

# COMPORTAMIENTO A CARGA LATERAL CÍCLICA DE MUROS DE ALBAÑILERÍA ARMADA CONSTRUIDOS CON BLOQUES DE CONCRETO VIBRADO

Por: **Angel San Bartolomé, Erika Vicente, Rafael Mendoza y Pedro Solano**  
**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

## RESUMEN

En el Laboratorio de Estructuras de la Pontificia Universidad Católica del Perú se ensayaron ocho muros de albañilería armada a carga lateral cíclica coplanar, con el objetivo de analizar: 1) la influencia de la cuantía y el tipo de refuerzo horizontal (barra corrugada o escalerilla electrosoldada); 2) el efecto del relleno (parcial o total) en las celdas de los bloques de concreto; y, 3) el efecto de la carga vertical, ante la cual, uno de los muros fue reforzado en sus talones con planchas de acero estructural. Estos muros fueron construidos por Firth Industries del Perú empleándose mortero y concreto embolsados.

## 1. INTRODUCCIÓN

En el Perú se han hecho pocas investigaciones sobre el comportamiento sísmico de la Albañilería Armada construida con bloques de concreto vibrado (Ref.1), por lo que con miras de enriquecer nuestros conocimientos y que estos sirvan de base para los cambios que se piensan hacer en la Norma E-070, la empresa Firth Industries del Perú proporcionó los materiales y la mano de obra para construir 8 muros, los que fueron ensayados a carga lateral cíclica para estudiar 3 parámetros: la cuantía y el tipo de refuerzo horizontal (barra corrugada o escalerilla electrosoldada), el efecto del relleno en los alvéolos (parcial o total) y el efecto de la carga vertical, ante la cual, uno de los muros fue reforzado en sus talones con planchas perforadas de acero A-36 con 3 mm espesor, colocadas en las juntas horizontales.

## 2. ENSAYOS PRELIMINARES

En esta investigación se utilizaron Bloques de 39x19x14 cm, Mortero: 1: ½: 4 (cemento: cal: arena gruesa, denominado “Mortero Fácil” embolsado) y Concreto Líquido: 1: 2½ : 1½ (cemento: arena: piedra de ¼”, denominado “Concreto Fácil” embolsado). Los principales resultados de los ensayos fueron:

### **Bloques:**

Absorción = 3.5%

Succión = 20gr / 200 cm<sup>2</sup> x min

Resistencia a Compresión Axial (sobre área bruta):  $f^b = 74 \text{ kg/cm}^2$

### **Concreto Líquido (Grout):**

Slump = 10 pulgadas

Resistencia a Compresión Axial:  $f^c = 200 \text{ kg/cm}^2$

Además se ensayaron pilas de 14x39x60 cm a compresión axial y muretes de 14x80x80 cm a compresión diagonal, en las siguientes cantidades: 5 pilas y 4 muretes rellenos con concreto líquido (una de las pilas tuvo planchas en cada junta), 4 pilas vacías y 4 muretes con relleno en los alvéolos extremos, los resultados de los ensayos se presentan a continuación:

### **Resistencia Característica a Compresión Axial ( $f^m$ ):**

Pilas rellenas: sin planchas 95 kg/cm<sup>2</sup> ; con plancha 120 kg/cm<sup>2</sup>

Pilas vacías: 56 kg/cm<sup>2</sup> sobre área bruta y 90 kg/cm<sup>2</sup> sobre área neta.

