

# COMPORTAMIENTO A CARGA LATERAL CÍCLICA DE LA ALBAÑILERÍA ARMADA DE JUNTA SECA CONSTRUIDA CON PLACAS P-14

Por: Ángel San Bartolomé, Miguel Ángel Moreno y Harold Bolaños  
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

## RESUMEN

Se analizó la posibilidad de emplear un nuevo bloque sílico-calcáreo, denominado “Placa P-14”, como una alternativa que imprime gran rapidez a la construcción de muros portantes de albañilería armada en edificios de hasta cinco pisos, con la peculiaridad de que los muros carecen de mortero en las juntas. Para ello se efectuaron ensayos de carga lateral cíclica en dos muros, sujetos además a carga vertical. Ambos muros presentaron iguales características, con la diferencia que el segundo llevó zunchos en los talones para confinarlos y aumentar la ductilidad del sistema P-14. Los resultados de los ensayos fueron satisfactorios.

## 1. INTRODUCCIÓN

Esta investigación tuvo como objetivo dar una respuesta sobre la posibilidad de emplear la Placa P-14, bloque sílico-calcáreo de grandes dimensiones, como una alternativa que imprime gran velocidad a la construcción de muros portantes de albañilería armada, sin columnas y con la particularidad adicional de carecer de mortero en sus juntas (“albañilería armada de junta seca”).

Conociéndose que algunas veces la albañilería armada sujeta a cargas sísmicas presenta problemas de trituración en su borde libre flexo comprimido (Refs.1 y 2), se trató de superar este problema mediante el uso de zunchos discretos colocados en el interior de las celdas de la Placa P-14, para así confinar los talones y mejorar la ductilidad de los muros.

De este modo, el sistema P-14 fue investigado sometiendo a dos muros a la acción de cargas laterales cíclicas. Ambos muros estuvieron sujetos además a carga vertical, equivalente a la existente en el primer piso de un edificio de 5 pisos, y tuvieron las mismas características, con la diferencia de que el segundo muro estuvo reforzado con zunchos en sus talones.

## 2. CARACTERÍSTICAS DE LA PLACA P-14

La Placa P-14 (Fig.1), de 14cm de espesor por 50cm de longitud y 24cm de altura, presenta 4 celdas circulares (7cm de diámetro, donde se aloja el refuerzo vertical) y un canal horizontal de 11cm de ancho por 2cm de profundidad, donde se coloca el refuerzo horizontal. Las 12 perforaciones (2.5cm de diámetro) sirven para aligerar el peso de la unidad (21.5 kg). El contenido de huecos, contabilizando las perforaciones, es el 30% del área bruta, por lo que la Placa P-14 califica como unidad sólida según la Norma E.070 (Ref.2). Cabe indicar que las perforaciones no atraviesan la base del bloque, aunque ello hubiese sido conveniente para que el grout que penetra a través de ellas se adhiera con el bloque de la hilada inmediata inferior.

Fig.1  
Placa P-14



Los ensayos realizados en 3 bloques, proporcionaron los siguientes resultados promedios:

- **Variación dimensional:** longitud 0.22%, altura 1.21%, espesor 1.36%
- **Succión:** 54 gr/(200cm<sup>2</sup>-min)
- **Absorción en 24 horas de inmersión:** 12.3 %
- **Resistencia a compresión:**  $f'b = 78 \text{ kg/cm}^2$  sobre área bruta
- **Resistencia a compresión de la Placa P-14 rellena con grout:**  $88 \text{ kg/cm}^2$

Con lo cual, de acuerdo a la Norma E.070 (Ref.2), la Placa P-14 califica como bloque clase "P", apto para ser empleado en la construcción de muros portantes de albañilería armada.

### 3. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES ADICIONALES

#### 3.1. Acero de Refuerzo

Los ensayos de tracción hechos en las varillas de acero empleadas en la construcción de los muros (Fig.4): 8mm y ½" de diámetro, proporcionaron esfuerzos de fluencia (4911 y 4484 kg/cm<sup>2</sup>, respectivamente) que superaron al valor nominal de fluencia ( $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ ), en tanto que sus resistencias máximas fueron 7110 y 7196 kg/cm<sup>2</sup>, respectivamente, y sus elongaciones en la rotura fueron 13.0% y 15.5%, respectivamente.

#### 3.2. Concreto, Mortero y Grout

Se utilizó cemento Pórtland tipo I. El concreto empleado en la viga de cimentación y la solera del muro fue de  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ . El mortero utilizado para asentar la primera hilada del muro (única con junta horizontal de mortero) tuvo una proporción volumétrica cemento-arena gruesa 1:3. El grout (concreto líquido de 11" de slump empleado para llenar las celdas del bloque) tuvo una proporción volumétrica cemento-arena 1:3, con una resistencia a compresión de  $160 \text{ kg/cm}^2$ , mayor que la resistencia mínima exigida por la Norma E.070 ( $140 \text{ kg/cm}^2$ , Ref.2); en este proyecto se utilizó grout embolsado proporcionado por la Compañía Minera Luren.

