

COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE MUROS DE ALBAÑILERÍA CONFINADA REFORZADOS CON CANASTILLAS DÚCTILES Y ELECTROSOLDADAS

Por: Ángel San Bartolomé
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

RESUMEN

El objetivo principal de este proyecto, financiado por PRODAC y ejecutado en el Laboratorio de Estructuras de la PUCP, fue analizar la posibilidad de utilizar en las columnas de los edificios de albañilería confinada, canastillas electrosoldadas en reemplazo de aquellas compuestas por acero dúctil. Para ello se construyeron 6 muros, variándose el tipo de canastilla en las columnas. En 3 de estos muros se utilizaron varillas dúctiles de 3/8", 1/2" y 5/8", mientras que en los otros 3 se usaron canastillas electrosoldadas equivalentes a las dúctiles. Estos muros fueron ensayados a carga lateral cíclica, para así comparar su comportamiento sísmico ante los 2 tipos de canastillas empleadas.

1. INTRODUCCIÓN

En la Norma E.070 (Ref.1) se especifica el uso de acero dúctil, con elongación mínima de 9%, como refuerzo estructural en las construcciones de albañilería. Esta especificación no es cumplida por las canastillas de acero electrosoldado, sin embargo, puesto que el uso de esas canastillas prefabricadas incrementaría la rapidez en la construcción de las edificaciones de albañilería confinada, al suprimirse la partida de habilitación de varillas, fue necesario investigar experimentalmente los efectos que causarían el empleo de las canastillas electrosoldadas sobre la resistencia, rigidez y ductilidad de los muros de albañilería confinada sujetos a cargas sísmicas.

Para ello se construyeron seis muros de albañilería confinada a escala natural, variándose tan solo el tipo de canastilla colocada en las columnas. En tres de estos muros: M1, M3 y M5 se utilizaron 4 varillas dúctiles de 3/8", 1/2" y 5/8" (diámetros usuales en estos edificios), respectivamente, mientras que en los otros tres (M2, M4 y M6) se usaron canastillas electrosoldadas con áreas de acero equivalentes a las dúctiles. Estos muros fueron sometidos a ensayos de carga lateral cíclica, lo cual permitió comparar su comportamiento sísmico para los 2 tipos de canastillas utilizadas.

2. CARACTERÍSTICAS NOMINALES DE LOS MATERIALES

En este proyecto se utilizaron materiales de buena calidad, con la finalidad de que ellos no influyan sobre el parámetro en análisis (tipo de refuerzo en la canastilla). Las propiedades reales de los materiales aparecen en el acápite 9, mientras que sus características nominales fueron:

- Ladrillo (Norma E.070, Ref.1): clase IV, sólido de arcilla (con 30% de huecos).
- Mortero (Norma E.070, Ref.1): tipo P2, proporción volumétrica cemento-arena 1: 4.
- Concreto: $f'c = 175 \text{ kg/cm}^2$. El tamaño máximo de la piedra chancada fue 1/2".
- Acero dúctil: Grado 60, $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$.
- Acero electrosoldado (información proporcionada por PRODAC): $f_y = 5000 \text{ kg/cm}^2$.

3. DEFINICIÓN DE LAS CANASTILLAS EMPLEADAS EN LAS COLUMNAS

Como patrón de comparación se adoptaron canastillas compuestas por 4 varillas de acero dúctil con diámetros de 3/8", 1/2" y 5/8", para los muros M1, M3 y M5, respectivamente. Las varillas verticales

de estas canastillas fueron estribadas con acero dúctil corrugado de diámetro ¼”, espaciados 1 a 5, 4 a 10 y el resto a 20cm (Fig.8).

Para definir a las varillas verticales correspondientes a las canastillas electrosoldadas (con $f_y = 5 \text{ ton/cm}^2$), se consideró que el conjunto de varillas proporcione una fuerza de tracción nominal a la fluencia ($T = A_s f_y$, donde “ A_s ” es la suma de las áreas de las varillas longitudinales que componen a la canastilla) igual a su equivalente en acero dúctil (con $f_y = 4.2 \text{ ton/cm}^2$). Bajo esta condición se obtiene un área de acero 16% menor en las canastillas electrosoldadas.

En la Fig.1 aparece el cuadro de columnas para los 6 muros analizados. Todas las columnas fueron de 13x20 cm, con un recubrimiento de 2cm medido a la cara externa de los estribos.

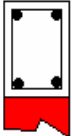

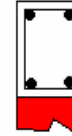



MURO	M1	M2	M3	M4	M5	M6
COLUMNA 13X20cm						
REFUERZO VERTICAL	4 f 3/8"	4 f 8.7mm	4 f 1/2"	6 f 9.5mm	4 f 5/8"	6 f 9.5mm + 4 f 8.7mm
ESTRIBOS	□ 1/4"	□ 5.5mm	□ 1/4"	□ 5.5mm	□ 1/4"	□ 5.5mm
Tipo de Ref.	dúctil	electrosoldado	dúctil	electrosoldado	dúctil	electrosoldado
Equivalencia	M1 y M2 equivalentes		M3 y M4 equivalentes		M5 y M6 equivalentes	

Fig.1. Cuadro de columnas para los 6 muros ensayados.

Puesto que las canastillas electrosoldadas presentan estribos de 5.5mm con un espaciamiento fijo de 20cm, mientras que de acuerdo a la Ref.1 se requiere que este espaciamiento sea como máximo a 10cm en los extremos de las columnas (Fig.8), tuvo que agregarse en esos extremos estribos de 5.5mm @ 20cm, amarrados a las varillas longitudinales con alambre #16 (Fig.2).

Para el caso canastilla dúctil, los estribos tuvieron 1 ¾ de vuelta (Fig.3) para que no estorben el paso de las piedras, evitándose así la formación de cangrejeras, mientras que en las canastillas electrosoldadas se utilizaron estribos cerrados con ganchos a 135° de 6cm de longitud (Fig.2).



