

ENSAYOS DE CARGA LATERAL EN MUROS DE ALBAÑILERÍA CONFINADA -EFECTOS DE LA CARGA VERTICAL-

Por: Guillermo Echevarría y Ángel San Bartolomé
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

RESUMEN

En el marco del Convenio # 3172 entre el Instituto de Investigación Tecnológica Industrial y de Normas Técnicas (ITINTEC) y la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), Guillermo Echevarría desarrolló este trabajo con el fin de optar el título de Ingeniero Civil otorgado por la PUCP. El Proyecto consiste en investigar el comportamiento a carga lateral cíclica de 5 muros (2.3 x 2.15 m.) sujetos a carga vertical constante, uno de estos muros tuvo la particularidad de estar reforzado horizontalmente con el objeto de estudiar cambios en su comportamiento inelástico.

INTRODUCCION

El efecto de la carga vertical sobre la resistencia y ductilidad de muros de albañilería sujetos a carga lateral, es reconocido por diversos investigadores; por lo cual con la finalidad de investigar este efecto con los materiales y técnicas constructivas usadas en nuestro medio, se construyeron 5 muros con la drillo de arcilla (2.30 x 2.15 m.) confinados por elementos de concreto armado, con la albañilería asentada en aparejo de soga y dentada sobre las columnas. Además, teniendo en cuenta que la capacidad de deformación se ve disminuída con el incremento de la carga axial, se proporcionó a uno de estos muros un refuerzo horizontal consistente en 1 ϕ 1/4" cada 2 hiladas (cuantía = 0.12%).

Estos muros fueron ensayados a carga lateral cíclica con desplazamiento horizontal controlado, sujetándolos a 4 niveles de carga axial típicas de edificaciones de mediana altura, las mismas que se mantuvieron constante durante el ensayo por medio de un acumulador.

1. MATERIALES DE CONSTRUCCION

1.1 Unidad de Albañilería

Se seleccionó el ladrillo sólido de arcilla, tipo King Kong hecho a máquina, ejecutándose pruebas de clasificación según normas ITINTEC, sintetizándose los resultados en la Tabla 1.

1.2 Mortero, Concreto y Refuerzo

De acuerdo a Normas ASTM, se ejecutaron ensayos de compresión sobre probetas cúbicas de mortero y cilíndricas de concreto a los 28 días de edad respectivamente, así como ensayos de tracción sobre el refuerzo y los resultados promedio aparecen en las Tablas 2 y 3.

2. ESPECIMENES

En la Fig. 1, se indican las dimensiones nominales de las pilas y muros mostrándose además el refuerzo típico del muro. En la Fig. 2 se observa la identificación de cada muro así como el refuerzo adicional al típico usado en el muro MV4.

3. ENSAYOS

La edad de la albañilería en la fecha de los ensayos fue 28 días.

3.1 Pilas a Compresión Axial (ver Fig. 1).

Se ensayaron a una velocidad de carga de 10 ton/min. y la inclusión de 2 LVDT colocados en el eje de la pila permitió determinar su módulo de elasticidad. La falla típica fue la de una grieta vertical que atravesaba unidad y mortero. En la Tabla 4 se anotan los resultados ya corregidos por esbeltez {1}.

3.2 Muros en Voladizo Sujetos a Carga Vertical Permanente y Lateral Cíclica

En la Fig. 3A se muestran los dispositivos utilizados y en la 3B los instrumentos de medición.

Debe señalarse que la viga de cimentación fue adecuadamente fijada a la losa de ensayos; la carga lateral fue aplicada por un actuador dinámico y para jalar al muro se emplearon 2 tirantes horizontales colocados sobre la solera y conectados al actuador. La carga vertical fue aplicada mediante 2 gatas que actuaban sobre un perfil metálico conectado a la solera, cuyo fin era distribuir estas 2 cargas concentradas en forma uniforme sobre el muro; a su vez estas 2 gatas reaccionaban contra otro perfil conectado a 2 tirantes verticales, los cuales estaban rotulados en su base de manera que todos los dispositivos montados sobre el muro pudiesen seguir su traslación lateral. El sistema hidráulico de estas 2 gatas estaba conectado a un acumulador, dispositivo que inyektado de nitrógeno permitió mantener constante la presión en ambas gatas a pesar que los desplazamientos de sus pistones variaban reacomodándose a la deformación vertical del muro sin restringirla (Fig. 4).

La primera parte de cada ensayo consiste en aplicar monotónicamente la carga vertical hasta alcanzar el nivel deseado (0, 5, 15, 15 y 25 ton.), el registro de las deformaciones verticales en el muro permite calcular su módulo de elasticidad (Fig. 5).

La segunda parte de cada ensayo consiste en aplicar 9 fases de desplazamiento horizontal controlado ($d = 0.5, 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5$ y 20mm) efectuándose un mínimo de 3 ciclos/fase hasta estabilizar el lazo histerético, a una velocidad de 1 ciclo/ 4 minutos. (Fig. 6 y 7). Los principales resultados aparecen en la Tabla 5 y Fig. 8.

4. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

4.1 Comportamiento Elástico de los Muros

Mientras que no surjan fisuras sobre el muro, su comportamiento es predecible mediante las fórmulas de Resistencia de Materiales, siempre y cuando se trabaje con la sección transformada no agrietada (Fig. 14). La carga asociada a la formación de la primera fisura visible (V_R), pudo determinarse igualando la tensión máxima a la resistencia de tracción por flexión del concreto (f_r). La rigidez lateral inicial (k_0) pudo evaluarse como la carga lateral que produce un desplazamiento unitario, debiéndose incluir la deformación por corte. El módulo de elasticidad calculado mediante ensayos de pilas a compresión axial resultó ser similar al obtenido sobre el muro.

