

ESTUDIO DE UN NUEVO LADRILLO DE CONCRETO Y DE LA INFLUENCIA DE LA CAL EN EL MORTERO SOBRE EL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE MUROS CONFINADOS

Por: Ángel San Bartolomé, Melissa Fernández y Ana Agüero
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

RESUMEN

Una fábrica local modificó la forma de sus ladrillos originales de concreto vibrado, disminuyendo la cantidad de ranuras y orientándolas en sentido inverso a la de los ladrillos originales, además, mientras que en las unidades originales las ranuras traspasaban al ladrillo, en los ladrillos nuevos una de las caras de asiento se encuentra tapada. Habiendo tenido un buen comportamiento sísmico-experimental los muros confinados hechos con los ladrillos originales, en este proyecto se analiza, mediante ensayos de carga lateral cíclica, si el cambio de unidades afecta o no al comportamiento sísmico y también si existe o no la necesidad de agregar cal al mortero para mejorar la adherencia ladrillo-mortero.

1. INTRODUCCIÓN

En un proyecto anterior (Ref.1) se obtuvo un buen comportamiento sísmico de los muros confinados hechos con ladrillos de concreto vibrado, denominados en este artículo como tipo “A” o ladrillos originales (Fig.1); sin embargo, la fábrica modificó las dimensiones del ladrillo (denominados en este artículo como tipo “B”, Fig.1), así como la disposición y cantidad de sus ranuras, las cuales no atraviesan completamente al ladrillo a diferencia de los ladrillos tipo “A”. De esta manera, fue necesario investigar, mediante ensayos de carga lateral cíclica, si esas modificaciones alteraban el comportamiento sísmico de los muros o si existía la necesidad de agregar cal al mortero para mejorar la adherencia ladrillo-mortero. Esta variante en el ladrillo y en el mortero también fue analizada mediante ensayos de prismas de albañilería (pilas y muretes de albañilería simple).

Fig.1
Ladrillos de concreto vibrado.



2. DESCRIPCIÓN Y ENSAYOS DE LOS LADRILLOS

Mientras que los ladrillos originales (tipo “A”, Ref.1) presentan 5 ranuras que atraviesan transversalmente ambas caras de asiento, los ladrillos tipo “B” son más pequeños y tienen 4 ranuras en el sentido longitudinal, así como una base lisa y llena, en tanto que la cara superior es rugosa y ranurada. Los resultados de los ensayos realizados siguiéndose las Normas INDECOPI para ambos ladrillos, aparecen en la Tabla 1. De acuerdo a estos resultados y según la Ref.2, el ladrillo original “A” es clase IV, mientras que el tipo “B” es clase III (de menor calidad). En adición, la alta succión que mostró el nuevo ladrillo (“B”) obligó a humedecer sus caras con una brocha antes de asentarlos.

| Tabla 1. Propiedades de los ladrillos originales "A" y nuevos "B". | | | |
|--|------------------|----------|--------|
| Propiedad | Tipo "A" (Ref.1) | Tipo "B" | |
| Dimensiones en centímetros | 24x13x9 | 22x13x9 | |
| Porcentaje de huecos en la cara ranurada | 29% | 25% | |
| Variación porcentual de dimensiones | Longitud | -0.09% | -0.01% |
| | Ancho | 0.01% | -0.10% |
| | Altura | 0.40% | -1.58% |
| Resistencia característica a compresión (kg/cm ²) | 146 | 118 | |
| Succión (gr/(200cm ² -min)) | 12 | 55 | |
| Porcentaje de absorción en 24 horas | 6% | 6% | |

3. PRISMAS DE ALBAÑILERÍA

Para determinar la influencia de la cal en el mortero sobre la resistencia a compresión axial de la albañilería (f'm) y la resistencia a corte puro (v'm), se construyeron 8 pilas (13x22x60cm) y 8 muretes (13x60x60cm). Se usaron ladrillos tipo "B" y dos tipos de mortero: 1:4 (sin cal) y 1: ½: 4 (con cal), a razón de 4 prismas por cada tipo de mortero. Estos prismas se ensayaron a los 28 días de edad y las resistencias características (Ref.2) aparecen en la Tabla 2, donde además se han agregado los resultados de la Ref.1 (prismas construidos con ladrillos tipo "A" y mortero 1: ½: 4 con cal).