Fig.2. Canastilla electrosoldada de M2.



Fig.3. Canastilla dúctil de M1.

3.1. Defectos Observados en las Canastillas Electrosoldadas de los Muros M4 y M6

Las canastillas electrosoldadas fueron fabricadas por PRODAC y aquellas correspondientes a los muros M4 y M6 presentaron 4 defectos que posteriormente PRODAC los corrigió.

1. En la canastilla electrosoldada de M6, pudo notarse que algunos estribos se encontraban desoldados (Fig.4). El problema se resolvió amarrando con alambre #16 el punto desoldado. Este problema no se presentó en las canastillas del muro M4.

Fig.4
Canastilla de M6 y estribos desoldados.



2. En una de las canastillas de M4 y en las 2 canastillas de M6, todos los estribos electrosoldados tenían un gancho doblado a 135° y soldado a la varilla longitudinal, mientras que el otro gancho doblaba 90° y estaba suelto (Fig.5). Para el caso de M4 el problema se resolvió doblando 45° el gancho que inicialmente estuvo a 90° (135° en total), introduciéndolo en el núcleo de la canastilla sin soldarlo. En M6 el doblar el gancho a 90° no podía efectuarse por la alta congestión de refuerzo, por lo que hubo que recortarlo de 6 a 4cm para después doblarlo a 135°.



Fig.5. Defectos en los ganchos de los estribos en M4 y M6 y solución en M6.

3. En las canastillas de M6, una de las varillas longitudinales internas se encontraba doblada y muy pegada al refuerzo ubicado en una de las esquinas de la canastilla (Fig.6). Esta varilla fue cambiada por otra en mejor estado y atada a los estribos con alambre #16.

Fig.6
Canastilla de M6 con varilla longitudinal interna doblada.



4. En las canastillas de M4 y M6, algunos estribos suplementarios (adicionales a los electrosoldados) presentaron grandes dimensiones (Fig.7), por lo que podrían entrar en contacto con el encofrado de la columna. Esos estribos fueron cambiados.

Fig.7

Estribos
suplementarios
muy grandes.

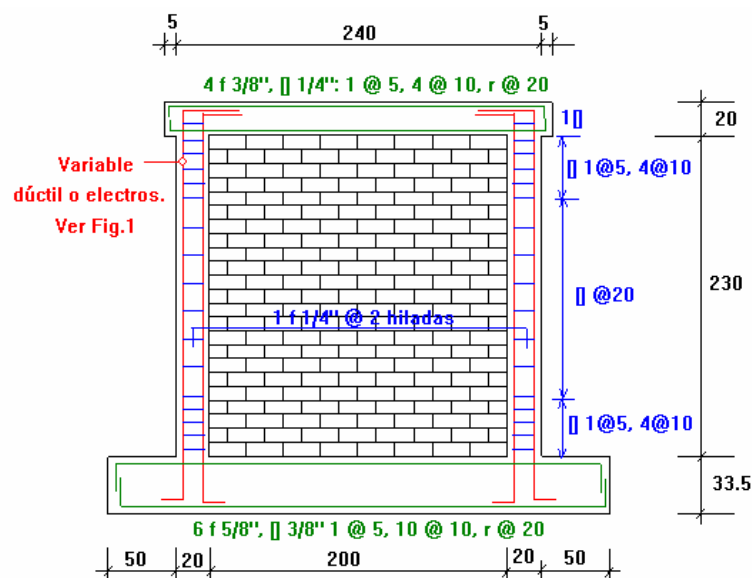


4. CARACTERÍSTICAS DE LOS MUROS

Los 6 muros a escala natural (Fig.8), tuvieron las mismas características geométricas y los mismos materiales, con la única diferencia de que las canastillas de refuerzo empleadas en las columnas de confinamiento variaron (Fig.1). Estos muros representan a un muro estructural del primer piso de algún edificio de más de 3 pisos, por lo que de acuerdo a la Ref.1, los 6 muros fueron reforzados horizontalmente con una cuantía de acero dúctil igual a 0.001 (1 ϕ 1/4" cada 2 hiladas). El diseño del refuerzo reglamentario (Ref.1), correspondió al utilizado en el muro M3 (ver el acápite 8.3).

Fig.8

Características
comunes de los 6
muros de 13 cm
de espesor. Las
medidas están en
centímetros.



5. CONSTRUCCIÓN DE LOS MUROS

En los 6 muros se empleó la misma mano de obra y la misma secuencia constructiva (Fig.9). En primer lugar se construyó la cimentación, donde anclaron las canastillas. Luego de 3 horas de haberse vaciado el concreto, se rayó la superficie superior en la zona a ser ocupada por el muro.

Los ladrillos fueron regados durante 1/2 hora la tarde anterior a su asentado, con el objeto de disminuir su alta succión. Luego, la albañilería fue construida en dos jornadas de trabajo, empleando juntas de mortero 1:4 de 1.5cm de espesor y juntas a ras entre la albañilería y las columnas; durante esta etapa se colocó el refuerzo horizontal correspondiente, el mismo que fue continuo y anclado en las columnas. Al culminar la primera jornada, se dejaron libres las juntas verticales correspondientes a la última hilada, al día siguiente, al iniciar la segunda jornada, se llenaron esas juntas y además se limpió y humedeció la superficie superior.

Al día siguiente de haberse construida la albañilería, se procedió con el encofrado de las columnas, para posteriormente vaciar el concreto, compactándolo con una vibradora. Finalmente, se construyó la viga solera. Todos los elementos de concreto armado fueron curados durante 3 días, mediante un

proceso de regado y no se notaron cangrejas en los confinamientos, pese a la congestión de refuerzo existente en el muro M6.



Fig.9. Secuencias de la construcción de los muros 6 muros confinados.

