

ENSAYO DINÁMICO PERPENDICULAR AL PLANO DE MUROS DE ALBAÑILERÍA CONFINADA PREVIAMENTE AGRIETADOS POR CORTE

Por: Clelia Vegas, Wilson Silva y Ángel San Bartolomé
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

1. INTRODUCCION Y OBJETIVO

En el Laboratorio de Estructuras de la PUCP, se realizó un ensayo de simulación sísmica perpendicular al plano de dos muros de albañilería confinada, construidos a escala reducida con diferentes técnicas. Estos muros habían sido previamente ensayados a carga lateral cíclica contenida en su plano; por lo que el objetivo del trabajo fue investigar si los muros severamente agrietados por corte, eran capaces de soportar acciones sísmicas ortogonales a su plano.

2. CARACTERISTICAS DE LOS ESPECIMENES

En la Fig. 1, se muestran las características de los especímenes (Muro 2 y Muro 3) a escala reducida (1:2.4). Estos muros fueron hechos variando la secuencia constructiva en la conexión columna-albañilería (en ningún caso fue dentada). El objetivo de tener una conexión a ras, fue el de evitar la formación de cangrejeras, así como la rotura de las unidades en la zona dentada, defectos que suelen presentarse en las construcciones tradicionales.

En el Muro 2, se construyó primero el paño de albañilería y luego las columnas de confinamiento; mientras que en el Muro 3, se usó un proceso inverso. Posteriormente, en los 2 muros se construyeron las soleras. En el Muro 3, se utilizaron "mechas" de alambre # 16 cada 3 hiladas, con el propósito de evitar el vaciamiento de la albañilería por acciones perpendiculares a su plano.

Las características de los materiales empleados fueron:

2.1 UNIDADES. Las unidades de albañilería empleadas, provinieron de ladrillos sólidos de arcilla tipo V, recortados en tres partes (11x7x6 cm); estas unidades fueron dispuestas en aparejo de soga de 7 cm de espesor, de manera que los lados recortados no formaran parte de la superficie por asentar. Los principales resultados fueron:

Compresión: $f'c = 197 \text{ kg/cm}^2$

Succión: 51 gr/200 cm²-min (regadas un día antes de asentárlas, disminuyó a 17 gr/200 cm²-min)

2.2 MORTERO. El mortero tuvo una dosificación volumétrica cemento: arena, de 1:4. La resistencia promedio a compresión fue 57 Kg/cm². Debido al pequeño espesor de las juntas (8 mm), la arena tuvo que tamizarse entre las mallas ASTM # 10 y 200.

2.3 CONCRETO. Se utilizó concreto fluido (slump = 10") con $f'c = 234 \text{ kg/cm}^2$ en las columnas de confinamiento (7x7 cm).

2.4 PILAS. Se ensayaron a compresión axial 8 Pilas de 7x11x33 cm (5 hiladas), obteniéndose por resultados:

Resistencia característica a la compresión $f'm = 77 \text{ kg/cm}^2$
Módulo de Elasticidad $E = 40,000 \text{ kg/cm}^2$

2.5 MURETES. Se ensayaron a compresión diagonal 6 Muretes de 7x34x36 cm (5 hiladas), obteniéndose por resultados:

Resistencia característica a compresión diagonal $v'm = 8.60 \text{ kg/cm}^2$
Módulo de corte $G = 12,900 \text{ kg/cm}^2$

3. ENSAYOS PREVIOS DE CORTE

Los muros fueron ensayados a corte, aplicando sobre la solera una carga lateral cíclica coplanar al muro con 6 fases de desplazamiento horizontal controlado, llegándose a registrar distorsiones angulares hasta de 1/100 (condiciones extremas), valor que supera al límite de reparabilidad especificado en la Ref.3 (1/200). El estado agrietado en que quedaron los muros, puede apreciarse en las Figs.2 y 3. Mayores detalles sobre el ensayo estático pueden verse en la Ref.1.

4. ENSAYO DINAMICO PERPENDICULAR AL PLANO DEL MURO

Para la etapa dinámica del ensayo, los muros fueron anclados sobre la plataforma del simulador de sismos (mesa vibradora), de manera que tanto la cimentación como la solera no tuvieran movimiento relativo respecto a la plataforma, esto se logró utilizando pórticos de acero (Fig.4). El objetivo de fijar la solera, fue el de tratar de simular el arriostramiento generado por los muros transversales, existentes en edificaciones reales.

