

# PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU

## FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



Comportamiento Sísmico de un Módulo de dos Pisos Reforzado y  
Construido con Ladrillos Ecológicos Prensados.

Tesis para optar el título de Ingeniero Civil, que presentan los bachilleres:

Javier Rojas Vargas

Ricardo Antonio Vidal Toche

Asesor: Ing. Wilson Silva

LIMA, SEPTIEMBRE DE 2014

## RESUMEN

La presente tesis tiene como objetivo principal estudiar de manera experimental el comportamiento sísmico de un material no convencional como son los ladrillos ecológicos prensados, los cuales son elaborados con una mezcla de suelo, cemento y agua, mezclados y tamizados de manera que puedan ser comprimidos por una prensa hidráulica que ejerce una fuerza de 7 toneladas. Se utilizó el procedimiento constructivo que el ladrillo ecológico propone, donde las columnas se refuerzan interiormente, utilizando los alveolos del mismo ladrillo para colocar tanto el refuerzo como las tuberías para instalaciones eléctricas y sanitarias.

Para ello se utilizaron los principios de la norma de albañilería de manera que podamos comprobar si con los ladrillos ecológicos y con el adecuado refuerzo, se puede construir viviendas de hasta dos pisos. Para ello se construyó un módulo en forma de “U”, de dos pisos a escala real con el sistema constructivo planteado, donde las columnas son moduladas con los mismos ladrillos, refuerzo horizontal y vertical debidamente confinado con mortero líquido. El módulo en forma de “U” contó con dos muros de corte y un muro de flexión siendo éste el de mayor longitud, así como con vigas de amarre construidas de forma convencional y no se colocó ningún tipo de elemento entre los pisos (losa aligerada o losa maciza).

También se realizaron ensayos de compresión en las unidades individuales del ladrillo ecológico prensado, así como ensayos de compresión axial en pilas y en muretes ensayos de compresión diagonal con la finalidad de obtener valores de las propiedades mecánicas que nos ayuden a determinar las condiciones con la que modelo debe ser ensayado. El modelo se ensayó sobre la mesa vibratoria del laboratorio de estructuras, sometiéndolo a sismos leve, moderado y severo. Los resultados que fueron procesados para cada una de las fases ensayadas, se presentan y comentan en el presente documento. Las conclusiones y recomendaciones pueden servir como punto de partida para futuros proyectos de estudio y poder introducir en el mercado un producto alternativo de construcción que sea viable y que pueda cumplir con las especificaciones que la norma peruana de construcción plantea.



Agrademos a nuestras familias que gracias a sus consejos y palabras de aliento crecimos como personas.

## AGRADECIMIENTO

A nuestros profesores que han influido con sus lecciones para formarnos como personas de bien y prepararnos profesionalmente para los retos que pone la vida, a todos y cada uno de ellos, en especial al Ingeniero Ángel San Bartolomé y al Ingeniero Wilson Silva, les agradecemos cada una de estas páginas de nuestra tesis.



## INDICE

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Descripción del Proyecto	1
1.2 Objetivos del Proyecto	1
CAPITULO 2: UNIDADES DE ALBAÑILERIA Y DEFINICIÓN DE LA MEZCLA	2
2.1 Características Geométricas del Ladrillo Ecológico de Suelo – Cemento	2
2.2 Definición de la Mezcla	4
2.2.1 Mezcla Suelo-Cemento	4
2.2.2 Ensayos Preliminares de Compresión y Mezcla Suelo-Cemento	5
CAPITULO 3: FABRICACIÓN DE LAS UNIDADES	6
3.1 La Máquina Prensadora Hidráulica	6
3.2 Fabricación de las Unidades	7
CAPITULO 4: DEFINICIÓN DEL REFUERZO	9
4.1 Refuerzo Vertical	9
4.2 Solera	10
CAPITULO 5: CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES	12
5.1 Características de las Pilas y Muretes	12
5.2 Características del Módulo	12
CAPITULO 6: CONSTRUCCIÓN DE LOS ESPECÍMENES	15
6.1 Pilas y Muretes	15
6.2 Modulo	16
CAPITULO 7: ENSAYOS DEL LADRILLO ECOLOGICO PRENSADO Y MAMPOSTERIA	23
7.1 Ensayo de Unidades de Ladrillos Ecológicos	23
7.1.1 Variación de Dimensiones	23
7.1.2 Absorción y densidad	23
7.1.3 Compresión de Unidades	24
7.2. Ensayo de Compresión Axial en Pilas	24

7.2.1 Forma de Falla	25
7.2.2 Resultados de Resistencia a la Compresión Axial	25
7.3 Ensayo de Compresión Diagonal en Muretes	26
7.3.1 Forma de Falla	27
7.3.2 Resultados de Resistencia al Corte	29
CAPITULO 8. ENSAYO SÍSMICO DEL MÓDULO	31
8.1 Peso del Módulo	31
8.2 Determinación de las Aceleraciones de Ensayo	31
8.3. Características de la Señal Sísmica	32
8.4 Instrumentación	33
8.5 Comportamiento Cualitativo del Módulo	33
8.6 Resultados	38
8.7 Lazos Histeréticos V-d	40
8.8 Vibración Libre. Período de Vibración "T".	43
CAPITULO 9: CONCLUSIONES	45
9.1 Unidades prensadas de suelo-cemento	45
9.2 Construcción	46
9.3 Pilas y Resistencia Admisible a Compresión Axial	46
9.4 Muretes Ensayados a Compresión Diagonal	46
9.5 Ensayo Sísmico del Módulo	47
9.6 Línea Futura De Investigación	48
REFERENCIAS	50

## CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

### 1.1 Descripción del Proyecto

El proyecto trata de analizar la posibilidad de utilizar los ladrillos ecológicos prensados en la construcción de viviendas sismorresistentes de hasta 02 pisos como alternativa a los ladrillos de arcillas quemados de manera artesanal. Para el desarrollo del proyecto se efectuaron las siguientes pruebas experimentales:

1. Ensayos de compresión de unidades de ladrillos prensados en 05 unidades.
2. Ensayos de compresión axial en 3 pilas.
3. Ensayos de compresión diagonal en 3 muretes.
4. Ensayo de simulación sísmica de un módulo de vivienda de 02 pisos.

Previamente, se realizaron las siguientes actividades:

1. Definición de las dimensiones modulares del bloque.
2. Definición de la mezcla a usar en la fabricación de los bloques.
3. Fabricación de los ladrillos ecológicos prensados.
4. Definición del refuerzo.
5. Definición de los especímenes.
6. Construcción de los especímenes.

En esta tesis se evalúan los resultados de los ensayos y el procedimiento constructivo usado.

### 1.2 Objetivos del Proyecto

El objetivo principal del proyecto es analizar experimentalmente el comportamiento sísmico de la albañilería compuesta por ladrillos ecológicos prensados, así como estudiar el efecto del refuerzo horizontal y vertical, utilizado para proveer ductilidad e integración entre los muros ante acciones coplanares y perpendiculares a los muros. Otros objetivos son: analizar si es aplicable al ladrillo ecológico prensado algunos aspectos de la Norma de Above y Albañilería, y analizar si las viviendas de hasta 2 pisos hechas con el ladrillo ecológico prensado, reforzadas en forma adecuada, son sísmicamente viables.

## CAPITULO 2: UNIDADES DE ALBAÑILERIA Y DEFINICIÓN DE LA MEZCLA

### 2.1 Características Geométricas del Ladrillo Ecológico de Suelo - Cemento

El sistema de albañilería con ladrillos ecológicos prensados de suelo – cemento se desarrolló como alternativa para la albañilería armada considerando refuerzo vertical y horizontal en su interior. La albañilería se conforma con bloques alveolares de dimensiones modulares que permiten que las unidades coincidan unas con otras y a través de los alveolos se permita el paso de las varillas de refuerzo. Tanto las columnas como las vigas de amarre se construyen con las unidades de suelo – cemento.

Los bloques tienen una longitud de 25 cm, un ancho de 12.5 cm y una altura de 7 cm, las juntas horizontales son de 0.5 cm de espesor como máximo, sin embargo las unidades presentan una desviación estándar de 0.40 cm (Fig.2.1). Las dimensiones de los alveolos permiten el paso de las varillas de refuerzo y las unidades de ladrillo de viga permiten la instalación del refuerzo horizontal (Fig.2.2. Dimensiones finales del bloque en centímetros).

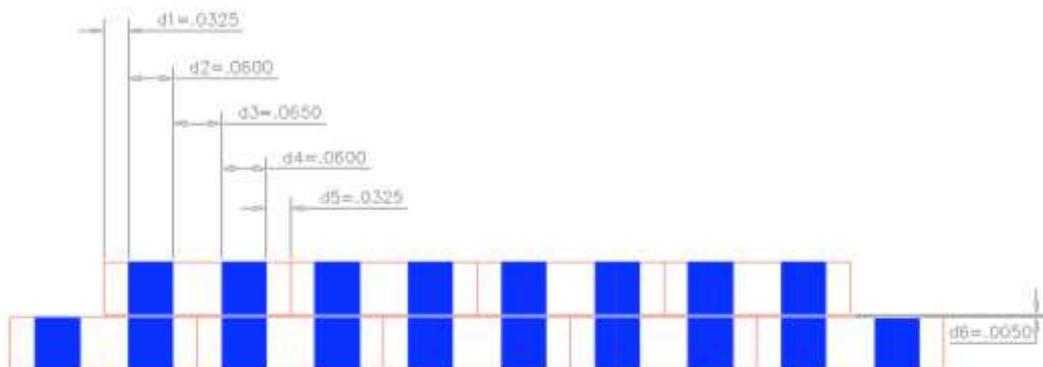


Fig.2.1 Dimensiones modulares en metros.

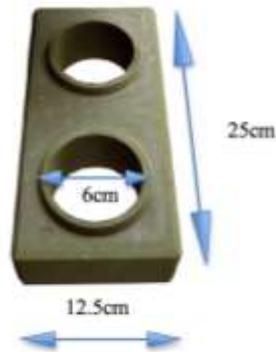


Fig.2.2 Dimensiones finales del ladrillo en centímetros.

Para la construcción de los muros se necesita modificar las matrices (moldes) de la prensa hidráulica a fin de obtener los distintos tipos de unidades que permitan una correcta unión. Entre los modelos se encuentran (a) unidad de ladrillo simple, (b) unidad de ladrillo de viga, (c) unidad de ladrillo para piso y (d) unidad de medio ladrillo (Fig.2.3.).



Fig.2.3 Tipos de ladrillos y matrices.

Los alveolos circulares tienen un diámetro de 5.7 cm, con lo que el porcentaje de huecos en la unidad es de:  $(2 \times \pi \times D \times D / 4) / (L \times A) = (2 \times 3.1416 \times 5.7 \times 5.7 / 4) / (25 \times 12.5) = 0.1633$  (16.33%). La sección transversal de la unidad es mayor al 70% del área bruta, por lo que el bloque se clasificó como solido de acuerdo con la Norma E.070.

El peso de las unidades es de 3.5 kg aproximadamente, por lo que puede ser manipulado por los operarios con una sola mano y permite catalogarlo como ladrillo.

## 2.2. Definición de la Mezcla

### 2.2.1 Mezcla Suelo-Cemento

El suelo empleado en la fabricación de las unidades ecológicas de suelo cemento es conformado por tierra arcillosa (65%), cemento (20%), arena fina (10%) y agua (5%), las tierras más adecuadas para la fabricación de las unidades son aquellas que cumplen con las siguientes características (Fig.2.4 Tamizado del material).

- Aquellas que pasen por el tamizado de 4.8 mm al 100%.
- Aquellas que pasen por el tamizado de 0.075 mm de 10% al 50%.
- Límite de liquidez menor o igual al 45%.
- Índice de plasticidad menor o igual al 18%.

La arcilla es un componente muy importante para la fabricación de las unidades por sus propiedades aglomerantes que mejoran su resistencia inicial y la trabajabilidad, sin embargo suelos arcillosos con propiedades diferentes a las antes descritas provocan fisuras luego del secado del material.



