

# EFFECTOS DE LA CARGA VERTICAL EN MUROS DE ALBAÑILERÍA ARMADA CONSTRUIDOS CON UNIDADES SILICO-CALCÁREAS

Por: **Jaime Tumialán, Gaby Quesada y Angel San Bartolomé**  
**Pontificia Universidad Católica del Perú**

## RESUMEN

Se presenta los resultados de cuatro muros de albañilería armada internamente, contruidos con unidades sílico-calcáreas, ensayados a carga lateral cíclica manteniendo constante la magnitud de la carga vertical. En uno de los muros se utilizó planchas de acero para confinar sus talones y se evitó los traslapes del refuerzo vertical. El resto de muros fue reforzado convencionalmente, empleando el refuerzo especificado en los planos estructurales correspondiente a un muro perimétrico real de un edificio de cinco pisos.

## 1. GENERALIDADES

Las dimensiones, el refuerzo, los materiales y el proceso constructivo de los muros ensayados en este proyecto correspondieron a un muro perimétrico (2.7 x 2.6 m, Fig.1) de un edificio real de 5 pisos, con la excepción de uno de ellos, donde se utilizó planchas perforadas de acero estructural A-36 en sus talones con el objeto de evitar la trituración de las unidades por flexocompresión; asimismo, en este muro se evitó el traslape del refuerzo vertical. Estos muros tuvieron cargas axiales representativas de muros perimetrales, donde el esfuerzo de compresión actuante máximo fue 0.04 f'm.

Cabe indicar que, durante los ensayos, el dispositivo generador de carga vertical (Fig.2) produjo fuerzas de fricción en el extremo superior del muro y un pequeño momento flector que contrarrestaban los efectos de la carga lateral, esto fue contemplado en el procesamiento de resultados.

## 2. MATERIALES

Se efectuaron una serie de ensayos sobre los materiales, obteniéndose los siguientes resultados:

**2.1 Unidad de Albañilería.** Se emplearon ladrillos estándar sílico-calcáreos con dimensiones 29 x 12 x 14 cm, con dos alvéolos de 5 x 9 cm, fabricados por C.M.L LACASA. Estas unidades tuvieron una relación área neta - área bruta igual a 74% (hueca según la Norma E-070) y su resistencia a compresión fue  $f'b = 190 \text{ kg/cm}^2$ , clasificando como Tipo V.

**2.2 Mortero.** Se empleó mortero en proporción volumétrica 1:1:4 (Cemento Portland Tipo I: Cal Hidratada Normalizada : Arena Gruesa). Se ensayaron probetas de 5 x 5 x 5 cm, que arrojaron una resistencia a compresión igual a  $130 \text{ kg/cm}^2$ .

**2.3 Mortero Líquido.** La proporción volumétrica fue 1 :  $\frac{1}{10}$  : 3 (cemento-cal-arena) con un slump de 11", necesario para que el mortero líquido llene todos los espacios en los alvéolos. Se ensayaron probetas de 5 x 9 x 10 cm, empleando las unidades de albañilería como molde. Las probetas se mantuvieron en los moldes hasta el día del ensayo (28 días) y arrojaron una resistencia promedio de  $210 \text{ kg/cm}^2$ .

### 3. PRISMAS DE ALBAÑILERIA

**3.1 Ensayo de Compresión Axial en Pilas.** Las pilas tuvieron las siguientes características: espesor de la junta horizontal: 1 cm; número de hiladas: 4; altura: 59 cm; espesor: 12 cm; esbeltez: 5. El número de pilas ensayadas fue: 3 sin mortero líquido; 5 rellenas con mortero líquido; y, 2 rellenas con mortero líquido adicionando planchas en todas las juntas. Los resultados promedios (sobre área bruta) fueron:

ESPECIMEN	$f'm$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$E_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )
Sin Mortero Líquido	127	79393
Con Mortero Líquido	110	58210
Con Mortero Líquido y Planchas	154	80410