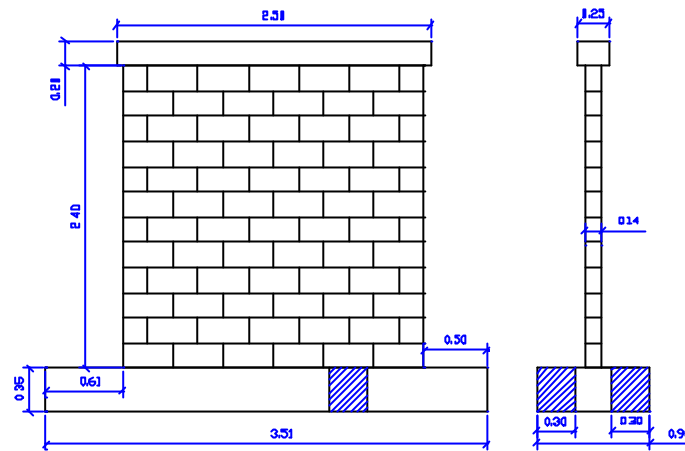
### **Resistencia Característica a Compresión Diagonal ( $v^m$ ):**

Muretes rellenos 11.3 kg/cm<sup>2</sup>

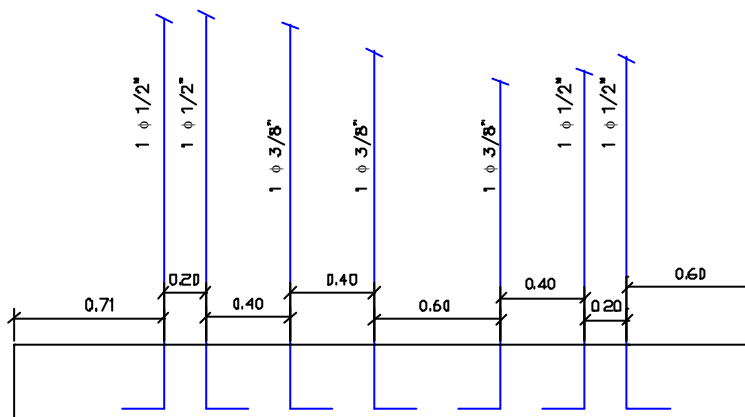
Muretes parcialmente rellenos: 5.6 kg/cm<sup>2</sup> sobre área bruta y 6.6 kg/cm<sup>2</sup> sobre área neta

### 3. CARACTERÍSTICAS DE LOS MUROS

Se construyeron 8 muros a escala natural (Fig.1) con dimensiones 2.4x2.4x0.14 m, todos ellos tuvieron el refuerzo vertical continuo (sin traslapes) mostrado en la Fig.2.



**Fig. 1. Dimensiones de los Muros**



**Fig. 2. Detalle del Refuerzo Vertical Continuo**

Las características de cada muro en particular se detallan en las Tablas 1 y 2, indicándose que el muro R3 tuvo planchas en sus talones, en una altura de 1.0 m (5 hiladas):

**TABLA 1. Muros con Relleno Total**

Muro	Carga Vertical (ton)	Refuerzo horizontal
<b>P1</b>	0	1 $\phi$ 3/8" cada 2 hiladas (cuantía = 0.127%)
<b>P2</b>	0	1 $\phi$ 3/8" cada hilada (cuantía = 0.254%)
<b>P3</b>	0	1 $\phi$ 1/2" cada hilada (cuantía = 0.461%)
<b>R1</b>	11	1 $\phi$ 3/8" cada hilada (cuantía = 0.254%)
<b>R2</b>	30	1 $\phi$ 3/8" cada hilada (cuantía = 0.254%)
<b>R3</b>	30	1 $\phi$ 3/8" cada hilada (cuantía = 0.254%)

**TABLA 2. Muros con Relleno en Alvéolos con Refuerzo Vertical**

Muro	Carga Vertical (ton)	Refuerzo horizontal
E1	0	2 $\phi$ 1/4" cada 2 hiladas (cuantía = 0.115%)
E2	11	2 $\phi$ 1/4" cada hilada (cuantía = 0.230%)

#### 1 4. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

Los pasos seguidos en la construcción de los muros se detallan a continuación:

- La viga de cimentación se construyó dejando anclada la armadura vertical (Foto 1). La superficie de la viga se limpió, rayó y humedeció antes de aplicar la capa de mortero para la primera hilada (Foto 2).



