

ESTUDIO DE LA CONEXIÓN COLUMNA-ALBAÑILERÍA EN MUROS CONFINADOS DISEÑADOS A LA ROTURA

Por: Italo González y Ángel San Bartolomé

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

RESUMEN

Con el objeto de estudiar el efecto de la conexión existente entre la albañilería y las columnas sobre el comportamiento sísmico de los muros confinados, se ensayaron dos muros de 2.30x2.40x0.13 m, contruidos con dos técnicas diferentes. En la primera técnica, la conexión fue dentada ("tradicional"); mientras que en la segunda, la conexión fue a "ras", adicionando "chicotes" de anclaje. Ambos muros fueron diseñados a la rotura, contemplando la falla por fuerza cortante. Para comprobar la efectividad tanto de las conexiones descritas como del método de diseño, se realizaron ensayos en dos etapas. La primera etapa fue de carga lateral cíclica coplanar y, posteriormente, en la segunda etapa, los muros (previamente agrietados por corte) fueron sometidos a ensayos de simulación sísmica perpendicular al plano, empleando la mesa vibradora del Laboratorio de Estructuras de la Universidad Católica.

INTRODUCCION

Para que un muro de albañilería confinada se comporte adecuadamente ante las acciones sísmicas, debe existir integridad en el sistema; esto es, la albañilería y el marco de concreto armado deben trabajar en conjunto. Es aquí donde radica la importancia de conseguir en la zona de interfase concreto-albañilería una gran adherencia; por esta razón, tradicionalmente se ha recurrido al empleo de conexiones dentadas entre la albañilería y las columnas. Sin embargo, cabe la posibilidad que bajo los dientes puedan formarse cangrejas y que estos dientes puedan fracturarse por el vibrado (o chuceo) del concreto, originando una fuerte degradación en la capacidad resistente de estos sistemas. De esta manera, en este proyecto se plantea como alternativa la eliminación de la conexión dentada, reemplazándola por una junta a ras con la adición de "mechas" de anclaje.

Por otro lado, el diseño mediante la Norma vigente de albañilería (Ref. 3) es elástico; sin embargo, ante la acción de sismos severos, los muros pueden fallar por fuerza cortante (Ref. 1), por lo que para evitar la degradación de resistencia es necesario diseñar adecuadamente los elementos de confinamiento. De esta manera, este proyecto también contempla el estudio experimental del método de diseño a la rotura, especificado por la Ref. 1.

1. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Empleando las Normas ITINTEC, se efectuaron una serie de ensayos sobre los materiales utilizados en este proyecto (ladrillos, mortero, etc.), obteniéndose los siguientes resultados:

1.1 Unidad de Albañilería. La unidad clasificó como Tipo III, sólida de arcilla, con dimensiones 23.5 x 13 x 9 cm y 18 perforaciones perpendiculares a la superficie de asiento. La resistencia a la compresión fue $f_b = 100 \text{ kg/cm}^2$ y la succión resultó 56 grs/200 $\text{cm}^2\text{-min}$; por lo que las unidades fueron regadas durante 25 minutos un día antes de asentarlas, disminuyendo la succión a 15 grs/200 $\text{cm}^2\text{-min}$.

1.2 Mortero. La proporción volumétrica de la mezcla (cemento portland tipo 1 - arena gruesa) utilizada fue 1:4, lo que proporcionó una resistencia a compresión igual a 116 kg/cm^2 .

1.3 Pilas. El ensayo de compresión axial sobre 8 pilas de albañilería con dimensiones $13 \times 23.5 \times 50 \text{ cm}$ (5 hiladas), proporcionó una resistencia característica a la compresión $f_m = 64 \text{ kg/cm}^2$, y un módulo de elasticidad $E = 32,637 \text{ kg/cm}^2 \approx 500 f_m$.

1.4 Concreto. El concreto de las columnas tuvo una resistencia a la compresión (f_c) igual a 182 kg/cm^2 , la mezcla empleada tuvo una proporción en volumen (cemento-arena-piedra-agua) igual a $1 : 2\frac{1}{2} : 4 : 0.8$, con una relación agua/cemento igual a 0.6 (en peso).