Conviene señalar que la teoría expuesta, mostró una divergencia de $\pm 20\%$ en relación a nuestros resultados experimentales.

4.2 Capacidad de Corte (V_R)

Por el método de mínimos cuadrados se relacionó linealmente la carga lateral asociada al primer agrietamiento diagonal contra la carga axial (P), obteniéndose con un 89% de correlación la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} V_R &= V_0 + 0.23 P \\ V_0 &= 0.56 \sqrt{f'_m} A_c \quad (\text{kg}) \\ A_c &= \text{área de corte} \quad (\text{cm}^2) \\ f'_m &= \text{resistencia a la compresión de pilas} \quad (\text{kg/cm}^2) \end{aligned}$$

señalamos que el factor "0.23" es comparable contra el obtenido en placas de concreto armado (Reglamento ACI-83) posiblemente por el tipo de falla (tracción diagonal) logrado incluso sobre el muro MV1 ($P=0$). Acotamos también que el esfuerzo horizontal prácticamente no influyó sobre V_R .

4.3 Comportamiento Post Agrietamiento Diagonal. Efectos de la Carga Axial (P) y del Refuerzo Horizontal.

Posterior al agrietamiento diagonal el muro se comportó como 2 piezas triangulares unidas por el refuerzo vertical, el triángulo superior trató de rotar y deslizarse sobre la base de la columna comprimida y la mayor carga vertical disminuyó la rotación incrementándose el deslizamiento, esto no ocurrió con el muro MV4 en donde el deslizamiento fue controlado por el refuerzo horizontal incrementándose la rotación (Fig. 10).

4.3.1 Rigidez Lateral (k)

Ante la mayor carga axial, k se incrementó especialmente al inicio de la recarga lateral (Fig. 6 y 7), debido a que la carga vertical tiende a reducir el tamaño de las grietas permanentes ($V=0$). Este efecto deberá de tenerse en cuenta si se pretende modelar el comportamiento inelástico de estos muros.

4.3.2 Capacidad Máxima (V_M)

Ante la mayor carga axial el efecto del deslizamiento de la pieza triangular superior superó al de la rotación, lo que produjo que el refuerzo vertical traccionado no fluya (Fig. 10) y más bien la resistencia última estuvo asociada a la capacidad por corte-fricción proporcionada por los 4 ϕ 1/2" existentes en la base de la columna comprimida, con lo cual V_M se mantuvo prácticamente independiente de P. En el muro MV4 el efecto de la rotación de la pieza triangular superior generó la fluencia del refuerzo vertical traccionado con lo cual se incrementó considerablemente el valor V_M (Fig. 8).

4.3.3 Degradación de la Capacidad de Carga Lateral

La capacidad de carga lateral se ve seriamente afectada en muros con elevada carga axial, en donde el deslizamiento de la pieza triangular superior genera el pandeo del refuerzo vertical comprimido (Fig. 7 y 12). En muros con carga vertical reducida o con carga vertical elevada pero reforzados horizontalmente, la degradación de carga más bien ocurrió para altos niveles de desplazamiento lateral y fue producto del deterioro de la albañilería (Fig. 6).

4.3.4 Deterioro de la Unión Albañilería-Columna

Los muros sujetos a elevada carga axial mostraron flexión en sus columnas (en el plano del muro), lo que deterioró la unión dentada entre la albañilería y columna, esto no ocurrió con el muro MV4 reforzado horizontalmente (Fig. 11). En consecuencia el comportamiento contra carga perpendicular al plano del muro debe mejorar cuando el muro tiene refuerzo horizontal.

4.3.5 Capacidad de Absorción y de Disipación de Energía

Un muro no solamente debe ser capaz de absorber energía sísmica sino también de disiparla. Una relación de estas energías la de el grado de amortiguamiento equivalente (GAE) graficado en la Fig. 9, en esta figura se aprecia que los muros con baja carga axial (MV1 y MV2) o con elevada carga axial pero reforzados horizontalmente (MV4) tuvieron mejor comportamiento que los muros MV3 y MV5, ya que una elevación repentina del GAE (Fig. 9) expresa una alta disipación de energía a costa de un mayor deterioro del espécimen que atenta contra su capacidad de absorber energía.

4.3.6 Capacidad Máxima de Deformación (ductilidad)

El límite máximo de desplazamiento lateral que deben tener los muros fue establecido en base a una serie de criterios (deformación permanente < 5 mm., tamaño máximo de grieta < 10 mm., degradación de la capacidad de carga < 25%, grado de amortiguamiento equivalente < 10%, deterioro mínimo en columnas y albañilería); y evaluando la ductilidad por el criterio de igualación de energías (Fig. 13), se obtuvo que para muros con elevada carga axial el desplazamiento lateral máximo no debería superar los 5 mm. (asociado a una ductilidad de 1.75) mientras que los muros con baja carga axial o elevada pero reforzados horizontalmente no debería superar los 10 mm. (asociados a una ductilidad de 2.5).

4.4 Recomendaciones para el Diseño

A pesar de haberse ensayado una mínima cantidad de especímenes, se puede dar las siguientes recomendaciones:

4.4.1 Para edificaciones convencionales de albañilería confinada de 3 a 5 pisos debería de adoptarse una ductilidad inferior a la señalada por el actual reglamento salvo que se les refuerce horizontalmente.

