

# ENSAYOS DE CARGA LATERAL EN MUROS DE ALBAÑILERÍA CONFINADOS -EFECTOS DEL REFUERZO-

**Por: Aldo Pastorutti y Ángel San Bartolomé (\*)**  
**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

## RESUMEN

Dentro del Convenio N° 3172 entre el Instituto de Investigación Tecnológica Industrial y de Normas Técnicas (ITINTEC) y la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), A. Pastorutti desarrolló este trabajo con el fin de optar el título de Ingeniero Civil otorgado por la PUCP. El Proyecto consistió en investigar el comportamiento a carga lateral cíclica de 5 muros (2.4 x 2.4 m.), en los cuales se varió el refuerzo horizontal (distribuido sobre el muro) y el refuerzo vertical en las columnas de confinamiento.

## INTRODUCCION

Ensayos de carga lateral realizados sobre muros de albañilería (1), mostraron que los elementos de confinamiento no resultan eficientes en la etapa post-agrietamiento diagonal, especialmente en las zonas centrales del muro en donde el tamaño de grieta era relativamente grande; asimismo, estos muros se comportaron como si fueran dos piezas triangulares unidas a través del refuerzo vertical existente y en donde el triángulo superior trataba de volcar y deslizarse en torno a la esquina inferior de la columna flexocomprimida creando concentraciones de esfuerzos que atentaron contra la resistencia y rigidez del conjunto. Con el fin de aminorar el problema surgió este Proyecto, en donde para poder redistribuir en mejor forma los esfuerzos se ha recurrido al refuerzo horizontal consistente en un caso en 2  $\emptyset$  1/4" cada 6 hiladas (cuantía = 0.08%), en otro cada 3 hiladas (cuantía = 0.16%) y un muro con solera intermedia reforzada con 2  $\emptyset$  1/2". Además, se estudió un muro con refuerzo vertical 4  $\emptyset$  3/8" en sus columnas. El comportamiento a carga lateral cíclica de los 4 muros descritos, fue comparado contra un muro patrón (de los que se construyen usualmente en nuestro medio) sin refuerzo horizontal, con 4  $\emptyset$  1/2" en las columnas de confinamiento, las cuales tenían una unión dentada con la albañilería la misma que fue asentada en aparejo de soga.

\* Profesor Asociado del Departamento de Ingeniería

## 1. MATERIALES DE CONSTRUCCION

### 1.1 Unidades de Albañilería

Se seleccionó al ladrillo sólido de arcilla, tipo King Kong hecho a máquina. Se ejecutaron pruebas de clasificación según normas ITINTEC, los resultados se sintetizan 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 promedios aparecen en las Tablas 2 y 3.

## 2. ESPECIMENES

En la Fig. 1 se indica las dimensiones nominales de las pilas, muretes 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 cada caso.

## 3. ENSAYOS

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

### 3.1 Pilas a Compresión Axial

Se ensayaron a una velocidad de carga de 10 tons/min. 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 (2).

### 3.2 Muretes a Compresión Diagonal

Se ensayaron a una velocidad de carga de 1 ton/min. En la Tabla 4 se anotan los resultados y en la Fig. 9 se observa la falla de carácter mixta (entre escalonada y una grieta que atraviesa unidad y mortero).

### 3.3 Muros en Voladizo a Carga Lateral

En la Fig. 3A se muestra los dispositivos utilizados y en la 3B, la disposición de los LVDT usados para medir los desplazamientos. El ensayo fue de desplazamiento horizontal en el eje del muro, controlado en fases según se indica en la Fig.4; la velocidad del ensayo fue un ciclo en 4 minutos, efectuándose un mínimo de 3 ciclos por fase hasta tener aproximadamente estabilizado el lazo histerético. Los resultados principales aparecen en la Tabla 5.

#### 4. COMPORTAMIENTO DE LOS MUROS

##### 4.1 Muro MR1 (Muro Patrón)

Este muro tuvo un comportamiento similar al registrado en la Ref. 1. Luego de formarse las grietas diagonales, el espécimen se comportó como 2 piezas triangulares unidas por el refuerzo vertical, en el cual el triángulo superior trataba de volcarse y deslizarse en torno a la base de la columna flexocomprimida deteriorándola (Fig. 10A). Cabe destacar que hecha la correlación de resistencia al corte (asociada a la primera grieta diagonal) contra la resistencia de pilas y muretes, se lograron resultados muy parecidos a los obtenidos en la Ref. 1, mediante las fórmulas:

$$v_R \text{ (Kg/cm}^2\text{)} = 0.56 \sqrt{f'_m} = 0.56 v'_m \text{ (ver Tablas 4 y 5)}$$

Como se habían medido las deformaciones en las diagonales, se obtuvo experimentalmente el módulo de corte  $G$  y suponiendo  $G = 0.4E$  (2), se calculó el módulo de elasticidad el cual comparado contra la resistencia de las pilas dió:  $E = 450 f'_m$ .

