



PONTIFICIA **UNIVERSIDAD CATÓLICA** DEL PERÚ

Esta obra ha sido publicada bajo la licencia Creative Commons
Reconocimiento-No comercial-Compartir bajo la misma licencia 2.5 Perú.

Para ver una copia de dicha licencia, visite
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO E
INFLUENCIA DE LA DIRECCIÓN DEL MOVIMIENTO EN
MÓDULOS DE ADOBE REFORZADO CON GEOMALLA**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil, que presenta el
bachiller:

Stefano Edoardo Bossio Ibáñez

Asesor: Dr. Marcial Blondet Saavedra

Lima, Agosto del 2010

Resumen

La presente tesis de investigación tiene como objetivo principal comprobar el comportamiento dinámico del sistema constructivo presentado en la cartilla “Construcción de casas saludables y sismorresistentes de Adobe Reforzado con geomallas” publicada por la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) y cuyos autores: Julio Vargas Neumann, Daniel Torrealva y Marcial Blondet impulsaron esta nueva tecnología que busca mejorar las viviendas de adobe e incrementar su resistencia ante los sismos. Esta tecnología se puso en práctica en la zona afectada por el terremoto del 15 de agosto del 2007 ocurrido en la costa sur del Perú.

Se construyeron dos módulos idénticos de adobe reforzado con geomalla de 3,25m x 3,25m a escala natural y fueron sometidos a ensayos dinámicos en la mesa vibradora del Laboratorio de Estructuras de la PUCP. Uno de los módulos fue sometido a un movimiento unidireccional, paralelo a dos de sus muros y el otro en una dirección de 45° con respecto a sus cuatro muros. La geomalla utilizada como refuerzo fue la Tensar BX4100 y se colocó externamente en los muros cubriendo el 100% del área de éstos. Se comparan los resultados de ambos ensayos con un ensayo realizado previamente de un módulo de adobe no reforzado.

Además, se buscó evaluar la influencia en el comportamiento sísmico que existe al cambiar la orientación del módulo en la mesa vibradora de un grado de libertad, comparando los resultados de ambos ensayos.

FACULTAD DE
CIENCIAS E
INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título : "Evaluación del comportamiento sísmico e influencia de la dirección del movimiento en módulos de adobe reforzado con geomalla".

Área : Estructuras -Investigación-

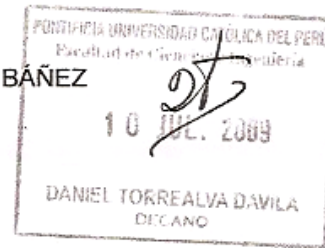
Asesor : Dr. Marcial Blondet Saavedra

Alumno : STEFANO EDOARDO BOSSIO IBÁÑEZ

Código : 2002.0580.2.412

Tema N° : 222

Fecha : Lima, 24 de junio de 2009



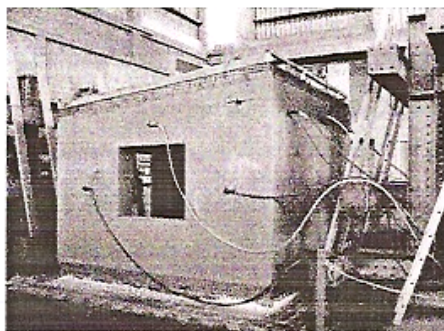
ANTECEDENTES

El terremoto producido el 15 de agosto del 2007 en el departamento de Ica produjo gran destrucción y más de 500 pérdidas humanas. En respuesta a este desastre, la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) empezó una ardua labor en difundir una nueva tecnología de construcción de casas de adobe utilizando geomalla como refuerzo externo de los muros. Esta difusión se inició con la publicación de una cartilla de construcción titulada "Construcción de casas saludables y sismorresistentes de adobe reforzado con geomallas".

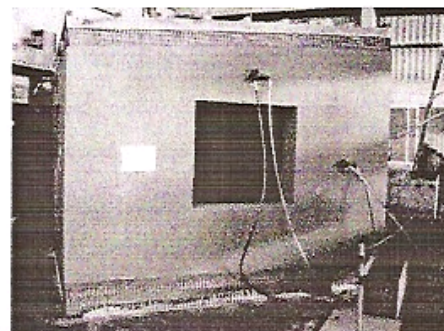
Se ha comprobado experimentalmente que el refuerzo con geomalla mejora el comportamiento dinámico de las construcciones de adobe. Éstas mantienen su unidad, brindan mayor resistencia y fallan dúctilmente.

Es necesario realizar ensayos adicionales en la mesa vibradora que permitan comprobar y validar el sistema constructivo presentado en la cartilla y que se viene construyendo y capacitando en la zona afectada por el sismo.

Este proyecto pretende estudiar y evaluar el comportamiento sísmico de dos módulos de adobe reforzado con geomalla ensayados en el Laboratorio de Estructuras de la PUCP. El primer ensayo se realizó colocando el muro frontal del módulo en dirección normal a la dirección del movimiento. El segundo ensayo se realizó colocando el módulo en una dirección de 45° con respecto a la dirección del movimiento.



MÓDULO 1



MÓDULO 2 (a 45°)

Handwritten signature

Handwritten signature

FACULTAD DE
 CIENCIAS E
 INGENIERÍA

 PONTIFICIA
 UNIVERSIDAD
 CATÓLICA
 DEL PERÚ

OBJETIVOS

El objetivo general del proyecto es contribuir a la construcción de viviendas de adobe sismorresistentes.

Los objetivos específicos son:

- Evaluar el comportamiento sísmico de dos módulos de adobe reforzado con geomalla ensayados en la mesa vibradora.
- Evaluar la influencia en el comportamiento sísmico que existe al cambiar la orientación del módulo en la mesa vibradora de un grado de libertad, comparando el módulo orientado en dirección normal al movimiento y el módulo a 45°.

PLAN DE TRABAJO

Se construyeron, entre agosto y octubre del 2008, dos módulos a escala natural de adobe reforzados externamente con la geomalla TENSAR BX4100 que cubría la totalidad de los muros y posteriormente fueron ensayados en la mesa vibradora del Laboratorio de Estructuras de la PUCP.

Los ensayos realizados en este proyecto fueron financiados íntegramente por el Rectorado de la PUCP.

Este proyecto de investigación comprende las siguientes etapas:

1. Diseño de los módulos: Confección de los planos de diseño, detalle del corte y traslape de geomalla. Cálculo del metrado y presupuesto de los materiales a utilizar.
2. Diseño del ensayo: Determinación de la señal y las fases del ensayo, así como la instrumentación para cada módulo.
3. Construcción de los módulos: Construcción de dos módulos, de igual dimensión y configuración, reforzados con el mismo tipo de geomalla.
4. Ensayo de los módulos: Ensayo de dos módulos en la mesa vibradora empleando una señal e incrementando el desplazamiento de la mesa en cada fase del ensayo.
5. Proceso de datos: Se determinarán, en cada uno de los módulos, las respuestas máximas, frecuencia, amortiguamiento y rigidez para cada fase. Se evaluará la contribución de la geomalla en la resistencia y rigidez del módulo. Además, se evaluará el comportamiento del módulo observando las grietas y daños ocurridos durante el ensayo.
6. Informe final: Se realizará un informe final en el cuál se describirán los trabajos realizados, los datos obtenidos en cada ensayo, el análisis y discusión de resultados y conclusiones.

VºBº ASB
 Coordinador de Investigación





Agradecimientos

Un especial agradecimiento a mi asesor, Dr. Marcial Blondet, por el tiempo dedicado al desarrollo de esta tesis y por sus invaluable consejos, tanto en el ámbito académico como personal.

Agradezco a la Ing. Gladys Villa García y al Ing. Julio Vargas por el apoyo y la confianza brindada en el desarrollo de esta investigación. Al personal del Laboratorio de Estructuras por su ayuda y cooperación durante todo el proceso de construcción y ensayo de los módulos.

Agradezco también al Rectorado de la PUCP, que financió los ensayos realizados en esta investigación y sin el cual ésta no hubiera sido posible. A la empresa Tecnología de Materiales S.A. y al Ing. Augusto Alza por su cooperación en el proyecto y la donación de los rollos de geomalla.

Finalmente, agradezco a mis amigos quienes siempre me incentivaron a terminar la tesis y a mi familia por su amor, comprensión y apoyo incondicional.

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| Resumen | I |
| Agradecimientos | IV |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Antecedentes | 1 |
| 1.2. Cartilla de Construcción de Adobe Reforzado con Geomalla | 2 |
| 1.3. Objetivos | 4 |
| 1.4. Metodología | 5 |
| 2. Características de los Materiales | 6 |
| 2.1. Adobe | 6 |
| 2.2. Geomalla | 7 |
| 2.2.1. Reglamentación para el Uso de Geomalla en Construcciones de Adobe | 9 |
| 2.2.2. Ensayo de Control ASTM D6637 | 10 |
| 3. Diseño y Construcción de los Módulos | 13 |
| 3.1. Características Físicas y Geométricas del Módulo | 13 |
| 3.2. Características del Refuerzo con Geomalla | 17 |
| 3.3. Verificaciones del Módulo según la Norma E.080 Adobe | 19 |
| 3.4. Procedimiento Constructivo | 21 |
| 4. Diseño del Ensayo | 27 |
| 4.1. Introducción | 27 |
| 4.2. Características del Ensayo | 27 |
| 4.2.1. Características de la Mesa Vibradora | 27 |
| 4.2.2. Señal Sísmica y Fases del Ensayo | 27 |
| 4.2.3. Instrumentación del Ensayo Unidireccional | 32 |
| 4.2.4. Instrumentación del Ensayo a 45° | 35 |
| 5. Identificación Dinámica y Detección de Daños | 37 |
| 5.1. Métodos de Identificación Dinámica Utilizados | 37 |
| 5.1.1. Determinación del Periodo Natural de Vibración | 37 |
| 5.1.2. Determinación del Coeficiente de Amortiguamiento | 39 |
| 5.2. Métodos de Detección de Daños Utilizados | 40 |
| 5.3. Caracterización de Daños en Construcciones de Adobe | 41 |
| 6. Módulo No Reforzado – Ensayo Unidireccional (M000) | 44 |

| | |
|--|-----------|
| 6.1. Introducción | 44 |
| 6.2. Ensayo Dinámico | 45 |
| 6.2.1. Fase 1 ($\Delta = 30\text{mm}$) | 45 |
| 6.2.2. Fase 2 ($\Delta = 80\text{mm}$) | 49 |
| 6.2.3. Fase 3 ($\Delta = 130\text{mm}$) | 53 |
| 6.2.4. Plano de Grietas en Muros | 55 |
| 6.3. Interpretación de Resultados | 56 |
| 6.3.1. Valores Máximos | 56 |
| 6.3.2. Periodo Natural de Vibración y Coeficiente de Amortiguamiento | 57 |
| 6.3.3. Cortante Basal vs. Desplazamiento Relativo | 58 |
| 6.3.4. Envolvente Cortante Basal vs. Desplazamiento Relativo | 62 |
| 7. Módulo Reforzado – Ensayo Unidireccional (M100-T4100) | 63 |
| 7.1. Introducción | 63 |
| 7.2. Ensayo Dinámico | 64 |
| 7.2.1. Fase 1 ($\Delta = 30\text{mm}$) | 64 |
| 7.2.2. Fase 2 ($\Delta = 80\text{mm}$) | 67 |
| 7.2.3. Fase 3 ($\Delta = 130\text{mm}$) | 70 |
| 7.2.4. Plano de Fisuras del Tarrajeo | 73 |
| 7.2.5. Plano de Daños de la Geomalla | 75 |
| 7.2.6. Plano de Fisuras y Grietas de Muros | 77 |
| 7.3. Interpretación de Resultados | 79 |
| 7.3.1. Valores Máximos | 79 |
| 7.3.2. Periodo Natural de Vibración y Coeficiente de Amortiguamiento | 80 |
| 7.3.3. Cortante Basal vs. Desplazamiento Relativo | 81 |
| 7.3.4. Envolvente Cortante Basal vs. Desplazamiento Relativo | 84 |
| 8. Módulo Reforzado – Ensayo a 45° (M100-T4100D) | 85 |
| 8.1. Introducción | 85 |
| 8.2. Ensayo Dinámico | 86 |
| 8.2.1. Fase 1 ($\Delta = 30\text{mm}$) | 86 |
| 8.2.2. Fase 2 ($\Delta = 80\text{mm}$) | 89 |
| 8.2.3. Fase 3 ($\Delta = 130\text{mm}$) | 92 |
| 8.2.4. Plano de Fisuras del Tarrajeo | 95 |
| 8.2.5. Plano de Daños de la Geomalla | 97 |
| 8.2.6. Plano de Fisuras y Grietas de Muros | 99 |
| 8.3. Interpretación de Resultados | 101 |
| 8.3.1. Valores Máximos | 101 |

| | |
|---|------------|
| 8.3.2. Periodo Natural de Vibración y Coeficiente de Amortiguamiento | 103 |
| 8.3.3. Cortante Basal vs. Desplazamiento Relativo | 104 |
| 8.3.4. Envolvente Cortante Basal vs. Desplazamiento Relativo | 107 |
| 9. Discusión de Resultados | 108 |
| 9.1. Comportamiento Sísmico | 108 |
| 9.2. Envolvente Cortante Basal vs. Desplazamiento Relativo | 109 |
| 9.3. Periodo Natural de Vibración y Coeficiente de Amortiguamiento | 112 |
| 9.4. Estimación y Variación de la Rigidez | 114 |
| 10. Conclusiones y Recomendaciones Constructivas | 116 |
| 10.1. Conclusiones | 116 |
| 10.2. Recomendaciones Constructivas | 117 |
| Referencias y Bibliografía | 122 |
| Anexos | |
| Anexo A Protocolo de Ensayo | |
| Anexo B Planos de Arquitectura de los Módulos M100-T4100 y M100-T4100D | |
| Anexo C Planos de Estructuras de los Módulos M100-T4100 y M100-T4100D | |
| Anexo D Planos de Instrumentación del Módulo M100-T4100 | |
| Anexo E Planos de Instrumentación del Módulo M100-T4100D | |

1. Introducción

1.1. Antecedentes

El Perú es un país altamente sísmico por encontrarse en el denominado Círculo de Fuego del Pacífico – región que bordea el Océano Pacífico y que es escenario del 75% de la sismicidad del planeta – ya que muy cerca de sus costas se encuentra la colisión de la placa continental de Nazca y la placa Sudamericana, creando una presión tectónica que eventualmente libera energía manifestándose en sismos de diversa magnitud.

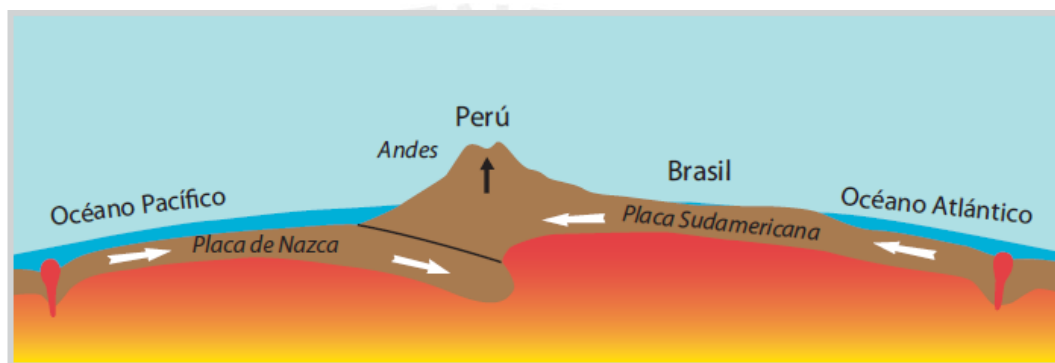


Figura 1.1 Sección transversal de las placas Nazca y Sudamericana (Fuente: INDECI, 2009)

El uso del adobe como material de construcción es muy común en zonas rurales del país por ser asequible y de bajo costo, sin embargo, es un material muy vulnerable a los terremotos. A raíz del terremoto de Ancash del 31 de Mayo de 1970, el cual ocasionó la muerte de casi 70 000 personas y la destrucción de una gran cantidad de edificaciones de adobe, se inició formalmente las investigaciones sistemáticas sobre el adobe.

Recientemente, en el año 2007, se realizó el Censo Nacional llevado a cabo por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) que mostró que el 34.8% de viviendas en el Perú (2 229 715 viviendas) son de adobe o tapial. Más aún, en zonas rurales este porcentaje se eleva a 68.5% (1 102 798 viviendas). Sin embargo, si bien el porcentaje de viviendas de tierra con respecto al total de viviendas ha venido disminuyendo en el Perú en los últimos años, el número global de estas viviendas sigue aumentando. Es por estos motivos que la investigación en el reforzamiento de viviendas de adobe sigue siendo de vital importancia y desde sus inicios, en la PUCP específicamente, se han propuesto diferentes soluciones

como son el uso de malla interna de caña y malla electrosoldada como material de refuerzo.

1.2. Cartilla de Construcción de Adobe Reforzado con Geomalla

A partir del año 2005 se empezaron a desarrollar nuevas investigaciones dirigidas por los profesores de Ingeniería Civil: Daniel Torrealva, Marcial Blondet y Julio Vargas que se orientaban a buscar nuevas propuestas de refuerzo sísmico de edificaciones de adobe con materiales que puedan ser producidos en grandes cantidades. Uno de los materiales utilizados como refuerzo fue la geomalla y se empezó a desarrollar con este material un procedimiento de construcción de viviendas sismorresistentes.

A raíz del sismo de 8.0 Mw (USGS) del 15 de Agosto de 2007 y cuyo epicentro se ubicó frente a la ciudad de Pisco, los departamentos de Lima, Ica y Huancavelica se vieron seriamente afectados. Un total de 596 personas fallecieron, 1 292 personas resultaron heridas de gravedad y cerca de 90 000 edificaciones, en su gran mayoría de adobe, fueron destruidas o declaradas inhabitables (INDECI, 2009).



Figura 1.2. Vivienda de adobe y quincha afectada por el sismo de Pisco (Fuente: EEFIT, 2008)



Figura 1.3. Colapso parcial de una vivienda de adobe tras el sismo de Pisco (Fuente: Hulburd, 2008)

El Rectorado de la PUCP encomendó a los mencionados profesores la elaboración y presentación de una propuesta de construcción para los damnificados de dicho desastre. En Diciembre de 2007 se publicó la cartilla titulada “Construcción de Casas Saludables y Sismorresistentes de Adobe Reforzado con Geomallas” en dos versiones, una para zonas de la costa y otra para la sierra. Esta cartilla está orientada de forma gráfica y didáctica que permite capacitar principalmente a las

personas afectadas por el sismo y sin que éstas requieran de un conocimiento técnico previo en construcción.

En la cartilla se presenta la construcción de una vivienda de aproximadamente 50 m² en planta y cuatro ambientes de adobe reforzado con geomalla. La cartilla incluye también las instrucciones para construir una cocina mejorada y una letrina de hoyo seco ventilado ubicada en la parte exterior de la vivienda.

En Marzo de 2008 esta tecnología se reglamentó oficialmente con la publicación del anexo N°1 “Refuerzo de Geomalla en Edificaciones de Adobe” de la Norma E.080 Adobe, en el cual se detalla el uso de este material como refuerzo de construcciones en adobe.

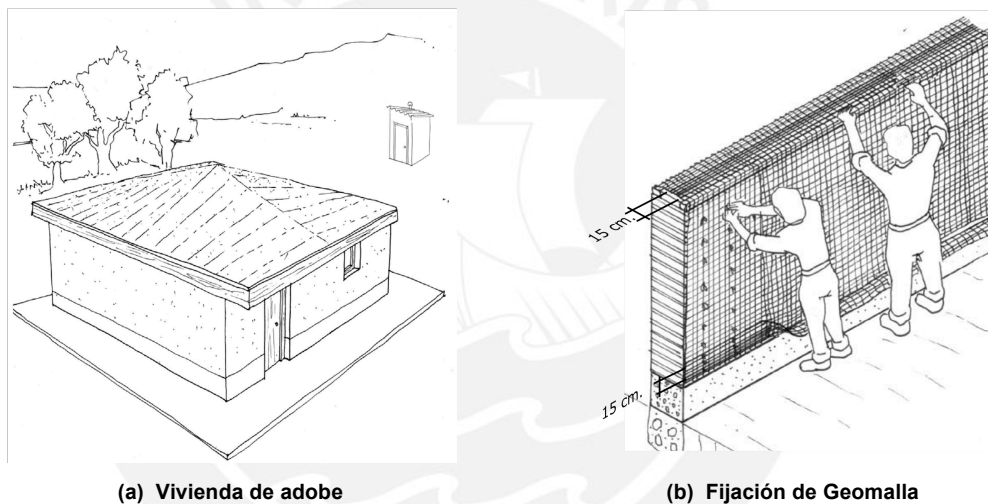


Figura 1.4. Ilustraciones de la Cartilla de Construcción (Fuente: Vargas et al, 2007)

A partir de entonces, esta tecnología fue aplicada en la zona del desastre a través de proyectos de capacitación masiva y construcción realizados por la Dirección Académica de Responsabilidad Social (DARS), que lideró en la PUCP las acciones para la reconstrucción de la zona afectada por el sismo del 15 de Agosto de 2007. A su vez, esta tecnología fue aplicada y diseminada en las zonas afectadas por otras instituciones como la Cruz Roja, CARE PERÚ, GTZ, Cáritas del Perú, entre otras.



Figura 1.5. Cartilla de construcción - Versión Costa
(Fuente: Vargas et al, 2007)



Figura 1.6. Vivienda construida de adobe reforzado
(Fuente: DARS)

Hasta el 2008, las investigaciones realizadas con procedimientos constructivos muy similares al descrito en la cartilla habían demostrado que esta tecnología incrementaba la resistencia sísmica de las edificaciones de adobe. Sin embargo, era necesario realizar ensayos dinámicos adicionales que validaran el procedimiento constructivo exactamente como había sido publicado en la cartilla, el cual se ha venido aplicando en la reconstrucción de las zonas afectadas.

1.3. Objetivos

El objetivo general del proyecto es contribuir a la construcción de viviendas de adobe sismorresistentes.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Evaluar el comportamiento sísmico de dos módulos de vivienda de adobe ensayados en el Laboratorio de Estructuras del Departamento de Ingeniería (LEDI), en los cuales se utilizó como refuerzo la geomalla Tensar BX4100 en el 100% de ambas caras de los muros y comprobar si su desempeño es satisfactorio desde el punto de vista sismorresistente, con miras a validar la técnica que se viene aplicando en la reconstrucción del área afectada por el sismo del 15 de Agosto del 2007,
- Evaluar la influencia en el comportamiento sísmico que existe al cambiar la orientación del módulo en la mesa vibradora de un grado de libertad, comparando el módulo orientado en dirección normal al movimiento y el módulo a 45°.

1.4. Metodología

Se construyeron entre agosto y octubre del 2008 dos módulos a escala natural de adobe reforzados externamente con la geomalla Tensor BX4100 que cubría la totalidad de los muros y posteriormente fueron ensayados en la mesa vibradora del Laboratorio de Estructuras de la PUCP. Los ensayos realizados en este proyecto fueron financiados íntegramente por el Rectorado de la PUCP.

Este proyecto de investigación comprendió las siguientes etapas:

1. Diseño de los módulos: Confección de los planos de diseño, detalle del corte y traslape de geomalla. Cálculo del metrado y presupuesto de los materiales que se van a utilizar.
2. Diseño del ensayo: Determinación de la señal y las fases del ensayo, así como la instrumentación para cada módulo.
3. Construcción de los módulos: Construcción de dos módulos, de igual dimensión y configuración, reforzados con el mismo tipo de geomalla.
4. Ensayo de los módulos: Ensayo de dos módulos en la mesa vibradora empleando una señal e incrementando el desplazamiento de la mesa en cada fase del ensayo.
5. Proceso de datos: Se determinaron, en cada uno de los módulos, las respuestas máximas, frecuencia, amortiguamiento y rigidez para cada fase. Se evaluó la contribución de la geomalla en la resistencia y rigidez del módulo. Además, se evaluó el comportamiento del módulo observando las grietas y daños ocurridos durante el ensayo.
6. Informe final: Se realizó un informe final en el cual se describieron los trabajos realizados, los datos obtenidos en cada ensayo, el análisis y discusión de resultados y conclusiones.

2. Características de los Materiales

Las características de los materiales requeridos para la construcción adecuada de una vivienda de adobe se establecen en la Norma Técnica de Edificación E.080 Adobe. Por lo tanto, los materiales utilizados en esta investigación deben seguir los mismos parámetros. A continuación se detallan los requerimientos establecidos y las características de los materiales utilizados en la construcción y refuerzo de los dos módulos de adobe.

2.1. Adobe

Los adobes utilizados para el asentado de los muros fueron de planta cuadrada. Se utilizaron medias unidades o unidades rectangulares en los extremos y en las esquinas de los muros para el amarre entre hiladas. Las dimensiones de las unidades completas de adobe fueron de 250mm x 250mm x 70mm de altura. Las medias unidades de adobe fueron de 125mm x 250mm x 70mm de altura. Cabe indicar que estas dimensiones difieren lo indicado en la cartilla, en la cual las dimensiones son de 400mm x 400mm x 100mm y 200mm x 400mm x 100mm para los unidades completas y medias unidades de adobe respectivamente. Esto se hizo con el propósito de no sobrepasar la capacidad portante de la mesa vibradora.

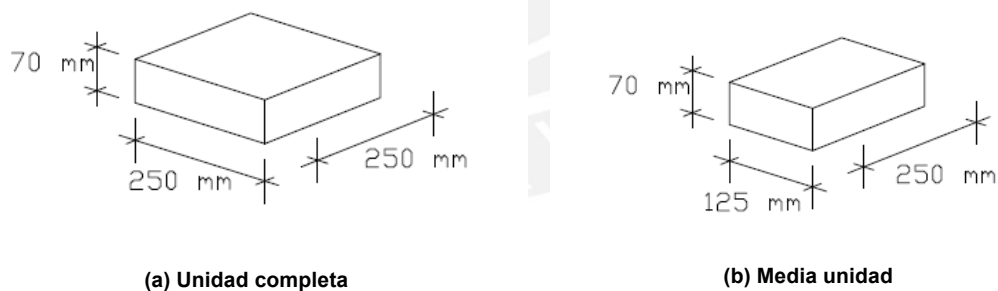


Figura 2.1. Dimensiones nominales de los adobes

El uso de paja en la mezcla para preparar adobes, en el mortero de asentado y en la torta de barro de los techos es común en el Perú. La paja reduce la contracción por secado de la mezcla y mejora la adherencia entre el adobe y el mortero. El tipo de paja puede variar según la disponibilidad en la zona y se recomienda utilizar la paja de arroz, de trigo, gras común, bagazo de caña, ichu o guano de ganado.

En la elaboración de los adobes se utilizó paja de césped del propio campus de la universidad y así poder controlar la propagación de fisuras y mejorar la estabilidad ante agentes externos de las unidades de adobe. Se cortó la paja en pedazos de 50mm aproximadamente.



Figura 2.2. Muestra de paja utilizada

Para la elaboración de los adobes se preparó una mezcla de suelo, arena gruesa y paja en una proporción de 5:1:1 en volumen, utilizando la mezcladora de eje vertical del laboratorio.



(a) Unidad completa



(b) Media unidad

Figura 2.3. Muestra de los adobes utilizados

2.2. Geomalla

La geomalla, o malla de polímero, fue el material utilizado como refuerzo de los muros de adobe. Dentro del rango de geomallas hay dos grandes tipos: Uniaxiales y Biaxiales. Las primeras se utilizan cuando la fuerza a resistir en tracción trabaja en una sola dirección y su dirección es conocida. Las geomallas biaxiales se utilizan

cuando la dirección de las fuerzas a resistir no es conocida o las fuerzas tienen varias direcciones y es justamente el caso en el reforzamiento de muros de adobe.

La geomalla se define como un material geosintético constituido por un conjunto de costillas paralelas conectadas, con aberturas de suficiente tamaño para permitir la trabazón del suelo, piedra, u otro material geotécnico con el que esté en contacto (Koerner, 2005). El uso de este material se da casi exclusivamente en aplicaciones geotécnicas como refuerzo de taludes, mejoramiento de la subrasante de vías y refuerzo de base de pavimentos. Por lo tanto, su uso ha sido ampliamente comprobado en diferentes obras de ingeniería, más no aún en viviendas de adobe. Actualmente, en el Perú, este material es importado exclusivamente y generalmente está disponible en rollos de 3 ó 4m de ancho y una longitud de 50 ó 75m.



Figura 2.4. Dimensiones de las aberturas de la geomalla Tensar BX4100



Figura 2.5. Rollo de geomalla Tensar BX4100

Dentro de las geomallas disponibles en el mercado local, la marca Tensar International Corporation (Tensar) es una de las más utilizadas y se encuentra en tres tipos: BX1100, BX1200 y BX4100. Las dos primeras han sido probadas en anteriores ensayos en la PUCP (Torrealva, 2005; Madueño, 2005; Blondet et al., 2006) y si bien han demostrado ser efectivas como refuerzo de estructuras de adobe, su costo es elevado si consideramos que las construcciones de adobe son en su mayoría de bajo costo y se realizan en zonas rurales.

Siguiendo los lineamientos de la cartilla, en la cual se busca contribuir a la reconstrucción de la zona afectada por el sismo de 2007, se decidió usar la geomalla Tensar BX4100 en el reforzamiento de los módulos, que es la más económica entre los tres tipos de geomalla disponibles, aunque es la de menor resistencia a la tracción. A continuación se compararán las características físicas y

económicas de las geomallas Tensar proporcionadas por Tecnología de Materiales S.A., representantes de esta marca en el Perú:

Tabla 2.1. Propiedades físicas de las geomallas biaxiales Tensar

| Propiedades | Unidades | BX1100 | | BX1200 | | BX4100 | |
|---|----------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| | | MD | XMD | MD | XMD | MD | XMD |
| Tamaño de abertura | mm | 25.00 | 33.00 | 25.00 | 33.00 | 33.00 | 33.00 |
| Espesor mínimo de la costilla | mm | 0.76 | 0.76 | 1.27 | 1.27 | 0.76 | 0.76 |
| Resistencia a la tracción al 2% de elongación | kN/m | 4.10 | 6.60 | 6.00 | 9.00 | 4.00 | 5.50 |
| Resistencia a la tracción al 5% de elongación | kN/m | 8.50 | 13.40 | 11.80 | 19.60 | 8.00 | 10.50 |
| Resistencia última a la tracción | kN/m | 12.40 | 19.00 | 19.20 | 28.80 | 12.80 | 13.50 |

- Las iniciales MD denotan la dirección principal de la geomalla (dirección de extrusión de la máquina) y XMD la dirección transversal
- Los valores mostrados son valores mínimo promedio o valores MARV (siglas en inglés de Minimum Average Roll Value), el cuál se calcula como el valor promedio menos dos veces la desviación estándar de un número de ensayos realizados en rollos seleccionados de un lote

Se puede observar en la Tabla 2.1 que la geomalla BX4100 tiene aberturas más grandes y costillas de menor espesor que las otras dos geomallas, por lo cual sus valores de resistencia a la tracción por metro de longitud son menores.

Tabla 2.2 Comparación económica y resistente de las geomallas biaxiales Tensar

| | Unidad | BX1100 | BX1200 | BX4100 |
|---|-------------------|--------|--------|--------|
| Costo por metro cuadrado | \$/m ² | 1.45 | 3.45 | 1.15 |
| Costo en porcentaje con respecto a la geomalla BX4100 | % | 126% | 300% | 100% |
| Resistencia última a la tracción (Dirección XMD) | kN/m | 19.00 | 28.80 | 13.50 |
| Resistencia en porcentaje con respecto a la geomalla BX4100 | % | 141% | 213% | 100% |

- Precios de venta, sin incluir IGV
- Material puesto en Lima por los representantes de Tensar en el Perú

Dentro de las geomallas Tensar disponibles en el mercado nacional, la geomalla BX4100 resulta ser la más económica. Las geomallas BX100 y BX1200 resultan ser 26% y 200% respectivamente, más caras que la geomalla BX4100.