Fig.2.4 Tamizado del material

Se realiza la mezcla del suelo con el cemento de tal manera que haya una mezcla homogénea, mejorando las propiedades de ambos elementos. Varios factores pueden influir en las características del producto final dentro de las que

encontramos, dosificación del cemento, naturaleza del suelo, contenido de humedad y la compactación de la prensa hidráulica.

### 2.2.2 Ensayos Preliminares de Compresión y Mezcla Suelo-Cemento

Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión en cinco unidades ecológicas de suelo cemento, los resultados se muestran a continuación.

**TABLA 2.1 Resistencia a la compresión**

Identificación	Largo (cm)	Ancho (cm)	Area bruta (cm <sup>2</sup> )	Maxima Carga (Kg)	Resistencia compresion (kg/cm <sup>2</sup> )
1	25.2	12.9	325.1	31770.0	97.7
2	25.2	12.7	318.1	32580.0	102.4
3	25.2	12.6	317.5	33010.0	104.0
4	25.2	12.7	318.8	32910.0	103.2
5	25.2	12.7	319.4	28840.0	90.3
<b>Promedio</b>					<b>99.5</b>

Bloques suelo-cemento: 99.5 kg/cm<sup>2</sup>

El resultado obtenido muestra una resistencia mayor al valor mínimo (12 kg/cm<sup>2</sup>) exigido por la Norma de Adobe E.080, siendo un valor equivalente a la resistencia característica a compresión de los ladrillos tipo III (95 kg/cm<sup>2</sup>) de la tabla de clase de unidad de albañilería para fines estructurales de la Norma de Albañilería E.070.

## CAPITULO 3: FABRICACIÓN DE LAS UNIDADES

### 3.1 La Máquina Prensadora Hidráulica

La prensa compactadora hidráulica (Fig.3.1) es un equipo de fabricación nacional portátil que se apoya sobre el terreno, lo que permite su traslado con facilidad a obra. La fabricación de las unidades se realizó fuera de las instalaciones del laboratorio de estructuras antisísmicas. La máquina manual puede ser operada por tres personas, una para el manejo de la prensa y dos para abastecer de mezcla el proceso.



Fig.3.1 Prensa compactadora hidráulica.

La faja transportadora entrega el material a la base de la compactadora y la prensa hidráulica ejerce una fuerza aproximada de 7 toneladas que permite conseguir un ladrillo compacto de suelo – cemento sin la necesidad de utilizar un horno tradicional. Para accionar la prensa se desplaza la palanca verticalmente al bloque. Luego, la unidad se retira manualmente, para seguir el proceso de curado por tres días y secado por tres días más.

### 3.2 Fabricación de las Unidades

Los insumos para la fabricación de las unidades pasan por un trompo mezclador. Con una pala se lleva a la siguiente etapa del proceso de fabricación que incluye un licuador para homogenizar la mezcla (Fig. 3.2 y 3.3).



Fig.3.2 Mezcladora,

El licuador elimina las imperfecciones de la mezcla para obtener un material con dimensiones homogéneas. El resultado de ambos procesos ingresa al circuito de fabricación mediante el alimentador de la prensa hidráulica. (Fig. 3.4)



Fig.3.3 Licuador.

Los ladrillos permiten ser apilados hasta una altura de 10 unidades luego de ser curados.



Fig.3.4 Prensa hidráulica.

El rendimiento observado durante la fabricación fue de 1000 a 1200 unidades por 8 horas de trabajos con tres operarios, es decir 1 unidad cada 2 minutos aproximadamente. La Fig. 3.5 ilustra las diversas etapas del proceso.

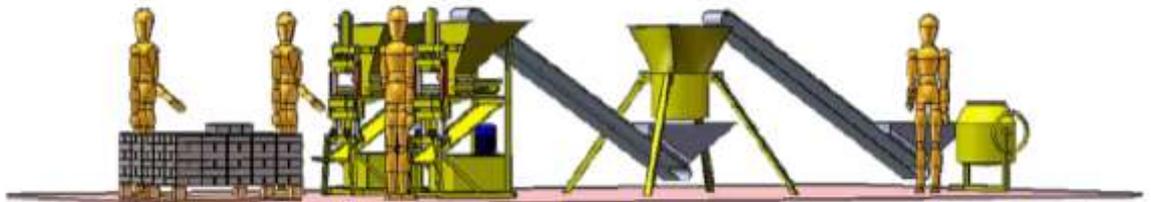


Fig.3.5 Proceso de fabricación.

En total se fabricaron 1400 unidades, dejándolos secar durante 03 días antes de llevarlos al laboratorio de estructuras antisísmicas (LEDI) y proceder con la instalación.

## CAPITULO 4: DEFINICIÓN DEL REFUERZO

### 4.1 Refuerzo Vertical

La resistencia a la compresión y la resistencia a la fuerza cortante de la albañilería dependen de las propiedades de la unidad de albañilería. El refuerzo vertical dentro de los alveolos de la unidad cumple la función de asegurar la unión entre los bloques de ladrillos ecológicos y garantizar el comportamiento del muro como una sola unidad.

Como refuerzo estructural se utilizará barras de acero que presentan comportamiento dúctil con una elongación mínima de 9%. El sistema se destina para la construcción de viviendas de hasta 2 pisos. Por tanto se debe considerar que el refuerzo vertical vaya anclado a la cimentación.

Para el refuerzo se determinó una varilla de  $\frac{1}{2}$ " cada 50 a 60 cm. Luego se procedió a llenar los alveolos que presentan varillas de refuerzo con mortero de las juntas (Fig.4.1) hasta alcanzar la altura de medio ladrillo, dicho procedimiento permite aumentar la resistencia a cizalle de las juntas horizontales (Fig.4.2).

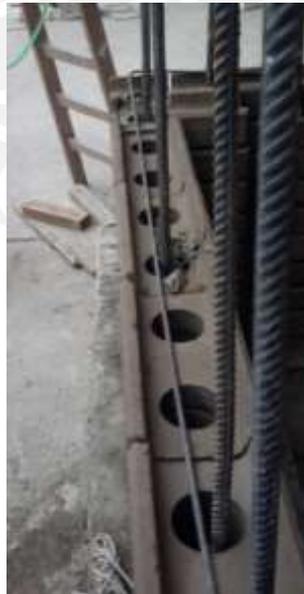


Fig.4.1. Fierro de  $\frac{1}{2}$ ".



Fig.4.2. Alveolos con mortero.

#### 4.2 Solera

Las vigas soleras permiten transmitir las fuerzas horizontales desde el techo hacia los muros perimetrales y aproximar la acción de un diafragma rígido en cada uno de los dos niveles. Se utilizó concreto armado con  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ , reforzado con 2 varillas de  $\frac{1}{4}$ " y estribos de fierro de  $\frac{1}{4}$ " espaciados cada 20 cm (Fig.4.3).



Fig.4.3. Viga solera del primer nivel.

En la mitad de cada uno de los niveles se colocó una hilada de ladrillo ecológicos tipo viga con refuerzo horizontal de 2 varillas de  $\frac{1}{4}$ " sin estribos (Fig.4.4), los niveles

de ladrillos tipo viga se completan con mortero para logran un arrioste horizontal a los muros.



Fig.4.4. Viga con ladrillos ecológicos.

## CAPITULO 5: CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES

Para los ensayos se preparan tres tipos de especímenes, pilas, muretes y el módulo de dos pisos.

Para todos los especímenes es necesario recalcar que las juntas fueron casi nulas. Se aplica entre ladrillo y ladrillo una lechada de mortero, esta junta podrá ser máximo de 0.5 cm, para que los enclaves hembra y macho sigan trabajando.

### 5.1 Características de las Pilas y Muretes

Se construyeron 4 pilas de 9 unidades cada una como se muestra en la figura 5.1. Las pilas fueron reforzadas con varillas de acero verticalmente con una altura de 63 cm. También se construyeron 4 muretes de 63x75 cm., como se aprecia en la figura 5.1, los cuales fueron reforzados vertical y horizontalmente. Ambos especímenes se construyeron con la misma técnica de construcción convencional para que sean representativos.

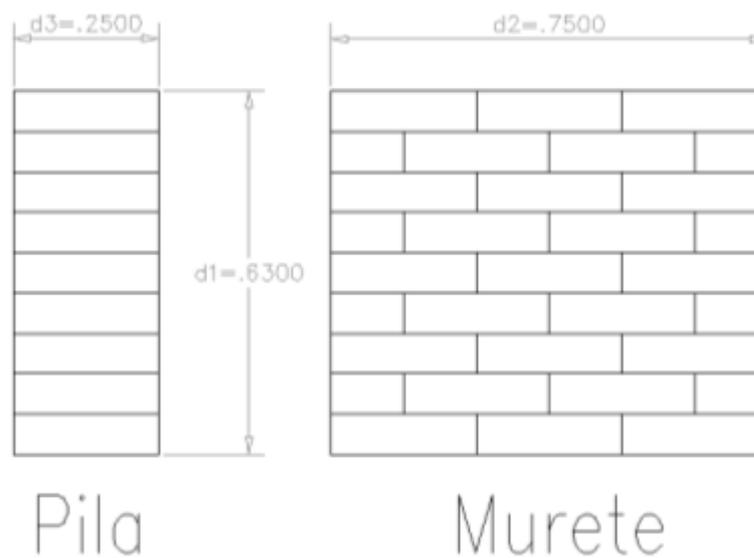


Fig.5.1. Características de las Pilas y de los Muretes.

### 5.2 Características del Módulo

El módulo de ladrillos prensados de dos pisos tuvo en planta una sección en forma de "U", tal como se muestra en la figura 5.2.

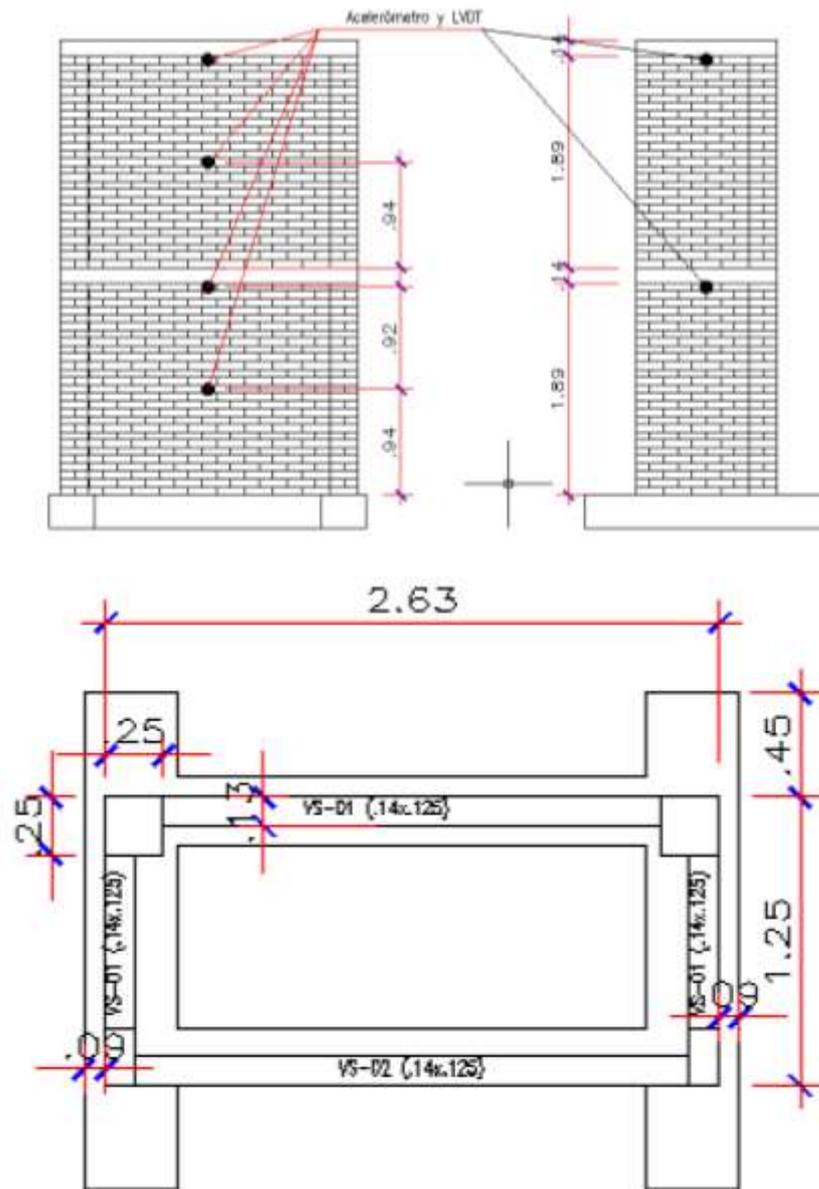


Fig.5.2. Características del Módulo.