6. TÉCNICA DE ENSAYO E INSTRUMENTACIÓN

6.1. Instrumentación

La carga lateral (V en la Fig.10) se registró con la celda de carga del actuador dinámico, mientras que los desplazamientos (D en la Fig.10), fueron captados con LVDT.

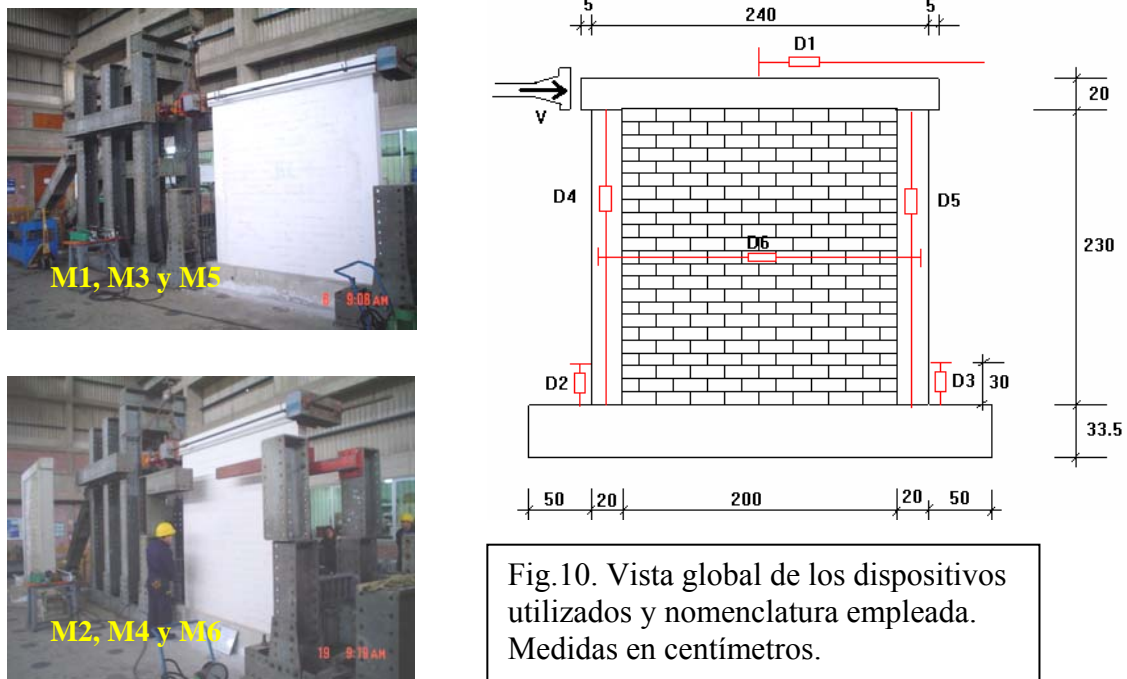


Fig.10. Vista global de los dispositivos utilizados y nomenclatura empleada. Medidas en centímetros.

6.2. Dispositivo de Seguridad en M2, M4 y M6

Ante la posibilidad de que ocurra una falla frágil en los muros reforzados con canastillas electrosoldadas (M2, M4 y M6), problema que no se presentó en el experimento, de manera preventiva se colocaron 2 vigas metálicas fuera del plano del muro en la parte superior (Fig.10).

6.3. Técnica de Ensayo

Los 6 muros fueron sometidos a un ensayo de carga lateral cíclica (V) con desplazamiento horizontal (D1) controlado en 10 fases, según se indica en la Tabla 1. Por cada fase se aplicó un número determinado de ciclos hasta estabilizar el lazo histerético V-D1, y se pintaron las fisuras de un color determinado (Tabla 1). No se aplicó carga vertical ($P = 0$).

Tabla 1. Fases del Ensayo.										
Fase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D1 (mm)	0.5	1.5	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0
Nº ciclos	1	2	2	2	3	3	3	3	3	3
Color	Amarillo	Rosado	Naranja	Rojo	Verde	Azul	Violeta	Marrón	Celeste	Negro

Es necesario precisar que la distorsión máxima inelástica permitida por la Ref.2 para las estructuras compuestas por muros de albañilería reforzada, es 0.005, que equivale a un desplazamiento lateral igual a $0.005 \times 2400 = 12\text{mm}$ (fase 7 del ensayo); sin embargo, debido a que en el experimento no se contempló la acción de la carga vertical, que reduce la ductilidad del muro, ni la gran cantidad de ciclos que imprime un sismo real generando mayor deterioro, fue necesario aplicar en los muros un desplazamiento de hasta 20mm para simular las situaciones indicadas.

7.0. COMPORTAMIENTO DE LOS MUROS

7.1. Muros M1 y M2 (equivalentes)

El muro M1, con canastilla de acero dúctil y baja cantidad de refuerzo vertical ($4 \phi 3/8''$), tuvo una falla combinada por flexión y cizalle en su zona central inferior (Fig.11). El muro M2, con canastillas electrosoldada ($4 \phi 8.7\text{mm}$), tuvo una falla por flexión que derivó en cizalle a través de la base. Ambos muros soportaron hasta la fase 9 del ensayo y terminaron con el talón triturado, pandeándose el refuerzo vertical, sin que se produzca la rotura por cizalle del refuerzo vertical (Fig.12), por lo que se puede decir que M1 y M2 tuvieron igual comportamiento.



Fig.11. Estado de M1 (izq.) y M2 (der.) y de sus talones, después de la fase 9 del ensayo.

Fig.12

Inspección del talón de M1 y M2 después del ensayo. Pandeo del refuerzo vertical, sin que ocurra su rotura por cizalle.



7.2. Muros M3 y M4 (equivalentes)

El muro M3, con canastilla de acero dúctil ($4 \phi \frac{1}{2}$ "), tuvo una falla combinada por corte (grieta diagonal a media altura y otra que abarcó todo el muro) y cizalle encima de la primera hilada (Fig.13). El muro M4, con canastilla electrosoldada ($6 \phi 9.5\text{mm}$), tuvo una falla combinada por corte (grieta diagonal en todo el muro) y cizalle en su base. Ambos muros soportaron las 10 fases del ensayo y terminaron con los talones muy dañados, sin que pandee el refuerzo vertical, por lo que se puede concluir que M3 y M4 tuvieron un comportamiento similar.