Las señales sísmicas empleadas fueron: el terremoto del 31 de Mayo de 1970 (frecuencia predominante = 2.4 Hz) y dos señales armónicas de frecuencias 5 y 7 Hz. El ensayo se realizó en varias fases (sismos leves a severos), controlando la amplitud máxima del desplazamiento de la mesa (D nominal), lo que dio lugar a aceleraciones Ap en la plataforma. Las características de las señales aparecen en la Fig.8, y en la Tabla siguiente:

| SEÑAL | FASE | D nominal (mm) | Ap max (g) | DURACION (seg) |
|-----------------|------|-------------------------|------------|----------------|
| Sismo Mayo 70 | 1 | 10.0 | 0.09 | 26.5 |
| " | 2 | 30.0 | 0.27 | 26.5 |
| " | 3 | 50.0 | 0.49 | 26.5 |
| " | 4 | 75.0 | 0.73 | 26.5 |
| " | 5 | 100.0 | 0.98 | 26.5 |
| " | 6 | 120.0 | 1.15 | 26.5 |
| " | 7 | 120.0 | 1.18 | 26.5 |
| " | 8 | 140.0 | 1.44 | 26.5 |
| Armónica - 5 Hz | 9 | 11.4 | 1.40 | 20.0 |
| Armónica - 7 Hz | 10 | 6.4 | 1.47 | 21.0 |
| " | 11 | n o r e g i s t r a d o | | |
| " | 12 | 7.2 | 1.69 | 21.0 |

Nota: El cálculo del período fundamental de vibración se determinó aplicando pulsos al inicio de cada fase.

4.1. COMPORTAMIENTO CUALITATIVO DE LOS MUROS

En las fases 1 a 7 (leves a severas), el movimiento de los muros fue similar al de un sólido rígido y no se apreció la formación de fisuras adicionales a las existentes.

En la Fase 8 (muy severa), del sismo Mayo 70, se apreció la formación de una fisura horizontal tanto en el centro del muro como en la penúltima hilada, mientras que entre la solera y la albañilería no se presentaron fisuras.

Puesto que se deseaba llevar a los muros hasta la condición de colapso, hubo que cambiar la señal. Esta vez, en las fases 9 a 12, se aplicaron movimientos armónicos con frecuencias cercanas a la condición de resonancia de los muros; así por ejemplo, la frecuencia propia de los muros 2 y 3, antes de la Fase 12, fueron 6 y 8 Hz, respectivamente. Ver Fig.9.

En la Fase 11 (muy severa), se observó que partes de la albañilería, prácticamente sueltas, interactuaban entre sí, sin llegar a volcar, quedando las aristas de las unidades muy dañadas tal como se aprecia en la Fig.5.

Cuando se aplicó al sistema una señal demasiado severa (Fase 12) el Muro 2 colapsó, mientras que el Muro 3 quedó en pie, pero su estado podría calificarse de inestable. En las Figs. 6 y 7, se aprecia el estado final de los muros, puede notarse que las columnas no tuvieron mayor deterioro respecto al ensayo estático; por lo cual se afirma que ellas funcionaron como elementos de arriostre al ser más rígidas que la albañilería.

4.2. PROCESAMIENTO DE RESULTADOS

En la parte central de cada muro se colocó un acelerómetro, para medir la aceleración absoluta. Esta información fue procesada gráficamente según se muestra en la Fig.9. En la Tabla siguiente, aparecen los valores máximos de la respuesta y los períodos (T) antes de aplicar la solicitud respectiva.

| SEÑAL Y FASE | D max. (mm) | A mesa (g) | PICO DE RESPUESTA (g) | | | |
|-----------------|----------------|---------------|-----------------------|--------|---------|--------|
| | | | MURO 2 | T(seg) | MURO 3 | T(seg) |
| Mayo 70-F2 | 27.3 | 0.27 | 0.29 | 0.038 | 0.40 | 0.077 |
| Mayo 70-F4 | 68.6 | 0.73 | 0.80 | 0.055 | 1.06 | 0.090 |
| Mayo 70-F8 | 128.5 | 1.44 | 2.92 | 0.083 | 2.72 | 0.117 |
| Arm.5 Hz-F9 | 11.4 | 1.40 | 3.35(*) | 0.083 | 3.35(*) | 0.117 |
| Arm.7 Hz-F12 | 7.2 | 1.69 | 6.70(*) | 0.180 | 4.53 | 0.120 |

(*) : Representan máximo valor registrado; en este caso la capacidad de captación del acelerómetro fue excedida.

