

CONTROL DE LA TRITURACIÓN DE LOS LADRILLOS HUECOS EN MUROS DE ALBAÑILERÍA CONFINADA SUJETOS A CARGA LATERAL CÍCLICA

Por: Ángel San Bartolomé, Jonathan Paredes y David Caycho

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

RESUMEN

El método de construcción más utilizado en el Perú es en base a muros portantes de albañilería confinada en edificaciones de hasta 5 pisos; sin embargo, debido a la informalidad existente en nuestro medio y al bajo costo de los ladrillos huecos (con más de 30% de su área bruta ocupada por perforaciones) en comparación con los ladrillos sólidos, estos muros son construidos generalmente con ladrillos huecos, lo que está prohibido por la Norma E.070 “Albañilería” debido a su mal desempeño sísmico. Por esta razón, en este proyecto se pretendió mejorar el comportamiento sísmico de los muros hechos con unidades huecas, mediante la incorporación de refuerzo horizontal y el relleno de aquellos ladrillos huecos ubicados en zonas críticas del muro.

1. INTRODUCCIÓN

En la Norma E.070 (Ref.1) se prohíbe el uso de ladrillos huecos (aquellos que presentan en su cara de asiento más del 30% de su área bruta ocupada por perforaciones) en la construcción de muros portantes de albañilería confinada, salvo que el ingeniero demuestre que ante los sismos severos la albañilería se comportará en el rango elástico, sin que se formen grietas diagonales. Esto se debe a que las continuas aberturas y cerramientos de las grietas diagonales terminan pulverizando a los ladrillos huecos, perdiéndose notablemente la capacidad portante de los muros, tanto ante cargas sísmicas como de gravedad. Este hecho se ha demostrado a nivel experimental (Ref.2, Fig.1) y en sismos reales (Fig.2). En la Fig.2 puede observarse que el problema descrito se presenta sólo en los pisos que se agrietan diagonalmente, mientras que en la Fig.1 la degradación severa de la resistencia a carga lateral, producto de la trituración de los ladrillos huecos, se inicia para derivas (0.004) menores que el límite máximo permitido por la Norma Sísmica (0.005, Ref.3), problema que podría agravarse por la carga vertical y la flexocompresión existentes en el primer piso de los muros altos.

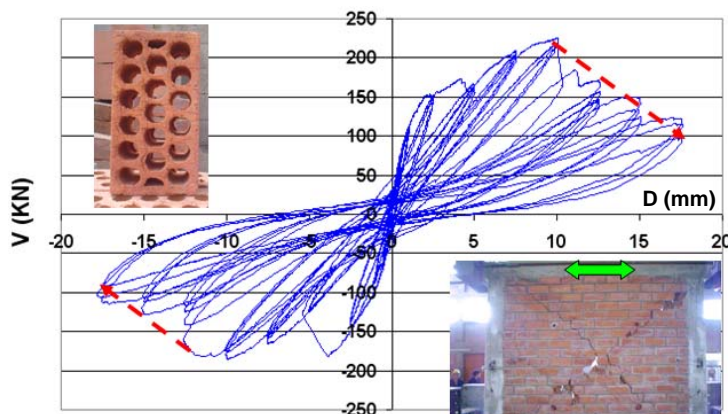


Fig.1 (Ref.2). Gráfica cortante-desplazamiento en un muro hecho con ladrillos huecos.

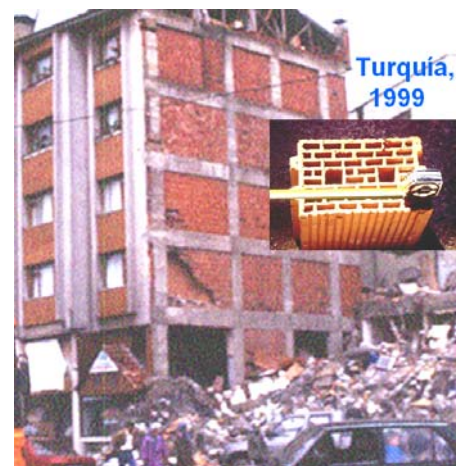


Fig.2. Sismo de Turquía.

De esta manera, en este proyecto se pretendió disminuir el grosor de las grietas diagonales mediante el uso de refuerzo horizontal, en la cuantía mínima que se especifica en la Norma E.070 (0.001, Ref.1), y para controlar la trituración de los ladrillos ubicados en zonas con altos esfuerzos de compresión (esquinas en contacto con el marco de confinamiento), esos ladrillos huecos fueron rellenos con mortero antes de asentarlos, transformándolos en unidades sólidas.