2. CARACTERISTICAS DE LOS MUROS CONFINADOS

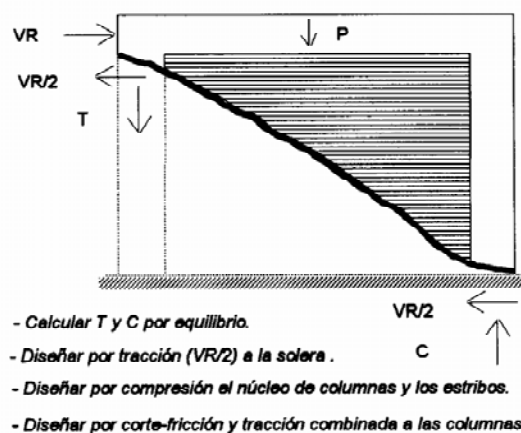
2.1 Tipos de Muros. Los muros (Fig. 1) fueron hechos de un paño y en aparejo de soga. Se utilizaron dos procedimientos distintos en la construcción:

Muro 1. El proceso constructivo fue el que tradicionalmente se sigue en estos sistemas: primero se levantó la albañilería, considerando una conexión dentada ($\frac{1}{2}$ ladrillo) entre la columna y la albañilería; posteriormente, se procedió con el vaciado de las columnas y solera. Cabe señalar que a pesar de usarse un vibrador, estribos con $1\frac{1}{4}$ de vuelta (sin ganchos) y piedras de tamaño menores de $\frac{1}{2}$ " en el concreto, se presentaron cangrejeras en la zona superior de una de las columnas (bajo los dientes), las que se repararon introduciendo mortero 1:3 a presión manual.

Muro 2. En este muro se siguió el siguiente procedimiento constructivo: primero se levantó la albañilería, dejando en las juntas horizontales (cada dos hiladas) un "chicote" de acero de $\frac{1}{4}$ " (Fig. 2), asimismo, las unidades fueron recortadas para obtener una conexión a ras entre la albañilería y las columnas; finalmente, se procedió con el vaciado del concreto de las columnas y solera.

Los "chicotes" estuvieron embutidos 50 cm en la albañilería (para situaciones reales puede usarse 40 cm, por el confinamiento que proporcionan las cargas verticales) y 15 cm en la columna más un gancho vertical a 90° de 10 cm; este dobléz fue vertical en previsión de fallas horizontales que por flexión podrían formarse en las columnas. Para calcular las longitudes de anclaje, se realizaron ensayos de adherencia utilizando un prisma de albañilería compuesto por 2 unidades en cuya junta se colocó el "chicote" (Fig. 3). Por otro lado, el espaciamiento (20 cm o cada 2 hiladas) de los "chicotes" fue hecho de tal manera de obtener una cuantía de acero mayor que 0.1%.

2.2 Diseño. El método seguido para el diseño de ambos muros fue el de rotura (especificado por la Ref. 1), que básicamente consiste en diseñar los elementos de confinamiento de manera que puedan soportar la carga teórica que produce el agrietamiento diagonal ($VR = 0.5 \sqrt{f_m t L} = 0.5 \times \sqrt{64 \times 13 \times 240} = 12480 \text{ kg}$). De esta forma se obtuvo (Fig. 1): $4 \phi \frac{1}{2}$ " con $\square \frac{1}{4}$ ", 1 a 5 cm, 5 a 7.5 cm, resto a 25 cm, en cada columna de $13 \times 20 \text{ cm}$; y, $4 \phi \frac{3}{8}$ " con $\square \frac{1}{4}$ ", 1 a 5 cm, 4 a 10 cm, resto 25 cm en la solera de $13 \times 20 \text{ cm}$.