5. EXTRAPOLACION DE RESULTADOS A MUROS DE ESCALA NATURAL

De lo anterior se puede inferir, que para producir el colapso en los muros, debe aplicarse señales totalmente irreales (sumamente severas); esto es, los sismos reales no tienen frecuencias de 7 Hz; asimismo, la aceleración máxima de los sismos peruanos no exceden a 0.40 g, mientras que a los especímenes se les tuvo que aplicar aceleraciones de hasta 1.7 g.

Lógicamente estos resultados deben ser modificados debido a la escala empleada a fin de extrapolar los resultados a muros reales, ya que los períodos de vibración entre ambos sistemas son diferentes.

Dada la imposibilidad de analizar un muro previamente agrietado, el análisis teórico tuvo que realizarse suponiendo un comportamiento elástico del sistema. El factor de escala (para la solicitud) se determinó igualando los esfuerzos normales máximos (σ) entre los muros a escala natural y reducida, para esto se siguieron 2 técnicas:

5.1. Técnica de Extrapolación 1 - Estática -

Se trata de que un muro a escala natural, ya agrietado, pueda soportar el coeficiente sísmico reglamentario ($C = 0.35$). En adelante se denominará con letras minúsculas a las características del muro pequeño y con mayúsculas, a las del muro real (escala natural).

| | Escala Reducida | Muro Real |
|---------------------------|-----------------|-----------|
| Espesor | b | B |
| Altura | h | H |
| Peso Volumétrico | Γ | Γ |
| Momento Flector | m | M |
| Coeficiente de Momentos | β | β |
| Coeficiente Sísmico | c | C |
| Esfuerzo Normal | σ | σ |
| Período Natural de Vibrar | t | T |

En el muro a escala reducida (de ancho unitario):

La carga repartida es: $w = c \Gamma b$

$$\text{Con lo que : } m = \beta w h^2 = \beta (c \Gamma b) h^2 \\ \sigma = 6 m / b^2 = 6 \beta c \Gamma h^2 / b$$

Similarmente, en el muro real (de ancho unitario):

$$\sigma = 6 M / B^2 = 6 \beta C \Gamma H^2 / B$$

Al igualar esfuerzos en ambos sistemas, se obtiene:

$$c = C (b/B) (H/h)^2$$

De acuerdo a las características de los muros:

$$\begin{aligned}
 C &= 0.35 \text{ (valor reglamentario en un muro real)} \\
 b &= 0.07 \text{ m (espesor del espécimen)} \\
 B &= 0.14 \text{ m (espesor del muro real en aparejo de soga)} \\
 h &= 1.03 \text{ m (altura del espécimen)} \\
 H &= 2.40 \text{ m (altura usual de un muro real)}
 \end{aligned}$$

$$\text{Con lo cual: } c = 0.35 \times (0.07/0.14) \times (2.4/1.03)^2 = 0.95$$

Este resultado nos indica que, el coeficiente sísmico en el muro a escala reducida debe ser por lo menos igual a 0.95, a fin de lograr el coeficiente sísmico del reglamento (0.35) en los muros reales; esto es, el factor de escala (para la solicitud) resulta ser $0.95/0.35 = 2.71$. El valor experimental del coeficiente sísmico en el muro a escala reducida, fue encontrado de la siguiente manera:

$$c = \text{Cortante Total} / \text{Peso} = (\text{Masa} * a) / (\text{Masa} * g) = a / g$$