2.2.1. Reglamentación para el Uso de Geomalla en Construcciones de Adobe

El uso de la geomalla como material de refuerzo en construcciones de adobe se reglamentó en el Anexo N°1: “Refuerzo de Geomalla en Edificaciones de Adobe” de la Norma E.080 Adobe. Los requisitos que debe cumplir este material son los siguientes:

1. Conformación de retícula rectangular o cuadrada, con abertura máxima de 50mm y nudos integrados.

2. Capacidad mínima de tracción de 3.5kN/m (350kgf/m), en ambas direcciones, para una elongación de 2%.
3. Flexibilidad y durabilidad para su uso como refuerzo embutido en estructuras de tierra.

Se verificó el cumplimiento de estos criterios en la geomalla seleccionada. El primer criterio se comprobó midiendo la abertura máxima en la geomalla con un vernier. La abertura en la dirección longitudinal del rollo fue de 33mm mientras que en la dirección transversal fue de 37mm, 4mm mayor a la abertura nominal de 33mm de las especificaciones técnicas.

Las especificaciones técnicas cumplían con el segundo criterio, sin embargo, se decidió realizar ensayos de tracción en muestras de geomalla para verificar los valores nominales y el comportamiento de la geomalla a esfuerzos de tracción. Los resultados se detallan en el Capítulo 2.2.2.

2.2.2. Ensayo de Control ASTM D6637

La geomalla fue sometida a ensayos de tracción unidireccional para comprobar la resistencia nominal especificada por el fabricante. Se procedió según el ensayo ASTM D6637 – “Standard test method for determining tensile properties of geogrids by the single or multi-rib tensile method”. Se ensayaron seis muestras, tres en el sentido longitudinal del rollo y tres en el sentido transversal al rollo. Las dimensiones de las muestras fueron de 180mm de ancho por 220mm de longitud.



Figura 2.6. Ensayo de tracción en la máquina universal

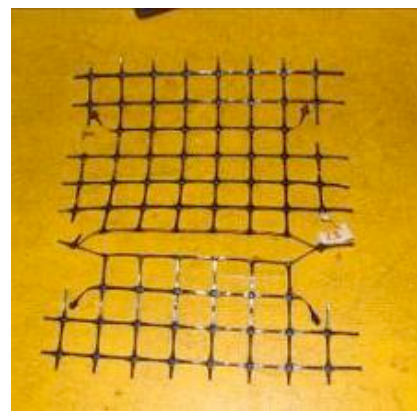


Figura 2.7. Muestra después del ensayo

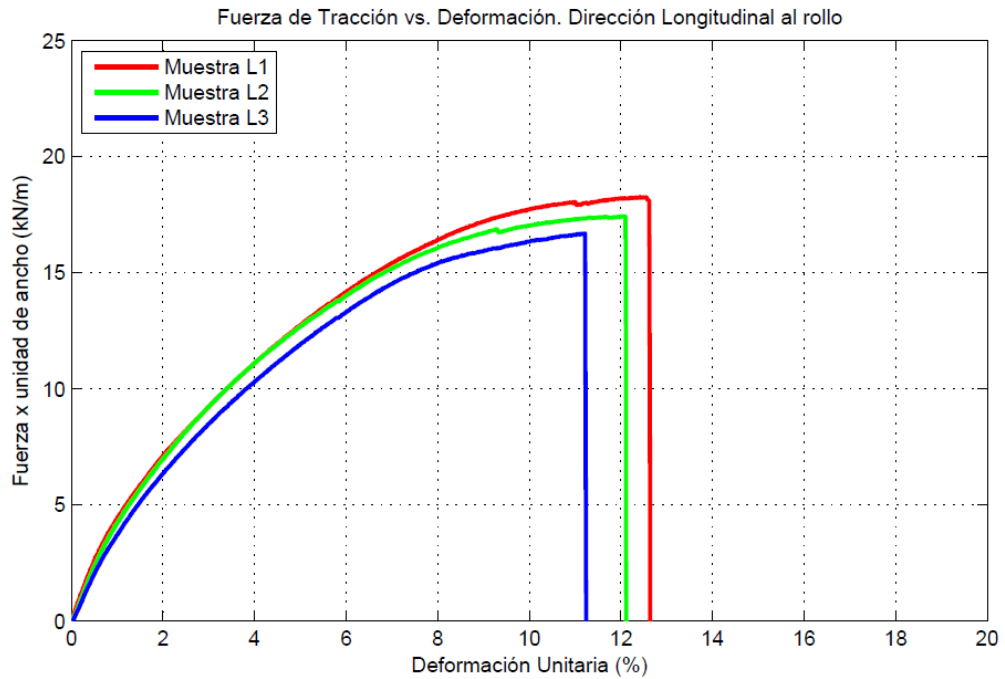


Figura 2.8. Gráfica Fuerza por unidad de ancho vs. Deformación unitaria en muestras ensayadas en la dirección longitudinal al rollo

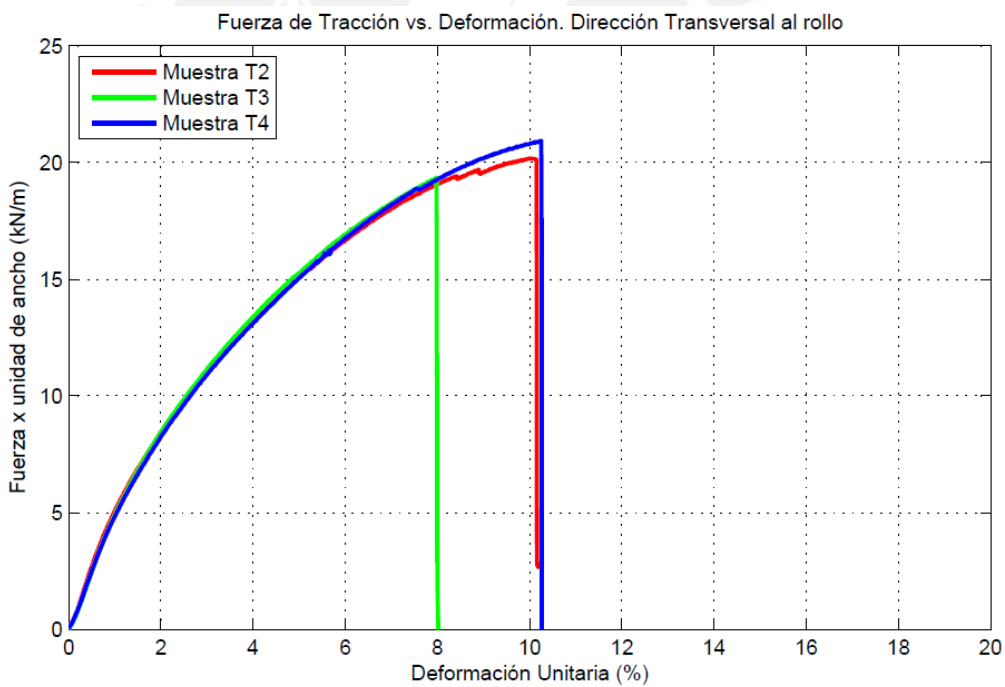


Figura 2.9. Gráfica Fuerza por unidad de ancho vs. Deformación unitaria en muestras ensayadas en la dirección transversal al rollo

Se puede observar en las Figuras 2.8 y 2.9 que la geomalla tiene un comportamiento elástico no lineal en ambas direcciones y una gran capacidad de deformación, llegando a valores del 8 al 13% de la longitud inicial de la muestra. Se observa también que en la dirección longitudinal al rollo la geomalla tiene mayor capacidad de deformación que en la dirección transversal, sin embargo, en esta

última dirección la resistencia a la tracción resulta mayor. Por lo tanto, la geomalla BX4100 es un material anisotrópico en las dos direcciones longitudinales.

Tabla 2.3. Comparación de las propiedades físicas de la geomalla BX4100 entre los resultados obtenidos y los proporcionados por el fabricante

| Propiedades | Unidad | Dirección principal (MD) | | | Dirección transversal (XMD) | | |
|--|--------|--------------------------|------------|-----------------------|-----------------------------|------------|-----------------------|
| | | Ensayo | Fabricante | Ensayo/ Fabricante | Ensayo | Fabricante | Ensayo/ Fabricante |
| Resistencia última a la tracción | kN/m | 15.9 | 12.8 | 124% | 18.6 | 13.5 | 138% |
| Resistencia a la tracción al 2% de elongación | kN/m | 6.0 | 4.0 | 150% | 6.9 | 5.5 | 125% |
| Resistencia a la tracción al 5% de elongación | kN/m | 11.5 | 8.0 | 144% | 14.5 | 10.5 | 138% |
| Módulo secante de tracción al 2% de elongación | kN/m | 300.0 | 220.0 | 136% | 345.0 | 300.0 | 115% |

- Las iniciales MD denotan la dirección principal de la geomalla (dirección de extrusión de la máquina) y XMD la dirección transversal
- Los valores mostrados son valores mínimo promedio o valores MARV (siglas en inglés de Minimum Average Roll Value), el cuál se calcula como el valor promedio menos dos veces la desviación estándar de un número de ensayos realizados en rollos seleccionados de un lote

Los resultados resumidos en la Tabla 2.3 mostraron que la geomalla resistió en ambas direcciones fuerzas del orden del 24 al 50% por encima de los valores proporcionados por el fabricante. Por lo tanto, los valores en las especificaciones técnicas son confiables y pueden ser usados para el diseño.

Es claro que los valores obtenidos de estos ensayos no pueden ser usados genéricamente para otras geomallas disponibles en el mercado sino para la geomalla Tensar BX4100 específicamente. Otro tipo de geomalla deberá ser ensayada para verificar sus características y resistencias o, en su defecto, solicitar al proveedor las especificaciones técnicas respectivas.

3. Diseño y Construcción de los Módulos

3.1. Características Físicas y Geométricas del Módulo

Los dos módulos construidos en esta investigación y el módulo no reforzado se diseñaron con las mismas dimensiones y configuración. Estos parámetros se definieron tomando como referencia investigaciones previas con el fin de comparar los resultados obtenidos. En este capítulo se hará referencia a los módulos como a un único módulo típico.

El módulo estaba conformado por cuatro muros de 3.25m de longitud, 0.25m de espesor y de alturas diferentes. El muro izquierdo y derecho tenían las mismas dimensiones y contaban con una ventana central. En el muro frontal se ubicaba la puerta mientras que el muro posterior no tenía abertura alguna. Este último tenía una altura mayor que el muro frontal, creando una inclinación en el techo de 8%.

A comparación de la cartilla, en donde la vivienda que se muestra es de 7.20m x 7.20m y cuenta con cuatro ambientes, en el laboratorio se ensayó únicamente el equivalente a un ambiente por las restricciones de tamaño y peso en la mesa vibradora. Sin embargo, la densidad de muros en el módulo y en la vivienda de la cartilla fue muy similar. Para la dirección paralela al muro izquierdo y derecho, la densidad de muros fue 0.15m^2 de muros por m^2 área en planta en ambos casos. En la dirección paralela a los muros frontal y posterior, la densidad de muros fue $0.10\text{m}^2/\text{m}^2$ en el módulo y $0.09\text{m}^2/\text{m}^2$ en la vivienda.

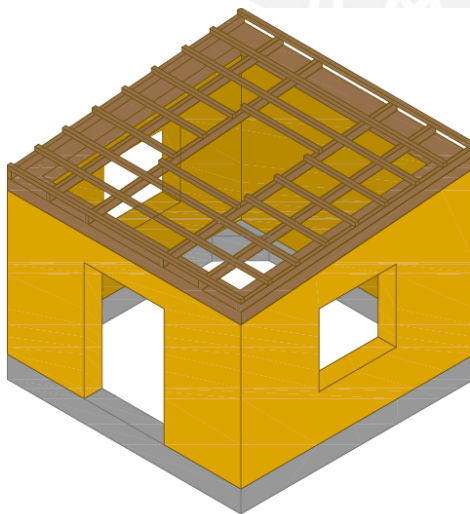


Figura 3.1. Vista isométrica del módulo

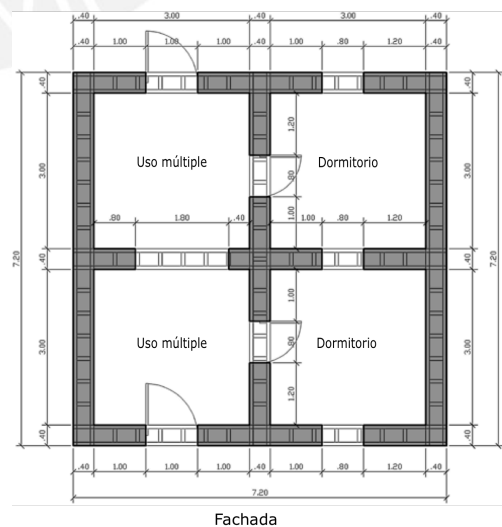


Figura 3.2. Vista en planta de la vivienda de la cartilla

El módulo se construyó sobre un anillo cuadrado de cimentación de concreto armado de 3.25m de lado, sección cuadrada de 0.3m x 0.3m, que representaba la cimentación rígida de una vivienda típica. Además, sirvió para anclar el módulo a la mesa vibradora y como soporte durante el transporte desde la zona de construcción hacia la plataforma de ensayo.

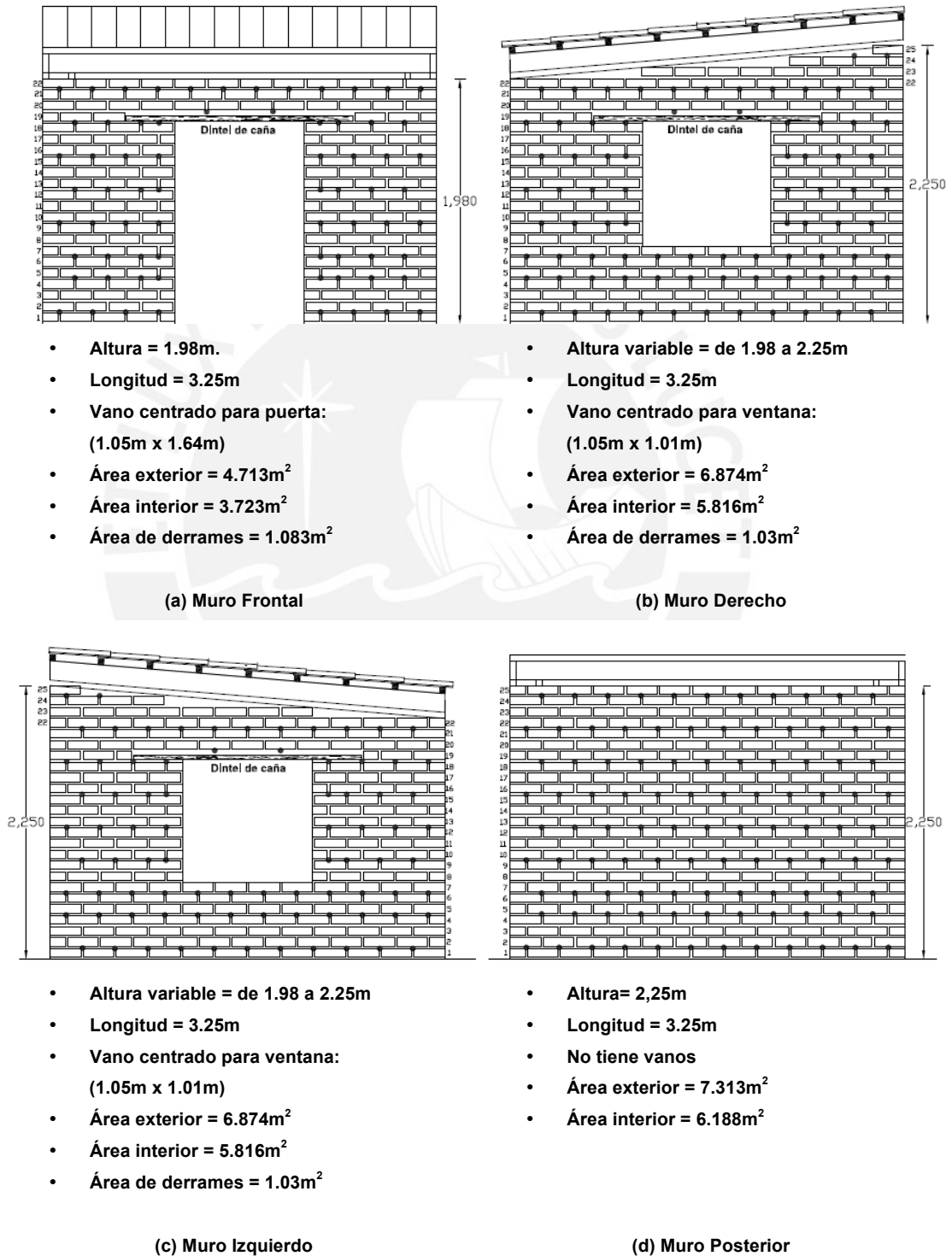


Figura 3.3. Elevación frontal de los muros

Las juntas horizontales y verticales entre adobes fueron de 20mm. Cada una de las hiladas era de 90mm de altura, 70mm correspondientes a la unidad de adobe y 20mm al mortero. La cantidad de adobes utilizados en el módulo fue de 761 unidades y 144 medias unidades. A continuación se detalla el metrado de adobes del módulo típico:

Tabla 3.1. Metrado de adobes en módulo típico

| Descripción de hiladas | N° de hiladas | Adobes 250x250x70 mm | | Adobes 125x250x70 mm | |
|------------------------|---------------|----------------------|------------|----------------------|------------|
| | | N° x hilada | Parcial | N° x hilada | Parcial |
| Impares | 5 | 37 | 185 | 6 | 30 |
| Pares | 5 | 38 | 190 | 4 | 20 |
| Impares Ventana | 5 | 29 | 145 | 6 | 30 |
| Pares Ventana | 6 | 28 | 168 | 8 | 48 |
| Impar Dintel | 1 | 21 | 21 | 10 | 10 |
| Hilada 23 | 1 | 25 | 25 | 2 | 2 |
| Hilada 24 | 1 | 16 | 16 | 2 | 2 |
| Hilada 25 | 1 | 11 | 11 | 2 | 2 |
| Total | 25 | | 761 | | 144 |

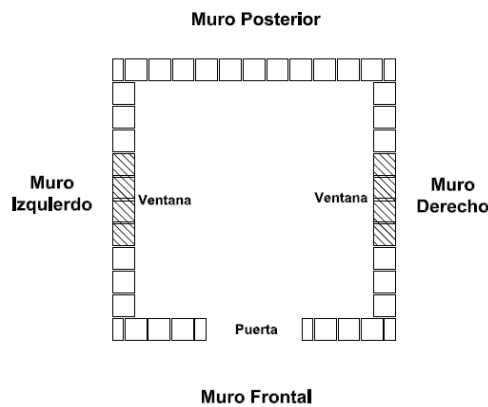


Figura 3.4. Hilada impar

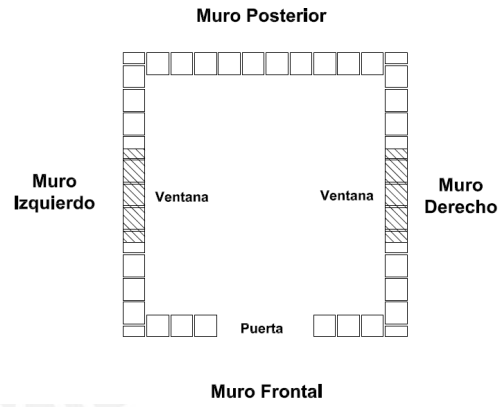


Figura 3.5. Hilada par

Para los dinteles de la puerta y ventanas se utilizó una viga compuesta de cañas. El objetivo de utilizar estos dinteles “flexibles” fue reducir la generación de grietas que ocurren en la unión del muro y el dintel durante un movimiento sísmico al ser el dintel de un material distinto al del adobe.

Se colocó una viga collar de madera en la parte superior de los muros que permitiera una transferencia de esfuerzos y se comporte como un arriostre horizontal que impida el libre desplazamiento de los muros durante un movimiento sísmico. La viga collar estaba conformada por largueros y travesaños de madera de 2” x 6” de sección.

En la cartilla, la viga collar sirve también de dintel ya que se coloca sobre los vanos en toda la vivienda. Sin embargo, se decidió seguir con la misma configuración con la cuál se había ensayado el módulo no reforzado para poder comparar los resultados posteriormente.

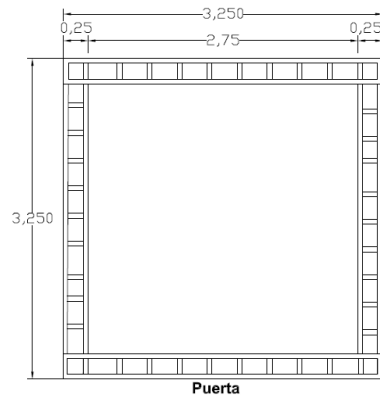


Figura 3.6. Vista en planta de la viga collar

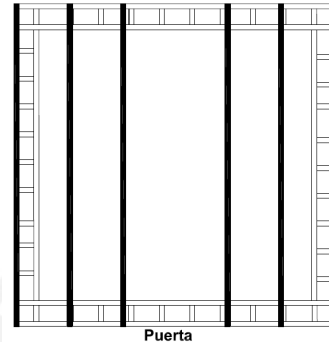


Figura 3.7. Vista en planta de las vigas de techo

Sobre la viga collar que amarraba todos los muros se colocó el techo. Este consistía de seis vigas de madera de 2" x 4" en la dirección muro frontal-muro posterior. Sobre estas vigas se colocó perpendicularmente nueve listones de madera de 2" x 2". Se dejó una abertura en la zona central del techo de 1m² aproximadamente para que las correas de la grúa pasen a través de ésta y se enganchen en el anillo de cimentación durante el traslado del módulo. Se decidió no colocar tejas ni otro material sobre el techo ya que el peso real del módulo sobrepasó los cálculos teóricos y podía exceder el límite del peso máximo de la mesa, como se detalla más adelante. No obstante, durante un movimiento sísmico, el peso de la cobertura del techo y la torta de barro que tradicionalmente se colocan en una vivienda de adobe como la mostrada en la cartilla es considerable y puede influir en el comportamiento de la estructura.

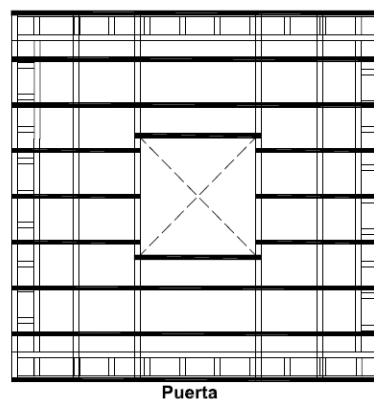


Figura 3.8. Vista en planta de los listones de techo

Para calcular el peso teórico del módulo típico se consideró los pesos unitarios de los materiales utilizados según la Norma E.020 Cargas:

Peso unitario del adobe: 16kN/m^3

Peso unitario de la madera (Tipo B): 10kN/m^3

Además, se consideró el peso unitario del mortero de barro y del tarrajeo igual al del adobe.

Tabla 3.2. Peso teórico del módulo típico

| Descripción | Área (m ²) | Ancho/Largo (m) | N° PU | (kN/m ³) | Parcial (kN) |
|---|------------------------|-----------------|-------|----------------------|--------------|
| Muro frontal | 4.713 | 0.25 | 1 | 16 | 18.85 |
| Muro derecho/izquierdo | 5.816 | 0.25 | 2 | 16 | 46.53 |
| Muro posterior | 7.313 | 0.25 | 1 | 16 | 29.25 |
| Tarrajeo exterior | 25.774 | 0.03 | 1 | 16 | 12.37 |
| Tarrajeo interior | 21.543 | 0.03 | 1 | 16 | 10.34 |
| Tarrajeo derrames | 3.143 | 0.03 | 1 | 16 | 1.51 |
| Vigas 2"x4" | 0.005 | 3.25 | 6 | 10 | 0.98 |
| Listones 2"x2" | 0.003 | 3.25 | 9 | 10 | 0.73 |
| Largueros 3.25m | 0.008 | 3.25 | 4 | 10 | 0.98 |
| Largueros 2.75m | 0.008 | 2.75 | 4 | 10 | 0.83 |
| Travesaños 0.15m | 0.008 | 0.15 | 42 | 10 | 0.47 |
| Peso total del módulo con tarrajeo | | | | | 123kN |
| Peso total del módulo sin tarrajeo | | | | | 99kN |

El peso total teórico del módulo con tarrajeo calculado fue 123kN, mientras que el peso total teórico del módulo sin tarrajeo fue 99kN. Estos pesos no incluyen los materiales de refuerzo.

3.2. Características del Refuerzo con Geomalla

La geomalla se cortó en ocho paños que se colocaron en cada una de las caras del módulo. Además, se utilizaron cuatro paños de geomalla para envolver el anillo de cimentación en cada uno de los muros y que sirvieron de anclaje a la geomalla de refuerzo de los muros. A continuación se detalla el metrado de geomalla:

Tabla 3.3. Metrado de geomalla de cimentación en módulo típico

| Ubicación de malla | Ancho (m) | Largo (m) | N° de mallas | Área (m ²) |
|--------------------|-----------|-----------|--------------|------------------------|
| Muro Frontal | 1.50 | 3.25 | 1 | 4.88 |
| Muro Posterior | 1.50 | 3.25 | 1 | 4.88 |
| Muro Izquierdo | 1.50 | 3.25 | 1 | 4.88 |
| Muro Derecho | 1.50 | 3.25 | 1 | 4.88 |
| Total | | | 4 | 19.52 |

Tabla 3.4. Metrado de geomalla en refuerzo de muros en módulo típico

| Malla | Ubicación | Ancho (m) | Largo (m) | N° de mallas | Área (m ²) |
|--------------|---------------------------------|-----------|-----------|--------------|------------------------|
| M1 | Muro frontal exterior | 4.05 | 2.30 | 1 | 9.32 |
| M2 | Muro frontal interior | 3.55 | 2.30 | 1 | 8.17 |
| M3 | Muro izquierdo/derecho exterior | 4.05 | 2.55 | 2 | 20.66 |
| M4 | Muro izquierdo/derecho interior | 3.55 | 2.55 | 2 | 18.11 |
| M5 | Muro posterior exterior | 4.05 | 2.55 | 1 | 10.33 |
| M6 | Muro posterior interior | 3.55 | 2.55 | 1 | 9.05 |
| Total | | | | 8 | 75.62 |

Se usaron 19.52m² de geomalla para la cimentación y 75.62m² de geomalla para el reforzamiento de los muros. En total se utilizó 95.14m² de geomalla por módulo, incluyendo traslapes. Dado que el costo por m² de la geomalla BX4100 fue \$1.15, el costo total de geomalla utilizada fue \$109.4 por módulo.

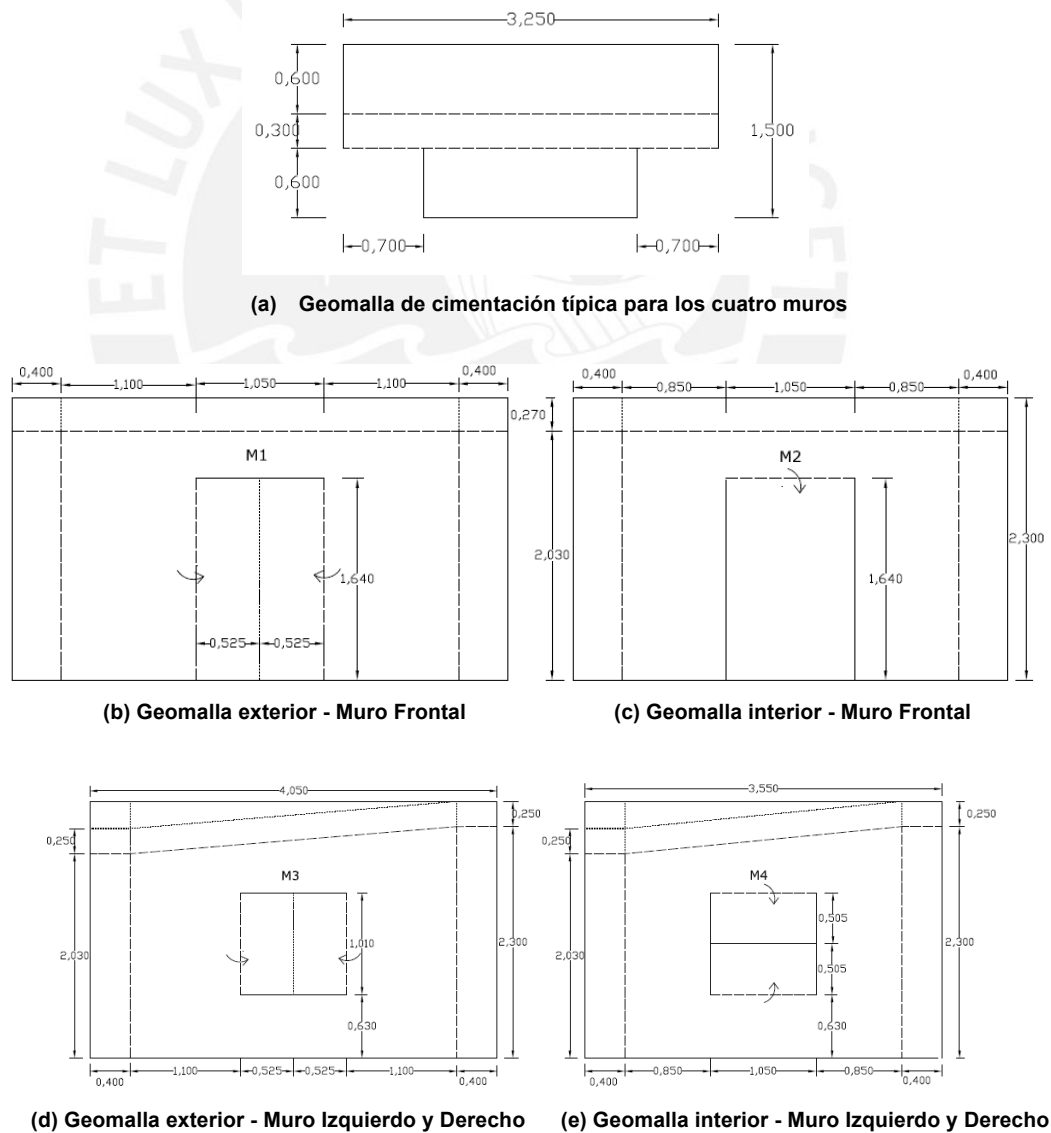
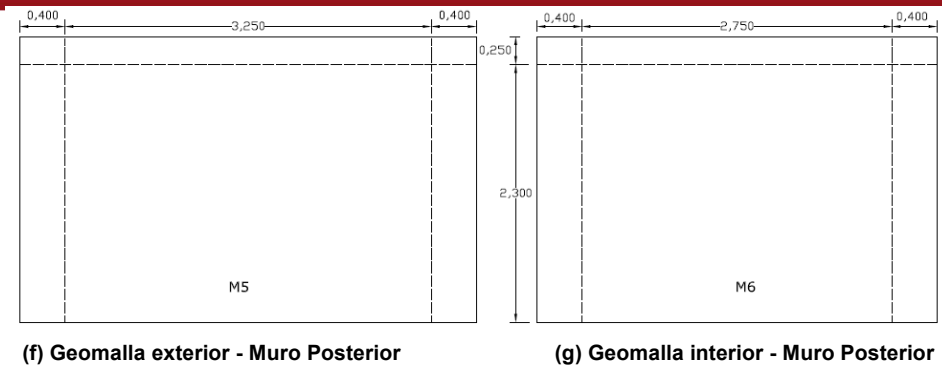


Figura 3.9. Paños de geomalla



Leyenda: Doblado - - - - - Corte _____

Figura 3.9. Paños de geomalla (Continuación)

Para sujetar la geomalla de refuerzo a los muros se utilizó rafia. La rafia es un material plástico de fibras de polipropileno utilizado comercialmente para embalaje y amarre de objetos. Se denominó “punto de rafia” a cada lugar donde se ubicó la rafia colocada durante el asentado de los adobes y que serviría luego para sujetar la geomalla al muro. Cada uno de estos puntos de rafia constaba de 4 tiras de rafia de 0.6m de longitud. Se distribuyeron a lo largo de los muros espaciados cada 0.25m horizontalmente y cada 3 hiladas de separación verticalmente.

En el muro frontal se colocaron 70 puntos de rafia, en el muro derecho e izquierdo se colocaron 82 en cada uno y en el muro posterior 103, que hicieron un total de 337 puntos de rafia. La longitud total de rafia utilizada fue 808.8m.

