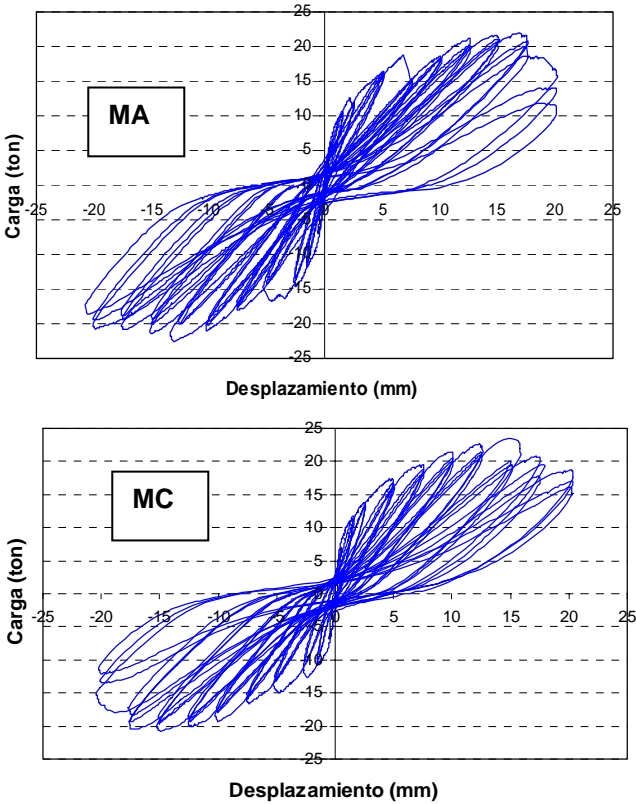
Fig.6
Muros MA (izquierda) y MC (derecha) al final del ensayo



6.2. Comportamiento Histerético

Del diagrama Cortante-Desplazamiento Lateral (V-D, Fig.7), puede observarse que independientemente del tipo de ladrillo utilizado, los lazos histeréticos son finos y pasan por el origen del sistema de referencia. Esto es usual en sistemas que disipan poca energía y degradan rigidez lateral. También puede apreciarse que la degradación de resistencia se inició a partir de la fase 8 (D = 15mm) en ambos muros, correspondiente a una deriva de 0.00625, mayor en 25% que la deriva asociada al límite de reparación (0.005, fase 7, Ref.2).

Fig.7
Lazos histeréticos V-D de los muros MA (con ladrillos de arcilla) y MC (con ladrillos de concreto)

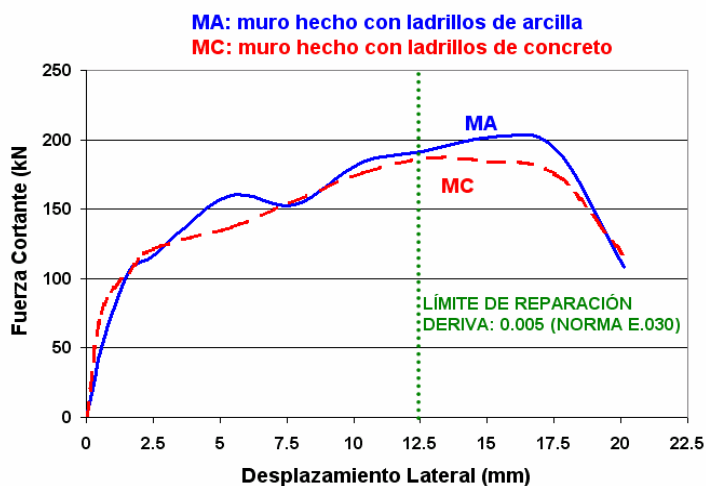


6.3. Envoltente V-D

Para efectos comparativos, se trazó la envoltente V-D (Fig.8) correspondiente a los lazos histeréticos estables (último ciclo de cada fase) en la rama más crítica (la de menor resistencia y con mayor degradación de carga) de cada muro. En la Fig.7 puede observarse que la rama más crítica para el muro “MA” es la positiva, mientras que para el muro “MC” es la negativa.

