

# ENSAYOS DE SIMULACIÓN SÍSMICA DE MODELOS DE ALBAÑILERÍA CONFINADA

José Francisco Pérez (1), Jorge Enciso (1) y Daniel Quiun (2)

(1) Bachiller en Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica del Perú

(2) Profesor del Departamento de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú

## 1. Resumen

El presente trabajo describe la construcción, ensayo y resultados de los ensayos de simulación sísmica realizados en tres modelos de albañilería confinada en la mesa vibradora del Laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Los modelos fueron construidos de acuerdo a las especificaciones técnicas típicas de viviendas populares de Indonesia, con materiales de baja resistencia y ciertos aspectos constructivos de poca calidad. El primer modelo fue el patrón, mientras que el segundo y tercero tuvieron ciertas mejoras y refuerzos adicionales. El proyecto fue planteado y codirigido por representantes de la Universidad de Mie, el Instituto de Investigación de la Vivienda (BRI) y el Instituto Nacional de Investigación en Ciencias de la Tierra y Prevención de Desastres (NIED), del Japón.

## 2. Introducción

La Universidad de Mie, el Instituto de Investigación de Ciencias de la Tierra y Prevención de Desastres, el Instituto de Investigación de la Vivienda y la empresa privada Tokio Soil Research, son entidades del Japón que están desarrollando investigaciones sobre el comportamiento sísmico de las construcciones de albañilería confinada de baja calidad en los países en vías de desarrollo del Asia. En el Perú, se tienen muchas construcciones similares, las que incumplen la Norma E.070 "Albañilería" (Ref.1).

En tal marco, estas instituciones contrataron los servicios del Laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) para desarrollar ensayos de simulación sísmica en modelos de viviendas de albañilería confinada de baja calidad, semejantes a las de Indonesia, adicionándose ensayos de control de los materiales de construcción. Se diseñaron, construyeron y ensayaron tres modelos o módulos, uno básico sin refuerzo adicional y dos más con pequeñas mejoras en los refuerzos. Los objetivos fueron estudiar y comparar el comportamiento sísmico de los tres modelos de albañilería confinada.

## 3. Metodología

Los tres modelos estuvieron conformados por 4 muros de 3x3 m y 3 m de altura. Por su posición, los muros se denominaron N, S, E, W. Los muros E y W tuvieron un vano de ventana, mientras que el muro S tuvo un vano de puerta.

El Modelo A o modelo base, fue de albañilería confinada con unidades de arcilla artesanal King Kong, asentados en aparejo de soga, con un mortero de baja resistencia (proporciones aprox. 1:8 cemento: arena); las juntas verticales fueron de 30 mm de espesor y las horizontales de 25 mm; la conexión fue a ras entre las 4 columnas y los muros de albañilería. Las vigas soleras, los dinteles y las columnas se especificaron con un concreto de resistencia  $f'c = 100 \text{ kg/cm}^2$ . Las columnas se ubicaron en las cuatro esquinas, con sección 0.13x0.13m y armadas con 4 barras de 8mm.

Los modelos mejorados se denominaron B y C. Aparte de tener las características del modelo básico, presentan los siguientes refuerzos adicionales. El modelo B, presenta un dintel en forma de anillo que da la vuelta a todo el modelo; además, se colocaron chicotes de acero. El Modelo C en cambio fue reforzado con una malla de acero galvanizada.

Se realizaron ensayos de control de los materiales de construcción y un análisis teórico utilizando la norma peruana.

### 3.1 Ensayos

#### 3.1.1 Unidades, Mortero y Albañilería

Se emplearon ladrillos de arcilla de fabricación artesanal, de dimensiones 218x112x68mm en promedio. Para determinar las características de las unidades de albañilería y clasificarlas, se realizaron los ensayos de variación dimensional, alabeo, absorción y compresión. Los resultados fueron: una máxima diferencia dimensional de 4 mm en el largo y ancho de las unidades de arcilla, produciendo una variabilidad máxima de 2.5 % en el ancho; el máximo alabeo fue de 4 mm en la cara superior del tipo convexo; el valor promedio de absorción obtenido fue de 11.4%; y la resistencia a compresión característica de la unidad ( $f'_b$ ) fue de 76 kg/cm<sup>2</sup>. Según la norma técnica E070 (Ref.1), las unidades de albañilería para fines estructurales se clasifican como ladrillo Clase II, unidades de baja resistencia y durabilidad.

Se especificó el uso de un mortero pobre, de proporción cemento:arena 1:8. La resistencia a la compresión se midió con cubos de 50 mm de lado, obteniéndose a los 28 días una resistencia a la compresión promedio de 51 kg/cm<sup>2</sup>.