4.4.2 Debe prestarse especial atención a los extremos de las columnas que deberían tener estribos espaciados a no más de la cuarta parte de su peralte

sobre una altura igual a dos veces su peralte; la inclusión de estos estribos confinaría al concreto incrementando su resistencia a flexo-compresión y reduciría la longitud de pandeo del refuerzo vertical.

4.4.3 Las columnas de confinamiento son los elementos que deben evitar el colapso estructural en caso la albañilería se agriete ante sismos severos, de esta manera se recomienda diseñar a sus bases (columnas sin esbeltez) como para que sean capaces de resistir una carga axial igual a la producida por la acción conjunta de la carga vertical y un momento volcante generado por la carga lateral que induce el agrietamiento de la albañilería. El área mínima de cada columna y dowell necesarios deberían ser diseñados por corte-fricción para absorber una carga lateral igual a la que produce el agrietamiento de la albañilería menos la carga absorbida por el refuerzo horizontal.

4.5 Línea Futura de Investigación

Es importante continuar investigando el efecto del refuerzo vertical y de la geometría del muro en conjunto con la carga axial ya que las formas de falla pueden influir sobre las conclusiones vertidas en este trabajo.

BIBLIOGRAFIA

1. "Normas Técnicas de Edificaciones E-070 Albañilería". ININVI, NTE-82, Perú.

TABLA N° 1

CLASIFICACION DE LA UNIDAD DE ALBAÑILERIA

		VALOR PROMEDIO	N° DE ESPECIMENES
Dimensión (cm)	Largo	23.5	10
	Ancho	13.2	
	Altura	9.1	
Resistencia a la Compresión		101.5 kg/cm ²	5
Succión		70 (gr/200cm ² x min.)	5
Succión luego del tratamiento (*)		15 (gr/200cm ² x min.)	5
Tipo de Unidad ITINTEC 331.018		III	18 perfora ciones de 2 x 2 cm.

(*) El tratamiento de las unidades consistió en regarlas con agua durante 25 minutos un día antes de asentarlas y la succión fue medida en el instante del asentado.

TABLA N° 2

MORTERO Y CONCRETO

MATERIAL	PROPORCION VOLUMETRICA	SLUMP	RESISTENCIA A LA COMPRESION (kg/cm ²)	N° DE ESPECIMENES
Mortero	1:5 (cemento: arena gruesa)	6"	90	20 cubos
Concreto	1:2 1/2:3 cemento: arena: piedra 1/2"	4"	160	10 cilindros estándar

TABLA N° 3

CARACTERISTICAS DEL REFUERZO

(Resultados Promedios Sobre 3 Especímenes)

DIAMETRO	CARACTERISTICAS	f_y (kg/cm ²)	f'_{max} (kg/cm ²)	ELONGACION EN 20 cm (%)
* φ 1/4"	liso y trefilado	---	5605	2.5
φ 3/8"	corrugado	5070	7042	15.7
φ 1/2"	corrugado	4884	7364	16.3

* Este refuerzo es vendido como φ 1/4", pero no tiene el peso ni las características correspondientes.

TABLA N° 4

PILAS

(Resultados Promedios Sobre 3 Especímenes)

RESISTENCIA PROMEDIO \bar{f}_m (kg/cm ²) (*)	VALOR CARACTERISTICO f'_m (kg/cm ²) (**)	MODULO DE ELASTICIDAD E (kg/cm ²)
67.3 (6%)	64	32,120

(*) La cantidad entre paréntesis indica el coeficiente de variación (cv) y el resultado ya esta corregido por esbeltez (l)

$$\text{factor de esbeltez} = 0.94$$

$$(**) f'_m = (1 - cv) \bar{f}_m$$

TABLA N° 5 RESULTADOS IMPORTANTES DEL ENSAYO

Muro	P	Primera Fisura (F)		Agrietamiento Diagonal (R)				Capacidad Máxima (M)				Valores Elásticos			
		Rama (+)		Rama (+)		Rama (-)		Rama (+)		Rama (-)		E	G	K _o	
		V	d	V	d	V	d	V	d	V	d				
MV1	0	6.94	0.66	14.64	3.81	14.57	3.43	18.90	15.74	16.59	15.18	-	17,250	10.27	
MV2	5	7.71	0.76	17.61	3.27	17.03	4.91	19.38	11.69	18.94	7.42	-	14,834	10.64	
MV3	15	14.18	1.92	18.18	3.77	18.29	3.64	20.44	4.96	23.65	12.62	36,700	15,543	10.89	
MV4	15	15.40	1.88	16.85	2.48	17.42	3.21	25.96	14.53	25.31	15.08	39,880	15,513	12.02	
MV5	25	17.44	1.76	19.66	2.47	23.00	3.39	21.91	10.03	23.52	10.06	35,180	21,808	13.51	

Nomenclatura: P = Carga axial nominal (ton)
V = Fuerza cortante (ton)
d = Desplazamiento lateral (mm)
E = Módulo de elasticidad (kg/cm²)
G = Módulo de corte (kg/cm²)
K_o = Rigidez lateral inicial (ton/mm)