3. PRIMERA ETAPA EXPERIMENTAL : ENSAYO DE CARGA LATERAL CICLICA

En esta etapa se aplicó carga lateral cíclica en el plano de los muros, mediante un actuador dinámico. El desplazamiento horizontal de la solera fue controlado en varias fases, de 3 ciclos cada una hasta estabilizar el lazo histerético. En las dos primeras fases, los desplazamientos fueron predeterminados, considerando los puntos para los cuales se esperaban fisuras importantes (fisura por flexión, primera grieta diagonal). Las fases fueron:

FASE #	1	2	3	4	5	6	7
DESPLAZAMIENTO (mm)	0.50	2.65	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0

3.1 Descripción del Comportamiento de los Muros. En ninguno de los muros se produjeron fisuras en la primera fase del ensayo. En la segunda fase ocurrió, en ambos muros, la falla por flexión; esta fisura se presentó a la altura de las hiladas inferiores. La falla por corte se presentó, en los dos muros, durante la tercera fase. Al término del ensayo, el patrón de agrietamiento de ambos muros fue prácticamente similar, con excepción de una falla local que se presentó en el Muro 1; por otro lado, las columnas de los dos especímenes quedaron en buen estado (Figs. 4 y 5).

En el Muro 1 se produjo en la zona superior derecha (zona de cangrejas) la separación entre la columna y la albañilería. Esta separación se inició en la tercera fase y siguió agrandándose en las fases posteriores; esta falla local produjo una fuerte degradación de carga, la que puede observarse en la rama negativa del lazo histerético mostrado en la Fig. 6. En el Muro 2, no se presentaron fisuras en la zona de conexión concreto-albañilería.

3.2 Predicción de Resultados. Se siguieron los criterios indicados por la Ref. 1:

Análisis Elástico. El estudio teórico del comportamiento de los muros en el rango elástico se realizó utilizando el criterio de la sección transformada (transformando las columnas en elementos equivalentes de albañilería), suponiendo que el muro se comportaba como un elemento en voladizo, deformable por flexión y corte. Teóricamente, se trabajó con $E = 500 \text{ f'm} = 500 \times 64 = 32000 \text{ kg/cm}^2$, $G = 0.4 E$ y $E_c = 180000 \text{ kg/cm}^2$ (probetas de concreto), obteniéndose:

VALORES TEORICOS			VALORES EXPERIMENTALES			
Ko	G	$\theta (x10^{-5})$	MURO	Ko	G	$\theta (x10^{-5})$
11220	12800	7.55	1	9636	16637	7.58
			2	9988	13166	6.29

donde: Ko = Rigidez lateral inicial (kg/mm)

G = Módulo de corte (kg/cm²)

θ = Angulo de rotación por flexión para una carga elástica determinada

Predicción de la Primera Fisura por Flexión (punto 'f'). Para la determinación teórica de la carga asociada al punto "f", se utilizó el criterio de la sección transformada no agrietada. Se evaluó, por resistencia de materiales, el esfuerzo de tracción máximo al cual estaba sujeto el muro, para luego igualarlo a la capacidad de tracción del concreto ($2 \sqrt{f_c}$) transformada a albañilería. Los resultados fueron los siguientes:

VALORES TEORICOS		VALORES EXPERIMENTALES		
Vf (kg)	df (mm)	MURO	Vf (kg)	df (mm)
8250	0.74	1	10618	1.68
		2	10466	1.95

Evaluación de la Resistencia al Corte (VR). La resistencia teórica al corte, asociada al primer agrietamiento diagonal, se evaluó mediante la expresión $VR = 0.5 \sqrt{f_m} t L$ (ver 2.2), correspondiente a una distorsión angular de 1/800 (equivalente en este caso a $dR = h/800 = 2200/800 = 2.75 \text{ mm}$). Los resultados fueron:

VALORES TEORICOS	
VR (kg)	dR (mm)
12480	2.75

VALORES EXPERIMENTALES		
MURO	VR (kg)	dR (mm)
1	11515	2.42
2	12570	4.01

3.3 Comparación del Comportamiento de los Muros. Obviando la rama negativa de la curva cortante-desplazamiento del Muro 1, por la falla local que tuvo (ver 3.1), en la Fig. 7 puede apreciarse que el comportamiento elástico y elastoplástico de los dos muros son prácticamente similares. Por lo que la técnica de construcción empleada en el Muro 2 no afectó ni la rigidez ni la resistencia. Por otro lado, para desplazamientos mayores al límite de reparabilidad indicado en la Ref. 1 ($h/200 = 11$ mm), se obtuvo un buen comportamiento, lo que indica que el proceso de diseño seguido resultó adecuado.