| Tabla 2. Resistencias características de los prismas de albañilería simple. | | | | | | |
|---|----------------------------|--------|---------------|--------|-------------------|--------|
| Ladrillo | Tipo "A"- Original (Ref.1) | | Tipo "B" | | | |
| Mortero | 1: ½: 4 (con cal) | | 1:4 (sin cal) | | 1: ½ :4 (con cal) | |
| Prisma | Pila | Murete | Pila | Murete | Pila | Murete |
| f'm o v'm (kg/cm ²) | 136 | 10.2 | 115 | 8.75 | 122 | (*) |

(*) Descartado por la alta dispersión de resultados obtenida (20%)

En todos los casos las pilas presentaron un tipo de falla principalmente por aplastamiento del ladrillo (Fig.2), por lo que la resistencia a compresión de la albañilería es ligeramente menor que la resistencia del ladrillo, con 11% a favor del ladrillo tipo "A". Asimismo, en todos los casos la forma de falla de los muretes fue principalmente escalonada a través de las juntas, cortando algunos ladrillos. No se pudo analizar la influencia de la cal y del tipo de ladrillo sobre la resistencia a corte puro (v'm), debido a que los muretes de la serie "B" con mortero con cal tuvieron una elevada dispersión de resultados (oscilaron entre 8.3 y 12.6 kg/cm²); sin embargo, si se omitiese el efecto de la cal, podría decirse que la influencia del tipo de ladrillo no fue tan relevante (16% a favor del tipo "A").

Fig.2
Fallas típicas en Pilas (izquierda) y Muretes (derecha).



4. CARACTERÍSTICAS Y CONSTRUCCION DE LOS MUROS CONFINADOS

Utilizando ladrillos tipo “B” se construyeron dos muros a escala natural (Fig.3): M1 con mortero con cal (1:½:4) y M2 con mortero sin cal (1:4), en ambos casos las dimensiones y el refuerzo fueron iguales a los que se emplearon en el muro “MC” de la Ref.1, construido con ladrillos tipo “A” y mortero 1:½:4 (con cal). En todos los casos el grosor de las juntas fue de 1cm y el aparejo fue de soga. El ladrillo tipo “A” sólo fue limpiado antes de asentarlo (Ref.1), mientras que el ladrillo tipo “B” fue limpiado y humedecido con una brocha en sus caras de asiento por su elevada succión (Tabla 1). El concreto utilizado en los confinamientos fue de $f'c = 175 \text{ kg/cm}^2$, mientras que el refuerzo empleado fue:

- Solera: $4 \phi 3/8''$, estribos $\square 1/4'' 1@5, 4@10, \text{resto } @20 \text{ cm}$.
- Columnas: $4 \phi 1/2''$, estribos $\square 1/4'' 1@5, 4@10, \text{resto } @20 \text{ cm}$.
- Conexión a ras columna-albañilería con mechas de anclaje de $1 \phi 1/4''$ cada 2 hiladas, embutidas 40cm en la albañilería y 15cm en las columnas, con ganchos a 90° de 10cm.