2. MATERIALES EMPLEADOS

Las principales características de los materiales empleados en este proyecto fueron:

- **Ladrillos.** Se utilizaron unidades de arcilla del tipo King Kong Industrial de 18 huecos (Fig.3), con dimensiones de 9 x 12.5 x 23 cm y resistencia a compresión $f'_{cb} = 144 \text{ kg/cm}^2$ sobre área bruta. De acuerdo a la Ref.1, esta unidad es clase IV y calificó como hueca, no apta de emplear en muros portantes. Las perforaciones cubrieron el 50% del área bruta de asentado.
- **Arena Gruesa y Piedra de 1/2".** Los agregados utilizados fueron fabricados industrialmente por FIRTH y se expenden en bolsas.
- **Mortero.** La proporción volumétrica cemento-arena gruesa fue 1: 4. Según la Ref.1, este mortero es tipo P2, apto para emplearse en muros portantes.
- **Cemento.** Se utilizó cemento Pórtland tipo I.
- **Acero de Refuerzo.** Se usó acero corrugado de grado 60 ($f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$).
- **Concreto.** La resistencia nominal a compresión del concreto empleado en las columnas y soleras fue $f'_{c} = 175 \text{ kg/cm}^2$, aunque las probetas estándar ensayadas a compresión a los 28 días de edad, tuvieron una resistencia promedio ($f'_{c} = 182 \text{ kg/cm}^2$) 4% mayor que la nominal.



Fig.3

3. CARACTERÍSTICAS DE LOS MUROS

Para evaluar experimentalmente la alternativa de solución al problema descrito en el acápite 1, se construyeron dos muros a escala natural utilizando ladrillos huecos (Fig.3). Uno de los muros fue construido con la técnica tradicional (muro M1, Fig.4) y el otro con el refuerzo horizontal adicional mencionado, taponando los ladrillos ubicados en las esquinas (muro M2 o "muro mejorado", Fig.5).

Las características que en común presentaron los dos muros fueron las siguientes:

- Las dimensiones de la albañilería: 2.3m de altura, 2.0m de longitud y 12.5cm de espesor.
- Los ladrillos huecos del tipo King Kong Industrial. Estas unidades fueron regadas durante 1/2 hora unas 10 horas antes de asentarlas, para disminuir su alta succión: 43 gr / (200cm²-min).
- La dosificación volumétrica del mortero de asentado cemento - arena gruesa 1: 4.
- La mano de obra.
- El aparejo de soga en la albañilería, con un traslape de medio ladrillo entre hiladas consecutivas.
- Las juntas horizontales y verticales de 1.5cm de espesor.
- La conexión columna-albañilería del tipo dentada, con dientes de 5.0cm (Fig.6), sin chicotes.
- Las columnas de 12.5 x 20 cm, reforzadas con 4 ϕ 1/2" y \square 1/4" 1 @ 5, 4 @ 10, r @ 20cm.
- La viga solera de 20 x 20 cm, reforzada con 4 ϕ 3/8" y \square 1/4" 1 @ 5, 4 @ 10, r @ 20cm.

Las diferencias entre el muro mejorado M2 (Fig.5) y el muro tradicional M1 (Fig.4) fueron:

- El refuerzo horizontal continuo: 1 ϕ 1/4" @ 20cm (cada 2 hiladas, cuantía de 0.00128), anclado en las columnas de confinamiento con ganchos a 90° en una longitud de 10cm.
- El relleno (taponado con mortero 1: 4) antes del asentado, en aquellos ladrillos huecos ubicados en las esquinas en contacto con el marco de confinamiento. Cabe indicar que la trituración de

los ladrillos huecos situados en las esquinas, podría producir problemas de columnas cortas al formarse un vacío. Por esta razón fue necesario convertir esos ladrillos en unidades sólidas