En las pilas sin planchas se observó una falla por agrietamiento vertical, disminuyendo la resistencia a compresión ( $f'm$ ) en las pilas que estaban rellenas de mortero líquido; esto se debió a la expansión del mortero líquido que produjo el destape de las caras laterales de las unidades (Fig.3). En el caso de las pilas con planchas, la falla fue por aplastamiento de la unidad (Fig.4), lo que produjo un aumento de la resistencia; en este caso, las planchas controlaron la expansión del mortero líquido confinándolo. También se apreció que el mortero líquido tuvo poca adhesión con la unidad, lo que puede deberse a su alta contracción de secado, a la baja succión de la unidad (15 gr/200 cm<sup>2</sup>-min) y a que las superficies de la unidad eran muy lisas, prácticamente vitrificadas. Finalmente, se observó que la relación  $E = 500 f'm$ , indicada en nuestro Reglamento, se cumple.

**3.2 Ensayo de Muretes.** Los muretes de 74 x 74 x 12 cm, en aparejo de soga, tuvieron un espesor de las juntas (horizontal y vertical) igual a 1 cm. El número de especímenes fue: 3 sin mortero líquido; y, 3 rellenos con mortero líquido. Los resultados promedios fueron:

ESPECIMEN	$v'm$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$G_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )
Sin Mortero Líquido	5.4	16626
Con Mortero Líquido	9.2	24815

Todos los muretes fallaron en forma escalonada a través de las juntas horizontales y verticales (Fig.5). En el caso de los muretes rellenos con mortero líquido se notó un incremento de la resistencia al corte, debido a que el relleno genera una especie de engrape mecánico entre las hiladas; en estos muretes se verificó la relación  $G_m = 0.4 E_m$ , dada por nuestro Reglamento.

### 4. MUROS DE ALBAÑILERIA ARMADA A ESCALA NATURAL

**4.1 Descripción de los Especímenes.** Los cuatro muros ensayados (MG1 a MG4) tuvieron el mismo refuerzo (Fig.1) consistente en: Refuerzo Vertical: 10  $\phi$  3/8" y Refuerzo Horizontal: 2  $\phi$  6 mm cada 3 hiladas. Este refuerzo fue utilizado en un muro perimétrico correspondiente a un edificio real de 5 pisos. Por otro lado, el muro MG4 presentó mejoras importantes con relación a los muros tradicionales (MG1 a MG3), éstas fueron:

1. En los talones se colocaron planchas de acero estructural A-36 de 3 mm de espesor con perforaciones de 1/2 pulgada de diámetro. La finalidad fue confinar al mortero líquido y de esta manera tratar de evitar el pandeo del refuerzo vertical. Ver Fig.6.
2. Debido a que en un edificio real el primer piso es el más solicitado por fuerza cortante, momento flector y fuerza axial, el refuerzo vertical fue continuo, evitando los traslapes (70 cm) con el dowell que nacía de la cimentación empleado en los muros MG1 a MG3. Sin embargo, esto dió como resultado un retardo en la construcción, debido a que las unidades tenía que insertarse desde la parte superior del refuerzo vertical.

- En las unidades correspondientes a cada cuatro hiladas, antes de asentarlas, se efectuaron pequeñas perforaciones de 8 mm de diámetro con el objeto de permitir el desfogue de las burbujas de aire que se presentan al vaciar el mortero líquido.

**4.2 Cálculo de las Planchas en los Talones.** Utilizando el Diagrama de Interacción correspondiente al muro MG4, con una carga axial de 16 ton, se determinó la Fuerza Cortante Máxima Teórica asociada a una falla por Flexión. Luego, se calculó mediante la fórmula de flexión compuesta de resistencia de materiales, los esfuerzos normales producidos por la flexocompresión y en aquellas zonas del muro en donde los esfuerzos excedían al 20% de  $f'm$ , se colocaron planchas de confinamiento. Según los resultados encontrados, la longitud de confinamiento fue de dos unidades en ambos extremos y la altura fue de 4 hiladas, por lo que se utilizaron 8 planchas en cada talón.