Donde "a" es la aceleración absoluta del muro, uniformizada a lo largo de su altura. Denominando A y A_p a la aceleración (en fracción de la gravedad) en la parte central del muro y en la plataforma respectivamente, puede determinarse "a". Para esto se supuso una distribución de aceleraciones relativa de forma parabólica (valor máximo: $A - A_p$), luego igualando el área de la parábola (agregando la aceleración de la plataforma) a la de un rectángulo (carga uniforme equivalente), se obtiene:

$$(a/g) h = c h = \{2/3 (A - A_p) + A_p\} h = (2/3 A + 1/3 A_p) h$$

$$\text{de la cual: } c = 2/3 A + 1/3 A_p$$

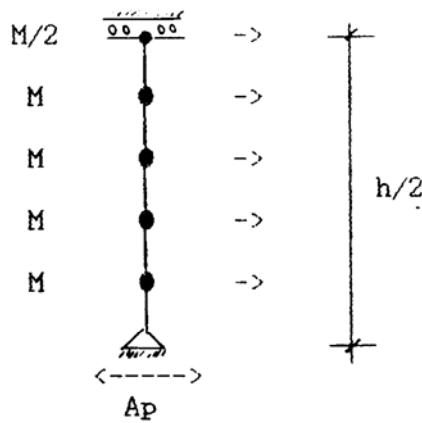
Este procedimiento se realizó para obtener la Fig.10, que corresponde a la variación en el tiempo del valor absoluto del coeficiente sísmico. Los valores picos alcanzados en dos de las fases severas fueron:

| FASE | A _p (g) | COEFICIENTE SISMICO (c) | |
|---------------|--------------------|-------------------------|--------|
| | | MURO 2 | MURO 3 |
| 8 (Mayo 70) | 1.44 | 2.42 | 2.17 |
| 12 (f = 7 Hz) | 1.69 | 2.46 | - |

Como puede observarse, se cumple con creces el hecho de que el coeficiente sísmico en el muro a escala reducida sea mayor a 0.95.

5.2. Técnica de Extrapolación 2 - Dinámica -

Ante la imposibilidad de analizar un muro agrietado, se eligió un modelo elástico de masas discretas a fin de determinar su respuesta dinámica mediante el programa de computación "TODA". Se consideró al muro como una viga de 1 m de ancho, biarticulado en sus extremos (base y solera), discretizándose la masa total del muro en 10 partes iguales. Por simetría se estudió la mitad de la altura total del muro, suponiéndose la continuidad de la misma con un apoyo deslizante que impone restricción al giro:



Definida la geometría del modelo, se calculó la matriz de rigidez lateral, para luego someterlo en su base a diferentes solicitudes severas (Fases 8, 9 y 12 del ensayo). El análisis dinámico se hizo tanto para el muro a escala reducida como para el muro a escala natural. Adicionalmente, el programa TODA proporcionó la aceleración absoluta en cada una de las masas, con las que se pudo determinar la distribución de las fuerzas de inercia, luego fue posible calcular el momento flector máximo y el esfuerzo normal respectivo (σ , ver 5.1).

| RESULTADOS DEL "TODA" | | | |
|-----------------------|-----------------|---|--|
| Señal | Ap. Máx. (g) | Escala Reducida σ_R (kg/cm ²) | Escala Natural σ_N (kg/cm ²) |
| Sismo Mayo 70 | 1.44 | 3.52 | 13.89 |
| Armónica 5Hz | 1.40 | 2.92 | 8.77 |
| Armónica 7Hz | 1.69 | 3.70 | 12.54 |

Para la misma solicitud, el esfuerzo normal obtenido en el muro real (escala natural) fue mayor al obtenido en el muro pequeño; por lo cual, para que ambos esfuerzos sean iguales, debe reducirse la solicitud actuante en el muro real en un factor igual a: σ_N / σ_R .

Esto quiere decir que hasta el instante del colapso (fase 12), un muro real (agrietado por corte) puede soportar acciones ortogonales a su plano, equivalentes a sismos muy severos con aceleración máxima de $(3.7/12.54) \times 1.69$ g = 0.5 g, y de frecuencia predominante cercana a la condición de resonancia; mientras que un sismo como el de Mayo 70, escalado a una aceleración de $(3.52/13.89) \times 1.44$ g = 0.36 g (severo), produciría algunas grietas adicionales a las previamente originadas por corte, pero no comprometerían la estabilidad del sistema.

