

Pontificia Universidad Católica del Perú

Facultad de Ciencias e Ingeniería



COMPORTAMIENTO SISIMICO DE MUROS CONSTRUIDOS CON BLOQUES DE TIERRA PRENSADA

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

FLAVIA MARGIORY VILLON CHANG

DIEGO FRANCO CASTILLO GAMBOA

ASESOR: ING. ANGEL SAN BARTOLOME

LIMA, DICIEMBRE DE 2013

RESUMEN

El déficit de viviendas populares identificadas en los sectores más pobres de la población nacional, tanto a nivel de la capital como en el resto de departamentos y provincias del país, ha sensibilizado al sector construcción por encontrar una vivienda económica. Específicamente el Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción: SENCICO, es una institución comprometida con el desarrollo de investigaciones vinculadas a la problemática de la vivienda económica en beneficio de los sectores sociales más pobres del país.

SENCICO busca formas de industrializar la fabricación de adobes sobre todo en el sector rural y en los sectores más pobres del país. Una forma es a través del uso de moldes metálicos que permitan fabricar semi artesanalmente bloques de tierra húmeda prensada, con cavidades y reforzamientos que integren los bloques en una sola unidad. En este sentido encarga SENCICO al Laboratorio de Estructuras del Departamento de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, construir un módulo de vivienda a escala natural para ser ensayado ante diferentes cargas simuladas. El objetivo específico fue determinar los resultados experimentales y a partir de estos, las conclusiones pertinentes.

Nuestro equipo estuvo conformado por los Bachilleres en Ingeniería Civil Srta. Flavia Margiory Villón Chang, y Sr. Diego Franco Castillo Gamboa, asesorados por el Ingeniero Civil Sr. Ángel San Bartolomé. La investigación arrojó conclusiones importantes para implementarse en el mediano plazo. Además corrigiendo pequeñas deficiencias encontradas durante el proceso de investigación, hacer posible proyectos de la vivienda propia económica y de calidad de un solo piso, para los sectores sociales más empobrecidos de nuestro país.

Esperamos que esta investigación contribuya al bienestar y desarrollo de la vivienda popular económica y segura, con estándares de calidad tan buscada por la mayoría de la población rural de nuestro país.

FACULTAD DE
CIENCIAS E
INGENIERÍAPONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título : "Comportamiento sísmico de muros construidos con bloques de tierra prensada".

Área : Estructuras -Investigación-

Asesor : Ing. Ángel San Bartolomé

Alumna : FLAVIA MARGIORY VILLÓN CHANG ✓

Código : 1998.7171.8.412

Alumno : DIEGO FRANCO CASTILLO GAMBOA

Código : 1999.7036.6.412

Tema N° : 232

Fecha : Lima, 9 de febrero de 2010



DESCRIPCION DEL PROBLEMA

Con la finalidad de semi-industrializar la fabricación de adobes, SENCICO ha creado una máquina portátil que permite fabricar artesanalmente bloques de tierra húmeda prensada en un proceso similar a la construcción de las tapias, pero tecnificado, mientras que la construcción de los muros sigue la técnica del adobe convencional. Puesto que con el aparato indicado cabe la posibilidad de crear bloques alveolares que permitan alojar internamente al refuerzo, se hace necesario investigar experimentalmente un sistema de refuerzo económico que garantice un adecuado comportamiento sísmico de los muros portantes correspondientes.

OBJETIVO

El objetivo principal del proyecto es evaluar experimentalmente el comportamiento sísmico de los muros hechos con bloques de tierra prensada, utilizando un sistema de refuerzo económico compuesto por tubos PVC que traten de integrar a todos los bloques en una sola unidad. Otros objetivos de la investigación serán: conocer las propiedades mecánicas del bloque y de la albañilería correspondiente, mediante ensayos de compresión axial y diagonal en prismas.

PLAN DE TRABAJO

Se realizarán los siguientes ensayos utilizando los equipos del Laboratorio de Estructuras, contratados por SENCICO. La construcción de los bloques, prismas, muros y módulo los hará SENCICO. Tanto la construcción como los ensayos serán supervisados por los tesisistas, bajo la responsabilidad del asesor.

Ensayo de Bloques

Se analizará el contenido de humedad de la tierra, su dosificación y si es necesario estabilizarla con cemento. Se fabricarán los bloques y se harán pruebas de compresión, variación de dimensiones, alabeo, succión y absorción.

FACULTAD DE
CIENCIAS E
INGENIERÍAPONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**Ensayos de Prismas**

Se construirán 3 pilas y 8 muretes a ensayar a compresión axial y diagonal, respectivamente. Todos los especímenes serán reforzados con los tubos PVC. En cuatro de los ocho muretes se utilizará mortero de barro con cemento adicionado, mientras que en el resto de prismas se utilizará mortero de barro, con el propósito de analizar la influencia del mortero sobre la resistencia a corte puro.

Ensayo de Muros a Carga Lateral Cíclica

Se construirán 2 muros a escala natural, uno de ellos carecerá de refuerzo interno (tubos PVC), mientras que el otro será reforzado para investigar la influencia del refuerzo ante cargas laterales coplanares. En ambos casos se utilizará vigas soleras de concreto pobre, reforzadas al mínimo. Ambos muros serán ensayados a carga lateral cíclica con desplazamiento lateral controlado.

Ensayo Sísmico del Módulo

Se construirá un módulo de vivienda a escala natural, reforzado con los tubos PVC y una solera de concreto pobre reforzada al mínimo. Este módulo presentará un muro lleno transversal a la dirección del sismo, para analizar el comportamiento ante cargas perpendiculares al plano y su conexión con los muros ortogonales, sujetos en simultáneo a cargas sísmicas coplanares. El módulo será ensayado ante sismos simulados en la mesa vibradora del Laboratorio de Estructuras.

Memoria Descriptiva

Se procesará la información, se elaborará la memoria descriptiva (extensión máxima 100 páginas) y se preparará un artículo con fines de difusión (extensión máxima 12 páginas), mostrando en forma gráfica los resultados experimentales.

VºBº
A.S.B.
Ángel San Bartolomé
Coordinador de Investigaciones
Sección de Ingeniería Civil

A.S.B. 





Agradecemos a nuestros padres por el apoyo incondicional en toda nuestra etapa universitaria.

AGRADECIMIENTO

Al Ing. Ángel San Bartolomé, nuestro más profundo agradecimiento por el apoyo brindado y sus continuas asesorías, que nos permitieron desarrollar esta tesis.

Agradecemos también a todo el personal técnico, profesional del Laboratorio de Estructuras de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Agradecimiento muy especial a SENSICO, institución comprometida con la investigación para el beneficio de los más pobres, también un agradecimiento al Ing. Cesar Huapaya y al Ing. Wilson Silva por el apoyo constante para poder sacar adelante nuestro proyecto.



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 Adobe Prensado | 2 |
| 2.2. Definición de la Mezcla | 4 |
| 2.2.1 Mezcla Suelo-Arena-Agua | 4 |
| 2.2.2 Ensayos Preliminares de Compresión y Mezcla Suelo-Cemento | 5 |
| CAPITULO 3: FABRICACIÓN DEL ADOBE PRENSADO | 7 |
| 3.1 La Máquina Prensadora (Compactadora) | 7 |
| 3.2 Fabricación del Bloque | 7 |
| CAPITULO 4: DEFINICIÓN DEL REFUERZO | 10 |
| 4.1 Refuerzo Vertical | 10 |
| 4.2 Solera | 11 |
| CAPITULO 5: CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES | 12 |
| 5.1 Características de las Pilas y Muretes | 12 |
| 5.2 Características de los Muros | 13 |
| 5.3 Características del Módulo | 14 |
| CAPITULO 6: CONSTRUCCIÓN DE LOS ESPECÍMENES | 15 |
| 6.1 Lineamientos Generales | 15 |
| 6.2 Pilas y Muretes | 18 |
| 6.3 Muros | 18 |
| 6.4 Construcción del Módulo | 21 |
| 6.5 Construcción de las Soleras | 24 |

| | |
|---|-----------|
| CAPITULO 7: ENSAYOS DEL ADOBE PRENSADO | 29 |
| 7.1 Ensayo de Unidades de Adobe | 29 |
| 7.1.1 Variación de Dimensiones y Alabeo | 29 |
| 7.1.2 Succión y Absorción | 29 |
| 7.1.3 Compresión | 30 |
| 7.2. Ensayo de Pilas a Compresión Axial | 30 |
| 7.2.1 Forma de Falla | 31 |
| 7.2.2 Resultados y Resistencia Admisible | 32 |
| 7.2.3 Módulo de Elasticidad (E) | 33 |
| 7.3 Ensayo de Compresión Diagonal en Muretes | 34 |
| 7.3.1 Forma de Falla | 35 |
| 7.3.2 Comportamiento | 36 |
| 7.3.3 Resultados y Resistencia Admisible | 37 |
| 7.4 Ensayos de Muros a Carga Lateral Cíclica | 38 |
| 7.4.1 Peso Volumétrico del Muro M2 | 38 |
| 7.4.2 Técnica de Ensayo | 39 |
| 7.4.3 Comportamiento Cualitativo de M2 (reforzado) | 40 |
| 7.4.4 Comportamiento Cualitativo del Muro M1 (no reforzado) | 43 |
| 7.4.5 Lazos Histeréticos V-D1 y Envolvente V-D1 | 45 |
| 7.4.6 Cálculo de la Rigidez Lateral (K) y del Módulo de Elasticidad (E) en M2 | 48 |
| CAPITULO 8. ENSAYO SÍSMICO DEL MÓDULO | 50 |
| 8.1 Peso del Módulo | 50 |
| 8.2 Determinación de las Aceleraciones de Ensayo | 50 |
| 8.3. Características de la Señal Sísmica | 53 |
| 8.4 Instrumentación | 53 |
| 8.5 Comportamiento Cualitativo del Módulo | 54 |
| 8.6 Resultados | 58 |
| 8.7 Lazos Histeréticos V-d2 | 60 |
| 8.8 Vibración Libre. Período de Vibración "T". | 62 |

| | |
|--|-----------|
| CAPITULO 9: CONCLUSIONES | 63 |
| 9.1 Adobe Prensado | 63 |
| 9.2 Construcción | 63 |
| 9.3 Pilas y Resistencia Admisible a Compresión Axial | 64 |
| 9.4 Muretes Ensayados a Compresión Diagonal | 65 |
| 9.5 Muros Ensayados a Carga Lateral Cíclica | 65 |
| 9.6 Ensayo Sísmico del Módulo | 66 |
| 9.7 Línea Futura de Investigación | 68 |
| | |
| REFERENCIAS | 69 |



CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 DESCRIPCION DEL PROYECTO

El proyecto trata analizar la posibilidad de utilizar bloques de suelo prensado en la construcción de viviendas sismorresistentes. SENCICO contrató los servicios del Laboratorio de Estructuras del Departamento de Ingeniería (LEDI) de la Pontificia Universidad Católica (PUCP), para efectuar las siguientes pruebas experimentales:

1. Ensayos de clasificación del bloque.
2. Ensayos de compresión axial en 3 pilas.
3. Ensayos de compresión diagonal en 8 muretes.
4. Ensayos de carga lateral cíclica en 2 muros a escala natural.
5. Ensayo de simulación sísmica de un módulo de vivienda.

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 bloques.
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 evaluar experimentalmente el comportamiento sísmico de los muros hechos con bloques de tierra prensada, utilizando un sistema de refuerzo económico compuesto por tubos PVC que traten de integrar a todos los bloques en una sola unidad. Otros objetivos de la investigación son: conocer las propiedades mecánicas del bloque y de la albañilería correspondiente, mediante ensayos de compresión axial y diagonal en prismas.

CAPITULO 2: UNIDADES DE ALBAÑILERIA Y DEFINICIÓN DE LA MEZCLA

2.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DEL ADOBE PRENSADO

El sistema de Adobe Prensado se ideó de tal manera que se asimile a una especie de “Albañilería Armada” reforzada internamente, hecha con bloques alveolares de dimensiones modulares, de tal forma que los alvéolos de los bloques de hiladas consecutivas coincidan, para que a través de ellos pase el refuerzo vertical que permita interconectar los bloques formando una sola unidad.

Originalmente, se pensó que los bloques iban a tener una longitud de 40cm y que las juntas verticales y horizontales iban a ser de 2cm de espesor (Fig.2.1). Sin embargo, errores cometidos en el molde metálico de la máquina prensadora, hicieron que el proyecto se desarrollara utilizando bloques de 38cm de longitud, sin juntas verticales (Fig.2.3).

El hecho de que los muros carezcan de juntas verticales, si bien debe afectar al comportamiento sísmico de los muros, se espera que este efecto no sea significativo, en vista que los bloques se interconectaron verticalmente con el refuerzo que atraviesa los alvéolos, los cuales a su vez fueron rellenos con el mortero de las juntas horizontales.

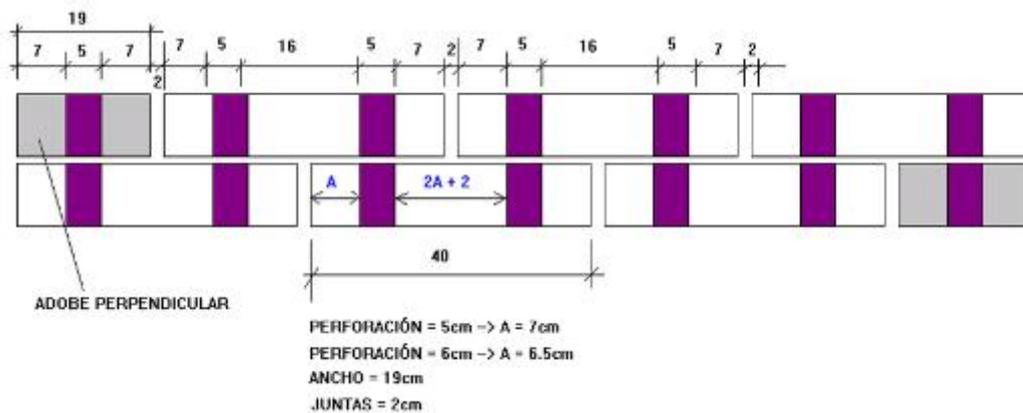


Fig. 2.1 Dimensiones modulares originales en centímetros.

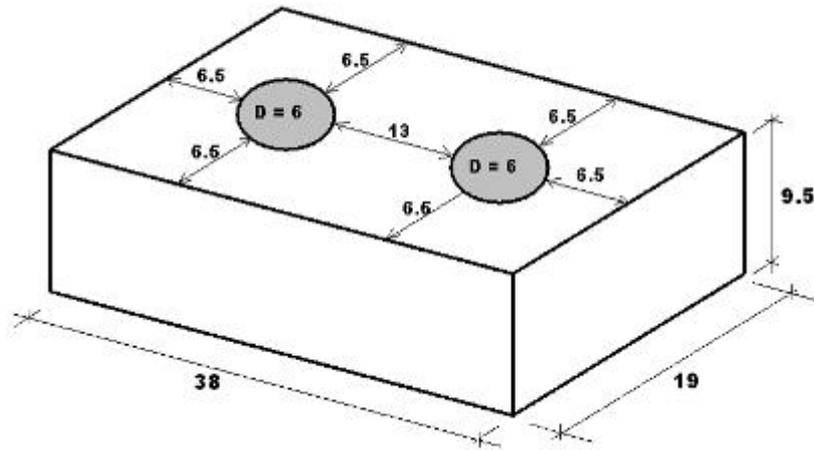


Fig.2.2 Dimensiones finales del bloque en centímetros.

Por otro lado, los 2 alvéolos fueron circulares, con un diámetro de 6cm, con lo cual, el porcentaje de huecos resultó: $(2\pi D^2/4) / (Lx t) = (2 \times 3.1416 \times 6^2/4) / (38 \times 19) = 0.078$ (7.8%). Es decir que la sección transversal de la unidad es mayor a 70% del área bruta, por lo que el bloque clasificó como sólido de acuerdo a la Norma E.070 [1].