Fig.13. Estado de M3 (izq.) y de M4 (der.) y de sus talones al aplicar $D1 = +20\text{mm}$ en la fase 10 del ensayo.

7.3. Muros M5 y M6 (equivalentes)

El muro M5, con canastilla de acero dúctil ($4 \phi \frac{5}{8}$ "), tuvo una falla por corte (grieta diagonal que abarcó todo el muro, Fig.14) y en la fase 10 del ensayo terminó con los nudos superiores triturados, quedando los talones en buen estado. El muro M6, con canastilla electrosoldada ($4 \phi 8.7\text{mm} + 6 \phi 9.5\text{mm}$), tuvo un comportamiento muy parecido a M5.



Fig.14. Estado de M5 (izq.) y M6 (der.) y de sus nudos superiores al aplicar $D1 = +20\text{mm}$ en la fase 10 del ensayo.

8. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

8.1. Lazos Histeréticos V-D1

Los lazos histeréticos Cortante (V) - Desplazamiento Lateral (D1), correspondientes a los 6 muros ensayados, aparecen en la Fig.15, donde puede notarse que, independientemente del tipo de canastilla utilizada (dúctil o electrosoldada), los lazos histeréticos son finos y tratan de pasar por el origen del sistema de referencia, lo cual es propio de sistemas que disipan poca energía y que, además de degradar resistencia, degradan rigidez lateral. Lazos similares aparecen en la Ref.3.

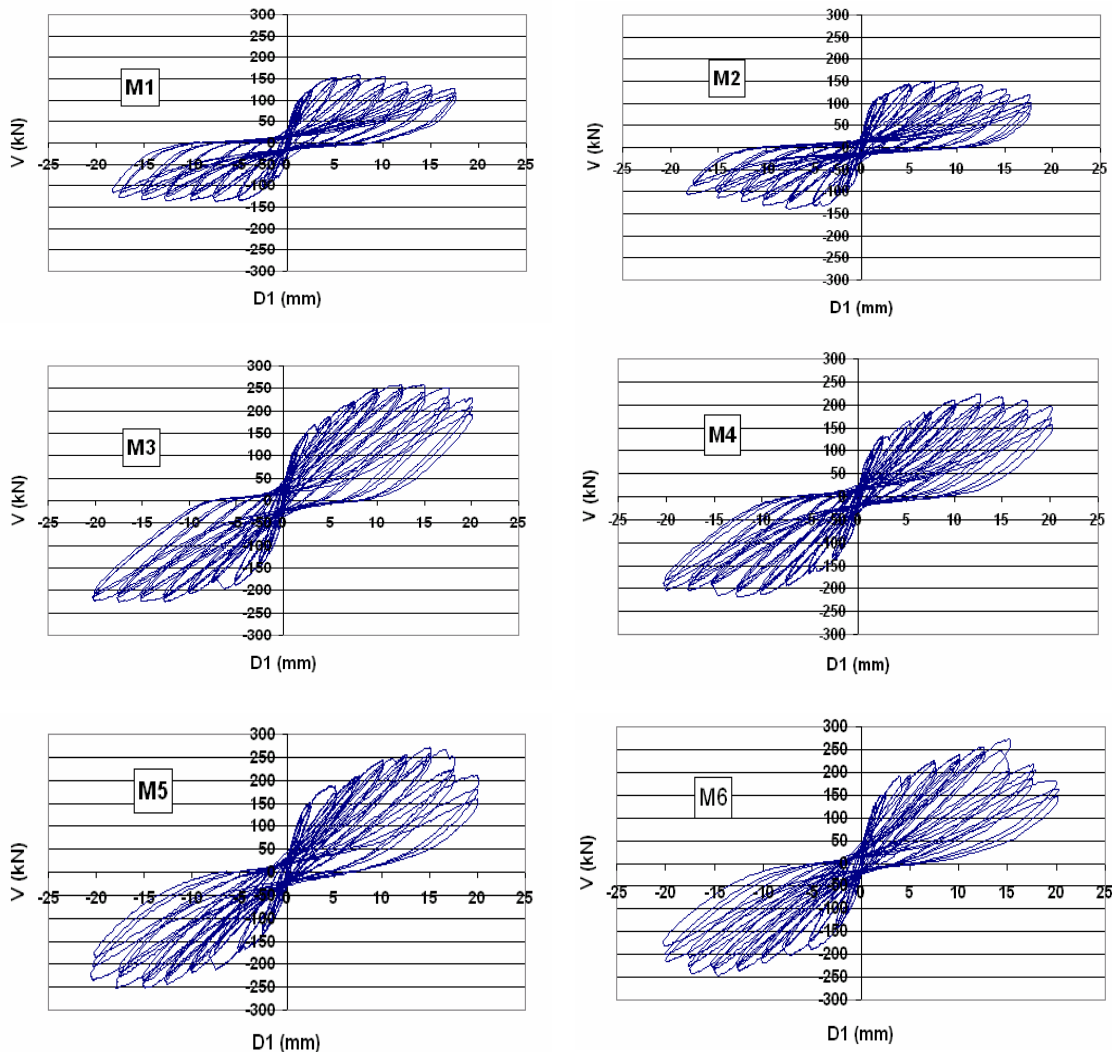


Fig.15. Lazos histeréticos V-D1 de los 6 muros ensayados.