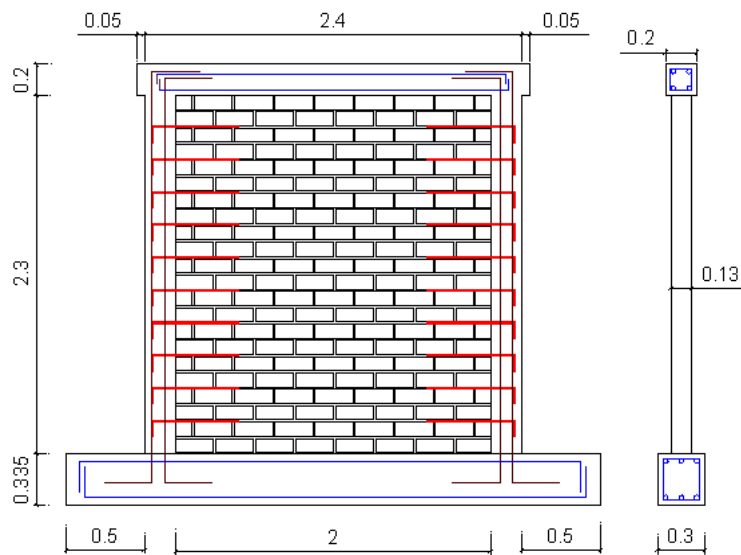


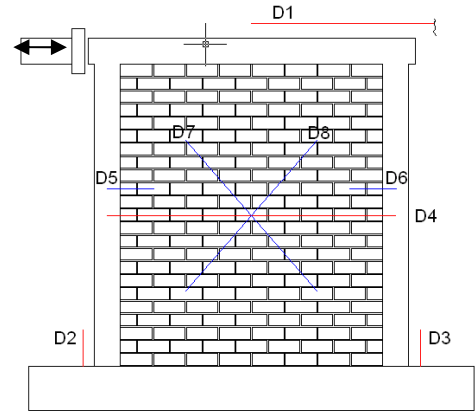
Fig.3. Características y construcción de los muros. Dimensiones en metros.

5. ENSAYO DE CARGA LATERAL CÍCLICA

Después de cumplir 28 días de edad, los muros fueron sometidos a un ensayo de carga lateral cíclica (V) con desplazamiento horizontal (D) controlado en 10 fases (Tabla 3). La cantidad de ciclos (NC) aplicados fue variable hasta estabilizar el lazo histerético V-D. Tanto la técnica de ensayo como la instrumentación utilizada (Fig.4), fueron las mismas que las empleadas en el muro MC de la Ref.1. Es necesario indicar que la deriva asociada a la fase 7 del ensayo corresponde a la deriva máxima permitida por la Norma E.030 (0.005, Ref.3).

| Tabla 3. Desplazamientos laterales (D) y número de ciclos (NC) en cada fase del ensayo. | | | | | | | | | | |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|----|------|----|------|----|
| Fase | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| D (mm) | 0.5 | 1.0 | 2.5 | 5.0 | 7.5 | 10 | 12.5 | 15 | 17.5 | 20 |
| NC | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |

Fig.4
Instrumentación:
8 LVDT.



5.1 Comportamiento Cualitativo de los Muros

En la Tabla 4 se presenta la secuencia en que se formaron las grietas en cada fase del ensayo, denominándose “G” al grosor máximo de la grieta diagonal en milímetros. En esta tabla se ha agregado el comportamiento del muro MC de la Ref.1, construido con ladrillos tipo “A” y mortero con cal.

| Tabla 4. Comportamiento de los muros. | | | |
|---------------------------------------|---|---|--|
| Fase | MC (ladrillo “A”) Ref.1 | M1 (ladrillo “B” con cal) | M2 (ladrillo “B” sin cal) |
| 1 | No hubo fisuras (comportamiento elástico). | | |
| 2 | Aparecieron fisuras de tracción por flexión en la zona inferior de las columnas. | | |
| 3 | Fisuras escalonadas en la parte intermedia inferior de la albañilería. | El ancho de la fisura formada en la zona inferior llegó a 0.15mm | Se formaron varias fisuras escalonadas de 0.35 mm en la mitad inferior. |
| 4 | Rotura diagonal escalonada a través de las juntas. G = 0.5mm. | Rotura diagonal escalonada, G = 1.2mm. | Rotura diagonal escalonada, G = 1.5mm. |
| 5 | Las grietas se extendieron en forma escalonada y cortando las esquinas de algunos ladrillos. | Se extendieron las grietas diagonales, G = 2.5mm | Se extendieron las grietas diagonales, G = 1.5 mm |
| 6 | Aparecieron fisuras en los talones del muro. G = 4mm. | Aparecieron nuevas grietas escalonadas, G = 4mm. | Surgieron nuevas grietas escalonadas, G = 4.1 mm |
| 7 | Apareció otra grieta diagonal escalonada y continuaron agrietándose los talones del muro. | G = 5.3mm. | El nudo superior izquierdo empezó a triturarse. La parte central de la albañilería empezó a triturarse. G = 6mm. |
| 8 | La trituración fue mayor en la parte central de la albañilería. G = 9mm. | G = 6.5mm. | G = 10 mm. |
| 9 | Se trituraron algunos ladrillos ubicados en la grieta diagonal, desprendiéndose del muro. G = 13mm. | Comenzó la trituración en las esquinas de algunos ladrillos. G = 11mm. | G = 14.5mm. |
| 10 | Se trituraron y desprendieron los ladrillos a lo largo de las dos diagonales. G = 19mm. | Grieta vertical en el tercio superior en la unión con la columna derecha. G = 16 mm. Las grietas remanentes (carga nula) tuvieron G = 11mm. | G = 19mm. |