Fig.4
Muro M1.
Sin
refuerzo
horizontal

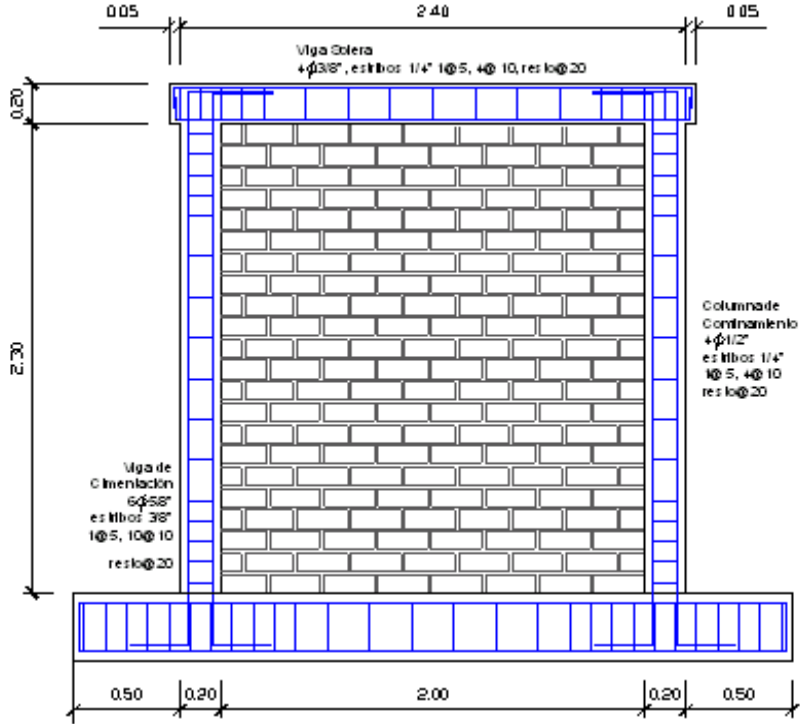
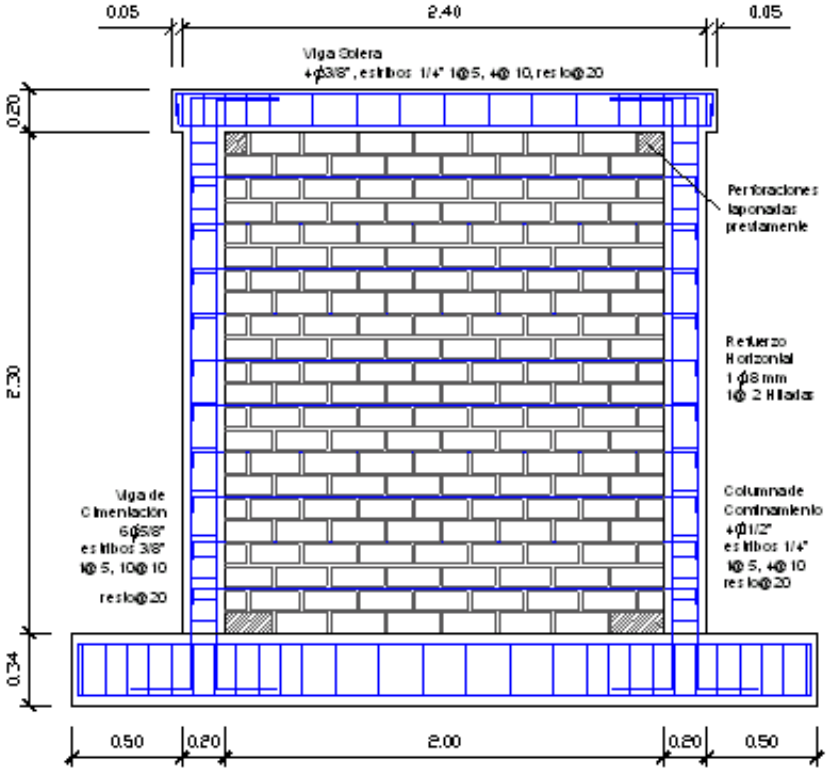


Fig.5
Muro M2.
Con
refuerzo
horizontal
y ladrillos
taponados
en zonas
críticas.



En la Fig.6 se aprecia secuencias de la construcción seguida en los dos muros.



Fig.6. Secuencias de la construcción de M1 (izquierda) y M2 (derecha).

4. PRISMAS DE ALBAÑILERÍA SIMPLE

Con la finalidad de determinar las propiedades de la albañilería simple, se construyeron 4 pilas de 12.5x23x60 cm (esbeltez = 4.8) y 4 muretes cuadrados de 12.5x60x60 cm. Ambos prismas estuvieron compuestos por 6 hiladas y fueron construidos bajo las mismas condiciones con que se construyeron los muros a escala natural (acápites 2 y 3).