## 5. ENSAYO DE LOS MUROS

Los muros estuvieron sujetos a las siguientes cargas axiales: MG1: 0, MG2: 10 ton ( $\sigma = 0.03 f'm$ ), MG3 y MG4: 16 ton ( $\sigma = 0.045 f'm$ ). Una vez aplicadas estas cargas, los muros se ensayaron a carga lateral cíclica con desplazamiento horizontal controlado, efectuándose 3 ciclos en cada fase hasta estabilizar el lazo histerético. Las fases fueron:

F A S E	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MG1 $\delta$ (mm)	0.15	0.50	1.50	3.00	5.50	8.00	10.50	13.00	15.50	—
MG2 $\delta$ (mm)	0.90	1.50	3.00	5.50	8.00	10.50	13.00	—	—	—
MG3 $\delta$ (mm)	0.25	0.50	1.50	3.00	5.50	8.00	10.50	13.00	—	—
MG4 $\delta$ (mm)	0.25	0.50	1.50	3.00	5.50	8.00	10.50	13.00	15.50	18.00

**5.1 Influencia del Dispositivo Generador de Carga Axial.** Este dispositivo (Fig.2) produjo los siguientes problemas:

- Mientras que el muro se desplazaba lateralmente, el dispositivo permanecía fijo, por lo que se originaba una fuerza de rozamiento entre los polines y las planchas de acero sobre las que se apoyaba el dispositivo. Esta fuerza fue calculada como  $V_f = \mu P$ , donde  $\mu$  es el coeficiente de fricción dinámico (0.18) y  $P$  es la carga axial. Por lo que la carga lateral efectiva actuante sobre el muro resulta:  $V_{efectiva} = V_{ensayo} - V_f$ .
- Como la carga axial no sigue el movimiento del eje del muro, se genera una excentricidad igual a la magnitud del desplazamiento lateral, pero, como este valor es pequeño, se despreció la influencia del momento flector ocasionado.

## 6. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE MUROS

**6.1 Rigidez Lateral Inicial.** Teóricamente la rigidez lateral para un muro en voladizo es:

$$K_o = \frac{1}{H^3/3EI + H/A_c G} = 12.5 \text{ ton / mm}$$

Donde:  $E = 58210 \text{ kg/cm}^2$  (pilas)  $G = 24815 \text{ kg/cm}^2$  (muretes)  
 $I = 19683 \times 10^3 \text{ cm}^4$   $A_c = 3240 \text{ cm}^2$

Experimentalmente se encontraron los siguientes valores:

MURO	d <sub>ensayo</sub> (mm)	V <sub>ensayo</sub> (ton)	V <sub>f</sub> (ton)	V <sub>efectivo</sub> (ton)	K <sub>o</sub> =V <sub>efectivo</sub> /d <sub>ensayo</sub> (ton/mm)
MG1	0.198	2.40	0	2.4	12.1
MG2	0.168	4.07	1.72	2.35	14.0
MG3	0.259	5.09	2.92	2.17	8.4
MG4	0.264	5.53	2.92	2.61	9.9

**6.2 Primera Fisura por Flexión (punto F).** Igualando el esfuerzo de tracción máxima (calculado sobre la sección bruta por resistencia de materiales) a la capacidad de tracción por flexión encontrada en el muro MG1 ( $f_r = 3.7 \text{ kg/cm}^2$ ) ensayado con carga vertical nula, se obtuvo los siguientes resultados teóricos y experimentales:

Muro	P (Ton)	Valores Teóricos (F)		Valores de Ensayo (F)		Corrección
		V (ton)	d teórico (mm)	V (ton)	d ensayo (mm)	V efectivo (ton)
MG1	1.4	2.106	0.169	2.4	0.198	2.40
MG2	9.76	3.824	0.308	5.9	0.404	4.23
MG3	15.74	4.876	0.392	8.6	0.499	5.73