8.2. Efectos del Tipo de Canastilla (dúctil y electrosoldada)

Para analizar el efecto del tipo de canastilla utilizada (dúctil y electrosoldada) sobre la resistencia, la rigidez y la ductilidad de los muros confinados, es necesario comparar aquellos muros que presenten canastillas equivalentes: M1 vs. M2, M3 vs. M4, y M5 vs. M6. Para esto se utilizó la envolvente de los lazos histeréticos V-D1 (Fig.16), asociada a los ciclos estables en cada fase del ensayo en su rama más crítica, que para todos los muros fue la positiva (empuje), donde se notó la mayor degradación de resistencia (Fig. 15). En la Tabla 2 aparece una parte de los valores numéricos V-D1 empleados para generar la Fig.16.

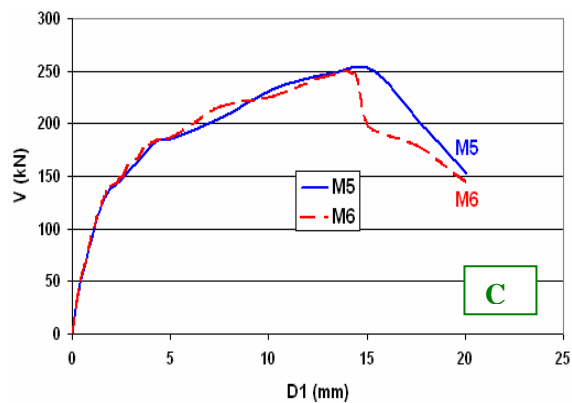
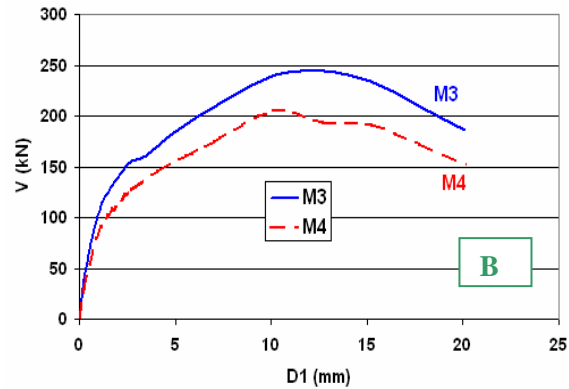
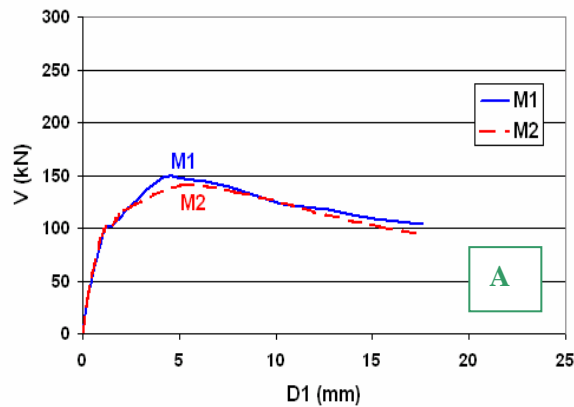


Fig.16 A, B y C

Envolvente de los lazos
histeréticos V-D1
correspondiente a los ciclos
estables de los 6 muros.

Tabla 2. Envoltura de los Lazos Histeréticos. Ciclo Estable. Rama Positiva.											
Muro	Fase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
M1	D1 mm	0.49	1.50	2.52	5.25	7.61	10.07	12.71	15.12	17.61	---
	V kN	52.86	102.87	121.81	146.46	138.8	123.97	117.80	109.44	103.76	---
M2	D1 mm	0.50	1.50	2.50	5.10	7.88	10.34	12.58	15.42	17.59	---
	V kN	56.89	104.25	120.71	140.72	134.79	124.08	113.05	101.45	93.92	---
M3	D1 mm	0.50	1.51	2.51	5.04	7.54	10.21	12.77	15.20	17.57	20.09
	V kN	62.82	123.90	152.34	184.55	215.13	240.61	244.68	233.80	211.71	185.53
M4	D1 mm	0.50	1.51	2.74	5.58	7.04	10.10	12.69	15.23	17.73	20.18
	V kN	53.06	101.83	127.60	160.16	174.88	204.77	193.44	190.51	172.44	152.01
M5	D1 mm	0.50	1.55	2.49	5.00	7.68	10.16	12.94	15.33	17.61	20.04
	V kN	54.87	127.15	146.53	185.64	206.39	232.51	246.88	251.15	202.92	152.98
M6	D1 mm	0.50	1.52	2.46	5.17	7.59	10.27	12.82	15.10	17.52	20.12
	V kN	57.86	125.87	150.22	188.42	216.37	226.04	244.89	198.28	180.10	144.29

En la Fig.16A se aprecia que no existe diferencia entre M1 y M2, por lo que ante la posibilidad remota de que se genere una falla por flexión (*) que derive en deslizamiento (acápate 7.1), daría lo mismo usar una canastilla de acero dúctil (M1) o electrosoldado (M2).

(*) *Ante los sismos reales, la falla por corte es una particularidad de las construcciones de albañilería (Ref.3), incluso si ésta carece de confinamientos en sus bordes, como se aprecia en la Fig.17. En el ensayo la falla por flexión se presentó por la ausencia de carga vertical, losa de techo, vigas dinteles y paredes transversales en muros con escaso refuerzo vertical (M1 y M2).*

Fig.17

Falla por corte en viviendas reales no confinadas en sus cuatro bordes.



En la Fig.16B, se nota que el muro M3 (con canastilla dúctil) presenta un 20% más de resistencia que el muro M4 (con canastilla electrosoldada), sin embargo, esta diferencia se presentó desde la etapa elástica (ver “V” de la Fase 1 en la Tabla 2), donde el efecto del refuerzo es intrascendente, por lo que la mayor resistencia de M3 sobre M4 se atribuye a la dispersión misma que tiene el material albañilería (*). En consecuencia, puede decirse que ante una falla por corte (situación real), daría lo mismo usar canastilla dúctil o electrosoldada, ya que ambos muros pudieron alcanzar el mismo nivel de deformación inelástica en la falla por corte (acápite 7.2).