4. SEGUNDA ETAPA EXPERIMENTAL: ENSAYO DINAMICO

El objetivo de este segundo ensayo fue investigar si los muros agrietados previamente por corte eran capaces de soportar acciones sísmicas ortogonales a su plano. Para esto, los muros fueron arriostrados con elementos metálicos sobre el simulador de sismos (Fig. 8), de manera que tanto la cimentación como la solera no tuvieran movimiento relativo respecto a la plataforma. La solera se fijó con el objeto de simular el arriostramiento proporcionado por el techo en las edificaciones reales, cuyo desplazamiento está limitado por los muros transversales a la dirección en estudio.

4.1 Técnica de Ensayo. Se utilizó un total de 10 acelerómetros y 11 LVDT dispuestos en la albañilería y en las columnas. Como señal sísmica se empleó el terremoto del 31 de Mayo de 1970 (frecuencia predominante = 2.4 Hz). El ensayo se realizó en varias fases, controlando la amplitud máxima del desplazamiento de la mesa (D_p), lo que dio lugar a aceleraciones A_p en la plataforma. Las fases realizadas involucraron sismos leves, moderados y severos, hasta alcanzar condiciones extremas. Se realizaron 6 fases para el Muro 1 y 3 fases para el Muro 2. Antes de iniciar cada fase, se hicieron ensayos de vibración libre, consistentes en la aplicación de cuatro pulsos basales, mediante los cuales se determinaron: el período fundamental y el amortiguamiento de los muros ante acciones transversales a su plano.

4.2 Resultados:

Período (T) y Amortiguamiento (β). Teóricamente, Ref. 2, el período natural del muro no agrietado ante acciones transversales a su plano pudo estimarse en 0.041 seg, suponiendo que ellos estaban simplemente apoyados en sus bordes. Experimentalmente, T y β fueron calculados empleando la respuesta de un acelerómetro colocado en la parte central del paño de albañilería; obteniéndose:

FASE	D_p (mm)	A_p (g)	T(seg)	β (%)
Muro 1:				
1	9.33	0.1032	0.1000	9.32
2	18.64	0.2069	0.1025	9.46
3	31.90	0.3430	0.1063	8.25
4	56.58	0.5868	0.1075	9.69
5	86.77	0.8912	0.1088	8.49
6	90.44	1.4148	0.1100	6.79
			0.1125	7.27
Muro 2:				
1	30.45	0.3376	0.1000	9.40
2	85.28	0.8791	0.1025	9.40
3	96.55	1.3756	0.1050	9.17
			0.1088	8.40

Descripción del Comportamiento de los Muros. En ambos muros, pudo observarse que durante el ensayo dinámico no se generaron fisuras de mayor importancia que las producidas por corte en la primera etapa; y, mucho menos, el vaciamiento de la albañilería.

Distribución de las Fuerzas de Inercia. Las fuerzas actuantes sobre cada muro fueron obtenidas multiplicando el registro de aceleración correspondiente a cada acelerómetro por su masa tributaria. La distribución de las fuerzas en cada muro fue prácticamente trapezoidal, con valores máximos en la parte superior. La resultante de estas fuerzas (R_1 , R_2) y el coeficiente sísmico promedio $c = R/W$; donde W = peso del muro = 1400 kg y $R = (R_1+R_2)/2$ fueron:

A_p (g)	0.10	0.21	0.34	0.59	0.89	1.39
Muro 1. R_1 (kg)	198	405	706	1295	2249	2478
Muro 2. R_2 (kg)	---	---	588	---	1620	2262
c	0.14	0.29	0.46	0.93	1.16	1.69
c/A_p (1/g)	1.40	1.38	1.35	1.58	1.30	1.22