En la Fig.5 se muestra el estado en que quedaron los tres muros después del ensayo (deriva: 0.0083). Allí puede observarse que los ladrillos tipo “A” del muro MC mostraron más daños que los ladrillos tipo “B”, aunque ello ocurrió para derivas mayores que la reglamentaria (0.005, Ref.3).

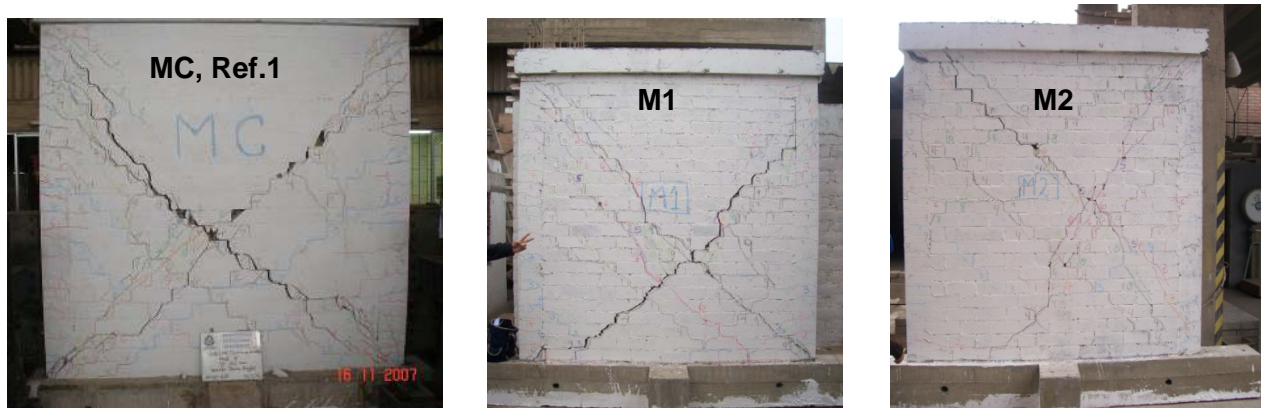


Fig.5. Estado de los muros MC (ladrillo A, con cal, Ref.1), M1 (ladrillo B, con cal) y M2 (ladrillo B, sin cal) después del ensayo de carga lateral cíclica.

5.2 Lazos Histeréticos

Los lazos histeréticos fuerza cortante (V) – desplazamiento lateral (D), se muestran en la Fig.6 para los tres muros, incluyendo al muro MC de la Ref.1. Estos gráficos están a la misma escala con fines comparativos. Puede notarse que los lazos son finos y pasan por el origen del sistema de referencia; esto ocurre normalmente en sistemas que disipan poca energía y degradan rigidez lateral.