Se construyeron y ensayaron 3 pilas y 3 muretes para determinar las propiedades mecánicas de la albañilería. Se obtuvo una resistencia característica a compresión  $f'_m=64.37$  kg/cm<sup>2</sup> y una resistencia característica a corte puro  $v'_m=6.4$  kg/cm<sup>2</sup>. Además, se determinó el módulo de elasticidad promedio  $E_m=12836$  kg/cm<sup>2</sup> y el módulo de corte promedio  $G_m = 5961$  kg /cm<sup>2</sup>. Al respecto, la relación  $E/f'_m$  sale 200, inferior a la indicada en la Norma que es de 500. Asimismo, la relación  $G_m/E_m$  sale 0.46, similar al valor 0.4 indicado en la Norma.

#### 3.1.2 Acero y concreto

Se utilizó acero corrugado de grado 60 proveniente de la fabrica Aceros Arequipa. Las barras de 8mm de diámetro tuvieron un esfuerzo promedio de fluencia de 537 MPa y un esfuerzo promedio a la rotura de 630 MPa. Para el concreto se hicieron probetas cilíndricas estándar, cuya resistencia a la compresión promedio fue de 125 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días.

### 3.2 Análisis teórico de los módulos

Se realizó un análisis estático ante un sismo moderado en las dos direcciones, de acuerdo a la Norma E070. Empleando el programa SAP2000 (ref.2), los muros se modelaron en forma espacial mediante una malla de elementos finitos (tipo "shell"), mientras que las vigas y columnas se modelaron mediante barras, ver Fig.1.

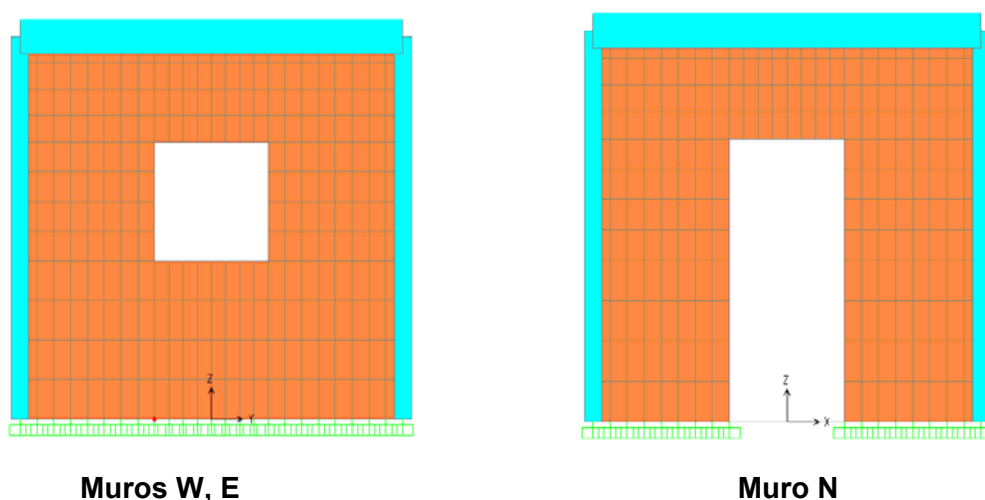


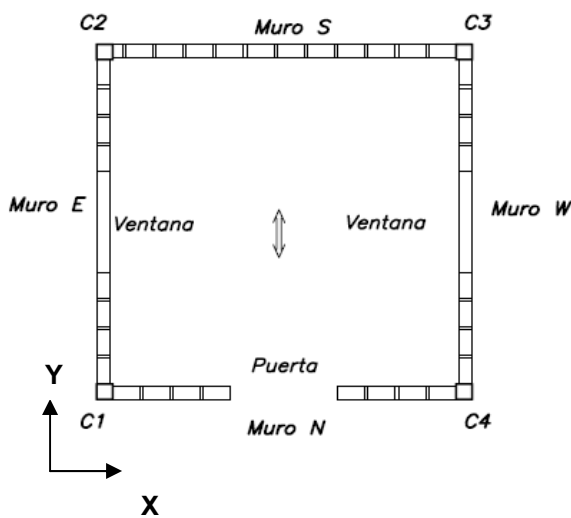
Fig. 1: Vista del modelo de los muros W, E, N.

La Tabla 1 resume el metrado de cargas en los 4 muros, y la Tabla 2 presenta los resultados del análisis ante sismo moderado, las capacidades a corte de los muros y los valores últimos para el diseño ante sismo severo. Se ha seguido el procedimiento de la ref. 3 por San Bartolomé.