Foto 1. Refuerzo Vertical anclado en la viga de cimentación



Foto 2. Primera hilada de los muros totalmente rellenos

- Los muros fueron construidos asentando los bloques (secos y limpios) a plomo y en línea; el espesor de las juntas fue 1 cm. En la primera jornada de trabajo, se construyó la primera mitad del muro.
- En todos los alvéolos por rellenar correspondientes a los bloques de la primera hilada, se dejaron registros de limpieza (Foto 3), estas aberturas se hicieron con una amoladora eléctrica.



Foto 3. Ventanas de limpieza en muros totalmente rellenos.



Foto 4. Junta vertical en un bloque asentado.

- En las juntas horizontales se colocó el mortero sobre la hilada inferior en los bordes longitudinales cubriendo el espesor de la cara del bloque, como máximo se colocó mortero para asentar 2 bloques.
- Para las juntas verticales se aplicó el mortero formando franjas en los bordes extremos de la cara de contacto del bloque a ser asentado, excepto en el muro R3 donde el mortero cubrió toda la cara de contacto (Foto 5), la tapa del bloque adyacente ya asentado no tuvo mortero. Sin embargo, posterior a esta investigación, Firth recomienda que ambos bloques (el asentado y el que se va a asentar) deben tener los bordes verticales embadurnados de mortero, tal como se muestra en la Foto 4.



Foto 5. Junta vertical en el muro R3.



Foto 6. Refuerzo de acero corrugado horizontal en los muros P y R.

- El mortero fue reemplado, de tal modo de mantener su trabajabilidad.
- La armadura horizontal continua se colocó en el eje del muro, durante el proceso de asentado (Foto 6), en el caso de los muros con escalerilla electrosoldada, el mortero se colocó sobre la escalerilla (incluso sobre el escalón), cuidando de lograr que esté inmersa en la junta (Foto 7).



Foto 7. Refuerzo de Escalerilla en los muros E.



Foto 8. Plancha en los talones del muro R3.

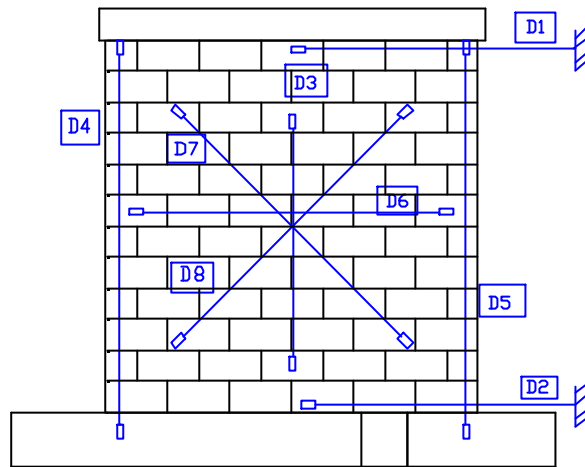
- A través de los registros (Foto 3) se limpiaron los desperdicios de mortero de los alvéolos utilizando una compresora de aire y una aspiradora, luego se encofró la primera hilada con una tabla colocada en la cara donde se encuentran los registros de limpieza, para posteriormente llenar las celdas con concreto líquido. Cabe indicar que inicialmente Firth recomendaba taponar los registros con retazos provenientes del mismo bloque cortado, sin embargo, en un ensayo previo se observó que estos tapones eran expulsados al momento del ensayo, por el efecto cíclico de la carga lateral.
- El concreto líquido se vació en dos etapas con un intervalo de espera de 30 minutos entre ellas. En el primer vaciado se llenó hasta 1.50 m de altura en toda la longitud del muro, para esto, el vaciado se hizo en 5 capas de 30 cm de altura aproximadamente cada una, realizando el compactado con una varilla lisa de 1/2". El último llenado se realizó en forma similar, pero dejando 10 cm libres en la última hilada, con la finalidad de que al vaciar la viga solera, ésta se engrape contra el muro formando llaves de corte que transmitan la carga lateral desde la viga hacia el muro.