En la Fig.8, puede observarse que el muro MC es inicialmente más rígido que MA, que entre los 4 a 6mm de desplazamiento lateral (zona donde se agrietaron diagonalmente los muros), MA supera ligeramente en resistencia a MC, pero después del agrietamiento diagonal ambos muros tuvieron prácticamente el mismo comportamiento hasta alcanzar la deriva máxima permitida por la Norma E.030 (0.005, Ref.2) asociada al límite de reparación. Adicionalmente, a partir de un desplazamiento de 17.5mm (deriva de 0.0073, fase 9 del ensayo), ambos muros tuvieron una fuerte degradación de resistencia.

Fig.8
Envolvente V-D del ciclo estable en la rama más crítica.



7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1. Rigidez Lateral (K)

La pendiente de la gráfica Cortante-Desplazamiento (Fig.7) en la primera fase del ensayo, donde no hubo fisuras, corresponde a la rigidez lateral elástica experimental ($K = V/D$). Para determinar la rigidez lateral teórica de los muros en voladizo, se aplicó el criterio de la sección transformada, utilizando el módulo de elasticidad "Em" de las pilas (Tabla 3) y se adoptó un módulo de corte $G_m = 0.4E_m$ (Ref.1), porque los sensores D7 y D8 (Fig.5) registraron desplazamientos por debajo de su grado de precisión. Los resultados aparecen en la Tabla 6.

Tabla 6. Rigidez Lateral Elástica (K) en ton/mm.			
Muro	Experimental	Teórica	Error
MA (ladrillo de arcilla)	15.04	17.67	17%
MC (ladrillo de concreto)	19.87	22.08	11%

Tanto en forma experimental como teóricamente, pudo demostrarse que en el rango elástico el muro MC era más rígido que MA, lo cual se debe a las propiedades intrínsecas de la materia prima con que están hechos los ladrillos. Sin embargo, en el rango inelástico, ambos muros presentaron la misma degradación de rigidez lateral.

7.2. Fisuración a Tracción por Flexión

La primera fisura de tracción por flexión, se presentó en ambos muros durante la fase 2 del ensayo, debiéndose destacar que primero fisuró la columna y después la fisura penetró en la albañilería. Para determinar teóricamente esta carga, se supuso que la resistencia del concreto de la columna era $2\sqrt{f'_c}$ en kg/cm^2 (Ref.3) y que las propiedades de la sección transversal, correspondían a la sección transformada (ver 7.1). Los resultados aparecen en la Tabla 7, donde se observa teórica y experimentalmente que MC es más resistente (12%) que MA ante esta falla.

Tabla 7. Resistencia a Tracción por Flexión, en toneladas.			
Muro	Experimental	Teórica	Error
MA (ladrillo de arcilla)	9.99	8.25	-17%
MC (ladrillo de concreto)	11.14	9.28	-17%

7.3. Resistencia al Agrietamiento Diagonal (V_m)

El agrietamiento diagonal de ambos muros se presentó entre las fases 4 y 5 del ensayo. Para predecir teóricamente la carga asociada, se aplicó la fórmula $V_m = 0.5 v'm t L$ (Ref.1), válida sólo para muros cuadrados sin carga vertical, donde $v'm$ es la resistencia a corte puro de los muretes (Tabla 3) limitada como máximo en $\sqrt{f'm}$, $t = 13\text{cm}$ y $L = 240\text{cm}$.

Los resultados aparecen en la Tabla 8, donde puede apreciarse que teóricamente y experimentalmente MA es 10% más resistente que MC, debido a la mayor adherencia que presentaron los ladrillos de arcilla con el mortero, mientras que en MC la falla fue escalonada.