El peso del módulo no debe ser mayor a 15 toneladas debido a las restricciones del puente grúa y la mesa vibratoria. Para calcular el peso del módulo se tomaron en consideración los siguientes pesos unitarios de los materiales empleados:

- Peso unitario del ladrillo prensado:  $1700 \text{ kg/m}^3$
- Peso unitario del concreto:  $2400 \text{ kg/m}^3$

En la tabla 5.1 se detallan los elementos y el peso del módulo a ensayar.

**TABLA 5.1 Peso del módulo**

Elemento	Peso (kg)
Cimentación en x e y	2,200
Acero de refuerzo en x e y	148
Concreto en vigas y columnas	1,005
Muros de ladrillos en x e y	4,375
	7,728

El peso del módulo es de 7.73 toneladas, peso que permite su traslado al interior del laboratorio de estructuras y su instalación en la mesa vibratoria para proceder con el ensayo.

## CAPITULO 6: CONSTRUCCIÓN DE LOS ESPECÍMENES

### 6.1 Pilas y Muretes (Fig. 6.1)

Para la construcción de las 4 pilas se requirieron 9 unidades por pila, las cuales fueron reforzadas verticalmente con acero de  $\frac{1}{2}$ " en ambos alveolos y estos fueron llenados con mortero. Para las juntas se usó mortero líquido para consolidar la adherencia entre los ladrillos ecológicos prensados. Luego de que el grout hubo fraguado, se recubrieron en la parte superior como inferior con capping de yeso-cemento, esto servirá de apoyo una vez que el espécimen ingrese a la prueba de compresión axial.

Para los muretes se emplearon 23 ladrillos ecológicos prensados por cada uno, y como se mencionó en el capítulo 5 serán 4 especímenes. Por cada hilada de ladrillos se colocan dos ladrillos y medio, en los alveolos de los extremos se colocará un refuerzo vertical de acero de  $\frac{1}{2}$ " y se recubrirá de mortero líquido.

En la parte central se reemplazará el ladrillo prensado por el ladrillo prensado de viga con la finalidad de colocar como refuerzo horizontal una barra de  $\frac{1}{2}$ ". Esta hilera de ladrillos de viga será llenada pero previamente se taparan los alveolos libres para que éstos no se rellenen.

Luego de finalizar la construcción de los cuatro especímenes y después que hallan fraguado, se colocarán en las esquinas superior e inferior, en dirección diagonal, capping de yeso-cemento, donde la máquina aplica carga sobre el espécimen.

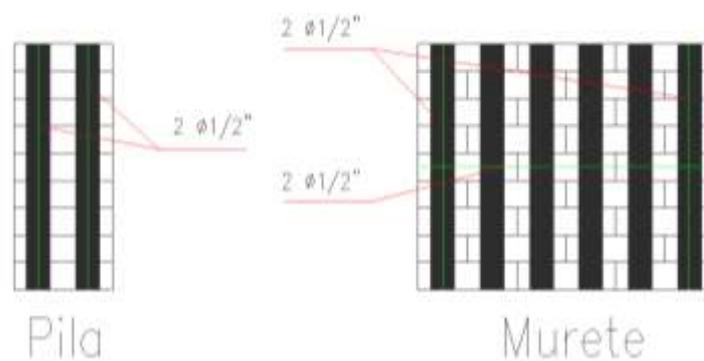


Fig. 6.1 Refuerzo de Pilas y Muretes

## 6.2 Módulo

El módulo fue construido sobre una cimentación, como se muestra en la figura 6.2, la cual cuenta con tres vigas principales VC-01 y VC-02 que soporta el peso de la estructura. Las vigas VC-01 tienen una sección de 30x40 cm reforzada con 6 fierros corrugados de 5/8" y estribos de 3/8". En ella se colocan los puntos de anclaje, en los extremos de la viga, tanto para la mesa vibratoria como para la grúa que desplazará el módulo del taller a la mesa vibratoria. La viga VC-02 tiene una sección de 30x30 cm con un refuerzo de 6 fierros corrugados de 5/8" con estribos de 3/8".

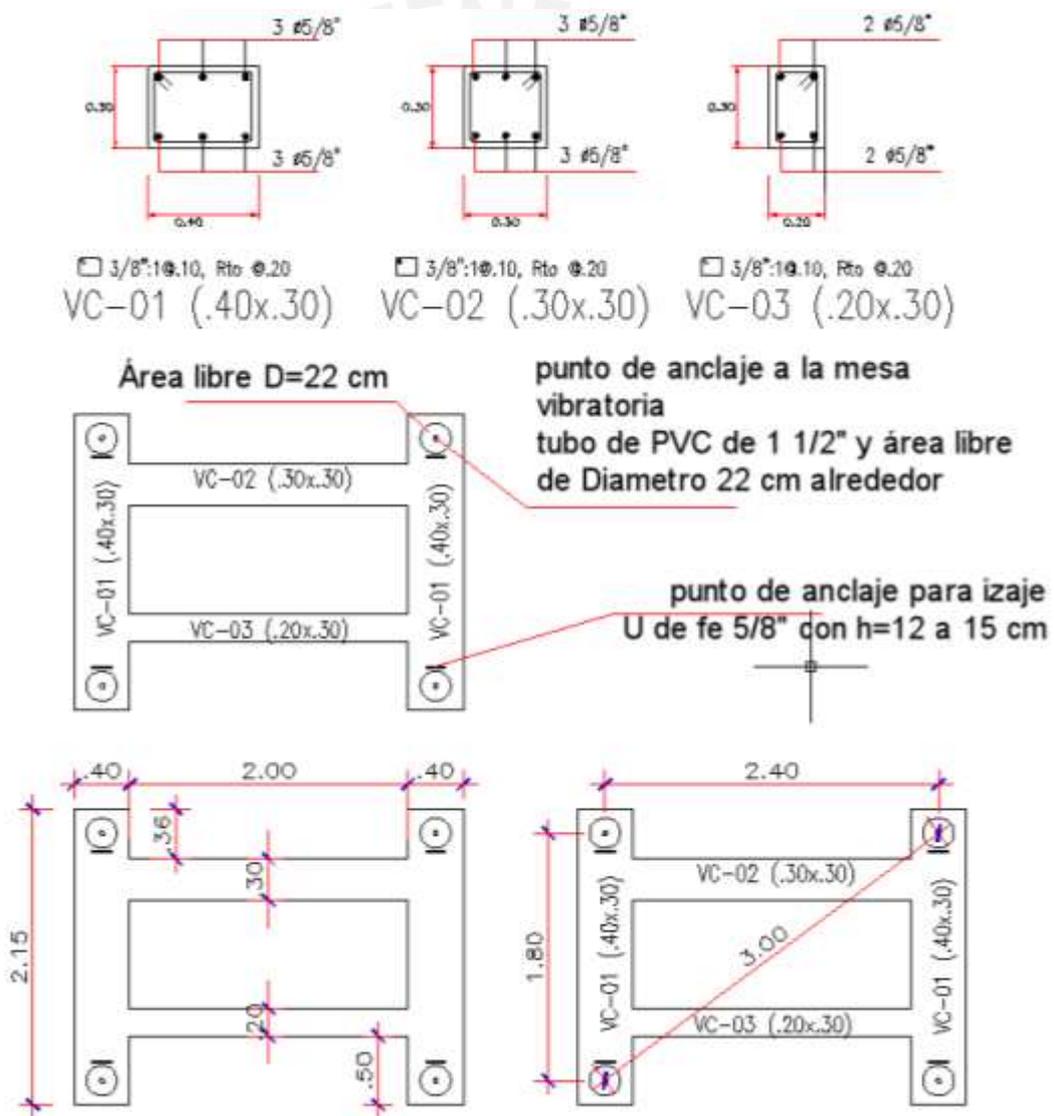


Fig. 6.2 Características de la cimentación para el modulo.

Por último, se tiene una viga secundaria VC-03 con una sección de 20x30 cm, un refuerzo de 4 fierros de 5/8" y estribos de 3/8". Las vigas fueron sobredimensionadas con la finalidad que puedan soportar los esfuerzos producidos por el traslado del módulo a la mesa vibratoria y los producidos durante el ensayo en la mesa vibratoria.

Proceso constructivo de la cimentación (Fig. 6.3 y 6.4):

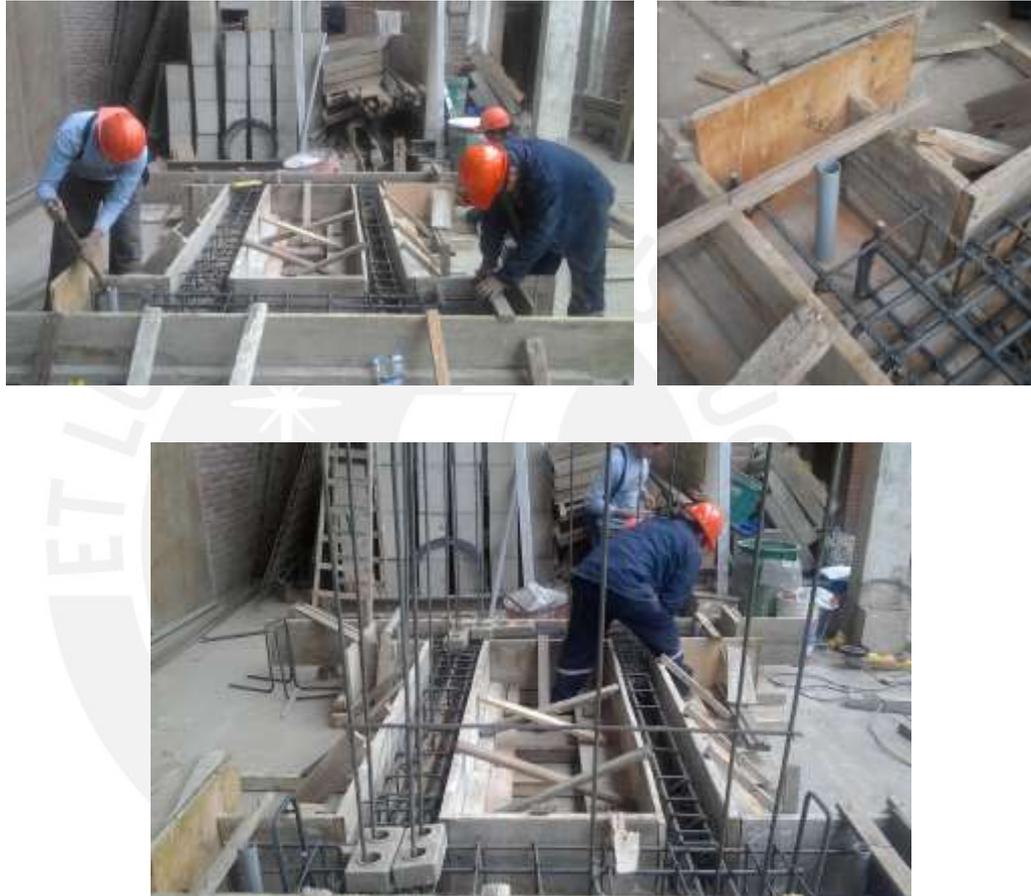


Fig. 6.3 Trabajos de encofrado, armado de refuerzo y fijación de puntos de anclaje.