El costo de la rafia fue \$3.54/kg y se calculó el peso por unidad de longitud de la rafia en 0.91gr/m, que dio un costo total en rafia utilizada de \$2.6 por módulo. El costo total del reforzamiento por módulo, considerando geomalla y rafia, fue \$112.0 y, por lo tanto, el costo del reforzamiento por m² de área en planta fue \$10.6/m².

3.3. Verificaciones del Módulo según la Norma E.080 Adobe

La norma E.080 Adobe especifica ciertos requisitos que una construcción sismorresistente de adobe debe cumplir. Los módulos construidos estuvieron sujetos a estos requisitos ya que fueron construidos a escala natural. A continuación se detallan las verificaciones concernientes a las dimensiones y esbeltez de los muros que especifica la norma E.080 Adobe.

El espesor de los muros se determinará en función de la altura de los mismos y de acuerdo a la esbeltez de los muros se exige un mínimo tipo de refuerzo.

Tabla 3.5. Refuerzo mínimo en función de las dimensiones del muro según Norma E.080 Adobe

| Esbeltez | Arriostres y Refuerzos Obligatorios | Espesor Mín. | Altura Máx. |
|-------------------------|---|--------------|-------------|
| | | Muro (m) | Muro (m) |
| $\lambda \leq 6$ | Solera | 0.4 - 0.5 | 2.4 - 3.0 |
| $6 \leq \lambda \leq 8$ | Solera + elementos de refuerzo horizontal y vertical en los encuentros de muros | 0.3 - 0.5 | 2.4 - 4.0 |
| $8 \leq \lambda \leq 9$ | Solera + elementos de refuerzo horizontal y vertical en toda la longitud de los muros | 0.3 - 0.5 | 2.7 - 4.5 |

- En casos especiales λ podrá ser mayor de 9 pero menor de 12, siempre y cuando se respalde con un estudio técnico que considere refuerzos que garanticen la estabilidad de la estructura.

Con la mayor altura de 2.25m del muro posterior, la mayor esbeltez en el módulo fue 9. Un muro con esta esbeltez le corresponde un reforzamiento mínimo de una solera como arriostre horizontal, elementos continuos de refuerzo horizontal y vertical en toda su longitud (Tabla 3.5), lo cual se logró con la viga collar de madera y la geomalla de refuerzo en los muros. Sin embargo, el espesor mínimo permitido es 0.30m lo cual no se llegó a cumplir en el módulo que tuvo un espesor de muros de 0.25m. La reducción de estos 0.05m se debió a la limitación en el peso que puede cargar la grúa al transportar el módulo desde la zona de construcción hacia la zona de ensayo.

Por otro lado, cuando se utilizan columnas y vigas de concreto armado como refuerzo en construcciones de adobe, la norma permite utilizar unidades de hasta 0.20m de espesor.

En la Tabla 3.6 se describen las demás verificaciones de las dimensiones del módulo y se observa que éste cumplió con cada una de ellas.

Tabla 3.6. Verificación del Módulo según la Norma E.080 Adobe

| Verificación | Norma E.080 Adobe | | Módulo | Cumple |
|---|---------------------|---------------------------|--------|--------|
| | Fórmula | Aplicada al módulo | | |
| Elemento de Arriostre | $c \geq 3e$ | Mínimo 0.75m | 3.00m | Sí |
| Longitud del muro entre arriostres verticales | $L \leq 12e$ | Máximo 3.00m | 2.75m | Sí |
| Ancho de vanos | $a \leq L/3$ | Máximo 1.08m | 1.05m | Sí |
| Borde Libre | $3e \leq b \leq 5e$ | $0.75m \leq b \leq 1.25m$ | 0.85m | Sí |

Donde:

a: Ancho de vanos

b: Longitud del borde libre

c: Base del elemento de arriostre

e: Espesor del muro

L: Longitud del muro entre arriostres

3.4. Procedimiento Constructivo

El procedimiento seguido en la construcción de los módulos M100-T4100 y M100-T4100D fue el mismo, por lo que en este capítulo se describirá un único procedimiento constructivo basado en lo especificado en la cartilla “Construcción de Casas Saludables y Sismorresistentes de Adobe Reforzado con Geomallas” (Vargas et al, 2007).

A diferencia de la construcción de una vivienda típica de adobe en donde se construye un cimiento y sobrecimiento de concreto o pirca, el módulo se construyó sobre un anillo de cimentación de concreto armado por las condiciones del ensayo. Este anillo de cimentación ya se encontraba construido y se reutiliza para los diferentes ensayos que se realizan en el laboratorio, por lo que se tuvo que idear una manera de simular el procedimiento de colocar el refuerzo de geomalla en la cimentación como se indica la cartilla. En ésta se señala que la geomalla de cimentación debe quedar embutida a 0.10m por debajo del borde superior del sobrecimiento y para simular esta situación en el módulo, se decidió que la geomalla de cimentación pase por debajo del anillo de cimentación, envolviéndolo en forma de “U”. Luego se fijó la geomalla al anillo colocando una platina de acero a 0.10m por debajo del borde superior del anillo y sujeta con pernos. Se tuvo cuidado en dejar la misma longitud de geomalla que sobresalió a cada lado del muro, aproximadamente 0.30m por encima del anillo.

Si bien con esta solución el anclaje de la geomalla de cimentación fue más seguro que el mencionado en la cartilla, fue la solución más conveniente considerando las condiciones del ensayo.

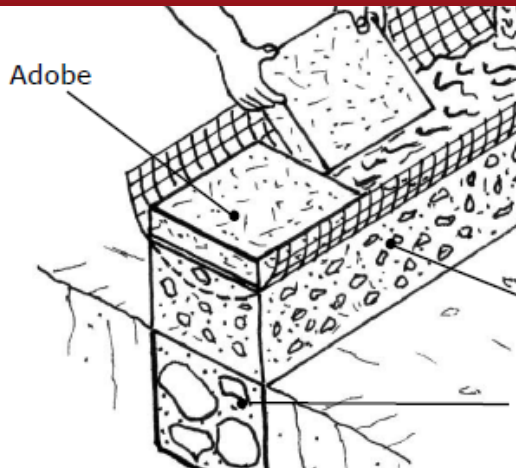


Figura 3.10. Geomalla de cimentación según la cartilla (Fuente: Vargas et al, 2007)



Figura 3.11. Fijación de la geomalla de cimentación en el módulo

Antes de realizar el asentado de adobes, se definió in situ la plantilla de la hilada par e impar. Luego, se procedió a elaborar el mortero de asentado utilizando para ello una mezcladora de eje vertical. La proporción en volumen de suelo, paja y arena gruesa en la mezcla fue 3:1:1. La paja se cortó en longitudes no mayores a 50mm. Los adobes se humedecieron con agua antes de realizar el asentado.



Figura 3.12. Emplantillado de adobes



Figura 3.13. Preparación del mortero de barro

Se colocaron los puntos de rafia durante el asentado para unir la geomalla de refuerzo a los muros de adobe en sus dos caras. Cada punto de rafia constó de cuatro cintas de rafia de 0.6m de longitud que sobresalían mínimo 0.15m a cada lado del muro. En la cartilla, se especifica que los puntos de rafia se deben colocar cada 0.30m horizontalmente y la separación vertical debe ser cada tres hiladas como máximo. Además deben colocarse en la hilada inmediatamente inferior a la parte baja de las ventanas y a los dos lados de cada vano a 0.10m de distancia.

En el módulo, la rafia se empezó a colocar luego de la primera hilada y se siguieron los pasos especificados en la cartilla, con la salvedad que la separación horizontal fue 0.25m ya que este espaciamento facilitaba su colocación al utilizar como referencia la dimensión de los adobes.

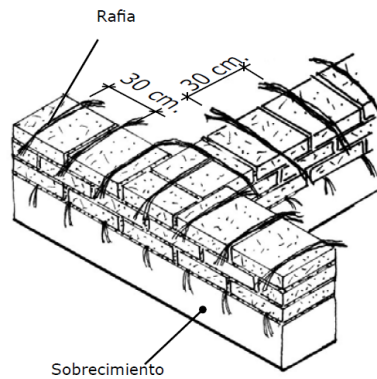


Figura 3.14. Distribución horizontal de rafia
(Fuente: Vargas et al, 2007)



Figura 3.15. Colocación de rafia

Para los dinteles se utilizaron cañas, las cuales se cortaron a una longitud de 1.85m colocadas en tres capas y amarradas con alambre #16. Previamente se seleccionaron las cañas más uniformes y se pelaron con un machete.



Figura 3.16 Asentado de adobes



Figura 3.17 Dintel de caña

La viga collar de madera se ensambló íntegramente en el piso y luego utilizando la grúa se colocó sobre el módulo. Se rellenó con mortero de barro los orificios entre los largueros y travesaños de la viga collar.



Figura 3.18. Muros del módulo terminados



Figura 3.19. Colocación de barro en la viga collar
(Fuente: Vargas et al, 2007)



Figura 3.20. Embarrado de la viga collar



Figura 3.21. Colocación y amarre del paño de geomalla

Se cortaron ocho paños de geomalla correspondientes a cada una de las caras de los cuatro muros. Luego de colocar el paño sobre la cara del muro, se pasó las tiras de rafia dejadas en el muro a través de las aberturas de la geomalla y se hizo un doble nudo, adosando firmemente el refuerzo al muro. Esta tarea se debió realizar por al menos dos personas, ya que mientras una amarraba los puntos de rafia la otra debía sujetar la geomalla.



Figura 3.22. Amarre de traslapes de geomalla



Figura 3.23. Amarre y traslape de la geomalla de refuerzo con la geomalla de cimentación

En la parte superior, las geomallas verticales de caras opuestas se amarraron con rafia y se clavaron a la viga collar. Después de fijar adecuadamente la geomalla, se colocó el techo. El techo se ensambló íntegramente en el piso y con la ayuda de la grúa se colocó sobre la viga collar previamente fijada sobre los muros.



Figura 3.24. Fijación de la geomalla sobre la viga collar



Figura 3.25. Colocación del techo

Todos los traslapes entre las geomallas de refuerzo de los muros fueron de 0.4m y los traslapes entre la geomalla de cimentación y la geomalla de refuerzo de los muros fueron de 0.3m y se amarraron con los puntos de rafia colocados durante el asentado. Posteriormente, se cortó el excedente de los nudos de rafia para dejar la superficie del muro lista para el tarrajeo y se utilizaron grapas y clavos en los lugares donde la geomalla no se adhirió bien al muro.

El acabado de los muros se realizó en dos capas. Se colocó una primera capa de tarrajeo de barro de 10mm de espesor en una proporción de mezcla de 3:2:1 (tierra: paja: arena gruesa) y dejando la superficie rugosa. Esta capa debía colocarse manualmente, haciendo bolas de barro y presionándolas fuertemente al muro para que se adhiriera adecuadamente. Luego, se colocó una segunda capa de tarrajeo de 15mm de la misma mezcla. Antes de colocar cada una de las capas de tarrajeo se debió limpiar la superficie del muro y humedecerla con agua.



Figura 3.26 Primera capa de tarrajeo



Figura 3.27 Segunda capa de tarrajeo

Por último, luego que la segunda capa del tarrajeo secó completamente, se sellaron las fisuras producidas por la contracción de fragua utilizando una mezcla fluida de proporción en volumen de 1:1 (tierra: arena fina). Esta mezcla se aplicó sobre la superficie de los muros pasando una brocha en forma perpendicular a las fisuras. Finalmente, se dejó secando el módulo hasta la fecha del ensayo.



Figura 3.28. Sello de fisuras con brocha



Figura 3.29. Módulo finalizado

La construcción del módulo M100-T4100 empezó el 4 de agosto de 2008 y culminó el 21 del mismo mes, en un total de 18 días.

El módulo M100-T4100D se empezó a construir el 25 de agosto y culminó el 6 de octubre de 2008, en un total de 43 días. La construcción de este módulo demoró más debido a que no se contó con el personal necesario durante buena parte de ese periodo.

4. Diseño del Ensayo

4.1. Introducción

El Laboratorio de Estructuras Antisísmicas “Cristóbal de Losada y Puga” de la PUCP cuenta con una mesa vibradora de simulación sísmica unidireccional que permite ensayar dinámicamente módulos de adobe de un piso a escala natural. Los ensayos dinámicos nos dan información representativa del comportamiento real de las estructuras de adobe frente a eventos sísmicos. Esta afirmación es particularmente válida en el caso del adobe, debido a que sus características de fragilidad y baja resistencia complican el diseño y la ejecución de ensayos estáticos (*Blondet et al, 2006*).

4.2. Características del Ensayo

4.2.1. Características de la Mesa Vibradora

La mesa vibradora se puede desplazar en una sola dirección horizontal con una amplitud máxima de 150mm y una aceleración máxima aproximada de 1.6g. La mesa pesa en total 176.58kN (18 000kgf) y la plataforma de ensayo tiene un área de 4.4m x 4.4m. El peso máximo que puede colocarse en la plataforma de la mesa vibradora está limitado por el peso máximo que puede cargar la grúa, es decir 160kN.

4.2.2. Señal Sísmica y Fases del Ensayo

La señal de comando utilizada en los ensayos fue derivada del registro de aceleraciones del terremoto del 31 de Mayo de 1970 en la dirección de la componente N82E. Este registro fue captado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP) en la ciudad de Lima.

La parte de mayor magnitud del registro de aceleraciones se filtró y se integró numéricamente de acuerdo a las especificaciones del sistema de control del simulador. Se obtuvo así una señal de desplazamientos donde el desplazamiento máximo de esta señal de comando se normalizó a la unidad. El ensayo constó de tres fases y el parámetro de control fue el desplazamiento máximo en la plataforma

de la mesa vibradora. La amplitud deseada se obtuvo amplificando la señal de comando y así incrementando los desplazamientos en cada fase. En la primera fase, la amplitud máxima de la señal de comando se amplificó a 30mm, en la segunda a 80mm y en la tercera a 130mm.

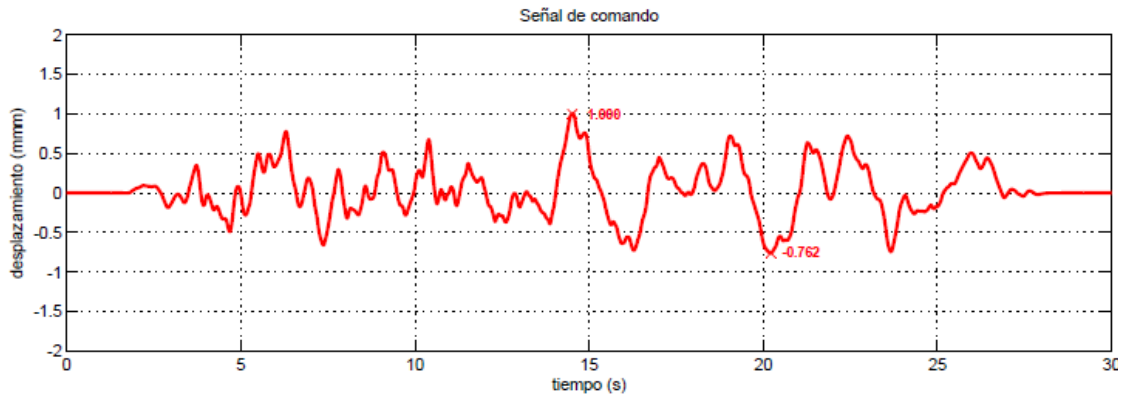


Figura 4.1. Señal de comando

Durante la ejecución del ensayo se registró la respuesta del simulador ante la señal de comando utilizada. Se registraron los desplazamientos y aceleraciones en la plataforma de la mesa vibradora.

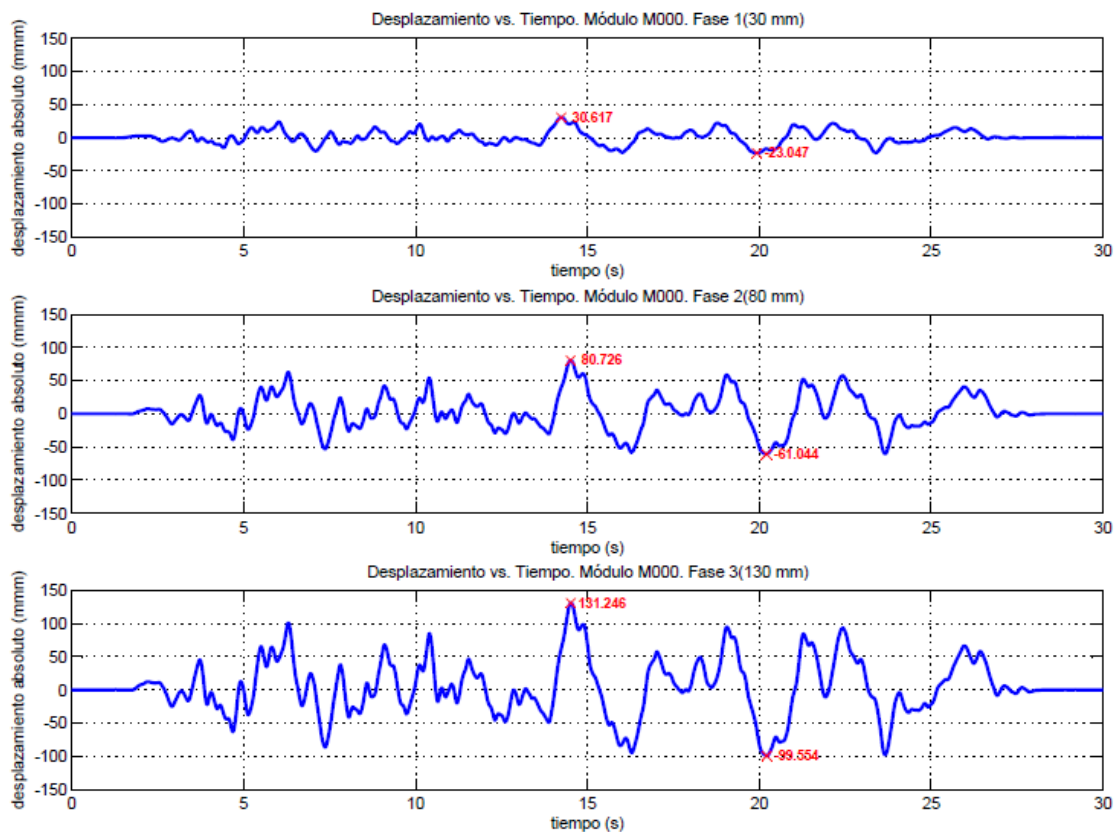


Figura 4.2. Desplazamiento de la plataforma de la mesa en cada fase - Módulo no reforzado (M000)

La respuesta del simulador fue bastante precisa al registrar valores muy cercanos a la señal de comando. A pesar de que no hubo un control sobre las aceleraciones, se pudo hallar una correlación entre los desplazamientos y las aceleraciones máximas en la mesa. Para las tres fases con amplitud máxima de 30mm, 80mm y 130mm se registraron aceleraciones máximas aproximadas de 0.3g, 0.8g y 1.3g respectivamente en la mesa vibradora. Un factor de correlación aproximado entre desplazamientos y aceleraciones máximas podrá ser entonces de 0.01g/mm.

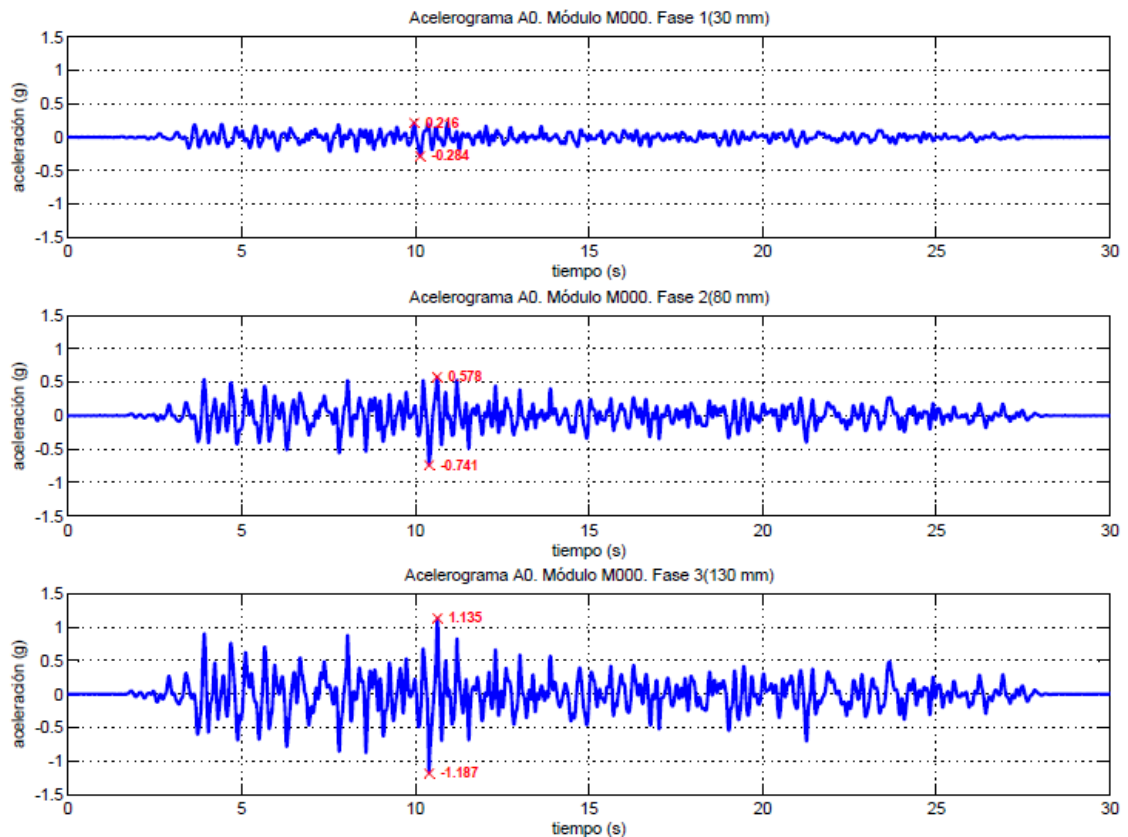


Figura 4.3. Acelerogramas de las tres fases registradas en la plataforma de la mesa - Módulo no reforzado (M000)

En las Figuras 4.4 y 4.5 se muestran los espectros de respuesta elástica para la señal de la Fase 3 (aceleración máxima en la mesa vibradora de 1.3g) para estructuras con un coeficiente de amortiguamiento del 5 y 10%.

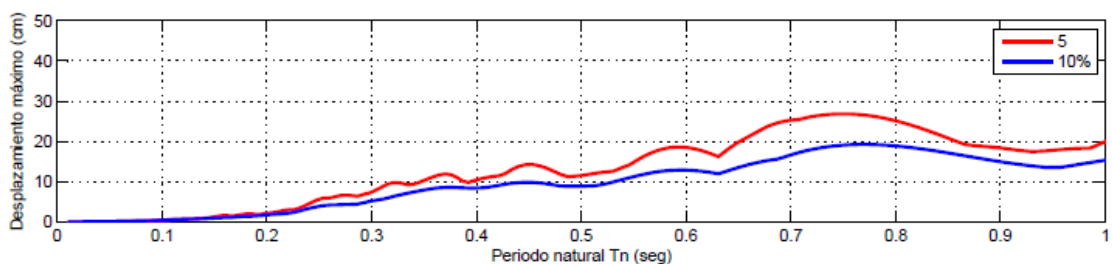


Figura 4.4 Espectro de desplazamientos relativos para la señal de la Fase 3

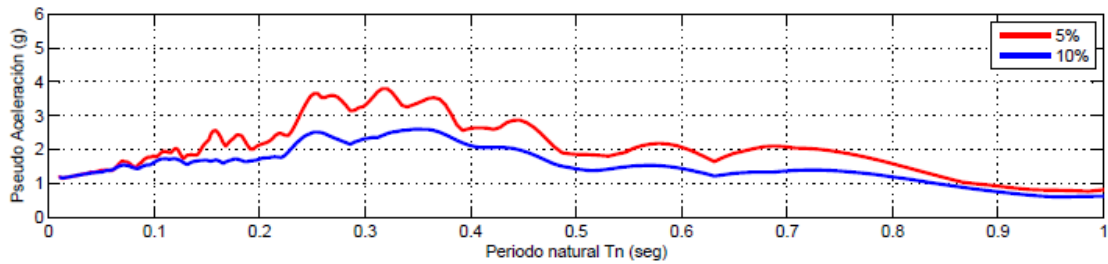


Figura 4.5 Espectro de pseudo aceleraciones para la señal de la Fase 3

La energía aplicada al módulo es de especial interés. En un sismo real se pueden producir movimientos en el suelo en hasta 6 direcciones (3 traslacionales y 3 rotacionales). Durante el terremoto de Pisco, el cual produjo el colapso de muchas viviendas de adobe, la aceleración máxima registrada en una componente horizontal fue 0.5g en la estación de Parcona, Ica (*IGP*) sobre suelo blando, menos de la mitad de la aceleración máxima en la mesa vibradora en la Fase 3 del ensayo (i.e. 1.3g). Por lo tanto, una vivienda típica de adobe suele colapsar ante aceleraciones mucho menores a las que se producen durante la Fase 3. Sin embargo, en los numerosos ensayos dinámicos realizados en la mesa vibradora - donde se han sometido varios módulos típicos de adobe no reforzado a un movimiento en una sola dirección traslacional - se ha observado que esto no se cumple.

Es evidente entonces que la energía aplicada al módulo, por ejemplo, durante un ensayo en la mesa vibradora con una aceleración unidireccional máxima de 0.3g no es la misma que una vivienda experimenta durante un sismo real con una aceleración máxima de 0.3g en alguna componente horizontal. Sin embargo, también es evidente que hay varios factores que influyen durante un ensayo en la mesa vibradora como son la diferencia en peso de la estructura y el techo, la longitud entre arriostres, la mano de obra utilizada y el procedimiento constructivo empleado en un módulo en comparación a una vivienda real.

No existe aún un estudio que determine la correlación entre la señal de un ensayo dinámico unidireccional en la mesa vibradora de la PUCP con un sismo real. No obstante, por los daños observados en los módulos durante muchos ensayos dinámicos, se suele denominar a la señal aplicada durante la Fase 1 (30mm), Fase 2 (80mm) y Fase 3 (130mm) como la de un sismo leve, moderado y severo, respectivamente.

Antes de cada una de las tres fases y al finalizar el ensayo se realizaron vibraciones libres. Estas consistieron en un movimiento tipo pulso rectangular para registrar la vibración libre del módulo y así poder obtener el periodo y el coeficiente de amortiguamiento en cada instrumento. Cada vibración libre se basó en cuatro pulsos con una amplitud de 1.5mm.

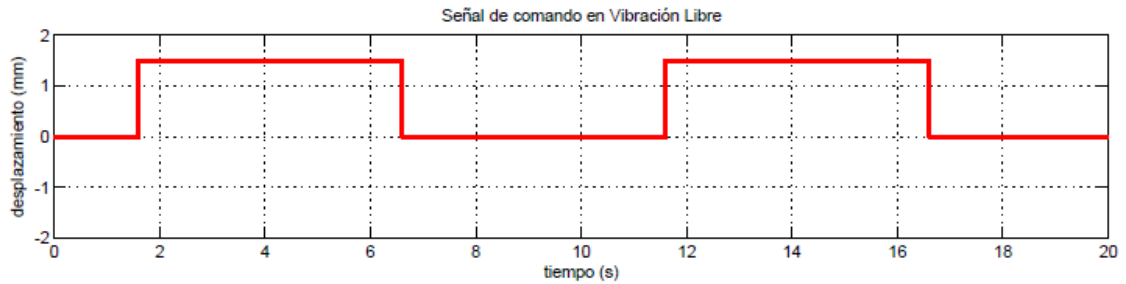


Figura 4.6. Señal de comando de vibración libre

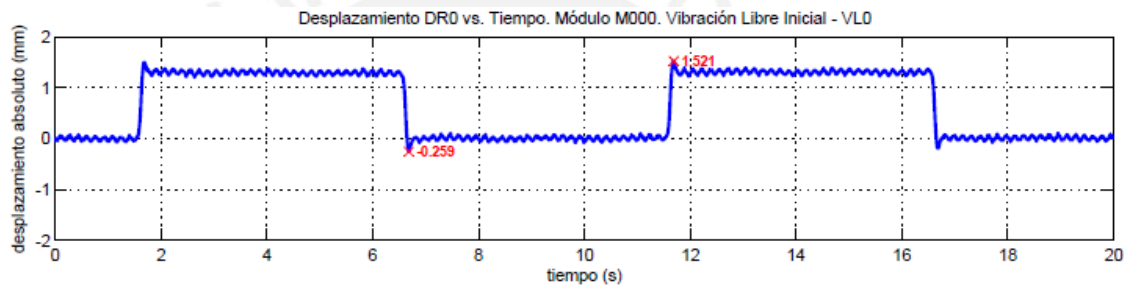


Figura 4.7. Señal registrada en la mesa durante la vibración libre – Módulo M000

Los desplazamientos registrados en la mesa mostraron oscilaciones no deseadas entre pulsos (Figura 4.7.), lo cual indica que hubo distorsiones en los valores registrados durante la vibración libre del módulo. No hubo en realidad una vibración libre pura ya que en todo momento la plataforma de la mesa vibradora estuvo en movimiento, aunque ésta fuera mínima. Sin embargo, se mantuvo la premisa en los cálculos de vibración libre y las distorsiones que podrían influenciar los cálculos se discuten en los resultados obtenidos de cada módulo.

Dado que la respuesta de una estructura en vibración libre se define como la respuesta de la estructura cuando cesan las excitaciones dinámicas externas aplicadas a ésta, se consideró como vibración libre a la parte de la señal inmediatamente posterior al pulso. En vibración libre, las ecuaciones y procedimientos para los cálculos del periodo y amortiguamiento son válidos y se describen en detalle en el Capítulo 5.

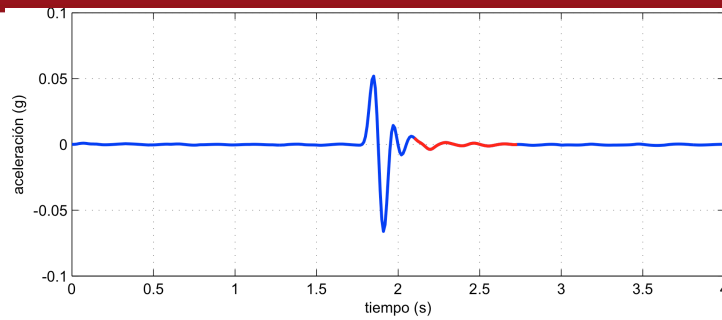


Figura 4.8. Pulso en Acelerograma de un instrumento

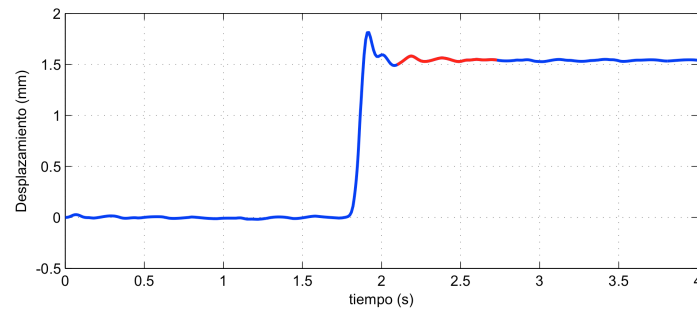


Figura 4.9. Pulso en Desplazamiento vs. Tiempo de la mesa vibradora

La Figura 4.8 muestra el pulso registrado en un acelerograma de un instrumento y la parte analizada en rojo, la cual se utilizó para obtener el periodo y el coeficiente de amortiguamiento. En la Figura 4.9 se muestra el pulso registrado en la plataforma de la mesa vibradora y en rojo el instante que corresponde al analizado en el acelerograma de los instrumentos.

4.2.3. Instrumentación del Ensayo Unidireccional

La instrumentación del módulo se definió en base a la utilizada en ensayos dinámicos de investigaciones anteriores para que los resultados obtenidos puedan ser comparables.

Se utilizaron 10 acelerómetros para registrar las aceleraciones absolutas en diferentes ubicaciones del módulo y se utilizó el acelerómetro ubicado en el actuador que desplaza la plataforma de la mesa vibradora para registrar la aceleración aplicada en la base del módulo.