- Solo en el muro R3 se utilizaron planchas de acero en sus 2 talones (Foto 8). En las tres primeras hiladas se colocó una plancha y media (60 cm de longitud) y en las siguientes dos hiladas, se colocó una plancha (40 cm de longitud).

## 5. INSTRUMENTACIÓN

Los aparatos utilizados para la fijación de los muros y el ensayo de los mismos fueron los siguientes:

- Un actuador dinámico de 50 ton de capacidad.
- Dos gatas de 25 ton de capacidad, que fijaron la viga de cimentación contra la losa de ensayo.
- Dos gatas de 63 ton de capacidad, la primera sirvió para evitar el deslizamiento de la cimentación, y la segunda, ubicada al centro de la viga solera, aportó la carga vertical en los muros sujetos a esta sollicitación (Tablas 1 y 2).
- Un amplificador, un sistema de adquisición de datos, una computadora y voltímetros.
- Transductores electrónicos de desplazamientos lineales (LVDT, "D" en la Fig.3):



**Fig. 3. Ubicación de los LVDT en un muro típico**

## 6. EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS

Para el caso de los muros sujetos a carga vertical (Foto 9), ésta se aplicó monotónicamente a una velocidad de 3 ton/min, hasta alcanzar 11 o 30 ton dependiendo del muro (Tablas 1 y 2); durante el ensayo de carga lateral cíclica, la carga vertical se mantuvo constante. El ensayo fue realizado controlando la amplitud del desplazamiento lateral  $D_0$  (Tabla 3 y Fig.3), aplicando un determinado número de ciclos hasta que se establezca el lazo histerético.



**Foto 9. Dispositivo de ensayo para muros sujetos a carga vertical.**

**TABLA 3. Fases del Ensayo de Carga Lateral Cíclica.**

Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase5	Fase 6	Fase 7	Fase 8
0.5 mm	1 mm	3 mm	6 mm	12 mm	15 mm	17.5 mm	20 mm

## 7. RESULTADOS

En la Tabla 4 se indica la carga lateral (V) y la fase en que ocurrieron: 1) la primera fisura visible de tracción por flexión (punto F); 2) el agrietamiento diagonal (punto R); y, 3) la carga lateral máxima (punto M). En la Tabla 5 se indica el tipo de falla final (y la carga asociada) que tuvieron los muros, así como la predicción de resultados (ver el acápite 7.1). En la Fig.4 se ha planteado la envolvente V-Do de los lazos histeréticos correspondientes al primer ciclo.

**TABLA 4. Resultados del Ensayo de Carga Lateral Cíclica.**

MURO	Rigidez Ko (ton/mm)	Primera Fisura (Punto F)		Arietamiento Diagonal (Punto R)		Carga Máxima (Punto M)	
		VF (ton)	Fase	VR (ton)	Fase	VM (ton)	Fase
P1	14.6	6.05	2	15.23	4	16.33	5
P2	12.8	5.50	2	16.06	5	16.12	5
P3	15.6	6.50	2	17.08	5	17.05	5
R1	15.8	5.12	1	20.98	5	21.36	8
R2	16.4	8.56	1	28.99	5	30.45	8
R3	16.4	15.13	2	31.36	5	31.66	7
E1	8.5	2.99	1	10.91	3	15.64	5
E2	13.3	6.43	2	14.67	4	22.25	8

**TABLA 5. Tipo de Falla y Predicción Teórica.**

MURO	Carga Lateral Experimental de Falla (ton)			Carga Lateral Teórica de Falla (ton)	
	V (ton)	Fase	Tipo de Falla	V (ton)	Tipo de Falla
P1	16.33	5	Deslizamiento	12.72	Flexión
P2	16.12	5	Deslizamiento	12.72	Flexión
P3	17.05	5	Deslizamiento	12.72	Flexión
R1	19.93	6	Deslizamiento	18.72	Flexión
R2	25.27	4	Deslizamiento	25.29	Flexión
R3	23.28	3	Deslizamiento	25.98	Flexión
E1	14.06	5	Corte	11.67	Corte
E2	19.53	8	Corte	17.60	Flexión



Foto 10. Falla típica por deslizamiento en las primeras hiladas.