Fig. 6.4 Vaceado de la cimentación.

El módulo será de dos niveles y constará de tres muros, dos paralelos al eje X y uno paralelo al eje Y. Los dos muros paralelos al eje X tienen una longitud de 1.25 metros y el otro de 2.63 metros, con una altura de 1.89 por nivel. Sobre éstos se confeccionará un collarín de vigas de amarre VS-01 y VS-02 reforzadas con acero corrugado, como se aprecia en la figura 6.3. Además los muros se reforzaron con acero vertical y horizontal, los refuerzos verticales se colocaron entre 50 y 60 cm tratando de mantener la simetría entre ellos, mientras que el horizontal se colocó en la mitad de cada paño, como se puede apreciar en las figuras 6.7, 6.8, 6.9, 6.10 y 6.11, que nos muestran el proceso constructivo del módulo.

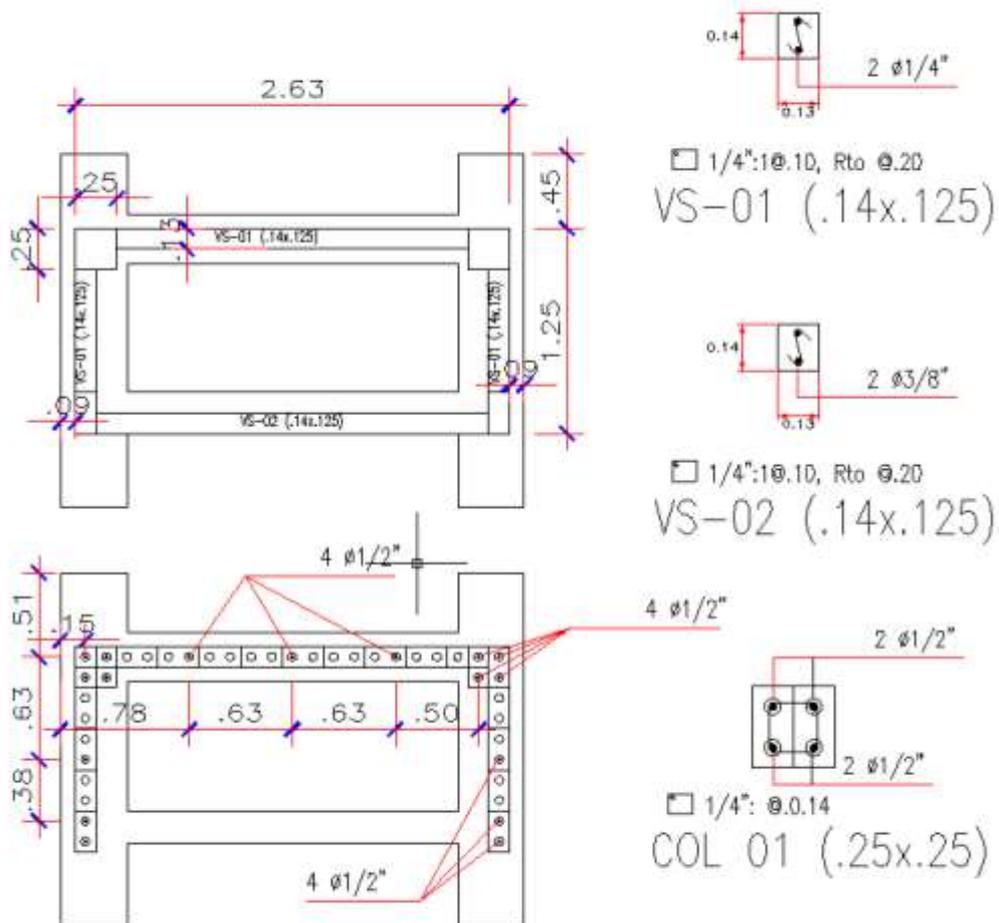


Fig. 6.5 Detalle del refuerzo de las paredes, columnas y vigas del módulo.

Proceso constructivo:



Fig. 6.6 Asentado de las primeras hiladas de ladrillo.



Fig. 6.7 Verificaciones de plomada y nivel.



Fig. 6.8 Armado de la hilera para el refuerzo horizontal con los ladrillos de viga.



Fig. 6.9 Armado de la viga solera del primer nivel.



Fig. 6.10 Armado de los muros del segundo nivel.



Fig. 6.11 Módulo terminado.

MCMXVII

## CAPITULO 7: ENSAYOS DEL LADRILLO ECOLOGICO PRENSADO Y MAMPOSTERIA

### 7.1 Ensayo de Unidades de Ladrillos Ecológicos

Se ensayaron 05 unidades de ladrillos ecológicos a variación de dimensiones, absorción, densidad y resistencia a la compresión.

#### 7.1.1 Variación de Dimensiones

En la Tabla 7.1 se muestran los resultados promedios de 05 unidades, obtenidos en las pruebas de dimensiones, se puede observar variaciones mínimas con respecto a las medidas nominales (Fig.2.2.), del orden de menos del 1.6%.

**TABLA 7.1 Variación de dimensiones de los ladrillos ecológicos prensados.**

Variación de Dimensiones (VD)			
	Promedio (mm)	Nominal (mm)	VD (%)
Largo	251.8	250.0	0.72 %
Ancho	127.0	125.0	1.60 %
Altura	69.82	70.0	-0.26 %

#### 7.1.2 Absorción y densidad

Se realizó la prueba de absorción, teniendo como resultado una absorción de 12.3% en promedio sobre las 5 unidades. Podemos ver que la absorción es menor al 22%, el cual es el valor máximo para los ladrillos de arcilla cocida de la Norma E.070. De los valores se aprecia que el curado parcial por 3 días es el apropiado para el tipo de unidades ensayado.

Luego de realizar la prueba de densidad a 5 unidades se obtuvo un valor promedio de 1.89 gr/cc, siendo el resultado mayor al valor mínimo de 1.50 gr/cc que se exige para los ladrillos de arcilla cocida. Los valores obtenidos son referenciales ya que los ladrillos ecológicos prensados no ingresan al horno para cristalizar la arcilla, se considera la resistencia mediante la compresión de las unidades con la prensa hidráulica.

### 7.1.3 Compresión de Unidades

La resistencia promedio a compresión de 5 unidades fue de  $99.5 \text{ kg/cm}^2$ , con una dispersión en los resultados de 10%, con lo que la resistencia promedio es mayor que la resistencia a compresión mínima de  $12 \text{ kg/cm}^2$  exigida por la Norma de Adobe E.080 y superior a  $50 \text{ kg/cm}^2$  valor para ladrillos tipo I en la Norma de Albañilería E.070.

De los resultados se puede comprobar que la resistencia a la compresión de los ladrillos ecológicos prensados supera la resistencia de los bloques de adobe y es equivalente a las unidades de ladrillos de arcilla industriales. A continuación se muestran los resultados de los ensayos a pilas, muretes y módulo de dos pisos.

### 7.2. Ensayo de Compresión Axial en Pilas

Para el ensayo se utilizaron los dispositivos mostrados en la Fig. 7.1. Se ensayaron 3 pilas a compresión axial con la finalidad de determinar la resistencia característica a compresión ( $f'm$ ). Terminada la construcción de los especímenes, se coloca un capping en la parte superior e inferior para uniformizar la superficie de contacto con el dispositivo de ensayo a compresión axial.

Se utilizó una velocidad de carga de  $5 \text{ tn/min}$  y el LVDT que se muestra permite medir el desplazamiento vertical relativo entre cabezales, lo que incluye la deformación del capping y el reacomodo de los cabezales.



Fig.7.1. Dispositivos utilizados en el ensayo de compresión en pilas.

### 7.2.1 Forma de Falla

Las tres pilas tuvieron una falla a través de una grieta vertical que atravesó los ladrillos ecológicos y el mortero (Fig.7.2), no se evidenció fallas por trituración de los ladrillos ni del concreto.

La resistencia a la compresión de cada pila ( $f_m$ ) se pudo determinar de la división de la carga a la rotura entre el área bruta de la unidad y corregida por el factor de esbeltez. Luego el valor de  $f'_m$  fue hallado al restar una desviación estándar al promedio de los valores de resistencia a la compresión.



Fig.7.2 Forma de falla de las 3 pilas (P1, P2 y P3).

### 7.2.2 Resultados de Resistencia a la Compresión Axial

Se muestran los resultados de los ensayos en la Tabla 7.2, en donde se obtuvieron resultados de esbeltez de 4.72 a 5.08, por lo que se procedió a realizar una corrección por esbeltez de los resultados.

**TABLA 7.2 Dimensiones de las pilas.**

Muestra	Altura (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Esbeltez
P1	63.50	25.00	12.50	5.08
P2	59.00	25.00	12.50	4.72
P3	61.80	25.00	12.50	4.94

**TABLA 7.3 Resistencia a la compresión axial de las pilas.**

Muestra	Area (cm <sup>2</sup> )	Carga (KN)	Carga (Kg)	Factor	f <sub>m</sub> (Kg/cm <sup>2</sup> )	Desv. (Kg/cm <sup>2</sup> )	Media (Kg/cm <sup>2</sup> )	f' <sub>m</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )
P1	312.50	110.94	11320.41	1.000	36.23	2.60	34.72	32.12
P2	312.50	98.22	10022.45	0.989	31.71			
P3	312.50	111.17	11343.88	0.998	36.21			

De los valores obtenidos en la tabla 7.3, se obtiene que la resistencia última de las pilas f'<sub>m</sub> es de 32.12 kg/cm<sup>2</sup>

El esfuerzo admisible a compresión de la albañilería de abobe (f<sub>m</sub>) (Norma E.080):

$$f_m = 0.25 f'_m$$

$$f_m = 0.25 \times 32.12 = 8.03 \text{ kg/cm}^2$$

La Norma de Abobe E.080 propone que alternativamente cuando no se realicen ensayos de pilas, se podrá usar el valor de esfuerzo admisible de  $f_m = 2.0 \text{ kg/cm}^2$ , valor que se comprueba luego del ensayo.

La resistencia admisible obtenida de 8.03 kg/cm<sup>2</sup> es suficiente para que los muros internos de una vivienda de 2 pisos puedan soportar las cargas de gravedad, por lo que luego de realizar el ensayo de compresión en pilas, se recomienda el uso de los ladrillos ecológicos de suelo – cemento en la elaboración de viviendas de hasta 2 pisos.

### 7.3 Ensayo de Compresión Diagonal en Muretes

Para obtener la resistencia al corte de la albañilería de ladrillos ecológicos prensados (V<sub>m</sub>), la Norma E.080 en el capítulo 8, indica que se pueden realizar ensayos de compresión diagonal en un mínimo de tres especímenes. Los resultados del ensayo permiten obtener el valor de V<sub>m</sub> (resistencia al corte) igual al esfuerzo último del murete de ensayo.

Durante los ensayos se construyeron tres muretes de 0.60 m x 0.63 m, con juntas horizontales de 0.5 cm de espesor. Durante la construcción de los muretes se verificó la verticalidad del mismo utilizando el mismo mortero que en la construcción de las pilas. En los extremos se colocó capping para uniformizar la superficie de contacto con el dispositivo de ensayo a compresión diagonal (Fig.7.3), el cual tuvo una velocidad de ensayo de 1 tn/min y no se utilizaron LVDT.



Fig.7.3 Dispositivos utilizados en el ensayo de muretes a compresión

### 7.3.1 Forma de Falla

Luego de realizar los ensayos, en los tres muretes se obtuvo una falla similar, en donde se formaron grietas diagonales a lo largo del espécimen y con poca tendencia a propagarse por las juntas. Esto indica que hubo una buena adherencia entre la unidad y el mortero (Fig.7.4 a 7.6).