Se colocaron 8 transductores de desplazamiento o LVDT's (Linear Variable Differential Transformers) para medir el desplazamiento absoluto en diferentes ubicaciones del módulo. Adicionalmente se utilizó el LVDT ubicado en el actuador que desplaza la plataforma de la mesa vibradora para registrar el desplazamiento en la base del módulo.

Tabla 4.1. Distribución de acelerómetros en el módulo

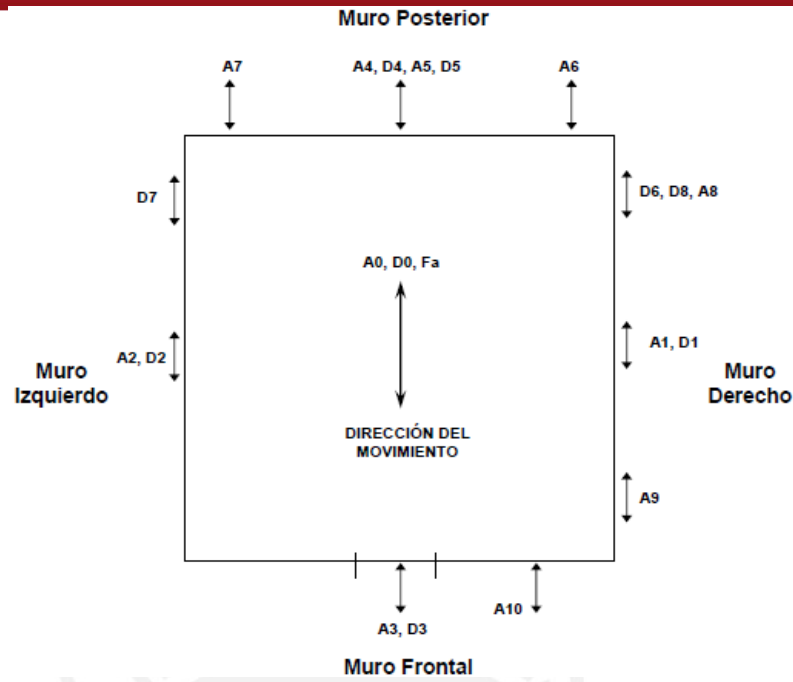
| Instrumento | Descripción | Ubicación |
|-------------|---------------------------------|--------------------|
| A0 | Plataforma de la Mesa Vibradora | – |
| A1 | Muro Derecho | Superior centro |
| A2 | Muro Izquierdo | Superior centro |
| A3 | Muro Frontal | Superior centro |
| A4 | Muro Posterior | Superior centro |
| A5 | Muro Posterior | Centro medio |
| A6 | Muro Posterior | Superior izquierda |
| A7 | Muro Posterior | Superior derecha |
| A8 | Muro Derecho | Centro derecha |
| A9 | Muro Derecho | Centro izquierda |
| A10 | Muro Frontal | Centro derecha |

A diferencia de los otros instrumentos que medían desplazamientos absolutos, el LVDT D6 y D7 midieron desplazamientos relativos entre dos puntos distantes a 250mm.

Tabla 4.2. Distribución de LVDTs en el módulo

| Instrumento | Descripción | Ubicación |
|-------------|---------------------------------|--------------------|
| D0 | Plataforma de la mesa vibradora | – |
| D1 | Muro Derecho | Superior centro |
| D2 | Muro Izquierdo | Superior centro |
| D3 | Muro Frontal | Superior centro |
| D4 | Muro Posterior | Superior centro |
| D5 | Muro Posterior | Centro medio |
| D6 | Muro Derecho | Superior derecha |
| D7 | Muro Izquierdo | Superior izquierda |
| D8 | Muro Derecho | Centro derecha |

La fuerza aplicada para desplazar la plataforma de la mesa también fue registrada mediante un instrumento ubicado en el actuador que aplica esta fuerza.



Notas:
 A: Acelerómetros
 D: Transductores de desplazamiento (LVDT)
 Fa: Sensor de fuerza
 A5, A8, A9, A10, D5 y D8 se encuentran a media altura.

Figura 4.10. Distribución en planta de la instrumentación – Módulo M100-T4100

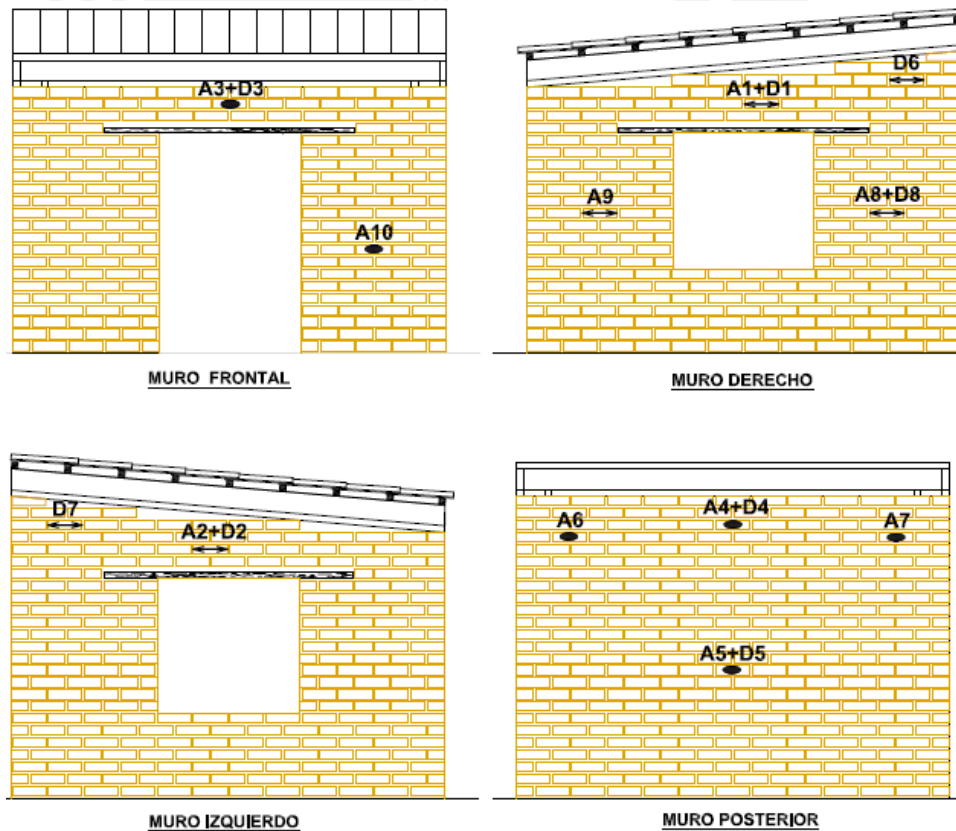


Figura 4.11 Elevaciones de la distribución de los instrumentos - Módulo M100-T4100

4.2.4. Instrumentación del Ensayo a 45°

Se utilizaron 12 acelerómetros para registrar las aceleraciones absolutas en diferentes ubicaciones en el módulo y se utilizó el acelerómetro ubicado en el actuador que desplaza la plataforma de la mesa vibradora para registrar la aceleración aplicada en la base del módulo.

Tabla 4.3. Distribución de acelerómetros en el módulo M100-T4100D

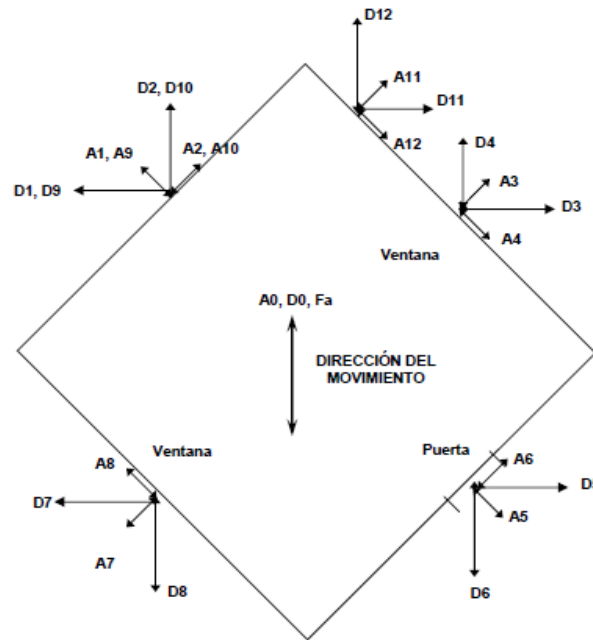
| Instrumento | Descripción | Ubicación | Dirección de registro |
|-------------|---------------------------|-----------------|-----------------------|
| A0 | Plataforma mesa vibradora | | |
| A1 | Muro Posterior | Superior centro | Transversal |
| A2 | Muro Posterior | Superior centro | Longitudinal |
| A3 | Muro Derecho | Superior centro | Transversal |
| A4 | Muro Derecho | Superior centro | Longitudinal |
| A5 | Muro Frontal | Superior centro | Transversal |
| A6 | Muro Frontal | Superior centro | Longitudinal |
| A7 | Muro Izquierdo | Superior centro | Transversal |
| A8 | Muro Izquierdo | Superior centro | Longitudinal |
| A9 | Muro Posterior | Centro medio | Transversal |
| A10 | Muro Posterior | Centro medio | Longitudinal |
| A11 | Muro Derecho | Centro derecha | Transversal |
| A12 | Muro Derecho | Centro derecha | Longitudinal |

Se colocaron 12 transductores de desplazamiento o LVDT's para medir los desplazamientos absolutos en diferentes partes del módulo. Adicionalmente se utilizó el LVDT ubicado en el actuador que desplaza la plataforma de la mesa vibradora para registrar el desplazamiento en la base del módulo.

Tabla 4.4. Distribución de LVDTs en el módulo M100-T4100D

| Instrumento | Descripción | Ubicación | Dirección de registro |
|-------------|---------------------------|-----------------|-----------------------|
| D0 | Plataforma Mesa Vibradora | | |
| D1 | Muro Posterior | Superior centro | Y-Y |
| D2 | Muro Posterior | Superior centro | X-X |
| D3 | Muro Derecho | Superior centro | Y-Y |
| D4 | Muro Derecho | Superior centro | X-X |
| D5 | Muro Frontal | Superior centro | Y-Y |
| D6 | Muro Frontal | Superior centro | X-X |
| D7 | Muro Izquierdo | Superior centro | Y-Y |
| D8 | Muro Izquierdo | Superior centro | X-X |
| D9 | Muro Posterior | Centro medio | Y-Y |
| D10 | Muro Posterior | Centro medio | X-X |
| D11 | Muro Derecho | Centro derecha | Y-Y |
| D12 | Muro Derecho | Centro derecha | X-X |

La fuerza aplicada para desplazar la plataforma de la mesa también fue registrada mediante un instrumento ubicado en el actuador que aplica esta fuerza.



Notas:
 A: Acelerómetros
 D: Transductores de desplazamiento (LVDT)
 Fa: Sensor de fuerza
 A9, A10, A11, A12, D9, D10, D11 y D12 se encuentran a media altura.

Figura 4.12. Distribución en planta de la instrumentación – Módulo M100-T4100D

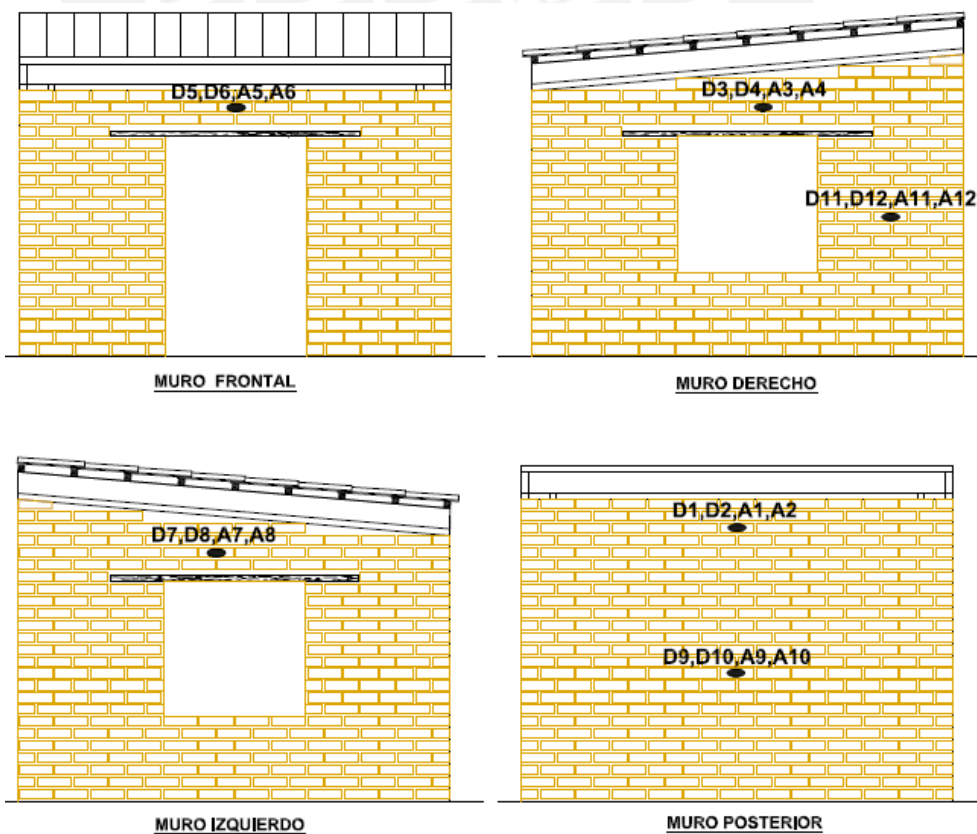


Figura 4.13. Elevaciones de la distribución de los instrumentos - Módulo M100T4100D

5. Identificación Dinámica y Detección de Daños

Dentro del campo de la Ingeniería Civil, la identificación dinámica y la detección de daños en estructuras han sido ampliamente desarrolladas por diferentes autores. Existen numerosos métodos para determinar los parámetros modales de una cierta estructura y enumerar cada uno de estos métodos escaparía al alcance de esta tesis. Se señalarán únicamente los métodos utilizados y aplicables a los ensayos realizados en esta investigación.

5.1. Métodos de Identificación Dinámica Utilizados

Las técnicas experimentales de análisis modal se pueden dividir en dos grandes grupos según el tipo de excitación utilizada. El primer grupo se basa en el análisis de la respuesta de la estructura cuando se aplica una excitación conocida. El segundo grupo se basa en el análisis de la respuesta de la estructura por su propia vibración natural ante excitaciones no conocidas como el ruido en el ambiente, fuerzas de viento, fuerzas de servicio, etc. El primer caso es aplicable a los ensayos realizados en la mesa vibradora y será el utilizado para el procesamiento de datos.

La excitación conocida aplicada a la estructura puede ser la señal registrada durante un movimiento sísmico para evaluar el desempeño de la estructura. Además, pueden aplicarse ensayos de vibración libre para determinar las propiedades de la estructura midiendo la respuesta dinámica de la estructura luego de aplicar un desplazamiento inicial.

En los métodos siguientes se utilizaron solo los acelerómetros debido a que los LVDT's, que median desplazamientos absolutos, debían restarse con el desplazamiento de la mesa para obtener los desplazamientos relativos y esto podría influenciar en la medición de los parámetros de la estructura. En los registros de aceleraciones, en cambio, es más fácil medir los parámetros de la estructura directamente (*Chopra, 1995*).

5.1.1. Determinación del Periodo Natural de Vibración

Los métodos para determinar los periodos y frecuencias de la estructura pueden dividirse según el dominio utilizado: el dominio del tiempo o el dominio de la

frecuencia. En el dominio del tiempo, un método para hallar el periodo de la estructura es medir el tiempo entre picos adyacentes de la señal registrada en un instrumento dado. Sin embargo, la señal registrada no siempre resulta clara para identificar los picos fácilmente ya que en muchos casos existen diferentes modos de vibración y los datos obtenidos mediante este método para un mismo instrumento suelen tener bastante variación entre sí. Además, cuando se cuenta con una gran cantidad de datos, este proceso resulta en muchos casos tedioso.

En el dominio de la frecuencia, se suele usar el algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier o FFT (por sus siglas en inglés), ya que permite un procesamiento rápido de los datos y permite cambiar fácilmente del dominio del tiempo al de frecuencia. Este método resulta bastante preciso al identificar la frecuencia natural de vibración como el valor máximo en el dominio, siempre y cuando las frecuencias naturales de la estructura se encuentren bien espaciadas, las frecuencias de muestreo sean las adecuadas y la estructura se encuentre en vibración libre.

En esta investigación se utilizó el dominio de la frecuencia para obtener las frecuencias fundamentales en cada instrumento. En la fase de vibración libre del ensayo, se aplicó la FFT a la parte de la señal inmediatamente después cada pulso donde las acciones externas desaparecen y la estructura se encuentra vibrando libremente. Así, se obtuvieron cuatro frecuencias por instrumento y se halló el valor promedio como el representativo.

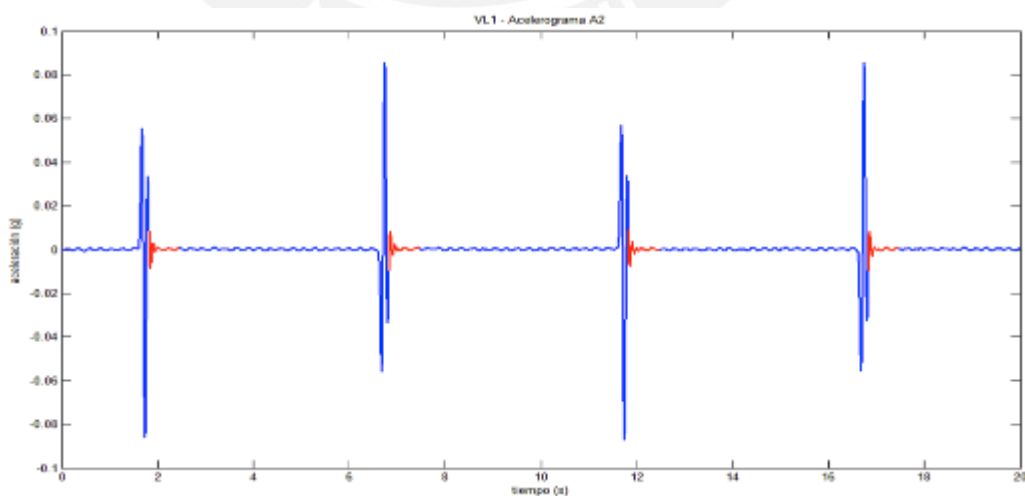


Figura 5.1 Respuesta en vibración libre en el dominio del tiempo

En la Figura 5.1 se observa en color rojo los cuatro fragmentos analizados de la señal de un acelerómetro en el dominio del tiempo. En la Figura 5.2 se observan estos fragmentos de la señal en el dominio de la frecuencia. Se puede observar que en cada una de las ventanas existe un pico predominante y cuya abscisa es la frecuencia amortiguada.

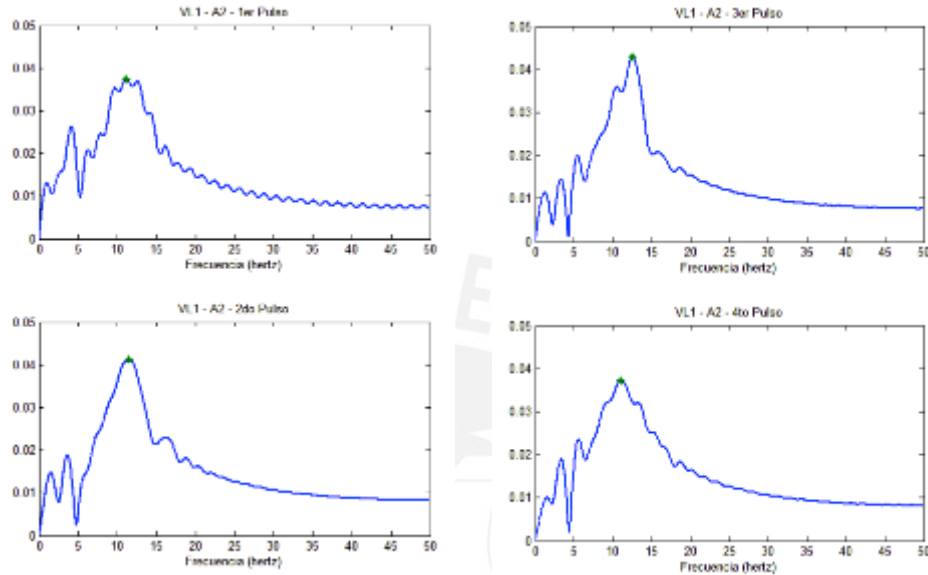


Figura 5.2 Respuesta en vibración libre en el dominio de la frecuencia

La frecuencia amortiguada, frecuencia natural de vibración y el periodo natural de vibración se relacionan entre sí mediante las siguientes ecuaciones:

$$f_d = f \sqrt{1 - \xi^2} \tag{5.1}$$

$$f = \frac{1}{T} \tag{5.2}$$

Donde:

- f_d : Frecuencia amortiguada
- f : Frecuencia natural de vibración
- T : Periodo natural de vibración
- ξ : Coeficiente de amortiguamiento

5.1.2. Determinación del Coeficiente de Amortiguamiento

El amortiguamiento es un mecanismo de la estructura que disipa la energía y reduce los desplazamientos de la respuesta de la estructura. Por lo tanto, una

medida del decaimiento en la respuesta nos permite obtener el valor del amortiguamiento. Un método muy usado es el del Decremento Logarítmico. Este se define como el logaritmo natural de la razón de dos amplitudes sucesivas en un sistema sub-amortiguado en vibración libre.

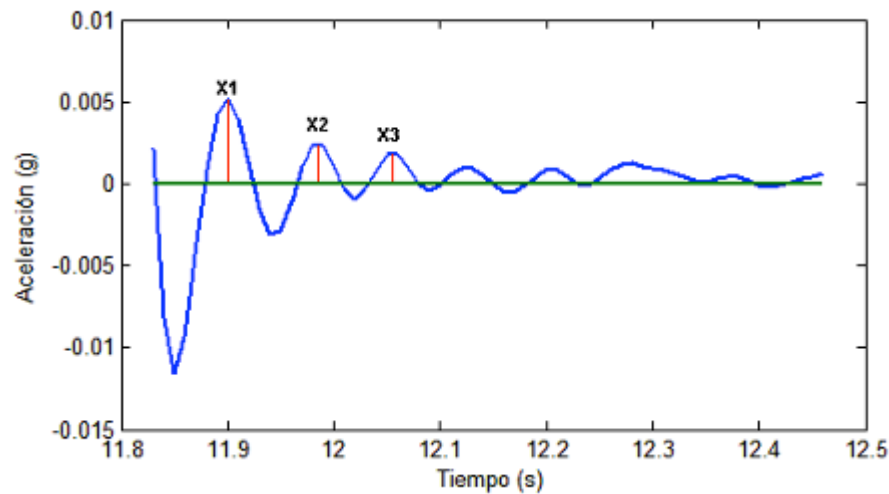


Figura 5.3. Decremento Logarítmico

En la Figura 5.3, por ejemplo, el cociente de X_1 entre X_2 será igual al decremento logarítmico. De forma genérica se utiliza la siguiente ecuación para hallar el coeficiente de amortiguamiento:

$$\delta = \ln\left(\frac{x_i}{x_{n+i}}\right) = 2n\pi\xi \quad (5.3)$$

Donde:

δ : Decremento Logarítmico

n : Número de ciclos entre picos

x_i : Amplitud de desplazamiento o aceleración en un pico

ξ : Coeficiente de amortiguamiento

5.2. Métodos de Detección de Daños Utilizados

En base a la premisa de que las propiedades modales (frecuencias, modos de vibración y amortiguamiento) están íntimamente relacionadas con las propiedades físicas de la estructura (masa y rigidez), se pueden hacer predicciones acerca del daño en la estructura analizando su variabilidad.

Mediante los cambios en la medición de frecuencias en las diferentes fases del ensayo podremos estimar la existencia de daños en la estructura. Asumiendo que no hay variación en la masa de la estructura entre cada fase y utilizando las fórmulas para un sistema de un grado de libertad, se puede hallar un índice de la degradación de la rigidez (*Quiun, 1993*). Este índice nos puede dar una estimación del porcentaje en que ha disminuido la rigidez de la estructura mediante las siguientes ecuaciones:

$$k_n = 4 \times \pi^2 \times m \times f_n^2 \quad (5.4)$$

$$S = \left(\frac{k_n}{k_0} \right) = \left(\frac{f_n}{f_0} \right)^2 \quad (5.5)$$

Donde:

S : Índice de la degradación de la rigidez

m : Masa de la estructura

f_n : Frecuencia natural de vibración en la fase n

f_0 : Frecuencia natural de vibración inicial (antes del ensayo)

k_n : Rigidez en la fase n

k_0 : Rigidez inicial (antes del ensayo)

El coeficiente de amortiguamiento también es un parámetro que se ve alterado cuando ocurre algún daño en la estructura. Un comportamiento no lineal de la estructura incrementa la energía de disipación, resultando en un aumento del coeficiente de amortiguamiento. Sin embargo, si bien este parámetro nos permite observar la ocurrencia de daños cuantitativamente, debido a la dificultad de estimarlo de manera precisa no es muy utilizado en métodos para la detección de daños en una estructura (*Botelho, 2008*).

5.3. Caracterización de Daños en Construcciones de Adobe

Las construcciones de adobe son altamente vulnerables a los movimientos sísmicos debido a su poca resistencia a la tracción, al elevado peso de la estructura y a su comportamiento frágil en el rango inelástico. Los daños ocasionados por sismos en construcciones de adobe pueden catalogarse en dos grandes grupos: daños causados por fuerzas perpendiculares al plano del muro y daños causados por fuerzas cortantes en el plano del muro.

Dentro del primer grupo de daños se encuentran las grietas verticales en las esquinas como se muestra en la Figura 5.4. El movimiento fuera del plano de muros ortogonales entre sí genera una concentración de esfuerzos de tracción en las esquinas ocasionando una grieta vertical que se propaga hacia abajo y eventualmente separa los muros entre sí. Luego ocurre el volteo del muro debido a la ausencia de arriostres fuera del plano.

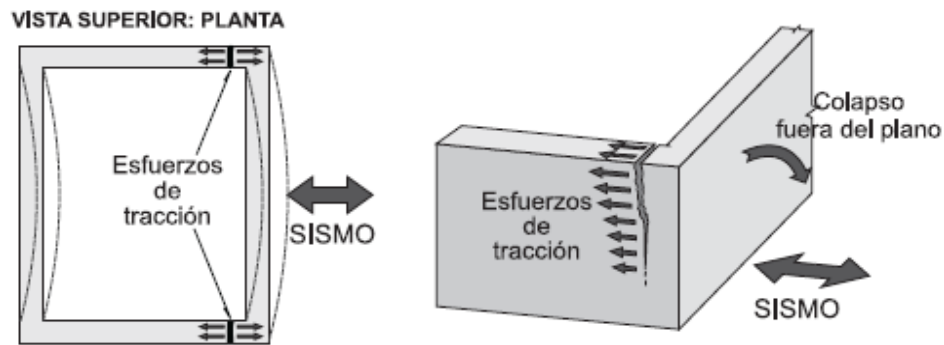


Figura 5.4. Grietas verticales en esquina (Fuente: PNUD, 2008)

Las grietas verticales en el centro de los muros se producen debido a los esfuerzos de tracción por flexión. Generalmente, esto ocurre cuando los muros de arriostre perpendiculares se encuentran muy separados y el muro trabaja como una losa arriostrada en tres de sus bordes, con el borde superior libre. Al igual que la grieta vertical en esquina, la grieta vertical en el centro del muro se origina en la parte superior del muro donde existe una mayor deformación y se propaga hacia abajo.

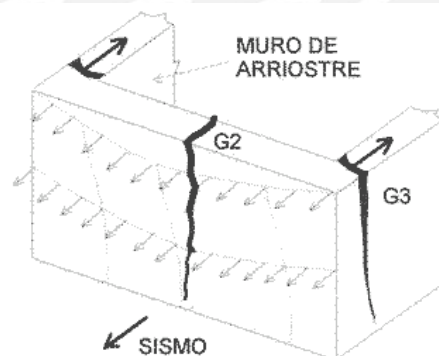


Figura 5.5. Grietas verticales debidas a fuerzas fuera del plano (Fuente: CERESIS)

En el segundo grupo se encuentran las grietas diagonales por fuerza cortante en el plano del muro. Estas ocurren cuando las fallas fuera del plano han sido controladas debido a que los muros son gruesos o porque existe un elemento de amarre al nivel superior de los muros. Las grietas diagonales se producen a lo largo del muro en una dirección o en las dos direcciones en forma de "X" y por lo general

se desarrollan entre el mortero de barro y el adobe debido a la poca adherencia entre estos dos elementos. En caso el muro tenga aberturas de puertas y/o ventanas, la grieta diagonal tenderá a generarse en las esquinas de estas aberturas debido a la concentración de esfuerzos en estas zonas y a la incompatibilidad entre las propiedades mecánicas del adobe y el material de los dinteles.

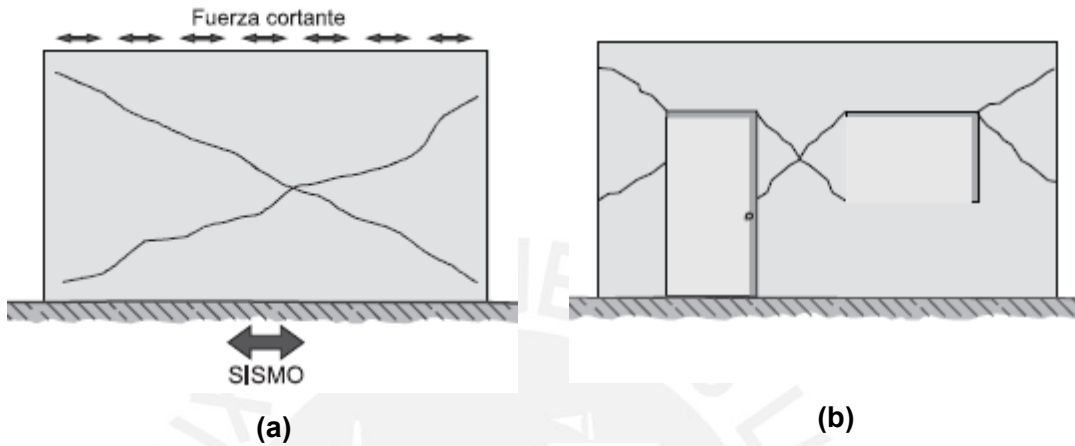


Figura 5.6. Grietas diagonales debidas a fuerzas en el plano del muro (Fuente: PNUD, 2008)

Una buena clasificación del daño en construcciones de adobe es la realizada por Torrealva (2007) y en la cual se definen cinco niveles de daño:

Tabla 5.1. Clasificación de daños en estructuras de adobe (Torrealva, 2007)

| Nivel de daño | Descripción |
|-----------------|--|
| Daños leves | La vivienda tiene grietas verticales menores a 10mm y no se observa desplome de los muros. Fisuras en los revestimientos y caída de pequeños trozos de tarrajeo. |
| Daños moderados | Además de los daños leves existen grietas en las esquinas mayores a 20mm. Pequeñas grietas en el revestimiento y en el muro de adobe. Ligero desplome en muros exteriores. Caída de grandes trozos de revoque. |
| Daños graves | Similar a los daños moderados pero más extensos y grietas más grandes y profundas en los muros. Desplomes excesivos. |
| Colapso parcial | Existen colapsos parciales o totales de algunos muros, sin caída del techo. |
| Colapso total | Algunos o todos los muros de adobe han colapsado, incluido el techo. |

6. Módulo No Reforzado – Ensayo Unidireccional (M000)

6.1. Introducción

El módulo no reforzado se ensayó durante el evento Sismo Adobe 2005 y fue parte de una investigación previa (*Blondet et al, 2006*) donde se realizaron ensayos dinámicos de módulos de adobe con las mismas características y dimensiones a las descritas en el Capítulo 3. Por lo tanto, este módulo servirá como referencia y será comparado con los resultados obtenidos en los ensayos de los dos módulos reforzados.