6. CONCLUSIONES

- Un muro de forma cuadrada, previamente agrietado por fuerza cortante coplanar hasta alcanzar condiciones extremas (distorsión angular de 1/100), es capaz de resistir acciones sísmicas severas en la dirección orthogonal a su plano, aún en el caso de que no exista carga vertical.

- Usualmente los muros reales están sujetos a carga vertical y además las distorsiones angulares luego de su falla por fuerza cortante, no deberían sobrepasar a 1/200, a fin de que sean reparables (Ref.3); por lo tanto, se podría afirmar que el comportamiento de los muros reales agrietados, ante acciones sísmicas ortogonales a su plano, deberían superar al comportamiento observado en el ensayo dinámico de los especímenes del presente proyecto.
- El nivel de agrietamiento durante el ensayo dinámico no se incrementó significativamente, esto se debe a que la energía sísmica trata de disiparse a través de las grietas previamente formadas por corte. Pudo observarse durante el ensayo, que partes de la albañilería prácticamente sueltas interactuaban entre sí, sin llegar a volcar; sino hasta que se aplicó sobre el sistema un sismo demasiado severo (Fase 12).
- En el rango elástico, para acciones transversales al plano del muro, la albañilería confinada real tiene una frecuencia propia elevada. Suponiendo que el muro (en aparejo de soga) es una losa simplemente apoyada en sus 4 bordes y utilizando las fórmulas de la Ref.2, se logra una frecuencia en el primer modo de vibrar del orden de 30 Hz en muros cuadrados y de 20 Hz en muros que tengan una longitud igual al doble de su altura. Siendo la frecuencia predominante de los sismos peruanos en suelo duro del orden de 3 Hz, el movimiento de los muros sería prácticamente el de un sólido rígido, por lo que el coeficiente sísmico sería similar a la aceleración del suelo; valor que se ha podido observar no supera al reglamentario 0.35.
- Extrapolando los resultados de los especímenes pequeños a muros reales confinados (acápite 5), podría afirmarse que hasta el instante de colapso los muros reales previamente agrietados por corte, sopor tarían acciones ortogonales a su plano correspondientes a sismos muy severos (0.5 g), lo que conduce a un coeficiente sísmico de 0.91 sobre el muro real, valor que es 160% mayor al reglamentario (0.35).
- Para condiciones sísmicas muy severas, el Muro 3 (con "mechas") tuvo un mejor comportamiento respecto al Muro 2, pese a que en el Muro 3 se habían formado fisuras previas por corte en la zona de conexión columna-albañilería. Por esta razón se recomienda el empleo de las mechas.
- Finalmente, se indica que los resultados de esta investigación son solamente válidos para muros confinados de forma cuadrada, es posible que en muros alargados pueda perderse el efecto del confinamiento en la región central de la albañilería; por lo que es necesario continuar con este tipo de investigación.

REFERENCIAS

1. Vegas C., "Efectos de la Conexión Columna-Albañilería en el Comportamiento Sísmico de los Muros Confinados". Tesis PUCP 1991.
2. Timoshenko, Young, y Weaver "Vibration Problems in Engineering". 4th Edition. WILEY.
3. San Bartolomé A., "Albañilería Confinada", Libro 4 de la Colección del Ingeniero Civil. CIP, 1991.