Las dimensiones que presenta el bloque (Fig.2.2), permiten cortar con una picota a la unidad en partes iguales, para seguir las utilizando modularmente como media unidad en los muros (Fig.2.3), sin juntas verticales. Adicionalmente, el peso de un bloque entero es de aproximadamente 11 kg, por lo que puede ser manipulado con las dos manos.

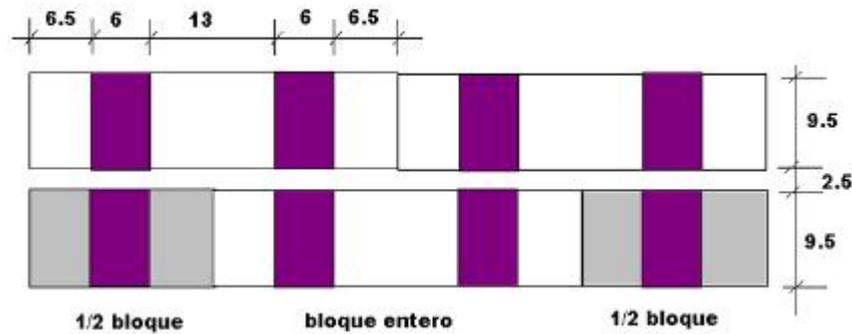


Fig.2.3 Albañilería sin juntas verticales. Dimensiones en centímetros.

2.2. DEFINICIÓN DE LA MEZCLA

2.2.1 Mezcla Suelo-Arena-Agua

El suelo empleado en la fabricación de los bloques es arcilloso (suelo agrícola adquirido por SENCICO), por lo que para evitar problemas de fisuración por contracción de secado, se le agregó arena gruesa seca, en una proporción volumétrica suelo – arena 5: 1.

Previamente, el suelo fue tamizado a través de una malla de 3/8" para eliminar las piedras, terrones grandes y materias orgánicas. (Fig.2.4)



Fig.2.4 Tamizado de suelo

Posteriormente, fue mezclado en seco con la arena, para después añadirle agua (Fig.2.5) de tal forma que se humedezca la mezcla sin que se forme barro.

La cantidad de agua fue medida mediante una prueba de campo (Fig.2.5), consistente en formar una bola de suelo húmedo para después soltarla desde una altura aproximada de 1m sobre una superficie plana y dura. Si la bola no se fractura quiere decir que la humedad es excesiva y hay que añadir mezcla seca; cuando la bola se pulveriza quiere decir que la mezcla está muy seca; y, cuando la bola se fractura en trozos grandes, es porque la humedad es la correcta. Cabe indicar que esta prueba se realiza en las construcciones de tapial.



Fig.2.5. Preparación de la mezcla y prueba de campo para medir el contenido de humedad.

2.2.2 Ensayos Preliminares de Compresión y Mezcla Suelo-Cemento

Con el objeto de determinar el nivel de resistencia a compresión que tenían los bloques preparados con la mezcla suelo-arena (acápite 2.2.1), y además para analizar la incidencia de añadir cemento (4% en peso) a la mezcla, se ensayaron a compresión ocho bloques a los 21 días de edad. Cuatro bloques fueron preparados con la mezcla suelo-arena y los otros 4 con la mezcla suelo-arena-cemento. Los resultados promedios fueron:

Bloques suelo-arena: 14.0 kg/cm² (con 20% de dispersión)

Bloques suelo-arena-cemento: 16.2 kg/cm² (con 14% de dispersión)

Puesto que añadir cemento a la mezcla incrementa la resistencia a compresión en apenas 16% y también porque agregar cemento produciría un incremento significativo en el costo (1/3 de bolsa por m² de muro), se decidió optar por la mezcla suelo-arena, ya que la resistencia alcanzada (14 kg/cm²) fue mayor que el valor mínimo (12 kg/cm²) exigido por la Norma de Adobe E.080 [3].

En esta etapa preliminar pudo observarse que la compactación de los bloques no era eficiente, por lo que el problema fue corregido aumentando el recorrido de la compactadora, con lo cual, los bloques definitivos al ser más compactos tuvieron mayor resistencia a compresión que los bloques preliminares (39% más, ver el acápite 7.1.3).



CAPITULO 3: FABRICACIÓN DEL ADOBE PRENSADO

3.1 La Máquina Prensadora (Compactadora)

La compactadora (Fig.3.1) es un equipo portátil fabricado por SENCICO e instalado mediante pernos sobre una base de concreto simple en el patio de construcción del LEDI. Este aparato metálico es de funcionamiento manual. El molde presenta la sección transversal del bloque, mientras que la tapa superior es giratoria en su plano y fija verticalmente. La base es una plancha de madera con una planta igual a la sección transversal del bloque. La presión se ejerce sobre la base de madera de abajo hacia arriba, accionando manualmente una palanca que desplaza verticalmente al bloque, el cual reacciona contra la tapa.

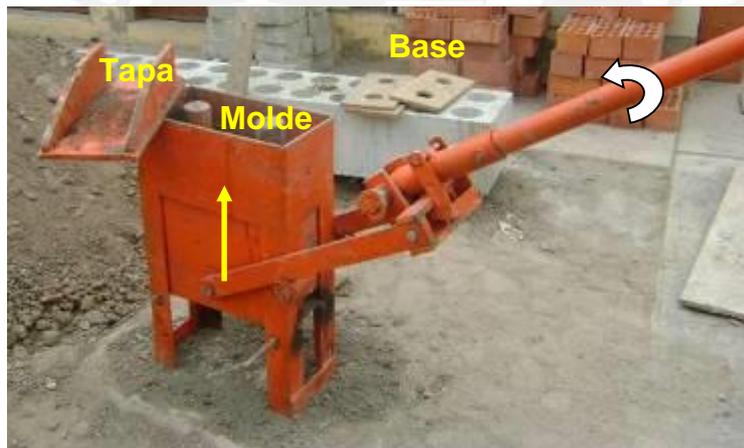


Fig.3.1 Compactadora y accionamiento manual de la palanca.

3.2 Fabricación del Bloque

La mezcla húmeda (acápite 2.2.1), se prepara para fabricar los bloques. Luego, se instala la base de madera (Fig.3.2) y con una pala se deposita la mezcla en el molde (Fig.3.3), para luego enrasarla con la mano y cerrar la tapa.



Fig.3.2 Instalación de base.



Fig.3.3 Depósito de mezcla en molde

Posteriormente, se levanta la palanca (Fig.3.4) para ejercer presión sobre la base de madera, desplazándose verticalmente el bloque hacia arriba reaccionando contra la tapa.



Fig.3.4 Proceso de fabricación de bloque.

Para desmoldar, se abre la tapa girándola horizontalmente y se acciona la palanca en sentido contrario (Fig.3.5), luego tomando la base de madera (Fig.3.6), se lleva al bloque hacia la zona de apilamiento colocándolo de canto y retirando la base de madera (Fig.3.7).





Fig.3.5 Desmolde de bloque.



Fig.3.6 desmontaje de bloque.

Fig.3.7 Apilamiento y secado del bloque.

El rendimiento observado en la fabricación de los bloques, trabajando con 4 hombres (2 preparando la mezcla y 2 fabricando el bloque), fue de 1 bloque cada 2 minutos.

En total se fabricaron 1570 bloques (Fig.3.7), dejándolos secar durante 28 días antes de emplearlos en la construcción de los especímenes.

CAPITULO 4: DEFINICIÓN DEL REFUERZO

4.1 Refuerzo Vertical

En general, la resistencia a compresión y a fuerza cortante debe ser brindada por la propia albañilería. El refuerzo vertical tan solo debe servir para garantizar la conexión entre los bloques, de tal forma que el conjunto de bloques se comporte como una sola unidad de muro de “albañilería”.

Por otro lado, puesto que estos sistemas, destinados a viviendas de un piso, se deforman ante los sismos principalmente por corte (la curvatura por flexión es mínima), no se necesita que el refuerzo vertical ancle en la cimentación.

En adición, el refuerzo debía ser flexible de tal forma que se acople a la deformación del muro, fácil de adquirir en cualquier parte del Perú, aparte que debía ser económico.

Bajo las condiciones señaladas, se escogió los tubos PVC de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro y de 1.8mm de grosor (Fig.4.1), del tipo pesado, utilizado para instalaciones eléctricas. Estos tubos tienen la ventaja de que pueden ser traslapados en línea usando conectores de PVC (Fig.4.2), con lo cual, se evita problemas de congestionar las celdas del bloque y el tener que insertar a los bloques desde la parte superior de tubos de gran longitud.



Fig.4.1. Tubos de $\frac{1}{2}$ ”.



Fig.4.2. Conector y acople de tubos en línea.

Una vez insertado el tubo en cada celda, el espacio restante fue rellenado con el mortero de las juntas por cada hilada construida, hasta alcanzar una altura de medio bloque (Fig.4.3). De este modo se forman una especie de grapas verticales en las juntas horizontales, para de esta manera aumentar la resistencia a cizalle en las juntas horizontales.

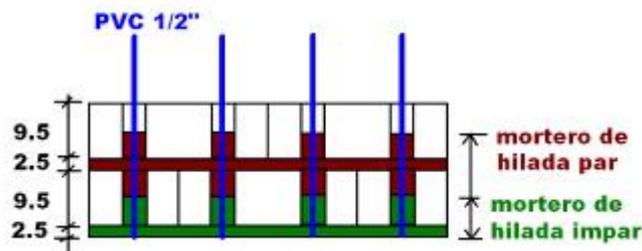


Fig.4.3 Relleno de las celdas. Medidas en centímetros.

4.3 Solera

Para: 1) conectar los encuentros entre muros perpendiculares; 2) arriostrar horizontalmente a los muros; 3) generar vigas dinteles en los vanos; 4) proporcionar de manera aproximada una acción de diafragma rígido; y, 5) transmitir las fuerzas horizontales desde el techo hacia los muros, se utilizaron soleras de concreto armado, de baja resistencia $f'c = 100 \text{ kg/cm}^2$, reforzadas con 2 varillas de $3/8"$ y estribos de alambre #8 espaciados a 20cm.

En la última hilada (Fig.4.4), los alvéolos de los bloques se dejaron a medio llenar, para que el concreto de la solera penetrase en esos espacios. De esta manera, se genera llaves de corte que permitan transmitir la fuerza horizontal desde el techo hacia el muro. En adición, los tubos penetraron al interior de la solera, y para mejorar la adherencia tubo-concreto, se enrolló la parte superior del tubo con alambre #16.

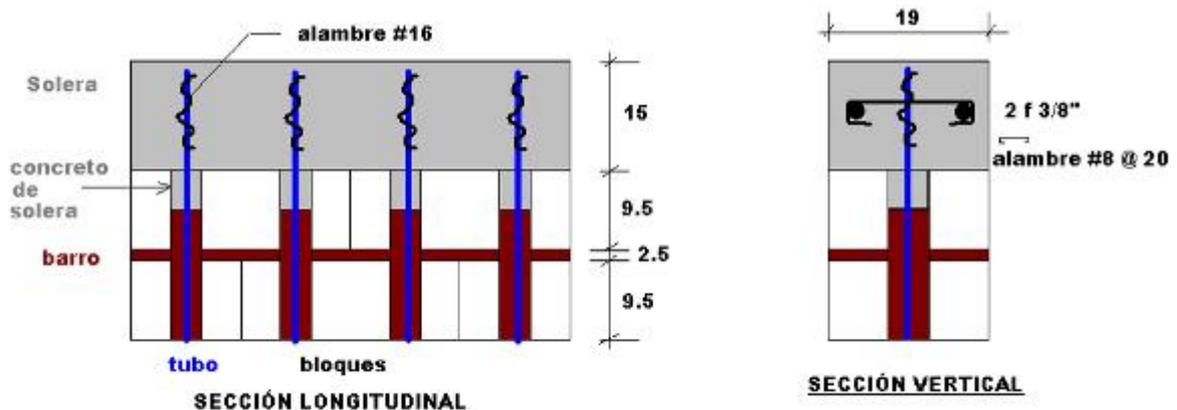


Fig.4.4. Solera y detalle de la unión solera-muro. Dimensiones en centímetros.

CAPITULO 5: CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES

Para todos los especímenes de albañilería con adobe prensado, las juntas horizontales de mortero tuvieron un espesor de 2.5cm. Este mortero fue hecho de barro, con la misma mezcla con que se fabricaron los adobes (acápite 2.2.1), aunque con mayor cantidad de agua. Sólo para el caso de los muretes se trató además de investigar el efecto de añadir 5% de cemento a la mezcla del mortero.

5.1 Características de las Pilas y Muretes

Se construyeron 8 muretes y 3 pilas, de 7 hiladas cada uno, de acuerdo a las especificaciones indicadas en la Fig.5.1. Todos los prismas fueron reforzados verticalmente con tubos PVC de ½", rellenándose las celdas según se indica en la Fig.5.1.

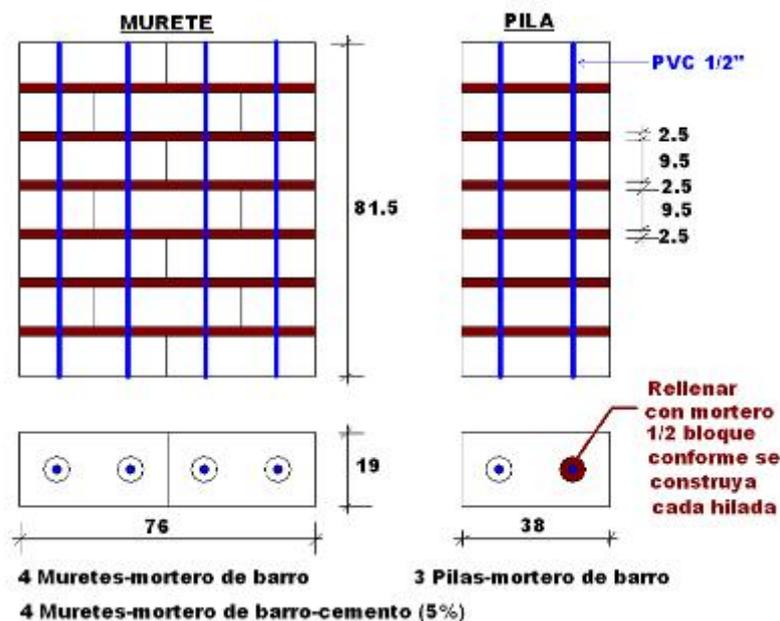


Fig.5.1. Características de los Muretes y de las Pilas.
Medidas en centímetros.

5.2 Características de los Muros

Los 2 muros (M1 y M2) a escala natural a ensayar a carga lateral cíclica, tuvieron las características mostradas en la Fig.5.2. La única diferencia que existió entre M1 y M2 es que M1 careció de refuerzo vertical (tubos PVC). En ambos casos, las celdas de los bloques se rellenaron con mortero de barro, de acuerdo a lo indicado en la Fig.5.1, mientras que la conexión con la solera se realizó según se indica en la Fig.5.2. Ambos muros fueron construidos sobre vigas de concreto armado existentes en el LEDI.