5. CONCLUSIONES

- Pudo lograrse el propósito de la investigación, en la cual se pretendía demostrar que el comportamiento elástico e inelástico de un muro con conexión a ras (incluyendo una cuantía de 0.1% de "chicotes" entre la columna y la albañilería) sometido a fuerzas coplanares y perpendiculares a su plano es muy similar al comportamiento de un muro con conexión dentada, tradicionalmente empleado en nuestro país.
- Con el empleo de la conexión a ras (con "chicotes"), se logró una gran adherencia en la zona de interfase columna-albañilería, manteniéndose de esta forma la integridad del sistema. La adición de los "chicotes" de anclaje en el Muro 2, incrementaron en un bajo porcentaje (0.87%) el costo de este muro en relación al Muro 1.
- La conexión dentada empleada en el Muro 1, produjo cangrejas bajo los dientes en la zona superior de la columna ubicada en la parte derecha del muro, lo que motivó que durante el ensayo estático la columna se separara de la albañilería en esa zona (Fig. 4), originando una considerable disminución en la capacidad resistente del muro. Cabe aclarar que la degradación de resistencia en el Muro 1, fue notoria sólo en la rama negativa (carga de derecha a izquierda) de la gráfica cortante-desplazamiento (Fig. 6). Esto se debe a que al empujar el muro (de izquierda a derecha) se produjo un huelgo en la zona de cangrejas; luego, al aplicar carga en reversa, este huelgo trató de cerrarse, por lo que el único elemento que opuso resistencia fue la columna derecha. Este problema no se presentó en el Muro 2, con conexión a ras.
- Las predicciones especificadas por la Ref. 1, para el cálculo de la rigidez lateral y para la evaluación de las cargas y desplazamientos asociados a la primera fisura por flexión y al primer agrietamiento diagonal, pudieron verificarse experimentalmente en este proyecto. Asimismo, los muros diseñados mediante la teoría de rotura, descrita en la Ref. 1, tuvieron buen comportamiento, incluso para distorsiones angulares mayores al límite de reparabilidad indicada por dicha referencia, por lo que se concluye que esta teoría de diseño es adecuada.
- El marco de confinamiento de los muros con conexión a ras o dentada, constituyó un sistema efectivo de arriostre ante cargas perpendiculares al plano, siendo capaces de resistir aceleraciones basales de hasta 1.4 g. Esto se debe a que aun estando agrietada la albañilería, el muro tuvo un amortiguamiento elevado (entre 6 y 10%) y continuó siendo un sistema rígido ante acciones ortogonales al plano, con una frecuencia natural muy lejos de la condición de resonancia. En este proyecto, la frecuencia natural de la albañilería agrietada fue de 10 Hz, en tanto que los sismos registrados en suelo duro tienen una frecuencia predominante del orden de 3 Hz. Por otro lado, las fuerzas de inercia, transversales al plano de los muros agrietados, tuvieron una distribución trapezoidal, y su resultante pudo predecirse usando un coeficiente sísmico igual a la aceleración de la plataforma (en fracción de "g") amplificada por un factor de 1.4

- f.- Los muros ensayados en este proyecto fueron de forma cuadrada, es posible que en muros donde los arriostres verticales estén distanciados dos veces la distancia entre los arriostres horizontales (valor máximo reglamentario), la acción de confinamiento ejercida por las columnas en la zona central de la albañilería puede perderse. Por lo tanto, se sugiere continuar este trabajo ensayando muros de forma rectangular.

REFERENCIAS

1. Libro 4 de la Colección del Ingeniero Civil. CIP, 1991. Por Angel San Bartolomé.
2. Vibration Problems in Engineering. Wiley, 1974. Por S. Timoshenko, D. Young y W. Weaver
3. Normas Técnicas de Edificación E-070. Albañilería. ININVI. 1982.