### 4. PROPIEDADES DE LA ALBAÑILERÍA SIMPLE

Para determinar la resistencia a compresión de la albañilería ( $f'm$ ) y la resistencia a compresión diagonal o a corte puro ( $v'm$ ), se realizaron ensayos en tres pilas y tres muretes. Estos prismas se construyeron apilando las placas P-14 en 4 hiladas (96cm de altura), para luego rellenarlas con grout (Fig.2). El peso volumétrico de estos especímenes en estado seco fue  $2 \text{ ton/m}^3$ .



Los ensayos de las pilas y muretes no representaron el comportamiento del sistema P-14, dando resultados bajos y poco confiables ( $f'm = 40 \text{ kg/cm}^2$ ,  $v'm = 1.74 \text{ kg/cm}^2$ ), probablemente porque las pilas tuvieron gran esbeltez (6.9, por encima del valor máximo especificado en la Norma E.070: 5), y porque los muretes carecieron de refuerzo, generándose fallas por desprendimiento de los bloques (Fig.3). De este modo, las propiedades del sistema P-14 (módulo de elasticidad, etc.) se determinaron utilizando los resultados de los ensayos de los muros a escala natural.

Fig.3  
Formas de falla de las Pilas y Muretes.



## 5. CONSTRUCCIÓN DE LOS MUROS

### 5.1. Características de los Muros

Los dos muros tuvieron las mismas características geométricas (Fig.4): 14cm de espesor, 225cm de longitud (4½ bloques por hilada) y una altura de 240cm (10 hiladas). El refuerzo vertical estuvo compuesto por 3 varillas de ½” en cada extremo y 5 varillas de 8mm en la zona central, mientras que el refuerzo horizontal fue de 1 varilla de 8mm en cada hilada. El muro M-1 no tuvo confinamiento en sus talones, en tanto que los talones de M-2 fueron confinados con zunchos de ¼” y pasos de 5cm. Cabe destacar que cada bloque fue atravesado por 2 varillas verticales.

En la cimentación de ambos muros anclan espigas que sirvieron para traslapar al refuerzo vertical de los muros. Siguiéndose las indicaciones del fabricante, los traslapes del refuerzo vertical se hicieron en la misma sección transversal y tuvieron la misma longitud (115cm).

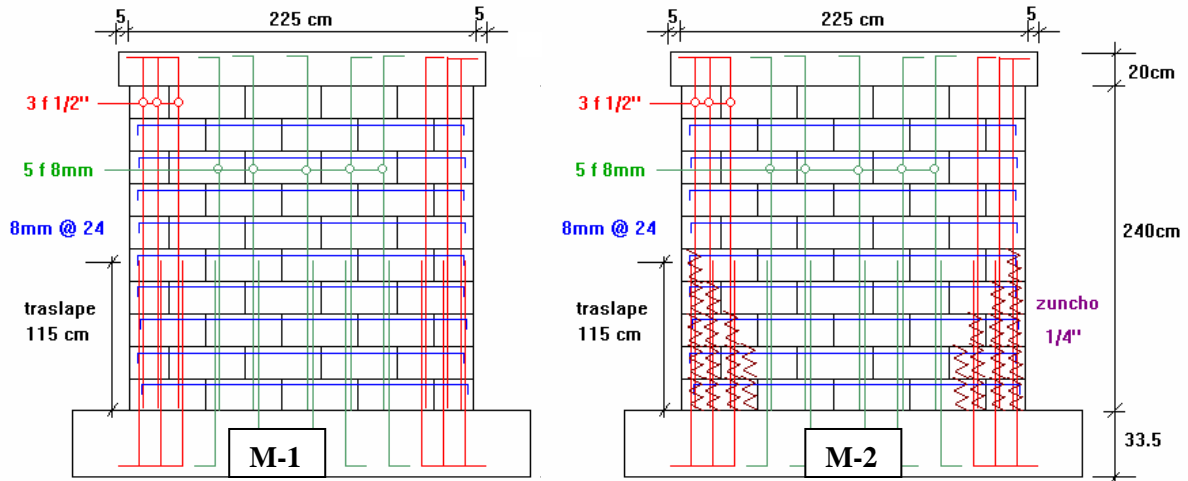


Fig.4. Características de los muros.

### 5.2. Construcción de los Muros

La construcción de los dos muros se hizo en simultáneo por un maestro de obra calificado para este tipo de estructuras. Antes de la construcción se colocó sobre la cimentación una capa de mortero 1:3, de 1.5cm de espesor, para asentar las unidades guías de la primera hilada (Fig.5). Debe destacarse que al no requerirse mortero en las juntas de las hiladas superiores (albañilería de junta seca), no existen desperdicios de mortero que se introduzcan por las celdas, por lo que los bloques de la primera hilada no necesitan ventanas de limpieza, a diferencia de la albañilería armada convencional, lo cual es una ventaja constructiva del sistema P-14.

Posteriormente se procedió con el apilado los bloques de la siguiente hilada, encajándolos de manera que exista un traslape de medio bloque con los bloques de la hilada inmediata inferior (Fig.5). Al terminar el apilamiento de una hilada, se le aplomó con las hiladas inferiores por medio de una regla y un martillo de goma.