Tabla 1: Metrado de cargas

| Muro | L (ton) | P (ton) | PL (ton) | Pg=P+0.25PL |
|------|---------|---------|----------|-------------|
| N1   | 1.07    | 1.67    | 0.5      | 1.8         |
| N2   | 1.07    | 1.67    | 0.5      | 1.8         |
| S    | 3       | 3.69    | 0.5      | 3.82        |
| E    | 3       | 3.54    | 0.5      | 3.67        |
| W    | 3       | 3.54    | 0.5      | 3.67        |

P: Carga muerta  
 PL: Sobrecarga  
 Pg: peso con 25% de sobrecarga



Los parámetros usados fueron:

Z = 0.4 (zona 3)

S = 1 Buen suelo

U = 1 Uso: Vivienda

Altura total del edificio  $h_n = 2.74$  m

Factor de amplificación sísmica C=2.5

R = 6 Albañilería – Sismo moderado

Con estos valores se determinó la fuerza cortante en la base usando la siguiente expresión

$$H = \frac{Z \cdot U \cdot S \cdot C}{R} \cdot P = \frac{0.4 \times 1 \times 1 \times 2.5}{6} \times 14.76 = 2.46 \text{ Ton}$$

(ref.1)

Tabla 2: Características y esfuerzos de los muros

| Muro | L(m) | Pg (ton) | Ve (ton) | Me (ton.m) | $\alpha$ | Vm    | 0.55 Vm | Vm/Ve | Vu (ton) | Mu (ton.m) |
|------|------|----------|----------|------------|----------|-------|---------|-------|----------|------------|
| N1   | 1.07 | 1.8      | 0.53     | 1.16       | 0.49     | 2.26  | 1.24    | 3.00  | 1.59     | 3.48       |
| S    | 3    | 3.82     | 1.52     | 4.35       | 1.00     | 11.44 | 6.29    | 3.00  | 4.56     | 13.05      |
| E, W | 3    | 3.67     | 1.28     | 3.19       | 1.00     | 11.40 | 6.27    | 3.00  | 3.84     | 9.57       |

Los valores de Ve, Me representan la fuerza cortante y momento flector por sismo moderado obtenidos por el programa SAP2000, mientras que Vu, Mu representan la fuerza cortante última y momento flector último ante sismo severo (ref.1).

Los muros en la dirección X-X e YY no se agrietan por corte ante el sismo moderado ( $Ve \leq 0.55Vm$ ). Además, se comportan elásticamente ante el sismo severo pues  $\Sigma Vm > 3 VE$ . La albañilería absorberá la fuerza cortante, con lo cual, las columnas no necesitan diseñarse por corte-fricción. Sólo se diseñan las columnas extremas a tracción y compresión (Tablas 3 y 4).

Tabla 3: Diseño de vigas soleras

| Muro                      | N1           | S            | E, W         |
|---------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Vu (ton)                  | 1.59         | 4.56         | 3.84         |
| Lm (m)                    | 1.07         | 3.00         | 3.00         |
| Ts (ton)                  | 0.80         | 2.28         | 1.92         |
| As (cm <sup>2</sup> )     | 0.21         | 0.60         | 0.51         |
| As min (cm <sup>2</sup> ) | 0.68         | 0.68         | 0.68         |
| As a usar                 | 4 $\Phi$ 8mm | 4 $\Phi$ 8mm | 4 $\Phi$ 8mm |

Tabla 4: Diseño de las columnas

| Muro<br>columna                 | N1      |       | S       |         | E, W    |         |
|---------------------------------|---------|-------|---------|---------|---------|---------|
|                                 | C1,C4   |       | C2      | C3      | C1,C4   | C2,C3   |
| Pg (ton)                        | 1.8     |       | 3.82    |         | 3.67    |         |
| Mu (ton.m)                      | 3.48    |       | 13.05   |         | 9.57    |         |
| Lm (m)                          | 1.07    |       | 3.00    |         | 3.00    |         |
| Nc                              | 1       |       | 2       |         | 2       |         |
| F (ton)                         | 3.25    |       | 4.35    |         | 3.19    |         |
| Pc (ton)                        | 1.8     |       | 1.91    |         | 1.84    |         |
| Lt (m)                          | 0.75    | ----- | 0.75    | 0.75    | 0.75    | 0.54    |
| Pt (ton)                        | 0.92    | ----- | 0.92    | 0.92    | 0.96    | 0.90    |
| T (ton)                         | 0.53    | ----- | 1.52    | 1.52    | 0.00    | 0.46    |
| C (ton)                         | 5.05    | ----- | 6.26    | 6.26    | 5.03    | 5.03    |
| As calculado (cm <sup>2</sup> ) | 0.14    | ----- | 0.40    | 0.40    | 0.00    | 0.12    |
| As a usar                       | 4 Φ 8mm | ----- | 4 Φ 8mm | 4 Φ 8mm | 4 Φ 8mm | 4 Φ 8mm |
| δ                               | 1       | ----- | 1       | 1       | 1       | 0.8     |
| An (cm <sup>2</sup> )           | 0       | ----- | 8.39    | 8.39    | 0       | 0       |
| Ac usado (cm <sup>2</sup> )     | 169     | ----- | 169     | 169     | 169     | 169     |
| An usado (cm <sup>2</sup> )     | 121     | ----- | 121     | 121     | 121     | 121     |
| Asmin (cm <sup>2</sup> )        | 0.40    | ----- | 0.40    | 0.40    | 0.40    | 0.40    |

Para el diseño de las columnas de los muros W, E se contempló como si fuese el diseño para un muro lleno y para el muro N se consideró el diseño de las columnas C1, C4 como si fuesen dos muros de albañilería de 1.07 m de longitud denominado N1. Estas aproximaciones se deben a que estos casos (muros con vanos) no están contemplados en la Norma E.070.