Los prismas fueron ensayados a los 28 días de edad. Las pilas se ensayaron a compresión axial, a una velocidad de carga de 5 ton/min, mientras que los muretes se ensayaron a compresión diagonal, a una velocidad de carga de 1 ton/min. De acuerdo a la Ref.1, la resistencia característica sobre área bruta ($f'm$ para las pilas y $v'm$ para los muretes), se obtuvo restando una desviación estándar al valor promedio de los 4 especímenes ensayados. Los resultados, luego de que la resistencia a compresión de las pilas fuese corregida por esbeltez (Ref.1), aparecen en la Tabla 1.

Tabla 1. Resistencia Características de los Prismas de Albañilería Simple.					
PILAS			MURETES		
f_m (kg/cm ²)	Dispersión	$f'm$ (kg/cm ²)	v_m (kg/cm ²)	Dispersión	$v'm$ (kg/cm ²)
62	3.8%	60	8.41	15%	7.14 (*)

(*) De acuerdo a la Ref.1, para fines de diseño estructural debe emplearse $v'm \leq \sqrt{f'm} = \sqrt{60} = 7.75 \text{ kg/cm}^2$, con lo cual debe usarse $v'm = 7.14 \text{ kg/cm}^2$.

Las fallas que presentaron las pilas fueron frágiles; las caras laterales de las unidades de albañilería tendieron a deslaminarse (falla común en este tipo de unidades huecas, Fig.7).

Las fallas que presentaron los muretes fueron por tracción diagonal (Fig.7), esto se debió a la buena adherencia generada entre los ladrillos y el mortero.

Fig.7
Fallas típicas en los prismas de albañilería simple.



5. ENSAYO DE CARGA LATERAL CÍCLICA. INSTRUMENTACIÓN.

El ensayo realizado fue de carga lateral cíclica con desplazamiento lateral (“D1” en la Fig.8) controlado en 10 fases (Tabla 2). En cada fase se aplicaron 3 ciclos de carga y descarga hasta estabilizar el lazo histerético cortante-desplazamiento (V-D); sólo en las 2 primeras fases se aplicó 1 ciclo, dado el comportamiento elástico que tuvieron los muros en esas fases.

FASE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Desplaza. D1 (mm)	0.5	1.5	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0
Deriva	0.0002	0.0006	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008
Número de ciclos	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3

La carga lateral (“V” en la Fig.8) fue aplicada mediante un actuador dinámico, mientras que los desplazamientos horizontales y verticales fueron registrados con 4 LDVT.

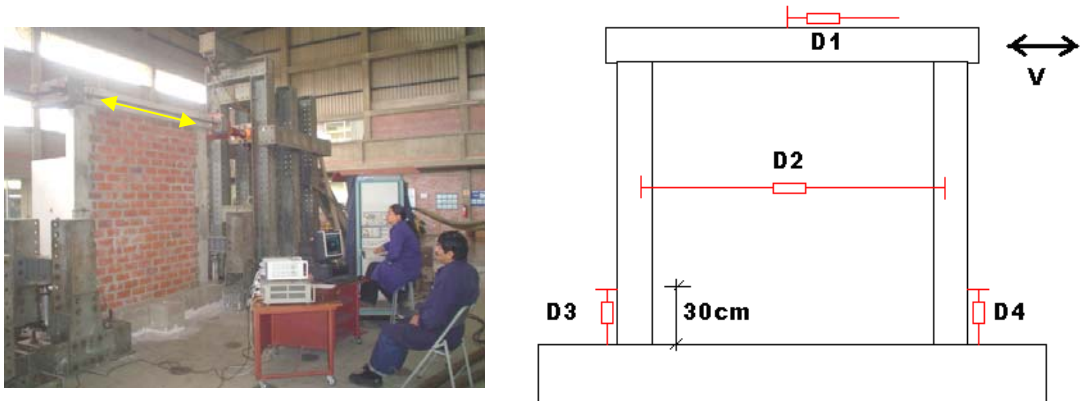


Fig.8. Instrumentación empleada en el ensayo de carga lateral cíclica.

6. COMPORTAMIENTO CUALITATIVO DE LOS MUROS

A continuación se indica el comportamiento que tuvieron los muros M1 (tradicional) y M2 (mejorado) en las distintas fases del ensayo. El valor “g” expresa el grosor máximo que alcanzó la grieta diagonal en el instante en que se aplicó el máximo desplazamiento lateral en cada fase.