Foto 11. Trituración del talón, nótase el pandeo del refuerzo vertical



Foto 12. Falla por corte (Muro E1)

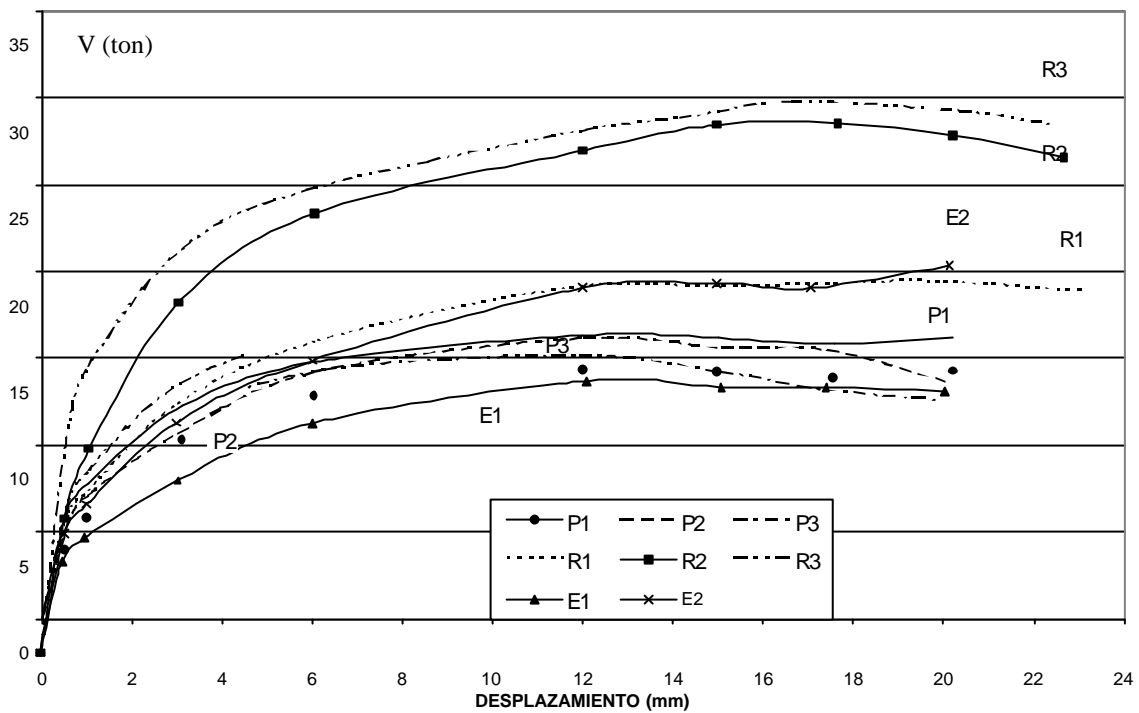


Fig.4. ENVOLVENTE V vs. Do



### 7.1. Predicción del Tipo de Falla

La carga lateral asociada a la falla por flexión ( $V_f$ ), fue determinada calculando el momento flector nominal ( $M_n$ ) asumiendo que el 100% del refuerzo vertical ( $A_s$ ) fluía, para luego dividir  $M_n$  entre la altura existente desde la base del muro hasta el eje del actuador dinámico.

$$M_n = A_s F_y D / 2 + P L / 2 \quad (\text{Ref.1})$$

Donde:  $F_y$  = esfuerzo de fluencia del refuerzo =  $4200 \text{ kg/cm}^2$   
 $D = 0.8 L = 0.8 \times 2.4 = 1.92 \text{ m}$  = peralte efectivo  
 $P$  = carga axial (incluyendo el peso del muro)