Es destacable también señalar que conocido  $E$  y  $G$  pudo predecirse teóricamente la rigidez lateral elástica ( $K_o$ ) así como a la carga asociada a la primera fisura visible por flexión ( $V_F$ ) (igualando la tensión máxima a la resistencia a la tracción por flexión del concreto) debiéndose considerar para ambas predicciones al momento de inercia de la sección transformada no agrietada (Fig. 11). La carga máxima también se pudo evaluar teóricamente bajo la hipótesis que la línea de falla por corte era a  $45^\circ$  y luego efectuando el equilibrio del triángulo superior del muro bajo la suposición que el refuerzo vertical traccionado entraba en fluencia (Fig. 12), se obtuvo una capacidad máxima que superaba a la de corte ( $V_R$ ).

##### 4.2 Muro MR2

En este muro la inclusión de la solera intermedia creó un incremento en la rigidez lateral elástica y en la carga de agrietamiento por corte (Tabla 5), ya que una hilada de ladrillo fue reemplazada por la solera de concreto. El comportamiento de este muro fue aceptable hasta la aplicación de un desplazamiento lateral igual a 15 mm; posterior a este desplazamiento al no poder las grietas diagonales atravesar a la solera intermedia, la mitad superior del muro empezó a deslizarse y luego a rotar en torno a la unión solera intermedia-columna, destruyéndola (Fig. 10B).

##### 4.3 Muro MR3

La capacidad teórica de flexión de este muro (con refuerzo vertical en sus columnas igual a  $4 \text{ } \emptyset \text{ } 3/8''$ ) fue evaluada con el criterio de la sección transformada y agrietada (Fig. 11), dándonos una carga lateral de 12 tons. menor a la capacidad teórica de corte, calculada por la fórmula  $V_R = 0.56 \sqrt{f'_m} \times A = 15 \text{ tons.}$ , por lo que era de esperarse una falla por flexión (la que ocurrió para  $V = 12.6 \text{ ton.}$ ). Producida esta falla, hubo deslizamiento del muro para posteriormente deteriorarse la base de la columna flexocomprimida (Fig. 10C). Cabe señalar que en las fases intermedias del ensayo ( $d = 10$  a  $15 \text{ mm}$ ), se produjeron ciertas grietas diagonales (en la mitad inferior del muro) asociadas a una carga lateral máxima similar a su capacidad teórica de corte.

La gráfica carga-desplazamiento horizontal de este muro, mostró tener prácticamente la misma forma que las obtenidas para el resto de muros a pesar que la forma de falla era diferente, sin embargo su reparación debe resultar

menos costosa.

#### 4.4 Muros MR4 y MR5

En estos muros con refuerzo horizontal anclado en las columnas de confinamiento, se observó que cuanto mayor sea este refuerzo, el número de grietas crece pero son cada vez más finas (Fig. 10F). Este refuerzo, empezó a trabajar posteriormente a la formación de la grieta diagonal (para una carga  $V_R$  similar a la obtenida para el muro MR1), uniendo a los dos triángulos divididos por la grieta diagonal, generándose una redistribución de esfuerzos que si bien provocó nuevas fisuras sobre el muro, evitó el deslizamiento del triángulo superior en torno a la base de la columna flexocomprimida y al término del ensayo estas esquinas no mostraron mayor deterioro (Figs. 10D y 10E). También pudo observarse que cuanto más refuerzo horizontal existe, las unidades de albañilería se deterioran menos y en la Fig. 8, se aprecia como el desplazamiento horizontal intermedio (relativo entre columnas) para un instante de carga máxima es para MR4 (cuantía = 0.16%) prácticamente la mitad al obtenido para MR5 (cuantía = 0.08%); lo que indicaría que ambos refuerzos trabajaron igualmente por lo que en ambos especímenes se registro la misma resistencia máxima.

### 5. CONCLUSIONES

5.1 La fórmula de correlación de la resistencia al corte de muros cuadrados vs. la resistencia a compresión de pilas y muretes, así como el cálculo del módulo de elasticidad y de corte propuesto en la Ref. 1, ha podido corroborarse.

5.2 El refuerzo horizontal utilizado (sin escalon de fluencia), no influyó sobre la resistencia al corte (generación del primer agrietamiento diagonal), ni sobre la rigidez lateral inelástica, pero si aumentó levemente la resistencia máxima (11%) debido a que este refuerzo siempre se comportó elásticamente. Por lo que es necesario investigar la influencia de la cantidad de refuerzo horizontal con escalon de fluencia definido (ejemplo alambre #8) sobre la resistencia.

5.3 El refuerzo horizontal distribuido sobre la altura del muro, aumentó la capacidad de deformación (ductilidad) sin que exista mayor deterioro de la albañilería y columnas en la etapa de grandes desplazamientos laterales. Cuanto mayor sea este refuerzo, mayor será el número de fisuras pero estas a su vez serán más finas y los esfuerzos se redistribuirán en mejor forma.

5.4 Debería reglamentarse el uso de un refuerzo horizontal mínimo distribuido sobre las hiladas de muros confinados que soportan elevada carga axial, el que garantizará la integridad de la albañilería incluso ante cargas perpendiculares a su plano. Este refuerzo debe anclarse sobre las columnas con ganchos a 90° en la dirección vertical, para evitar pérdida de anclaje cuando se genere fisuras por flexión en las columnas.

5.5 No es conveniente concentrar todo el refuerzo horizontal en la zona intermedia del muro, por la concentración de esfuerzos que este genera en la zona de anclaje con la columna.