- En la fase 1 (deriva = 0.0002) los dos muros tuvieron un comportamiento elástico.
- En la fase 2 (deriva = 0.0006) se formaron fisuras de tracción por flexión en la base del muro M2, mientras que en el muro M1 no se formaron fisuras.
- En la fase 3 (deriva = 0.001) se inició el agrietamiento diagonal en los dos muros, alcanzándose $g(M1) = 0.5\text{mm}$ y $g(M2) = 0.15\text{mm}$.
- En las fases 4 (deriva = 0.002) y 5 (deriva = 0.003) se formaron otras grietas diagonales, registrándose en la fase 5: $g(M1) = 4.5\text{mm}$ y $g(M2) = 3\text{mm}$.
- En la fase 6 (deriva = 0.004) se inició la trituración del ladrillo ubicado en la intersección de las grietas diagonales de M1, alcanzándose $g(M1) = 5\text{mm}$ y $g(M2) = 4\text{mm}$.
- En la fase 7 (deriva = 0.005, correspondiente al límite de reparación), el grosor máximo de las grietas diagonales fue: $g(M1) = 8\text{mm}$ y $g(M2) = 4.5\text{mm}$, notándose grietas más finas en M2, pero en mayor cantidad que en M1 (Fig.9). En M1 las grietas fueron asimétricas.

Fig.9
M1 y M2
en Fase 7
(deriva =
0.005).



- En la fase 8 (deriva = 0.006) aparecieron nuevas grietas diagonales y las que ya existían aumentaron de tamaño y grosor: $g(M1) = 9\text{mm}$, $g(M2) = 5\text{mm}$. En esta fase se inició la trituración de un ladrillo ubicado en la esquina superior de la antepenúltima hilada del muro M2 (Fig.10), mientras que el ladrillo taponado de la esquina superior no tuvo problemas.
- En la fase 9 (Fig.11, deriva = 0.007), se produjo en M2 la trituración de 2 ladrillos adyacentes al triturado en la fase 8. En M1 se produjo la trituración de 3 ladrillos en contacto con una de las columnas. Se alcanzó: $g(M1) = 11\text{mm}$ y $g(M2) = 6\text{mm}$.



Fig.10. M2-Fase 8.

Fig.11
Fase 9.



- En la fase 10 (deriva = 0.008) no aparecieron grietas, las existentes aumentaron de tamaño y grosor; asimismo, se produjo la trituration de otros ladrillos en ambos muros (Fig.12).

Fig.12
Fase 10.



Luego del ensayo estático (1 ciclo en 4 minutos), se realizó una prueba dinámica en ambos muros, consistente en aplicar desplazamientos laterales (D1) de hasta 10mm con una frecuencia de 2 Hz. En esta prueba pudo observarse (ver video en el blog <http://blog.pucp.edu.pe/albanileria>) la manera de cómo se pulverizaban otros ladrillos, pese a que el desplazamiento lateral (10mm) fue menor al aplicado en el ensayo estático original (20mm); es decir, la prueba dinámica generó un mayor deterioro en la albañilería. El estado final en que quedaron ambos muros aparece en la Fig.13.

Fig.13
Prueba
dinámica.
Estado
final.



7. ANÁLISIS GRÁFICO DE RESULTADOS

En la Fig.14 se muestra los lazos histeréticos V-D correspondientes a los muros M1 (tradicional) y M2 (mejorado). Estas gráficas han sido trazadas a la misma escala con fines comparativos.