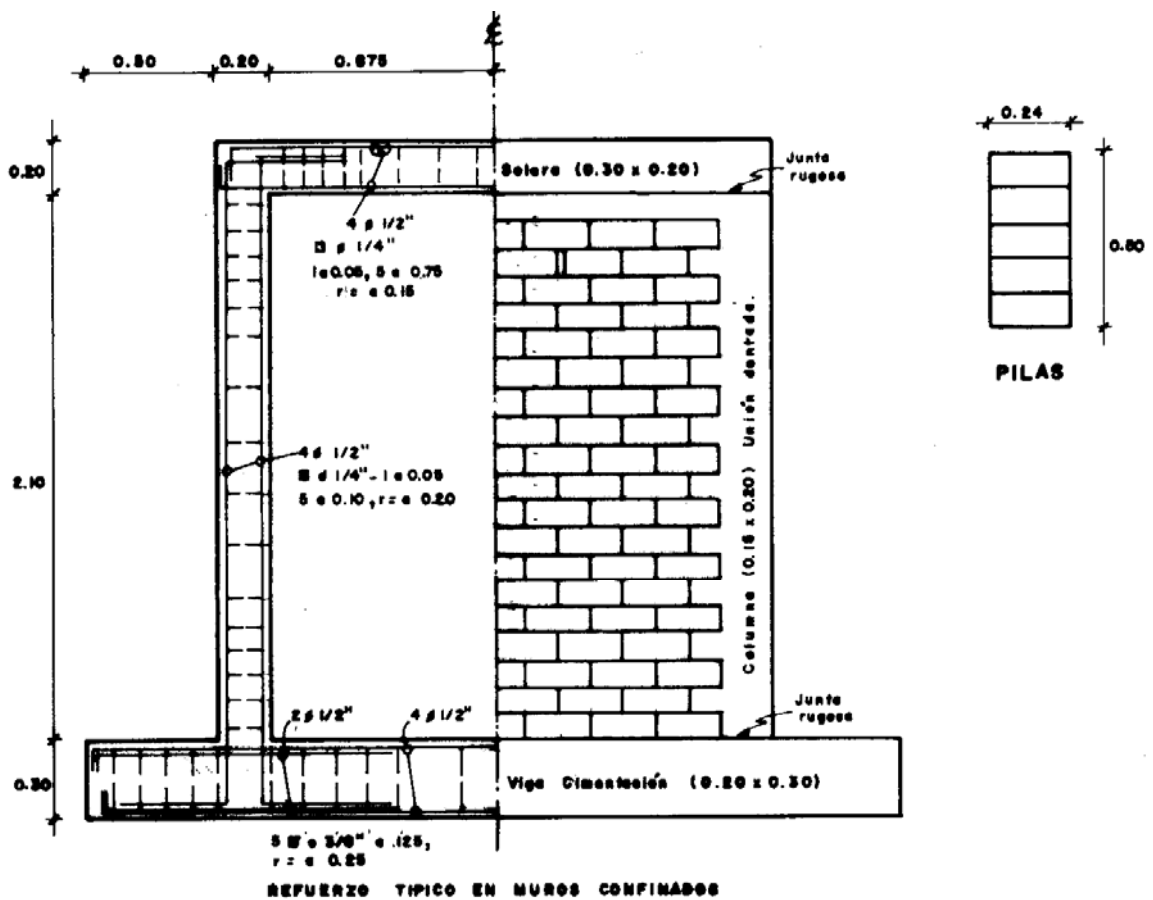


Fig. 1.- DIMENSIONES NOMINALES DE MUROS Y PILAS
(Aparejo de saga, espesor 13 cm y juntas 1 cm.)

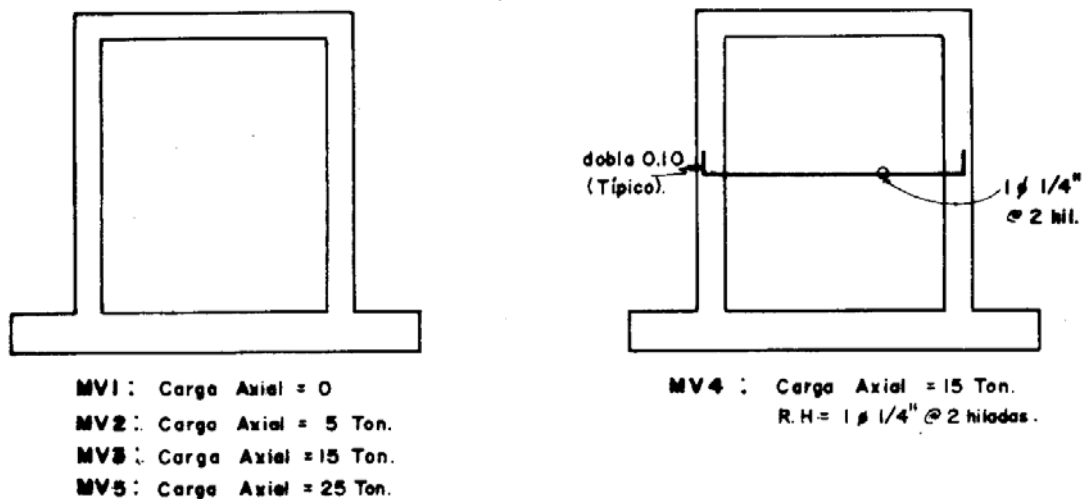


Fig. 2.- IDENTIFICACION DE MUROS Y REFUERZO ADICIONAL AL TÍPICO.