5.6 Las formas de falla pueden ser controladas (en Laboratorio) en función de aumentar o disminuir la capacidad de flexión en relación a la de cor

te, y un muro que falle por flexión puede repararse más económicamente que uno que falle por corte. Sin embargo, en sismos reales muros sin refuerzo vertical muestran fallas por corte debido a que la carga vertical incrementa en mayor proporción a la capacidad de flexión que a la capacidad de corte. De este modo, debería investigarse la influencia de la carga axial sobre la capacidad de flexión (variando el refuerzo vertical) y de corte.

#### BIBLIOGRAFIA

1. San Bartolomé, Angel. "Ensayos de Carga Lateral en Muros de Albañilería Confinados por Elementos de Concreto Armado. Correlación de Resultados entre Especímenes a Escala Natural y Pequeñas Probetas". V Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Tacna, 1984. Convenio ITINTEC-PUCP # 3169.
2. "Norma Técnica de Edificación E-070 Albañilería". Instituto Nacional de Investigación y Normalización de la Vivienda, NTE-82, Perú.

TABLA N°1

CLASIFICACION DE LA UNIDAD

		Valor Promedio	N° de Especímenes
Dimensión (cm)	Largo	23.5	10
	Ancho	13.2	
	Altura	9.1	
Resistencia a la compresión (Kg/cm <sup>2</sup> )		101.5	5
Succión		70 (gr/200 cm <sup>2</sup> x min.)	5
Succión luego del tratamiento(*)		15 (gr/200 cm <sup>2</sup> x min.)	5
Tipo de Unidad ITINTEC 331.018		III	18 perforaciones de 2 x 2 cms.

(\*) 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	Proporción Volumétrica	Slump	Resistencia a la Compresión (Kg/cm <sup>2</sup> )	N° de Especímenes
Mortero	1:1:5 (Cemento-cal-arena gruesa)	6"	120	41 cubos
Concreto	1:2:3 (Cemento-arena gruesa-piedra 1/2")	3"	220	15 cilindros

TABLA N°3

CARACTERISTICAS DEL REFUERZO  
(Resultados Promedios sobre 3 Especímenes)

Diámetro	Característica	$f_y$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	$f_{m\acute{a}x}$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	Elongación en 20 cm. (%)
Ø 1/4" *	liso y trefilado	----	5605	2.50
Ø 3/8"	corrugado	5070	7042	15.7
Ø 1/2"	corrugado	4884	7364	16.3

\* Este refuerzo es vendido como Ø 1/4", pero no tiene las características correspondientes.

TABLA N°4

PILAS Y MURETES  
(Resultados Promedios sobre 3 Especímenes)

Espécimen	Resistencia Promedio (*) $\bar{f}_m$ ó $\bar{v}_m$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	Valor Característico (**) $f'_m$ ó $v'_m$ (Kg/cm <sup>2</sup> )
Pila	81.3 (8.6%)	74.3
Murete	8.8 (4%)	8.45

(\*) La cantidad entre paréntesis indica el coeficiente de variación (cv).

(\*\*) Valor característico = (1 - cv)\* valor promedio.

Factor de esbeltez en pilas = 0.94 (2)

TABLA N° 5

RESULTADOS EN MUROS

(Area de Corte =  $13 \times 240 = 3120 \text{ cm}^2$ )

Muro	Primera Fisura Visible por Flexión		Primer Agrietamiento Diagonal por Corte		Capacidad Máxima		Rigidez Lateral Inicial
	$V_F$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	$d_F$ (mm)	$V_R$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	$d_R$ (mm)	$V_M$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	$d_M$ (mm)	$K_0$ (Ton/mm)
MR1	3.66	1.075	4.87	1.67	6.54	14.91 •	10.62
MR2	4.59	0.950	5.29	1.22	8.18	9.97	15.67
MR3	2.49	0.595	(*)	(*)	5.37	4.13	13.07
MR4	3.53	0.800	4.87	1.45	7.24	12.25	13.75
MR5	4.47	0.899	4.87	1.04	7.28	14.70	15.52
Ref. 1	3.78	0.95	4.69	1.40	6.25	15.00	12.35

(\*) Falla por flexión, resistencia =  $4.04 \text{ Kg/cm}^2$  asociado a un desplazamiento lateral = 1.37 mm.