Fig.7.4 Formas de falla de murete M1



Fig.7.5 Formas de falla de murete M2



Fig.7.6 Formas de falla de murete M3

### 7.3.2 Resultados de Resistencia al Corte

De manera similar a los cálculos realizados en los ensayos de compresión en pilas, para determinar el valor de la resistencia característica al corte de la albañilería con ladrillos ecológicos prensados (vím), se utilizó el valor promedio de la fuerza aplicada entre el área diagonal comprimida menos una desviación estándar del promedio de los resultados.

Los resultados de los cálculos se muestran en la tabla 7.4 y 7.5.

**TABLA 7.4 Dimensiones y Cargas Máximas.**

Muestra	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Diagonal (cm)	P <sub>máx</sub> (Kg)	P <sub>máx</sub> (KN)
M1	62.00	63.00	12.50	88.39	6500.00	63.70
M2	60.40	63.00	12.50	87.28	5361.22	52.54
M3	60.00	63.00	12.50	87.00	6979.59	68.40

TABLA 7.5 Resistencia a la compresión diagonal de los muretes

Muestra	Area (cm <sup>2</sup> )	Carga (KN)	f't (kg/cm <sup>2</sup> )	Desv. (Kg/cm <sup>2</sup> )	Media (Kg/cm <sup>2</sup> )	V'm (Kg/cm <sup>2</sup> )
M1	3906.00	63.70	5.88	0.76	5.74	4.98
M2	3805.20	52.54	4.91			
M3	3780.00	68.40	6.42			

De acuerdo a la norma E.080, el esfuerzo admisible al corte del muro (Vm) se obtendrá con la expresión:

$$V_m = 0.4 f't$$

$$V_m = 0.4 \times 4.98 = 1.99 \text{ kg/cm}^2$$

El valor obtenido es mayor que la alternativa cuando no se realizan ensayos de muretes, en donde se puede usar como esfuerzo admisible es valor de  $V_m = 0.25 \text{ kg/cm}^2$ .

Por otro lado, de acuerdo a la norma E.070, para el diseño se deberá utilizar la expresión:

$$V'm \leq \sqrt{f'm} = \sqrt{32.12} = 5.68 \text{ kg/cm}^2$$

$$4.98 \text{ (ensayos) kg/cm}^2 < 5.68 \text{ kg/cm}^2$$

En donde su cumple la expresión y valor final de la resistencia admisible al corte Vm es de  $1.99 \text{ kg/cm}^2$ .

## CAPITULO 8. ENSAYO SÍSMICO DEL MÓDULO

### 8.1 Peso del Módulo

El peso del módulo de dos pisos con ladrillos ecológicos prensados se midió durante el transporte del mismo, desde el patio de maniobras hacia la plataforma de ensayo del laboratorio de estructuras. Para tomar la medida se utilizó una celda de carga colgada en el puente grúa.

Previo a realizar el transporte del módulo, se contaba con el peso del anillo de cimentación. De las medidas tomadas se obtiene lo siguiente:

Peso del módulo con cimentación	=	7728 kg
Peso del anillo de cimentación	=	2200 kg
-----		
Peso del módulo	=	5528 kg

Se considera un peso volumétrico del concreto de la solera igual a  $2400 \text{ kg/m}^3$ , por lo que el peso de los muros del módulo es igual a 4375 kg. Siendo el volumen que ocupan los ladrillos ecológicos igual a  $2.422 \text{ m}^3$  (no se considera el vano frontal de la edificación), se obtiene que el peso volumétrico de los muros de albañilería de ladrillos ecológicos prensados es de:  $1806 \text{ kg/m}^3$ .

Para fines prácticos, se supone que el peso volumétrico de la albañilería hecha de ladrillos ecológicos prensados de suelo – cemento reforzado es de  $1700 \text{ kg/m}^3$ .

### 8.2 Determinación de las Aceleraciones de Ensayo

De acuerdo a lo estipulado en la Norma Técnica E.030 – Diseño Sismo Resistente, la aceleración máxima del terreno con una probabilidad de 10% de ser excedida en 50% es de 0.4g para la zona 3 del Perú. Si nos encontramos frente a un suelo blando, esta aceleración tiene un factor de amplificación de hasta 1.4 al compararse con un suelo rocoso, llegando a un valor de 0.56g.

Previo a cada fase se realizó un ensayo de vibración libre para determinar el periodo y el grado de amortiguamiento. La prueba consiste en aplicar 4 pulsos de 1.5 mm de desplazamiento en la mesa vibratoria.

En la tabla 8.1 se muestran las fases del ensayo sísmico.

TABLA 8.1 Aceleración nominales del ensayo sísmico

Fase	Ao (sismo de ensayo)	Equivalencia a un sismo real.
0	Vibración libre	Permite hallar el periodo natural de la estructura.
1	0.30g	Sismo moderado en suelo duro.
1	Vibración libre	Verificación del periodo de la estructura.
2	0.70g	Sismo severo en suelo duro.
2	Vibración libre	Verificación del periodo de la estructura.
3	1.20g	Sismo muy severo en suelo duro.
3	Vibración libre	Verificación del periodo de la estructura.

### 8.3. Características de la Señal Sísmica

En el ensayo sísmico del módulo de dos niveles, se utilizó la señal sísmica correspondiente a la componente “L” del terremoto ocurrido el 31 de mayo de 1970, captada en Lima, Perú, con 30 segundos de duración en su parte más fuerte. Este sismo produjo daños severos en las viviendas de adobe ubicadas en la zona afectada (Ciudades de Ancash).

La forma de la señal “mayo70” y su espectro de Fourier aparecen en la Fig.8.1, donde puede apreciarse que las frecuencias predominantes oscilan entre 2.5 a 3.5 Hz, en donde se puede apreciar que la frecuencia predominante del sismo de ensayo es de 3.2 Hz. Para el ensayo la intensidad del movimiento fue variable, de tal modo de presentar sismos leves, moderados y severos.

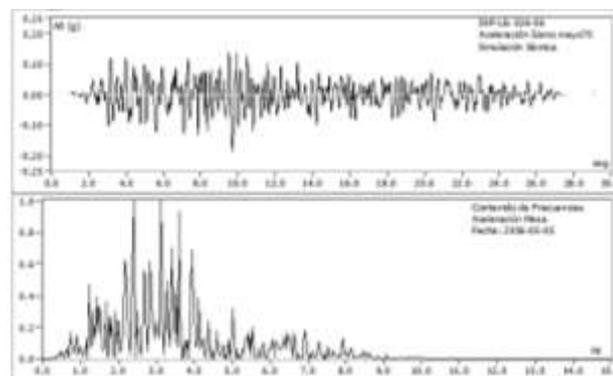


Fig.8.1 Aceleración del Sismo Mayo70 y contenido de frecuencias.

## 8.4 Instrumentación

En adición a los instrumentos propios de la mesa vibratoria (acelerómetro Ao, LVDT Do), se utilizaron ocho acelerómetros (Ai) y ocho LVDT (Di) con las siguientes funciones, mostrados en la Fig. 8.2.

- A1, A3, A5, D1, D3 y D5, medir horizontalmente la respuesta de la solera del primer nivel.
- A2, A4, A6, D2, D4 y D6, medir horizontalmente la respuesta de la solera del segundo nivel.
- A7 y D7, medir la respuesta de la parte intermedia del muro central del primer nivel.
- A8 y D8, medir la respuesta de la parte intermedia del muro central del segundo nivel.

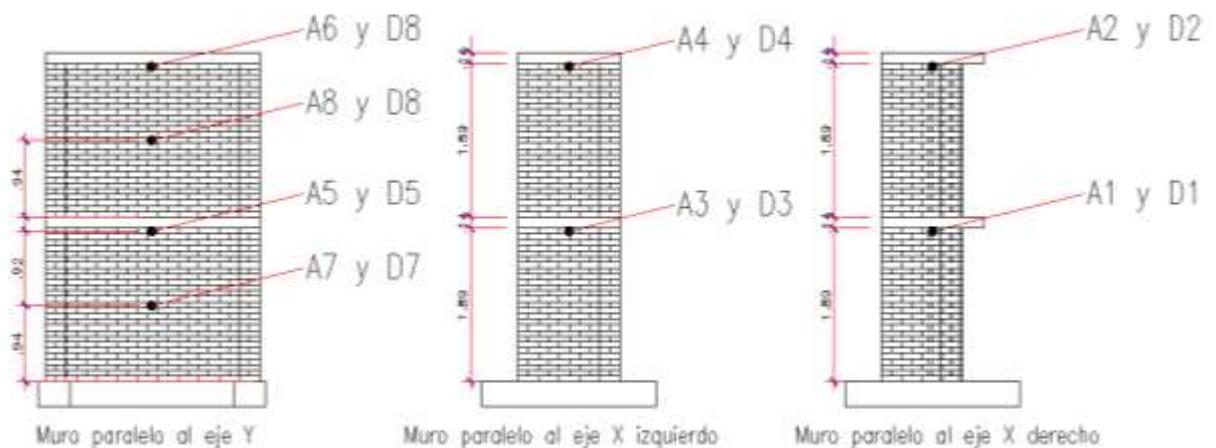


Fig.8.2. Instrumentación del módulo en el ensayo sísmico.

## 8.5 Comportamiento Cualitativo del Módulo

Durante la **Fase 1** y la **Fase 2** no se presentaron fisuras en el módulo de dos niveles construido con ladrillos ecológicos prensados de suelo-cemento (Fig. 8.3).



Fig.8.3 Módulo luego de realizar la Fase 1 y Fase 2. No se presentan grietas en los muros del modelo.

Se presenta a continuación el cálculo de la resistencia al corte y la predicción para la cual se iniciara la falla por corte del módulo de dos pisos con muros de ladrillos ecológicos prensados. Se utilizará la ecuación para el cálculo de la resistencia al agrietamiento diagonal para unidades de arcilla de la Norma de Albañilería E.070.

$$V_m = 0.5 \times V'_m \times \alpha \times t \times L + 0.23 \times P$$

Para el valor de  $V'_m$  no se considera el valor obtenido del murete 2 (M2) por ser muy pequeño en comparación de los valores de los muretes 1 y 3.

$$V_m = 0.5 \times 6.15 \times 0.62 \times 12.5 \times 125 + 0.23 \times 1250 \text{ kg}$$

$$V_m = 2978.91 + 287.5 = 3266.41 \text{ kg}$$

Por lo que para que se inicie la falla por corte se requiere:

$$A_o = (V_m / \text{peso}) \times g$$

$$A_o = (3267 \times 2) / 5500$$

$$A_o = 1.20 \text{ g}$$

Durante la **Fase 3** solamente se presentaron pequeñas fisuras que atravesaron el muro, se dieron en las unidades con fisuras diagonales y en la unión de los ladrillos

con el mortero por una mala adherencia. Los resultados cualitativos nos indican que el ensayo realizado se encuentra aun dentro de la fase elástico (Fig. 8.4 a 8.6).



Fig.8.4 Grietas en la unión ladrillo con mortero.



Fig.8.5 Grietas diagonales en las unidades.



Fig.8.6 Grietas verticales en las unidades.

## 8.6 Resultados

Para hallar la fuerza cortante en la base del módulo ( $V$ , en ton), se utilizó la siguiente fórmula:

$$V = F_a - (M_c + M_a + M_p) A_o = F_a - (P_c + P_a + P_p) A_o / g$$

En donde  $F_a$  es la fuerza del actuador dinámico menos la suma de las masas de la cimentación ( $P_c/g$ ,  $P_a/g$  y  $P_p/g$ ) multiplicadas por la aceleración de la plataforma ( $A_o$ ).