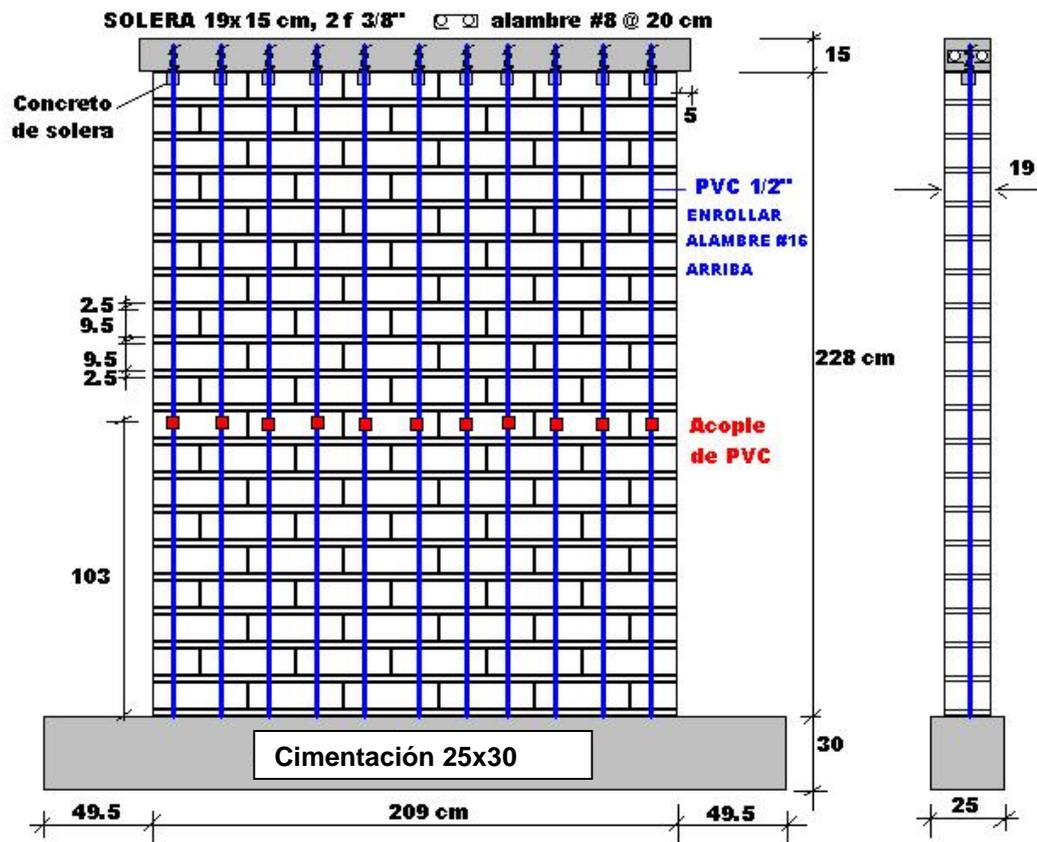
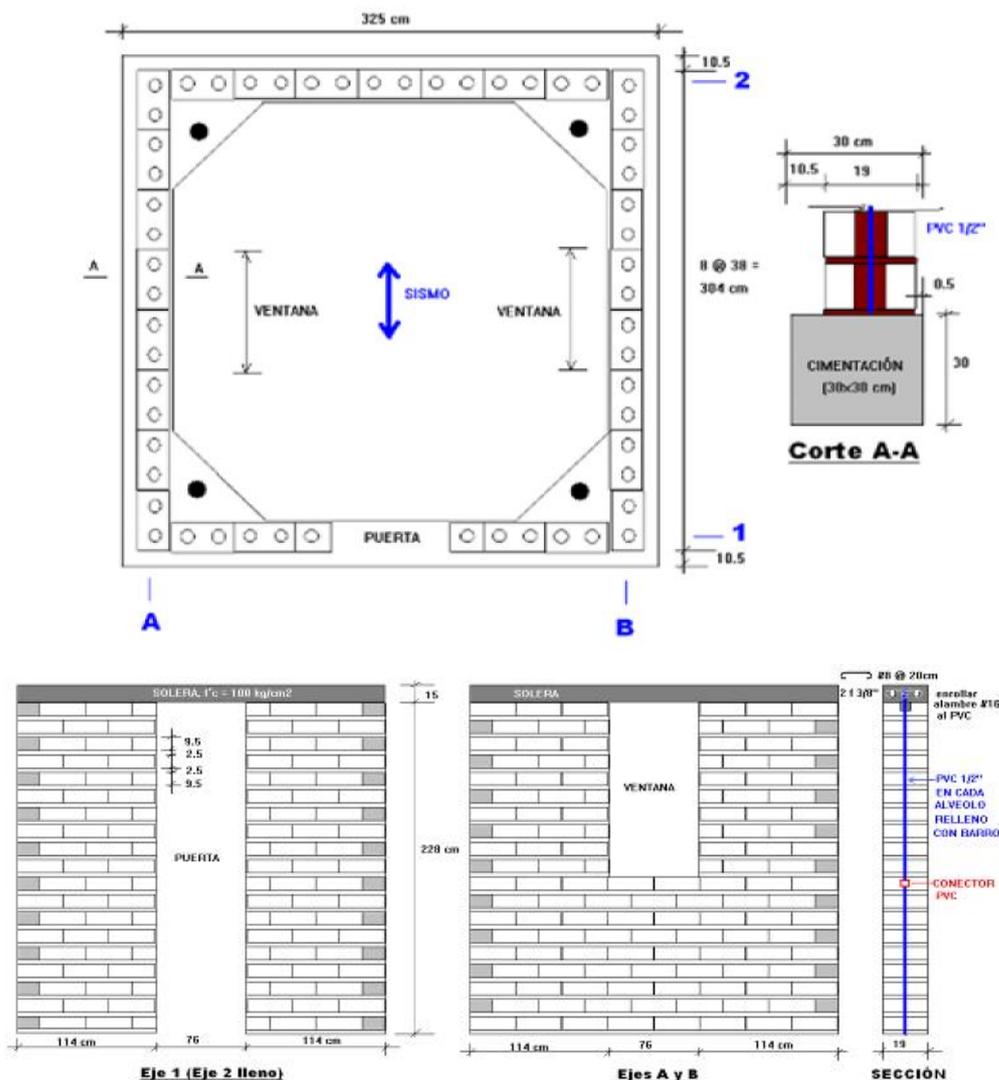


Fig.5.2. Características del muro reforzado M2 (el muro M1 careció de tubos PVC). Medidas en centímetros.

5.3 Características del Módulo

El módulo, cuyas características aparecen en la Fig.5.3, estuvo compuesto por 4 muros de 8 bloques cada uno (304cm de longitud total). Estos muros se construyeron sobre un anillo de concreto armado existente en el LEDI, que permitió transportarlo hacia la mesa vibradora. En la dirección de ensayo (ejes A y B), los muros tuvieron ventanas. En la dirección transversal al ensayo, el muro del eje 1 tuvo una puerta, mientras que el muro del eje 2 fue totalmente lleno. Los vanos de puerta y ventana tuvieron una longitud de 2 bloques (76cm), y se extendieron hasta tocar con la base de la solera de concreto armado, de sección transversal 19x15cm. Todos los bloques estuvieron interconectados verticalmente mediante tubos PVC de 1/2", cuyas celdas se rellenaron con mortero de acuerdo a lo indicado en la Fig.5.2, mientras que en la Fig.4.4 se especifica el detalle de la unión muro-solera.



CAPITULO 6: CONSTRUCCIÓN DE LOS ESPECÍMENES

Fig.5.3. Características del Módulo. Medidas en centímetros.

Los detalles seguidos en la construcción de los especímenes fueron dados a conocer en el capítulo 5. En este acápite sólo se ilustra mediante fotos la técnica constructiva seguida.

6.1 Lineamientos Generales

El recorte de los bloques enteros en medios bloques se realizó mediante una picota (Fig.6.1). El control del grosor (2.5cm) de la junta horizontal se hizo utilizando un escantillón (Fig.6.2). Para nivelar horizontalmente a los bloques ubicados en los extremos del muro, se usó un nivel de burbuja (Fig.6.3), y para nivelar verticalmente a estos bloques se empleó una plomada (Fig.6.4).



Fig.6.1. Uso de la picota para cortar bloques, el lado recortado se colocó dando hacia una de las caras externas del muro.



Fig.6.2. Escantillón.

Una vez asentados los bloques ubicados en los extremos del muro (“bloques maestros” asentados utilizando el escantillón, el nivel y la plomada, Figuras 6.5, 6.6 y 6.7), se utilizó una regla (Fig.6.5) para alinear horizontalmente a los bloques internos del muro.

Fig.6.3. Nivel.

Fig.6.4. Plomada.



Fig.6.5.Regla

Fig.6.6.Humedecimiento de la base del bloque.

En el proceso de asentado, la base del bloque por asentar fue humedecida con agua mediante una brocha (Fig.6.6), para disminuir su alta succión, mientras que la cara superior se mantuvo seca (Fig.6.7); ésta cara superior después fue humedecida con la brocha instantes antes de asentar el bloque de la hilada inmediata superior (Fig.6.8).



Fig.6.7. Asentado del bloque con su cara superior

Fig.6.8. Humedecimiento de la cara superior.

Después de haberse asentado el bloque, se rellenó con mortero (barro) la mitad superior de la altura de los alvéolos, compactándolo con los dedos de la mano (Fig.6.9).



Fig.6.9. Compactación del mortero en los alvéolos del bloque a $\frac{1}{2}$ altura.

Debe mencionarse que no hubo dificultad al colocar los tubos en la primera hilada, en donde primero se rellenaron los alvéolos con barro hasta alcanzar la mitad de la altura del bloque, para enseguida insertar los tubos (Fig.6.10).



Fig.6.10. Instalación de los tubos en la primera hilada, nótese su verticalidad.

6.2 Pilas y Muretes

Siguiéndose los lineamientos descritos en los acápites 5.1 y 6.1, se construyeron 3 pilas y 8 muretes (Fig.6.11), reforzando a todos los prismas con tubos PVC de $\frac{1}{2}$ ". En 4 muretes se utilizó mortero de barro (suelo-arena 5:1, serie MB), mientras que en los 4 muretes restantes se añadió 5% (en peso) de cemento a la mezcla seca suelo-arena (serie MC), para luego formar barro echándole agua. Pudo notarse que el mortero con cemento incorporado secaba más rápido que el mortero sin cemento, no obstante, el asentado se realizó sin dificultad.



Fig.6.11 Construcción de las pilas y muretes.

6.3 Muros

Siguiéndose los lineamientos especificados en los acápites 5.2 y 6.1, se construyeron 2 muros a escala natural (Fig.6.12): M1 (sin tubos) y M2 (con tubos). En ambos muros se rellenó con mortero a los alvéolos correspondientes a la última hilada, hasta alcanzar una altura igual a la

mitad inferior del bloque correspondiente (Fig.6.13 y Fig.6.14), dejando vacías la mitad superior, de tal modo que el concreto de la solera penetre en estos espacios, para formar llaves de corte.

Cabe indicar que en el muro M2, no existió problemas en acoplar los tubos en la zona indicada en la Fig.5.2, mediante los conectores mostrados en la Fig.4.2, el tubo acoplado superior continuó manteniendo su verticalidad (Fig.6.14).



Fig.6.12 Construcción de los muros M1 y M2.



Fig.6.13 Última hilada de M2. Relleno con barro a media altura de los alvéolos, dejando vacía la mitad superior.



Fig.6.14. Etapas de la construcción de M2. Nótese la altura de los tubos y su verticalidad. A la derecha los tubos ya están acoplados.



Fig.6.15. Muro M1 (sin tubos) y taponado de los alvéolos a media altura de los bloques de la última hilada.

6.4 Construcción del Módulo

Siguiéndose las especificaciones indicadas en los acápite 5.3 y 6.1, se construyó el módulo a escala natural. No se detectó ningún problema. A continuación, en orden, se ilustra mediante una serie de figuras (Fig.6.15 a Fig.6.20) el proceso constructivo seguido.



Fig.6.15. Emplantillado de los bloques y construcción de la primera hilada.



Fig.6.16. Inserción de tubos de 1/2”.



Fig.6.17. Construcción de la mitad inferior del módulo, llenando con mortero a media altura los alvéolos, para después humedecer la cara superior y asentar el bloque de la siguiente hilada con su base humedecida.



Fig.6.18. Zona de empalme de tubos y alvéolos a medio llenar.



Fig.6.19
 Instalación de los conectores sobre los tubos inferiores y acople con los tubos superiores.



Fig.6.20. Construcción de la mitad superior del módulo.

6.5 Construcción de las Soleras

Siguiéndose las especificaciones indicadas en los acápite 4.2, 5.2 y 5.3, se construyeron las vigas soleras de los muros (M1 y M2) y del módulo. En estas soleras se utilizó concreto de baja resistencia a compresión (concreto pobre), compuesto por una mezcla en proporción volumétrica cemento-arena-piedra de $\frac{1}{2}$ " 1: 6: 4, que fue compactada mediante una varilla corrugada de $\frac{1}{2}$ ", para simular una situación real donde no se utilice vibradora.

El refuerzo estuvo compuesto por 2 varillas de $\frac{3}{8}$ " estribadas con alambre #8 espaciado a 20cm, formando ganchos a 180° (Fig.6.21) y amarrado a las varillas con alambre #16. Estas varillas se doblaron horizontalmente a 90° en sus extremos, tal como se indica en las figuras (Fig.6.22, Fig.6.23 y Fig.6.24). Para el caso de los muros, la solera se extendió 5cm fuera del muro, para aplicar allí la carga lateral. Para el caso del muro M2 y del módulo (reforzados con tubos), antes de efectuarse el vaciado primeramente se enrolló la parte superior del tubo con alambre #16 (Fig.6.25), para mejorar su adherencia con el concreto de la solera.



Fig.6.21. Presentación del refuerzo de la solera para los muros M1 y M2.

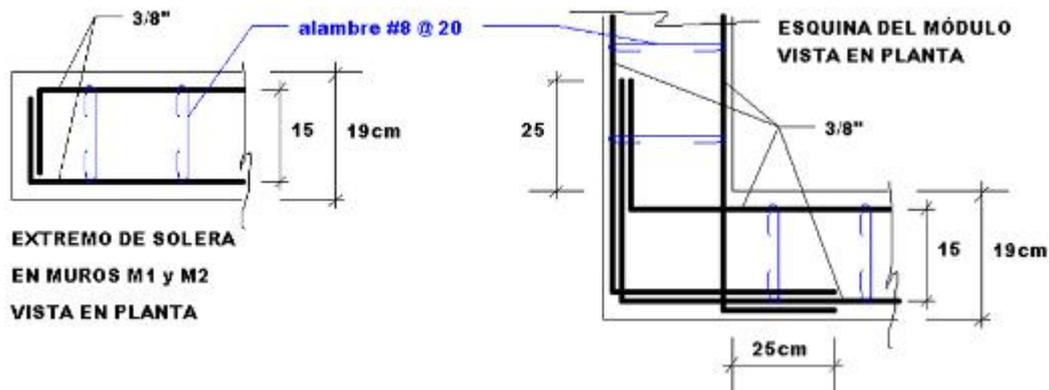


Fig.6.22. Detalles del refuerzo en extremos de la solera. Vista en planta.



Fig.6.23. Presentación del refuerzo de la solera del módulo.



Fig.6.24 Detalle del refuerzo en las esquinas del módulo.



Fig.6.25. Espiralado de la parte superior del tubo con alambre #16.

Posteriormente, utilizando tablas, se encofraron las soleras (Fig.6.27 y 6.28).



Fig.6.27. Encofrado de la solera del muro M2.



Fig.6.28. Encofrado de la solera del módulo.

El concreto fue preparado en una mezcladora (Fig.6.29), transportado en carretilla y vaciado con baldes. La compactación fue realizada con una varilla de construcción de $\frac{1}{2}$ " (Fig.6.30).



Fig.6.29. Preparación del concreto y vaciado.



Fig.6.30. Compactación del concreto en el muro y en el módulo.

Al día siguiente del vaciado, se desencofraron las soleras. No se notaron cangrejas ni problemas de segregación (Fig.6.31). Las soleras de los muros M1 y M2 fueron curadas en los 2 primeros días de edad regándolas con agua; sin embargo, al notarse la debilidad del adobe ante la acción del agua, la solera del módulo no se curó.



Fig.6.31 Vigas solera desencofradas.