Figura 6.1 Módulo no reforzado M000

Este módulo se denominó M000 tomando como referencia su denominación anterior. A diferencia de los módulos M100-T4100 y M100-T4100D, que fueron tarrajeados íntegramente, en este módulo sólo se tarrajó el muro derecho. Además, no se colocó una viga collar que amarre los muros en la parte superior. El techo fue colocado directamente sobre listones de madera empotrados en los muros e incluía una cobertura de tejas. Esto se hizo con el propósito de representar el proceso constructivo típico que se realiza en las zonas rurales del Perú en construcciones de adobe sin refuerzo.

El peso del anillo de concreto armado que se utilizó como base del módulo fue 29.50kN y el peso del módulo fue 105.20kN, que hicieron un total de 134.70kN sobre la mesa vibradora.

El ensayo se llevó a cabo el día 16 de Mayo de 2005 y la dirección del movimiento de la mesa vibradora fue paralela a los muros con ventanas (muro izquierdo y derecho).

6.2. Ensayo Dinámico

6.2.1. Fase 1 ($\Delta = 30\text{mm}$)

En la Fase 1 los daños en los muros fueron imperceptibles. Se pudieron observar desplazamientos relativos entre los muros pero sin causar daño alguno. Según la clasificación de daños descrita en la Tabla 5.1, el módulo no presentó daños. En la Figura 6.2 se muestra el módulo después de la Fase 1.

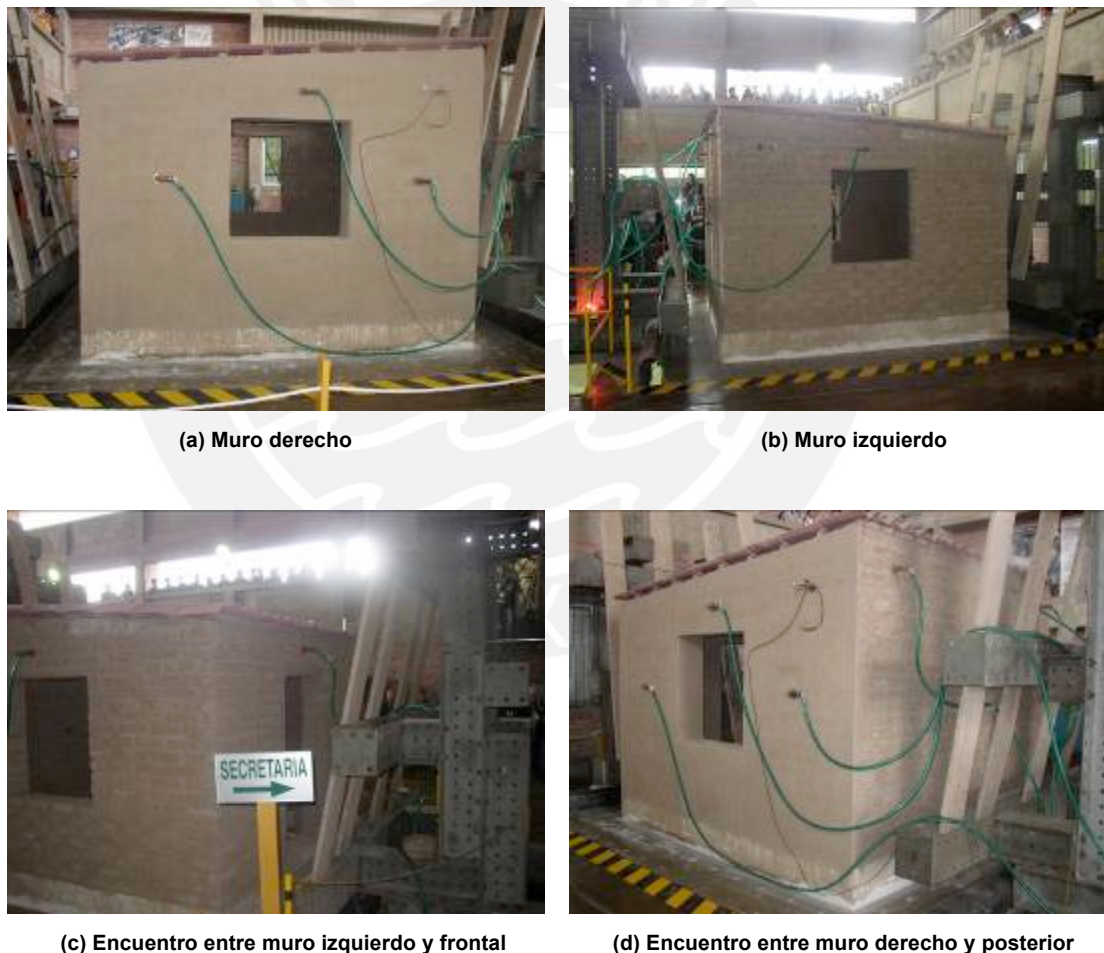


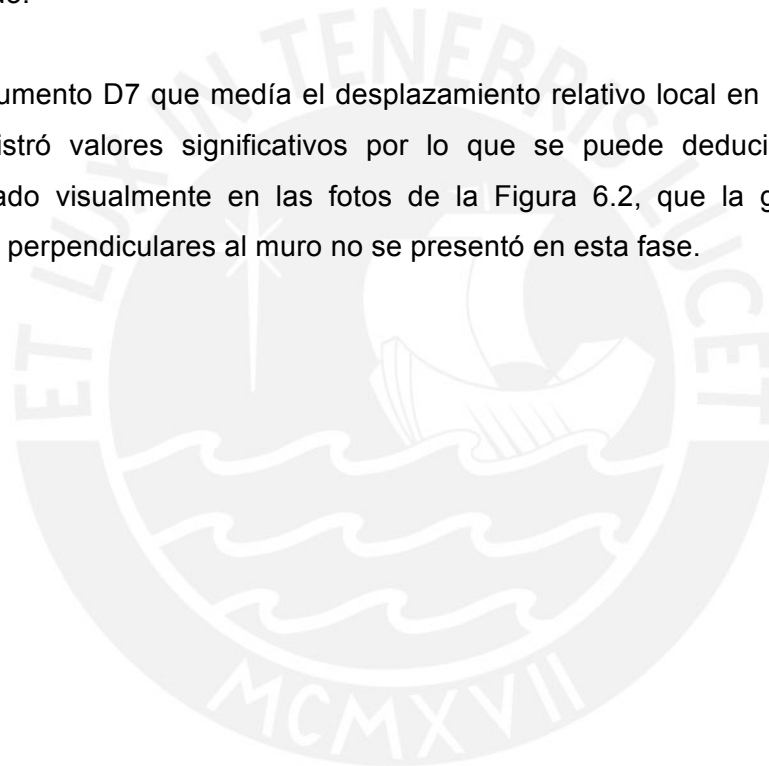
Figura 6.2 Daños en el módulo M000 - Post Fase 1 (30mm)

En la Figura 6.3 se muestran los acelerogramas más significativos registrados durante la Fase 1. Se puede observar la amplificación en los instrumentos con

respecto al último gráfico, el cual representa la aceleración de la mesa. No se observó mayor diferencia en los valores registrados entre el muro derecho e izquierdo. El muro frontal y posterior registraron una amplificación considerablemente mayor con respecto a la aceleración de la mesa que el muro derecho e izquierdo.

En la Figura 6.4 se muestran los desplazamientos relativos medidos en cada uno de los muros y el desplazamiento absoluto en la mesa. Al igual que en la Figura 6.3, se pudo observar una gran amplificación en el muro frontal y posterior. Tampoco se observó diferencia significativa entre los desplazamientos del muro derecho e izquierdo.

El instrumento D7 que medía el desplazamiento relativo local en el muro izquierdo no registró valores significativos por lo que se puede deducir, además de lo observado visualmente en las fotos de la Figura 6.2, que la grieta vertical por fuerzas perpendiculares al muro no se presentó en esta fase.



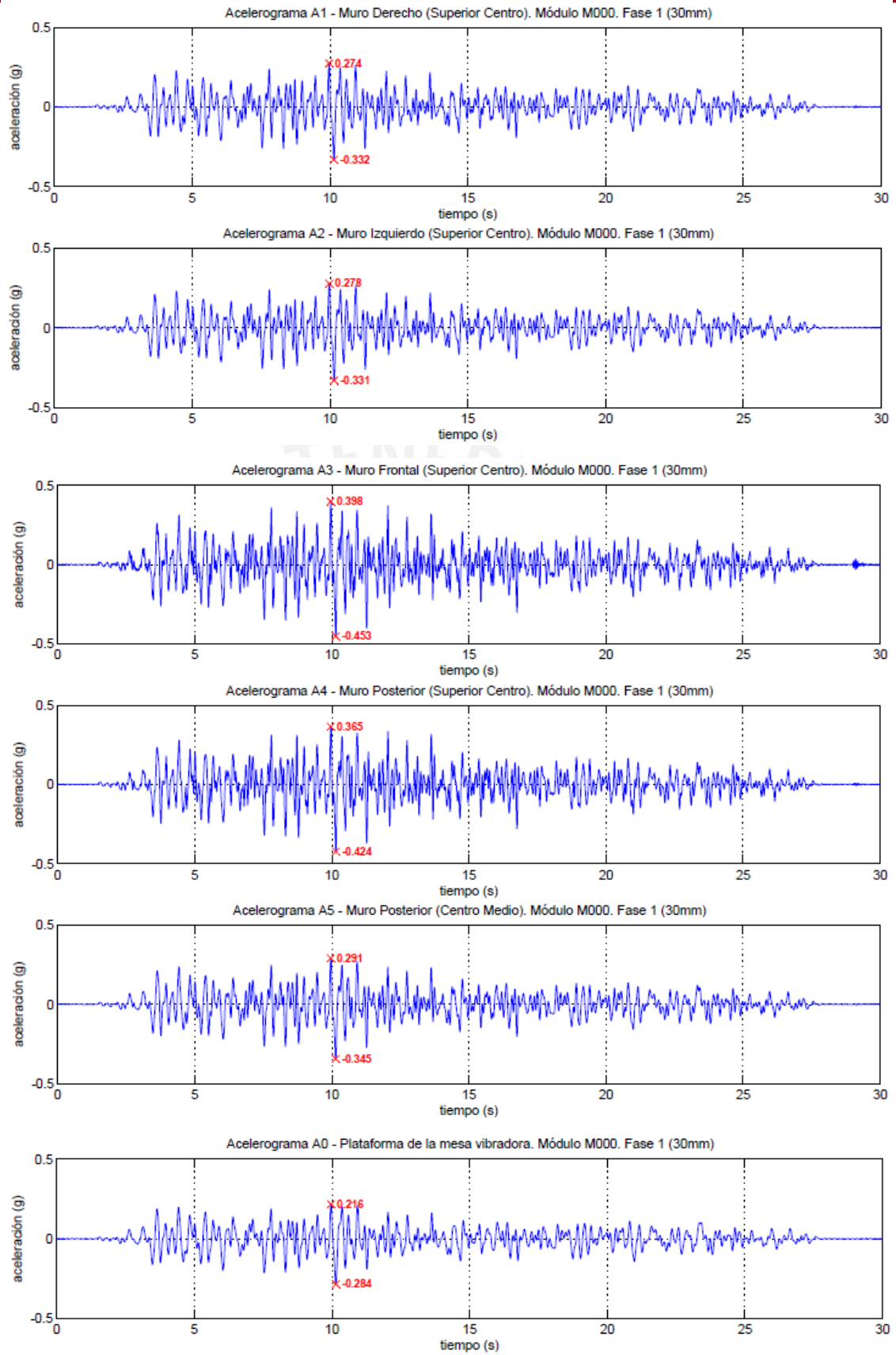


Figura 6.3 Acelerogramas de la Fase 1 (30mm) en el módulo M000

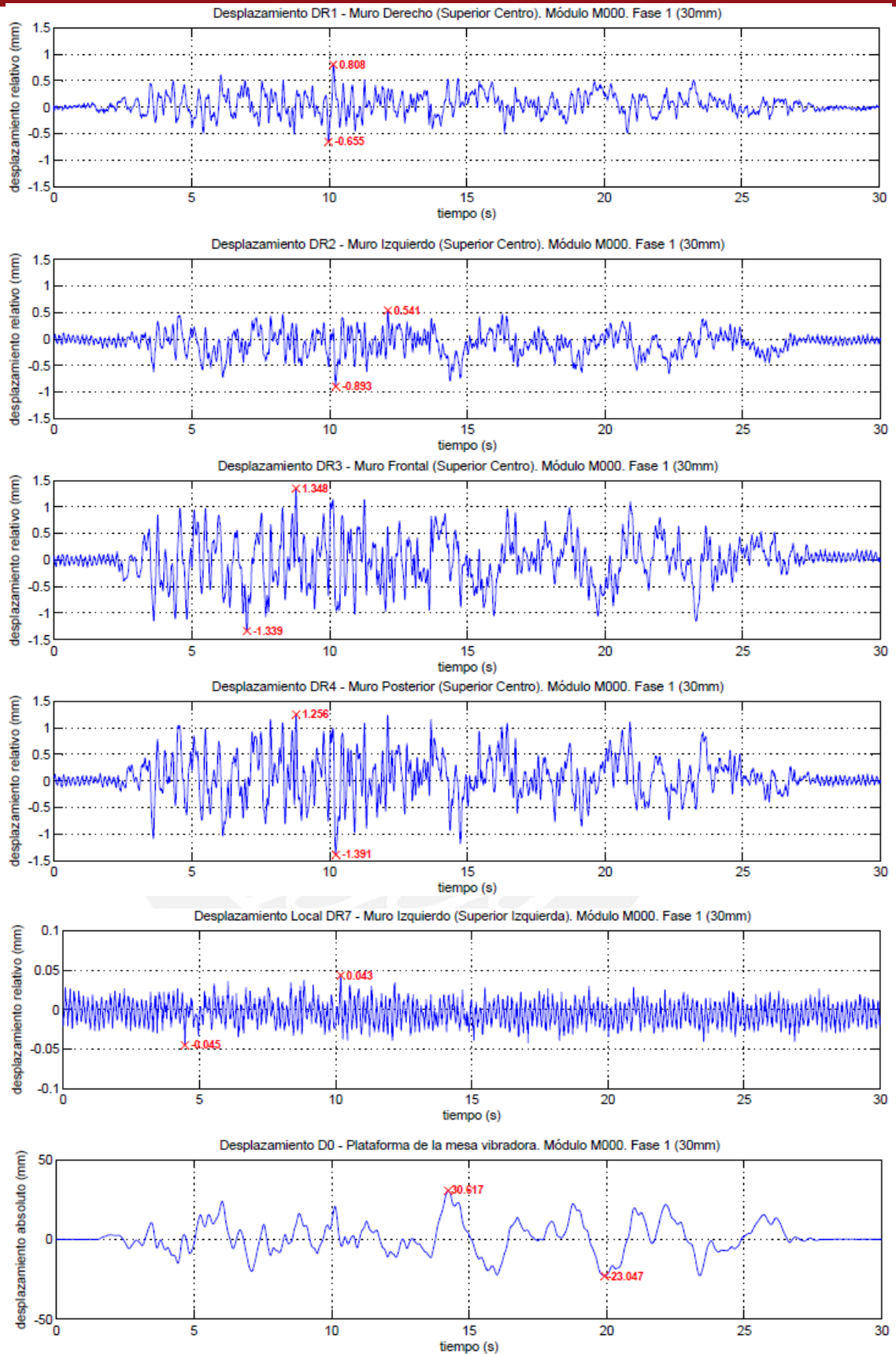


Figura 6.4 Desplazamientos en la Fase 1 (30mm) en el módulo M000

6.2.2. Fase 2 ($\Delta = 80\text{mm}$)

En la Fase 2 se produjo el desprendimiento de pedazos de adobes debido a la excesiva deformación de los muros. Por instantes el techo se separó íntegramente de los muros. Se formaron grandes grietas diagonales en los muros derecho e izquierdo debido a fuerzas cortantes en el plano. Se presentaron grietas verticales en las esquinas del muro izquierdo y derecho, iniciándose la falla típica por volteo que ocurre en construcciones sin refuerzo. Sin embargo, se observó una notable diferencia entre el muro derecho con tarrajeo y el muro izquierdo sin tarrajeo, el cuál se vio seriamente afectado. Se presentaron daños graves en el módulo.



(a) Muro izquierdo



(b) Encuentro entre el muro derecho y frontal



(c) Daños en la ventana del muro izquierdo



(d) Encuentro entre el muro derecho y posterior

Figura 6.5 Daños en el módulo M000 - Post Fase 2 (80mm)

En la Figura 6.6 se puede observar una mayor amplificación en los valores de aceleración en el muro izquierdo en comparación al muro derecho, lo que corrobora las ventajas de colocar revestimiento al muro, incrementando su rigidez.

Los mayores valores de aceleración se registraron en la parte superior del muro frontal.

En la Figura 6.7 la diferencia entre el muro derecho e izquierdo es aún más notoria, al mostrar un desplazamiento relativo máximo de 14.97mm en el muro derecho y de 71.07mm en el muro izquierdo. Los valores máximos de desplazamiento relativo se registraron en la parte superior del muro posterior.

A partir de los 10 segundos de iniciada la fase, se pudo observar un gran cambio en la frecuencia de las aceleraciones registradas, especialmente en los acelerómetros de los muros frontal y posterior. Esto hace indicar que hubo un daño en la estructura lo que originó este cambio, lo que se corrobora en las fotos mostradas en la Figura 6.5. También, a partir de ese instante, los desplazamientos relativos se incrementaron significativamente, así como en el instrumento D7 que medía el desplazamiento relativo local en el muro izquierdo. Aquí, se registró un desplazamiento relativo máximo de 50mm, lo que indica que la grieta vertical por fuerzas perpendiculares al muro posterior se formó y lo hizo inestable al volteo.

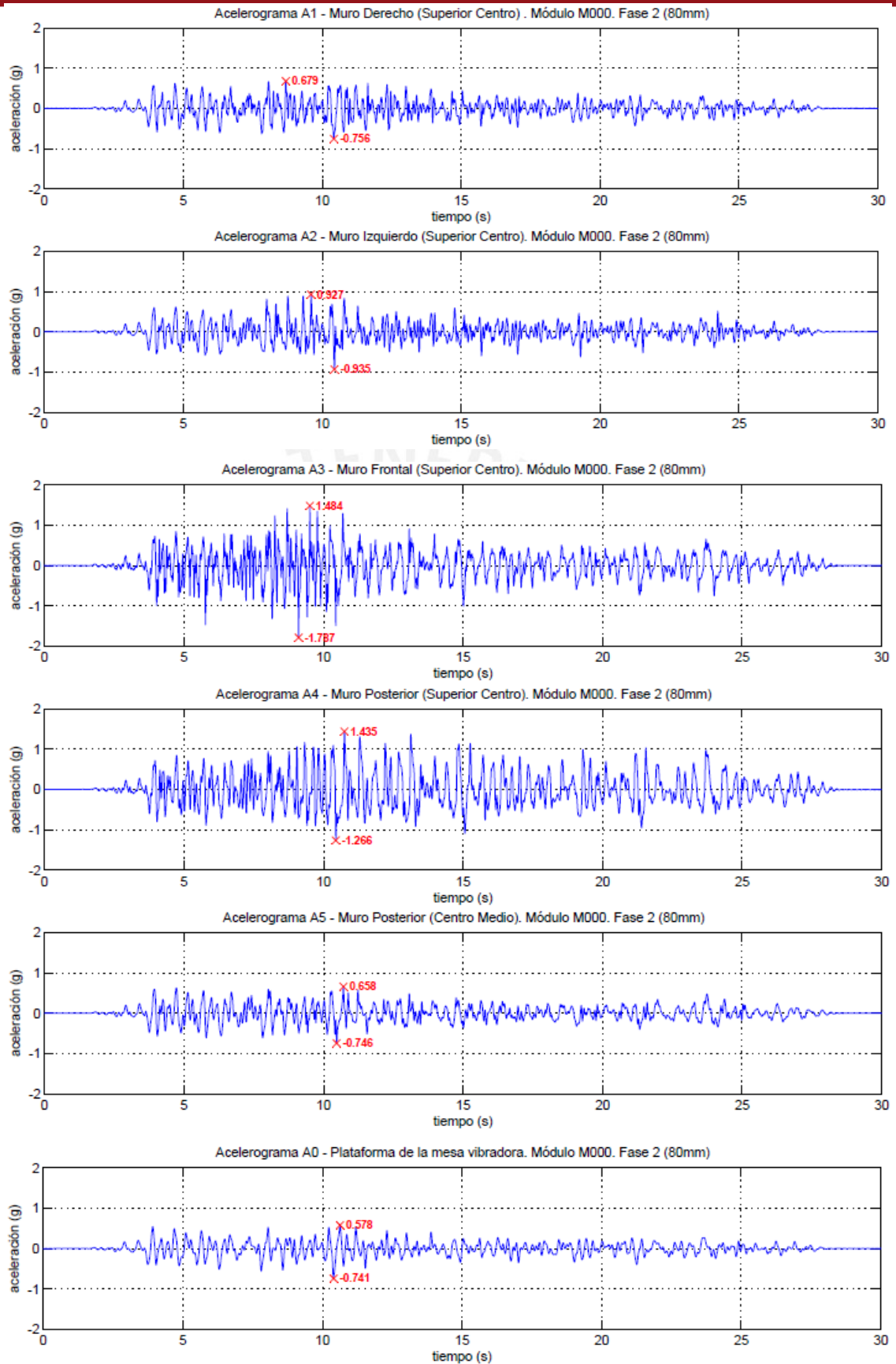


Figura 6.6 Acelerogramas de la Fase 2 (80mm) en el módulo M000

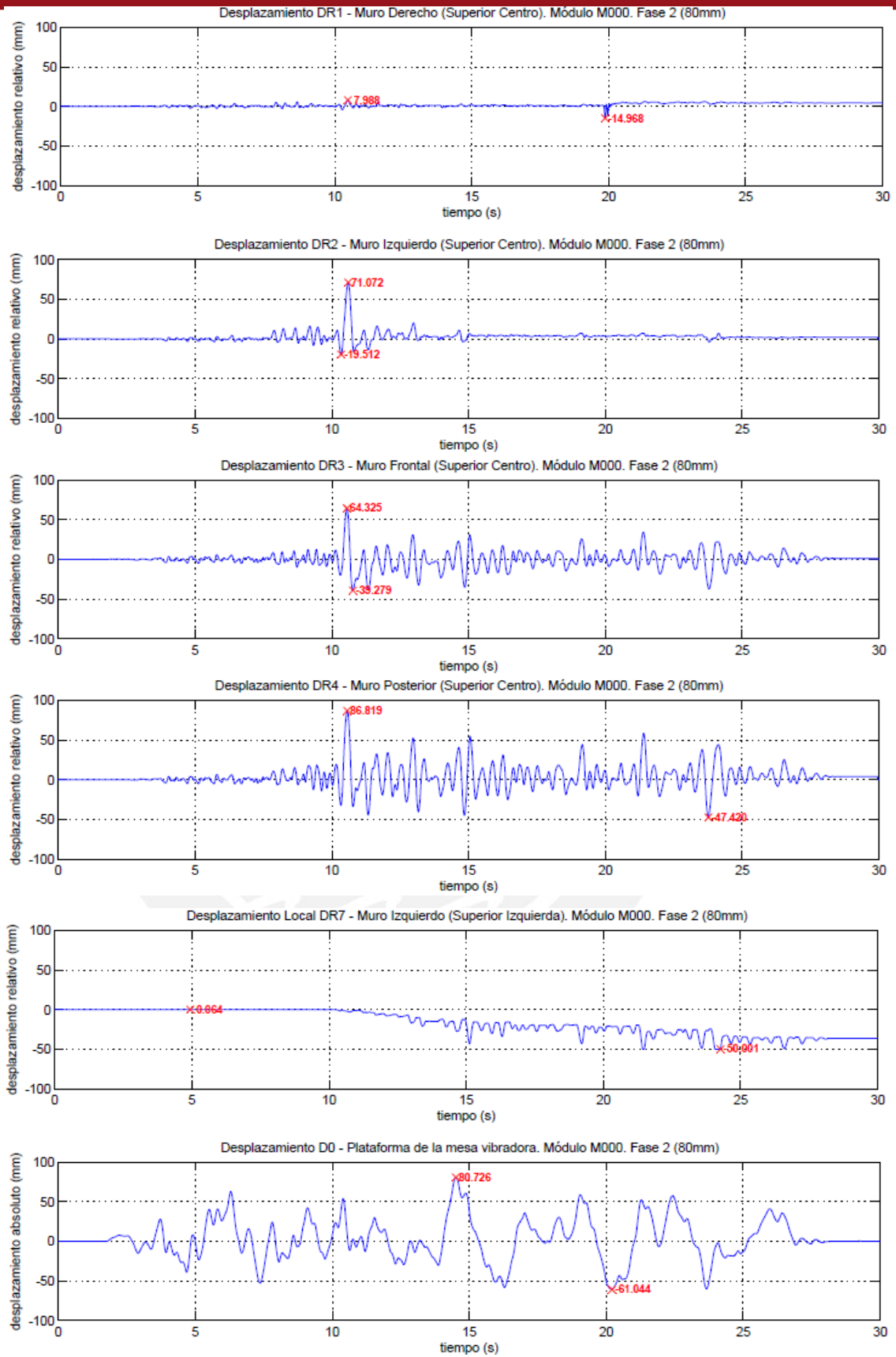


Figura 6.7 Desplazamientos en la Fase 2 (80mm) en el módulo M000

6.2.3. Fase 3 ($\Delta = 130\text{mm}$)

Por precaución y ante el inminente colapso del módulo se retiraron los LVDT's antes de realizar la última fase. Los muros frontal y posterior colapsaron por volteo, aunque el techo permaneció apoyado por gravedad en los muros de corte. Las grietas diagonales en los muros derecho e izquierdo se incrementaron significativamente, disminuyendo a su vez la sección de los muros. Se presentó el colapso parcial del módulo y éste quedó inestable al finalizar el ensayo.



(a) Encuentro entre muro izquierdo y muro posterior



(b) Muro izquierdo



(c) Muro derecho



(d) Encuentro entre muro derecho y posterior

Figura 6.8 Daños en el módulo M000 – Post Fase 3 (130mm)

En la Figura 6.9 se observa que a partir de los 11 segundos de iniciada la fase, los acelerómetros del muro frontal y posterior registraron valores inusuales, indicando el inicio del colapso de ambos muros. Como se mencionó anteriormente, en esta fase no se pudieron registrar los desplazamientos relativos en cada uno de los muros, por lo que no se pudo sacar mayores conclusiones con respecto a los desplazamientos.

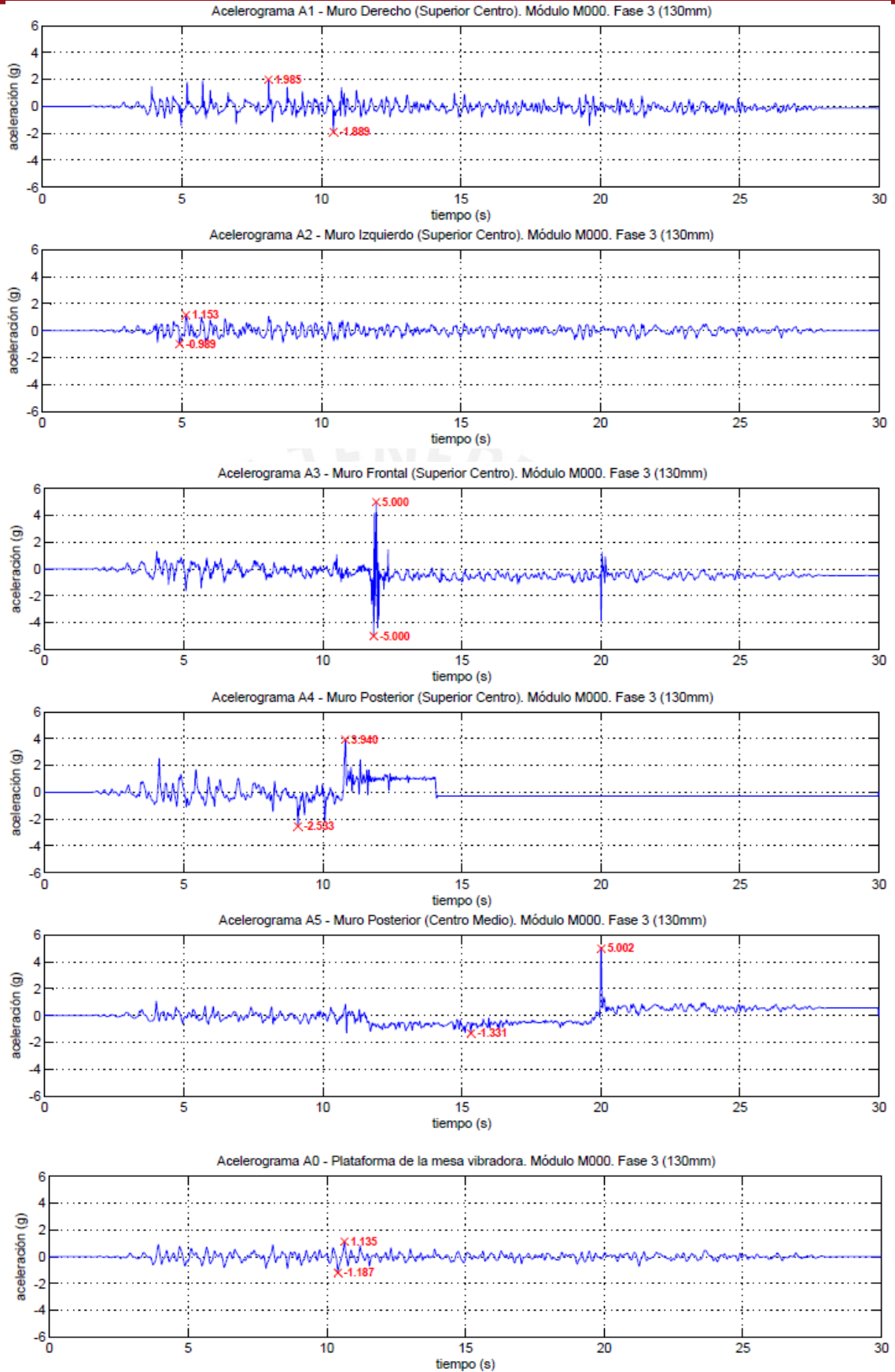


Figura 6.9 Acelerogramas de la Fase 3 (130mm) en el módulo M000

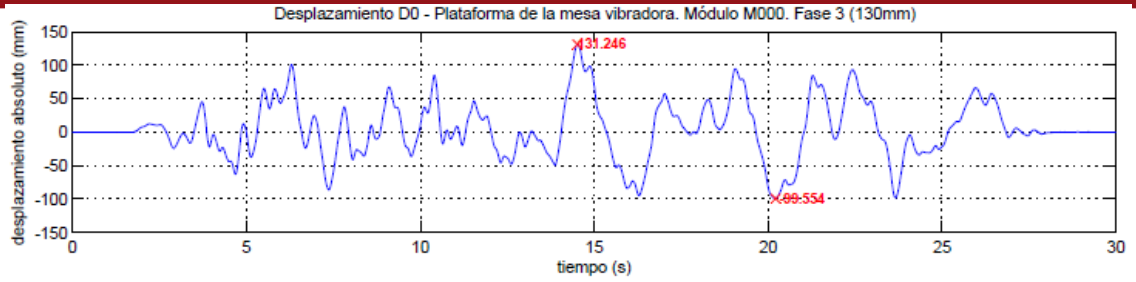


Figura 6.10 Desplazamiento en la Fase 3 (130mm) en el módulo M000

6.2.4. Plano de Grietas en Muros

Se denotaron las grietas producidas al finalizar cada fase por diferentes colores. El color negro se utilizó para identificar las fisuras generadas durante la primera fase, el rojo para la segunda fase y el azul para la tercera fase. Las zonas sombreadas indican los lugares donde el muro de adobe se derrumbó o colapsó.