Los valores utilizados se muestran a continuación.

$$P_p = g M_p = 18000 \text{ kg} = \text{peso de la plataforma}$$

$$P_c = g M_c = 1958 \text{ kg} = \text{peso del anillo de cimentación}$$

$$P_a = g M_a = 446 \text{ kg} = \text{peso de las bolsas de arena adicionales}$$

Los desplazamientos registrados ( $D_i$ ) con los LVDT horizontales, son absolutos (relativos a un sistema externo a la mesa), para hallar los desplazamientos relativos a la mesa se restaron los desplazamientos de la mesa ( $D_o$ ):  $d_i = D_i - D_o$ .

$$d_i = D_i - D_o, \text{ para } i = 1 \text{ a } 8.$$

En la Tabla 8.2 se muestran los valores máximos positivos y máximos negativos captados por los instrumentos del laboratorio, al ser valores máximos la tabla muestran la envolvente durante los 30 segundos que duró el ensayo.

La resistencia unitaria al corte ( $v = V/A$ ) se obtuvo dividiendo el cortante basal entre el área de corte de los muros orientados en la dirección del ensayo.  $A = 125 \text{ cm} \times 12.5 \text{ cm} \times 2 = 3125 \text{ cm}^2$ .

**TABLA 8.2: Valores máximos y mínimos registrados durante las tres fases del ensayo sísmico**

Instrumento	Fase 1		Fase 2		Fase 3	
Ao (g)	0.269	-0.326	0.557	-0.763	1.353	-1.492
A1 (g)	0.336	-0.380	0.771	-0.872	1.441	-1.568
A2 (g)	0.448	-0.485	1.189	-1.272	2.610	-2.828
A3 (g)	0.303	-0.365	0.751	-0.850	1.362	-1.693
A4 (g)	0.393	-0.457	1.116	-1.289	2.092	-2.517
A5 (g)	0.327	-0.377	0.783	-0.862	1.454	-1.746
A6 (g)	0.449	-0.468	1.239	-1.227	2.582	-2.909
A7 (g)	0.299	-0.341	0.639	-0.797	1.401	-1.592
A8 (g)	0.348	-0.414	0.919	-0.989	1.792	-2.299
d1 (mm)	10.773	-0.872	1.936	-1.802	5.966	-4.434
d2 (mm)	10.699	-1.485	3.982	-3.672	11.434	-8.302
d3 (mm)	1.219	-0.970	1.834	-1.599	5.431	-4.044
d4 (mm)	1.758	-1.385	3.435	-2.746	11.780	-8.441
d5 (mm)	1.501	-0.883	2.315	-1.895	6.287	-4.881
d6 (mm)	2.176	-1.347	3.618	-2.887	11.979	-8.686
d7 (mm)	1.566	-1.478	1.508	-2.458	5.657	-5.604
d8 (mm)	2.113	-1.525	3.033	-3.186	10.231	-8.166
Do	31.355	-23.811	70.326	-52.968	130.403	-98.791
V(kg)	2423	-3965	5100	-7559	13317	-11890
v (kg/cm2)	0.78	-1.27	1.63	-2.42	4.26	-3.80

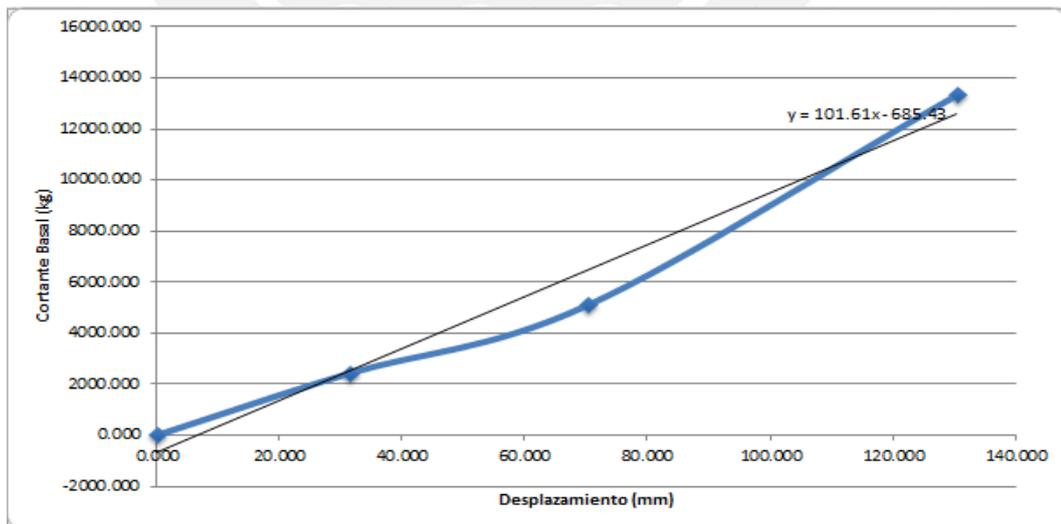


Fig.8.7. Cortante Basal vs desplazamiento D6 en las tres fases.

Utilizando los valores mostrados en la Tabla 8.2, se puede decir lo siguiente:

- En las tres fases del ensayo (fase elástica), los instrumentos A2 y A4, al igual que d2 y d4, marcaron valores no similares, por lo que a pesar de la simetría del módulo se presentó torsión en la dirección del ensayo.
- Los resultados en los instrumentos inferiores en la mitad del muro central (A7, d7) presentaron aceleraciones y desplazamiento pequeños, por lo que se concluye que las columnas externas y los muros de borde de la edificación requieren anclar el refuerzo de acero a la cimentación.
- Durante las tres fases del ensayo no se presentaron deslizamiento entre los elementos.
- Durante la fase 3 se presentaron aceleración de hasta 2.9g sin que se produzca desacople de los elementos, por lo que se comprueba que el mortero utilizado durante la construcción es el correcto para mantener la unidad del módulo.

### 8.7 Lazos Histeréticos V-d

En las figuras 8.8 a 8.14 se muestran los lazos histeréticos V-d6 y la variación de la fuerza cortante para las fases 1, 2 y 3 del ensayo. En todas las fases de la ensayo se muestra una gráfica desordenada, lo cual indica que se ha ingresado a la etapa inelástica, sin embargo se considera que la respuesta al sismo se ve afectada por la capacidad de las columnas de bloques ecológicos de suelo – cemento.

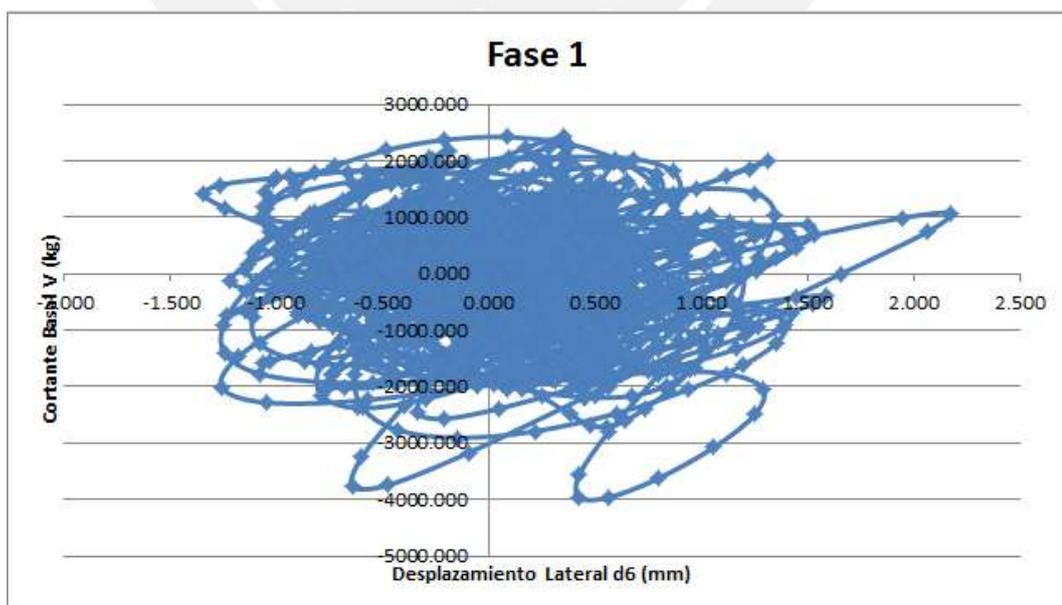


Fig.8.8. Lazos histeréticos V-d6. en fase 1.

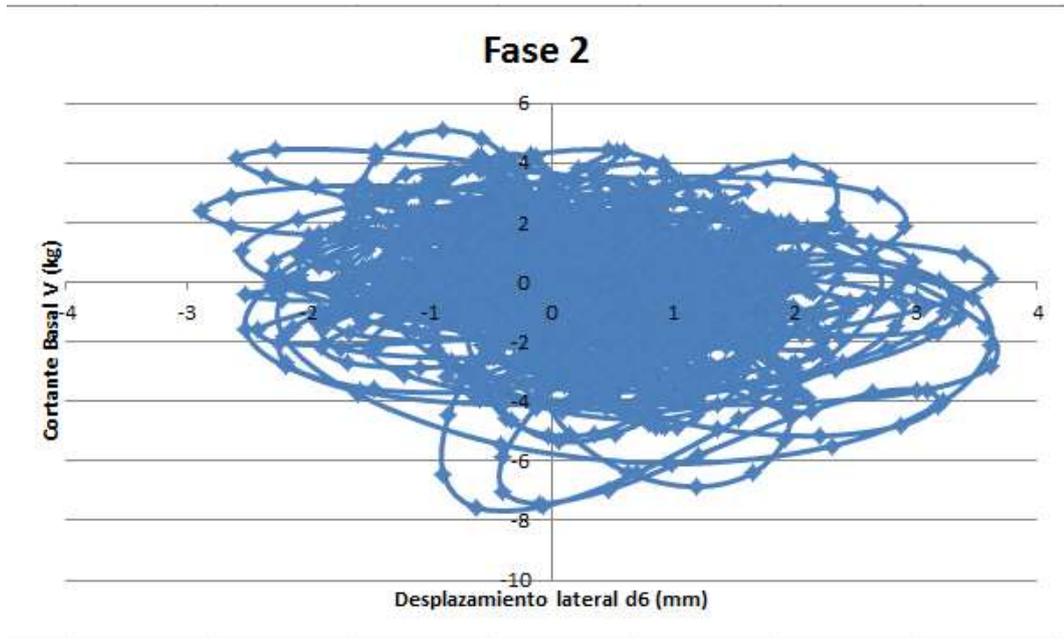


Fig.8.9. Lazos histeréticos V-d6. en fase 2.

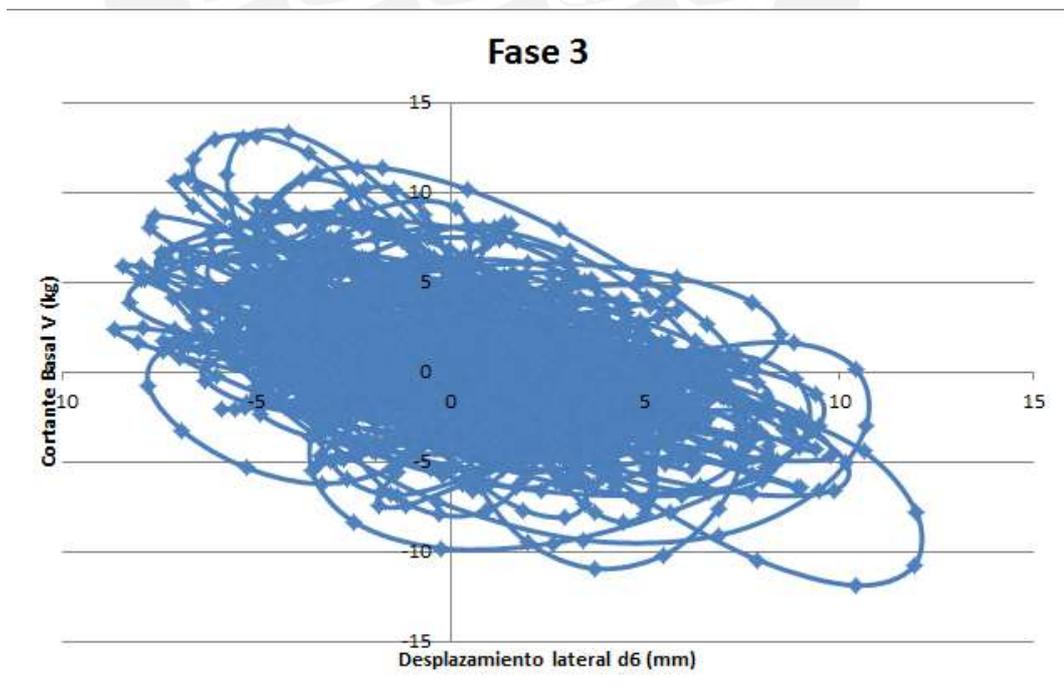


Fig.8.10. Lazos histeréticos V-d6. en fase 3.