Fig.5  
Asentado de la primera hilada y apilamiento en las hiladas superiores.



El proceso indicado se repitió hasta alcanzar la altura del muro, cuidando de colocar el refuerzo horizontal (Fig.6) y los zunchos para el caso del muro M-2. Luego se insertó el refuerzo vertical traslapándolo con las espigas, sin amarrar estas varillas.

Fig.6  
Refuerzo horizontal y zunchos en M-2



Previo al vaciado, se taparon las rendijas por donde pudiera salirse el grout (Fig.7). Luego se vació el grout de manera continua, empezando desde la celda extrema hasta que se llene completamente toda su altura, para después proseguir con la celda adyacente hasta llegar al otro extremo del muro; este procedimiento se realiza para evitar cangrejeras. El grout, por ser líquido, rellena también los canales horizontales y las perforaciones de la Placa P-14. Debe destacarse que inmediatamente después de terminar el apilamiento, y luego de que la primera capa de mortero haya fraguado, es posible vaciar el grout, a diferencia de la albañilería armada convencional, donde se debe esperar que seque el mortero utilizado en todas las juntas.

Finalmente, con el objeto de observar si los sismos moderados podrían dañar los acabados, se aplicó masilla en las juntas de una de las caras del muro (Fig.7) para luego lijarla y pintarla.



Fig.7. Taponado de rendijas, vaciado del grout y masillado de las juntas.

## 6. ENSAYO DE LOS MUROS

Transcurridos 28 días de fragua en ambos muros, se prepararon los dispositivos necesarios para el ensayo. En la Fig.8 aparecen la instrumentación empleada y los dispositivos utilizados.

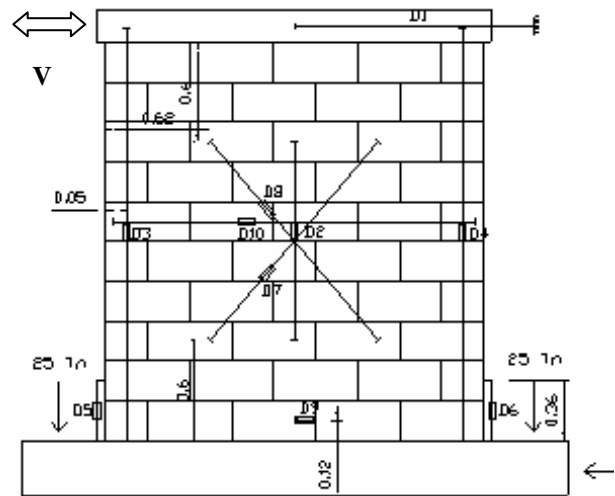


Fig.8. Vista global de los dispositivos e instrumentación utilizada.

Las funciones de los 10 LVDT (Fig.8) empleados fueron:

- **D1:** Controlar los desplazamientos laterales.
- **D2 D3 y D4:** Medir las deformaciones axiales.
- **D5 y D6:** Medir las deformaciones verticales en los talones del muro.
- **D7 y D8:** Medir las deformaciones diagonales.
- **D9:** Registrar el posible deslizamiento entre el muro y la cimentación.
- **D10:** Medir el grosor de las grietas acumuladas en la zona central del muro.

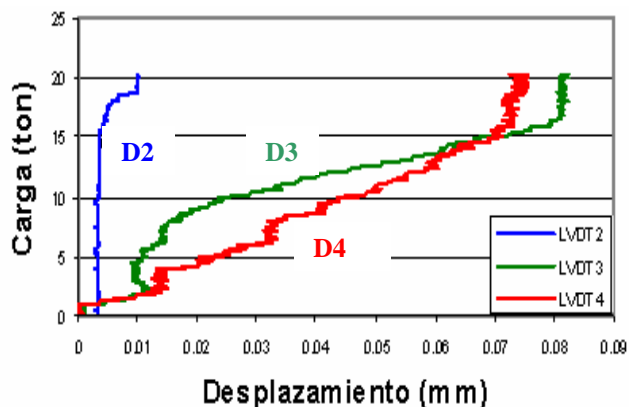
El ensayo se dividió en dos etapas, primero la aplicación de la carga vertical y luego la aplicación de la carga lateral cíclica.

### 6.1. Aplicación de la Carga Vertical (P)

La carga vertical se aplicó a una velocidad de 3 ton/min hasta llegar a 20 ton. En esta etapa se pretendió evaluar el módulo de elasticidad (E), sin embargo, el pequeño esfuerzo axial aplicado ( $6.35 \text{ kg/cm}^2$ ), generó desplazamientos verticales (D2, D3 y D4) fuera del rango de precisión de los LVDT (menores de 0.1 mm, Fig.9), por lo que no pudo determinarse "E".

Fig.9

Muro M-2. Gráfica carga axial P vs desplazamientos D2, D3 y D4.



## 6.2. Ensayo de Carga Lateral Cíclica (V)

En este ensayo se mantuvo constante la carga vertical (20 ton) y se variaron los desplazamientos laterales (D1) en 10 fases, aplicándose un número variable de ciclos en cada fase (Tabla 1), a una velocidad de 1 ciclo por minuto, hasta que el lazo histerético V-D1 se estabilice.