Tanto en las columnas como en las vigas soleras el acero de refuerzo que se requiere es mínimo por lo que bastaría con colocarle 4 Φ 8mm

En el caso del muro S que estará sometido a cargas ortogonales a su plano, se verificó su capacidad de flexión (ref.1):

$$\gamma e = 1.8 \times 0.11 = 0.198 \text{ ton/m}^2$$

$$\text{Carga sísmica de servicio } w = 0.8 \text{ Z U C1 } \gamma e = 0.8 \times 0.4 \times 1 \times 0.9 \times 0.198 = 0.057 \text{ ton /m}^2$$

$$a = 2.74 \text{ m, } b = 2.74 \text{ m. Entonces } b/a = 1 \rightarrow m = 0.0479 \text{ (coeficiente tabla 12 Norma E070)}$$

$$\text{Momento sísmico } M_s = m w a^2 = 20.5 \text{ kg-cm / cm}$$

$$\text{Esfuerzo de tracción actuante } f_m = 6 M_s / t^2 = 6 \times 20.5 / 11^2 = 1.02 \text{ kg/cm}^2$$

Se obtiene un esfuerzo menor al valor resistente de  $f_t = 1.5 \text{ kg/cm}^2$ , por tanto, el muro cumple.

### 3.3 Construcciones de los módulos

Los tres módulos se construyeron siguiendo un procedimiento básico, al cual se hicieron variantes en los módulos B y C. A continuación se describe este procedimiento.

El anillo de cimentación de cada módulo se construyó usando concreto de  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ . Las unidades de arcilla fueron regadas por 25 minutos unas 10 horas de su asentado, de acuerdo a lo indicado por la Norma E.070. Aunque este regado no es usual en Indonesia, allá el clima es muy húmedo y se decidió que las condiciones de humedad deben ser semejantes, para que la succión al instante del asentado de los ladrillos sea adecuada.

Los muros se asentaron en aparejo de soga, con reglas, plomadas y escantillón. En los muros que tenían puertas y ventanas la primera jornada de trabajo se levantó hasta la parte inferior del vano de ventana. En la segunda jornada se levantó hasta la parte superior del vano de ventana y de puerta, para armar y vaciar los dinteles de concreto en las siguientes jornadas.

Para las columnas preparó y vació concreto de  $f'c=100\text{kg/cm}^2$ , utilizando un vibrador para evitar la aparición de cangrejas. Una vez endurecido el mortero de los muros y el concreto de las columnas, se encofraron y armaron las vigas, para finalmente vaciarlas también con concreto de  $f'c=100\text{ kg /cm}^2$ . El tamaño y sección de las vigas fue tal que permita la colocación de sobre carga consistente en bolsas de arena sobre ellas.

En el módulo B, aparte de presentar el procedimiento básico, se colocaron unos chicotes de acero con diámetro de 8mm cada 6 hiladas, que penetraron una longitud de 0.5 m en la hilada de mortero; en las columnas tuvieron un gancho de 0.1 m (Fig.2). Además, se incorporó un dintel que daba la vuelta a todo el módulo formando un anillo (Fig.3).



Fig. 2: acero en unión albañilería - columna



Fig. 3: vista del dintel del Módulo B

El módulo C, aparte del procedimiento básico, fue reforzado con una malla de acero galvanizada de 1 mm con cocadas de  $\frac{3}{4}$ ", clavada sobre los muros y atornillada a los elementos de concreto armado (fig. 4). La malla se colocó de una sola pieza, rodeando todo el modulo y con un traslape de 25 cm. Además, para el módulo C se tarrajó el muro E siguiendo el procedimiento tradicional (fig. 5) con un mortero cemento: arena 1:4.



Fig. 4: Colocación de la malla



Fig. 5: Tarrajeo del muro E.

### 3.4 Ensayos de los Módulos

Los módulos fueron sometidos a ensayos de simulación sísmica en la mesa vibradora del Laboratorio de Estructuras de la PUCP. El movimiento fue unidireccional, en la dirección de los muros con ventana. El modulo A fue sometido a 6 fases, mientras que los módulos B y C fueron sometidos a 4 fases. Antes de cada fase se ejecutaron ensayos de vibración libre.

#### 3.4.1 Instrumentación

La ubicación de los acelerómetros (A1, A2, A4, A5 y A10) y los medidores de desplazamientos LVDTs (D1, D2, D3, D5 y D7) para la medición de los desplazamientos, se realizó como indica la fig. 6.