Durante la etapa de vaciado del concreto, se fabricaron 4 probetas cilíndricas estándar: una proveniente de la solera de cada muro y dos provenientes de la solera del módulo. Estas probetas fueron curadas durante 28 días, para después ensayarlas a compresión.

CAPITULO 7: ENSAYOS DEL ADOBE PRENSADO

7.1 ENSAYO DE UNIDADES DE ADOBE

En total se ensayaron 8 bloques enteros a variación de dimensiones, alabeo, succión y absorción, mientras que a compresión se ensayaron 5 bloques enteros. Los resultados de las probetas individuales aparecen en la Ref.4, en este reporte sólo se muestran los resultados promedios.

7.1.1 Variación de Dimensiones y Alabeo

En la Tabla 7.1 se presenta los resultados promedios y la dispersión de resultados obtenidos en las pruebas de variación de dimensiones y de alabeo. En esta tabla se observa que los bloques presentan dimensiones que varían ligeramente respecto a las dimensiones nominales (Fig.2.2), en menos de 1.5%; sin embargo, su alabeo es alto al igual que la dispersión de resultados.

TABLA 7.1 Variación de dimensiones y alabeo del bloque de tierra prensada.

| | Variación de Dimensiones (VD) | | | Alabeo | |
|--------|-------------------------------|-----------------|-----------|------------------|------------|
| | Promedio (mm) | Nominal (mm) | VD (%) | Promedio (mm) | Dispersión |
| Largo | 385.5 | 380 | 1.4 % | 4 | 42 % |
| Ancho | 190.5 | 190 | 0.3 % | | |
| Altura | 94.8 | 95 | -0.2 % | | |

7.1.2 Succión y Absorción

La succión promedio de los bloques previamente secados en un horno a 110°C de temperatura durante 24 horas, resultó 32 gr/(200cm²-min), con una dispersión de resultados muy alta (92%), que osciló entre 9.8 hasta 94.8 gr/(200cm²-min). De esta manera, se considera adecuado haber humedecido las caras del bloque con una brocha (Fig.6.6) antes del asentado.

Por otro lado, los bloques no pasaron la prueba de absorción ya que terminaron disgregándose luego de haber estado sumergidos en agua durante 24 horas (Fig.7.1). Cabe indicar que lo propio ocurre con los adobes convencionales, aunque éstos muestran mayor estabilidad que los bloques prensados (tardan más en disgregarse). De este modo, es necesario proteger a los muros del agua.



Fig.7.1 Prueba de absorción

7.1.4 Compresión

La resistencia promedio a compresión fue de 19.5 kg/cm^2 , con una dispersión de resultados de 25%. Esta resistencia promedio es mayor que la resistencia a compresión de los bloques preliminares con y sin cemento (acápite 2.2.1), por lo que la corrección que se hizo a la compactadora funcionó adecuadamente. Asimismo, la resistencia obtenida supera en 62% a la resistencia mínima exigida por la Norma E.080 [3] (12 kg/cm^2)

7.2. ENSAYO DE PILAS A COMPRESIÓN AXIAL

Utilizándose los dispositivos mostrados en la Fig.7.2, se ensayaron a compresión axial 3 pilas reforzadas con tubos PVC (Fig.6.11), a una velocidad de carga de 500 kg/min. El LVDT que aparece en la Fig.7.2, mide el desplazamiento vertical relativo entre los cabezales, por lo que incluye la deformación del capping (yeso-cemento) y el reacomodo de los cabezales.



Fig.7.2. Dispositivos utilizados en el ensayo de las pilas a compresión.

7.2.1 Forma de Falla

Las 3 pilas fallaron a través de una grieta vertical que atravesó bloques y mortero (Fig.7.3). Esta falla se produce por la expansión lateral que tiene la pila (efecto de Poisson) al verse sujeta a compresiones axiales, no se produjo fallas por trituración de los bloques ni del mortero. Al desmontar las pilas, pudo observarse que parte del mortero de relleno usado para taponar los alvéolos del bloque, quedó adherido en los tubos, pese a que éstos son lisos.



Fig.7.3 Forma de falla de las 3 pilas. Abajo se nota como parte del mortero de relleno quedó adherido al tubo PVC.

7.2.2 Resultados y Resistencia Admisible

Los resultados individuales alcanzados por las tres pilas aparecen en la Tabla 7.2, mientras que en la Fig.7.4 se muestra la variación de la carga axial (P) versus el desplazamiento vertical relativo entre los cabezales (D) del equipo de ensayos.

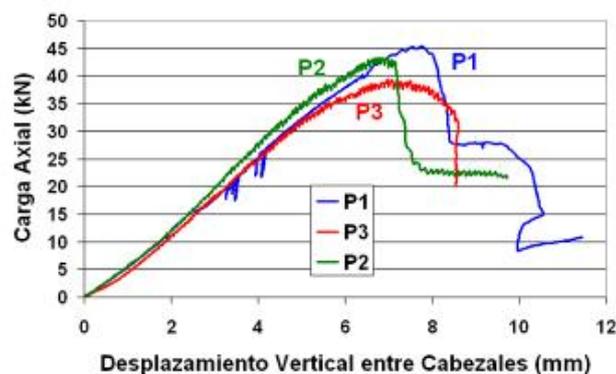


Fig.7.4 Variación de carga axial vs Desplazamiento vertical relativo entre los cabezales

TABLA 7.2 Resultados del ensayo de compresión axial en pilas

| Pila | P1 | P2 | P3 | Promedio |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|----------|
| Carga máxima (kN) | 45.07 | 43.17 | 39.06 | 42.43 |
| Resistencia (kg/cm ²) | 6.36 | 6.09 | 5.51 | 6 |

La resistencia promedio a compresión axial fue 6 kg/cm² (Tabla 7.2), con una baja dispersión de resultados (7.2%). Debe indicarse que las pilas ensayadas presentaron una esbeltez (Fig.5.1) de $81.5/19 = 4.3$, mientras que en la Norma E.080 [3] se especifica usar una esbeltez igual a 3, pero no se proporcionan factores de corrección por esbeltez.

De emplearse los factores de corrección por esbeltez de la Norma E.070 [1] y normalizándolos a una esbeltez de 3, entonces la resistencia a compresión de las pilas sería $f'm = 1.14 \times 6 = 6.84$ kg/cm², por lo que de acuerdo a la Norma E.080 [3], la resistencia admisible a compresión axial de los muros sería: **$f_m = 0.25 f'm = 1.7$ kg/cm²**.

Esta resistencia admisible ($f_m = 1.7$ kg/cm²) es insuficiente como para que los muros internos de una vivienda de 2 pisos puedan soportar las cargas de gravedad, de esta manera se aconseja utilizar el sistema de adobe prensado con unidades de las dimensiones usadas en este proyecto sólo para viviendas de 1 piso.

7.2.3 Módulo de Elasticidad (E)

Empleando la zona lineal de la gráfica P-D (Fig.7.4), para cargas axiales comprendidas entre 10 y 30 kN, se intentó obtener el módulo de elasticidad de la albañilería incluyendo los tubos; sin embargo, se obtuvo un valor muy bajo (840 kg/cm² con 6.5% de dispersión), debido a que el desplazamiento relativo entre cabezales incluye la deformación del capping. Un valor más razonable se obtendría aplicando la expresión **$E = 500 f'm = 500 \times 6 = 3000$ kg/cm²**, proveniente de la Norma E.070 [1]; sin embargo, este valor deberá ser verificado en el ensayo del muro M2 y del módulo.

7.3 ENSAYO DE COMPRESIÓN DIAGONAL EN MURETES

Los 4 muretes construidos con mortero de barro fueron denominados “MB”, mientras que los hechos con mortero de barro-cemento (5%) se denominaron “MC”. Estos 8 muretes fueron ensayados a compresión diagonal a una velocidad de carga de 100kg/min, cubriéndolos previamente con capping de yeso-cemento en las dos esquinas donde la maquina interactúa con el murete (Fig.7.5). Los dispositivos utilizados para el transporte y el ensayo aparecen en la Fig.7.5. En este ensayo no se utilizaron LVDT.



Fig.7.5 Capping en los muretes, transporte con puente grúa y dispositivos empleados en el ensayo de compresión diagonal.

7.3.1 Forma de Falla

Los 8 muretes tuvieron una forma de falla mixta (Fig.7.6), presentándose grietas a través de las juntas y que además atravesaron los bloques. Pudo notarse que los tubos PVC evitaron la falla frágil, que es característica en especímenes no reforzados de este tipo. Es decir, no se notó mayor influencia del mortero (con o sin cemento) sobre la forma de falla por corte.



Fig.7.6 Forma de falla de los muretes hechos con mortero de barro (MB) y de los construidos con mortero barro-cemento (MC).

7.3.2 Comportamiento

En los 4 muretes MB sólo se registró la carga diagonal máxima (Tabla 7.3), mientras que en los 4 muretes de la serie MC se registró la variación de la carga a lo largo del tiempo que duró el ensayo

(Fig.7.7). No obstante, la influencia del refuerzo (tubos PVC) sobre el comportamiento de los 8 muretes fue muy similar, notándose (Fig.7.8) cuatro etapas bien definidas. En la primera etapa el comportamiento fue elástico hasta que se formaron las primeras fisuras, produciéndose una pequeña caída en la resistencia. En la etapa 2 la carga se incrementó, registrándose otras fisuras. En la etapa 3 la carga se estabilizó hasta que se formó una gran grieta, que generó la pérdida total de la resistencia (etapa 4). Es decir, el refuerzo proporcionó ductilidad y resistencia adicional.

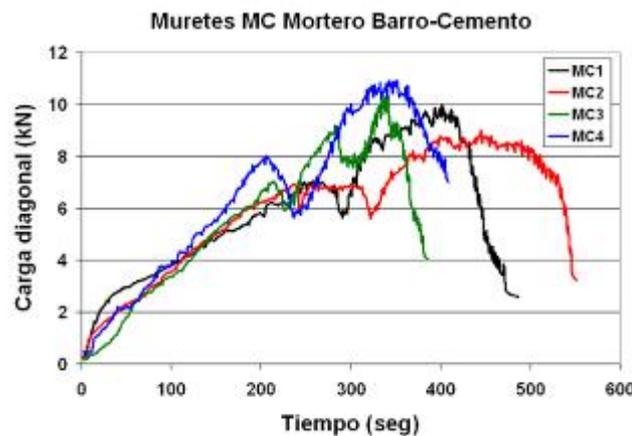


Fig.7.7 Comportamiento de los 4 muretes de la serie MC a lo largo del ensayo.

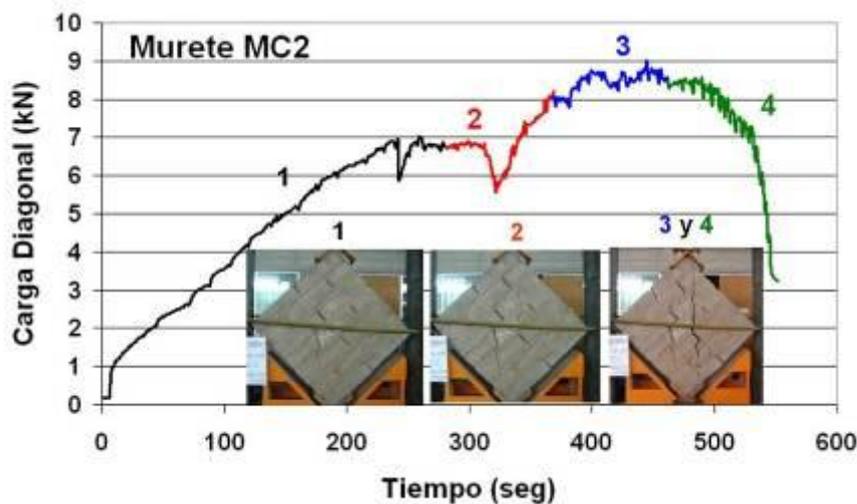


Fig.7.8. Niveles de agrietamiento en 4 etapas del ensayo del murete MC2. Ductilidad y resistencia aportada por los tubos PVC.

7.3.3 Resultados y Resistencia Admisible

La resistencia unitaria a corte puro (v), fue obtenida dividiendo la carga diagonal (P) entre el área bruta de la diagonal cargada. En la Tabla 7.3 aparecen los resultados obtenidos para los 8 muretes, debiéndose remarcar que sólo para los muretes de la serie MC (Fig.7.6) pudo registrarse la carga asociada a la formación de la primera fisura diagonal (P_1 en la Tabla 7.3).

TABLA 7.3 Resultados del ensayo de compresión diagonal en muretes.

| Serie MC (mortero de barro-cemento) | | | Serie MB (mortero de barro) | |
|-------------------------------------|--------------|--------------|-----------------------------|--------------|
| Murete | P_1 (kN) * | P máx (kN) | Murete | P máx (kN) |
| MC1 | 6.88 | 9.99 | MB1 | 7.48 |
| MC2 | 6.82 | 9.02 | MB2 | 10.99 |
| MC3 | 7.00 | 10.33 | MB3 | 8.98 |
| MC4 | 7.92 | 10.93 | MB4 | 7.78 |
| Promedio (kN) | 7.16 | 10.07 | Promedio (kN) | 8.81 |
| Dispersión | 7.2% | 7.9% | Dispersión | 18% |
| v (kg/cm ²) | 0.35 | 0.48 | v (kg/cm ²) | 0.42 |

(*) P_1 = carga asociada a la primera fisura diagonal, medida sólo en muretes de la serie MC.

De acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 7.3, puede notarse para la serie de muretes MC que el refuerzo (tubos PVC) incrementó la resistencia a corte puro en 41%, mientras que el empleo de cemento en el mortero (serie MC) aumentó la resistencia a corte puro en 14% respecto a los muretes construidos con mortero de barro (serie MB). Como el incremento de 14% en la resistencia a corte producida por la adición de cemento (5% de la mezcla) al mortero no es significativo, se podría emplear mortero de barro, aunque la dispersión de resultados resulte mayor.

Por otro lado, de acuerdo a la Norma E.080 [3], la resistencia admisible a fuerza cortante de los muros debe calcularse de la expresión $v_m = 0.4 v = 0.4 \times 0.42 = 0.17 \text{ kg/cm}^2$ para el caso en que se use mortero de barro. Este resultado es menor al valor que especifica la misma Norma para situaciones en que no se efectúe ensayos de compresión diagonal (0.25 kg/cm^2). Estos resultados serán comparados con aquellos que provengan de los muros y del módulo a escala natural.

En adición, de admitirse que los tubos proporcionan un incremento de resistencia de 41% también para los muretes con mortero de barro (serie MB), entonces su resistencia al primer agrietamiento diagonal sería: $v1 = 0.42/1.41 = 0.3 \text{ kg/cm}^2$.

7.4 ENSAYOS DE MUROS A CARGA LATERAL CÍCLICA

7.4.1 Peso Volumétrico del Muro M2

Durante la etapa de transporte de los muros, desde el patio de construcción hacia la losa de ensayos, M1 y M2 fueron pesados mediante una celda de carga colgada en el puente grúa. Asimismo, antes de construir la albañilería, se pesó su cimentación. Para el caso del muro M2 reforzado con tubos PVC (Fig.5.2), se obtuvo:

Peso de la cimentación = 585 kg

Peso de M2 con cimentación y solera = 2362 kg

Peso de M2 con solera y sin cimentación = $2362 - 585 = 1777 \text{ kg}$

Para hallar el peso de la solera (Ps), escasamente reforzada y con tubos en su interior, se supuso que el peso volumétrico del concreto era igual a 2300 kg/m^3 , con lo cual:

Peso estimado de la solera = $2300 \times 2.19 \times 0.19 \times 0.15 = 144 \text{ kg}$

En consecuencia, el peso de la albañilería de M2 resulta = $1777 - 144 = 1633 \text{ kg}$

Con lo cual, el peso volumétrico de M2 es: $= 1633 / (2.09 \times 2.28 \times 0.19) = 1800 \text{ kg/m}^3$

Cabe indicar que el peso volumétrico del muro M1, sin tubos PVC, fue muy parecido al valor obtenido para el muro M2.