La carga lateral asociada a la falla por corte ( $V_c$ ) fue determinada asumiendo que sólo el acero horizontal ( $A_{sh}$ , espaciado verticalmente la cantidad "s") aportaba resistencia.

$$V_c = A_{sh} F_y D / s \quad (\text{Ref.1})$$

Teóricamente, el muro debería fallar con la menor de las cargas  $V_f$  (por flexión) o  $V_c$  (por corte).

## 8. CONCLUSIONES

- Los pesos volumétricos promedios de la albañilería construida con bloques de concreto fueron:  $1.7 \text{ ton/m}^3$  para la parcialmente rellena y  $2.3 \text{ ton/m}^3$  para la totalmente rellena.
- El ensayo de los muros totalmente rellenos sujetos a carga vertical, permitió calcular los módulos de Elasticidad ( $E_a$ ) y de Corte ( $G_a$ ) de la albañilería, obteniéndose:  $E_a = 81595 \text{ kg/cm}^2$  y  $G_a = 33994 \text{ kg/cm}^2$ , mientras que en el ensayo de compresión axial de las pilas compuestas por 3 bloques, se obtuvo un valor muy elevado de " $E_a$ ".
- La relación propuesta por la Ref.2 para calcular " $E_a$ " ( $700 f'm$ ) en función de la resistencia a compresión de las pilas ( $f'm$ ), es conservadora. En este proyecto se obtuvo  $E_a = 860 f'm$ . Sin embargo, el valor propuesto en la Ref.2 fue obtenido empleando concreto líquido con una resistencia a compresión  $f'c = 140 \text{ kg/cm}^2$ , mientras que en esta investigación el grout tuvo  $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$ .
- El valor de la resistencia a tracción por flexión de la albañilería ( $f't$ ) con unidades de concreto vibrado asentadas en su estado natural (secas), empleando mortero 1:  $\frac{1}{2}$  : 4, resultó  $8.2 \text{ kg/cm}^2$  para la albañilería totalmente rellena y  $6.8 \text{ kg/cm}^2$  para la albañilería parcialmente rellena. Esta resistencia se puede utilizar para predecir la carga asociada a la primera fisura por flexión.
- El humedecimiento de los bloques, pasando sobre la superficie de asentado una brocha con agua antes de asentarlos (técnica aplicada en la construcción del muro R3), permitió incrementar la resistencia a tracción por flexión de la albañilería de  $8.2 \text{ kg/cm}^2$  a  $18.5 \text{ kg/cm}^2$ . Por lo cual, para mejorar el comportamiento elástico, se recomienda humedecer (con la técnica mencionada) la superficie de asentado de los bloques con la finalidad de reducir su alta succión ( $20 \text{ gr/200cm}^2\text{-min}$ ).
- El agrietamiento diagonal en los muros parcialmente rellenos se produjo para una deriva de  $1/740$ , sin que ocurra una degradación significativa de su resistencia, debido al trabajo inmediato del refuerzo horizontal. En los muros con relleno total el agrietamiento diagonal se produjo para derivas comprendidas entre  $1/400$  y  $1/200$ , era de esperarse que se produjera a menores derivas (del orden de  $1/800$ , Ref.1), pero esto no ocurrió debido a que las grietas por flexión (en las primeras hiladas) degeneraron en un deslizamiento del muro. Se recomienda en futuras investigaciones provocar la falla por corte a menores deriva, para obtener valores confiables de VR.
- Las escalerillas electrosoldadas empleadas como refuerzo horizontal en las juntas de los muros parcialmente rellenos, mostraron buen comportamiento, el espaciamiento de sus escalones (40 cm) no generó problemas de pandeo en el refuerzo longitudinal de la escalerilla.