**6.3 Agrietamiento Diagonal (punto R).** Experimentalmente se encontró:

MURO	CARGA AXIAL (ton)	DESPLAZAMIENTO O (mm)	V <sub>R</sub> (ton)	V <sub>R</sub> * (ton)
MG1	1.4	1.927	8.9	8.9
MG2	9.8	2.521	11.9	10.22
MG3	16.8	2.370	15.5	12.42
MG4	15.9	2.032	14.4	11.5

$$V_R^* : \text{Carga lateral corregida, asociada al punto R} = V_{R \text{ ensayo}} - V_f$$

Utilizando el método de mínimos cuadrados se obtuvo la siguiente relación:

$$V_R^* = 0.21 P + 8.5 \text{ (ton)}$$

**6.4 Fallas Producidas en los Especímenes.** En el muro MG1 ( $P = 0$ ) hubo una tendencia hacia la falla por flexión, ya que las grietas se localizaban en la base del muro, mientras que las fisuras diagonales se encontraban cerradas por acción del refuerzo horizontal; sin embargo, la falla final fue por traslape del refuerzo vertical, formándose una grieta horizontal a la altura en la que terminaba la espiga (Fig.7), esta falla originó una severa degradación de la carga lateral. En los muros MG2 ( $P = 10 \text{ ton}$ ) y MG3 ( $P = 16 \text{ ton}$ ), la falla fue mixta y en el estado final volvió a observarse una falla por traslape del refuerzo vertical, presentándose además el deterioro del talón para un desplazamiento de 13 mm. En el muro MG4 ( $P = 16 \text{ ton}$ ), con planchas, también la falla fue mixta y no ocurrió problemas de traslape puesto que el refuerzo vertical fue continuo; la falla final fue por pandeo del refuerzo vertical, pero, esto ocurrió para un desplazamiento de 18 mm (Fig.8); es decir, este muro tuvo mayor capacidad de deformación inelástica que el muro MG3.

**6.5 Comportamiento Post Agrietamiento Diagonal.** Cuando se forma la grieta diagonal el muro queda dividido en dos piezas triangulares, la parte superior gira y desliza entorno al talón del muro; esta acción es la que deteriora el talón del muro, provocando además el pandeo del

refuerzo vertical. Este problema fue mayor cuanto mayor era la carga vertical. Después de la aparición de la primera grieta diagonal continuaron surgiendo grietas diagonales, en su mayoría escalonadas, mostrando la poca adherencia que existió entre la unidad y el mortero. Destacan las siguientes observaciones:

- Las mayor cantidad de fisuras se produjeron en los muros MG1, MG2, MG3 al alcanzar un desplazamiento de 8 mm, mientras que para el muro MG4 con planchas en los talones esto sucedió para un desplazamiento lateral de 13 mm. Por lo que es razonable fijar como límite de reparabilidad las siguientes distorsiones angulares:

<b>Muros sin refuerzo en los talones</b>	<b>1 / 300</b>
<b>Muros con refuerzo en los talones</b>	<b>1 / 200</b>

- Se puede decir que la capacidad de carga máxima degradó por varias razones:
  1. La falla por traslape en los muros MG1, MG2 y MG3, pese a que se usó un traslape de 70 cm, superior al mínimo recomendado por normas extranjeras:  $60 \phi = 56$  cm.
  2. El debilitamiento ocasionado por los desperdicios de mortero en la interfase mortero líquido-cimentación, pese a que durante el asentado se utilizaron tapones (esponjas) en los alvéolos de las unidades para evitar la caída del mortero. Ver la Fig.9.
  3. La congestión de refuerzo (traslapes del refuerzo vertical y ganchos del refuerzo horizontal) en alvéolos de poca dimensión (5 x 9 cm).
  4. La expansión y trituración del mortero líquido por efectos de flexocompresión, lo que provocó el destape de las unidades colocadas en el talón. Este problema ocurrió para un desplazamiento de 13 mm en el muro MG3 y para un desplazamiento de 16 mm en el muro MG4; pero, en el muro MG4 las planchas confinaron al mortero líquido hasta alcanzar un desplazamiento de 18 mm, donde ocurrió el pandeo del refuerzo vertical.