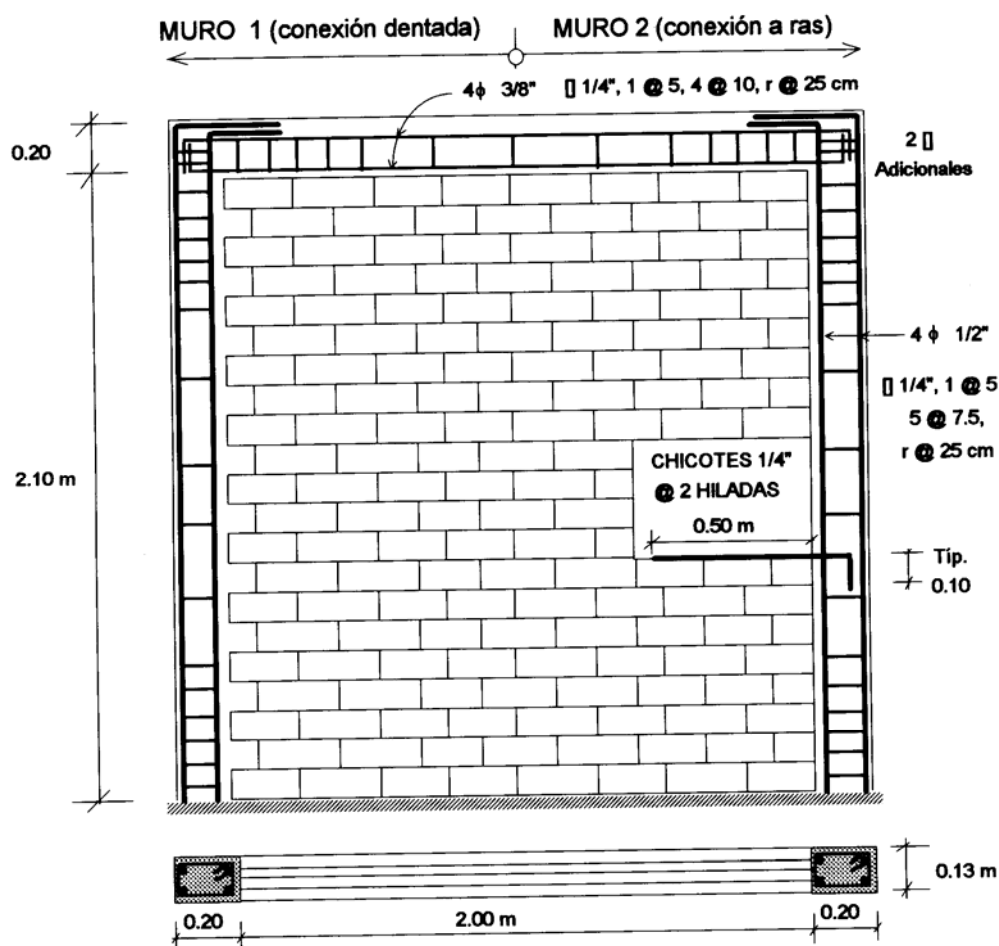


Fig.1. Características de los Muros 1 y 2.



Fig.2. Chicote de anclaje en el Muro 2.

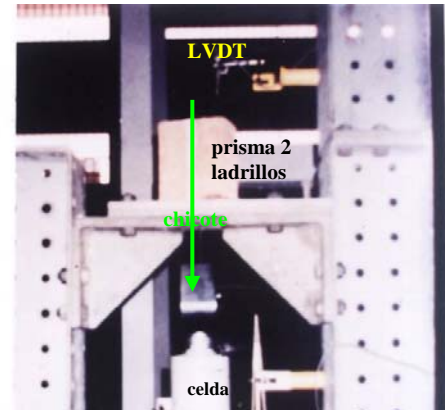


Fig.3. Ensayo de adherencia del chicote.

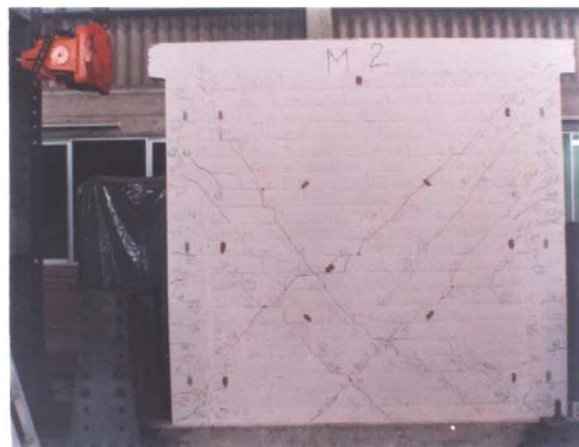
Fig.4

Ensayo estático del Muro 1 al instante de aplicar $D = -12.5\text{mm}$.



Fig.5

Muro 2 al término del ensayo estático.