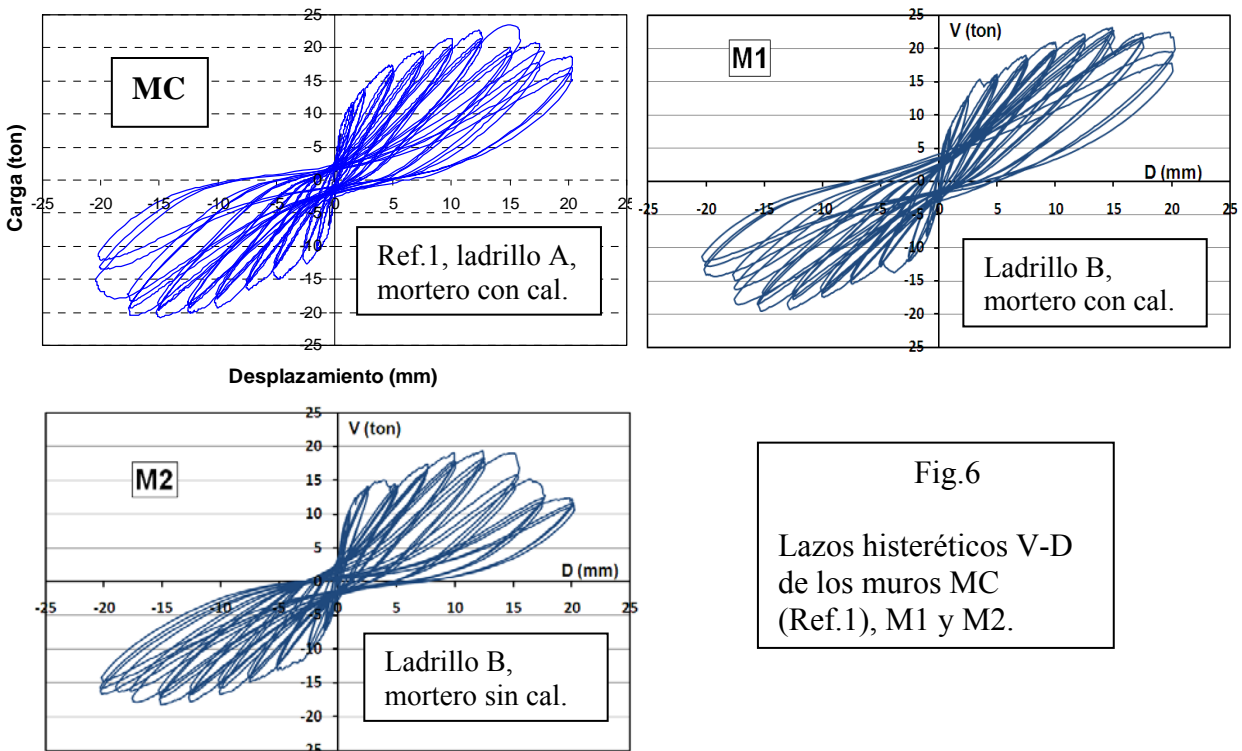


Fig.6
Lazos histeréticos V-D de los muros MC (Ref.1), M1 y M2.

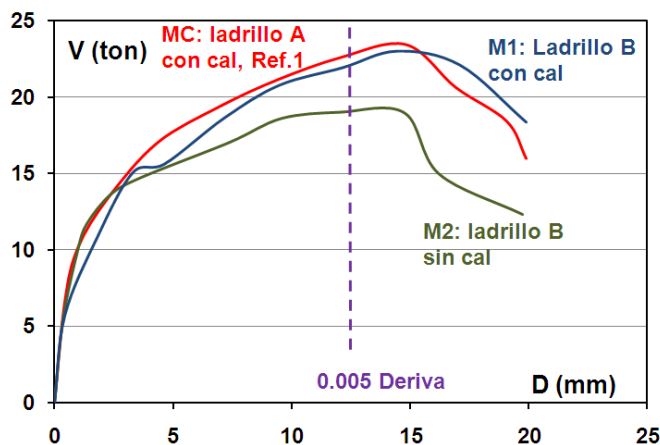
5.3 Envoltorio de los Lazos Histeréticos

Con el objetivo de analizar las influencias de la cal en el mortero y el tipo de ladrillo sobre el comportamiento sísmico de la albañilería, hecha con ladrillos de concreto vibrado, se trazaron las envoltorios V-D de los lazos histeréticos (Fig.6) correspondientes al primer ciclo de cada fase en su rama positiva, para así atenuar los efectos de la degradación de resistencia producida por el deterioro de las columnas, ya que el ensayo empezó en cada fase aplicando cargas positivas.