**6.6 Capacidad Máxima (punto M).** La carga lateral máxima durante el ensayo, fue:

<b>MURO</b>	<b>CARGA AXIAL (Ton)</b>	<b>DESPLAZAMIENT O (mm)</b>	<b>V<sub>M</sub> (ton)</b>	<b>V<sub>M</sub>* (ton)</b>
MG1	1.4	7.63	15.3	15.3
MG2	9.74	9.96	18.2	16.5
MG3	15.81	10.11	20.5	17.6
MG4	16.46	15.00	24.4	21.4

$$V_M^* : \text{Carga lateral corregida, asociada al punto M} = V_{M \text{ ensayo}} - V_f$$

## 7. CONCLUSIONES

### 7.1 Influencia de la Carga Axial

- Al incrementarse la carga axial, aumenta la carga lateral que genera la primera fisura.
- El agrietamiento diagonal se produjo para una distorsión angular aproximada de 1/1150. Esta distorsión resultó ser independiente del nivel de carga axial.
- La carga lateral asociada al agrietamiento diagonal resultó:

$$V_R = 0.29 v' m A + 0.21 P$$

Donde:

$V_R$  = carga lateral al producirse el agrietamiento diagonal (kg)

$v'm$  = resistencia a compresión diagonal de los muretes (kg / cm<sup>2</sup>)

A = área de corte (cm<sup>2</sup>)

P = carga axial (kg)

Esta expresión es distinta a la encontrada en la Ref. 1, donde, para el caso de muros confinados construidos con ladrillos de arcilla, se obtuvo:

$$V_R = 0.5 v'm A + 0.23 P$$

## 7.2 Efecto del Refuerzo en los Talones (Planchas)

- La carga lateral asociada al agrietamiento diagonal resultó ser independiente de la presencia de las planchas, tal como se observó en los muros MG3 y MG4.
- Las planchas incrementaron en 40% a la resistencia a compresión de la albañilería ( $f'm$ ).
- Comparando los resultados de los muros MG3 y MG4, se observó que la Capacidad Máxima de Carga Lateral se incrementó en 20%, aunque pudo haber influido la colocación del refuerzo vertical corrido (sin empalmes) que tenía el muro MG4.
- Se ha encontrado las siguientes distorsiones asociadas al límite de reparabilidad: 1/300 para la albañilería sin planchas, y 1/200 para la albañilería con planchas en los talones.
- El deterioro final en los talones (trituration del mortero fluido y pandeo del refuerzo vertical) de los muros MG3 y MG4 fue similar; sin embargo, las planchas retardaron este deterioro, aumentando como consecuencia la capacidad de deformación inelástica (de 13 a 18 mm), esta mejora en la ductilidad es independiente del tipo de falla por flexión o corte, porque en ambas fallas se producen concentraciones de esfuerzos en los talones.
- Cabe mencionar que la esbeltez del refuerzo vertical (medida a través de la relación espaciado entre planchas vs. diámetro de la barra: 15 cm / 0.95 cm) fue 15.8, por lo que si se pretende evitar el pandeo del refuerzo vertical (Fig.8), debería emplearse una esbeltez de 13, lo que hubiese conllevado a emplear  $1 \phi \frac{1}{2}$  " en el extremo del muro.

## 7.3 Procedimiento Constructivo

- Es recomendable el empleo de ventanas de limpieza en todas las unidades que se asientan en la base del muro. En esta investigación se tuvo bastante cuidado para que durante el asentado no cayera mortero a través de los alvéolos; sin embargo, esto se produjo, alcanzando los desperdicios una altura de 2.5 cm, lo que generó una junta fría entre la cimentación y el mortero líquido en todos los muros. Ver la Fig.9.
- Es importante mencionar que en los muro donde existía traslape del refuerzo vertical, la falla final se presentó a la altura donde terminaba la espiga; esto no ocurrió en el muro MG4, donde el refuerzo vertical era continuo. Por lo que se recomienda, al menos para los muros del primer entrespacio (el más crítico por flexión, corte y axial), evitar los traslapes, no importando que el proceso constructivo se retarde al tener que insertar las unidades desde el extremo superior de este refuerzo durante el asentado.