Tabla 8. Carga asociada al Agrietamiento Diagonal, en toneladas.			
Muro	Experimental	Teórica	Error
MA (ladrillo de arcilla)	17.27	17.88	4%
MC (ladrillo de concreto)	16.07	15.95	-1%

7.4. Carga Máxima Soportada

La resistencia máxima experimental, promedio de las ramas V-D positivas y negativas en su primer ciclo (Fig.7), se presentó durante la fase 8 del ensayo en ambos muros. Las cargas asociadas fueron: 22.22ton para MA y 22.09ton para MC, resultados que son similares ya que ambos muros tuvieron el mismo refuerzo y las propiedades de la albañilería fueron casi iguales.

8. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Las conclusiones que se presentan a continuación, se encuentran limitadas por la poca cantidad de especímenes ensayados, pero, aún así, constituyen un indicio del buen comportamiento sísmico que tuvieron los muros confinados hechos con los dos tipos de ladrillos analizados. Estas conclusiones son válidas sólo para materiales semejantes a los estudiados en este proyecto.

8.1. Unidades

- De acuerdo a los resultados de los ensayos, los ladrillos de concreto y de arcilla calificaron como unidades sólidas, aptas para ser utilizadas en la construcción de muros portantes.
- Para fines estructurales (Ref.1), los ladrillos de arcilla calificaron como clase V (de alta durabilidad y resistencia), mientras que los de concreto calificaron como clase IV, por su menor resistencia a compresión ($f'b$); sin embargo, esto no es condicionante como para que los ladrillos de concreto puedan ser empleado en edificios de 5 pisos en la zona sísmica 3.

8.2. Prismas de Albañilería

- La resistencia a compresión ($f'm$) fue similar tanto para las pilas construidas con ladrillos de arcilla como para las hechas con ladrillos de concreto.
- El módulo de elasticidad experimental obtenido en las pilas, se pudo predecir con las

fórmulas de la Ref.1: $E_m = 500f'_m$ para los ladrillos de arcilla y $E_m = 700f'_m$ para los ladrillos de concreto, con menos de 10% de error.

- La resistencia a corte puro (v'_m) de los muretes construidos con ladrillos de arcilla fue 69% mayor que los hechos con ladrillos de concreto. Sin embargo, para el caso de los muretes con ladrillos de arcilla, esta resistencia tuvo que limitarse con fines de diseño estructural en $\sqrt{f'_m}$ (Ref.1), con lo cual, la diferencia en v'_m se redujo de 69% a 12%.

8.3. Construcción de los Muros

- La conexión a ras columna-albañilería en los dos muros confinados, evitó problemas que muchas veces se presentan con la conexión dentada tradicional: cangrejas bajo los dientes y rotura de dientes al compactar el concreto de las columnas. Adicionalmente, los chicotes colocados en los extremos de la albañilería cada dos hiladas, permitieron que el desplazamiento en la conexión columna-albañilería sea menor de 1mm.
- La técnica de asentado de ladrillos aplicando mortero en una extensión máxima de 80cm, resultó efectiva, ya que se originaron muy pocas fisuras horizontales. Para el caso de los ladrillos de concreto, estas fisuras se produjeron principalmente sobre la cara más lisa.

8.4. Rigidez Lateral (K)

- La rigidez lateral elástica experimental del muro MC (ladrillos de concreto) fue 32% mayor que la rigidez lateral del muro MA (ladrillos de arcilla). Esta rigidez pudo predecirse en cada muro con 17% de error, aplicando el criterio de la sección transformada (Ref.1). Por otro lado, en el rango inelástico, la degradación de rigidez fue similar en ambos muros.

8.5. Resistencia a Tracción por Flexión

- La resistencia a tracción por flexión del muro MC (ladrillos de concreto) fue 12% mayor que la de MA (ladrillos de arcilla). Ambas resistencias pudieron predecirse con 17% de error, aplicando el criterio de la sección transformada no agrietada y admitiéndose que la resistencia a tracción por flexión del concreto de las columnas es: $f'_t = 2\sqrt{f'_c}$, en kg/cm^2 .