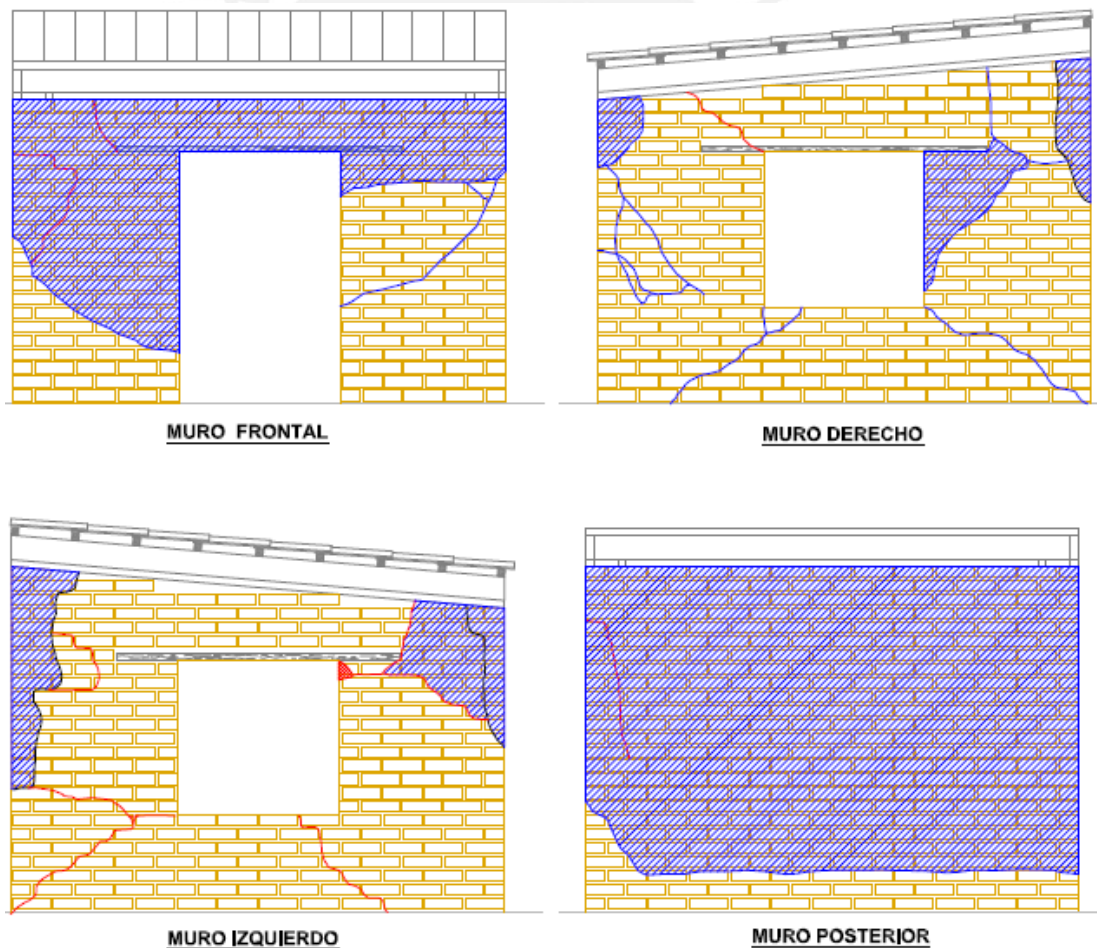


Figura 6.11 Grietas en muros exteriores del módulo M000

En la Figura 6.11 se observa que aproximadamente el 50% del área del muro frontal y el 100% del muro posterior colapsaron. Asimismo, entre el 10 al 15% del área del muro izquierdo y derecho también se derrumbó. Las grietas producidas por fuerzas cortantes en los muros de corte ocasionaron un gran daño al separarlos por bloques y haciéndolos muy vulnerables al colapso. Las grietas verticales por volteo ocasionaron el colapso de los muros de flexión.

6.3. Interpretación de Resultados

6.3.1. Valores Máximos

A continuación se resumen los valores máximos registrados en los instrumentos durante las fases de ensayo:

Tabla 6.1. Solicitaciones máximas registradas en la mesa vibradora (M000)

| Instrumento | Fase 1 | Fase 2 | Fase 3 |
|-------------|--------|---------|---------|
| A0 (g) | 0.284 | 0.741 | 1.187 |
| D0 (mm) | 30.617 | 80.726 | 131.246 |
| Fa (kN) | 98.443 | 230.672 | 317.285 |
| V (kN) | 39.897 | 77.931 | 94.294 |

Tabla 6.2. Aceleraciones máximas registradas en el módulo M000 (g)

| Instrumento | Descripción | Fase 1 | Fase 2 | Fase 3 |
|-------------|---|--------|--------|--------|
| A0 | Mesa | 0.284 | 0.741 | 1.187 |
| A1 | Muro Derecho (Superior centro) | 0.332 | 0.756 | 1.985 |
| A2 | Muro Izquierdo (Superior centro) | 0.331 | 0.935 | 1.153 |
| A3 | Muro Frontal (Superior centro) | 0.453 | 1.787 | 5.000 |
| A4 | Muro Posterior (Superior centro) | 0.424 | 1.435 | 3.940 |
| A5 | Muro Posterior (Centro medio) | 0.345 | 0.746 | 5.002 |
| A6 | Muro Posterior (Superior Izquierdo) | 0.359 | 0.966 | 5.000 |
| A7 | Muro Posterior (Superior Derecho) | 0.351 | 1.475 | 4.011 |
| A8 | Muro Derecho (Centro Derecha) | 0.321 | 0.722 | 2.894 |
| A9 | Muro Derecho (Centro Izquierda) | 0.321 | 0.821 | 2.410 |
| A10 | Muro Frontal (Centro Derecha) | 0.302 | 0.765 | 2.311 |
| Amáx | Aceleración máxima en la Fase | 0.453 | 1.787 | 5.002 |
| FADmáx | Factor de amplificación dinámico máximo | 1.593 | 2.411 | 4.216 |

Tabla 6.3. Desplazamientos absolutos máximos en el módulo M000 (mm)

| Instrumento | Descripción | Fase 1 | Fase 2 | Fase 3 |
|-------------|-------------------------------------|--------|---------|---------|
| D0 | Mesa | 30.617 | 80.726 | 131.246 |
| D1 | Muro Derecho (Superior) | 30.751 | 81.804 | – |
| D2 | Muro Izquierdo (Superior) | 30.258 | 85.149 | – |
| D3 | Muro Frontal (Superior) | 31.193 | 96.063 | – |
| D4 | Muro Posterior (Superior) | 30.788 | 110.006 | – |
| D5 | Muro Posterior (Centro) | 30.633 | 90.008 | – |
| D6 | Muro Derecho (Superior Derecha) | – | – | – |
| D7 | Muro Izquierdo (Superior Izquierda) | – | – | – |
| D8 | Muro Derecho (Centro Derecha) | 30.711 | 81.733 | – |

Tabla 6.4. Desplazamientos relativos máximos en el módulo M000 (mm)

| Instrumento | Descripción | Fase 1 | Fase 2 | Fase 3 |
|-------------|-------------------------------------|--------|--------|--------|
| DR1 | Muro Derecho (Superior) | 0.808 | 14.968 | – |
| DR2 | Muro Izquierdo (Superior) | 0.893 | 71.072 | – |
| DR3 | Muro Frontal (Superior) | 1.348 | 64.325 | – |
| DR4 | Muro Posterior (Superior) | 1.391 | 86.819 | – |
| DR5 | Muro Posterior (Centro) | 1.141 | 36.920 | – |
| DR6 | Muro Derecho (Superior Derecha) | 0.058 | 16.506 | – |
| DR7 | Muro Izquierdo (Superior Izquierda) | 0.045 | 50.001 | – |
| DR8 | Muro Derecho (Centro Derecha) | 1.136 | 3.327 | – |

6.3.2. Periodo Natural de Vibración y Coeficiente de Amortiguamiento

A continuación se muestran los periodos naturales de vibración obtenidos durante las vibraciones libres:

Tabla 6.5 Periodos naturales en vibraciones libres en el módulo M000 (s)

| Instrumento | Descripción | Inicial | Post-Fase 1 | Post-Fase 2 | Post-Fase 3 |
|-------------|-------------------------------------|---------|-------------|-------------|-------------|
| A1 | Muro Derecho (Superior) | 0.16 | 0.16 | 0.17 | – |
| A2 | Muro Izquierdo (Superior) | 0.15 | 0.17 | 0.17 | – |
| A3 | Muro Frontal (Superior) | 0.07 | 0.07 | 0.17 | – |
| A4 | Muro Posterior (Superior) | 0.07 | 0.07 | 0.18 | – |
| A5 | Muro Posterior (Centro) | 0.07 | 0.07 | 0.18 | – |
| A6 | Muro Posterior (Superior Izquierdo) | 0.07 | 0.07 | 0.20 | – |
| A7 | Muro Posterior (Superior Derecha) | 0.12 | 0.16 | 0.18 | – |
| A8 | Muro Derecho (Centro Derecha) | 0.16 | 0.16 | 0.17 | – |
| A9 | Muro Derecho (Centro Izquierda) | 0.16 | 0.16 | 0.17 | – |
| A10 | Muro Frontal (Centro Derecha) | 0.16 | 0.16 | 0.16 | – |

En la Tabla 6.5 se observa que los periodos obtenidos en los muros frontal y posterior fueron menores al inicio del ensayo con respecto a los muros de corte, lo cuál resulta incongruente con lo observado durante los ensayos.

Al analizar el periodo que tuvieron los desplazamientos en la mesa vibradora mostrados en la Figura 4.7, se observó que este fue de aproximadamente 0.16s en todas las vibraciones libres, el mismo que se obtuvo en muchos instrumentos. Se puede deducir entonces que estas distorsiones si son significativas y alteran la obtención de los parámetros dinámicos como es el periodo natural de vibración.

A pesar de esto, los periodos hallados mostraron que fueron los muros de flexión los que más daño presentaron al incrementar su periodo en más del doble de su valor inicial.

Tabla 6.6 Coeficientes de amortiguamiento en vibraciones libres en el módulo M000

| Instrumento | Descripción | Inicial | Post-Fase 1 | Post-Fase 2 | Post-Fase 3 |
|-------------|-------------------------------------|---------|-------------|-------------|-------------|
| A1 | Muro Derecho (Superior) | 8.58% | 9.21% | 13.80% | – |
| A2 | Muro Izquierdo (Superior) | 7.04% | 8.09% | 8.49% | – |
| A3 | Muro Frontal (Superior) | 8.35% | 9.40% | 9.43% | – |
| A4 | Muro Posterior (Superior) | 11.19% | 13.57% | 13.89% | – |
| A5 | Muro Posterior (Centro) | 12.44% | 12.97% | 14.85% | – |
| A6 | Muro Posterior (Superior Izquierdo) | 9.15% | 9.33% | 13.41% | – |
| A7 | Muro Posterior (Superior Derecho) | 7.95% | 12.66% | 12.98% | – |
| A8 | Muro Derecho (Centro Derecha) | 11.11% | 12.24% | 13.98% | – |
| A9 | Muro Derecho (Centro Izquierda) | 7.50% | 10.19% | 11.02% | – |
| A10 | Muro Frontal (Centro Derecha) | 5.70% | 10.48% | 10.87% | – |

Los coeficientes de amortiguamiento registrados en los instrumentos también mostraron un incremento después de la Fase 2 entre 13 y 91% de su valor inicial, lo cual hace evidente el daño producido en la estructura.

Cabe resaltar que estos dos parámetros, el periodo natural de vibración y el coeficiente de amortiguamiento, fueron obtenidos sólo hasta después de la Fase 2 debido a que no se realizó la vibración libre luego de la Fase 3 por el evidente estado de inestabilidad y colapso parcial del módulo al finalizar el ensayo.

6.3.3. Cortante Basal vs. Desplazamiento Relativo

Los datos obtenidos por el sensor de fuerza nos dan la fuerza aplicada en cada instante para mover la plataforma de la mesa vibradora según la señal utilizada. Considerando únicamente las fuerzas de inercia en el sistema actuador-plataforma

podemos obtener la fuerza cortante aplicada en la base del módulo, restando a este valor la masa de la plataforma y del anillo de cimentación multiplicados por la aceleración de la mesa. La ecuación es la siguiente:

$$V = F_a - (P_p + P_a)A_0 \quad (6.1)$$

Donde:

V : Cortante basal del módulo (kN)

F_a : Fuerza aplicada a la plataforma (kN)

P_p : Peso de la plataforma = 176.58kN (18 000kgf)

P_a : Peso del anillo de cimentación (kN)

A_0 : Aceleración de la plataforma de la mesa vibradora (g)

El desplazamiento relativo (DR) se obtuvo usando la siguiente ecuación:

$$DR_{\#} = D_{\#} - D_0 \quad (6.2)$$

Donde:

$DR_{\#}$: Desplazamiento relativo del instrumento # (mm)

$D_{\#}$: Desplazamiento absoluto del instrumento # (mm)

D_0 : Desplazamiento de la plataforma de la mesa vibradora (mm)

A continuación se muestran los gráficos de Cortante Basal vs. Desplazamiento Relativo de los instrumentos más representativos. Cabe resaltar que la cortante basal corresponde a todo el módulo y no únicamente al muro donde se encuentra el instrumento. Se muestran solo los gráficos correspondientes a la Fase 1 y Fase 2 debido a la ausencia de LVDT's en la Fase 3, como se mencionó anteriormente.

Se observa una gran diferencia entre los gráficos del muro derecho (tarrajado) y el muro izquierdo (no tarrajado). En el primero no se observan grandes desplazamientos y un comportamiento predominantemente elástico con algunas incursiones en el rango inelástico. En el muro izquierdo, en cambio, se observa un comportamiento que excede el límite elástico con una gran disipación de energía. Esta última figura se repite en el muro frontal y el muro posterior.

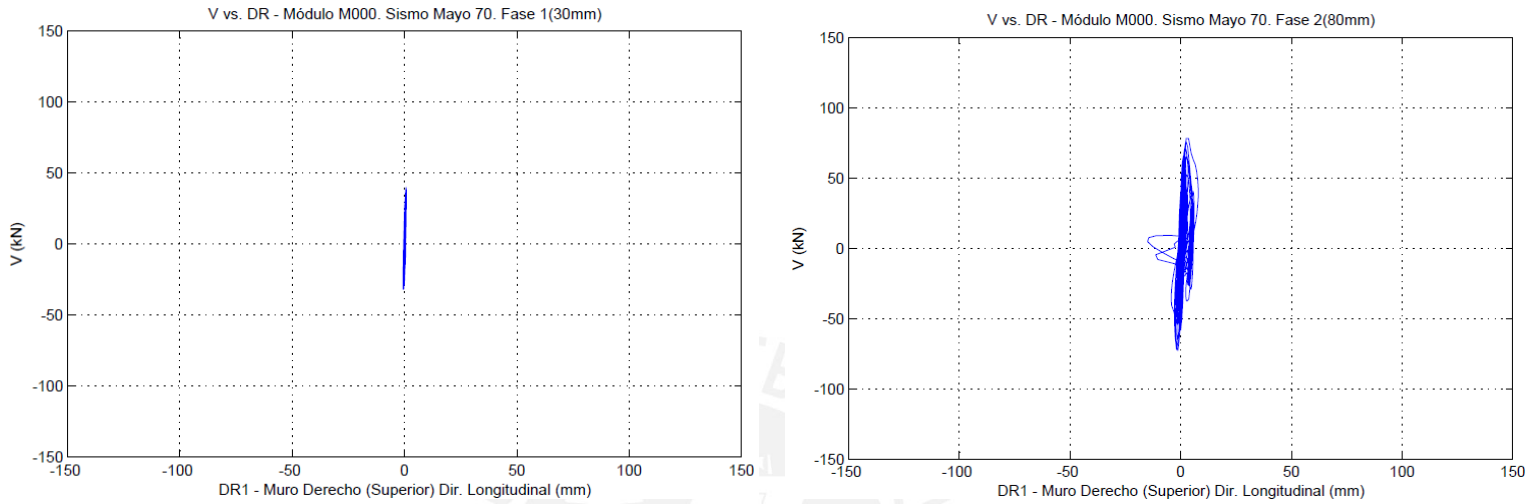


Figura 6.12 Cortante Basal vs. Desplazamiento Relativo – Muro Derecho (Superior) del módulo M000

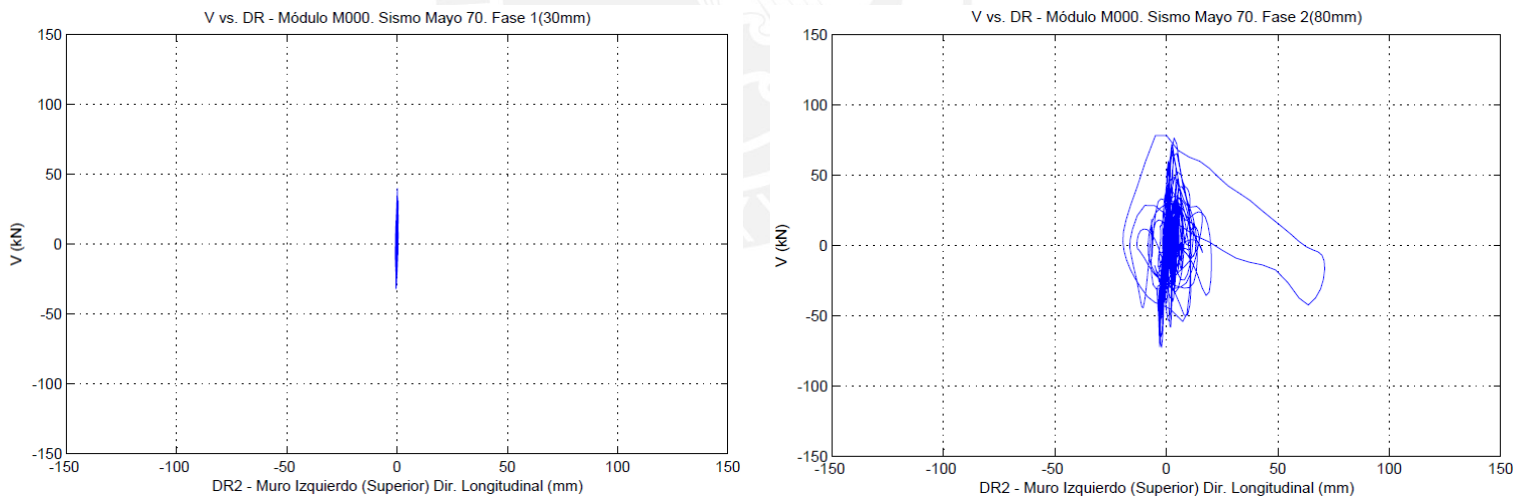


Figura 6.13 Cortante Basal vs. Desplazamiento Relativo – Muro Izquierdo (Superior) del módulo M000

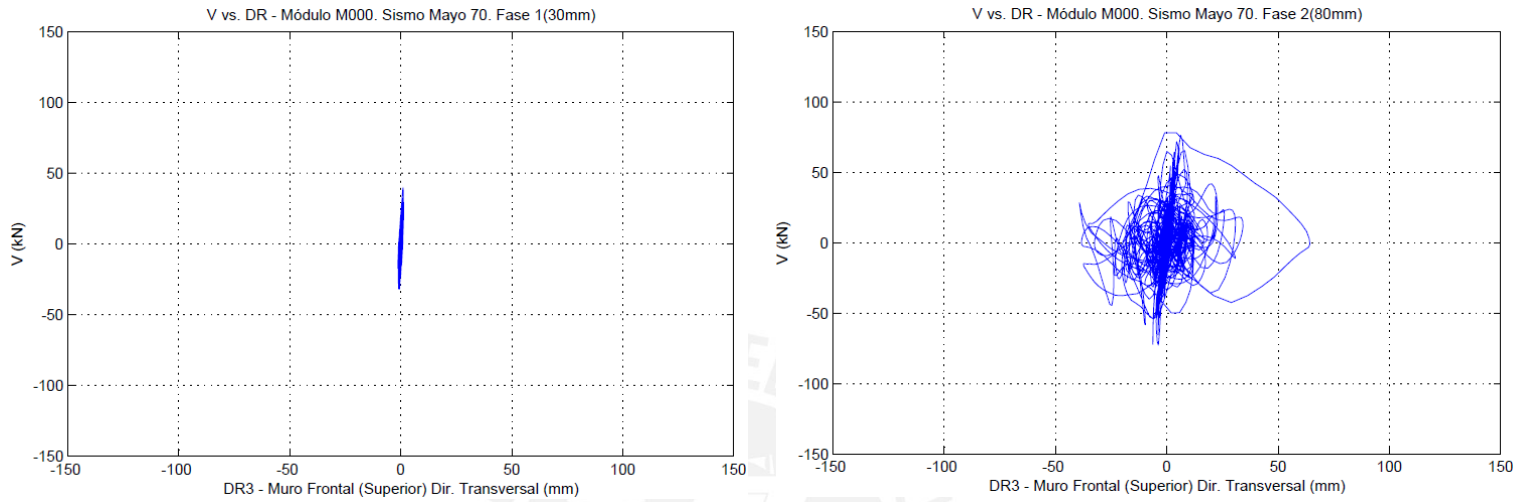


Figura 6.14 Cortante Basal vs. Desplazamiento Relativo – Muro Frontal (Superior) del módulo M000

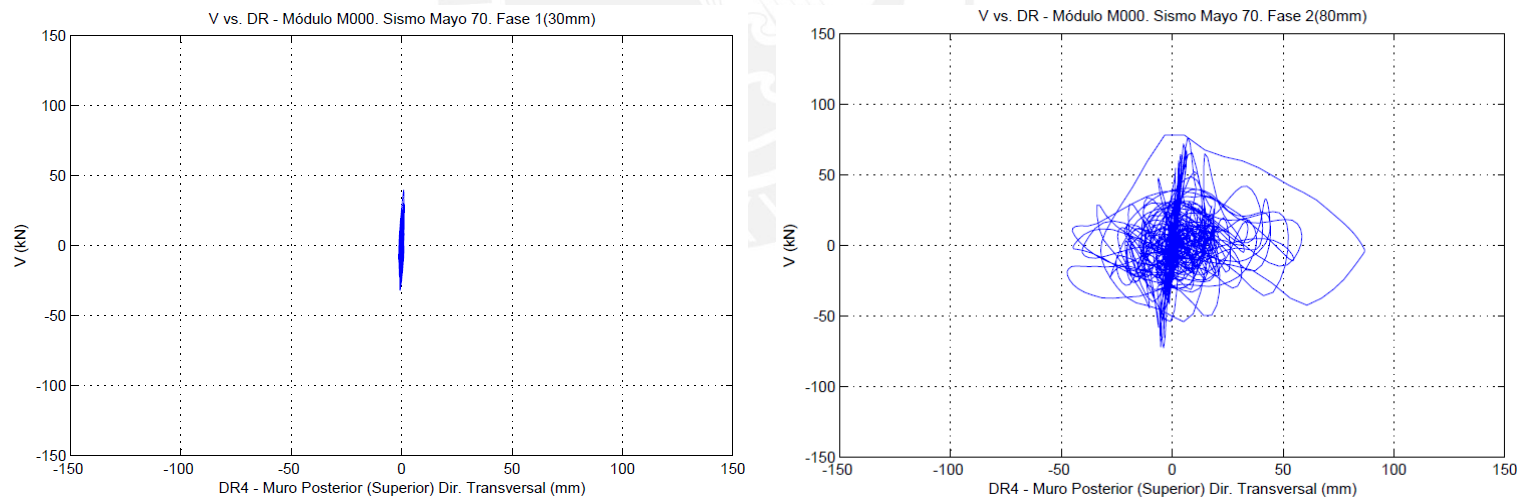


Figura 6.15 Cortante Basal vs. Desplazamiento Relativo – Muro Posterior (Superior) del módulo M000

6.3.4. Envolvente Cortante Basal vs. Desplazamiento Relativo

Se graficó la envolvente (Figura 6.16) a los gráficos obtenidos en el acápite 6.3.3 para poder establecer una comparación del comportamiento entre cada uno de los muros. Para esto, se dividió cada fase de 30 segundos en 12 ventanas de 2.5 segundos de duración. Luego, se identificaron los puntos donde ocurrieron los máximos y mínimos desplazamientos y fuerzas en cada ventana. Por lo tanto, se obtuvo 4 puntos por ventana y 48 por cada fase. Se tomó el valor absoluto a cada punto para pasar los puntos al primer cuadrante y graficar la envolvente.

El comportamiento entre los muros izquierdo, frontal y posterior fue muy similar, con desplazamientos mayores a los 60mm y una gran disminución de la cortante basal luego de alcanzar el valor máximo. El muro derecho tuvo desplazamientos menores a los 10mm y no presentó una disminución de la cortante basal, esto debido a que fue el único muro con tarrajeo, lo que favoreció su comportamiento sísmico.

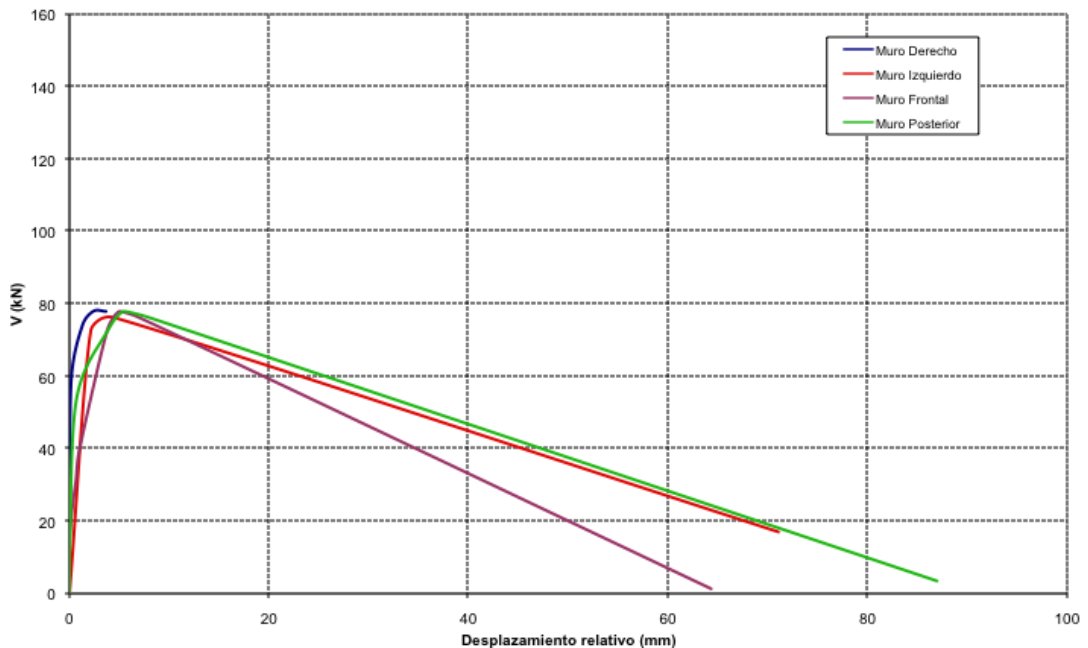


Figura 6.16 Envolventes en el Módulo M000

7. Módulo Reforzado – Ensayo Unidireccional (M100-T4100)

7.1. Introducción

La denominación de este módulo, tomando como referencia investigaciones anteriores, fue M100-T4100 por estar reforzado en el 100% del área de los muros con la geomalla Tensar BX4100.



Figura 7.1. Módulo reforzado M100-T4100

El peso del anillo de concreto armado que se utilizó como base del módulo fue 28.14kN y el peso del módulo incluyendo el tarrajeo fue 131.01 kN, haciendo un total de 159.15 kN. Debido a que este peso estaba ligeramente por debajo del peso admisible de 160kN que puede soportar la grúa para trasladar el módulo desde la zona de construcción a la plataforma de la mesa vibradora, se decidió no añadir más peso y no colocar la cobertura de tejas que usualmente se utiliza sobre la estructura del techo, como en el módulo M000.

Cabe mencionar que el módulo se dejó secar luego de su culminación por 20 días y no llegó a cumplir los 28 días mínimos recomendados de secado para realizar el ensayo, ya que por motivos de programación el ensayo del módulo no podía postergarse. El ensayo se llevó a cabo el día 10 de setiembre de 2008.

La dirección del movimiento de la mesa vibradora fue paralela a los muros con ventanas (muro izquierdo y derecho).

7.2. Ensayo Dinámico

7.2.1. Fase 1 ($\Delta = 30\text{mm}$)

En la Fase 1 se produjeron pequeñas fisuras verticales en el tarrajeo en las esquinas interiores del módulo. También se produjeron pequeñas fisuras diagonales en el tarrajeo de las esquinas de la puerta y ventanas. No se observaron daños estructurales y el daño en el tarrajeo fue casi imperceptible.



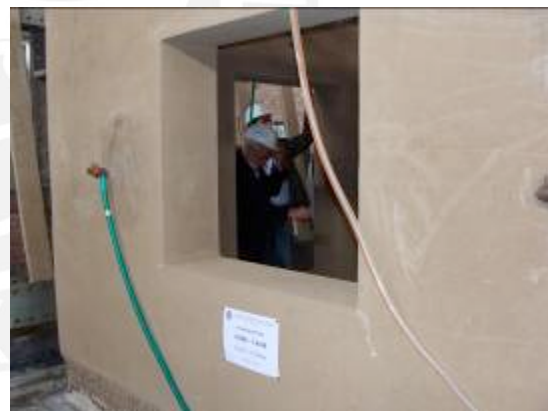
(a) Muro izquierdo



(b) Encuentro interior entre el muro frontal e izquierdo



(c) Encuentro interior entre el izquierdo y posterior



(d) Muro derecho

Figura 7.2. Daños en el módulo M100-T4100 – Post Fase 1 (30mm)

En la Figura 7.3 y 7.4 se muestran los acelerogramas y desplazamientos más significativos registrados en esta fase. Se puede observar la amplificación en los instrumentos con respecto al último gráfico, el cual muestra la aceleración de la mesa. Los muros frontal y posterior tuvieron una mayor amplificación que los muros de corte. El instrumento D7, que medía el desplazamiento relativo local en el muro izquierdo, registró un desfase inicial posiblemente debido al reacomodo del instrumento, ya que no se observó daño alguno en esa zona del muro.