En la Fig.7 se aprecia que los tres muros analizados (incluyendo al muro MC de la Ref.1), no presentan degradación de resistencia hasta después que se sobrepasa la deriva máxima reglamentaria (0.005, especificada por la Ref.3), por lo que cualquiera de las tres alternativas es aceptable.

En la Fig.7 se observa que la inclusión de cal en el mortero (muro M1, hecho con ladrillo “B”) incrementó la resistencia máxima en 20% respecto al caso en que el mortero careció de cal (muro M2, hecho con ladrillo “B”). En esta figura también se nota que el uso de una mejor calidad de ladrillo de concreto vibrado “A” (muro MC, hecho con mortero con cal), en relación al tipo “B” usado en el muro M1 (hecho con mortero con cal), no influyó sobre la resistencia máxima, por lo que si pretendiese obtener la misma resistencia usando una menor calidad de ladrillo (tipo “B”), habría que agregar cal al mortero. Lo indicado no descarta el uso del ladrillo tipo “B” sin cal en el mortero (muro M2), sólo que para efectos de diseño estructural habría que considerar una resistencia menor que la correspondiente al muro con ladrillo original (tipo “A”), salvo que se agregue cal al mortero.

Fig.7
Envoltorio V-D de M1,
M2 y MC (Ref.1).



6. COMPARACIÓN DE VALORES EXPERIMENTALES Y TEÓRICOS

6.1 Rigidez Lateral Inicial (K)

La rigidez lateral experimental se calculó como la relación V/D en la primera fase del ensayo, donde los muros se comportaron elásticamente (sin fisuras). Para hallar la rigidez lateral teórica se supuso que la albañilería del muro en voladizo tenía un módulo de elasticidad $E_m = 700f'm$ (ver “f’m” en Tabla 2) y un módulo de corte $G_m = 0.4E_m$, estas expresiones aparecen en la Ref.2 y son válidas para la albañilería hecha con ladrillos de concreto; además, las columnas de concreto se transformaron en elementos equivalentes de albañilería. Los resultados aparecen en la Tabla 5, donde se nota que la diferencia entre los valores teóricos y experimentales no es significativa y que en el rango elástico no existe mayor diferencia entre usar mortero con cal o sin cal, o entre usar ladrillos tipo “A” o “B”.

Tabla 5. Comparación de Rigideces Laterales “K”.

| Muro | M1 | M2 | MC (Ref.1) |
|-------------------------|-------------------|---------------|-------------------|
| Mortero | 1: ½: 4 (con cal) | 1:4 (sin cal) | 1: ½: 4 (con cal) |
| Ladrillo | B | B | A |
| K experimental (ton/mm) | 19.17 | 20.05 | 19.87 |
| K teórico (ton/mm) | 21.84 | 21.06 | 22.08 |
| Diferencia | 14% | 5% | 11% |

6.2 Carga de Agrietamiento Diagonal (Vm)

El agrietamiento diagonal de todos los muros se presentó en la fases 4 del ensayo. Para predecir teóricamente la carga asociada, se aplicó la fórmula $V_m = 0.5 v' m t L$ (Ref.2), válida sólo para muros cuadrados sin carga vertical, donde $v' m$ es la resistencia a corte puro de los muretes (Tabla 2) limitada como máximo en $\sqrt{f' m}$, $t = 13\text{cm}$ y $L = 240\text{cm}$. En la Tabla 6 aparecen los valores obtenidos.