El peso volumétrico del adobe convencional es 1600 kg/m^3 , por lo que el mayor peso volumétrico de M2 (12.5% más) se debe a la compactación del suelo al prensar la tierra húmeda.

7.4.2 Técnica de Ensayo

Los muros M1 (sin refuerzo) y M2 (reforzado con tubos), fueron sometidos a un ensayo de carga lateral cíclica con desplazamiento horizontal (“D1” en la Fig.7.9) controlado en 10 fases (Tabla 7.4), aplicándose un determinado número de ciclos en cada fase (“Nc” en la Tabla 7.4), hasta que el lazo histerético V-D1 se estabilice. La velocidad del ensayo fue 1 ciclo en 4 minutos.

La carga lateral “V” se aplicó con un actuador dinámico, mientras que los desplazamientos “Di” fueron medidos mediante LVDT. Se utilizaron 5 LVDT (Fig.7.9), cuyas funciones fueron:

- D1: controlar los desplazamientos laterales de la solera.
- D2 y D3: observar el comportamiento de los talones del muro.
- D4 y D5: determinar la deformación por corte y el grosor de grietas acumuladas.

Las grietas que surgieron en cada fase del experimento, fueron pintadas con el color indicado en la Tabla 7.4.

TABLA 7.4 Fases del ensayo de carga lateral cíclica con desplazamiento controlado

| Fase | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------|-----|-----|------|--------|----------|---------|-------|------|--------|---------|
| D1 (mm) | 0.5 | 2.5 | 5.0 | 7.5 | 10.0 | 12.5 | 15.0 | 17.5 | 20.0 | 25.0 |
| Nc | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 |
| Color | --- | --- | rojo | rosado | amarillo | celeste | verde | lila | blanco | naranja |

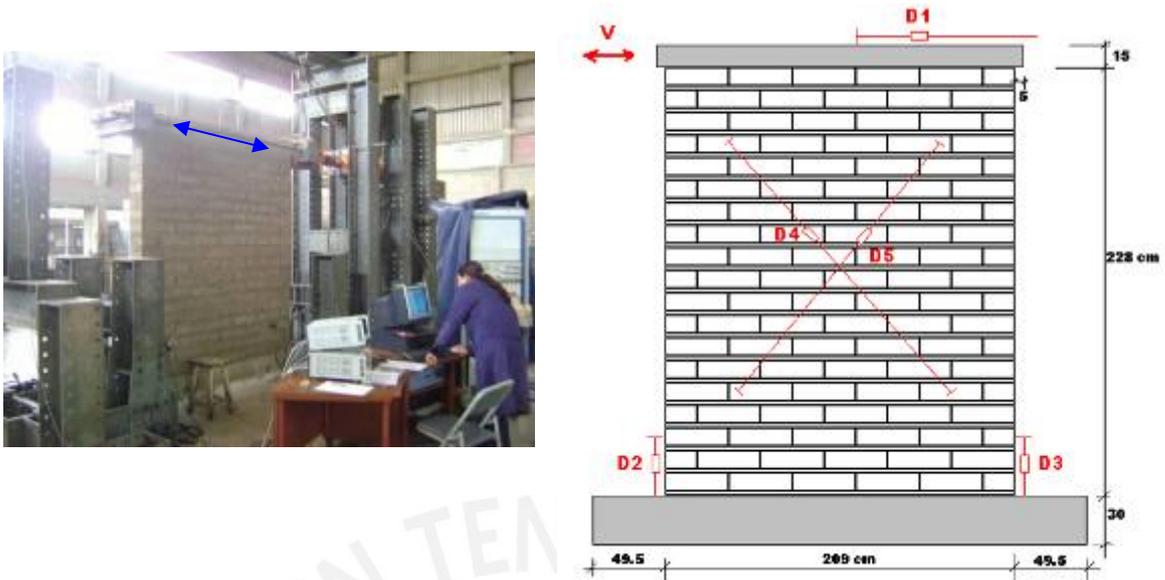


Fig.7.9. Instrumentación.

7.4.3 Comportamiento Cualitativo de M2 (reforzado)

En las 3 primeras fases del ensayo, no se presentaron fisuras en M2. En la Fase 4 se presentaron fisuras horizontales de poca extensión en la base de las hiladas 7 y 11, también se fisuraron 2 bloques de la parte central y otros 2 bloques del tercio superior (Fig.7.10).

En la fase 5 (Fig.7.11), para cargas negativas, se produjo una grieta diagonal predominantemente por las juntas, pero que cortó algunos bloques, con un grosor máximo de 3mm. Para cargas positivas, se produjo una falla diagonal ubicada en el tercio superior derecho.

En la Fase 6 (Fig.7, 12), se produjo una grieta horizontal en la base de la hilada 9. Dos bloques ubicados en la penúltima hilada se fisuraron.

En la Fase 7 (Fig.7.13), para cargas negativas se fisuró el bloque ubicado en el talón comprimido. El máximo grosor de la grieta diagonal fue 7mm.

En la Fase 8 (Fig.7.14), para cargas positivas se presentó el agrietamiento diagonal. Esta grieta fue escalonada a través de las juntas y atravesó también algunos bloques, incluso en el ubicado en el talón comprimido. El máximo grosor de la grieta diagonal fue 8mm.

En la Fase 9 (Fig.7.15), se fisuraron otros adobes; el grosor máximo de la grieta diagonal fue 10mm. En la Fase 10 (Fig.7.16) la grieta diagonal alcanzó un grosor máximo de 12mm. Al terminar el ensayo, la grieta diagonal permanente tuvo un grosor máximo de 8mm.

En síntesis, el muro M2 tuvo una forma de falla por corte, sin que se presenten fisuras de tracción por flexión en la base. Adicionalmente, los empalmes de los tubos PVC solo tuvieron problemas para cargas negativas desde la fase 6, en una extensión de 57cm (1½ bloque, Fig.7.16), aunque los tubos continuaron acoplados. La interfase solera-muro no tuvo problemas.



Fig.7.10. M2, Fase 4.



Fig.7.11. M2, Fase 5.



Fig.7.12. M2, Fase 6.



Fig.7.13. M2, Fase 7.



Fig.7.14. M2. Fase 8.



Fig.7.15. M2. Fase 9.

63



Fig.7.16. M2. Fase 10. A la derecha se observa la grieta horizontal en la zona de empalmes de los tubos PVC verticales.

Terminado el experimento de M2, se picó en 2 zonas (Fig.7.17) para observar el estado de los tubos, notándose que éstos no tuvieron daños. En la zona 1 (zona del muro sin daño) se notó que el mortero usado para rellenar los alvéolos se había integrado adecuadamente con el adobe y los tubos, mientras que en la zona 2 (con grieta diagonal) se notó que este mortero se había contraído y separado ligeramente del adobe, allí también se notó que los tubos continuaron acoplados, pese a la existencia de una grieta horizontal en esa zona (Fig.7.16).



Fig.7.17. Inspección pos ensayo de M2.

7.4.4 Comportamiento Cualitativo del Muro M1 (no reforzado)

En las Fases 1 y 2 el comportamiento fue elástico, sin que se forme ninguna fisura.

En la Fase 3 se formaron fisuras diagonales en 5 adobes ubicados en las hiladas 15, 16 y 17 (Fig.7.18), dos en el extremo superior derecho para cargas positivas y los otros tres en el extremo superior izquierdo para cargas negativas. En esta fase se hicieron 3 marcas verticales de color blanco en la zona central superior para detectar posibles deslizamientos.



Fig.7.18. M1. Fisuras de 5 adobes en la fase 3.

En la Fase 4 se presentó el deslizamiento de la franja central (2 adobes) en la base de la última hilada, derivando en grietas diagonales en los extremos (Fig.7.19). El deslizamiento fue de 5mm y en las $\frac{3}{4}$ partes inferior del muro no se presentaron fisuras.



Fig.7.19 M1, Fase 4.

En la Fase 5 (Fig.7.20) el deslizamiento llegó a ser de la misma magnitud que el desplazamiento lateral aplicado (10mm), y el grosor máximo de las grietas diagonales fue 5mm. En esta fase decreció severamente la resistencia por lo que se detuvo el ensayo. Cabe indicar que la unión entre la solera y la última hilada funcionó adecuadamente (el deslizamiento se presentó en la base de la última hilada).



Fig.7.20. M1. Fase 5.

7.4.5 Lazos Histeréticos V-D1 y Envolvente V-D1

Los lazos histeréticos cortante-desplazamiento lateral (V-D1) para los muros M1 y M2 se muestran en la Fig.7.21. Estos gráficos se han hecho a la misma escala con fines comparativos. La diferencia que se aprecia en la etapa inelástica entre los muros M1 y M2 es muy significativa en los valores de desplazamiento lateral. Para M1 se obtuvo un D1 máximo de 10.09mm y para M2 un D1 máximo de 25.2mm.

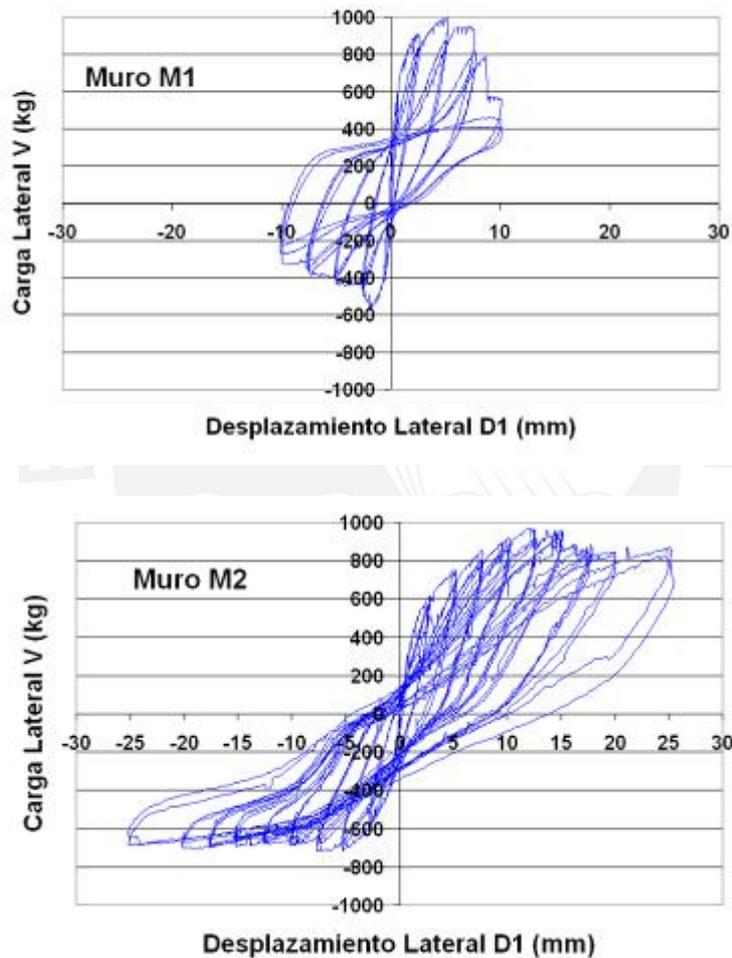


Fig.7.21. Lazos histeréticos V-D1 correspondientes a los muros M1 (no reforzados) y M2 (reforzado con tubos PVC).

En la Tabla 7.5 aparecen los valores V-D1 correspondientes a los valores máximos de cada fase del ensayo (primer ciclo), mientras que en la Fig.7.22 se han graficado los valores de la Tabla 7.5.

TABLA 7.5 Envoltente V-D1 de los primeros ciclos Ven Kg D1 en mm

| Muro | Cargas Positivas | | | | | | | | | | |
|------|------------------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|
| | Fase | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| M1 | V | 524 | 910 | 985 | 912 | 538 | --- | --- | --- | --- | --- |
| | D1 | 0.49 | 2.51 | 5.18 | 7.67 | 10.09 | --- | --- | --- | --- | --- |
| M2 | V | 180 | 603 | 736 | 840 | 905 | 960 | 943 | 845 | 833 | 844 |
| | D1 | 0.51 | 2.97 | 5.20 | 7.70 | 10.2 | 12.4 | 15.0 | 17.6 | 20.1 | 25.2 |
| Muro | Cargas Negativas | | | | | | | | | | |
| | Fase | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| M1 | V | 393 | 547 | 411 | 351 | 303 | --- | --- | --- | --- | --- |
| | D1 | 0.51 | 2.02 | 5.03 | 7.68 | 10 | --- | --- | --- | --- | --- |
| M2 | V | 268 | 585 | 710 | 691 | 654 | 659 | 671 | 697 | 687 | 667 |
| | D1 | 0.52 | 2.75 | 5.24 | 7.66 | 10.1 | 12.6 | 15.4 | 17.8 | 20.2 | 25.1 |

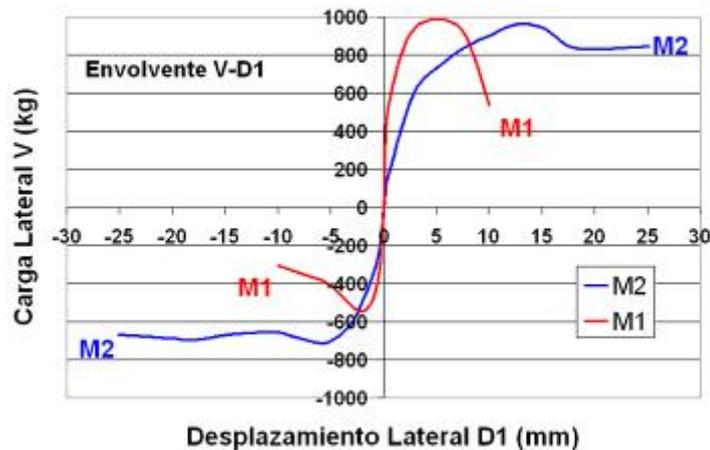


Fig.7.22 Envoltente V-D1 de los primeros ciclos de los muros M1 y M2.

De la Tabla 7.5 y de la Fig.7.22, se desprenden los siguientes comentarios:

- El muro M1 tuvo mayor rigidez lateral inicial que el muro M2. Esto podría deberse a que los alvéolos de M1 estuvieron totalmente rellenos con mortero de barro, mientras que en M2 existían tubos PVC vacíos en todos los alvéolos, lo cual disminuyó su área y el momento de inercia de la sección transversal. Cabe indicar que los tubos son muy flexibles y no aportan rigidez lateral, permitiendo tan solo integrar a todos los adobes.
- En ambos muros la carga positiva fue mayor que la negativa, lo cual depende de la forma de falla. En el caso del muro M2, la grieta diagonal por cargas negativas se formó en la fase 5 (Fig.7.11), mientras que por cargas positivas lo hizo recién en la fase 8 (Fig.7.14). Por esta razón, es aconsejable trabajar con la menor resistencia que para el muro M2 resultó 710 kg, equivalente a un esfuerzo cortante: $v \text{ máx.} = 710 / (19 \times 209) = 0.18 \text{ kg/cm}^2$.
- Después del agrietamiento diagonal en M2, los tubos mantuvieron constante la resistencia y proporcionaron ductilidad (capacidad de deformación inelástica), mientras que en M1, carente de tubos, la pérdida de resistencia fue sustancial después que se alcanzó la carga máxima (positiva y negativa), es decir, el muro M1 no reforzado tuvo una falla frágil.
- La resistencia máxima alcanzada por M2 (0.18 kg/cm^2), coincide numéricamente con la resistencia admisible hallada en el acápite 10.3 en base al ensayo de compresión diagonal de los muretes, sin embargo, la resistencia admisible indicada en la Norma E.080 [3] está afectada por un factor de seguridad, por lo que se deduce que la resistencia a corte del adobe prensado reforzado con tubos es muy baja en comparación con los adobes convencionales.
- Sólo para cargas negativas pudo observarse que la resistencia del muro M2 reforzado con tubos fue mayor en 30% que la resistencia del muro no reforzado M1, mientras que para cargas positivas ambas resistencias máximas coincidieron. Es decir, no se puede asegurar que los tubos incrementen la resistencia máxima, a diferencia de lo observado en los muretes ensayados a corte puro (acápites 7.7.3 y Fig.7.8).
- De acuerdo a la Norma E.070 [1], la resistencia a corte de un muro de albañilería sin carga vertical se calcula con la expresión: $v_m = 0.5 v' m \alpha$, donde: $v' m$ = resistencia a corte de los muretes = 0.42 kg/cm^2 y $\alpha = V L / M$, donde a su vez: L = longitud del muro = 209cm, V =

fuerza cortante, $M = V h =$ momento flector, $h = 235.5\text{cm} =$ altura del muro hasta el eje del actuador. De esta manera se obtendría $v_m = 0.5 \times 0.42 \times 0.89 = 0.19 \text{ kg/cm}^2$, valor que coincide con el resultado experimental de $M_2 (0.18 \text{ kg/cm}^2)$.