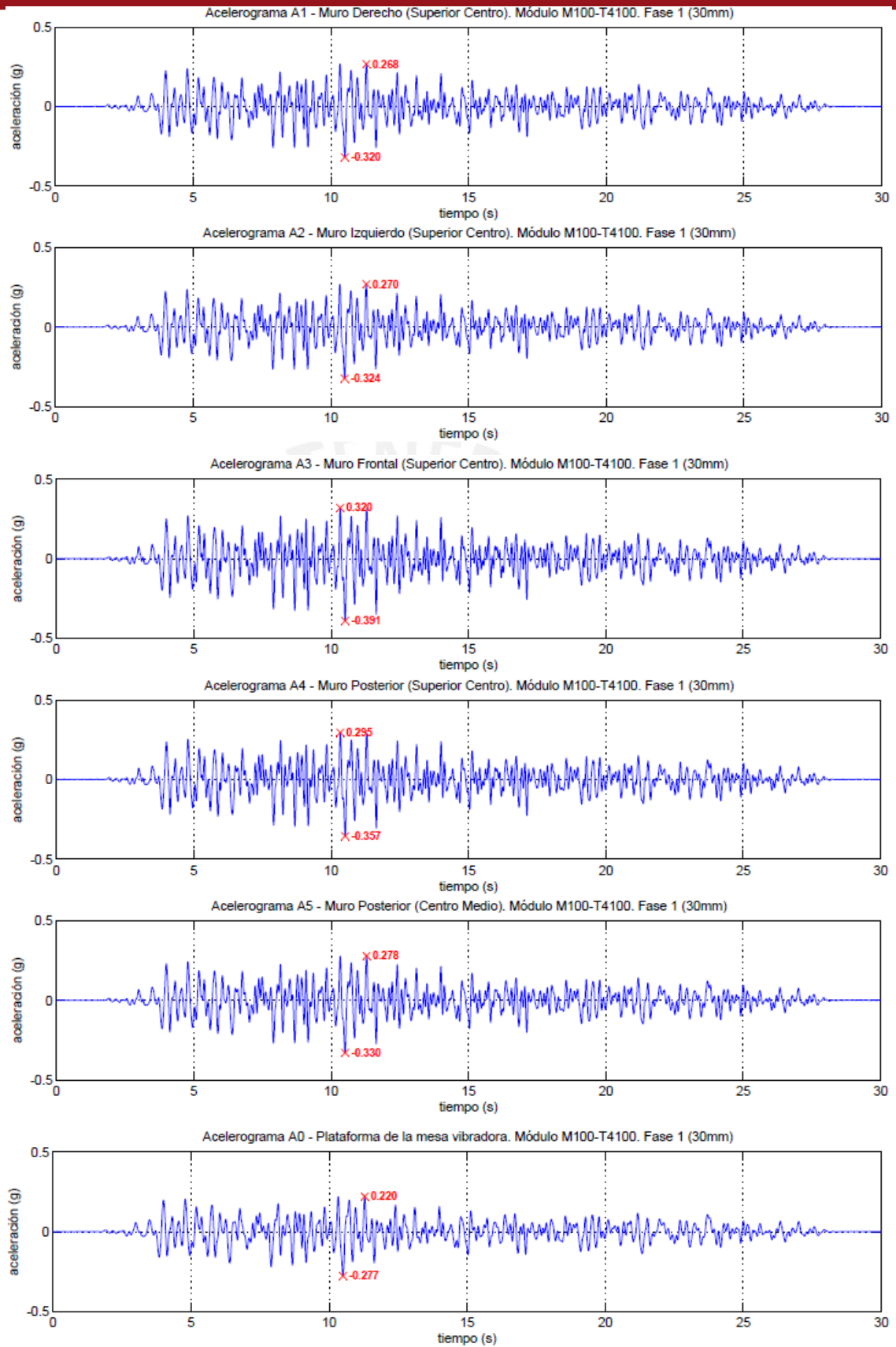


Figura 7.3 Acelerogramas de la Fase 1 (30mm) en el módulo M100-T4100

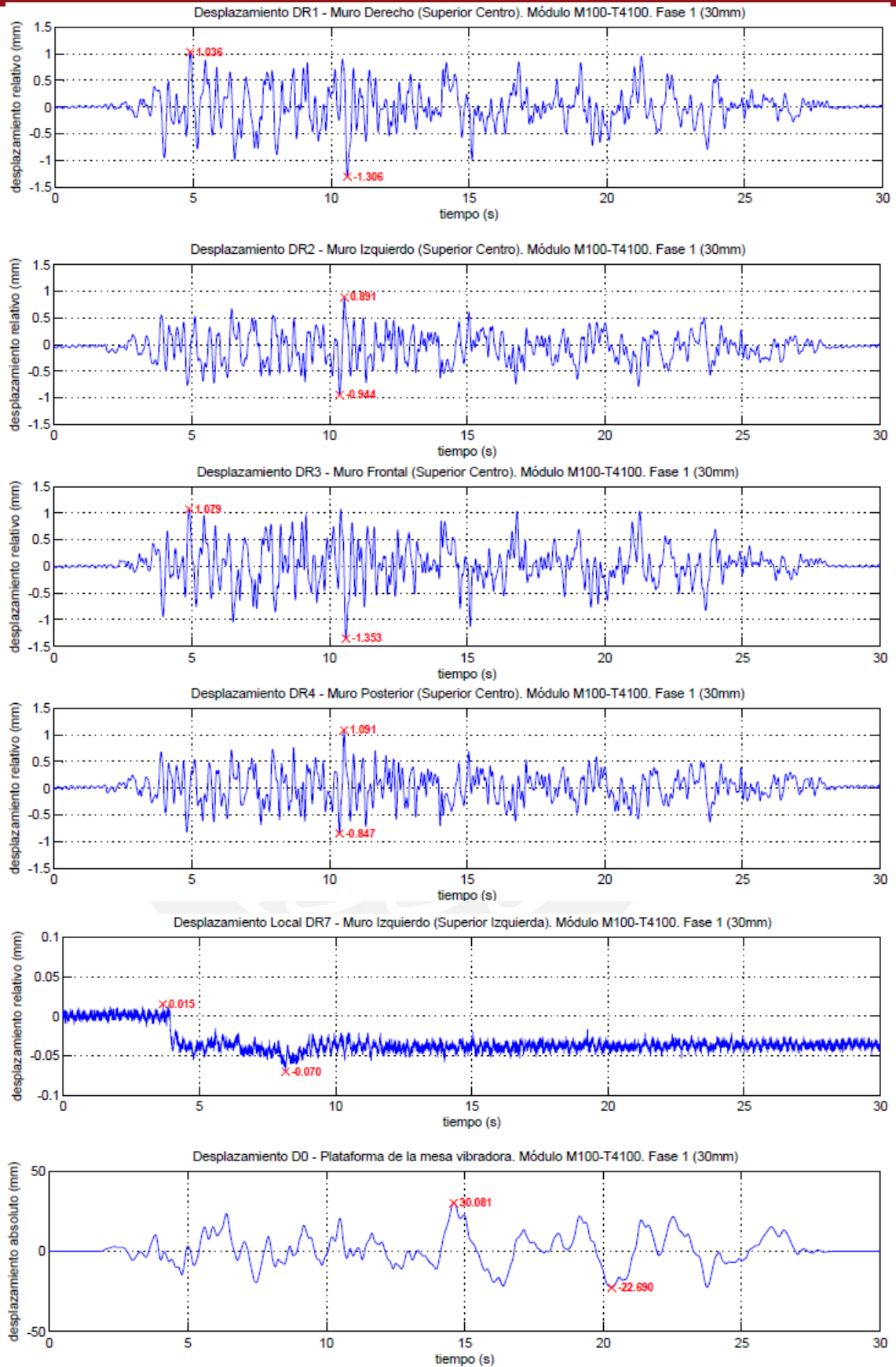


Figura 7.4. Desplazamientos en la Fase 1 (30mm) en el módulo M100-T4100

7.2.2. Fase 2 ($\Delta = 80\text{mm}$)

En la Fase 2 las fisuras diagonales en el tarrajeo de las esquinas de los vanos aumentaron considerablemente. Sin embargo, no se observó mayores daños en los muros. Se presentaron daños leves en el módulo según la clasificación de daños de la Tabla 6.1.



Figura 7.5. Daños en el módulo M100-T4100 – Post Fase 2 (80mm)

En las Figuras 7.6 y 7.7 se muestran las aceleraciones y desplazamientos más representativos registrados en esta fase, respectivamente.

A partir de los 4 segundos de iniciada la fase, se pudo observar desplazamientos significativos en el instrumento D7 que medía el desplazamiento relativo local en el muro izquierdo. Se registró un desplazamiento relativo máximo de 0.2mm, lo que indica que la grieta vertical por fuerzas perpendiculares al muro posterior se empezó a formar.

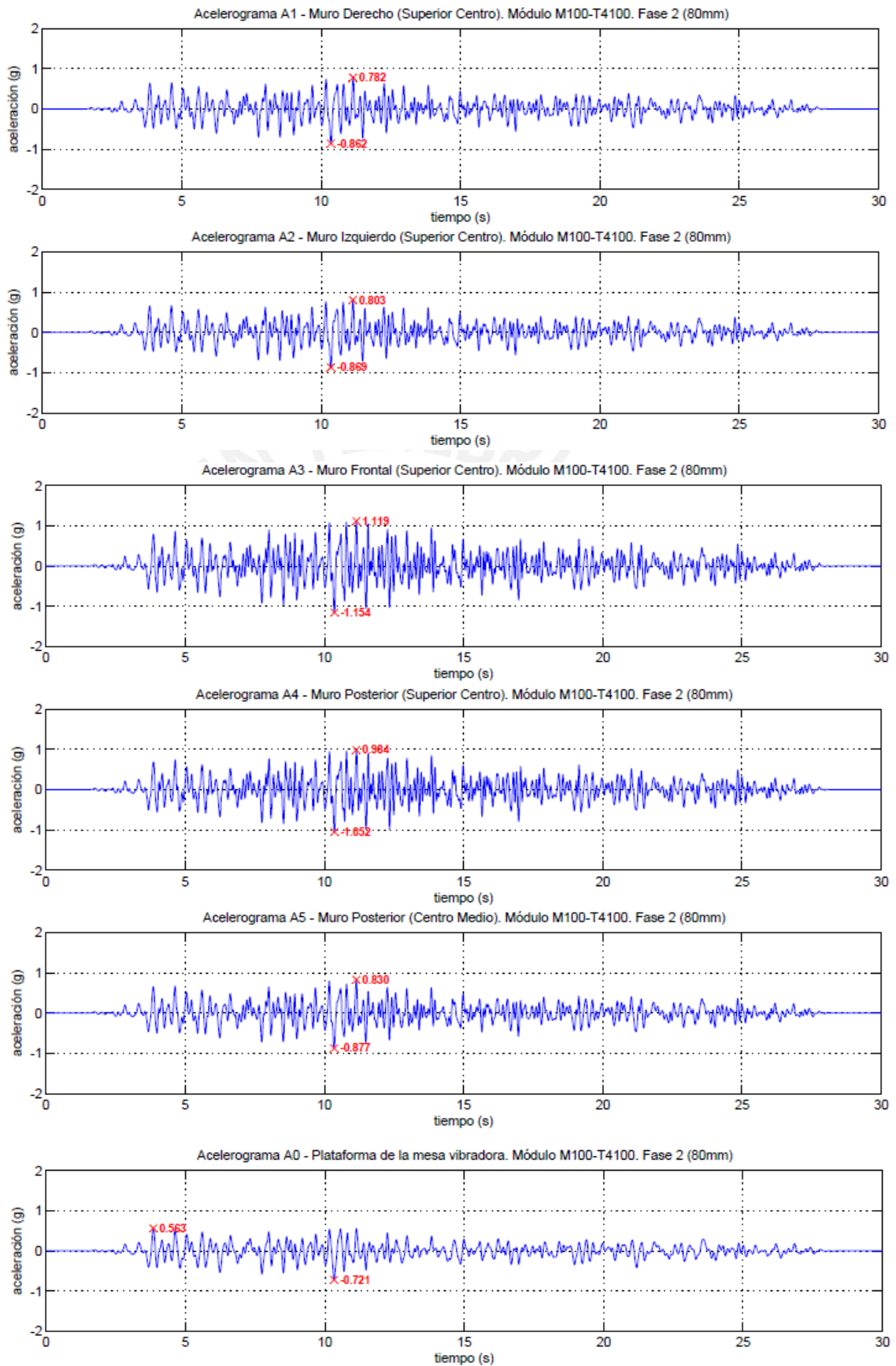


Figura 7.6 Acelerogramas de la Fase 2 (80mm) en el módulo M100-T4100

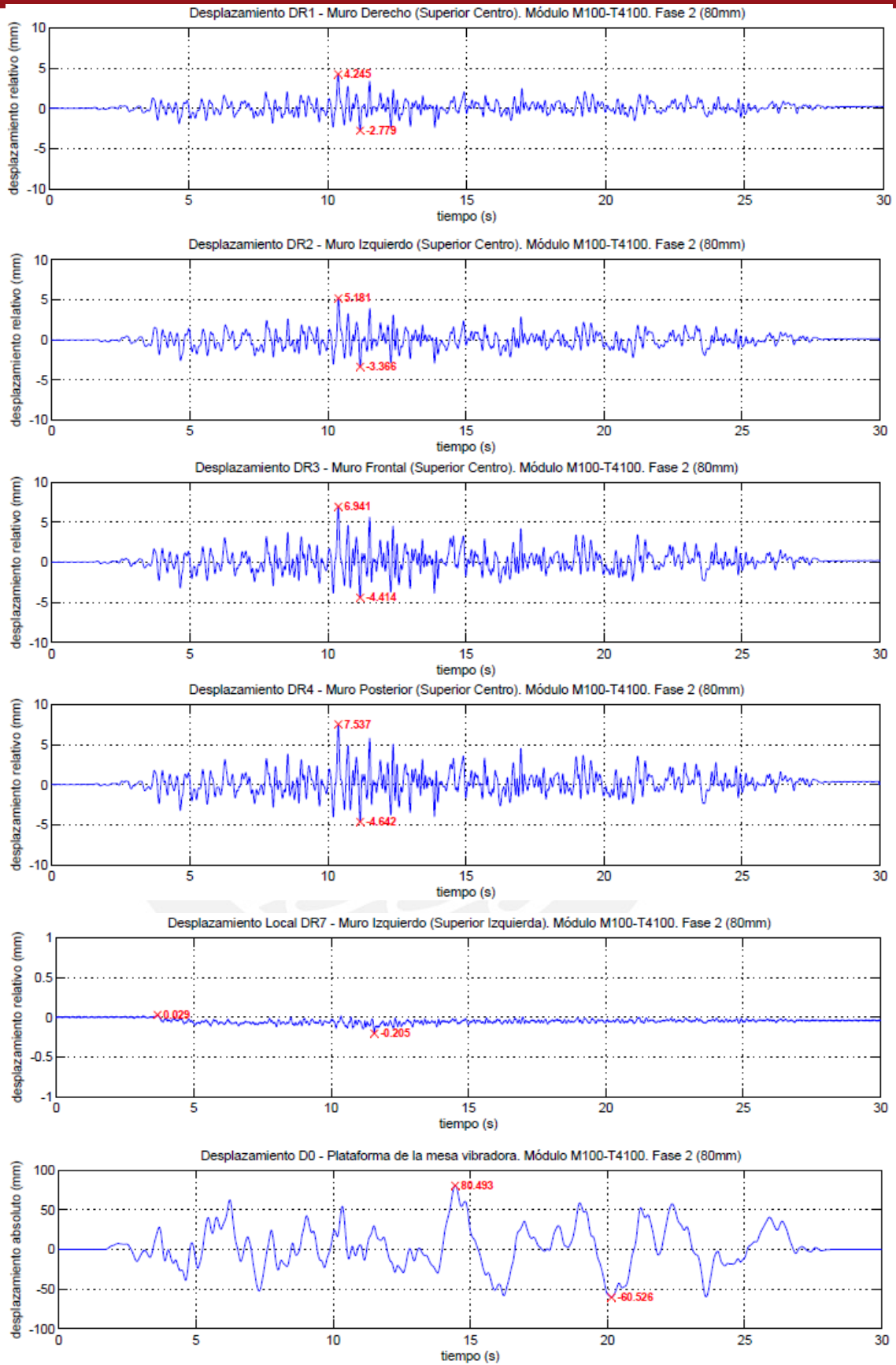


Figura 7.7 Desplazamientos en la Fase 2 (80mm) en el módulo M100-T4100

7.2.3. Fase 3 ($\Delta = 130\text{mm}$)

En la Fase 3 se produjeron desplazamientos relativos considerables, con mayor intensidad en los muros frontal y posterior. Sin embargo, no se presentó deslizamiento alguno en la base de los muros. Se desprendió el tarrajeo en las zonas donde se presentaron grietas por fuerzas cortantes y fuera del plano. Al final del ensayo el módulo presentó daños moderados en los muros pero la integridad de la vivienda no se vio afectada.



(a) Muro derecho (exterior)



(b) Muro izquierdo (exterior)



(c) Muro posterior (interior)



(d) Encuentro entre el muro derecho y posterior

Figura 7.8 Daños en el módulo M100-T4100 – Post fase 3 (130mm)

La envergadura del desprendimiento del tarrajeo en el módulo puede haber sido influenciado por el corto tiempo de secado del módulo, ya que se observó un ligero humedecimiento en los pedazos de tarrajeo que se desprendieron. En las Figuras 7.9 y 7.10 se muestran las aceleraciones y desplazamientos registrados en esta fase, respectivamente. Se puede observar una mayor amplificación en los valores de aceleración y desplazamiento en los muros frontal y posterior en comparación a los muros derecho e izquierdo. Los mayores valores de aceleración se registraron en la parte superior del muro frontal y los mayores valores de desplazamiento en la parte superior del muro posterior.

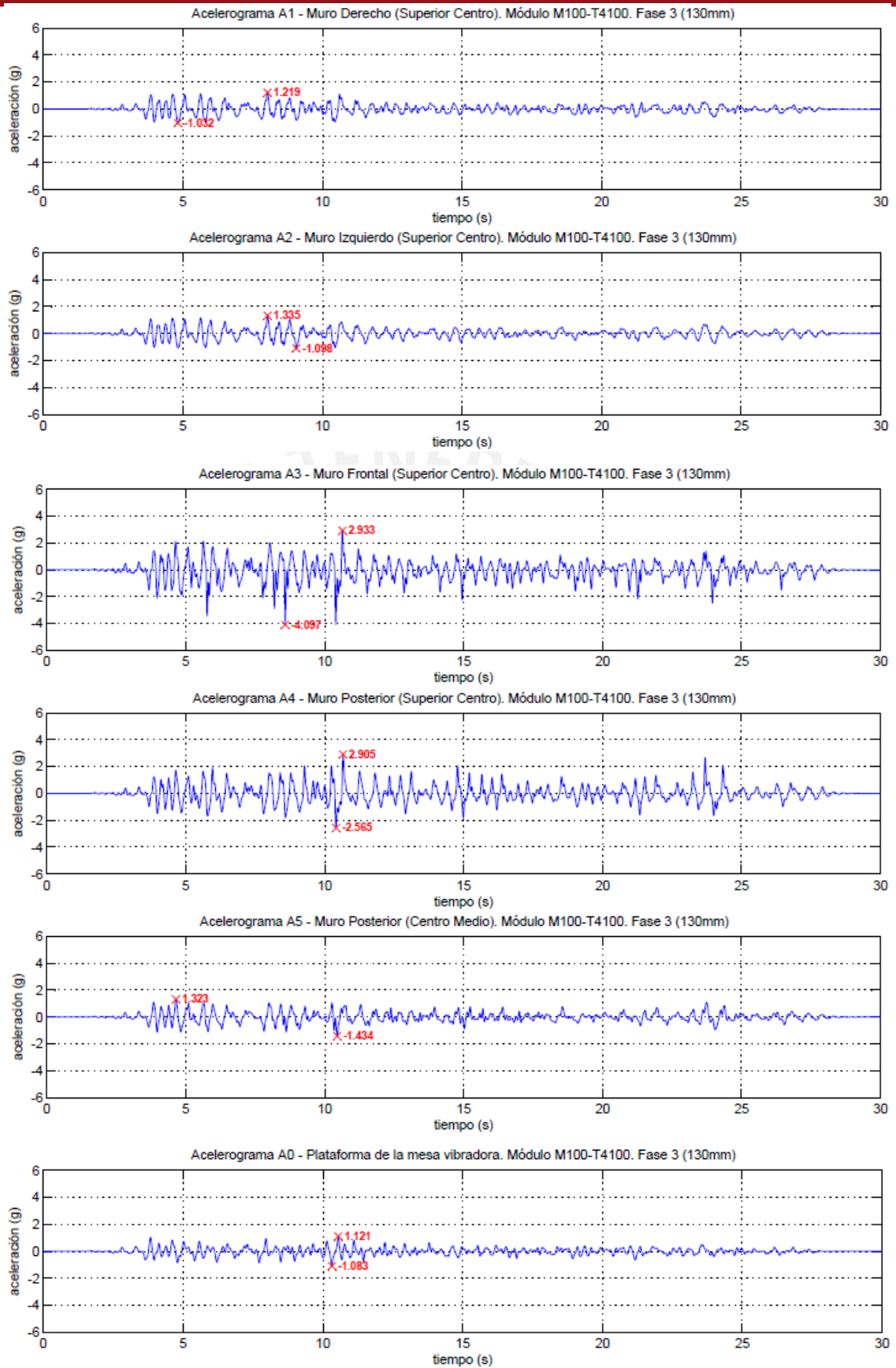


Figura 7.9 Acelerogramas de la Fase 3 (130mm) en el módulo M100-T4100

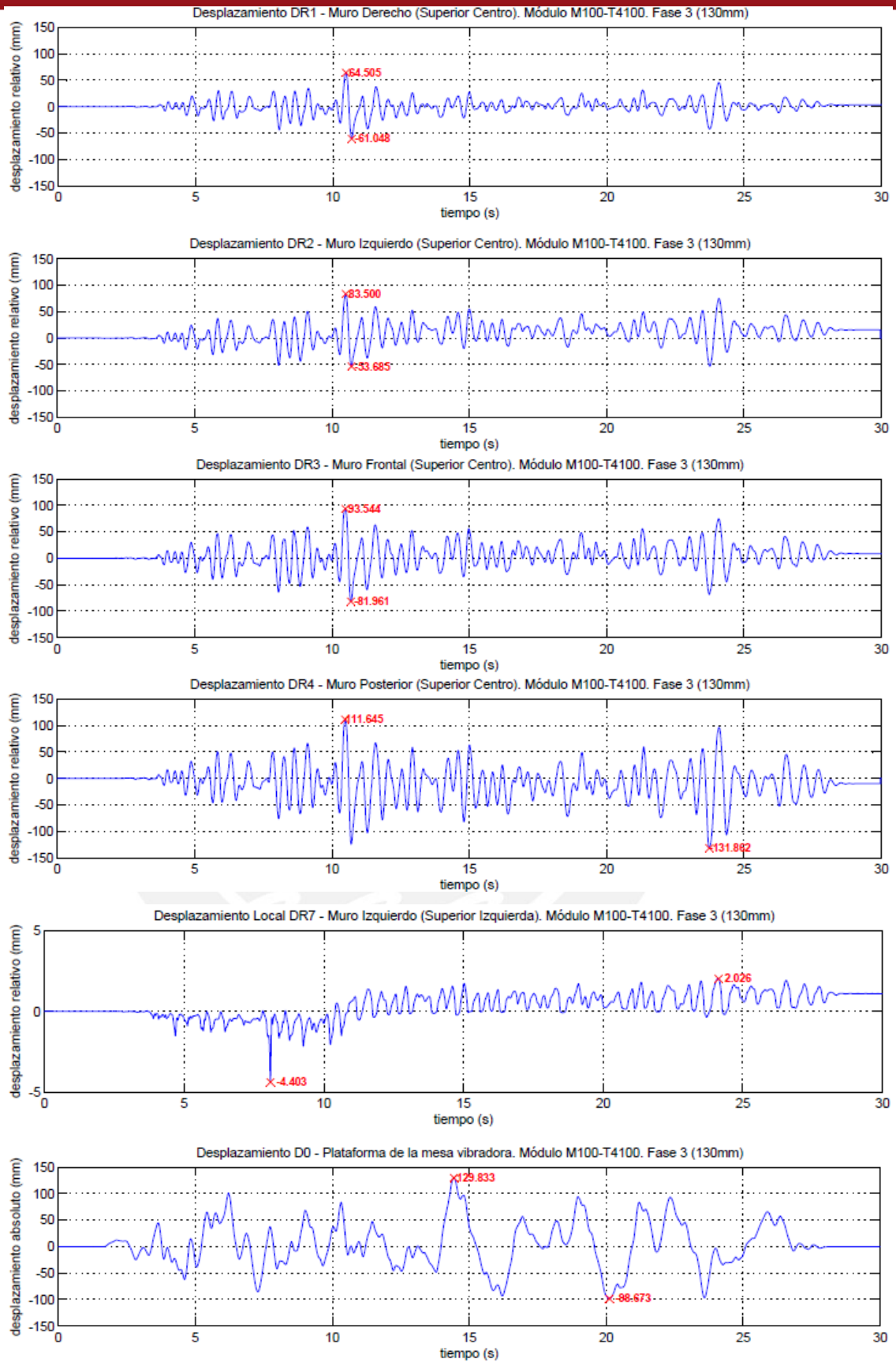


Figura 7.10 Desplazamientos en la Fase 3 (130mm) en el módulo M100-T4100

7.2.4. Plano de Fisuras del Tarrajeo

La identificación de fisuras se realizó al finalizar cada fase y se marcó en los muros a cada una de ellas diferenciándolas por colores. El color negro se utilizó para identificar las fisuras generadas durante la primera fase, el rojo para la segunda fase y el azul para la tercera fase. Las zonas sombreadas denotan los lugares donde el tarrajeo se desprendió del muro.

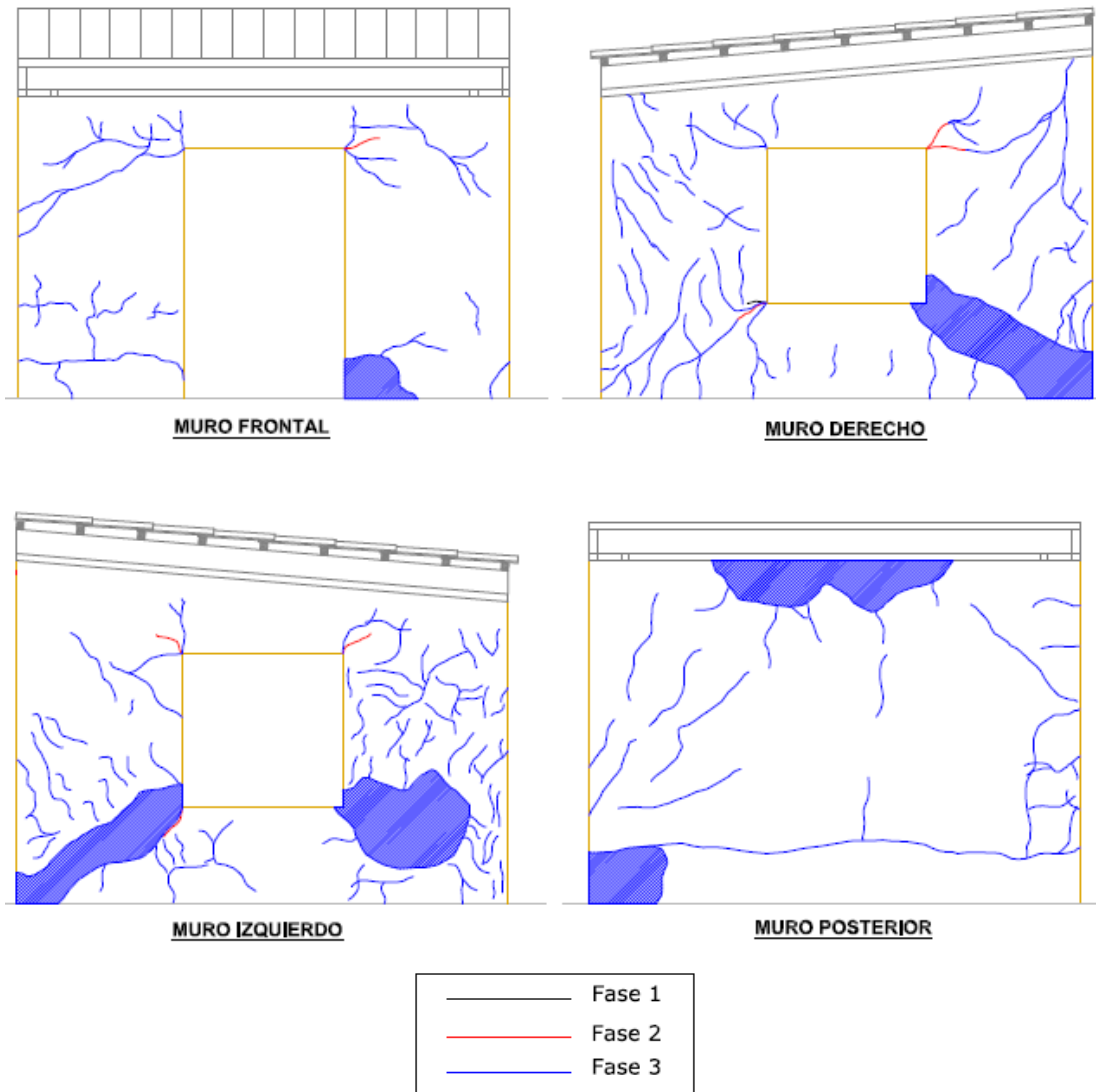


Figura 7.11 Fisuras en tarrajeo exterior – Módulo M100-T4100

Se pudo observar el desprendimiento del tarrajeo en las zonas donde el módulo experimentó las mayores fuerzas cortante y de flexión. Además, como se mencionó anteriormente, se pudo haber favorecido el desprendimiento del tarrajeo debido a que la fecha del ensayo se adelantó algunos días y no se cumplieron los 28 días

recomendados de secado desde la colocación del tarrajeo hasta la fecha del ensayo.

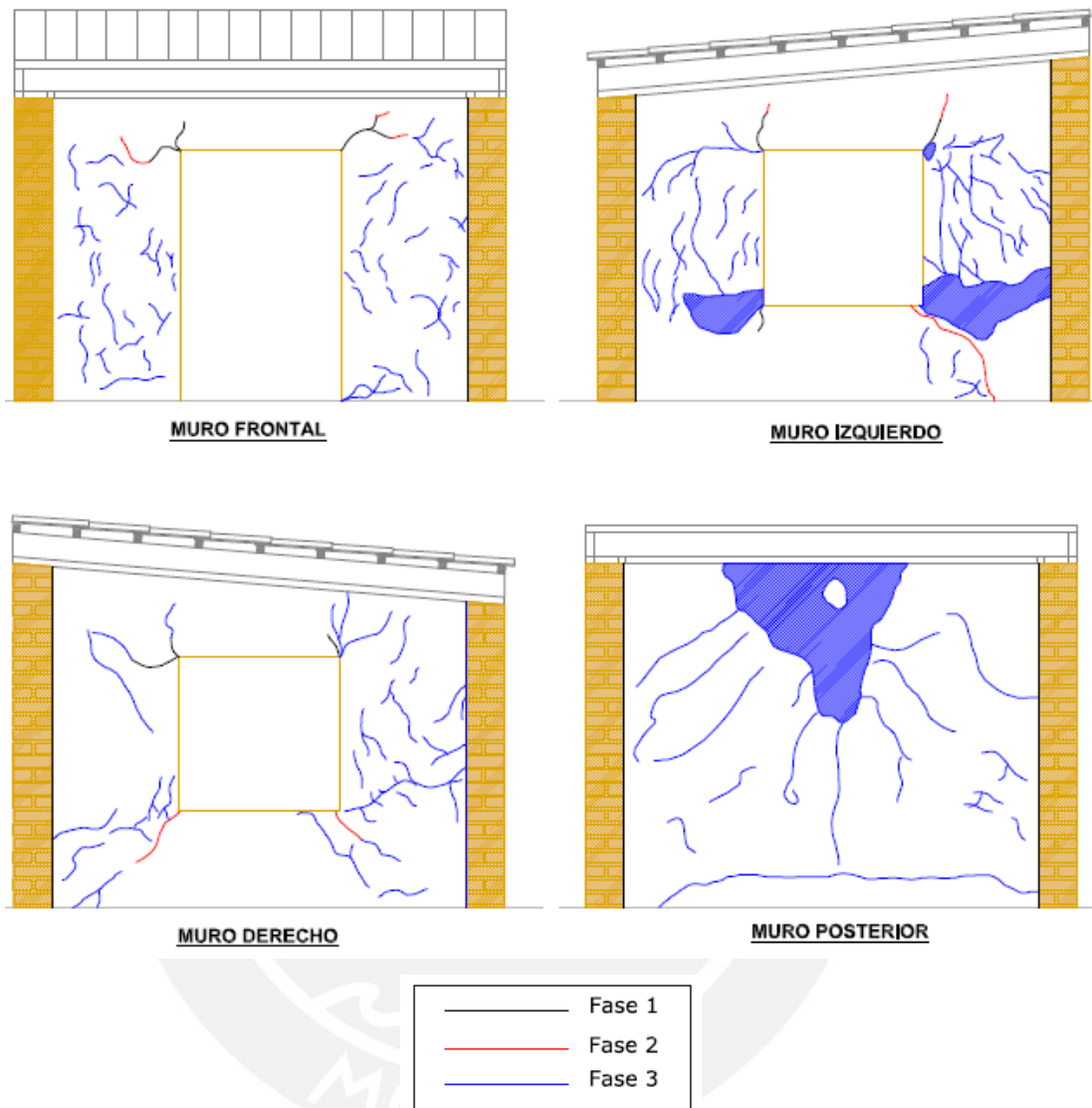


Figura 7.12 Fisuras en tarrajeo interior – Módulo M100-T4100

Casi la totalidad de las fisuras en el tarrajeo se produjeron recién en la Fase 3. Además, se puede observar la gran distribución de las fisuras del tarrajeo en toda la superficie de los muros, lo que indica que la geomalla favoreció en la distribución de las fuerzas en los muros.

7.2.5. Plano de Daños de la Geomalla

Finalizado el ensayo se removió el tarrajeo para observar los daños en el refuerzo de geomalla. Las roturas en la geomalla se denotaron con color rojo.