Tabla 1. Fases del Ensayo de Carga Lateral Cíclica.										
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	2	3	3	3	3	(*)

(\*) En el muro M-1 se aplicaron 3 ciclos y en M-2 se aplicaron 4 ciclos

## 6.3. Descripción del Comportamiento de los Muros

En la Tabla 2 se presenta un resumen de las principales fisuras que tuvieron los muros durante el ensayo de carga lateral cíclica, mientras que en las figuras 10 y 11 se muestra su estado final.

Tabla 2. Comportamiento de los Muros.		
Muro	M-1 (sin zunchos)	M-2 (con zunchos)
Fase 1 (0.5mm)	No se presentaron fisuras, el comportamiento de ambos muros fue elástico.	
Fase 2 (1.5mm)	Se presentaron fisura por flexión en la base.	Fisuras por flexión en la base y en las juntas de los bloques de las 2 hiladas inferiores.
Fase 3 (2.5mm)	Aparecieron fisuras horizontales en las juntas correspondientes a la mitad inferior del muro.	Fisuras escalonadas en las juntas, horizontales y verticales, en la mitad inferior del muro.
Fase 4 (5.0mm)	En ambos muros se presentaron las primeras fisuras diagonales que abarcaron toda la pared, algunas fueron escalonadas a través de las juntas y otras atravesaron los bloques.	
Fase 5 (7.5mm)	Se generaron nuevas fisuras diagonales y verticales localizadas en la zona central de ambos muros. Estas fisuras atravesaron los bloques.	
Fase 6 (10.0mm)	Empezó a triturarse el talón derecho, desprendiéndose la cuarta parte del bloque.	Aparecieron nuevas fisuras diagonales. Los talones no presentaron fisuras.
Fase 7 (12.5mm)	Se prolongaron y ensacharon las fisuras existentes. A partir de la fase 8 el muro M-1 empezó a perder resistencia.	Se prolongaron y ensacharon las fisuras existentes. A partir de la fase 7 empezaron a fisurarse los bloques de ambos talones, pero no hubo pérdida de resistencia.
Fase 8 (15.0mm)		
Fase 9 (17.5mm)	Se desprendió el grout del talón derecho triturado, dejando al descubierto al refuerzo vertical.	Se despostillaron los bordes inferiores de un bloque localizado en la cuarta hilada.
Fase 10 (20.0mm)	El talón izquierdo se agrietó en las 3 primeras hiladas, dejando al descubierto al refuerzo vertical. El refuerzo vertical del talón derecho terminó pandeado.	El bloque del talón derecho se trituró desprendiéndose del grout que quedó confinado por los zunchos. En el cuarto ciclo de esta fase hubo una degradación importante de resistencia.



Fig.10. Muro M-1 al término del ensayo.



Fig.11. Muro M-2 (con zunchos) al término del ensayo.

#### 6.4. Comportamiento Histerético

En las figuras 12 y 13 se presentan los lazos histeréticos V-D1 correspondientes a los muros M-1 y M-2, respectivamente. Estos lazos son muy parecidos a los obtenidos en otros sistemas de albañilería armada y confinada (Ref.1). Son delgados y tratan de pasar por el origen del sistema de referencia, lo cual es propio de sistemas que disipan poca energía y degradan rigidez. También se aprecia que a medida que avanza el ensayo, el desplazamiento remanente para carga lateral nula se incrementa debido al constante deterioro del muro. En la Fig.12 se aprecia que el muro M-1 empezó a perder resistencia a partir de la fase 8, mientras que ello recién ocurrió para la fase 10 en el muro M-2, debido a que los zunchos retardaron la trituration del talón.

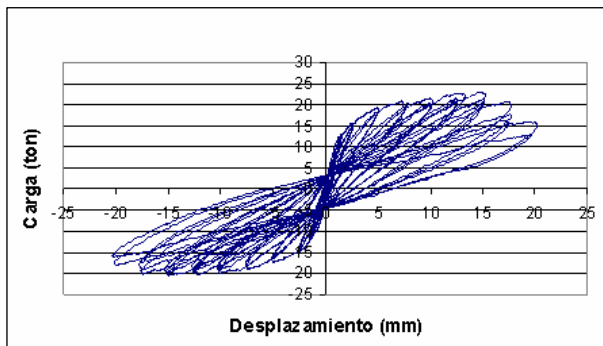


Fig.12. Muro M-1, gráfica V-D1

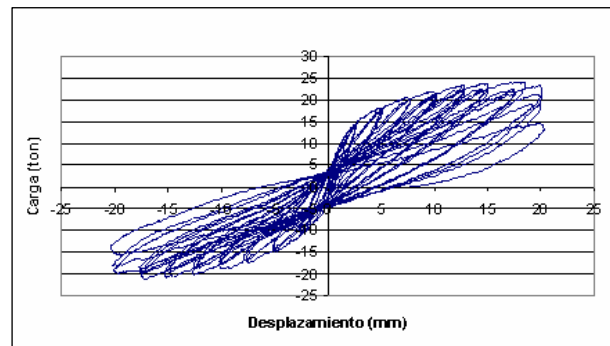


Fig.13. Muro M-2, gráfica V-D1

#### 6.5. Rigidez Lateral Elástica (K)

Para el cálculo de la rigidez lateral se utilizó la grafica V-D1 en su primera fase, donde el comportamiento fue elástico. Los resultados fueron:  $K_{M-1} = 12600$  ton/m y  $K_{M-2} = 8740$  ton/m, con un promedio de rigideces  $K = 10670$  ton/m. La mayor rigidez que tuvo M-1, se explica por el hecho de que los zunchos empleados en M-2 restaron el área ocupada por el grout en la celda.