- El uso de planchas en los talones del muro R3 retardó la aparición de grietas en esta zona por flexocompresión, sin producirse la trituración del bloque.
- En el muro E2 se había pronosticado una falla por flexión, sin embargo, este muro falló por corte.
- En igualdad de cuantía del refuerzo horizontal y bajo la misma carga vertical, los muros con relleno parcial fallaron por corte y admitieron cargas máximas similares a los muros totalmente rellenos (E1 vs. P1 y E2 vs. R1), debido a que los muros totalmente rellenos fallaron por deslizamiento.
- Los muros parcialmente rellenos reforzados horizontalmente con escalerilla electrosoldada, pueden ser utilizados en edificaciones de 1 y 2 pisos al haberse comprobado su buen comportamiento. Sin embargo, es necesario precisar que en este proyecto los bloques tuvieron 36 % de vacíos, que el relleno se realizó alternadamente estando el refuerzo vertical interior espaciado a 40 cm y que los 2 alvéolos extremos estuvieron completamente rellenos con concreto líquido de  $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$ .
- Durante el ensayo de los muros con relleno total ocurrió un tipo de falla indeseable: la falla por deslizamiento. Esta falla se presentó como una derivación de la falla por flexión, sobre las primeras hiladas de los muros, dejándose ver como una grieta horizontal a lo largo de la junta de mortero. Esta falla es muy peligrosa ya que la parte superior del muro puede salirse de su plano ante la acción de cargas sísmicas transversales, generándose una excentricidad importante de la carga vertical. Asimismo, la gran cantidad de ciclos que contiene un sismo, genera una degradación importante de la resistencia ante el deslizamiento.
- La falla por deslizamiento presentada en los muros totalmente rellenos, hizo que el refuerzo horizontal sea ineficaz. Nótese en la Tabla 4 que la carga máxima alcanzada por los muros P1, P2 y P3, es prácticamente la misma, pese a que la cuantía de refuerzo horizontal se triplicó.

### 8.1.Línea Futura de Investigación

- La mayoría de los códigos extranjeros de Albañilería Armada recomiendan distribuir el refuerzo vertical a lo largo del muro, esta recomendación fue aplicada en este proyecto obteniéndose una falla final por deslizamiento, por lo que se propone realizar una nueva investigación, donde el refuerzo por flexión se concentre en los extremos del muro, para disminuir el corrimiento horizontal de las grietas que por el carácter cíclico de la carga lateral se transforman en una falla por deslizamiento, y en la parte interior del muro agregar refuerzo vertical diseñado por corte-fricción.
- Para la albañilería de arcilla, las pilas de 5 o 6 hiladas ( $h = 50$  a  $60 \text{ cm}$ ) permiten la obtención correcta del Módulo de Elasticidad “Ea” (Ref.1), esto no fue posible para las pilas compuestas por 3 bloques de concreto vibrado ( $h = 60 \text{ cm}$ ), por lo que es necesario modificar el número de hiladas, de tal modo que se obtenga valores de “Ea” semejantes a los calculados en los muros a escala natural.
- En este proyecto se observó una deficiente adherencia entre el grout y el bloque, por lo que es necesario estudiar la manera de evitar este defecto, posiblemente agregando un aditivo expansivo en el grout (“Grout-Aid”), tal como se recomienda en el Reglamento de Albañilería de Nueva Zelanda, o regando el interior de las celdas antes de vaciar el grout, o compactando el grout con una vibradora, o curando los muros después de vaciar el grout, o aplicando en simultáneo las técnicas mencionadas.

## 9. REFERENCIAS

1. Construcciones de Albañilería, Comportamiento Sísmico y Diseño Estructural. Angel San Bartolomé. Pontificia Universidad Católica del Perú. Fondo Editorial. 1998.
2. Proyecto de Normas Técnicas de Edificación E-070 “Albañilería”. Angel San Bartolomé. Documento en estudio por el Comité de Albañilería-SENCICO.