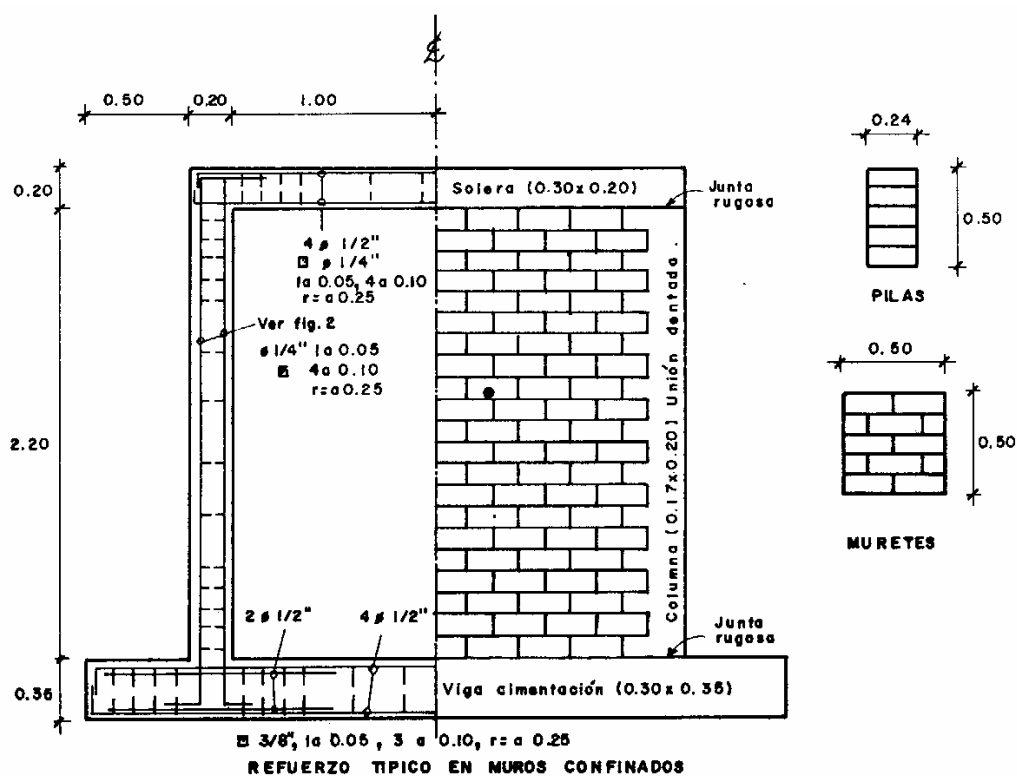


Fig. 1.- DIMENSIONES NOMINALES DE MUROS, MURETES Y PILAS  
(Aparejo de soga, espesor 13 cm, juntas 1 cm.)

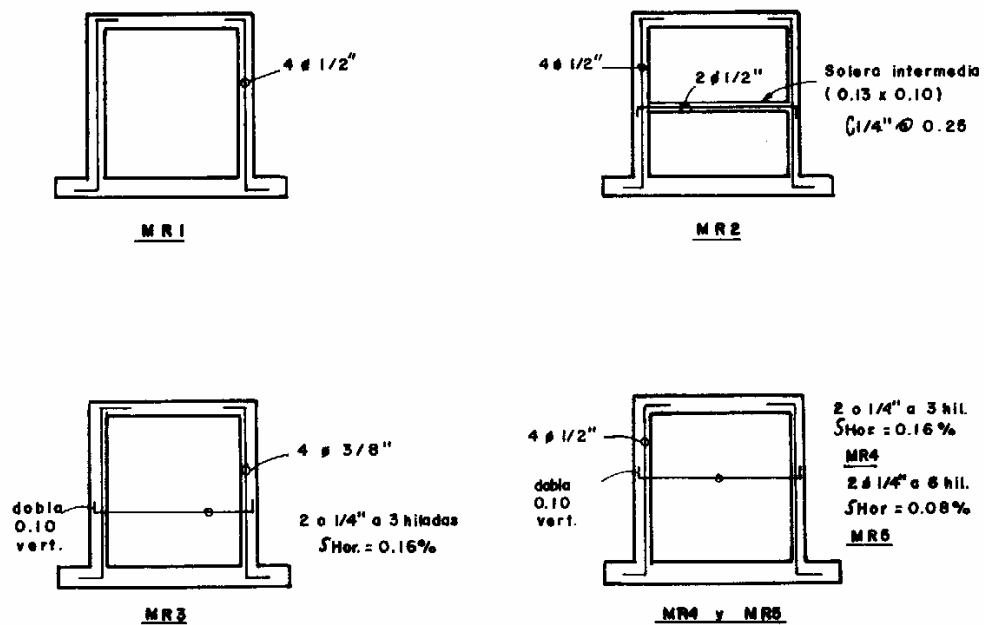


Fig. 2.- IDENTIFICACION DE MUROS Y REFUERZO ADICIONAL AL TÍPICO



FIG. 3A VISTA GLOBAL DE DISPOSITIVOS

- Actuador dinámico MTS (50 ton.)
- Minicomputadora HP 9825B
- Sistema de adquisición de datos HP 3052A
- 3 Recorder X-Y
- 6 LVDT
- 3 Gatas hidráulicas