Tabla 6. Comparación de Resistencias al Agrietamiento Diagonal “Vm”.

| Muro | M1 | M2 | MC (Ref.1) |
|-----------------------|-------------------|---------------|-------------------|
| Mortero | 1: ½: 4 (con cal) | 1:4 (sin cal) | 1: ½: 4 (con cal) |
| Ladrillo | B | B | A |
| Vm experimental (ton) | 14.93 | 14.05 | 16.07 |
| Vm teórica (ton) | (*) | 13.65 | 15.95 |
| Diferencia | (*) | -3% | -1% |

(*) En M1 no pudo determinarse $v' m$ (ver la Tabla 2)

En la Tabla 6 se nota que la diferencia entre los valores teóricos de “Vm” con los valores experimentales no es significativa, por lo que la fórmula de la Ref.2 es adecuada. Por otro lado, debido a que en los 3 muros la falla diagonal fue principalmente escalonada cortando algunos ladrillos, los valores experimentales de “Vm” no muestran grandes diferencias: incremento de 6% cuando se usó cal en el mortero e incremento de 8% a favor del ladrillo original tipo “A”, para el caso mortero con cal.

7. 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 se obtuvo en los muros confinados hechos con los nuevos ladrillos de concreto (tipo B). Para comparar los efectos producidos por el cambio del ladrillo original (tipo A), se hizo uso de los resultados de la Ref.1.

7.1 Ladrillos

- Según los resultados de los ensayos y de acuerdo a la Ref.2, los ladrillos nuevos de concreto vibrado tipo “B”, calificaron como unidades sólidas y aptas para ser utilizadas en la construcción de muros portantes en edificaciones de hasta de 5 pisos, ubicadas en la zona sísmica 3 (Ref.3).
- De acuerdo a la Ref.2, los ladrillos originales tipo “A” ($f' b = 146 \text{ kg/cm}^2$) son clase IV, mientras que los del tipo “B” ($f' b = 118 \text{ kg/cm}^2$) son clase III; sin embargo, esto no es condicionante como para que los ladrillos tipo “B” puedan ser empleados en la construcción de muros portantes.

7.2 Prismas de Albañilería

- **Efectos de la cal en el mortero.** La resistencia a compresión axial ($f'm$) de las pilas, construidas en un caso con mortero con cal y en el otro sin cal, fue prácticamente la misma, por lo que el uso de la cal resultó intrascendente; esto se debió a que la forma de falla fue por aplastamiento en las pilas. En cuanto a la resistencia a corte puro ($v'm$) de los muretes, no pudo llegarse a ninguna conclusión, porque los muretes hechos con mortero con cal tuvieron alta dispersión de resultados.
- **Efectos del tipo de ladrillo.** La resistencia a compresión axial de las pilas ($f'm$) hechas con ladrillos originales tipo “A” fue 11% mayor que las hechas con ladrillos tipo “B”, debido a que en ambos casos la falla fue principalmente por aplastamiento del ladrillo y el ladrillo tipo “B” presenta menos resistencia a compresión que el tipo “A”. Para el caso de los muretes no pudo llegarse a ninguna conclusión, por la alta dispersión de resultados que tuvieron los muretes de la serie “B” hechos con mortero con cal, excepto que en todos los casos la falla fue escalonada a través de las juntas atravesando algunos ladrillos; esta forma de falla también se presentó en los muros.

7.3 Construcción de los Muros

- La conexión a ras columna–albañilería en los muros confinados con la adición de mechas de anclaje, evitó problemas que muchas veces se presentan en la conexión dentada tradicional, como son: cangrejas bajos los dientes, rotura de dientes al compactar el concreto de las columnas, o juntas frías por la falta de limpieza de los desperdicios de mortero que caen sobre los dientes. Durante los ensayos, no se notaron grietas verticales importantes en la unión albañilería-columna.
- Por la alta succión que tuvo el ladrillo tipo “B” hubo que humedecer sus caras antes de asentarlos, en tanto que los ladrillos tipo “A” se asentaron en su estado natural previa limpieza (Ref.1).

7.4 Rigidez Lateral (K)

- La rigidez lateral inicial pudo predecirse aplicando el criterio de la sección transformada y las expresiones que especifica la Norma E.070 (Ref.2) para el cálculo del módulo de elasticidad y del módulo de corte de la albañilería: $E_m = 700f'm$ y $G_m = 0.4E_m$, respectivamente.
- La rigidez lateral elástica de los muros hechos con cal en el mortero, sin cal, o con ladrillos tipo “A” (original) o tipo “B” (nuevo), fue prácticamente la misma.