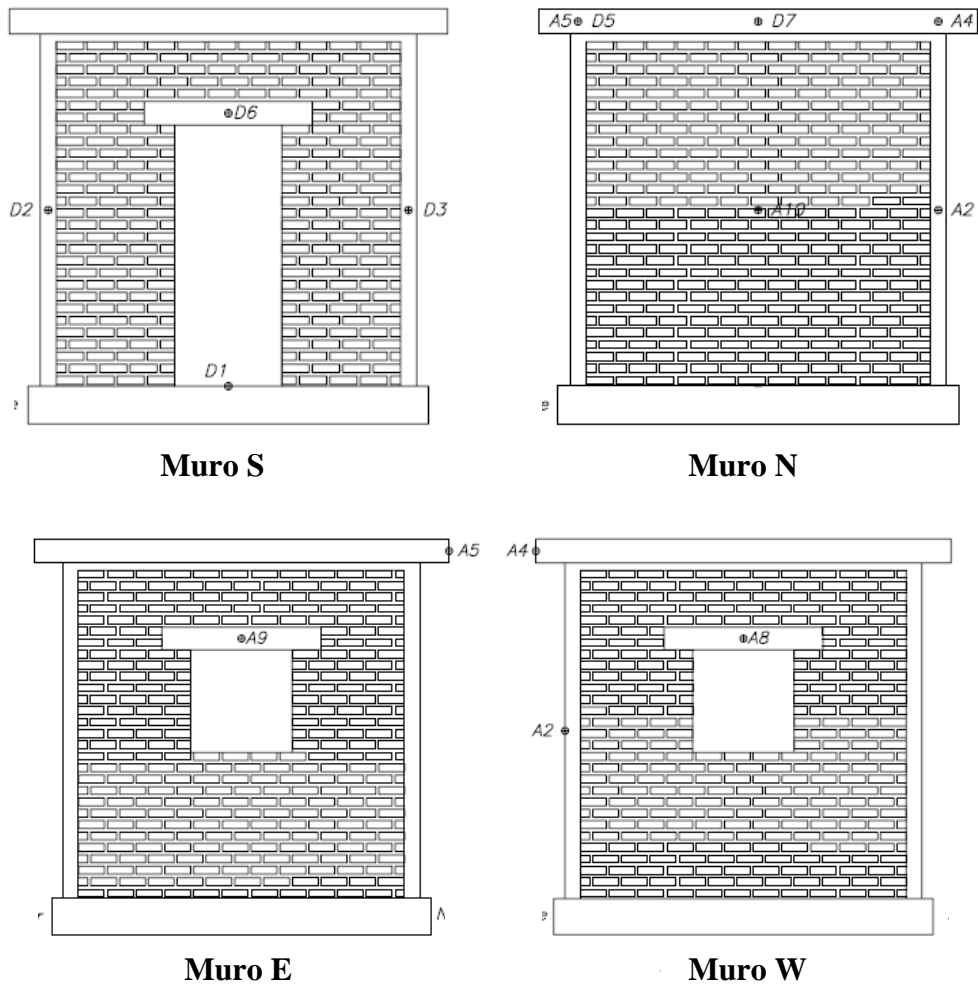


Fig. 6 Instrumentación en los módulos

### 3.4.2 Fases y señales

Se utilizaron las señales derivadas de los registros sísmicos de ICA2 (2007), KOBE (1995), y MAYO70 (1970). Se fue variando la escala de tiempo y la amplitud de los movimientos para producir movimientos de intensidad creciente. Las tablas 5, 6, y 7 resumen las distintas fases para los tres módulos.

Tabla 5: Ensayo módulo A

| Fase | D nominal (mm.) | D real (mm.) | Aceleración real (g) | Tipo señal | Escala de tiempo |
|------|-----------------|--------------|----------------------|------------|------------------|
| 1    | 5               | 4.73         | 0.26                 | ICA        | 0.1              |
| 2    | 16              | 15.58        | 0.82                 | ICA        | 0.1              |
| 3    | 40              | 40.19        | 0.89                 | ICA        | 0.2              |
| 4    | 70              | 69.73        | 1.67                 | ICA        | 0.2              |
| 5    | 75              | 75.68        | 0.68                 | KOBE       | 2/3              |
| 6    | 30              | 30.40        | 1.39                 | ICA        | 0.1              |

Tabla 6: Ensayo módulo B

| Fase | D nominal (mm.) | D real (mm.) | Aceleración real (g) | Tipo señal | Escala de tiempo |
|------|-----------------|--------------|----------------------|------------|------------------|
| 1    | 40              | 40.24        | 0.84                 | ICA        | 0.2              |
| 2    | 70              | 73.78        | 1.72                 | ICA        | 0.2              |
| 3    | 135             | 134.41       | 1.39                 | MAYO 70    | ---              |
| 4    | 30              | 30.86        | 1.35                 | ICA        | 0.1              |

Tabla 7: Ensayo Modulo C

| Fase | D nominal (mm.) | D real (mm.) | Aceleración real (g) | Tipo señal | Escala de tiempo |
|------|-----------------|--------------|----------------------|------------|------------------|
| 1    | 120             | 118.85       | 0.84                 | MAYO 70    | ---              |
| 2    | 30              | 31.26        | 1.48                 | ICA        | 0.1              |
| 3    | 70              | 70.22        | 1.58                 | ICA        | 0.2              |
| 4    | 120             | 120.02       | 1.12                 | MAYO 70    | ---              |

Las figuras 6, 7, 8, y 9 muestran los tres módulos durante los ensayos de simulación sísmica, y el tipo de fisuras que se fueron presentando y marcando.