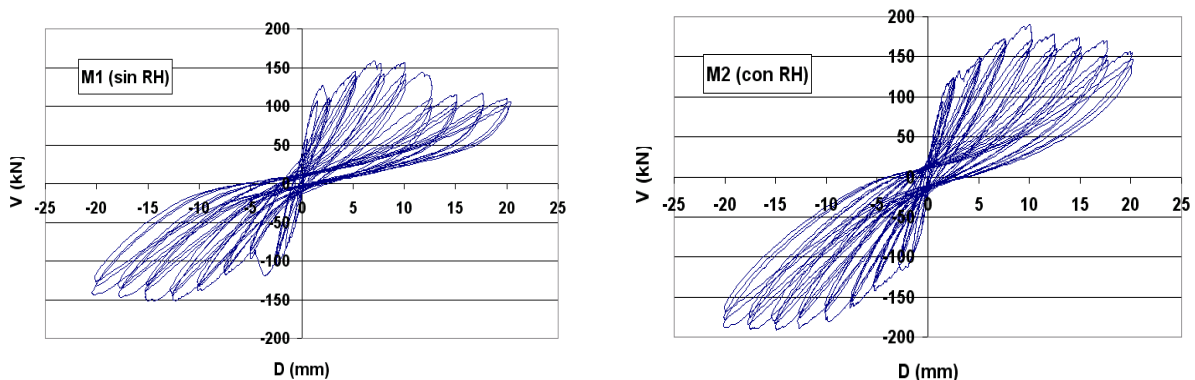
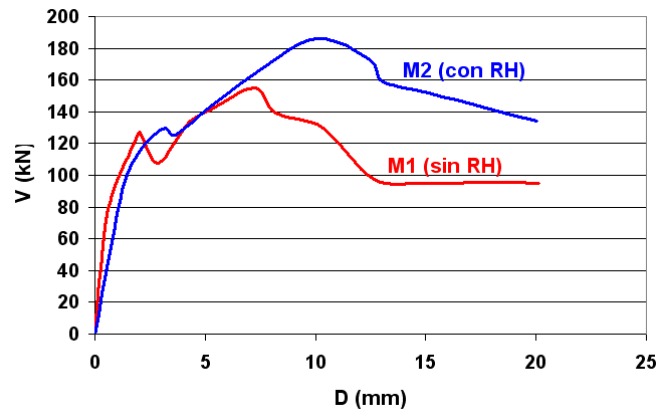


Fig.14. Lazos histeréticos V-D de los muros M1 (izquierda) y M2 (derecha).

La Fig.15 corresponde a la envolvente de los lazos histeréticos estables en su rama positiva (la más crítica en ambos muros). La rotura diagonal se produjo en ambos muros para una carga del orden de 12.3 ton (13.0 ton en la rama positiva y 11.5 ton en la rama negativa), asociada a un desplazamiento lateral comprendido entre 2 y 3.4 mm (deriva del orden de 1/900). En el instante de la rotura diagonal, en M1 se produjo una fuerte caída de resistencia, mientras que en M2 el refuerzo horizontal controló el grosor de la grieta diagonal, atenuando la degradación de resistencia.

Fig.15
Envolvente de los lazos histeréticos estables.

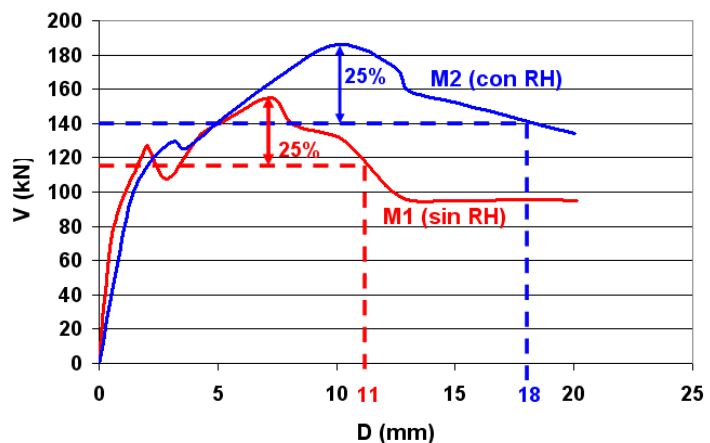


La resistencia asociada al primer agrietamiento diagonal (V_m), pudo predecirse con 15% de error, mediante la fórmula de la Ref.1: $V_m = 0.5 v' m t L$, asociada a un muro cuadrado sin carga vertical, donde $v' m = 7.14 \text{ kg/cm}^2$ (Tabla 1), $t = 12.5 \text{ cm}$ y $L = 240 \text{ cm}$, obteniéndose $V_m = 10.7 \text{ ton}$.

Por otro lado, en la Fig.15 puede notarse que la degradación de resistencia se presentó en ambos muros después de haberse alcanzado la carga máxima, siendo menos pronunciada para el muro M2 (mejorado) por la presencia del refuerzo horizontal.

Si en la etapa inelástica se admitiese como aceptable una degradación de resistencia de hasta 25% (Fig.16), entonces el muro M2 (mejorado) podría alcanzar una deriva máxima de hasta 0.007 (Fase 9), mayor que el límite máximo especificado por la Norma Sísmica (0.005, Ref.3), mientras que M1 (tradicional) tan sólo podría alcanzar una deriva ligeramente mayor que 0.004 (Fase 6).

Fig.16
Desplazamientos máximos considerando 25% de degradación de resistencia.