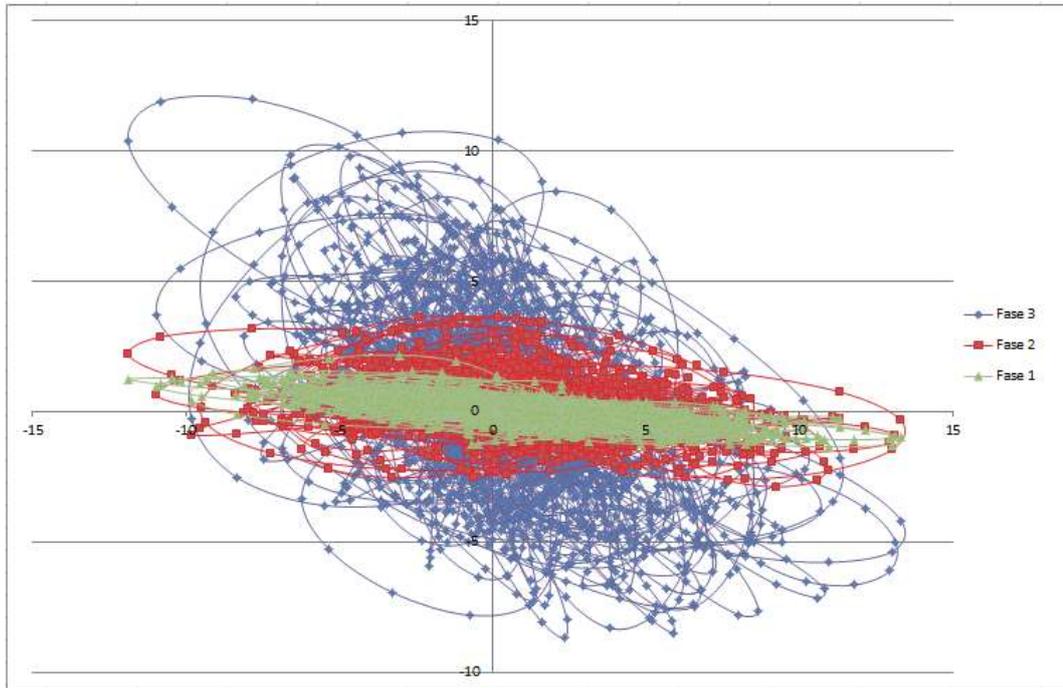


Fig.8.11. Resumen de Lazos histeréticos V-d6.

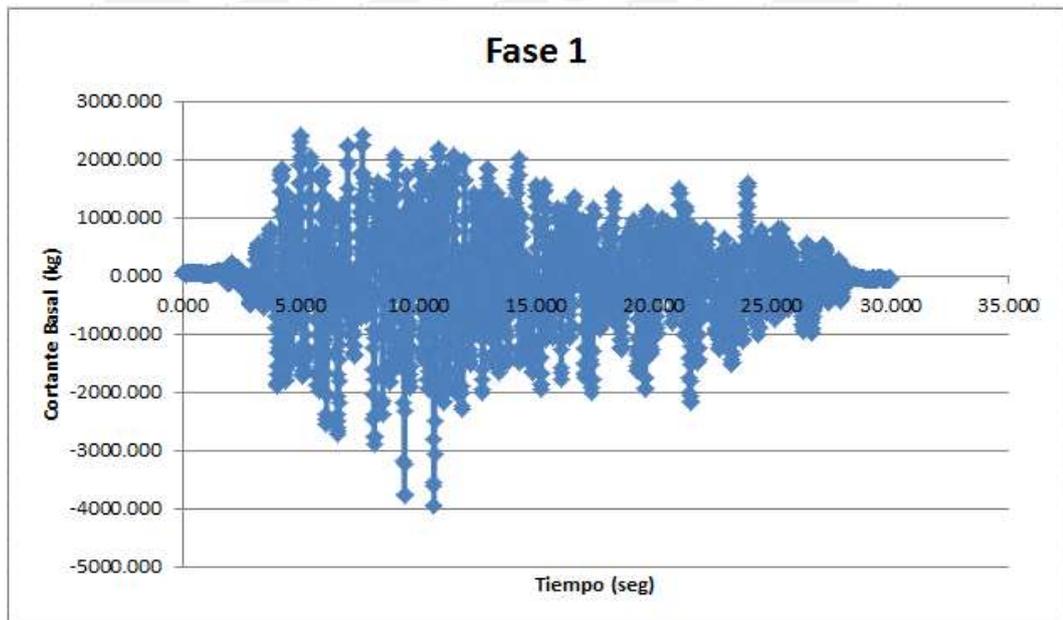


Fig.8.12. Variación del cortante basal en el tiempo en fase 1.

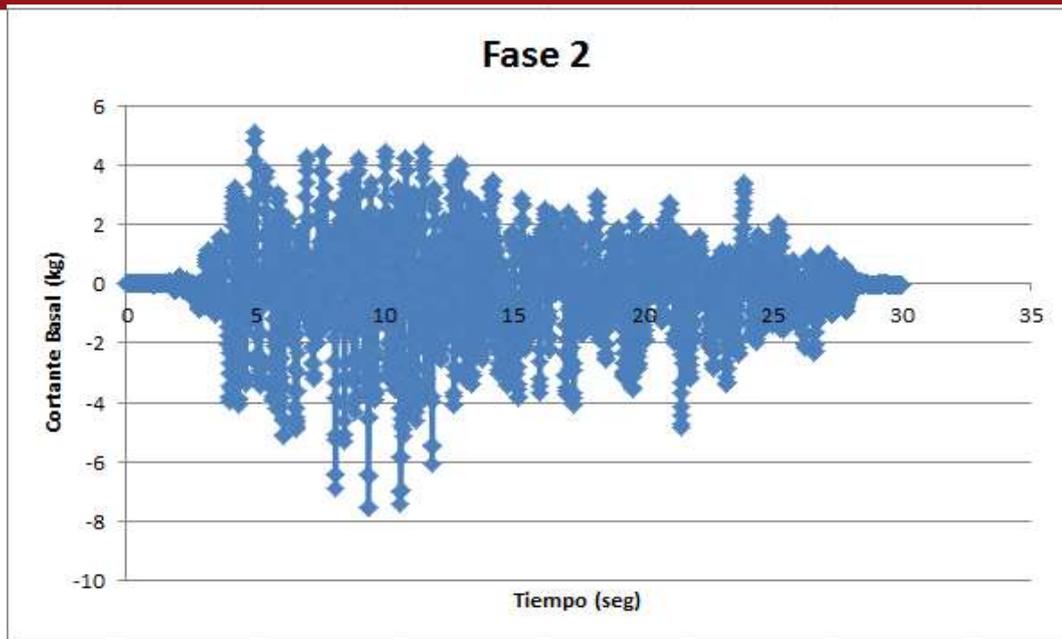


Fig.8.13. Variación del cortante basal en el tiempo en fase 2.

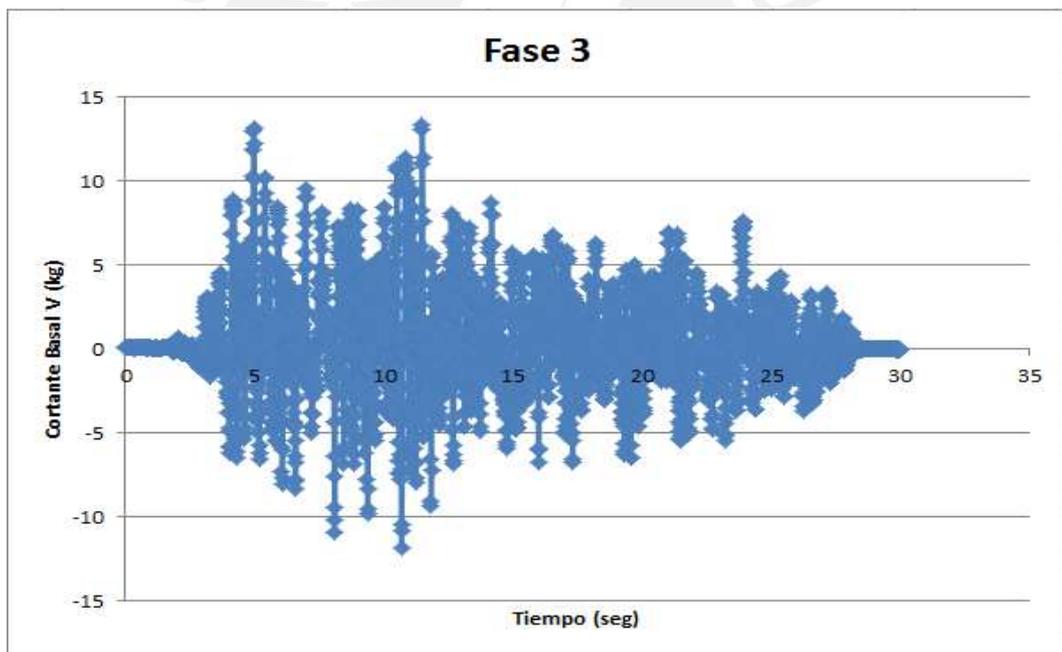


Fig.8.14. Variación del cortante basal en el tiempo en fase 3.

### 8.8 Vibración Libre. Período de Vibración "T".

Antes de la primera fase y luego de cada una de las fases del ensayo sísmico, se aplicaron 4 pulsos de desplazamiento de 1.5 mm en la mesa vibratoria. Se

registraron las respuestas de todos los instrumentos para luego procesar la variación de la aceleración a lo largo del tiempo del acelerómetro central ubicado en el segundo nivel. (Fig.8.15)

Se obtuvieron resultados pequeños y muy variables del periodo. El periodo promedio luego de la vibración post fase 3 fue 0.12 segundos y el amortiguamiento se calculó usando decremento logarítmico.

$$\varepsilon = \text{Ln} (0.029276/0.017923)/(2\pi \times 2) = 0.03904 \text{ (3.90\%)}$$

De acuerdo a la figura 8.15 se aprecia una caída durante los ciclos consecutivos por lo que se tomó dos ciclos para el cálculo del amortiguamiento, al encontrarnos frente a un caso elástico, el amortiguamiento no se ve modificado luego de cada fase del proyecto.