(*) *El ladrillo tuvo una dispersión de 28% en su resistencia a compresión (acápite 9.1).*

En la Fig.16C, se aprecia que el comportamiento de M5 y M6 es idéntico hasta la fase 8 (D1 = 15mm), después la degradación de resistencia fue más notoria en M6 debido a que durante la fase 8 se presentó una fisura horizontal en la base de la última hilada, problema que también se generó en M5 durante la fase 9, con lo cual, ambos muros alcanzaron la misma resistencia en la fase 10. Al depender esa fisura horizontal de la albañilería y no del refuerzo, puede decirse que ante una falla por corte (situación real), daría lo mismo usar canastilla dúctil (M5) o electrosoldada (M6).

8.3. Efectos de la Cantidad de Refuerzo Existente en las Canastillas

De acuerdo a la Norma E.070 (Ref.1), los muros confinados se diseñan esperando una falla por corte ante la acción de los sismos severos, de tal modo que los confinamientos sean capaces de soportar la carga de agrietamiento diagonal (Vm). Siguiéndose la nomenclatura de la Ref.1 y las características del muro mostradas en la Fig.8, se tiene para el caso canastilla dúctil:

Valores nominales de diseño: $f'c = 175 \text{ kg/cm}^2 = 0.175 \text{ ton/cm}^2$, $f_y = 4.2 \text{ ton/cm}^2$.
 Albañilería (ver acápite 9.4): $f'm = 110 \text{ kg/cm}^2$, $v'm = 10.56 \text{ kg/cm}^2$ no mayor que $\sqrt{f'm}$
 \rightarrow usar $v'm = \sqrt{f'm} = 10.5 \text{ kg/cm}^2 = 105 \text{ ton/m}^2$.

$V_m = 0.5 v'm \alpha t L + 0.23 P_g$: $V_m = 0.5 \times 105 \times 1.0 \times 0.13 \times 2.4 + 0.23 \times 0.0 = 16.38 \text{ ton (*)}$
 $P_g =$ carga de gravedad = 0, $t = 13 \text{ cm}$, $L = h = 240 \text{ cm}$
 $\alpha = V L / M = V L / (V h) = 1$. Muro cuadrado ($h = L$)

(*) *La carga de agrietamiento diagonal experimental de M3, M4, M5 y M6 fue: 18 ton, 10% mayor que el valor teórico ($V_m = 16.38 \text{ ton}$), y se presentó entre las fases 4 y 5 del ensayo.*

Fuerzas Internas en cada Columna (Vc, T y C)

Momento flector en la base: $M_u = V_m h = 16.38 \times 2.4 = 39.31 \text{ ton-m}$
 Momento flector M: $M = M_u - \frac{1}{2} V_m h = 19.66 \text{ ton-m}$
 Fuerza debida a M: $F = M / L = 19.66 / 2.4 = 8.19 \text{ ton}$
 Carga gravedad en columna: $P_c = 0$ (no se aplicó carga vertical en el ensayo)
 Tracción (T): $T = F - P_c = 8.19 - 0 = 8.19 \text{ ton}$
 Compresión (C): $C = F + P_c = 8.19 + 0 = 8.19 \text{ ton}$
 Cortante (Vc): $V_c = 1.5 V_m L_m / (L (N_c + 1)) = \frac{1}{2} V_m = 8.19 \text{ ton}$
 $L_m =$ longitud del paño mayor = L, $N_c = 2$ columnas

Diseño de una Columna

Área de concreto por corte: $A_{cf} = V_c / (0.2 f'c \phi) = 8.19 / (0.2 \times 0.175 \times 0.85) = 275 \text{ cm}^2 = 13 \times 21 \text{ cm}$
 \rightarrow se usó 13x20cm.

Área de acero vertical: $A_s = (V_c / \mu + T) / (f_y \phi) = (8.19 / 1 + 8.19) / (4.2 \times 0.85) = 4.59 \text{ cm}^2$
 \rightarrow en el muro M3 se usó 4 $\phi \frac{1}{2}$ ", $A_s = 5.16 \text{ cm}^2$.

Área del núcleo confinado: $A_n = A_s + (C / \phi - A_s f_y) / (0.85 \delta f'c) = -78 \text{ cm}^2 \rightarrow$ no requiere.
 $\phi = 0.7$, $\delta = 0.8$ (columna sin pared transversal)

Debido a que no existe carga de gravedad en el muro (el experimento se hizo con $P = 0$), el área del núcleo confinado (A_n) sale negativa, mandando el área por corte-fricción (A_{cf}) y estribos mínimos de confinamiento: $\square \frac{1}{4}$ ", 1 @ 5, 4@10, r @ 25cm, aunque se usó: $\square \frac{1}{4}$ ", 1 @ 5, 4@10, r @ 20cm.

Diseño de la Solera

Tracción: $T_s = V_m L_m / (2 L) = \frac{1}{2} V_m = 8.19\text{ton}$

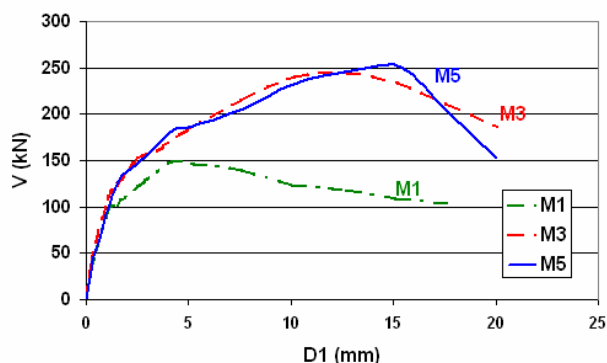
Refuerzo: $A_s = T_s / (\phi f_y) = 8.19 / (0.9 \times 4.2) = 2.17\text{cm}^2 \rightarrow$ se usó 4 $\phi \frac{3}{8}$ ".