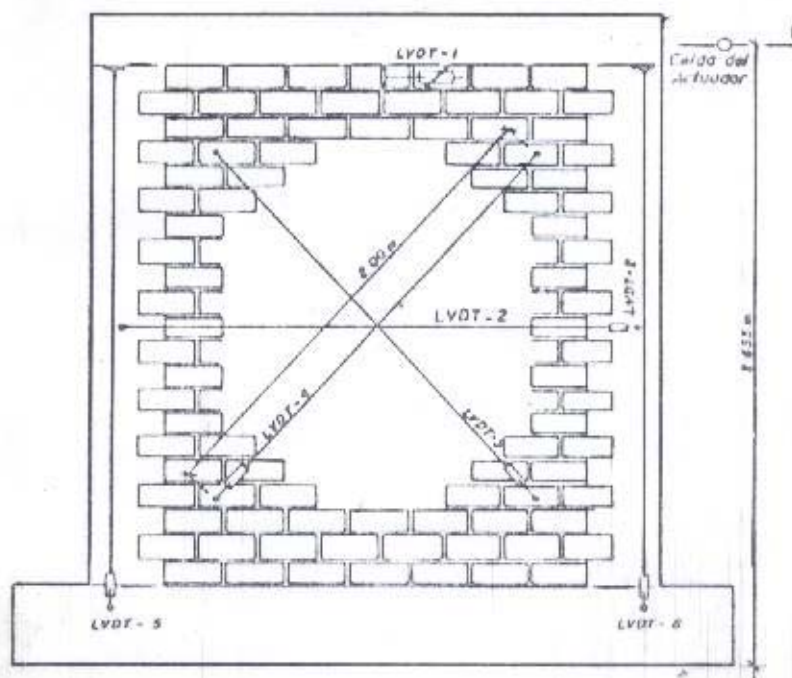
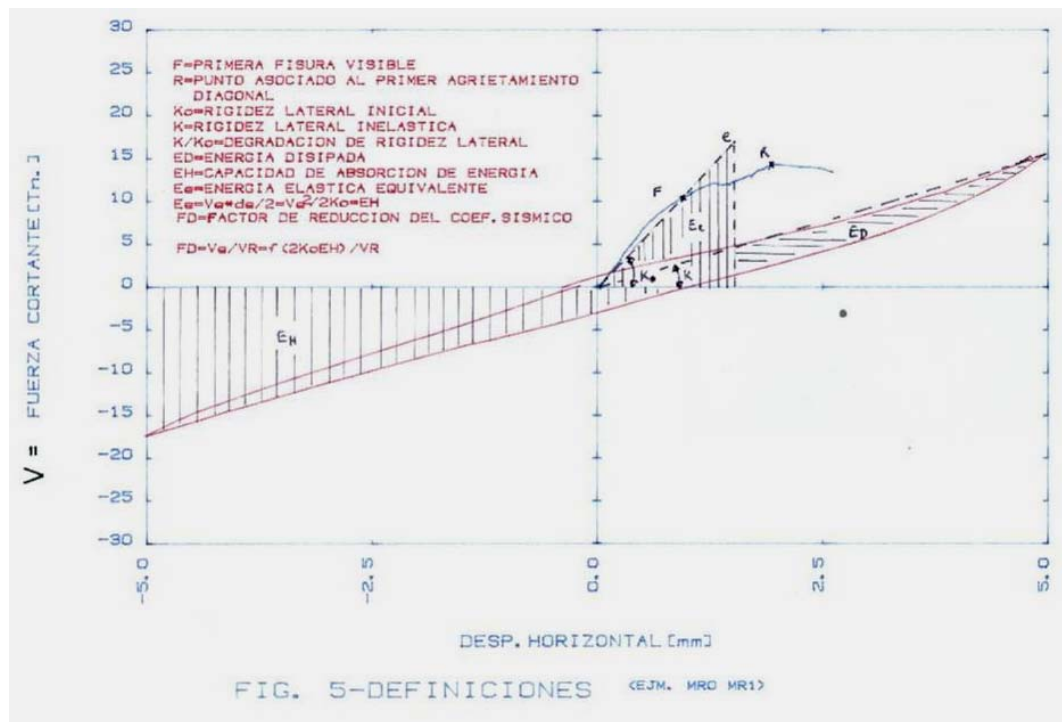
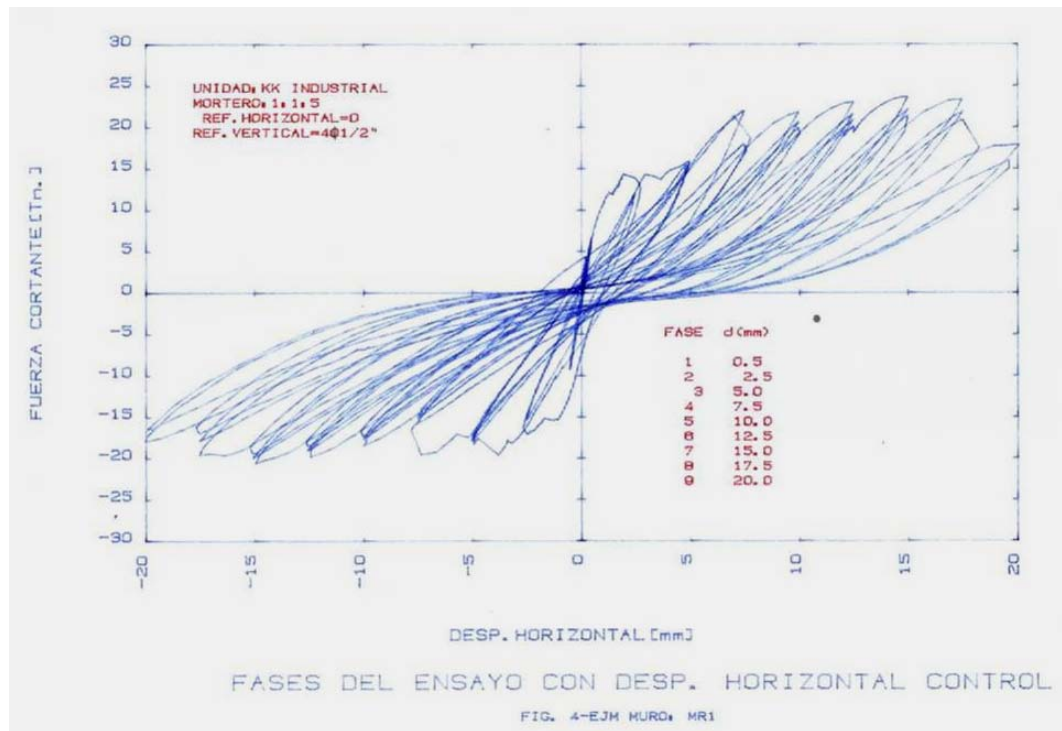