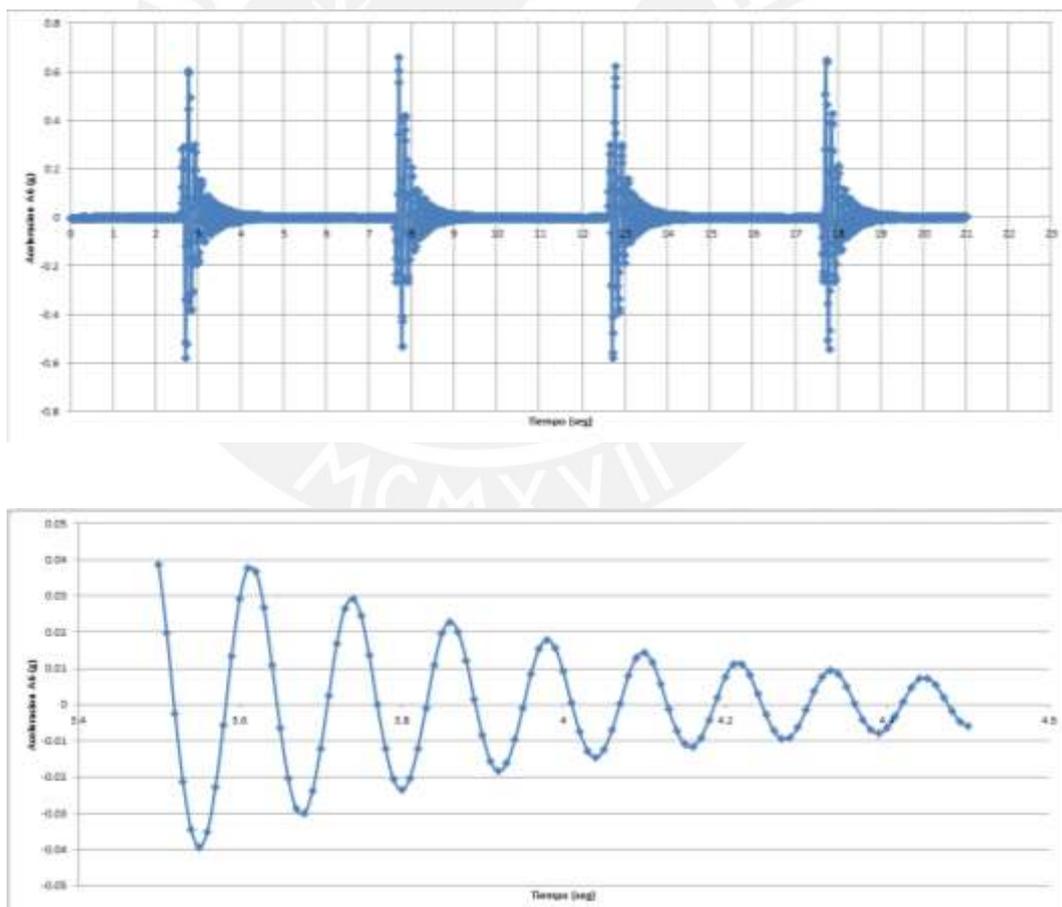


Fig.8.15. Respuesta en vibración libre del sensor A6.

## CAPITULO 9: CONCLUSIONES

### 9.1 Unidades prensadas de suelo-cemento

- Se presentaron variaciones en las dimensiones de los ladrillos ecológicos prensados de suelo-cemento. Principalmente se encontraron diferencias en altura en donde se tuvo que utilizar juntas horizontales con un espesor mayor a 0.5 cm, llegando a juntas de 0.9 a 1.0 cm de espesor, las que afectan directamente la resistencia a fuerza cortante y compresión axial de la albañilería. En el futuro se deberá corregir y/o calibrar la prensa hidráulica a fin de lograr unidades que permitan un proceso constructivo sin juntas horizontales.
- La fabricación de las unidades de suelo-cemento dio un rendimiento de un ladrillo cada dos minutos. No se presentaron fisuras por contracción por secado, por lo que el curado utilizado fue el correcto para el tipo de material empleado en la fabricación.
- Considerando una mezcla conformada por tierra arcillosa (65%), cemento (20%), arena fina (10%) y agua (5%) se lograron ladrillos de suelo cemento con una resistencia a la compresión de  $99.5 \text{ kg/cm}^2$ , valor superior a la resistencia mínima exigida por la Norma de Adobe E.080 ( $12 \text{ kg/cm}^2$ ) y siendo equivalente a la resistencia característica a compresión de los ladrillos clase III ( $95 \text{ kg/cm}^2$ ) de la Norma de Albañilería E.070.
- El peso de los ladrillos ecológicos prensados de suelo-cemento es de 3.5 kg por unidad, presentando variaciones en sus dimensiones de hasta 1.6%. Se realizaron pruebas de absorción en las unidades, teniendo una absorción de 12.3% en promedio, valor inferior al límite aceptado para ladrillos de arcilla cocida.
- Luego de realizar la prueba de densidad sobre las unidades, se obtuvo un valor promedio de 1.89 gr/cc, siendo el resultado mayor al mínimo de 1.50 gr/cc que se exige para los ladrillos de arcilla cocida.
- No se presentaron daños en los ladrillos ecológicos prensados durante la operación de transporte y asentado.

## 9.2 Construcción

- Durante la construcción de los especímenes se pudo verificar que las unidades de suelo-cemento fabricadas con prensa hidráulica facilitan el asentamiento de las hiladas y la presencia de alveolos otorgan la posibilidad del uso de refuerzo vertical, horizontal y tuberías para instalaciones eléctricas y sanitarias.
- La facilidad de instalación genera un ahorro en el número de horas hombre utilizado en la construcción y el acabado sin tarrajeo un ahorro en el costo del muro por metro cuadrado instalado.

## 9.3 Pilas y Resistencia Admisible a Compresión Axial

- La resistencia a compresión axial de la albañilería, corregida por esbeltez, fue  $f'm = 32.12 \text{ kg/cm}^2$ , de acuerdo con la Norma de Albañilería E.080, la resistencia admisible a compresión axial de los muros resulta:  **$f_m = 0.25 f'm = 8.03 \text{ kg/cm}^2$** .
- De acuerdo al valor obtenido de presión admisible de  $8.03 \text{ kg/cm}^2$ , se concluye que la resistencia de los muros con ladrillos ecológicos prensados de suelo-cemento, es suficiente para que los muros internos de una vivienda de dos pisos puedan soportar las cargas de gravedad.

## 9.4 Muretes Ensayados a Compresión Diagonal

- Luego de realizar los ensayos de compresión diagonal en los tres muretes, se obtuvo el mismo tipo de falla con grietas diagonales a lo largo del espécimen y con poca tendencia a propagarse por las juntas horizontales, lo cual indicó una buena adherencia entre la unidad y el mortero.
- Las varillas de refuerzo vertical proporcionaron ductilidad a los muretes de albañilería después del primer agrietamiento diagonal.
- La resistencia máxima promedio a corte puro de los muretes hechos con ladrillos ecológicos prensados de suelo-cemento y reforzados con varillas de acero, fue de  $v = 4.98 \text{ kg/cm}^2$ . De acuerdo a la Norma de Adobe E.080, el esfuerzo admisible al corte del muro  $V_m$  se obtendrá con la expresión  $V_m = 0.4$

$v = 0.4 \times 4.98 = 1.99 \text{ kg/cm}^2$ , el valor obtenido es mayor que la alternativa cuando no se realizan ensayos de muretes ( $V_m = 0.25 \text{ kg/cm}^2$ ).

### 9.5 Ensayo Sísmico del Módulo

- Luego de aplicar al módulo de dos pisos un sismo equivalente al leve y moderado de la Norma de Albañilería E.070, para el ensayo Fase 1 y Fase 2 con aceleración de 0.3g y 0.7g en suelo duro, no se presentaron grietas en el espécimen.
- Al aplicar al módulo de dos pisos un sismo equivalente al severo de la Norma de Albañilería E.070, para el ensayo Fase 3 con aceleración de 1.3g, solamente se presentaron fisuras finas y de poca extensión. Por otro lado, a pesar de la simetría del módulo, se presentó una ligera torsión en la dirección del ensayo sin producirse deslizamiento entre los elementos.
- El refuerzo en los encuentros de muros, el refuerzo horizontal con ladrillos tipo viga y el refuerzo de la viga solera fueron adecuados para controlar la falla por desgarramiento vertical en las esquinas del módulo. Las fallas de este tipo se dan principalmente por las fuerzas de inercia provenientes de los muros transversales a la dirección del ensayo.
- Durante la Fase 3 del ensayo se calculó un esfuerzo cortante máximo de  $4.26 \text{ kg/cm}^2$ , valor que no llega a superar la resistencia a corte puro de los muretes de  $4.98 \text{ kg/cm}^2$ . Para comparar los valores, hay que considerar que los bordes del módulo presentan bordes arriostrados, a diferencia de los muretes que tuvieron cuatro bordes libres. Se espera que la resistencia a corte del módulo sea mayor a la obtenida con los ensayos en los muretes.
- Según lo indicado en la Norma de Diseño Sismo resistente E.030 se especifica utilizar una carga  $V = Z \times U \times C1 \times P$ , considerando los valores del ensayo se tiene:  $U = 1$  para el caso de viviendas,  $C1 = 1.3$  para elementos cuya falla entrañe peligro para personas,  $Z = 0.4$  en la zona sísmica 3, con lo que tenemos un coeficiente sísmico de  $V/P = 0.52$ . Los resultados indican que el sistema es el adecuado para evitar la falla por desgarramiento en las esquinas y consecuentemente la volcadura del módulo.

- Las gráficas fuerza cortante vs desplazamiento para ensayo sísmico del módulo de dos pisos en las tres fases del ensayo, permitieron distinguir que el módulo se encuentra dentro del rango elástico. No se presenta un valor máximo ni la plataforma plana que evidencia el ingreso a la etapa inelástica.
- Luego de procesar los datos resultantes de las tres fases de ensayo, se obtienen valores de fuerza cortante basal que supera el peso de la estructura. Los valores se deben a la aceleración definida para los ensayos (0.3g, 0.7g y 1.3g). Se concluye que el peso de la construcción fue insuficiente para lograr una muestra representativa que permita evaluar los daños en una edificación con ladrillos ecológicos prensados de suelo-cemento ante distintas sollicitaciones sísmicas.
- De acuerdo con los valores obtenidos se aprecia que todo el ensayo se realizó dentro del rango elástico, sin embargo no resulta económico diseñar las estructuras de vivienda para que respondan elásticamente bajo las sollicitaciones sísmicas más severas. Las gráficas de lazos histéricos y las gráficas de cortante basal en el tiempo muestran un comportamiento frágil de los materiales con valores de cortante constantes a lo largo de la duración total del ensayo.
- De lo visto anteriormente y con las pruebas realizadas, se recomienda utilizar un valor de reducción de fuerza sísmica de  $R = 3$  de la Norma de Diseño Sismo resistente E.030 para la albañilería con ladrillos ecológicos prensados de suelo-cemento.

#### 9.6 Línea Futura De Investigación

- Si bien los resultados muestran altos valores de resistencia a compresión axial en pilas ( $32.12 \text{ kg/cm}^2$ ) y compresión diagonal en muretes ( $4.98 \text{ kg/cm}^2$ ), es importante revisar la durabilidad de las unidades en el tiempo considerando la ausencia de coacción en las unidades de suelo-cemento durante la fabricación.
- Se recomienda realizar ensayos de carga lateral cíclica en muros de albañilería con unidades de suelo-cemento para determinar la resistencia a corte para distintas condiciones de esbeltez, arrostramiento de bordes y niveles de carga lateral. Los ensayos propuestos permitirán revisar el proceso constructivo y

verificar la adherencia de la solera a las unidades de albañilería así como la ductilidad otorgada por el refuerzo vertical.

- Los ensayos de carga lateral cíclicas en muros de albañilería permitirán verificar los valores teóricos de  $E_m$  y  $G_m$  de acuerdo con la Norma de Albañilería E.070 ( $E_m = 500f_m$  y  $G_m = 0.4E_m$ ). Estos valores para la presente tesis son  $E_m = 500 \times 32.12 = 15,560 \text{ kg/cm}^2$  y  $G_m = 0.4 \times 15560 = 6,224 \text{ kg/cm}^2$ . Los valores resultantes permitirán desarrollar un modelo analítico con fines de obtener ecuaciones de diseño para el tipo de albañilería ensayado.



## REFERENCIAS

1. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, y SENCICO, 2006. Reglamento Nacional de Construcciones. Norma E.070 “Albañilería”.
2. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, y SENCICO, 2006. Reglamento Nacional de Construcciones. Norma E.080 “Adobe”.
3. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, y SENCICO, 2006. Reglamento Nacional de Construcciones. Norma E.030 “Diseño Sismorresistente”.
4. San Bartolomé, Quiun, Silva, *Construcciones de Albañilería*, Fondo Editorial - PUCP, Lima, 2011.