#### 6.6. Módulo de Corte (G)

El módulo de corte G se determinó como la pendiente de la gráfica esfuerzo cortante ( $\tau = V/A$ ) versus distorsión angular ( $\gamma = |\epsilon_1| + |\epsilon_2|$ ) correspondiente a la fase 1 del ensayo, donde el comportamiento de los muros fue elástico. Las deformaciones unitarias “ $\epsilon$ ” fueron calculadas

dividiendo los desplazamientos diagonales D7 y D8 entre la distancia existente entre las bases de los LVDT. El resultado para el muro M-1 fue:  $G_{M-1} = 27800 \text{ kg/cm}^2$ , mientras que para M-2 no se pudo obtener un resultado confiable ya que su gráfica  $\tau-\gamma$  no fue óptima.

### 6.7. Determinación del Módulo de Elasticidad (E)

La evaluación del módulo de elasticidad se hizo en forma indirecta, utilizando los valores experimentales de la rigidez lateral ( $K = 10670 \text{ ton/m}$ , hallada en el acápite 6.5) y del módulo de corte ( $G = 27800 \text{ kg/cm}^2$ , determinado en el acápite 6.6).

Para un muro en voladizo la rigidez lateral responde a la expresión (Ref.1): 
$$K = \frac{E}{\frac{h^3}{3I} + \frac{f h E}{A G}}$$

Donde:

$h = 2.5 \text{ m}$  = altura del muro, medida desde su base hasta el eje del actuador dinámico.

$I = t L^3/12 = 0.14 \times 2.25^3/12 = 0.133 \text{ m}^4$  = momento de inercia de la sección transversal.

$f = 1.2$  = factor de forma de la sección rectangular.

$A = t L = 0.14 \times 2.25 = 0.315 \text{ m}^2$  = área de la sección transversal.

Con estos datos se obtuvo:  $E = 65,900 \text{ kg/cm}^2$ , con una relación  $E/G = 2.37$ , que difiere en 5% respecto a la relación  $E/G = 2.5$  especificada en la norma de Albañilería E.070 (Ref.2).

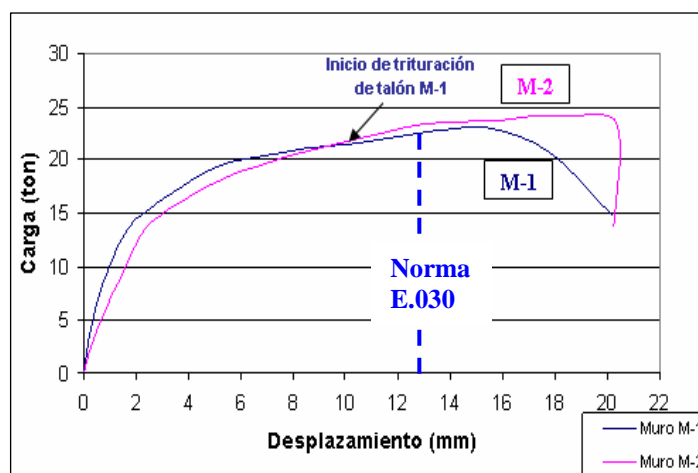
Por tanto, se sugiere emplear para el sistema P-14:  $E = 65,000 \text{ kg/cm}^2$  y  $E/G = 2.5$

### 6.8. Distorsión Máxima y Envolvente V-D1

En la Norma Sísmica E.030 (Ref.3) se especifica que la distorsión angular máxima para la albañilería reforzada es 0.005. Para los muros analizados, esta distorsión corresponde a un desplazamiento lateral de:  $0.005h = 0.005 \times 2500 = 12.5 \text{ mm}$ , asociado a la fase 7 del ensayo.

Este requerimiento de desplazamiento lateral para sismos severos, fue cumplido por el muro M-2 (con zunchos), donde la degradación de resistencia se presentó en la fase 10 (D1 = 20mm, Fig.14) al triturarse sus talones. En cambio, en M-1 (sin zunchos) la trituración del talón se inició en la fase 6 (D1 = 10mm) y pese a que no degradó resistencia hasta la fase 8 (D1 = 15mm), porque la trituración del talón en la fase 6 abarcó  $\frac{1}{4}$  de bloque comprometiendo sólo a la varilla vertical extrema, conservadoramente se considera que el comportamiento de M-1 no fue aceptable, en vista que un sismo real podría provocar un mayor deterioro al imprimirle al muro, con gran rapidez, un mayor número de ciclos que los generados hasta la fase 6 del ensayo.