7.4.6 Cálculo de la Rigidez Lateral (K) y del Módulo de Elasticidad (E) en M2

La rigidez lateral elástica (K) y el módulo de corte (G), fueron calculados para el muro reforzado con tuberías (M2) en la Fase 2 del experimento, para una carga de 500 kg, donde aún no se habían formado las fisuras y en donde la gráfica V-D1 fue prácticamente lineal (Fig.7.23). Posteriormente, conociéndose el valor experimental de “K”, se halló en forma indirecta el módulo de elasticidad del muro (E). Los valores para hallar K y G aparecen en la Tabla 7.6.

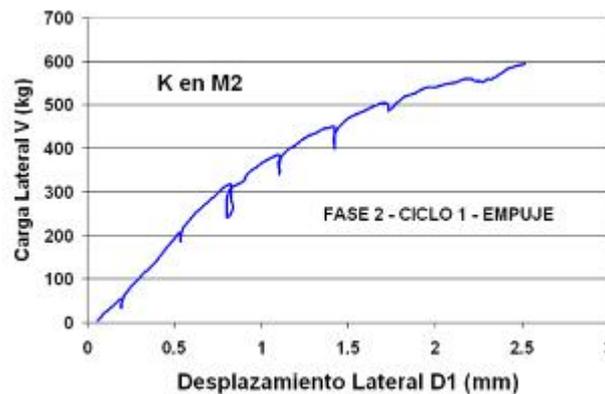


Fig. 7.23 Muro M2. Fase 2, zona lineal.

TABLA 7.6 Valores para el calculo experimental de K y G. Fase 2.

| Valores iniciales (carga nula) | | | | Valores finales (V = 500 kg) | | | |
|--|---------|---------|---------|------------------------------|---------|---------|---------|
| V (kg) | D1 (mm) | D4 (mm) | D5 (mm) | V (kg) | D1 (mm) | D4 (mm) | D5 (mm) |
| 3.2 | 0.055 | 0.026 | 0.031 | 503.5 | 1.695 | 0.258 | 0.230 |
| $\Delta V = 500.3 \text{ kg}, \Delta D1 = 1.64\text{mm}, \Delta D4 = 0.232\text{mm}, \Delta D5 = 0.199\text{mm}$ | | | | | | | |

La rigidez lateral experimental se obtiene como: $K = \Delta V / \Delta D1 = 500.3 \text{ kg} / 0.164 \text{ cm} = 3050 \text{ kg/cm}$

El módulo de corte experimental se obtiene de la relación $G = \tau / \gamma$ donde τ es el esfuerzo cortante y γ es la deformación por corte obtenida con los LVDT diagonales D4 y D5:

$$\tau = \Delta V / A = 500.3 / (19 \times 209) = 0.126 \text{ kg/cm}^2$$

$$\gamma = (\Delta D4 + \Delta D5) / D = (0.232 + 0.199) / 2260 = 0.0001907$$

$$D = \text{distancia entre las bases de los LVDT D4 y D5} = 2260 \text{ mm}$$

$$\text{Con lo cual: } G \text{ (experimental)} = 0.126 / 0.0001907 = 661 \text{ kg/cm}^2$$

Por otro lado, las propiedades del muro M2 (Fig.5.2) son:

- Área = $A = 19 \times 209 = 3971 \text{ cm}^2$
- Momento de inercia = $I = 19 \times 209^3 / 12 = 14454770 \text{ cm}^4$
- Factor de forma = $f = 1.2$ (sección rectangular)
- Altura desde el eje del actuador hasta la base del muro = $h = 235.5 \text{ cm}$

De esta manera, conociéndose el valor experimental de “ $K = 3050 \text{ kg/cm}$ ” y asumiéndose $E/G = 2.5$ (módulo de Poisson = 0.25, [1]), se determinó el valor de “ E ” utilizando la siguiente expresión teórica aplicable a muros en voladizo:

$$K = \frac{E}{\frac{h^3}{3I} + \frac{f h E}{A G}}$$

Como resultado se obtuvo: $E = 1460 \text{ kg/cm}^2$, con lo cual $G = E / 2.5 = 585 \text{ kg/cm}^2$. Este valor teórico de “ G ” difiere en 12% respecto al valor experimental (661 kg/cm^2), mientras que el valor de “ E ” difiere sustancialmente del valor propuesto en el acápite 7.2.3 ($E = 500 \text{ f'm}$).

Estos resultados muy bajos de “ E ” y “ G ”, indican que el sistema de adobe prensado es sumamente flexible, a la vez que presenta baja resistencia a fuerza cortante.

CAPITULO 8. ENSAYO SÍSMICO DEL MÓDULO

8.1 Peso del Módulo

Durante la operación de transporte del módulo desde el patio de construcción hacia la nave de ensayos, se pesó al módulo utilizando una celda de carga colgada en el puente grúa. Previamente, antes de construir al módulo, su anillo de cimentación fue pesado, obteniéndose:

| | |
|-------------------------------------|----------|
| Peso del módulo con cimentación = | 11447 kg |
| Peso del anillo de cimentación = | 2960 kg |
| ----- | |
| Peso del módulo incluyendo solera = | 8487 kg |

Si se supone un peso volumétrico del concreto de la solera escasamente reforzada igual a 2300 kg/m^3 , entonces el peso de los muros que componen al módulo resulta 7740 kg . Por otro lado, siendo el volumen ocupado por los muros igual a 4.263 m^3 (descontando puerta y ventanas), el peso volumétrico del adobe prensado reforzado con tubos resulta: 1815 kg/m^3 , valor que es ligeramente superior (0.8%) al hallado en el acápite 7.4.1 para el muro M2 reforzado con tubos.

De esta manera, para fines prácticos, puede suponerse que el peso volumétrico del adobe prensado reforzado con tubos es **1800 kg/m^3** .

8.2 Determinación de las Aceleraciones de Ensayo

De acuerdo a la Norma Sísmica E.030 [5], la aceleración máxima esperada en suelo duro de la costa peruana (Zona 3) para sismos severos es $0.4g$, mientras que para el caso de suelos blandos, esta aceleración debe amplificarse por $S = 1.4$, llegándose a obtener $1.4 \times 0.4g = 0.56g$.

En el caso del módulo, debe hacerse correcciones por densidad de muros y por la ausencia de techo a la aceleración para el caso de suelo blando.

Corrección por Ausencia de Techo (C1)

Admitiéndose que el techo compuesto por troncos, cañas y torta de barro pesa 120 kg/m^2 , entonces el techo del módulo pesaría $120 \times 3.04^2 = 1109 \text{ kg}$. Puesto que el peso del módulo con solera es 8487 kg (acápite 8.1) y el peso del módulo con solera y techo es 9596 kg , entonces el factor de corrección es: **$C1 = 9596/8487 = 1.13$** .

Corrección por Densidad de Muros (C2)

En la Fig.8.1 se presenta la planta de una vivienda de adobe ubicada en Guadalupe, Ica, de un piso, típica de la costa peruana. Esta vivienda fue reforzada en 1998 con malla electrosoldada y pudo soportar el terremoto de Pisco del 15-08-2007 (aceleración de $0.5g$ sobre suelo blando, registrada en Parcona, Ica), sin ningún daño. Esta vivienda, con muros de 0.4m de espesor, presenta las siguientes densidades de muros:

Área en Planta = $4.4 \times 15.0 = 66\text{m}^2$

Densidad de muros en X-X: $(15+12) \times 0.4 / 66 = 0.164 \text{ m}^2/\text{m}^2$

Densidad de muros en Y-Y: $(0.9+3.1+1.7) \times 2 \times 0.4 / 66 = 0.069 \text{ m}^2/\text{m}^2$

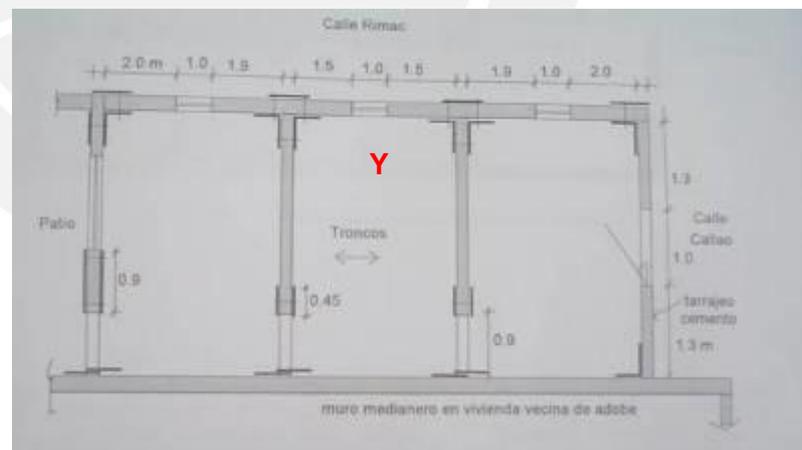


Fig. 8.1. Vivienda típica de adobe en la Costa.

Puesto que en la dirección de ensayo (con ventanas, Fig.5.3), el módulo presenta una densidad de muros igual a $1.14 \times 4 \times 0.19 / (3.04 \times 3.04) = 0.0938 \text{ m}^2/\text{m}^2$, entonces el factor de corrección por densidad de muros resulta: **$C2 = 0.0938 / 0.069 = 1.36$** .

Aceleración de Ensayo

De esta manera, para la condición más adversa en que el sistema de adobe prensado se ubique sobre suelo blando, la aceleración máxima ante sismos severos sería: $A_0 = 0.56g$
 $C1$
 $C2 = (0.56g) \times 1.13 \times 1.36 = 0.86g$.

Por otro lado, la resistencia máxima de 0.18 kg/cm^2 hallada en el acápite 7.4.5, corresponde al caso de muros esbeltos, donde las tracciones por flexión reducen la resistencia a corte; sin embargo, para el caso del módulo, los alféizares de ventana reducen la esbeltez del muro, por lo que podría adoptarse como resistencia a corte puro 0.3 kg/cm^2 , que corresponde a los muretes con mortero de barro al instante en que se forma la primera grieta diagonal (acápites 7.3.2).

De este modo, asumiéndose que el módulo se comportará como sólido rígido hasta que se forme la grieta diagonal, la aceleración correspondiente sería:

Para el Módulo: $M \times A_0 = 8487 \times A_0 \dots (1)$

Para los Muros con ventanas: $m \times a = (4 \times 114 \times 19) \text{ cm}^2 \times 0.3 \text{ kg/cm}^2 = 2600 \text{ kg} \dots (2)$

Igualando (1) y (2) obtenemos:

$8487 \text{ kg} \times A_0$ (agrietamiento) = $0.3 \times 4 \times 114 \times 19 = 2600 \text{ kg} \rightarrow A_0$ (agrietamiento) = $0.3g$, asociada a un sismo real con aceleración en suelo duro: $0.3g / (C1 \times C2) = 0.2g$, de carácter moderado.

Con lo cual, las aceleraciones nominales para el ensayo de simulación sísmica serán las mostradas en la Tabla 8.1

TABLA 8.1 Aceleración nominales del ensayo sísmico

| Fase | A_0 (sismo de ensayo) | Equivalencia a un sismo real |
|------|-------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 0.30g | Sismo moderado en suelo duro (0.2g) |
| 2 | 0.85g | Sismo severo en suelo blando (0.56g) |

8.3. Características de la Señal Sísmica

En el ensayo sísmico del módulo, se utilizó la señal sísmica correspondiente a la componente “L” del terremoto ocurrido el 31 de mayo de 1970 en Chimbote, 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 y obligó a la remodelación completa de la ciudad de Huaraz.

La forma de la señal “mayo70” y su espectro de Fourier aparecen en la Fig.8.2, donde puede apreciarse que las frecuencias predominantes oscilan entre 2.5 a 3.5 Hz.

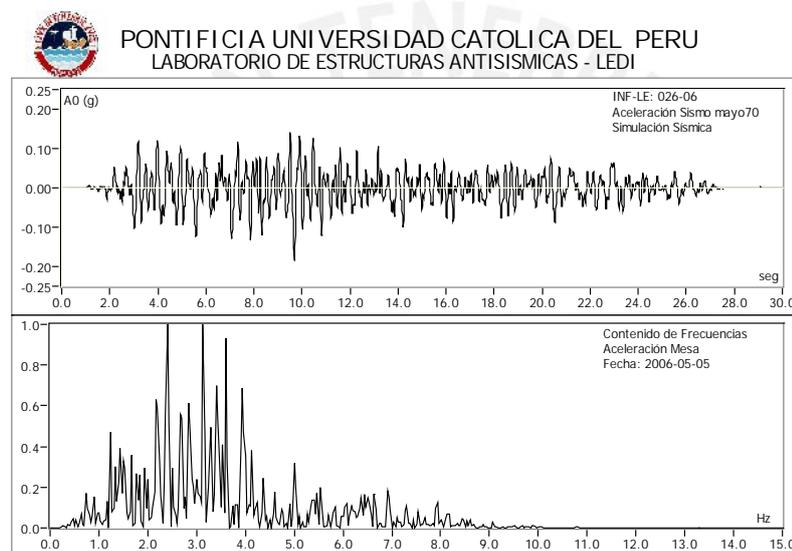


Fig.8.2 Acelerograma de la señal Mayo70 y contenido de frecuencias.

8.4 Instrumentación

Aparte de los instrumentos propios de la mesa vibradora (acelerómetro Ao, LVDT Do y medidor de presiones del actuador dinámico), se utilizaron (Fig.8.3) cinco acelerómetros (Ai) y nueve LVDT (Di), cuyas funciones fueron:

- A1, A2, A3, A4, D1, D2, D3 y D4, medir horizontalmente la respuesta de la solera.
- A5, D5, medir la respuesta de la parte central del muro lleno del eje 2 ante cargas sísmicas perpendiculares al plano.
- D6, medir el posible deslizamiento entre la solera y la última hilada del muro del eje B.
- D7, medir el posible deslizamiento entre la base del muro del eje B y la cimentación.

- D8 y D9, medir desplazamientos verticales en los talones del muro del eje B ante la posibilidad de una falla por flexión.