Estribos mínimos: $\square \frac{1}{4}$ ", 1 @ 5, 4@10, r@ 25cm \rightarrow se usó $\square \frac{1}{4}$ ", 1 @ 5, 4@10, r @ 20cm.

Este es el refuerzo que se empleó en el muro M3, que es mayor al de M1 y menor al de M5. De la Fig.18, correspondiente al caso canastilla dúctil, se puede obtener las siguientes conclusiones:

- El comportamiento del muro M3 y M5 (ambos con falla por corte) es similar, por lo que se deduce que el diseño reglamentario es correcto y no se requería usar 4 varillas de $\frac{5}{8}$ " (M5).
- Usar una menor cantidad de refuerzo al requerido reglamentariamente (en M1 se utilizó 4 $\phi \frac{3}{8}$ ", mientras que con la Ref.1 se requería 4 $\phi \frac{1}{2}$ "), podría conducir a un tipo de falla por flexión, derivando en deslizamiento, por la poca cantidad de refuerzo vertical existente en M1. Esta falla por cizalle disminuye la ductilidad, ya que M1 solo pudo alcanzar 17.5mm de desplazamiento lateral, mientras que M3 llegó hasta 20mm.

Fig.18
 Envoltura V-D1. Ciclo estable.
 Muros con canastillas dúctiles:
 M1 (4 $\phi \frac{3}{8}$ "), M3 (4 $\phi \frac{1}{2}$ ") y M5
 (4 $\phi \frac{5}{8}$ ").



9. ENSAYO DE LOS MATERIALES

9.1. Ladrillos

Las pruebas hechas en el ladrillo utilizado, comercialmente denominado "King Kong 30% de Vacíos", con dimensiones nominales de 240x130x90mm, proporcionaron los siguientes resultados:

- Variación de dimensiones: -0.4% en longitud, -0.8% en espesor y -5.4% en altura.
- Alabeo: 1 mm.
- Resistencia promedio a compresión sobre área bruta: 235 kg/cm², con 28% de dispersión.
- Resistencia característica a compresión: $f'_b = 235 (1 - 0.28) = 170 \text{ kg/cm}^2$.

Por lo que de acuerdo a la Ref.1, los ladrillos clasificaron como unidades sólidas de arcilla (con menos de 30% de huecos), clase IV, aptas para ser empleadas en los muros portantes confinados en cualquier lugar del Perú. La deficiencia en la altura (el valor promedio fue 85mm), pudo corregirse utilizando juntas horizontales de 15mm en vez de 10mm (aceptado por la Ref.1).

9.2. Concreto

Se ensayaron a compresión axial a 12 probetas estándar, con 28 días de edad, provenientes de cada una de las columnas existentes en los 6 muros, obteniéndose una resistencia promedio $f'_c = 176 \text{ kg/cm}^2$, con 9.5% de dispersión, similar al valor nominal de diseño (175 kg/cm^2).

9.3. Acero de Refuerzo

Para simular los estribos de 5.5mm soldados a las varillas longitudinales (de 8.7 y 9.5mm) cada 20cm en las canastillas electrosoldadas, se ensayó a tracción una muestra de 40cm de longitud, soldada en su parte intermedia a un retazo de varilla transversal de 5.5mm de diámetro. Los resultados promedios de 2 varillas por cada diámetro de barra empleada en los muros, se proporcionan en la Tabla 3, mientras que en la Fig.19 aparece el comportamiento a tracción de la varilla más representativa y en la Fig.20 aparecen las formas de falla. Cabe resaltar que las varillas longitudinales de las canastillas electrosoldadas tuvieron 6% de elongación en la rotura (Tabla 7).

Diámetro nominal	Tipo	Fluencia f_y (kg/cm ²)	Máxima f_m (kg/cm ²)	Elongación (%)
1/4"	Dúctil	5211	7041	10
3/8"	Dúctil	4545	6870	17
1/2"	Dúctil	4522	6705	16
5/8"	Dúctil	4382	7174	15
8.7mm	Electrosoldado	----	5500	6
9.5mm	Electrosoldado	----	5405	6

Fig.19
Comportamiento a tracción de las varillas dúctiles y electrosoldadas.

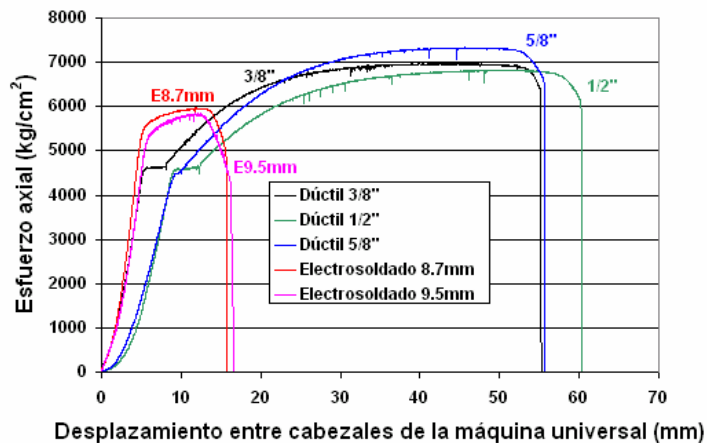


Fig.20
Formas de falla de las varillas dúctiles y electrosoldadas.



En la Fig.19 puede apreciarse que las varillas dúctiles tienen un escalón de fluencia definido, con una resistencia unitaria mayor en un 11% que el valor nominal ($f_y = 4200$ kg/cm²), para después ingresar a la zona de endurecimiento, alcanzando resistencias máximas mayores que las correspondientes a las varillas electrosoldadas en un 27% y deformaciones en la rotura mayores en un 320% que las asociadas a las varillas electrosoldadas. Por otro lado, en las varillas electrosoldadas no pudo medirse la resistencia a la fluencia, debido a que no existió un escalón definido y a que los desplazamientos entre los cabezales de la máquina universal (Fig.19), incluyen resbalamientos de las varillas en las mordazas. Adicionalmente, en la Fig.20 se aprecia que de las cuatro varillas electrosoldadas ensayadas una falló en la zona cercana a la soldadura, mientras que las otras tres fallaron a unos 6cm de la soldadura.