Fig.14  
Envolvente V-D1  
para los muros M-1  
y M-2 (zunchado).





## 7. REVISIÓN DE ALGUNAS ESPECIFICACIONES DE LA NORMA E.070 (Ref.2)

### 7.1. Revisión de la Necesidad de Confinar los Talones

En la Norma de Albañilería E.070 se especifica que los talones libres de los muros armados deben confinarse cuando el esfuerzo de flexo compresión ( $\sigma$ ) supera a  $0.3 f'm$ . Revisando esta situación en el muro M-1, para el instante en que se inició la trituración del talón (fase 6 del ensayo:  $V = 21.57$  ton,  $P = 20$  ton), se obtuvo mediante la ecuación 1:  $\sigma = 52$  kg/cm<sup>2</sup>.

$$\text{Ecuación 1: } \sigma = \frac{P}{A} + \frac{M y}{I} = \frac{P}{A} + \frac{V h L/2}{I}$$

Para dejar de confinar el talón, se hubiese requerido que las pilas tengan:  $f'm > \sigma / 0.3 = 52/0.3 = 173$  kg/cm<sup>2</sup>. Para el caso del sistema P-14 se piensa que alcanzar  $f'm = 173$  kg/cm<sup>2</sup> es imposible, ya que la resistencia a compresión de un bloque relleno con grout fue  $88$  kg/cm<sup>2</sup> (acápite 2), por lo que el talón de M-1 requería confinarse, tal como se hizo con el muro M-2.

### 7.2. Resistencia al Agrietamiento Diagonal ( $V_m$ )

La resistencia característica a corte puro ( $v'm$ ) de los muretes resultó sumamente baja y dispersa ( $1.74$  kg/cm<sup>2</sup>, con 26% de dispersión, ver el acápite 4) y con una forma de falla (desprendimiento de bloques) que no se presentó en los muros (fisuras diagonales que atravesaron los bloques).

De este modo, no es posible aplicar la ecuación 2 especificada en la Norma E.070 para calcular " $V_m$ "; sin embargo, empleando dicha fórmula, se tratará de evaluar indirectamente " $v'm$ ", considerando que el agrietamiento diagonal de los muros M-1 y M-2, sujetos a una carga axial  $P = 20$  ton, se presentó en la fase 4 del ensayo para una carga lateral promedio  $V_m = 18.7$  ton.

**Ecuación 2** (para unidades sílico-calcáreas):  $V_m = 0.35 v'm \alpha L t + 0.23 P$ , donde:

$$0.33 \leq \alpha = \frac{V L}{M} = \frac{V L}{V h} = \frac{2.25}{2.5} = 0.9 \leq 1.0$$

Utilizando la ecuación 2, con  $V_m = 18.7$  ton, se obtuvo:  $v'm = 14.2$  kg/cm<sup>2</sup>. Este resultado supera al que se obtiene en muretes hechos con bloques "Estándar" sílico-calcáreos para albañilería armada ( $9.2$  kg/cm<sup>2</sup>, Ref.2). De este modo, es necesario continuar la investigación ensayando muretes a compresión diagonal hechos con la placa P-14, pero, esta vez reforzándolos interiormente para evitar que los bloques se desprendan durante el ensayo. Por el momento, se sugiere emplear  $5$  kg/cm<sup>2</sup> en reemplazo del término  $0.35 v'm$  de la ecuación 2.

### 7.3. Control de Fisuración ante Sismos Moderados

En la Norma E.070 se especifica que los sismos moderados deben generar fuerzas cortantes en los muros menores que  $0.55 V_m$  para evitar su agrietamiento. En este proyecto se obtuvo  $V_m = 18.7$  ton (acápite 7.2), mientras que la fisuración de M-1 y M-2 se inició durante la fase 2 del ensayo ( $D1 = 1.5$ mm), con una carga lateral promedio  $V = 12$  ton.

Puesto que la carga asociada a la primera fisura visible,  $V = 12$  ton, es mayor que  $0.55 V_m = 0.55 \times 18.7 = 10.3$  ton, se concluye que la especificación de control de fisuración de la Norma E.070 fue cumplida por los muros de este proyecto, ya que los acabados no se fisuraron para cargas menores que  $0.55 V_m$ .

#### 7.4. Resistencias Nominales a Corte ( $V_{uf}$ ) y a Flexión ( $V_n$ ). Predicción del Tipo de Falla.

Las resistencias nominales fueron calculadas empleando las ecuaciones de la Norma E.070 y un esfuerzo de fluencia del acero  $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ , con lo cual, de ingresar el refuerzo a la zona de endurecimiento, estas resistencias podrían incrementarse hasta un máximo de 70% (acápite 3.1).