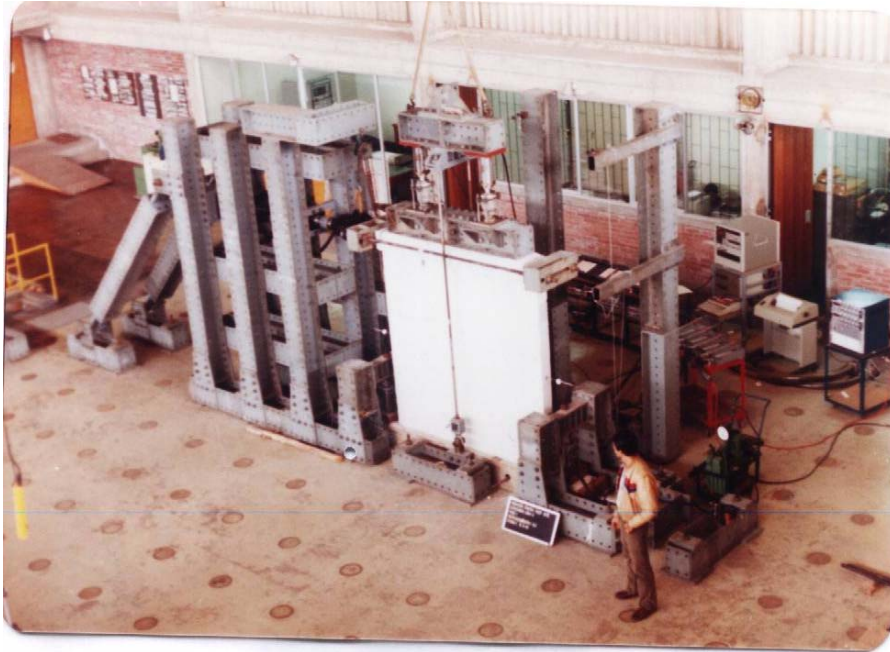


FIG. 3A VISTA GLOBAL DE DISPOSITIVOS

- Actuador dinámico MTS (50 ton.)
- Minicomputador HP 9825B
- Sistema de Adquisición de Datos HP 3052A
- 3 Recorder X-Y
- 10 LVDT
- 2 Extensómetros
- 5 Gatas
- 2 Celdas de carga
- 1 Acumulador