Fig. 6: Módulo A en la mesa vibradora



Fig. 7: Módulo B en la mesa vibradora



Fig. 8: Módulo C en la mesa vibradora



Fig. 9: Muro del Módulo B después del ensayo, con las fisuras marcadas por fase

## 4 Resultados

### 4.1 Cualitativo: Descripción de las grietas

**Módulo A:** Se pudo observar que durante las tres primeras fases no se produjo ninguna fisura. En la fase 4 aparecieron las primeras fisuras diagonales iniciadas en las esquinas del vano, además que en el muro E se comenzó a agrietar en las uniones muro con columna. En la fase 5 aparecieron pequeñas grietas (señal relativamente débil). En la fase 6 aparecieron nuevas grietas diagonales, además en el Muro E en la esquina inferior se desprendió pedazos de ladrillo (fig. 10).

**Módulo B:** Recién en la segunda fase aparecieron grietas diagonales en el muro W y E de hasta 0.3 mm iniciadas en la parte inferior de la ventana. En la fase 3 se formaron nuevas grietas

diagonales en la otra dirección, mientras que en la fase 4 se reafirmaron más las grietas existentes y se prolongaron alguna de ellas, llegando a espesores de 1.2 mm (Fig.11).

Módulo C: En la fase 1 no se produjo ninguna fisura, mientras que en la segunda fase comenzaron a aparecer grietas diagonales en las esquinas de la ventana de hasta 0.6 mm. de espesor en el muro W. En la fase 3 no se produjo mayor daño al ya producido anteriormente. En el Muro E no se produjo daño alguno (Fig. 12).