La resistencia a fuerza cortante proporcionada por el refuerzo horizontal ( $1 \phi 8\text{mm} @ s = 24\text{cm}$ ), se calculó con la ecuación 3, obteniéndose  $V_{uf} = 19.7 \text{ ton}$ , mayor que  $V_m = 18.7 \text{ ton}$ . Con lo cual, se cumplió el requisito de la Norma E.070, de que  $V_{uf} \geq V_m$ .

$$\text{Ecuación 3: } V_{uf} = \frac{A_s f_y L}{s}$$

La resistencia asociada al mecanismo de falla por flexión ( $V_n$ ) fue calculada dividiendo al momento flector nominal ( $M_n$ ) entre la altura  $h = 2.5\text{m}$ . El momento  $M_n$  fue calculado mediante la ecuación 4, donde:  $A_s = 3.87 \text{ cm}^2$  (3 varillas de  $\frac{1}{2}$ "", reservándose las varillas centrales de 8mm para evitar la falla por deslizamiento, según se indica en la Norma E.070),  $D = 0.8 L = 1.8\text{m} =$  peralte efectivo, y,  $P = 20 \text{ ton}$ . Los resultados fueron:  $M_n = 51.8 \text{ ton-m}$  y  $V_n = 20.7 \text{ ton}$ .

$$\text{Ecuación 4: } M_n = A_s f_y D + 0.5 P L$$

Puesto que  $V_{uf} = 19.7 \text{ ton}$  es menor que  $V_n = 20.7 \text{ ton}$  (si se contabilizaran las varillas verticales centrales en el cálculo de "Mn" se hubiese incrementado aún más "Vn"), teóricamente se espera que los muros fallen por corte, lo cual ocurrió en los experimentos. Sin embargo, en la Norma E.070 se especifica que la albañilería armada debe fallar por flexión, situación que podría lograrse incrementando el diámetro del refuerzo horizontal en futuras investigaciones.

Cabe destacar que los muros ensayados no presentaron fallas por deslizamiento, por lo que se piensa que la especificación de la Norma E.070, acerca de colocar refuerzo vertical mínimo (cuantía: 0.001) en la parte central de los muros para evitar la falla por deslizamiento, resultó válida para el sistema P-14.

#### 7.5. Resistencia Máxima

La resistencia máxima del muro M-2 (24.2 ton) fue ligeramente mayor (5%) que la de M-1 (23 ton); es decir, los zunchos de confinamiento empleados en M-2 no elevaron su capacidad resistente y solo sirvieron para proporcionarle mayor ductilidad. Cabe destacar que éste es el propósito de la Norma E.070 cuando se requiere colocar elementos de confinamiento.

La resistencia máxima (23.6 ton en promedio), fue 20% mayor que la resistencia nominal a corte aportada por el refuerzo horizontal ( $V_{uf} = 19.7 \text{ ton}$ , para  $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ ), esto se explica porque el refuerzo horizontal llegó a incursionar en su zona de endurecimiento. A continuación, para la fase 8 del ensayo, donde  $V = 23 \text{ ton}$ , se demuestra que el refuerzo vertical también ingresó a la zona de endurecimiento, para ello se utilizaron los datos captados por los LVDT 5 y 6 (Fig.8) cuando trabajan a tracción, para hallar la deformación unitaria respectiva.

$D = 6.5 \text{ mm} =$  desplazamiento vertical promedio en la base de los muros.

$d = 360 \text{ mm} =$  distancia entre las bases de los LVDT 5 y 6.

$\varepsilon = D/d = 6.5/360 = 0.018 =$  deformación unitaria de tracción en la base de los muros.

Esta deformación unitaria (0.018) excede en 9 veces a la deformación unitaria de fluencia correspondiente al refuerzo ( $f_y / E_s = 4200/2100000 = 0.002$ ), con lo cual, el refuerzo vertical incursionó en la zona de endurecimiento.

## 8. CONCLUSIONES

Las conclusiones vertidas en este artículo se encuentran limitadas por la poca cantidad de muros ensayados, sin embargo, constituyen un indicio del buen comportamiento sísmico que tuvo el sistema P-14, cumpliendo además con varios requisitos estipulados por la Norma E.070 (Ref.2) en lo relacionado a la albañilería armada convencional.

### 8.1. Placa P-14

- La placa P-14 clasificó de acuerdo a la Norma E.070 (Ref.2) como un bloque clase “P”, apto para ser empleado en la construcción de muros portantes de albañilería armada.
- La alta succión que presentó el bloque ( $54 \text{ gr}/200\text{cm}^2\text{-min}$ ) es adecuada, puesto que el grout necesita perder inicialmente agua para lograr una resistencia satisfactoria y transmitir su material cementante hacia los bloques, de tal modo que estos materiales logren integrarse.
- El grout penetró en el interior de las 12 perforaciones del bloque, por lo que sería conveniente que estas perforaciones traspasen la base de la Placa P-14 para lograr una mayor adherencia con los bloques de la hilada inmediata inferior.

### 8.2. Proceso Constructivo

- Al no emplearse mortero en las juntas ni ventanas de limpieza, requeridos en la albañilería armada convencional, la mano de obra se reduce considerablemente. Además, al emplearse un proceso de apilamiento de bloques, no se requiere capacitar mayormente a los obreros.
- Debido a que el muro no requiere de tarrajeos sino tan solo de un empaste, los costos deben disminuir significativamente.
- La velocidad de construcción es mayor que la correspondiente a los muros de concreto armado, ya que no existen partidas de encofrado, desencofrado y curado de muros.
- No se detectaron problemas de cangrejeras, segregación, ni de traslape del refuerzo vertical, pese a que el 100% del traslape se hizo en la misma sección transversal. Posiblemente lo último se deba a que la falla en los muros fue principalmente por fuerza cortante.
- En un edificio limeño de 5 pisos hecho con la Placa P-10 (similar a la P-14, pero de 10cm de espesor), no se presentaron las fisuras por contracción de secado del concreto que suelen generarse en los edificios hechos con muros de concreto armado de ductilidad limitada.