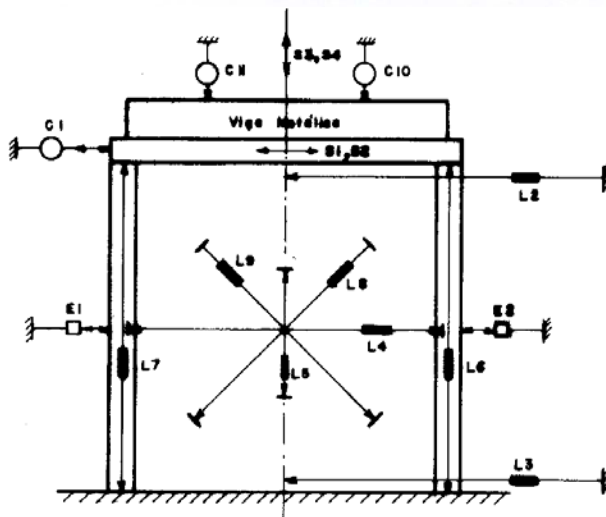
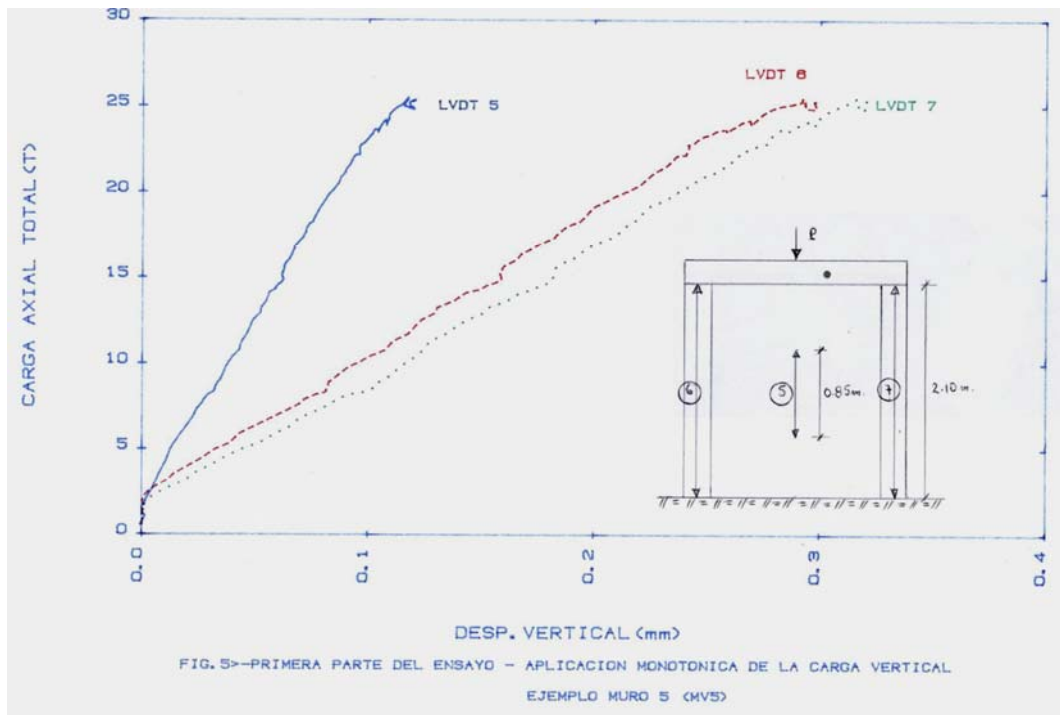
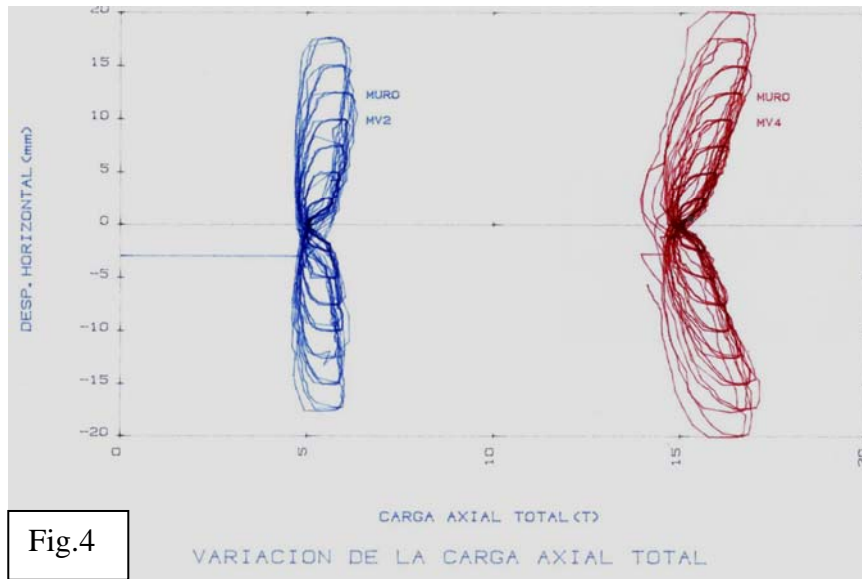
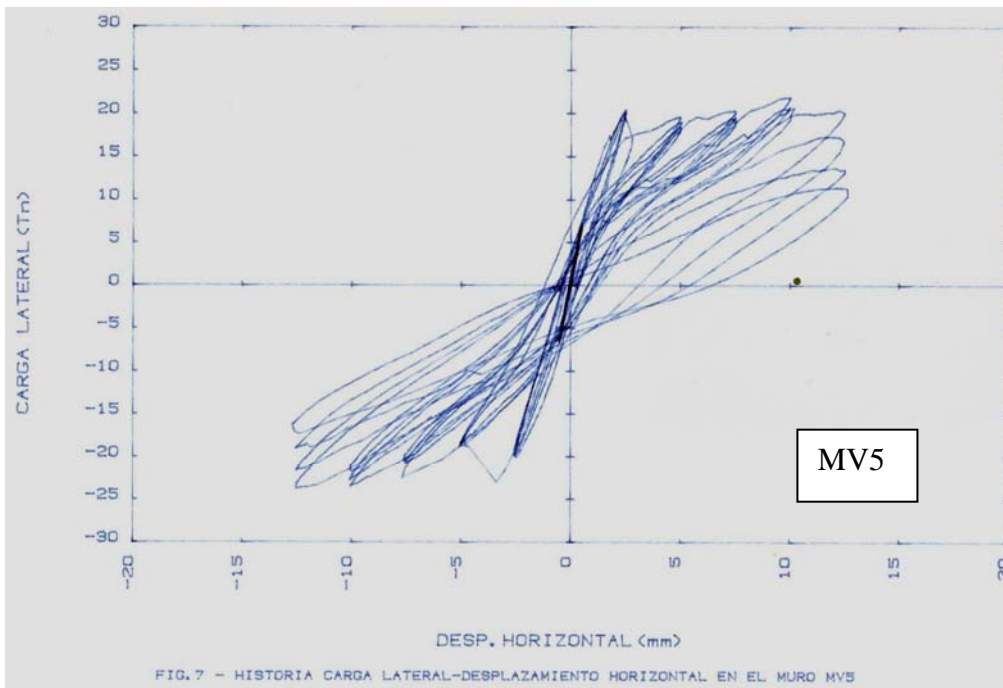
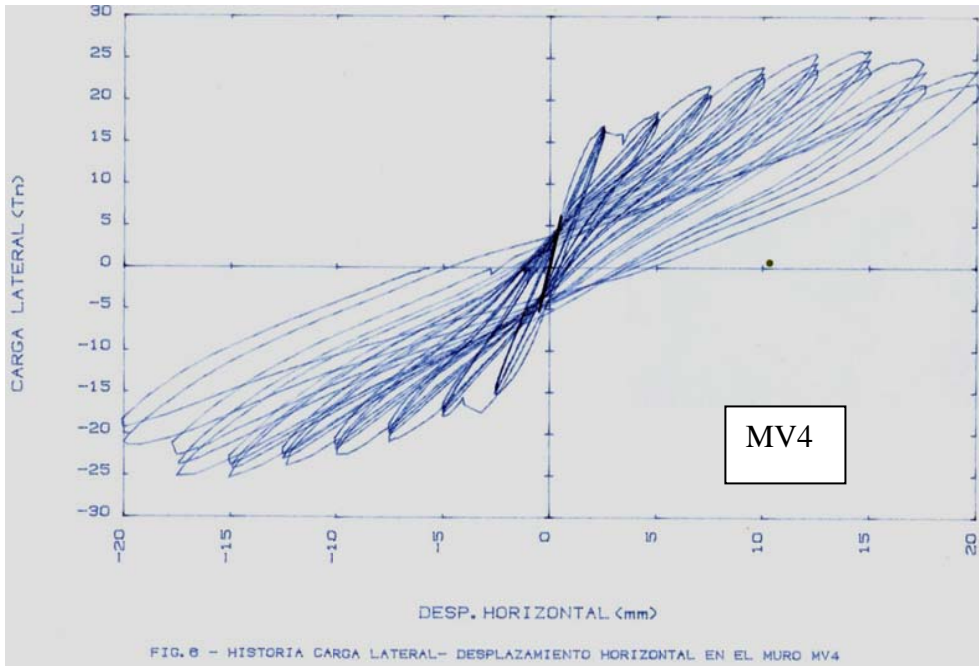