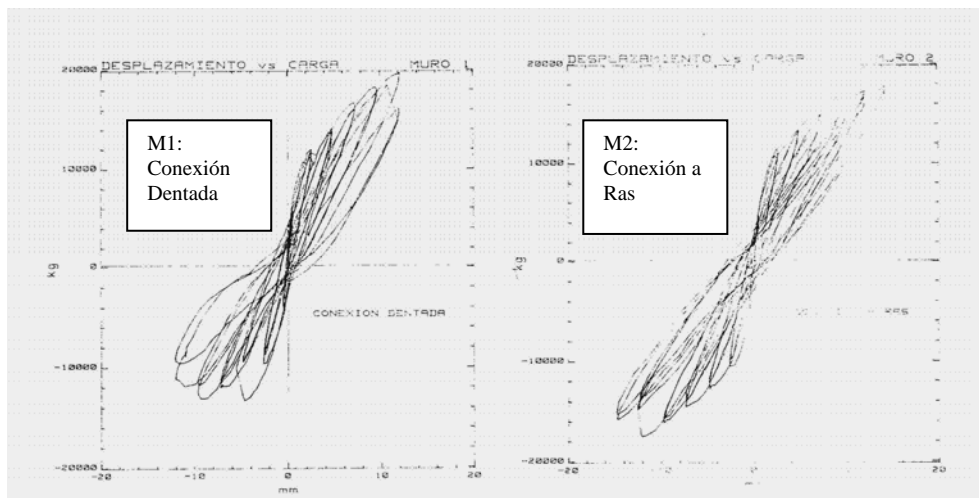


Fig.6. Gráficas Cortante-Desplazamiento. Muro 1 (izq.) y Muro 2 (der.)

Fig.7

Envolvente cortante-desplazamiento del primer ciclo.

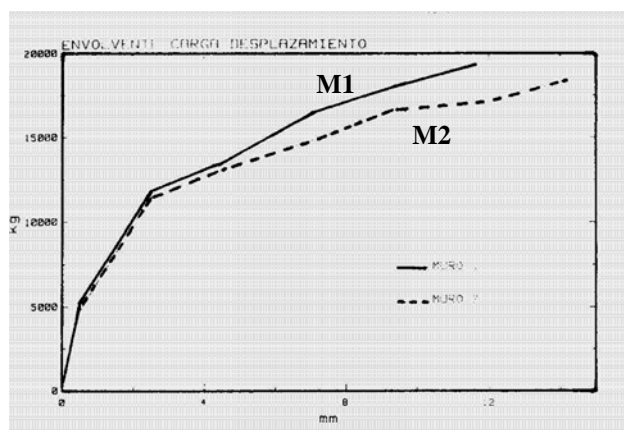
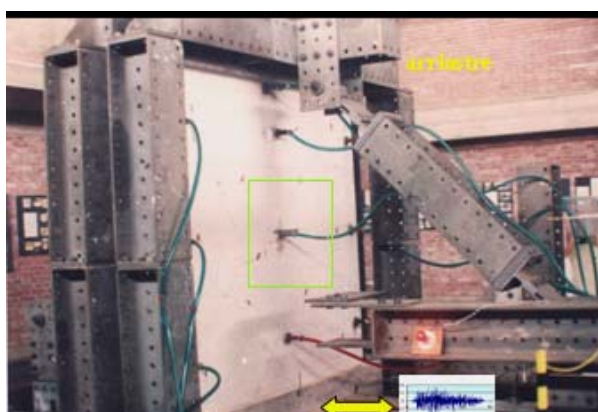


Fig.8

Ensayo sísmico perpendicular al plano del muro agrietado previamente por corte.



FOTOS ADICIONALES AL ARTÍCULO

La conexión dentada tradicional puede causar 3 problemas, por estas razones es conveniente que los dientes no se extiendan una longitud mayor que 5cm, o utilizar junta a ras con chicotes.

Rotura del diente al compactar el concreto de la columna, y cangrejera debajo del diente.



Acumulación de desperdicios del mortero de asentado. Cuando no se eliminan antes de vaciar el concreto, se forman juntas frías en la conexión columna-albañilería.



Conexión a Ras y
Mechas de anclaje



Conexión dentada con
dientes de 5cm, limpios