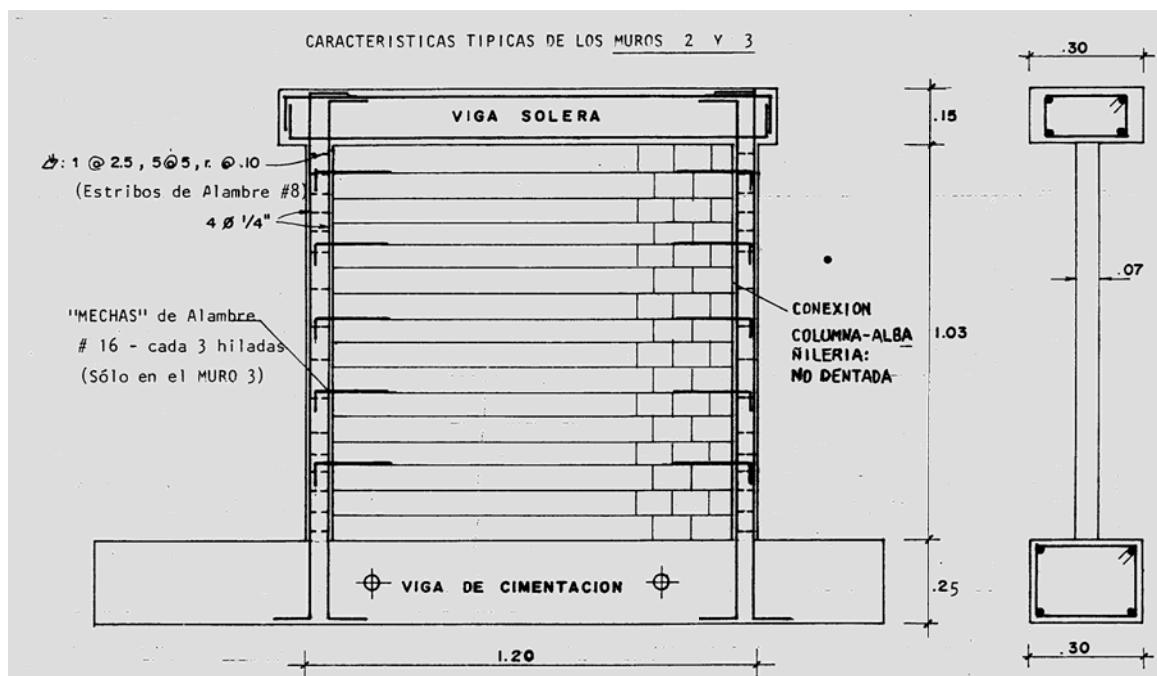


Fig.1. Características de los muros 2 y 3.



Fig.2. Muro 3. Ensayo estático.
Fase final. Distorsión 0.001



Fig.3. Muro 2. Ensayo estático.
Fase final. Distorsión 0.001



Fig.4. Ensayo Dinámico.

Fig.5
Muro 2 al
finalizar la fase
11 (armónica
de 7Hz).





Fig.6. Muro 2 después del ensayo dinámico.



Fig.7. Muro 3 después del ensayo dinámico.

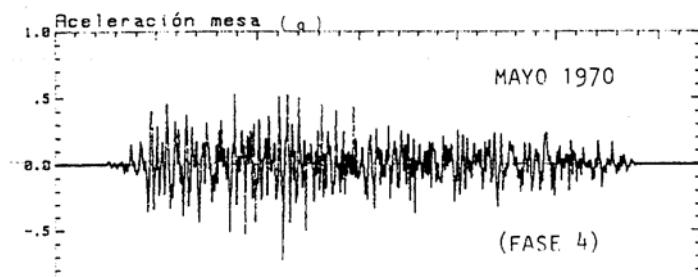
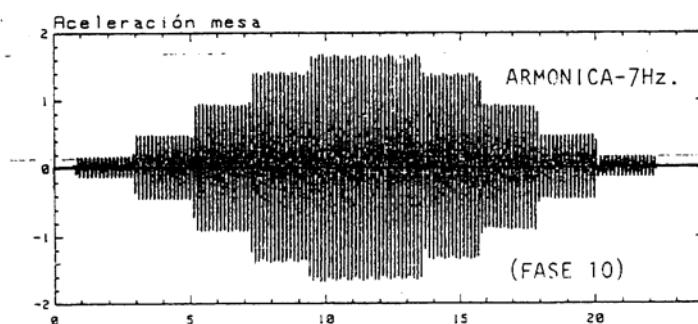
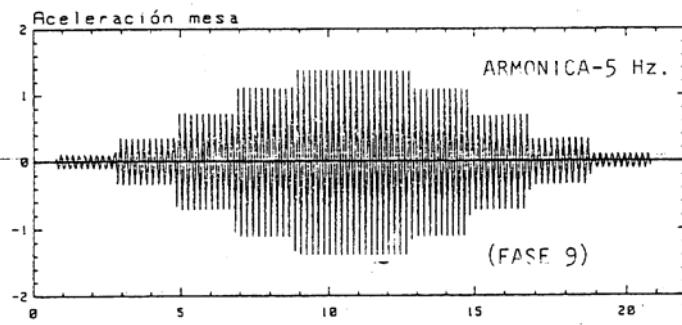


Fig.8

Señales empleadas en el ensayo dinámico. Aceleración de la mesa vibradora en "g".