Fig. 3B

INSTRUMENTOS de MEDICION	
L	= LVDT
C	= Celda de carga.
E	= Extensómetro
S	= Straingage (tirantes)





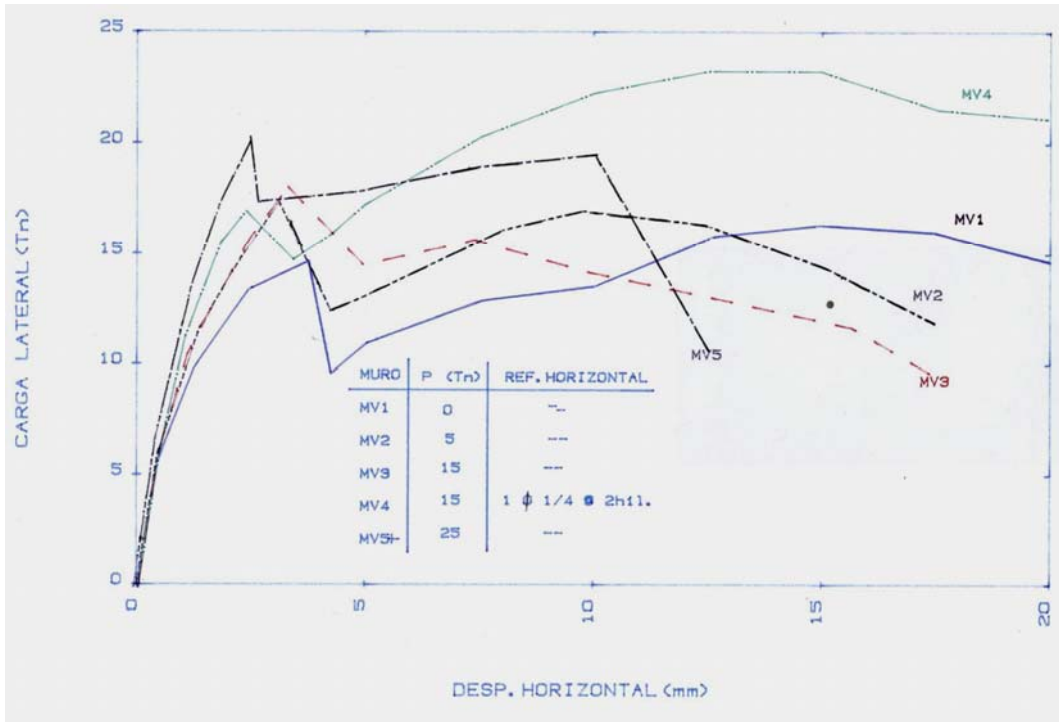


Fig.8. Envolvente de los ciclos estables.

Fig. 9

Variación del amortiguamiento equivalente

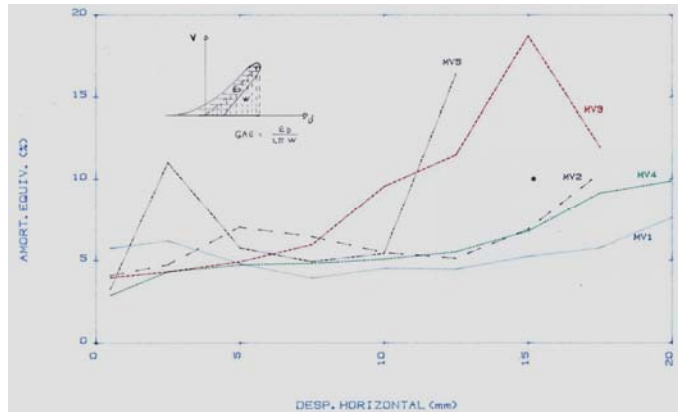


Fig.10

Variación del desplazamiento vertical en una columna (ciclos estables)

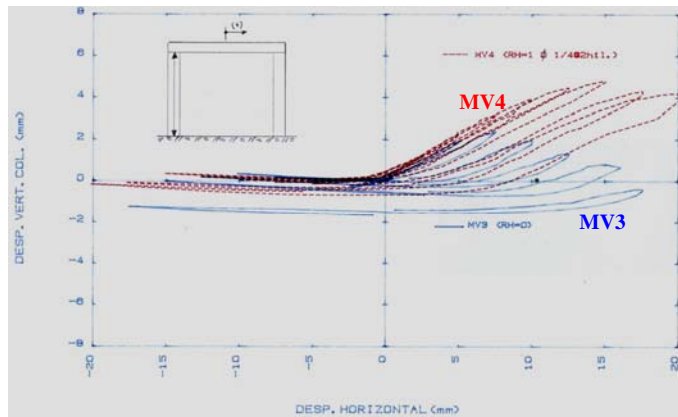




Fig.11. Estado de los muros MV3 (izquierda) y MV4 (derecha), ambos con $P = 15\text{ton}$ y $D = +17.5\text{mm}$.