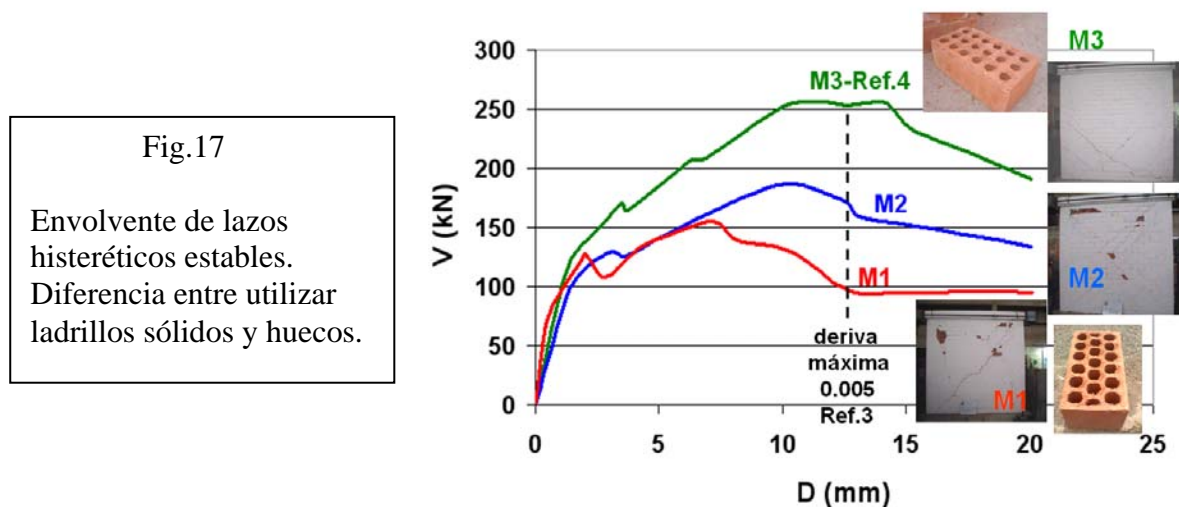


De esta manera, aparte del incremento en resistencia máxima (20%) que tuvo M2 en relación a M1, la mejora alcanzada en los desplazamientos inelásticos máximos, asociados a un 25% de degradación de resistencia, fue significativa (64%).

Sin embargo, como la trituración de los ladrillos en M2 se presentó a partir de la fase 8 del ensayo (Fig.10), para una deriva de 0.006 cercana al límite máximo especificada por la Ref.3 (0.005), no

puede decirse que la alternativa propuesta sea la solución para controlar la trituración de los ladrillos huecos, en vista que el ensayo estático se ejecutó en un muro de un solo piso, sin carga vertical, presentándose en la Fase 9 la trituración de 3 ladrillos adyacentes ubicados en la penúltima hilada (Fig.11), donde la acción del refuerzo horizontal resultó totalmente ineficiente como para controlar la trituración de los ladrillos mencionados. Cabe remarcar que una prueba dinámica, como el ensayo armónico realizado, produce mayor deterioro en la albañilería (figura 12 versus 13) y que la mayor carga vertical, o la mayor compresión por flexión existente en el primer piso de una edificación de varios pisos, hubiesen generado mayor trituración en los ladrillos huecos.

Por la razón indicada en el párrafo anterior, es conveniente utilizar ladrillos sólidos en aquellos pisos que durante los sismos severos se agrieten diagonalmente, tal como se especifica en la Ref.1. En la Fig.17 puede observarse la gran diferencia que existe en el comportamiento inelástico de los muros y en el deterioro de sus unidades, cuando se utiliza ladrillos sólidos (muro M3 de la Ref.4) y huecos, pese a las mejoras introducidas en M2.



Cabe mencionar que la forma de falla asimétrica que tuvo el muro M1 (tradicional, Fig.12) hizo que la trituración de los ladrillos ubicados en la región central (donde teóricamente se cruzan las grietas diagonales) no fuese tan significativa, como ocurrió con el muro de la Ref.2 (Fig.1).

8. COSTOS

Como los muros M1 (tradicional) y M2 (mejorado) tuvieron los mismos confinamientos de concreto armado, en el análisis de costos sólo se consideró los precios que inciden en la albañilería: ladrillos, mortero, refuerzo horizontal, herramientas menores y mano de obra. De esta manera, se obtuvo un costo (a enero del 2009) por metro cuadrado de albañilería de S/.38.50 para el muro M1 y S/.42.40 para el muro M2 (10% mayor). De haberse empleado ladrillos sólidos, el costo de la albañilería se hubiese incrementado en 21% en relación a la albañilería de M1.