### 8.3. Comportamiento de la Albañilería Simple

- Las pilas ensayadas a compresión presentaron resistencias muy bajas ( $f'm = 40 \text{ kg}/\text{cm}^2$ ), posiblemente esto se deba a la gran esbeltez que tuvieron.
- Los muretes ensayados a compresión diagonal presentaron resistencias a corte puro muy bajas ( $v'm = 1.74 \text{ kg}/\text{cm}^2$ ), desprendiéndose los bloques; esta forma de falla no se dio en los muros debido a que los bloques estuvieron conectados por el refuerzo (2 varillas por bloque).
- Por lo indicado, se requiere realizar más ensayos de estos prismas, pero reforzándolos.

### 8.4. Módulo de Elasticidad (E) y Módulo de Corte (G)

- En base a conocer experimentalmente la rigidez lateral de los muros, pudo obtenerse indirectamente el módulo de elasticidad de la albañilería P-14, proponiéndose adoptar con fines de análisis estructural:  $E = 65,000 \text{ kg}/\text{cm}^2$ , con  $E/G = 2.5$ .

## 8.5. Comportamiento a Carga Lateral Cíclica

- El comportamiento a carga lateral cíclica para una falla por corte fue bastante similar a los sistemas convencionales de albañilería armada, confinada y muros de concreto armado; es decir, los lazos histeréticos V–D fueron finos y degradantes en rigidez lateral, produciéndose la degradación de resistencia solo cuando los talones fallaron por compresión.
- La trituración de los talones para el muro M-1 (sin zunchos) se inició para una distorsión angular de 0.004, menor que la especificada como límite máximo por la Norma Sísmica E.030 (0.005, Ref.3), por tanto, era necesario confinar al talón.
- Cuando se confinó al talón con zunchos discretos (muro M-2), el comportamiento inelástico mejoró notoriamente llegándose a alcanzar una distorsión de 0.008, 60% mayor que el límite máximo de la Norma Sísmica E.030 (0.005, Ref.3), luego se produjo una fuerte degradación de resistencia al triturarse el talón. Debe indicarse que estos zunchos son más económicos que el uso de planchas metálicas perforadas pegadas con epóxico a la base del bloque.
- El empleo de zunchos en M-2 no mejoró su resistencia a corte, pero elevó su ductilidad. Este es el propósito de los elementos de confinamiento de acuerdo a la Norma E.070 (Ref.2).
- El tipo de falla obtenido en los muros ensayados fue principalmente por fuerza cortante, por tanto, es necesario analizar el comportamiento del sistema P-14 ante una falla por flexión, que es la adoptada en la Norma E.070 (Ref.2) para los sistemas de albañilería armada.
- Al obtenerse en los muretes una resistencia al corte puro ( $v'm$ ) muy baja, no pudo predecirse la carga de agrietamiento diagonal de los muros con la fórmula  $V_m = 0.35 v'm \alpha t L + 0.23P$ , especificada en la Norma E.070 (Ref.2) para unidades sílico-calcáreas; sin embargo, con fines de diseño estructural, puede emplearse  $5 \text{ kg/cm}^2$  en reemplazo del término  $0.35v'm$ .

## 9. RECOMENDACIONES

- Se debe tener mucho cuidado con el vaciado del grout. Este proceso debe hacerse de forma continua, sin generar impactos transversales contra el muro de bloques apilados.
- Luego de ensayarse el muro se detectó que una varilla vertical no estaba adecuadamente recubierta por el grout, encontrándose en proceso de oxidación, por lo que se recomienda colocarlas con precisión en la parte central de las celdas del bloque.
- Los zunchos, en contacto con las caras internas de las celdas del bloque, no están totalmente recubiertos por el grout, quedando expuestos a los efectos del ambiente. Se recomienda dar un tratamiento anticorrosivo a los zunchos antes de insertarlos en los bloques.

## 10. REFERENCIAS

1. Construcciones de Albañilería, Comportamiento Sísmico y Diseño Estructural. Por: Ángel San Bartolomé. Pontificia Universidad Católica del Perú. Fondo Editorial, 1994.
2. Reglamento Nacional de Edificaciones. Norma E.070, “Albañilería”. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. SENCICO, primera edición, 2006.
3. Reglamento Nacional de Edificaciones. Norma E.030, “Diseño Sismorresistente”. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. SENCICO, primera edición, 2006.

## AGRADECIMIENTO

Los autores desean expresar su profundo agradecimiento a la Compañía Minera Luren LACASA, en especial al Ing. Alejandro Garland Stronsdorfer, por haber financiado las partidas de materiales y construcción de este proyecto, ejecutado en el Laboratorio de Estructuras de la Pontificia Universidad Católica del Perú.