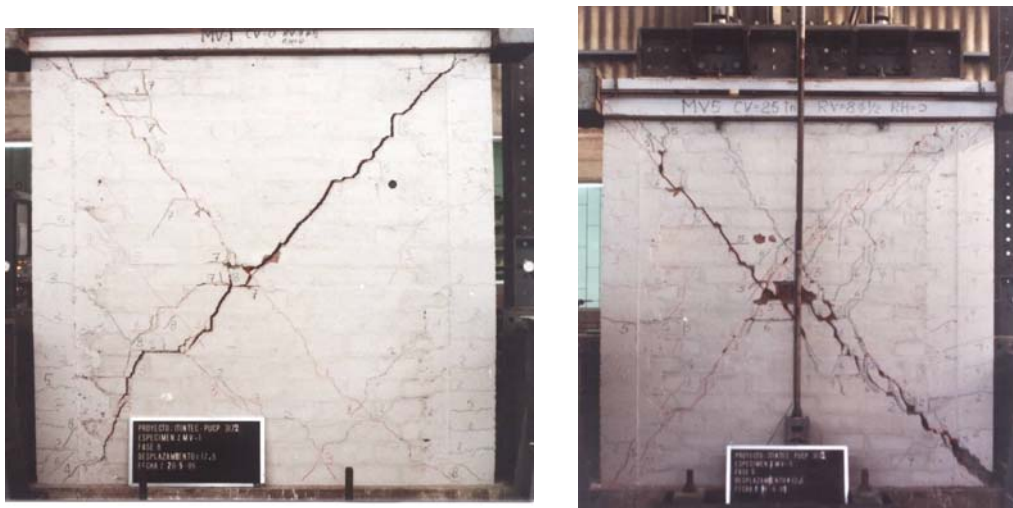
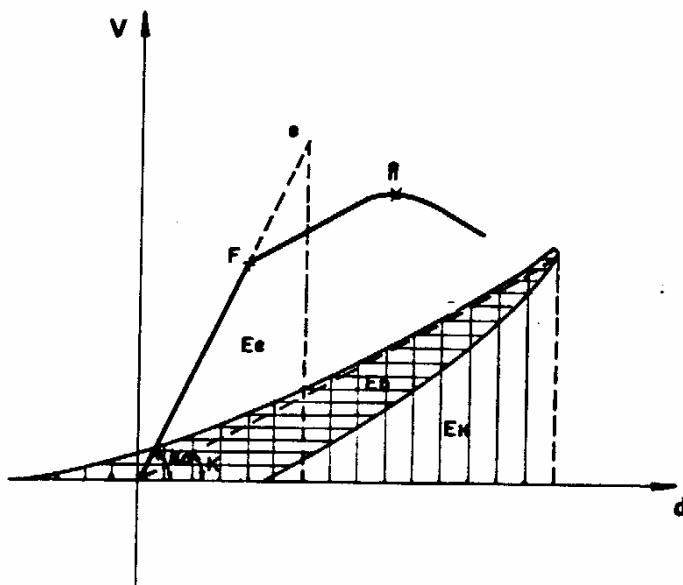
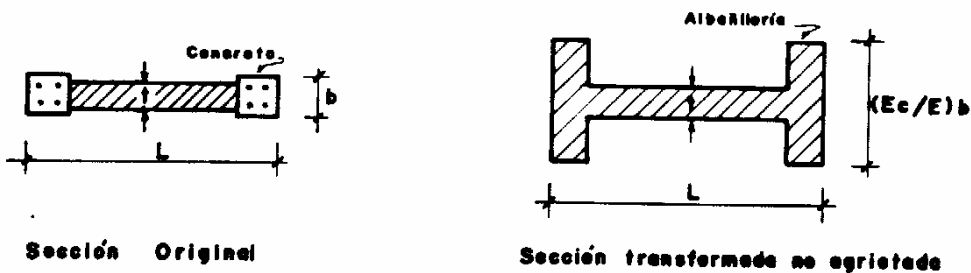


Fig.12. Estado de los muros MV1 (izquierda) con $P = 0\text{ ton}$ $D = -17.5\text{mm}$, y MV5 (derecha) con $P = 25\text{ ton}$ $D = +12.5\text{mm}$.



- F = Primera fisura visible.
- R = Agrietamiento diagonal.
- Ko = Rigidez lateral inicial.
- K = Rigidez inelástica.
- Ee = Energía disipada.
- EN = Absorción de energía
- $E_e = \frac{1}{2} V_e d_e = \frac{V_e^2}{2 K_o} = E_N$
- Fd = Factor indicativo de ductibilidad.
- $F_d = \frac{V_e}{V_R} = \frac{\sqrt{2 K_o E_N}}{V_R}$

Fig. 13.- Definiciones



Rigidez lateral inicial = $K_o = 1 / (H^3 / 3EI + H / GAc)$

Carga asociada a la primera fisura visible = $V_f = \frac{2I}{HL} \left(P/A + \frac{E f_r}{E_c} \right)$

$E = 500 f'_m.$

$G = 0.4 E$

$E_c =$ Mod. elasticidad del concreto

$I =$ Momento de inercia

$A =$ Area total de la sección.

$A_c =$ Area de corte = tL

$H =$ Altura.

$f_r = 2 \sqrt{f'_c}$ (Kg/cm²)

$f'_c =$ Resistencia a compresión del concreto.

Fig. 14.- Comportamiento elástico (ejem. muro de un piso).