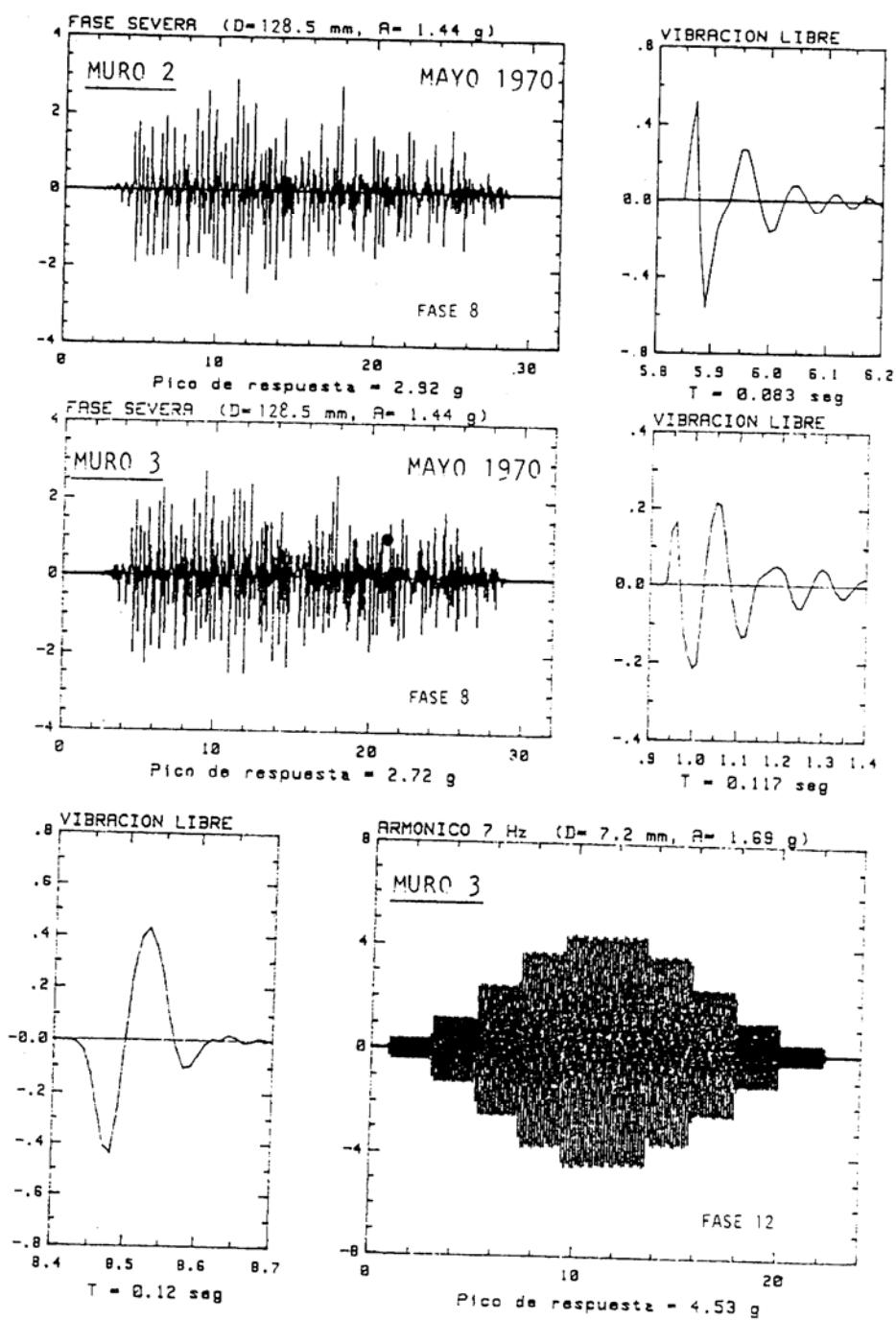
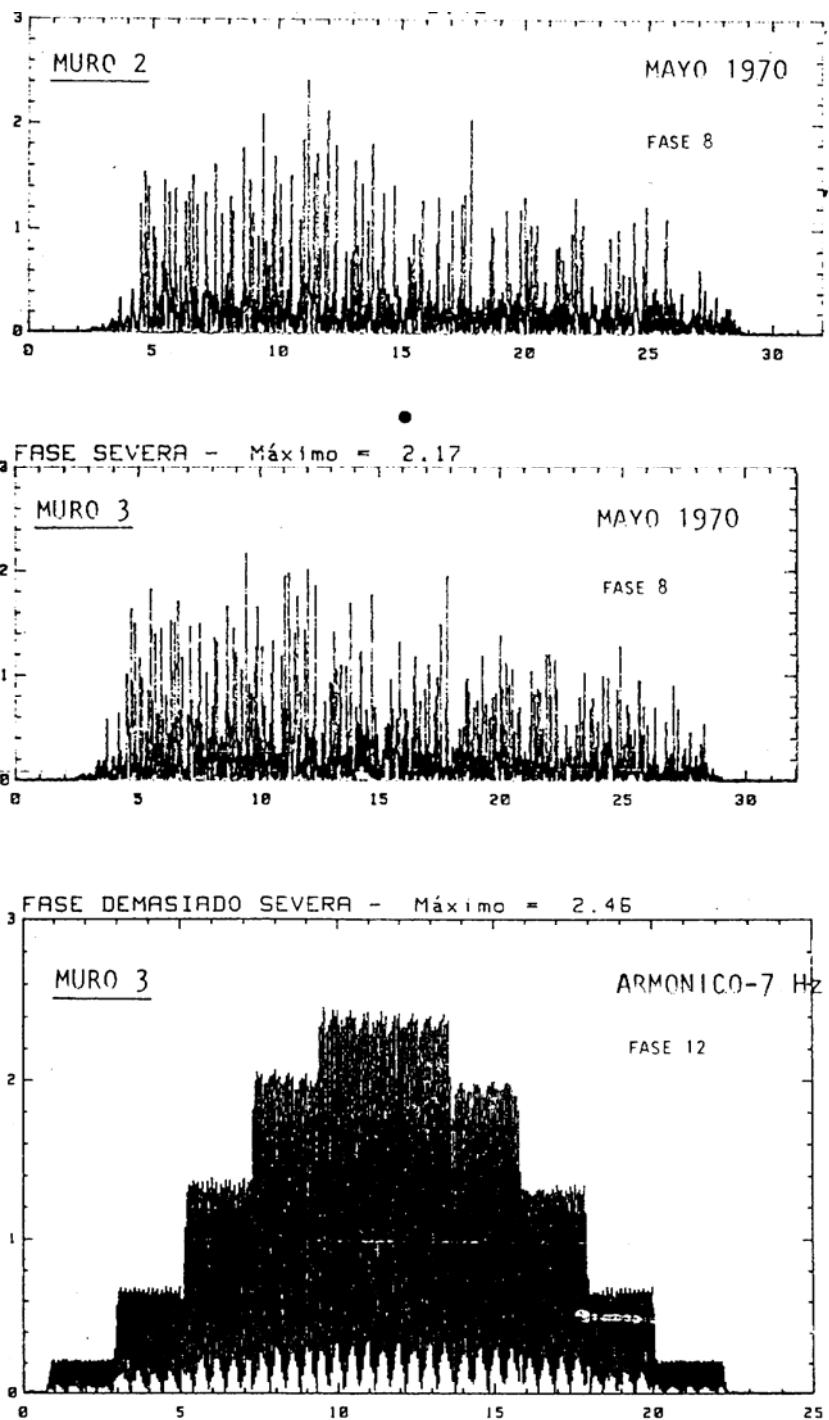


Fig.9. Respuesta del acelerómetro (g) ubicado en la parte central de los muros 2 y 3



Para el muro 2 no se obtuvo la variación del coeficiente sísmico por haberse excedido la capacidad del acelerómetro..

Fig.10. Variación del Coeficiente Sísmico.