## 8. REFERENCIAS

- Ref.1. Construcciones de Albañilería. Comportamiento Sísmico y Diseño Estructural.  
A. San Bartolomé. Fondo Editorial. Pontificia Universidad Católica del Perú. 1994.

GRAFICO 1: ENVOLVENTE DE PRIMEROS CICLOS

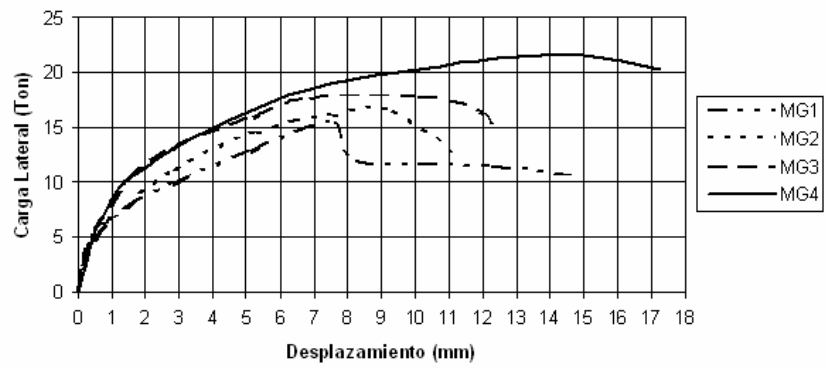


GRAFICO 2: CARGA LATERAL VS. DESPLAZAMIENTO - MURO MG1

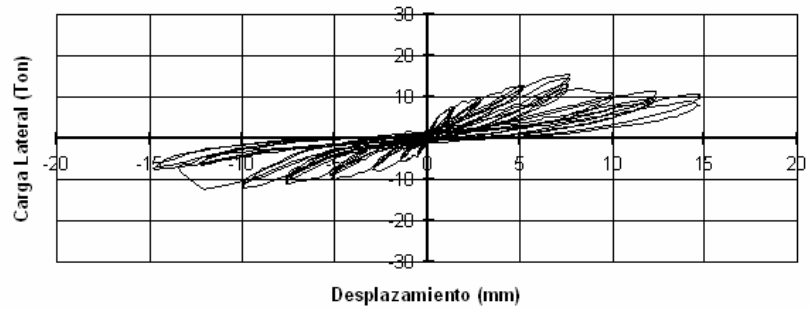


GRAFICO 3: CARGA LATERAL VS. DESPLAZAMIENTO - MURO MG2

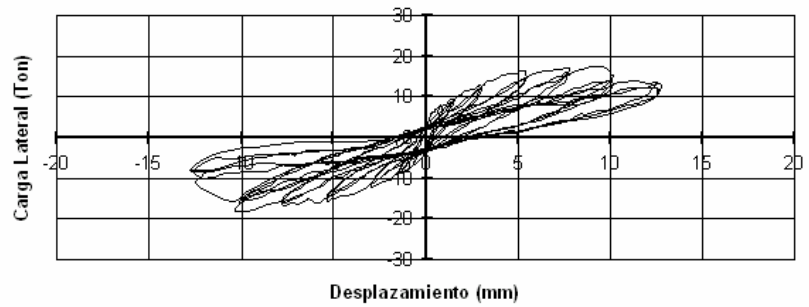
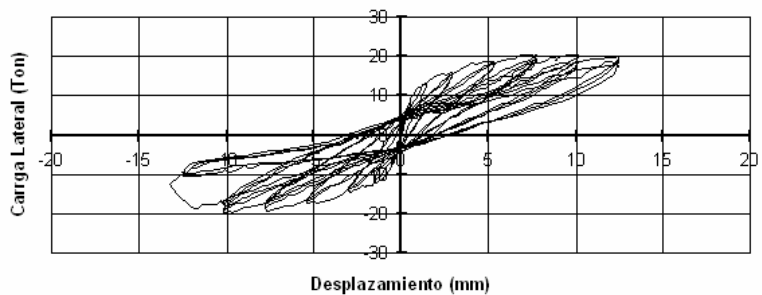