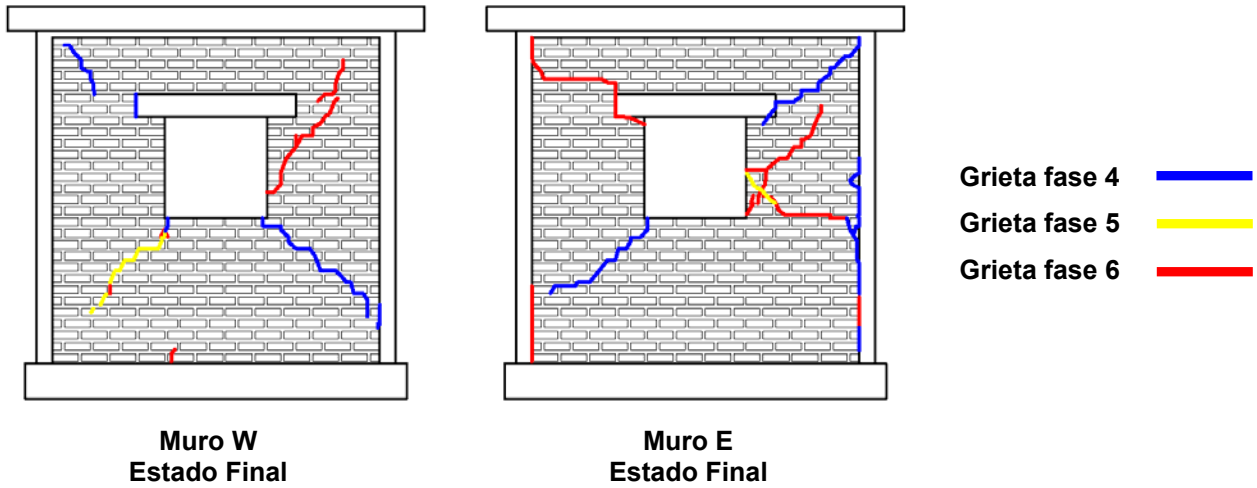


Fig. 10: Esquema del estado final del Módulo A

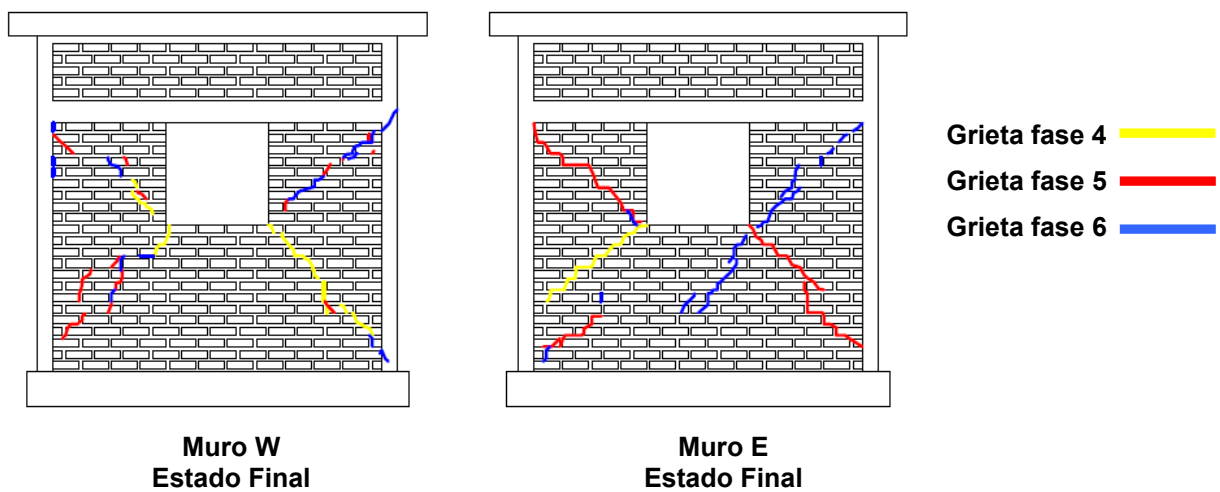
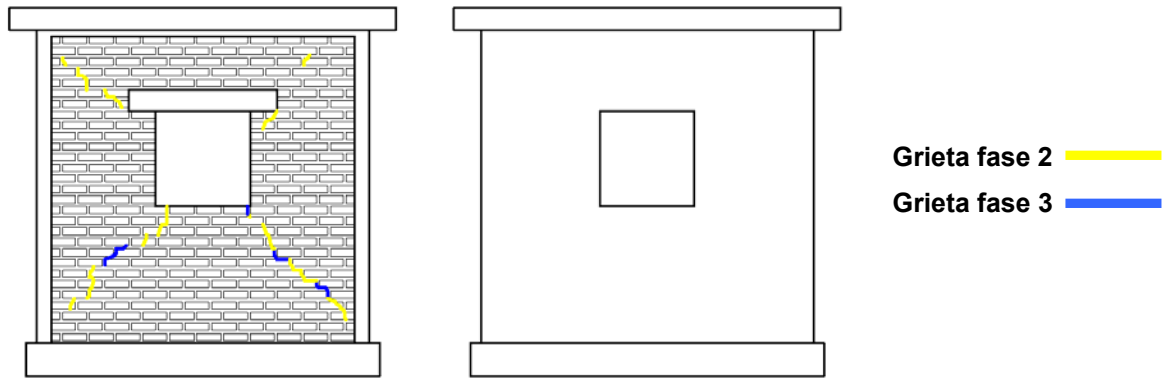


Fig. 11: Esquema del estado final del Módulo B





**Muro W  
Estado Final**

**Muro E  
Estado Final**



Fig. 12: Esquema del estado final del Módulo C

#### 4.2 Envoltentes cortante desplazamiento

Las envolventes que se muestran en las figuras 13, 14 y 15 corresponden a una misma señal ICA y la misma escala de tiempo 0.2, con el objetivo de poder compararlas. Observamos que los cortantes basales son prácticamente iguales para los tres módulos para esa señal. En las Tablas 8, 9 y 10 se indican las fuerzas del actuador ( $F_a$ ), el cortante basal ( $V$ ) y el desplazamiento relativo del punto 5 (DR5) para los tres módulos.

Fig. 13: Envoltente Fase 4 Módulo A

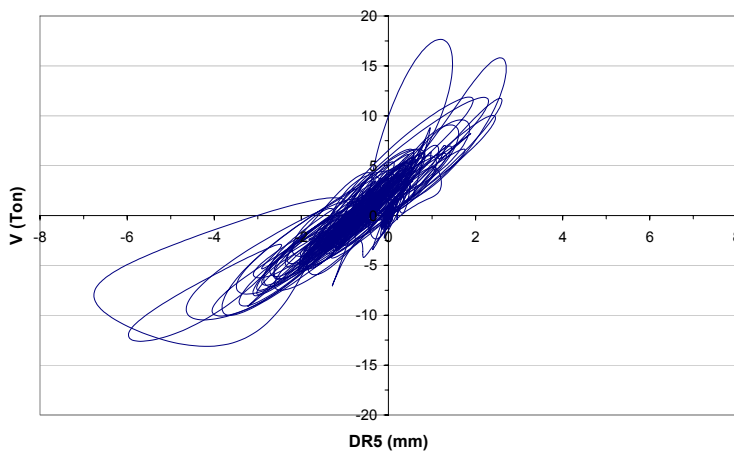


Tabla 8: Fuerzas máximas

|               | FUERZAS MAXIMAS |            |             |
|---------------|-----------------|------------|-------------|
|               | Fa<br>(Ton)     | V<br>(Ton) | DR5<br>(mm) |
| <b>FASE 1</b> | 10.053          | 4.65       | 0.45        |
| <b>FASE 2</b> | 31.907          | 14.95      | 1.71        |
| <b>FASE 3</b> | 33.366          | 15.25      | 2.06        |
| <b>FASE 4</b> | 46.428          | 17.64      | 6.76        |
| <b>FASE 5</b> | 34.419          | 15.08      | 3.70        |
| <b>FASE 6</b> | 48.377          | 19.69      | 10.90       |