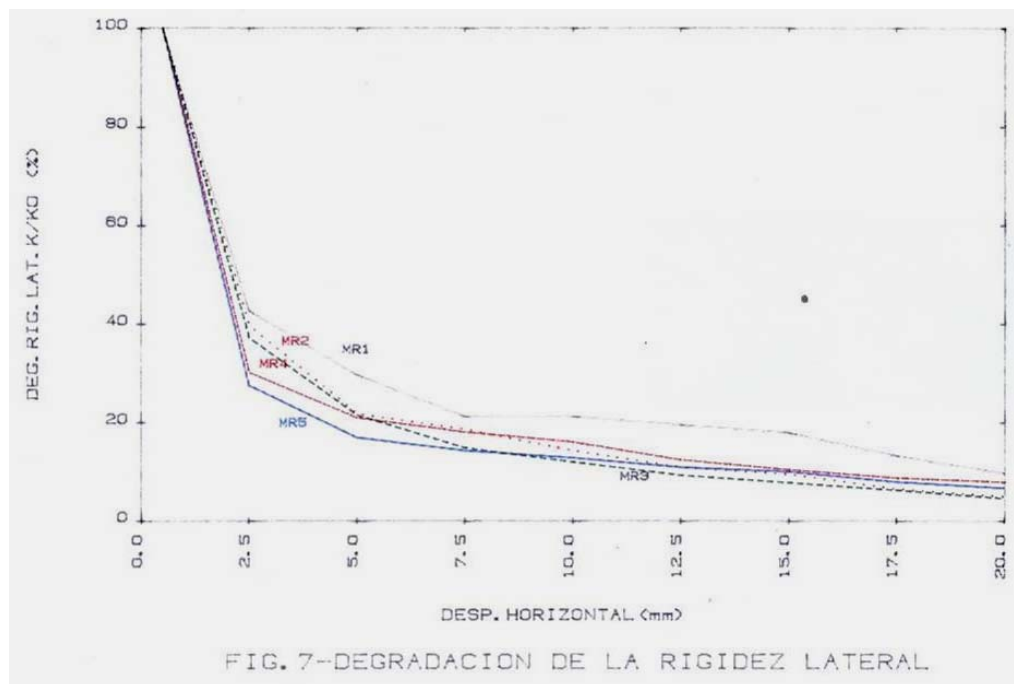
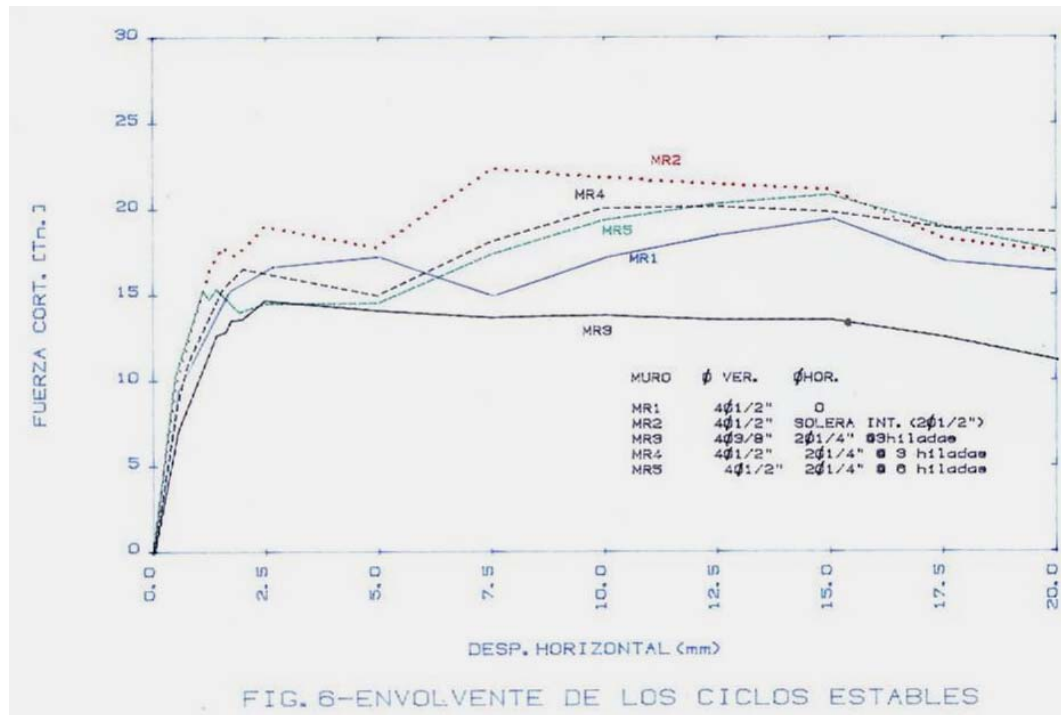