8.6. Carga de Agrietamiento Diagonal (V_m)

- La resistencia al agrietamiento diagonal del muro MA (ladrillos de arcilla) fue 8% mayor que la del muro MC (ladrillos de concreto), debido a la mayor adherencia que tuvieron los ladrillos de arcilla con el mortero. Esta resistencia pudo predecirse con la fórmula de la Ref.1 ($V_m = 0.5 v'_m \alpha t L + 0.23 P$) con menos de 4% de error.

8.7. Carga Máxima

- La máxima carga soportada por los muros MA y MC fue similar, e indicó que el refuerzo vertical de las columnas ingresó en la etapa de endurecimiento, lo que pudo verificarse con los instrumentos empleados.

8.8. Comportamiento de los Muros y Grado de Deterioro

- Las fisuras que aparecieron en el muro MC (ladrillos de concreto), siguieron el mismo patrón que tuvieron los muretes correspondientes: fueron principalmente escalonadas. En cambio,

en el muro MA (con ladrillos de arcilla) y en sus muretes correspondientes, la grieta fue diagonal cortando ladrillos y mortero, con lo cual, la adherencia ladrillo-mortero fue mejor para el caso de los ladrillos de arcilla.

- Hasta la fase 7 del ensayo, asociada a la deriva de 0.005 (valor máximo permitido por la Ref.2), ambos muros tuvieron el mismo nivel de daños, quedando en un estado reparable. Sin embargo, al término del ensayo (deriva de 0.0083), el muro MC (ladrillos de concreto) mostró una mayor cantidad de grietas y un mayor deterioro que MA (ladrillos de arcilla). Cabe indicar que el deterioro se acentúa con el incremento de la carga vertical (Ref.5), por lo que la influencia de este parámetro debe ser investigada.

8.9. Peso Volumétrico

- El peso volumétrico de la albañilería hecha con ladrillos de concreto (2.2 ton/m^3) fue 22% mayor que la correspondiente a la albañilería hecha con ladrillos de arcilla (1.8 ton/m^3). Esto debe preverse cuando se opta por usar ladrillos de concreto en una edificación, ya que al aumentar el peso del edificio, se incrementará la fuerza cortante sísmica.

8.10. Costos

- De acuerdo al tipo de ladrillo utilizado en este proyecto, la albañilería con ladrillos de concreto resultó ser más económica que la hecha con ladrillos de arcilla, a pesar que las rendijas de las unidades de concreto dejaron pasar 27 % más de mortero que las perforaciones del ladrillo de arcilla. Esto se debe a que el precio del millar de ladrillos de concreto es la mitad del correspondiente a los ladrillos de arcilla.

9. LÍNEA FUTURA DE INVESTIGACIÓN

La fábrica limeña que produce ladrillos de concreto en forma industrial ha modificado la forma de sus unidades, invirtiendo la dirección de las ranuras y disminuyendo el área de huecos de 30% a 25% (Fig.9), así como la longitud de 24cm a 22cm. La particularidad de esta nueva unidad, es que una de las caras de asiento esta taponada y es relativamente lisa; por tal razón, es importante investigar el comportamiento sísmico de la albañilería hecha con esta nueva unidad.

Fig.9
Nuevo tipo de
ladrillo de
concreto.



REFERENCIAS

1. SENCICO, 2006. Norma Técnica de Edificación E.070 “Albañilería”.
2. SENCICO, 2006. Norma Técnica de Edificación E.030 “Diseño Sismorresistente”.
3. SENCICO, 2006. Norma Técnica Edificación E.060 “Concreto Armado”.
4. San Bartolomé Á., 2001. Construcciones de Albañilería. Comportamiento Sísmico y Diseño Estructural. Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
5. San Bartolomé Á., 2007. Blog de Albañilería: <http://blog.pucp.pe/albanileria>.