Fig. 14: Envoltura Fase 2 Módulo B

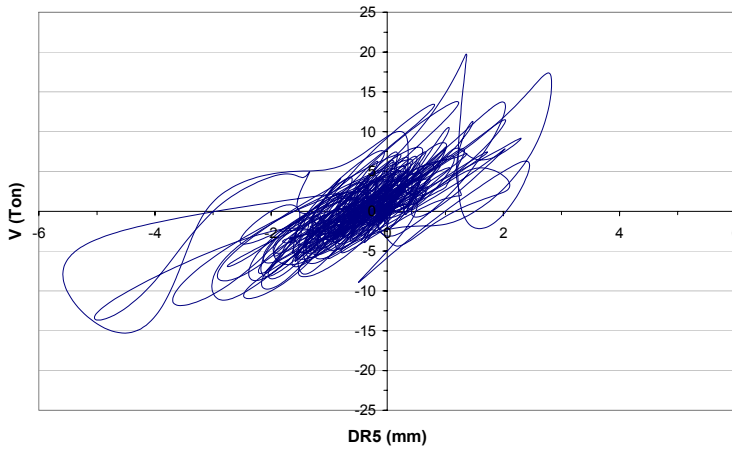


Fig. 15: Envoltura Fase 3 Módulo C

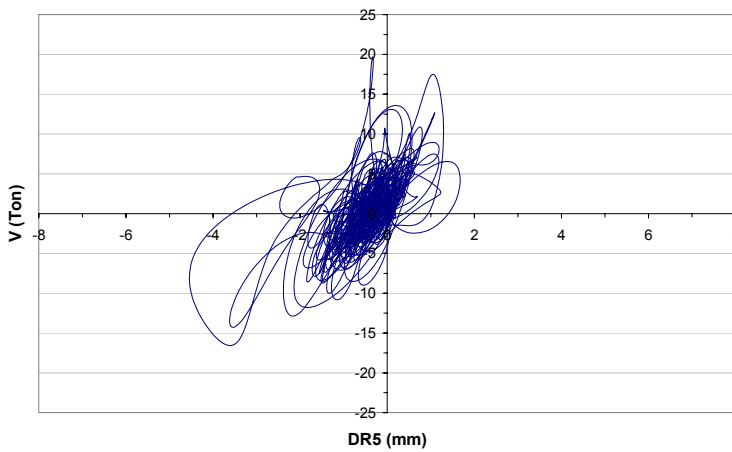


Tabla 9: Fuerzas máximas

|               | FUERZAS MAXIMAS |            |             |
|---------------|-----------------|------------|-------------|
|               | Fa<br>(Ton)     | V<br>(Ton) | DR5<br>(mm) |
| <b>FASE 1</b> | 33.258          | 15.95      | 1.80        |
| <b>FASE 2</b> | 46.029          | 19.74      | 5.59        |
| <b>FASE 3</b> | 39.350          | 17.26      | 5.96        |
| <b>FASE 4</b> | 48.556          | 21.84      | 9.42        |

Tabla 10: Fuerzas máximas

|               | FUERZAS MAXIMAS |            |             |
|---------------|-----------------|------------|-------------|
|               | Fa<br>(Ton)     | V<br>(Ton) | DR5<br>(mm) |
| <b>FASE 1</b> | 26.154          | ---        | ---         |
| <b>FASE 2</b> | 48.260          | 21.13      | 3.11        |
| <b>FASE 3</b> | 46.093          | 19.67      | 4.54        |
| <b>FASE 4</b> | 38.977          | 17.01      | 4.54        |

Fa: Fuerza del actuador  
 V : Cortante basal  
 DR5: Desplazamiento relativo del punto D5

## 5. Conclusiones

Se demostró que la albañilería confinada puede constituir un sistema constructivo apto para regiones sísmicas, incluso con materiales de poca resistencia y defectos constructivos. Las mejoras introducidas en los módulos B y C incrementaron la capacidad de la estructura y son sencillas de implementar. Los resultados que se piensa aplicar en países como Indonesia son útiles para la realidad peruana donde se construye en condiciones informales.

## 6. Referencias

- 1) SENCICO, Norma Técnica de Edificación E.070 Albañilería, Lima, Edición 2007.
- 2) Wilson Edward L. SAP2000 Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures. Version 7.01. Three Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures. Computers and Structures, Inc. Berkeley 1998.
- 3) San Bartolomé A. Blog de albañilería, <http://blog.pucp.edu.pe/albañilería>, Pontificia Universidad Católica del Perú, 2007.