FIG. 3B UBICACION DE LOS ELEMENTOS DE MEDICION





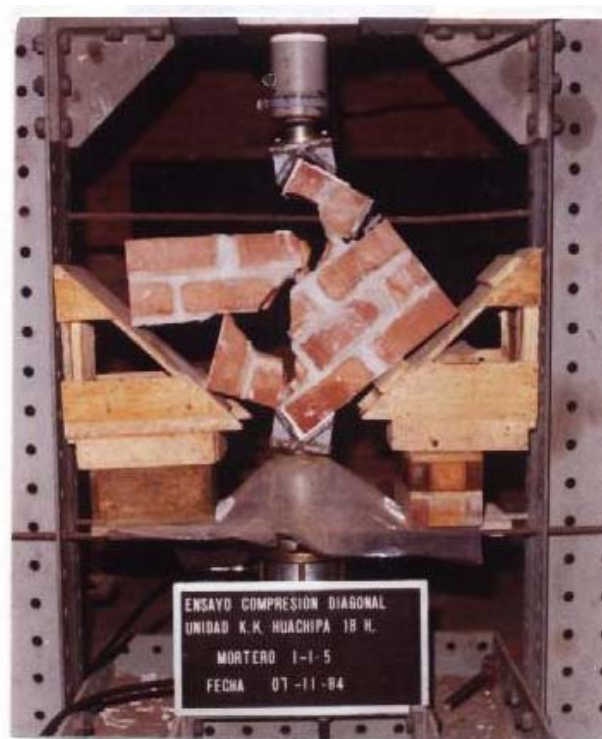
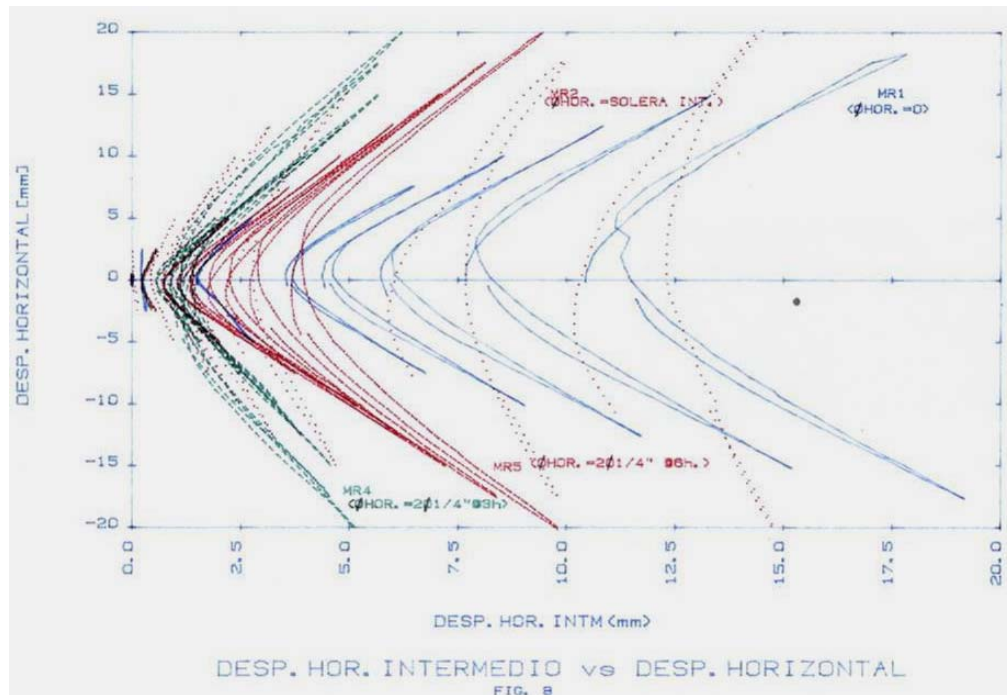