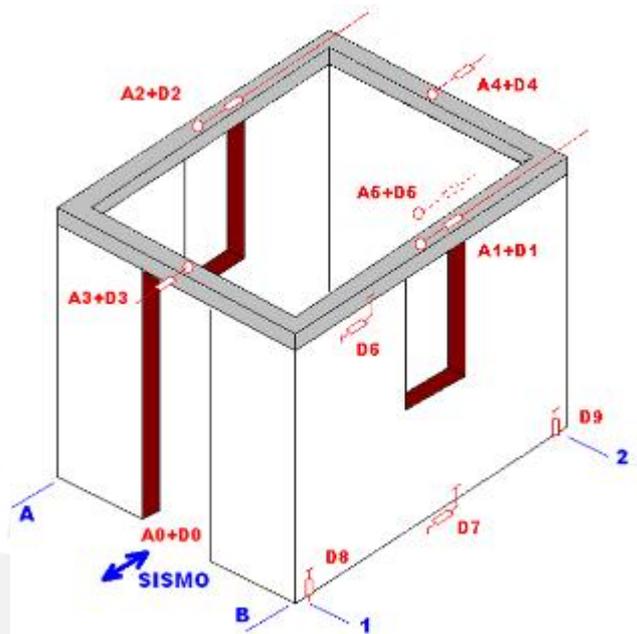


Fig.8.3. Instrumentación del módulo en el ensayo sísmico.

8.5 Comportamiento Cualitativo del Módulo

Durante la **Fase 1** se presentaron sólo 2 pequeñas fisuras (Fig.8.4) en el alféizar del eje A, que atravesaron al adobe. Terminada esta fase, y ante un posible colapso en la siguiente fase, como medida de seguridad se colocaron fajas que sujetaron a la viga solera (Fig.8.5). Estas fajas pasaron por los vanos de puerta y ventanas y estuvieron colgadas del puente grúa. Asimismo, las fajas tuvieron una holgura suficiente como para evitar su interacción con el módulo.



Fig.8.4. Fase 1. Fisuras en el alféizar del eje A. El resto de muros un tuvo fisuras.



Fig.8.5. Fajas colocadas después de la Fase 1.

En la **Fase 2** se presentaron grietas verticales en las 4 esquinas del módulo (falla por desgarramiento), iniciándose en la parte central para después correr hacia arriba y hacia abajo, sin que atravesasen a la solera y estancándose en la tercera hilada (Fig.8.6). Estas grietas fueron mucho más importantes en los extremos del muro lleno (eje 2, Fig.8.7) que en los extremos del muro con puerta (eje 1, Fig.8.6), por la mayor masa existente en el muro del eje 2.



Fig.8.6. Fase 2. Grietas verticales en los extremos del eje 1. Nótese que no atraviesan la solera y se estancan en la tercera hilada.

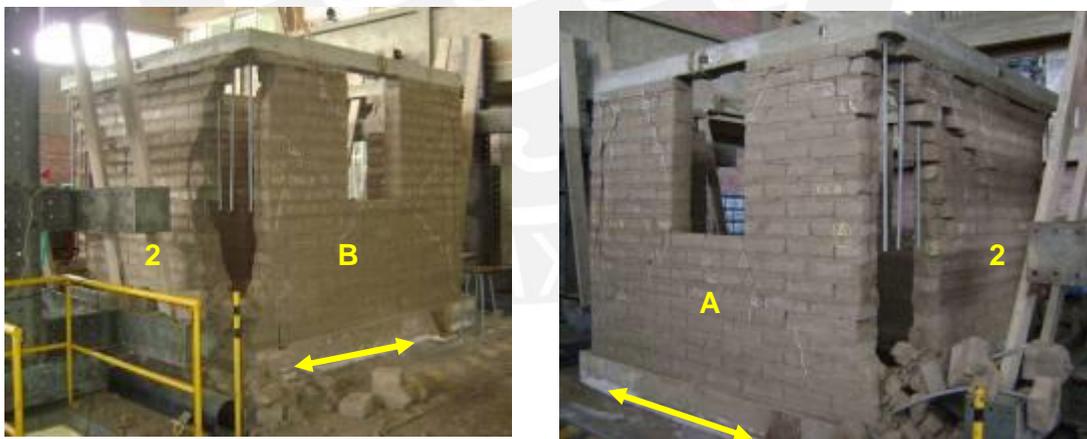


Fig.8.7
Fase 2. Colapso de los extremos del eje 2. Nótese que la solera no presenta daños, tampoco el adobe de la última hilada. La foto de abajo corresponde a una vista interior del eje 2.



En el caso del muro del eje 2, se presentó en sus esquinas el desacople de 3 tubos PVC en su zona de empalme (Fig.8.8), mientras que en el caso del muro del eje 1 las grietas verticales fueron menos notorias en la esquina interior (Fig.8.9) que en la esquina exterior (Fig.8.6).

Otras grietas que se generaron durante la Fase 2, aunque de menos importancia que las producidas en las 4 esquinas, fueron: a) fisuras diagonales en los muros de corte (Fig.8.10); y, b) fisura horizontal en la base de la última hilada (Fig.8.11) de todos los muros.

Debe también resaltarse que los empalmes de los tubos no tuvieron problemas en la zona central de todos los muros (Fig.8.12), excepto en los extremos del eje 2 (Fig.8.7 y 8.8).

Puesto que el módulo quedó en peligro inminente de colapso, en la Fase 2 terminó el ensayo, concluyéndose, desde el punto de vista cualitativo, que la presencia de la solera y de la conexión dentada entre muros ortogonales (Fig.6.15), es insuficiente como para evitar la falla por desgarramiento vertical en el encuentro entre muros, producida por acciones sísmicas perpendiculares al plano, debiéndose añadir refuerzo horizontal en forma de “L” para conectar los muros ortogonales. Este refuerzo puede añadirse ya sea internamente en las juntas durante la construcción, o externamente después de la construcción.



Fig.8.8. Fase 2.
Desacople de los tubos
en la esquina 2-A.



Fig.8.9. Fase 2.
Fisuras en la esquina
interior 1-A.



Fig.8.10. Fase 2. Fisuras diagonales en los muros de corte A y B.



Fig.8.11 Fase 2. Grieta en la base de la última hilada. Nótese que la unión solera-adobe no tuvo problemas, excepto en las esquinas del eje 2.



Fig.8.12. Fase 2. Zona central del muro de corte "A" y del muro de flexión "2", sin problemas en los empalmes de los tubos.

8.6 Resultados

La fuerza cortante en la base del módulo (V) fue obtenida restando a la fuerza impuesta por el actuador dinámico (Fa), la suma de las masas de la cimentación (Mc) y la plataforma (Mp) multiplicadas por la aceleración de la plataforma (Ao):

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

Donde:

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

$P_c = g M_c = 2960 \text{ kg}$ = peso del anillo de cimentación (acápite 8.1)

Los desplazamientos relativos a la mesa vibratora (d_i), fueron obtenidos restando a los desplazamientos absolutos (D_i en la Fig.8.3) el desplazamiento de la plataforma D_o .

$$d_i = D_i - D_o, \text{ para } i = 1 \text{ a } 5.$$

En la Tabla 8.2 aparecen los valores máximos, positivos y negativos, captados por los instrumentos (Fig.8.3), debiéndose acotar que estos valores no necesariamente ocurren al mismo instante. Por otro lado, la resistencia unitaria a fuerza cortante ($v = V/A$) fue obtenida dividiendo al cortante basal "V" entre el área de corte de los muros orientados en la dirección de ensayo, descontando los vanos de ventana: $A = 4 \times 114 \times 19 = 8664 \text{ cm}^2$.

TABLA 8.2: Valores máximos y mínimos registrados en el ensayo sísmico

| Instrumento | Fase 1 | | Fase 2 | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|
| | Ao (g) | 0.237 | -0.294 | 0.674 |
| A1 (g) | 0.657 | -0.675 | 0.986 | -2.648 |
| A2 (g) | 0.332 | -0.385 | 0.861 | -1.149 |
| A3 (g) | 0.533 | -0.552 | -1.006 | -1.837 |
| A4 (g) | 0.481 | -0.521 | 1.024 | -1.305 |
| A5 (g) | 0.481 | -0.485 | 1.536 | -0.907 |
| d1 (mm) | 5.773 | -4.361 | 51.64 | -40.58 |

| | | | | |
|-------------------------|-------|--------|--------|--------|
| d2 (mm) | 7.976 | -5.936 | 60.09 | -41.39 |
| d3 (mm) | 4.588 | -3.557 | 52.82 | -38.62 |
| d4 (mm) | 7.243 | -5.981 | 56.36 | -36.62 |
| d5 (mm) | 3.776 | -2.759 | 125.79 | -86.53 |
| D6 (mm) | 0.124 | -0.157 | (*) | (*) |
| D7 (mm) | 0.021 | -0.047 | 0.095 | -0.027 |
| D8 (mm) | 0.017 | -0.175 | 0.706 | -2.509 |
| D9 (mm) | 0.015 | -0.067 | (*) | (*) |
| Do (mm) | 29.51 | -22.31 | 84.37 | -63.94 |
| V (kg) | 3486 | -3320 | 6361 | -7982 |
| v (kg/cm ²) | 0.40 | -0.38 | 0.73 | -0.92 |

(*) Cayeron escombros sobre los LVDT D6 y D9 afectando su lectura.

Utilizando los valores mostrados en la Tabla 8.2, y remarcando que los problemas en la fase 2 se concentraron en las esquinas del módulo (Fig.8.6 y Fig.8.7), se puede decir lo siguiente:

- En la fase 1 (elástica), los instrumentos A1 y A2, al igual que d1 y d2, marcaron diferentes valores, por lo que hubo torsión pese a la simetría del módulo en la dirección de ensayo.
- Los desplazamientos verticales en la base extrema de los muros (D8 y D9) fueron muy pequeños, incluso en la fase 2, por lo que los muros ubicados en la dirección de ensayo trabajaron principalmente a corte. De esta manera se concluye que no se requería anclar los tubos en la cimentación.
- Los desplazamientos horizontales relativos entre la última hilada y la viga solera (D6), así como el relativo entre la base del muro y la cimentación (D7), fueron muy pequeños, incluso en la fase 2, por lo que no existió problemas de deslizamiento entre los elementos indicados. En la fase 2 el deslizamiento se concentró en la base de la última hilada (Fig.8.11).
- Durante la fase 2, en la parte central del muro de flexión del eje 2, sujeto a cargas sísmicas perpendiculares al plano, se registraron valores elevados de desplazamiento y aceleración:

$d5 = 126\text{mm}$ y $A5 = 1.54g$, sin que se produzca el desacople de los tubos verticales centrales (Fig.8.7 y Fig.8.12), por lo que no se requiere emplear pegamentos entre estos tubos.

- En el diseño por carga sísmica perpendicular al plano, en la Norma E.030 [5] se especifica emplear una carga $V = Z U C1 P$, que para las condiciones más drásticas de muros de viviendas ($U = 1$) que puedan volcarse ($C1 = 1.3$) en la zona sísmica 3 ($Z = 0.4$), proporciona un coeficiente sísmico: $V/P = Z U C1 = 0.4 \times 1 \times 1.3 = 0.52$. Puesto que en la fase 2 se alcanzó $A5/g = 1.54 > V/P = 0.52$, sin que se vuelque el muro del eje 2, se concluye que de evitarse la falla por desgarramiento en las esquinas, el sistema de adobe prensado es adecuado ante solicitaciones sísmicas perpendiculares al plano.
- En la fase 2 se presentó el agrietamiento diagonal de los muros orientados en la dirección de ensayo, registrándose un esfuerzo cortante máximo (0.73 kg/cm^2 y -0.92 kg/cm^2) que superó a la resistencia a corte puro de los muretes (0.42 kg/cm^2 , acápite 7.3.3) y del muro M2 (0.18 kg/cm^2 , acápite 7.4.5). Las razones de estas diferencias podrían deberse a la poca esbeltez que tuvieron los muros de corte del módulo y a la presencia de muros perpendiculares a los de corte, que deben haber absorbido una parte del cortante total, aparte de generar un mayor confinamiento. Debe señalarse que los muros de corte del módulo tuvieron 3 bordes arriostrados, mientras que los muretes tuvieron 4 bordes libres, por lo que debería esperarse una mayor resistencia a corte en los muros del módulo que en los muretes.

8.7 Lazos Histeréticos V-d2

Si bien es cierto que los desplazamientos horizontales de la solera $d1$, $d2$, $d3$ y $d4$ fueron distintos, las diferencias no fueron considerables, oscilando (Tabla 8.2) entre 8 y 4.6mm en la fase 1, y entre 60 y 51.6mm en la fase 2. De este modo, para graficar los lazos histeréticos, se utilizó el desplazamiento “ $d2$ ”, y con fines comparativos, se utilizó la misma escala para las fases 1 y 2.

En la Fig.8.13 aparecen los lazos histeréticos V-d2 para las fases 1 y 2 del ensayo. En la fase 1 puede apreciarse una respuesta elástica pero no lineal, mientras que para la fase 2 (inelástica), la gráfica es desordenada, aunque puede notarse que la resistencia máxima fue alcanzada

varias veces manteniéndose constante (entre $t = 3$ a 16 segundos, ver además la Fig.8.14), lo que significa que los tubos proporcionaron ductilidad, como en los ensayos de los muretes y del muro M2.

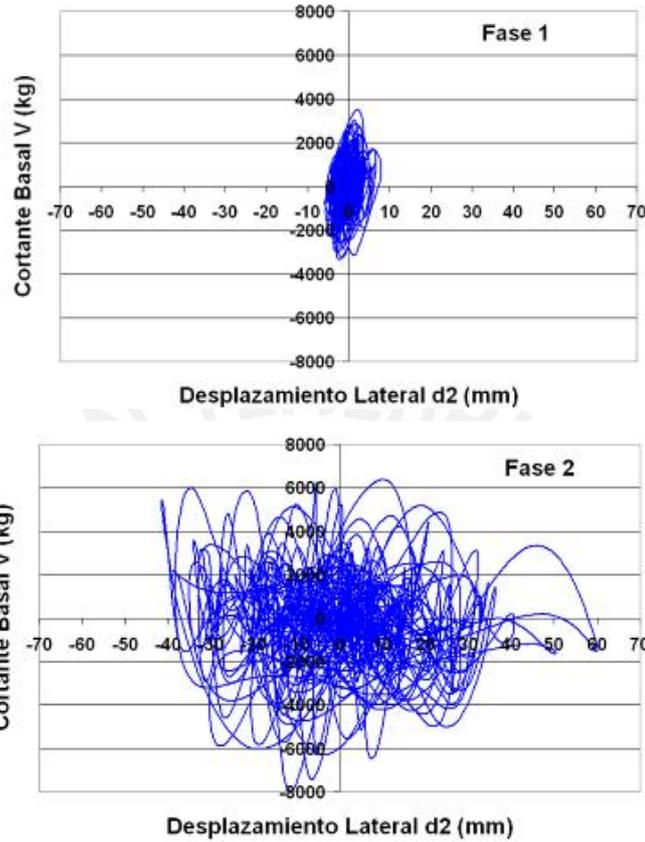


Fig.8.13. Lazos histeréticos V-d2.

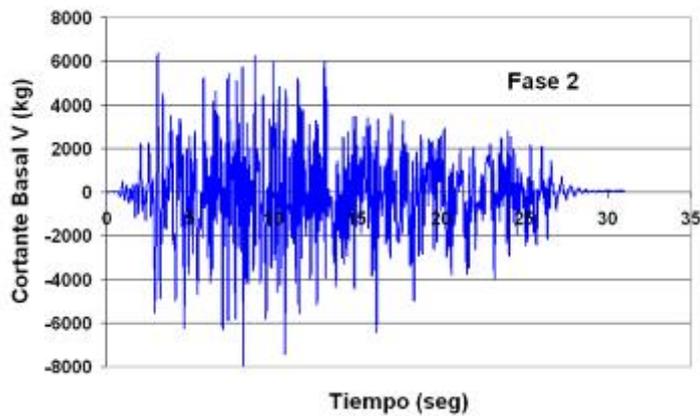


Fig.8.14 Variación del cortante basal (V) durante el tiempo del ensayo sísmico.