GRAFICO 4: CARGA LATERAL VS. DESPLAZAMIENTO - MURO MG3



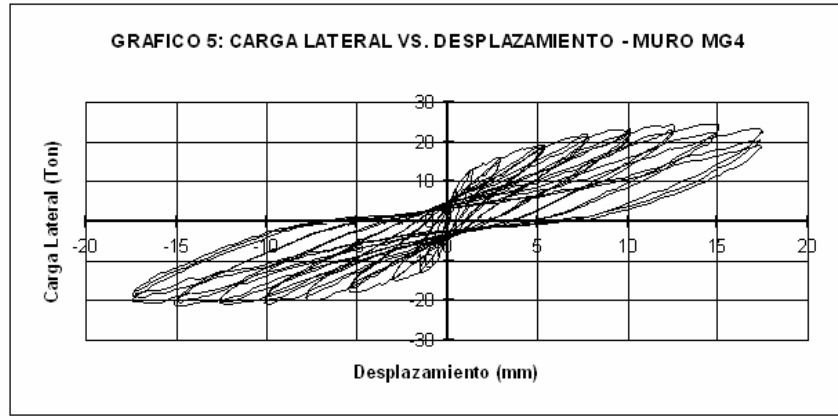


Fig. 1

Características de los muros a escala natural.

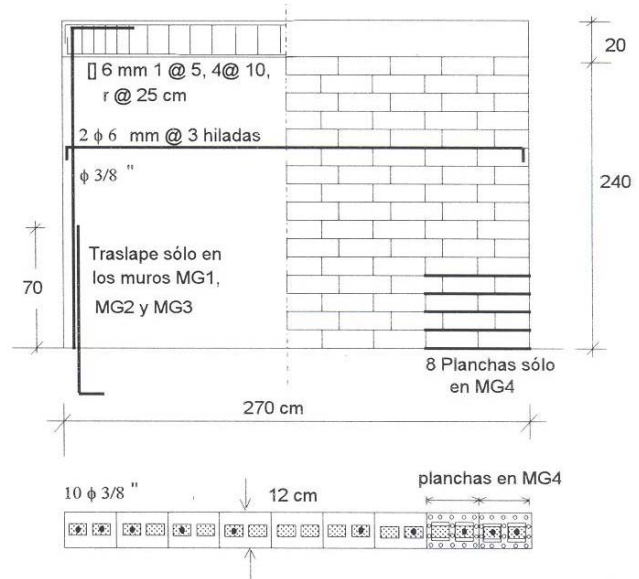


Fig.2. Vista Global de los Dispositivos Mecánicos (izquierda) y Detalle del Dispositivo para Generar la Carga Vertical (derecha).





Fig.3. Pila Rellena con Mortero Líquido Sin Planchas.



Fig.4. Pila Rellena con Mortero Líquido Con Planchas.

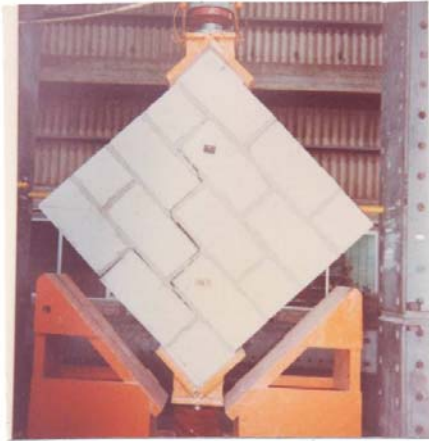


Fig.5. Muretes Rellenos con Mortero Fluido.



Fig.6. Planchas en el Muro MG4.



Fig.7. Falla por Traslape en MG1.Fase 9.



Fig.8. Talón de MG4. Fase 10.



Fig.9. Talón de MG2. Defectos del Traslape y Junta Fría Mortero Fluido-Cimentación.



Fig.10. Construcción de MG4 con Reforzo Vertical Continuo.