9. CONCLUSIONES

- a) De acuerdo a la Ref.1, el ladrillo empleado en este proyecto calificó como hueco, no apto de ser utilizado en la construcción de muros portantes confinados, salvo que la albañilería tenga un comportamiento elástico ante los sismos severos.
- b) Puesto que por razones económicas se utiliza unidades huecas en nuestro medio, se desarrolló este proyecto cuyo objetivo fue introducir mejoras (muro M2) consistentes en cerrar las grietas diagonales mediante una cuantía mínima de refuerzo horizontal, y taponar con mortero aquellos ladrillos ubicados en zonas críticas del muro (esquinas) antes de asentarlos.

- c) En el muro tradicional M1, donde no se introdujo ninguna mejora, se comprobó la prohibición indicada en la Ref.1, al iniciarse la trituración de los ladrillos en una etapa temprana del ensayo, observándose una degradación importante de resistencia (25%) para derivas del orden de 0.004, menores que el valor máximo permitido por la Norma Sísmica (0.005, Ref.3).
- d) Las mejoras introducidas en el muro M2, permitieron incrementar la resistencia máxima en 20% y atenuar la degradación de resistencia, producto de la trituración de los ladrillos. En este muro la trituración de los ladrillos se inició para una deriva de 0.006, ligeramente mayor que el límite máximo indicado por la Norma Sísmica (0.005, Ref.3).
- e) La prueba dinámica realizada en los dos muros, generó un mayor deterioro de los ladrillos huecos, pulverizándolos incluso para una deriva igual a la mitad del valor máximo aplicada estáticamente en el ensayo original.
- f) Pese a las mejoras obtenidas en M2, no puede decirse que la alternativa propuesta sea la solución para controlar la trituración de los ladrillos huecos, en vista que el ensayo estático se ejecutó en un muro de un solo piso, sin carga vertical, presentándose para una deriva de 0.007 la trituración de 3 ladrillos adyacentes ubicados en la penúltima hilada (los ladrillos taponados de la primera y última hilada no se trituraron), donde la acción del refuerzo horizontal resultó ineficiente como para controlar la trituración de los ladrillos mencionados, produciéndose una pérdida considerable de la sección transversal del muro. De este modo, mientras no se realicen otras investigaciones, donde se contemple el efecto dinámico de la carga sísmica y las compresiones por carga vertical y flexión, es aconsejable utilizar ladrillos sólidos en aquellos pisos que durante los sismos severos se agrieten diagonalmente, tal como se especifica en la Ref.1. En los pisos que no se agrieten, puede emplearse ladrillos huecos, pero en el diseño estructural deberá contemplarse la menor resistencia a fuerza cortante que tiene esa albañilería.
- g) El costo de la albañilería del muro mejorado M2 fue 10% mayor que la del muro tradicional M1. Esta diferencia en costo fue contrarrestado por el mayor beneficio que se obtuvo en el incremento de la resistencia máxima (20%) y de la capacidad de deformación inelástica (64%). El utilizar ladrillos sólidos, con un porcentaje de huecos menor de 30%, haría que el costo se incremente en 21%, con lo cual, la alternativa propuesta sigue siendo económicamente factible de emplear, pero se requiere una mayor investigación, por la razón indicada en 9.f.

REFERENCIAS

1. Norma Técnica E.070 “Albañilería”. Reglamento Nacional de Edificaciones. SENCICO. Edición 2007.
2. Comparación del comportamiento sísmico de un muro de albañilería tradicional y otro caravista. Ángel San Bartolomé y José Ordoñez. Capítulo “Albañilería Confinada” del Blog de Investigaciones en Albañilería http://blog.pucp.edu.pe/albanileria_2007 y Revista COSTOS, edición 134, mayo del 2005.
3. Norma Técnica E.030 “Diseño Sismorresistente”. Reglamento Nacional de Edificaciones. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, y SENCICO. Edición 2006.
4. Comportamiento sísmico de muros de albañilería confinada reforzados con canastillas dúctiles y electrosoldadas. Ángel San Bartolomé. Capítulo “Albañilería Confinada” del Blog de Investigaciones en Albañilería http://blog.pucp.edu.pe/albanileria_2007 .