8.8 Vibración Libre. Período de Vibración “T”.

Antes y después de la fase 1 del ensayo sísmico, cuando el módulo estaba en el rango elástico, se aplicaron 4 pulsos de desplazamiento $D_0 = 1.8\text{mm}$ en la mesa vibradora, registrándose la respuesta de todos los instrumentos (Fig.8.3 y Fig.8.15), para luego procesar la mejor de las respuestas para la dirección de ensayo y obtener el período natural de vibración del módulo.

Debido a la poca masa del módulo, se obtuvo resultados pequeños y muy variables del periodo, oscilando entre $T = 0.09$ y 0.115 segundos, con un promedio de 0.102 seg.

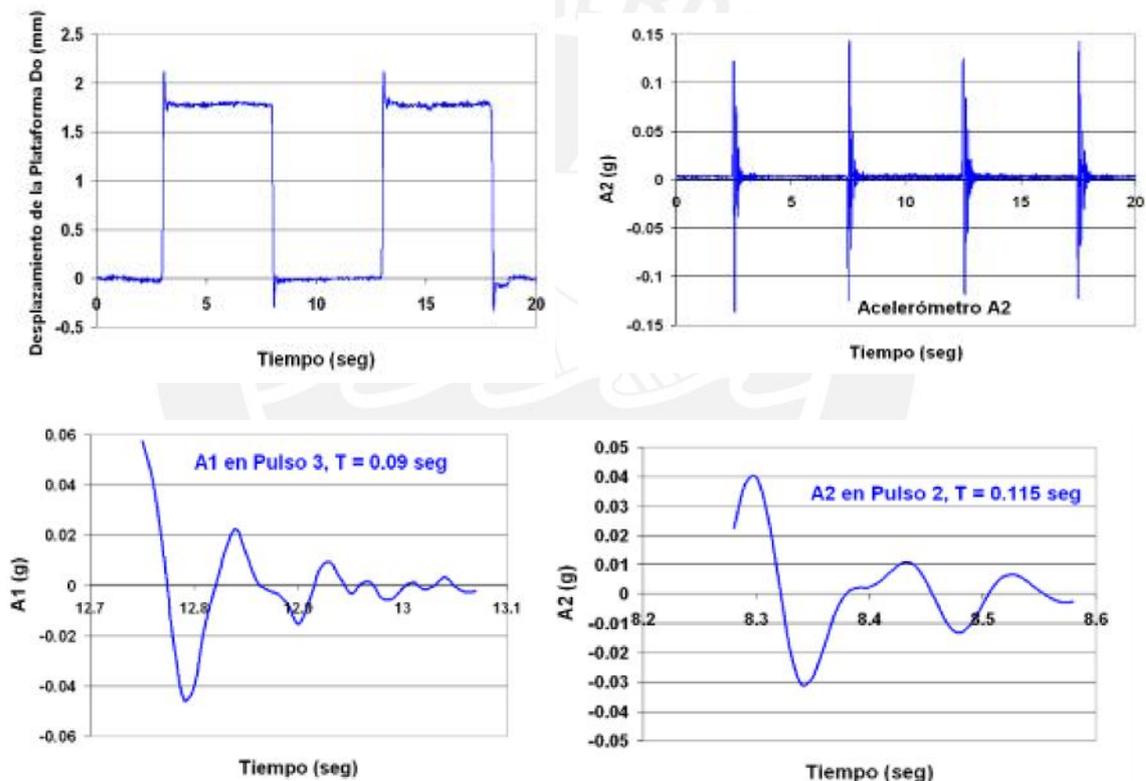


Fig.8.15. Ensayo de vibración libre. Pulsos “Do” en la mesa vibradora y respuesta de los acelerómetros A1 y A2.

CAPITULO 9: CONCLUSIONES

9.1 Adobe Prensado

- Existieron errores en las dimensiones del molde de la prensadora metálica, que hicieron que no pueda emplearse mortero en las juntas verticales y que se utilice juntas horizontales gruesas (2.5cm de espesor). Esto disminuyó la resistencia a fuerza cortante y a compresión axial de la albañilería. En proyectos futuros, las dimensiones del molde deberán corregirse de tal modo de lograr bloques con medidas modulares (Fig.2.1) y con juntas verticales llenas.
- No hubo problemas en la fabricación de los adobes. No se registraron fisuras por contracción de secado y el rendimiento observado fue la fabricación de 1 bloque cada dos minutos.
- Empleando una mezcla suelo-arena gruesa en proporción volumétrica 5:1, se lograron bloques con una resistencia a compresión de 19.5 kg/cm², mayor en 62% a la resistencia mínima exigida por la Norma E.080 [3] (12 kg/cm², Ref.3) para los adobes convencionales.
- La adición de cemento (4% en peso) a la mezcla suelo-arena, generó un incremento de la resistencia a compresión de 16% en los bloques, por lo que se descartó el uso de cemento ya que significaría un incremento importante en el costo (1/3 de bolsa por m² de muro).
- El peso de cada bloque fue de unos 11 kg y la variación de sus dimensiones fue mínima, excepto su alabeo (4mm). Sin embargo, los bloques no aprobaron la prueba de absorción, por lo que la albañilería correspondiente debe protegérsela del agua.
- No se presentaron daños en los bloques durante la operación de transporte y asentado.

9.2 Construcción

- No existió ningún problema en la construcción de los especímenes reforzados con tubos PVC verticales y una solera de concreto pobre (muros y módulo). En el proceso constructivo se utilizaron herramientas convencionales (badilejo, plomada, nivel, escantillón, etc.).

- Para reducir la alta succión de los bloques: 32 gr/(200cm²-min), sus caras horizontales de asiento fueron ligeramente humedecidas con una brocha con agua. Estos bloques no pueden sumergirse en el agua.
- El uso de dispositivos de acoples en los tubos PVC SAP, de ½” de diámetro y 1.8mm de grosor, localizados a la mitad de la altura del muro, facilitó el asentado de los bloques.
- No existe la necesidad de usar pegamentos en la zona de acople de los tubos PVC, tampoco existe la necesidad de anclar los tubos en la cimentación, puesto que la deformación lateral de los muros fue prácticamente por corte. Incluso para cargas sísmicas importantes perpendiculares al plano de los muros, no se presentaron fallas en los acoples por la flexión del muro, excepto en las esquinas del módulo (ver el acápite 9.6).
- La conexión solera-tubo enrollado con alambre #16, funcionó adecuadamente. En los experimentos de los muros y del módulo no se notó problemas de anclaje del tubo en esa unión. Tampoco se notó fallas por adherencia en la unión solera-última hilada del muro.
- Después de los experimentos, en algunos casos se notó que el mortero de barro introducido con los dedos de la mano en el interior de los alvéolos de los bloques, se contrajo separándose del bloque, por lo que sería conveniente compactarlo con un pisón de madera.

9.3 Pilas y Resistencia Admisible a Compresión Axial

- La resistencia a compresión axial de las pilas reforzadas con tubos, corregida por esbeltez, fue $f'm = 6.84 \text{ kg/cm}^2$, por lo que de acuerdo a la Norma E.080 [3], la resistencia admisible a compresión axial de los muros resulta: **$f_m = 0.25 f'm = 1.7 \text{ kg/cm}^2$** .
- Puesto que la resistencia admisible ($f_m = 1.7 \text{ kg/cm}^2$) es insuficiente como para que los muros internos de una vivienda de 2 pisos puedan soportar las cargas de gravedad, se aconseja utilizar el sistema de adobe prensado con unidades de las dimensiones usadas en este proyecto sólo para viviendas de 1 piso.

9.4 Muretes Ensayados a Compresión Diagonal

- La adición de cemento (5% en peso) al mortero de barro, incrementó la resistencia a corte puro en sólo 14%, por lo que se descartó el uso de cemento en el mortero. Además, la forma de falla no se vio afectada por la adición de cemento al mortero de barro.
- Los tubos PVC proporcionaron ductilidad e incrementaron la resistencia después del primer agrietamiento diagonal en 41%.
- La resistencia máxima promedio a corte puro de los muretes hechos con mortero de barro y reforzados con tubos fue $v = 0.42 \text{ kg/cm}^2$. De acuerdo a la Norma E.080 [3], la resistencia admisible a fuerza cortante de los muros debe calcularse con la expresión $vm = 0.4 v = 0.17 \text{ kg/cm}^2$. Este resultado es muy pequeño e incluso menor al valor que especifica la Norma E.080 [3], para situaciones en que no se efectúe ensayos de compresión diagonal (0.25 kg/cm^2).

9.5 Muros Ensayados a Carga Lateral Cíclica

- En el muro M1 (sin tubos), la falla fue por deslizamiento localizada en la zona central superior de la base de la última hilada, derivando en grietas diagonales en los extremos. En M2 (con tubos), la forma de falla fue por corte, presentándose grietas escalonadas y otras que atravesaron los bloques. En ambos muros, la conexión entre la solera y la hilada superior no tuvo problemas de adherencia, pese a que la carga lateral se aplicó sobre la solera.
- Los tubos PVC proporcionaron ductilidad, pero, a diferencia de los muretes, no incrementaron la resistencia a corte. Cabe resaltar que M1 (sin tubos) pudo soportar hasta un desplazamiento lateral de 5mm, para después producirse una fuerte degradación de la resistencia, mientras que M2 (con tubos) llegó hasta 25mm sin que degrade la resistencia.
- El muro M1 (sin tubos) tuvo mayor rigidez lateral inicial que el muro M2 (con tubos). Esto podría deberse a que los alvéolos de M1 estuvieron totalmente rellenos con mortero de barro, mientras que en M2 existían tubos PVC muy flexibles y vacíos en todos los alvéolos.

- La resistencia máxima alcanzada por M2 (0.18 kg/cm^2), coincidió con la resistencia admisible propuesta por la Norma E.080 [3]. Sin embargo, la resistencia admisible está afectada por un factor de seguridad, por lo que se deduce que la resistencia a corte del adobe prensado reforzado con tubos es muy baja en comparación con los adobes convencionales.
- La resistencia máxima de M2 (0.18 kg/cm^2), pudo predecirse mediante la expresión propuesta por la Norma E.070 [1] para muros sin carga vertical: $v_m = 0.5 v_r$, donde: “v” es la resistencia a corte de los muretes y “ α ” es un coeficiente de reducción por esbeltez.
- En base a conocerse la rigidez lateral experimental de M2 y asumiéndose un módulo de Poisson de 0.25, se calculó el módulo de elasticidad de la albañilería hecha con adobe prensado y tubos de refuerzo, obteniéndose: $E = 1460 \text{ kg/cm}^2$. Este resultado muy bajo de “E”, indica que el sistema de adobe prensado es muy flexible.

9.6 Ensayo Sísmico del Módulo

- La aplicación de un sismo equivalente al moderado de la Norma E.070 [1], Fase 1 con una aceleración de hasta 0.2g en suelo duro, generó 2 fisuras muy finas y de poca extensión localizadas en el alféizar de una ventana de uno de los muros de corte.
- Después de aplicarse un sismo equivalente al terremoto severo de la Norma E.030 [5], Fase 2 con una aceleración de hasta 0.56g en suelo blando, el módulo quedó al borde del colapso, concentrándose las fallas principales en la unión entre muros perpendiculares, generándose además grietas diagonales en los muros de corte y un ligero deslizamiento en la base de la última hilada (la unión solera-última hilada tuvo un problemas de adherencia).
- El uso de la viga solera, donde no se produjo ninguna fisura, y de la conexión dentada entre muros perpendiculares, con tubos verticales en esa unión, fue insuficiente como para controlar la falla por desgarramiento vertical en las esquinas del módulo, causadas principalmente por las fuerzas de inercia provenientes de los muros transversales a la dirección de ensayo. Por ello se recomienda reforzar esos encuentros con una malla electrosoldada, anclada a los muros externamente formando un sándwich en la esquina, o en las juntas horizontales cada 3 hiladas, tal como se muestra en la Fig.9.1.

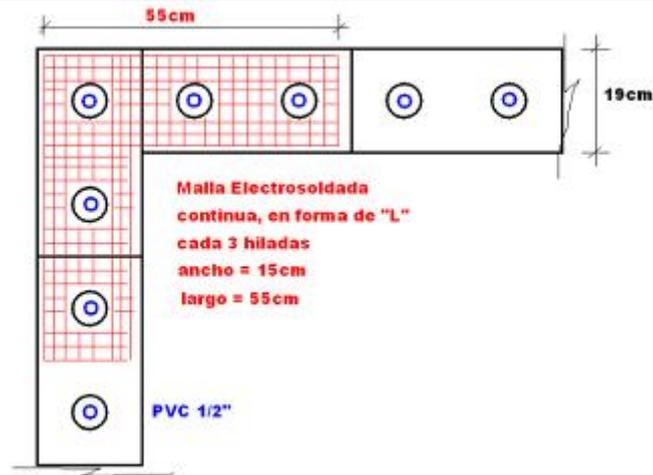


Fig.9.1 (vista en Planta) Malla electrosoldada cada 3 hiladas en las esquinas. En esa zona debe usarse mortero cemento-arena 1:5. Como la malla presenta un ancho de 90cm, puede ser recortada en forma de "L".

- La resistencia a corte, fue alcanzada varias veces durante la Fase 2 del experimento, sin que degrade, lo cual indica que los tubos PVC proporcionaron ductilidad.
- En la Fase 2 se registró un esfuerzo cortante máximo (0.73 kg/cm^2) que superó a la resistencia a corte puro de los muretes (0.42 kg/cm^2) y del muro M2 (0.18 kg/cm^2). Las razones de estas diferencias podrían deberse a la poca esbeltez que tuvieron los muros de corte del módulo y a la presencia de muros perpendiculares a los de corte, que deben haber absorbido una parte del cortante total. Debe señalarse que los muros de corte del módulo tuvieron 3 bordes arriostrados, mientras que los muretes tuvieron 4 bordes libres, por lo que debería esperarse una mayor resistencia a corte en los muros del módulo que en los muretes.
- En el diseño por carga sísmica perpendicular al plano, en la Norma E.030 [5] se especifica emplear una carga $V = Z U C_1 P$, que para las condiciones más drásticas de muros de viviendas ($U = 1$) que puedan volcarse ($C_1 = 1.3$) en la zona sísmica 3 ($Z = 0.4$), proporciona un coeficiente sísmico: $V/P = Z U C_1 = 0.52$. Puesto que en la Fase 2 se alcanzó $1.54g$ en el centro del muro ortogonal a la dirección de ensayo, sin que se vuelque,

se concluye que de evitarse la falla por desgarramiento en las esquinas, el sistema es adecuado ante esta acción.

9.7 Línea Futura De Investigación

- Es importante corregir las dimensiones del molde, de tal modo de lograr bloques modulares que se asienten con juntas verticales y horizontales de 2cm de grosor.
- Mediante ensayos sísmicos de muros en forma de “H” o “U”, es necesario investigar al refuerzo adicional propuesto en la Fig.9.1, para observar si es capaz de controlar la falla por desgarramiento vertical.
- Mediante ensayos de carga lateral cíclica, es necesario determinar la resistencia a corte para varias condiciones de esbeltez, arriostramiento de bordes y niveles de carga vertical. En estos ensayos deberá además observarse sí el uso de juntas verticales llenas incide o no sobre la resistencia y rigidez de los muros.
- Para verificar la baja resistencia admisible a compresión obtenida en este proyecto, es necesario realizar el ensayo de compresión en muros a escala natural.

REFERENCIAS

1. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, y SENCICO, 2006. Reglamento Nacional de Construcciones. Norma E.070 “Albañilería”.
2. Laboratorio de Estructuras de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Informe INF-LE 289-09. Resistencia a Compresión. Adobe Prensado Preliminar.
3. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, y SENCICO, 2006. Reglamento Nacional de Construcciones. Norma E.080 “Adobe”.
4. Laboratorio de Estructuras de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Informe INF-LE 348-09 A. Ensayos de dimensiones, alabeo, compresión y absorción en adobes prensados.
5. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, y SENCICO, 2006. Reglamento Nacional de Construcciones. Norma E.030 “Diseño Sismorresistente”.