FIG. 9 FALLA TIPICA DE UN MURETE A COMPRESION DIAGONAL



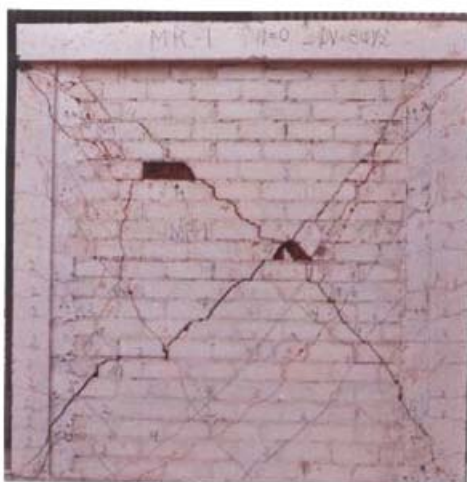


Figura 10A MR1

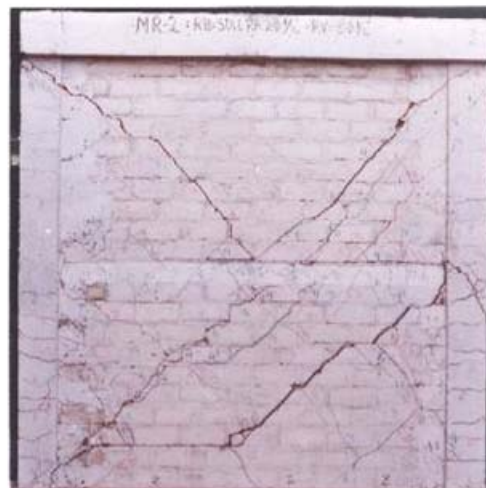


Figura 10B MR2



Figura 10C MR3



Figura 10D MR4



Figura 10E MR5

Figuras 10A a 10E. Estado de los muros al término de los ensayos.



MR1



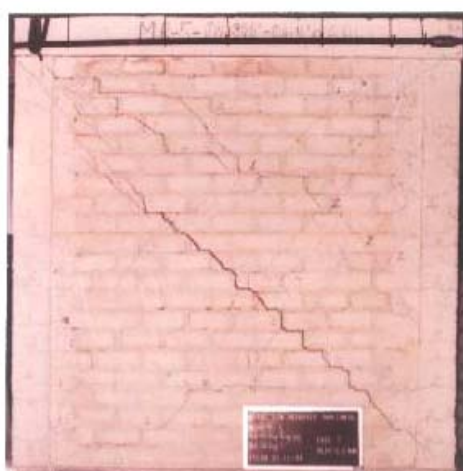
MR2



MR3



MR4



MR5

Fig.10F. Estado de los muros al aplicar  $D = +15\text{mm}$ .

$$E_s: 2'100,000 \text{ Kg/cm}^2$$

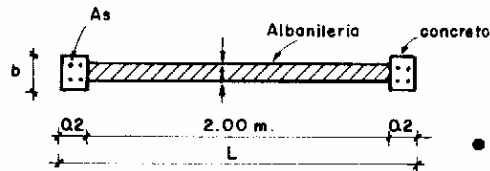
$$f_r = 2 \sqrt{f'_c}$$

$$E_c: 200,000 \text{ Kg/cm}^2$$

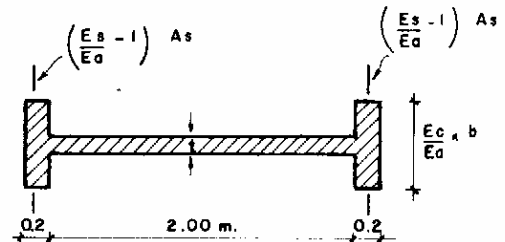
$$f_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$$

$$E_a: 500 \text{ f'm}$$

$$h = 2.3 \text{ m}$$

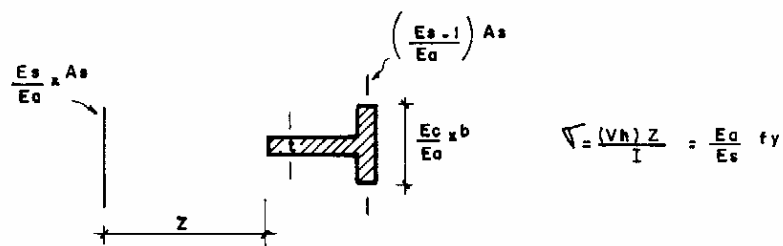


≡



$$\sigma_{max} = \frac{(VFh)(L/2)}{I} = \frac{E_a f_r}{E_c}$$

### PREDICION DE LA CARGA DE FISURACION POR FLEXION (VF)



SECCION AGRIETADA - PREDICION  
DE LA CAPACIDAD DE FLEXION EN MR3 (V).

Fig. 11.- SECCIONES TRANSFORMADAS A ALBAÑILERIA

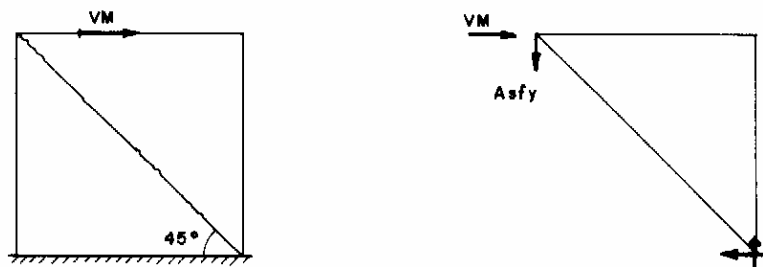


Fig. 12.- MODELO USADO PARA LA PREDICION DE LA CARGA MAXIMA (VM) EN MRI



## FIGURAS ADICIONALES AL ARTÍCULO

En el muro MR2, el daño se concentró en la conexión columna-solera intermedia. Esta situación podría haberse mejorado de haberse concentrado estribos en el nudo.



El uso de refuerzo horizontal evitó el deterioro de la albañilería, aumentando su capacidad de deformación inelástica, pero el incremento de resistencia fue muy reducido.