9.4. Pilas y Muretes de Albañilería

Siguiéndose la técnica de construcción empleada en la albañilería de los muros (acápite 5), se construyeron 3 pilas y 3 muretes, cada uno de 6 hiladas. Las pilas tuvieron dimensiones nominales de 13x24x60 cm, mientras que en los muretes las dimensiones nominales fueron: 13x60x60 cm.

A los 28 días de edad, las pilas fueron ensayadas a compresión axial y los muretes a compresión diagonal. La resistencia unitaria promedio (f_m , v_m), así como la resistencia característica (f'_m , v'_m), obtenida restando una desviación estándar al valor promedio (Ref.1), y la dispersión porcentual de resultados, aparecen en la Tabla 4, mientras que las formas de falla que tuvieron las pilas y muretes se muestran en la Fig.21.

Tabla 4. Resistencias unitarias y dispersión de resultados en Pilas y Muretes.					
PILAS			MURETES (*)		
f_m (kg/cm ²)	Dispersión	f'_m (kg/cm ²)	v_m (kg/cm ²)	dispersión	v'_m (kg/cm ²)
122	10%	110	10.85	2.7%	10.56

(*) Se descartó el resultado de uno de los muretes por tener una falla distinta a los otros dos: escalonada en las 2 primeras hiladas más deslizamiento, con baja resistencia (Fig.21).



El resultado obtenido para los muretes ($v'_m = 10.56$ kg/cm²) fue ligeramente mayor que $\sqrt{f'_m} = \sqrt{110} = 10.5$ kg/cm², por lo que de acuerdo a la Ref.1, debe adoptarse $v'_m = 10.5$ kg/cm².

10. CONCLUSIONES

Las conclusiones que se vierten en este artículo están limitadas al uso de:

- Canastillas electrosoldadas de buena calidad. Inicialmente las canastillas electrosoldadas de los muros M4 y M6 presentaron 4 defectos, indicados en el acápite 3.1, que fueron corregidos por PRODAC antes de construir los muros M4 y M6. Estos defectos podrían atribuirse a que por primera vez PRODAC producía este tipo de canastillas.
- Varillas longitudinales de las canastillas electrosoldadas que tengan una elongación en la rotura mayor o igual que 6%. Este valor no está muy alejado de la elongación mínima (9%) que exige la Norma E.070 (Ref.1) para las varillas dúctiles.

1. En los muros con baja cantidad de refuerzo vertical (M1 y M2), se presentó una falla por flexión que derivó finalmente en deslizamiento con el pandeo del refuerzo vertical. Generalmente, este tipo de falla no se presenta en las edificaciones reales de albañilería confinada o sin confinar, por la presencia de carga vertical, paredes transversales, losas de techo y vigas dinteles, no existentes en los muros ensayados. Sin embargo, ante la posibilidad remota de que ocurra esta falla, el comportamiento sísmico de los muros equivalentes M1 (con canastilla dúctil) y M2 (con canastilla electrosoldada), fue similar.
2. En los muros con mayor cantidad de refuerzo vertical (M3, M4, M5 y M6), predominó la falla por corte, la cual es aceptada por la Ref.1 para el diseño de las edificaciones de albañilería confinada sujetas a sismos severos. Ante este tipo de falla, el comportamiento sísmico de los muros equivalentes con canastillas dúctiles y electrosoldadas (M3-M4 y M5-M6), fue similar, y todos tuvieron un comportamiento dúctil al alcanzar una deriva máxima 67% mayor que el valor máximo permitido por la Ref.2 (0.005) para este tipo de edificación. Este porcentaje resguarda a los resultados obtenidos de efectos no contemplados en el ensayo, como la carga de gravedad y la mayor cantidad de ciclos que imprime un sismo real, que reducen la ductilidad (Ref.3).
3. La ligera mayor resistencia (20%) que tuvo el muro M3 (con canastilla dúctil) sobre su equivalente M4 (con canastilla electrosoldada), se atribuye a la dispersión propia que tiene el material albañilería. Al respecto, debe indicarse que los ladrillos industriales utilizados en este proyecto tuvieron 28% de dispersión en su resistencia a compresión.
4. Siguiéndose la Norma E.070 (Ref.1), para el caso refuerzo dúctil, las columnas requerían el refuerzo vertical empleado en el muro M3: $4 \phi \frac{1}{2}$ " (mayor que el de M1: $4 \phi \frac{3}{8}$ ", y menor al de M5: $4 \phi \frac{5}{8}$ "). Puesto que el comportamiento sísmico de M3 fue similar al de M5 y superior al de M1, se concluye que la técnica de diseño especificada por la Ref.1 es adecuada.

En síntesis, bajo las limitaciones indicadas en este acápite, se concluye que es posible emplear canastillas electrosoldadas en la construcción de los muros de albañilería confinada en reemplazo de las canastillas de acero dúctil. Para esto, el refuerzo longitudinal total deberá proporcionar en la fluencia la misma fuerza de tracción en ambas canastillas, esto permite reducir el área de acero en un 16% en las canastillas electrosoldadas. Asimismo, en las canastillas electrosoldadas que presentan un espaciamiento fijo entre los estribos, deberá agregarse estribos suplementarios en los extremos, de acuerdo a la exigencia de la Norma E.070 (Ref.1).

11. REFERENCIAS

1. SENCICO 2006 y Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Reglamento Nacional de Edificaciones. Norma E.070 "Albañilería".
2. SENCICO 2006 y Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Reglamento Nacional de Edificaciones. Norma E.030 "Diseño Sismorresistente".
3. San Bartolomé Á. Website: <http://blog.pucp.edu.pe/albanileria>. Investigaciones en Albañilería.