7.5 Resistencia al Agrietamiento Diagonal (V_m)

- La resistencia al agrietamiento diagonal “ V_m ” pudo predecirse con un margen de error pequeño, empleando la fórmula de la Norma E.070 (Ref.2).
- Para el caso en que se usó mortero con cal (muro M1), la resistencia al agrietamiento diagonal se incrementó levemente (6%) respecto al caso mortero sin cal (muro M2), debido a que la cal mejoró la adherencia ladrillo-mortero, principalmente en la cara de asiento lisa y totalmente tapada.
- El muro MC construido con ladrillo original tipo “A” (Ref.1) presentó un ligero incremento de 8% en la resistencia al agrietamiento diagonal respecto al muro M1 hecho con ladrillo tipo “B”. Esta

diferencia no descarta el empleo de los ladrillos tipo “B” en la construcción de muros portantes, sólo indica que en el diseño estructural debe usarse una ligera menor resistencia “V_m”.

7.6 Resistencia Máxima a Fuerza Cortante

- La máxima carga soportada por los muros depende del grado de deterioro que presenten la albañilería y los confinamientos; a su vez, esta carga está influenciada por la incursión del acero vertical en su zona de endurecimiento (comprobada en el experimento con los LVDT colocados en la base de las columnas). Esta carga se presentó para derivas un tanto mayores que la reglamentaria (0.005, Ref.3). En ese sentido puede decirse que los muros hechos con mortero con cal o sin cal, o con ladrillos tipo “A” (Ref.1) o “B”, fue prácticamente similar, con una ligera mayor resistencia (20%) cuando se usó ladrillos tipo “A” o “B” con mortero con cal, en relación al caso ladrillos tipo “B” con mortero sin cal; por lo que si pretendiese obtener la misma resistencia máxima usando una menor calidad de ladrillo (tipo “B”), habría que agregar cal al mortero.

7.7 Deriva Máxima

- La deriva máxima especificada por la Norma E.030 (Ref.3) es 0.005 para la albañilería confinada. Esta deriva estuvo asociada a la fase 7 del ensayo ($D = 12.5$ mm), donde los muros hechos con mortero con cal o sin cal, o con ladrillos tipo “A” (Ref.1) o tipo “B”, estaban en un estado económicamente reparable. Por lo que indistintamente del tipo de mortero o ladrillo de concreto que se use, puede decirse que los muros se comportaron adecuadamente, sobreviniendo la degradación de resistencia para derivas mayores que 0.005, por el deterioro producido tanto en los confinamientos como en los ladrillos.

7.8 Resumen de Conclusiones

- En síntesis se concluye que podría dejarse de emplear cal en el mortero y que podría emplearse ladrillos nuevos tipo “B” en las edificaciones de albañilería confinada de hasta 5 pisos ubicadas en la zona sísmica 3, con tal que en el diseño sísmico se contemple la ligera menor resistencia (14%) al agrietamiento diagonal que proporciona este tipo de ladrillo en comparación con el ladrillo tipo “A”, salvo que se adicione cal al mortero. Para el diseño por carga vertical, también debe considerarse una pequeña reducción (18%) en la resistencia a compresión de la albañilería (f'_m), excepto cuando se adicione cal al mortero.

REFERENCIAS

1. Angles Pari Paola, 2008. Comparación del Comportamiento a Carga Lateral Cíclica de un Muro Confinado con Ladrillos de Concreto y otro con Ladrillos de Arcilla. Tesis PUCP. Lima, Perú.
2. Reglamento Nacional de Edificaciones, 2006. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento y SENCICO. Norma Técnica de Edificaciones E.070 “Albañilería”. Lima, Perú.
3. Reglamento Nacional de Edificaciones, 2006. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento y SENCICO. Norma Técnica de Edificaciones E.030. “Diseño Sismorresistente”. Lima, Perú.