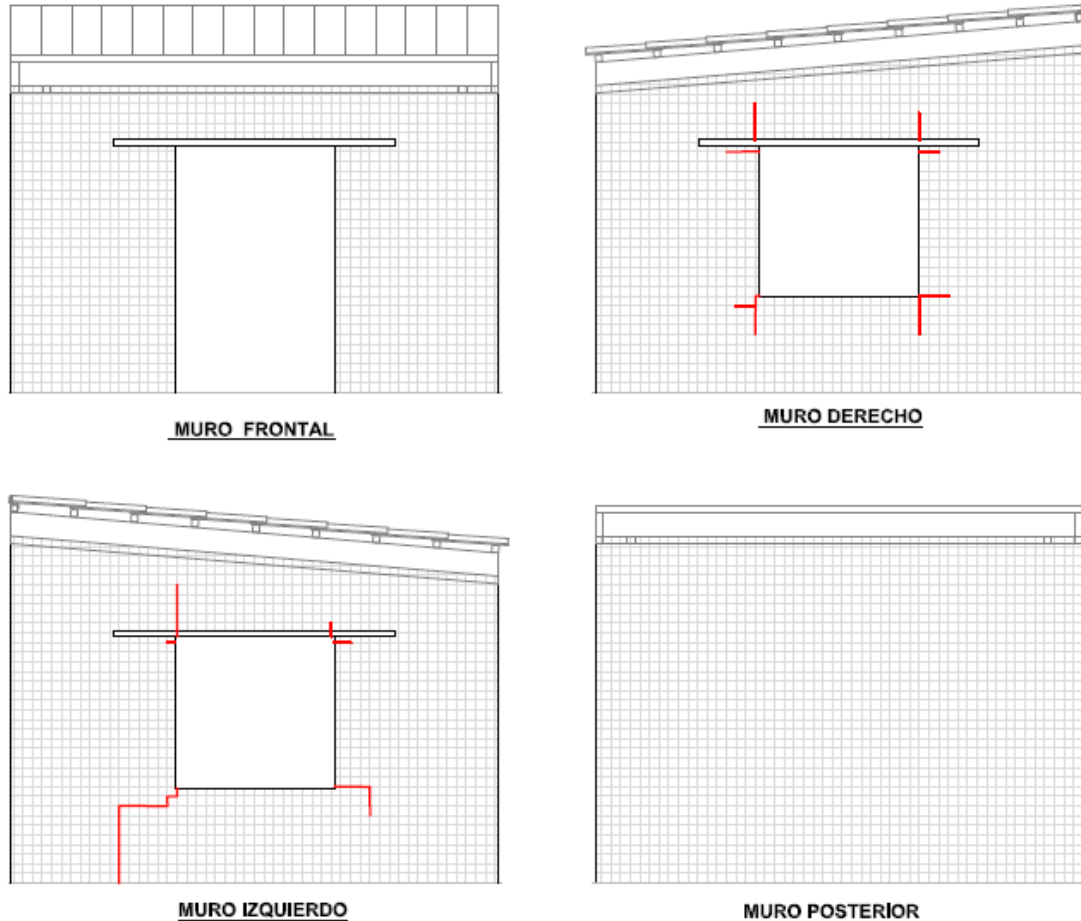


Figura 7.13 Daños en geomalla exterior – Módulo M100-T4100

Las roturas en la geomalla se produjeron exclusivamente en las ventanas de los muros de corte (muros derecho e izquierdo). En la mayoría de las esquinas de ambas ventanas se observó la rotura de solo unas pocas costillas de geomalla, sin embargo, en la esquina inferior izquierda del exterior del muro izquierdo se observó una gran rotura de la geomalla. Esto indica que en estas zonas hubo una mayor concentración de esfuerzos de tracción, evidenciando que las fuerzas de tracción fueron mayores a la resistencia última de la geomalla BX4100 de 12.8kN/m.



Figura 7.14 Rotura de geomalla exterior en la esquina inferior izquierda del muro izquierdo

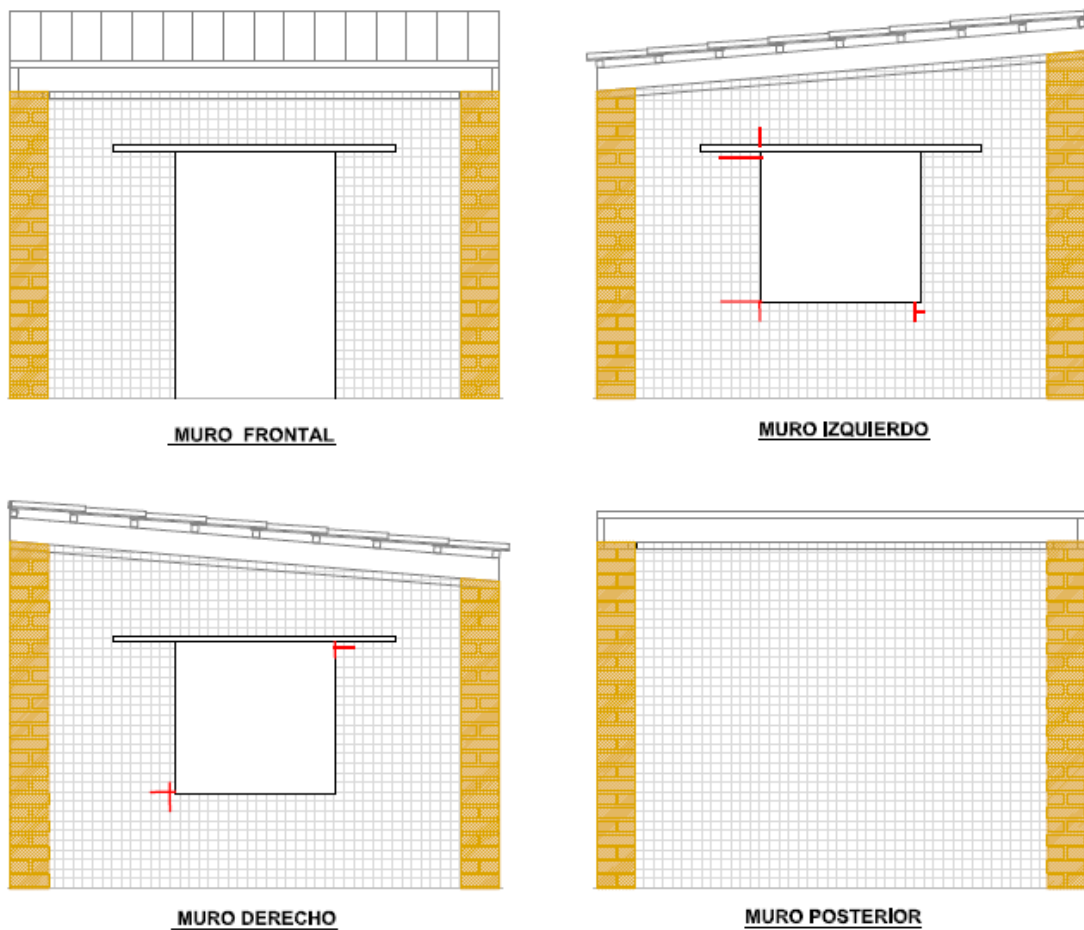


Figura 7.15 Daños en geomalla interior – Módulo M100-T4100

También se produjo la rotura de la geomalla en los paños interiores de los muros derecho e izquierdo. Sin embargo, el daño en estos paños fue menor al presentado en los paños exteriores.

7.2.6. Plano de Fisuras y Grietas de Muros

Luego de finalizado el ensayo y de remover el tarrajeo, se retiró la geomalla para observar los daños en los muros. Las fisuras se identificaron con color negro y las grietas con color rojo. Las fisuras se clasificaron por un grosor menor o igual a 0.5mm. Las grietas se clasificaron por un grosor mayor a 0.5mm. Este límite es netamente referencial y se usó con el propósito de diferenciar el grado de los daños. Las zonas sombreadas indican los lugares donde el adobe se desmoronó.

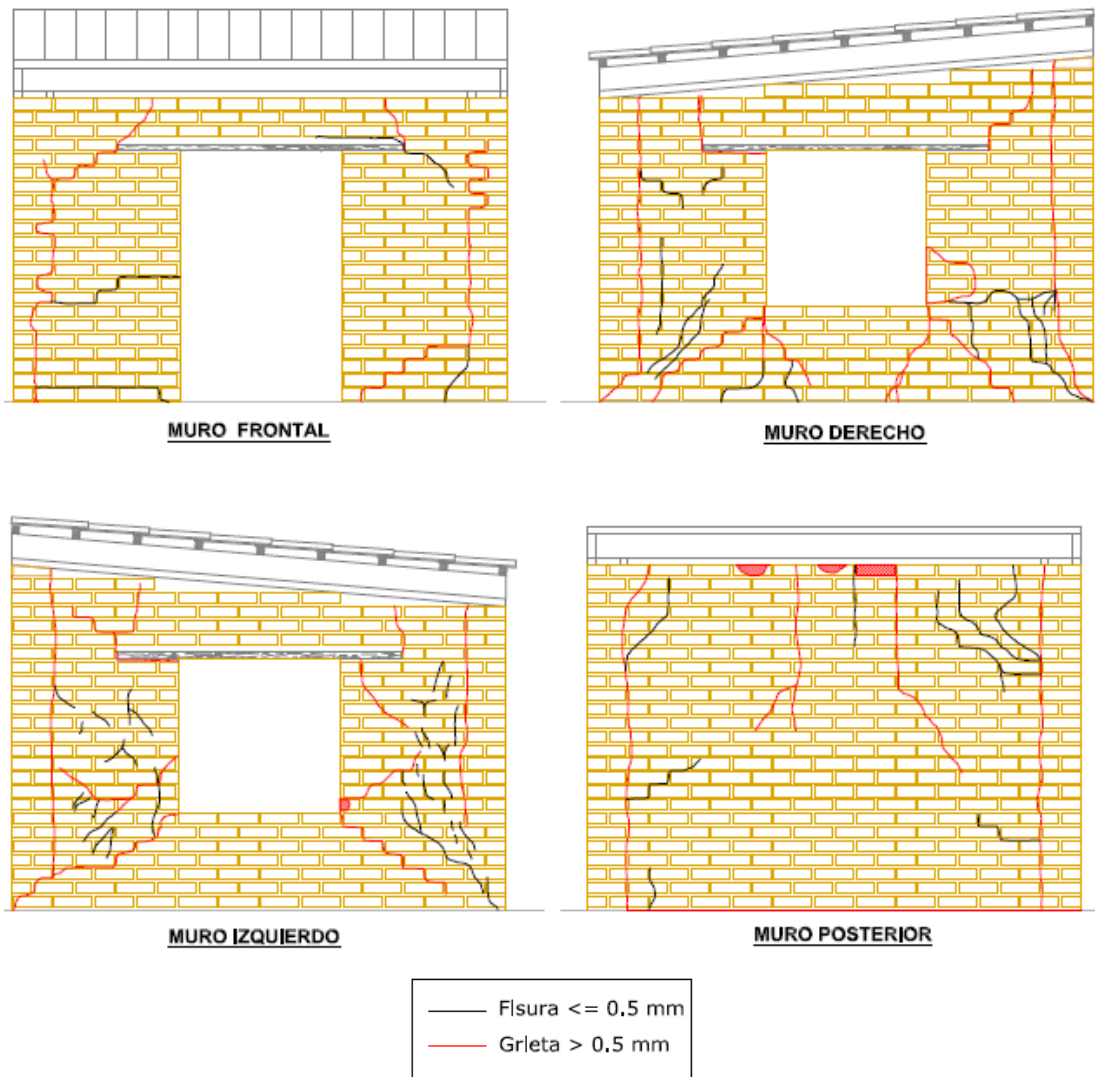


Figura 7.16 Fisuras y grietas exteriores en muros – Módulo M100-T4100

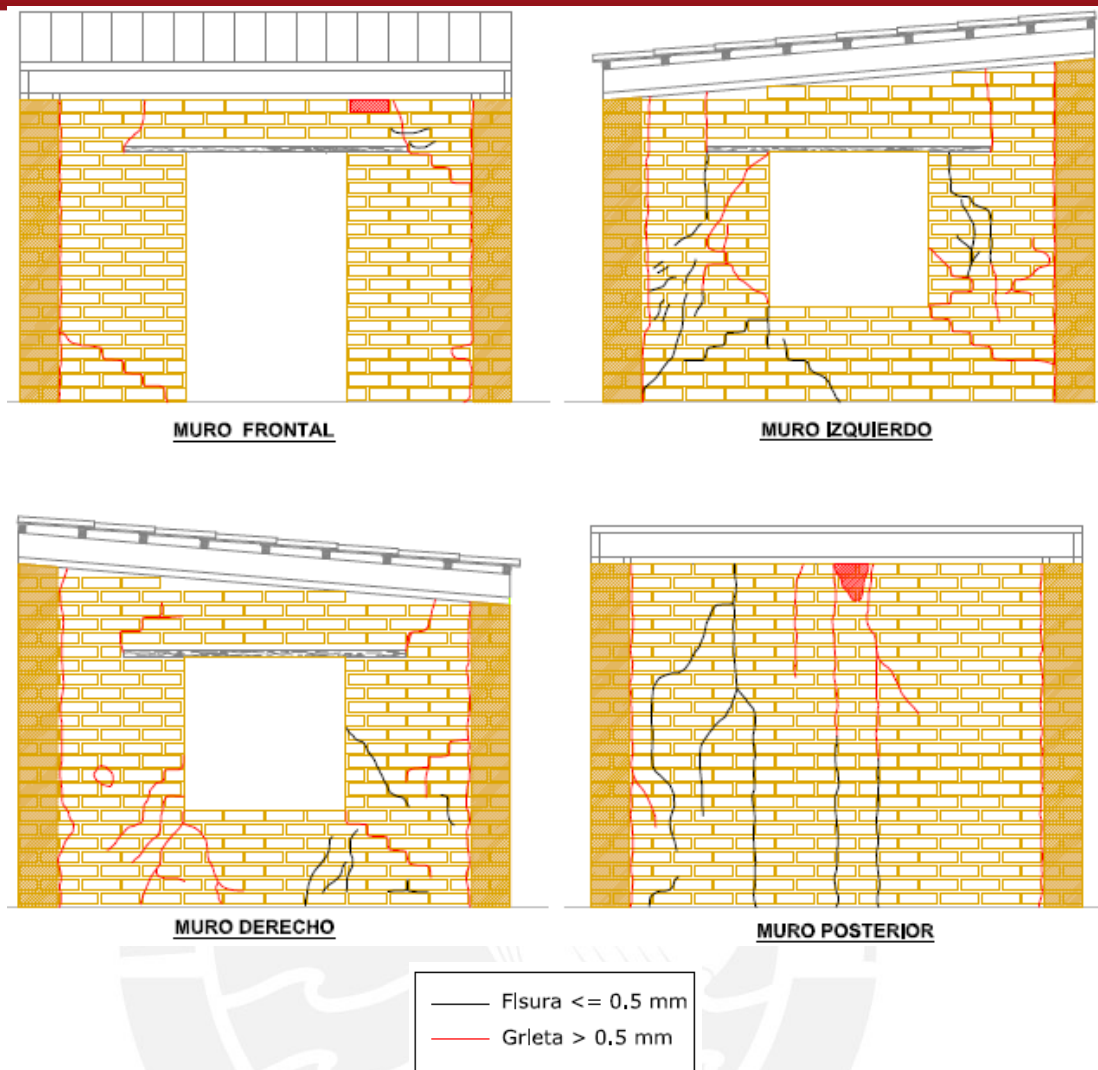


Figura 7.17 Fisuras y grietas interiores en muros – Módulo M100-T4100

Se puede observar que en el módulo se formaron grietas verticales en las esquinas por fuerzas fuera del plano, grietas verticales por flexión en el centro del muro posterior y grietas diagonales por fuerzas cortantes en el muro derecho e izquierdo. Sin embargo, por el confinamiento que brinda la geomalla a los muros, estos daños no llegaron a poner en peligro la estructura.

También se pudo corroborar lo observado en el tarrajeo de los muros, que fue una gran distribución de las fisuras y grietas en toda la superficie de los muros debido a que la geomalla distribuyó las fuerzas de tracción.

7.3. Interpretación de Resultados

7.3.1. Valores Máximos

A continuación se resumen los valores máximos registrados en los instrumentos durante las fases de ensayo:

Tabla 7.1. Solicitaciones máximas registradas en la mesa vibradora (M100-T4100)

| Instrumento | Fase 1 | Fase 2 | Fase 3 |
|-------------|---------|---------|---------|
| A0 (g) | 0.277 | 0.721 | 1.121 |
| D0 (mm) | 30.081 | 80.493 | 129.833 |
| Fa (kN) | 101.527 | 277.464 | 355.929 |
| V (kN) | 44.842 | 130.189 | 147.022 |

Tabla 7.2. Aceleraciones máximas registradas en el módulo M100-T4100 (g)

| Instrumento | Descripción | Fase 1 | Fase 2 | Fase 3 |
|-------------|---|--------|--------|--------|
| A0 | Plataforma de la Mesa Vibradora | 0.277 | 0.721 | 1.121 |
| A1 | Muro Derecho (Superior centro) | 0.320 | 0.862 | 1.219 |
| A2 | Muro Izquierdo (Superior centro) | 0.324 | 0.869 | 1.335 |
| A3 | Muro Frontal (Superior centro) | 0.391 | 1.154 | 4.097 |
| A4 | Muro Posterior (Superior centro) | 0.357 | 1.052 | 2.905 |
| A5 | Muro Posterior (Centro medio) | 0.330 | 0.877 | 1.434 |
| A6 | Muro Posterior (Superior izquierdo) | 0.331 | 0.906 | 1.931 |
| A7 | Muro Posterior (Superior derecha) | 0.285 | 0.843 | 1.956 |
| A8 | Muro Derecho (Centro derecha) | 0.305 | 0.792 | 1.598 |
| A9 | Muro Derecho (Centro izquierda) | 0.305 | 0.835 | 1.274 |
| A10 | Muro Frontal (Centro derecha) | 0.309 | 0.847 | 1.332 |
| Amáx | Aceleración máxima en la Fase | 0.391 | 1.154 | 4.097 |
| FADmáx | Factor de amplificación dinámico máximo | 1.412 | 1.601 | 3.655 |

Tabla 7.3. Desplazamientos absolutos máximos en el módulo M100-T4100 (mm)

| Instrumento | Descripción | Fase 1 | Fase 2 | Fase 3 |
|-------------|-------------------------------------|--------|--------|---------|
| D0 | Plataforma de la Mesa Vibradora | 30.081 | 80.493 | 129.833 |
| D1 | Muro Derecho (Superior centro) | 30.219 | 81.429 | 138.311 |
| D2 | Muro Izquierdo (Superior centro) | 30.183 | 81.467 | 154.465 |
| D3 | Muro Frontal (Superior centro) | 30.174 | 83.435 | 158.570 |
| D4 | Muro Posterior (Superior centro) | 30.183 | 83.029 | 200.649 |
| D5 | Muro Posterior (Centro medio) | 30.378 | 82.105 | 149.225 |
| D6 | Muro Derecho (Superior Derecha) | – | – | – |
| D7 | Muro Izquierdo (Superior Izquierda) | – | – | – |
| D8 | Muro Derecho (Centro Derecha) | 30.150 | 81.939 | 142.792 |

Tabla 7.4. Desplazamientos relativos máximos en el módulo M100-T4100 (mm)

| Instrumento | Descripción | Fase 1 | Fase 2 | Fase 3 |
|-------------|-------------------------------------|--------|--------|---------|
| DR1 | Muro Derecho (Superior centro) | 1.306 | 4.245 | 64.505 |
| DR2 | Muro Izquierdo (Superior centro) | 0.944 | 5.181 | 83.500 |
| DR3 | Muro Frontal (Superior centro) | 1.353 | 6.941 | 93.544 |
| DR4 | Muro Posterior (Superior centro) | 1.091 | 7.537 | 131.862 |
| DR5 | Muro Posterior (Centro medio) | 1.087 | 4.934 | 85.412 |
| DR6 | Muro Derecho (Superior Derecha) | 0.022 | 0.099 | 2.667 |
| DR7 | Muro Izquierdo (Superior Izquierda) | 0.070 | 0.205 | 4.403 |
| DR8 | Muro Derecho (Centro Derecha) | 0.540 | 3.219 | 55.511 |

7.3.2. Periodo Natural de Vibración y Coeficiente de Amortiguamiento

A continuación se muestran los periodos naturales de vibración obtenidos durante las vibraciones libres:

Tabla 7.5 Periodos naturales en vibraciones libres en el módulo M100-T4100 (s)

| Instrumento | Descripción | Inicial | Post-Fase 1 | Post-Fase 2 | Post-Fase 3 |
|-------------|-------------------------------------|---------|-------------|-------------|-------------|
| A1 | Muro Derecho (Superior centro) | 0.08 | 0.09 | 0.09 | 0.11 |
| A2 | Muro Izquierdo (Superior centro) | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.25 |
| A3 | Muro Frontal (Superior centro) | 0.07 | 0.08 | 0.09 | 0.14 |
| A4 | Muro Posterior (Superior centro) | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.26 |
| A5 | Muro Posterior (Centro medio) | 0.08 | 0.08 | 0.09 | 0.26 |
| A6 | Muro Posterior (Superior izquierdo) | 0.07 | 0.08 | 0.09 | 0.24 |
| A7 | Muro Posterior (Superior derecha) | 0.08 | 0.08 | 0.09 | 0.25 |
| A8 | Muro Derecho (Centro derecha) | 0.08 | 0.08 | 0.09 | 0.24 |
| A9 | Muro Derecho (Centro izquierda) | 0.08 | 0.08 | 0.09 | 0.24 |
| A10 | Muro Frontal (Centro derecha) | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.18 |

En la Tabla 7.5 se observa que los periodos en los muros no sufrieron mayor variación hasta después de la Fase 2. Luego de la Fase 3, los valores se incrementaron hasta tres veces su valor inicial lo que indica la presencia de daño.

El periodo que tuvieron los desplazamientos de la plataforma de la mesa vibradora durante las vibraciones libres, similar a lo mostrado en la Figura 4.7, varió entre 0.22s a 0.28s. Se observó que estas distorsiones no influenciaron los valores obtenidos hasta la vibración libre Post-Fase 2, sin embargo, en la última vibración libre la lectura de los periodos si se vio alterada por las distorsiones durante la vibración libre en la mesa vibradora.

Tabla 7.6 Coeficientes de amortiguamiento en vibraciones libres en el módulo M100-T4100

| Instrumento | Descripción | Inicial | Post-Fase 1 | Post-Fase 2 | Post-Fase 3 |
|-------------|-------------------------------------|---------|-------------|-------------|-------------|
| A1 | Muro Derecho (Superior centro) | 7.94% | 11.46% | 11.88% | 16.04% |
| A2 | Muro Izquierdo (Superior centro) | 8.57% | 9.89% | 11.39% | 17.09% |
| A3 | Muro Frontal (Superior centro) | 6.89% | 10.65% | 11.70% | 14.70% |
| A4 | Muro Posterior (Superior centro) | 8.70% | 8.30% | 9.64% | 12.71% |
| A5 | Muro Posterior (Centro medio) | 6.26% | 9.33% | 10.83% | 12.01% |
| A6 | Muro Posterior (Superior izquierdo) | 7.32% | 9.63% | 13.22% | 14.16% |
| A7 | Muro Posterior (Superior derecha) | 9.33% | 10.12% | 11.04% | 13.19% |
| A8 | Muro Derecho (Centro derecha) | 6.77% | 9.42% | 11.29% | 15.64% |
| A9 | Muro Derecho (Centro izquierda) | 9.55% | 9.92% | 13.15% | 13.80% |
| A10 | Muro Frontal (Centro derecha) | 9.66% | 11.57% | 11.49% | 15.45% |

Los coeficientes de amortiguamiento se incrementaron gradualmente durante las fases, llegando a un incremento del 41 al 131% de su valor inicial lo que evidencia un cierto grado de daño.

7.3.3. Cortante Basal vs. Desplazamiento Relativo

A continuación se muestran los gráficos de Cortante Basal vs. Desplazamiento relativo de los instrumentos más representativos. Cabe resaltar que la cortante basal corresponde a todo el módulo y no únicamente al muro donde se encuentra el instrumento. Se muestran los gráficos correspondientes a la Fase 1, Fase 2 y Fase 3.

Se observa una gran diferencia entre los gráficos de la Fase 1 y 2 con respecto a la Fase 3. En las primeras dos fases no se observan grandes desplazamientos y es notorio un comportamiento elástico. En la Fase 3, en cambio, se observa un comportamiento que excede el límite elástico con una gran disipación de energía en los cuatro muros. En los muros frontal y posterior esta disipación fue mayor al registrarse desplazamientos mayores que en los muros de corte.

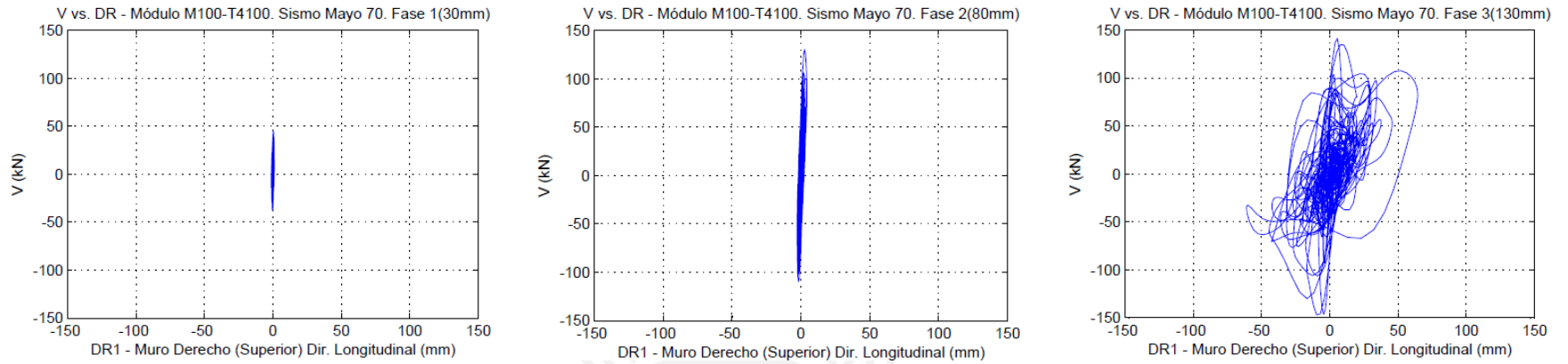


Figura 7.18 Cortante Basal vs. Desplazamiento relativo – Muro Derecho (Superior) del módulo M100-T4100

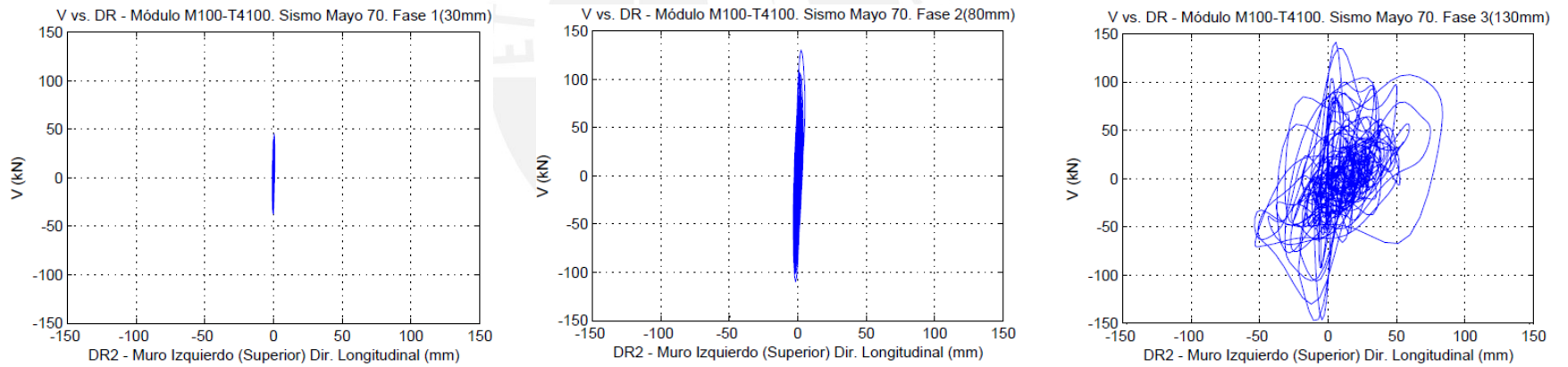


Figura 7.19 Cortante Basal vs. Desplazamiento relativo – Muro Izquierdo (Superior) del módulo M100-T4100

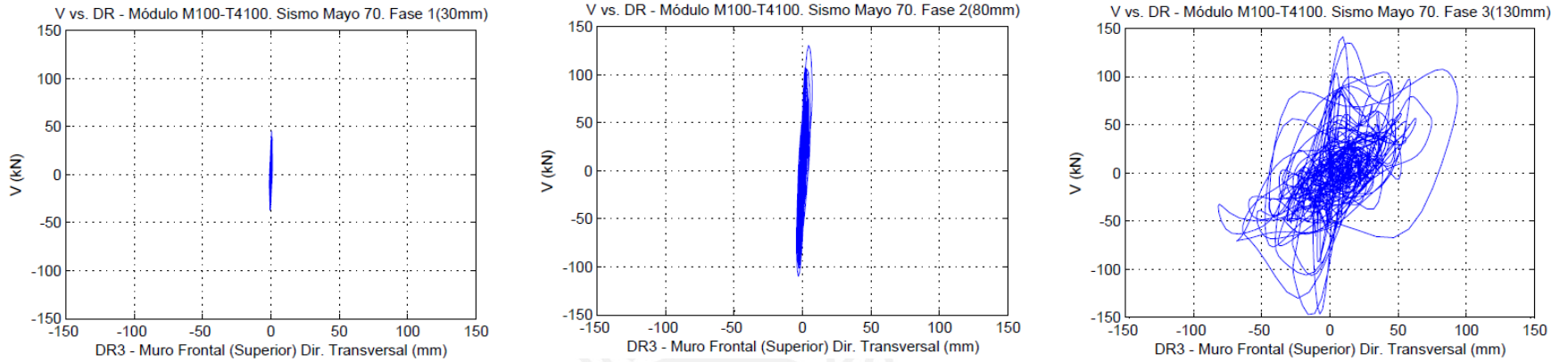


Figura 7.20 Cortante Basal vs. Desplazamiento relativo – Muro Frontal (Superior) del módulo M100-T4100

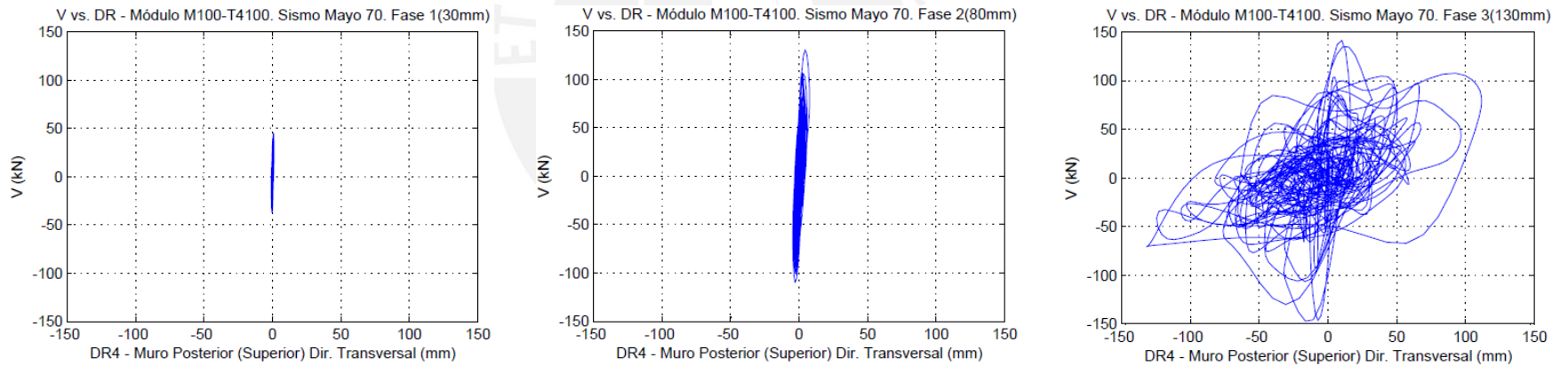


Figura 7.21 Cortante Basal vs. Desplazamiento relativo – Muro Posterior (Superior) del módulo M100-T4100

7.3.4. Envolvente Cortante Basal vs. Desplazamiento Relativo

Se graficó la envolvente (Figura 7.22) a los gráficos obtenidos en el acápite 7.3.3 para poder establecer una comparación del comportamiento entre cada uno de los muros.

El comportamiento entre los cuatro muros fue muy similar, con desplazamientos mayores a los 60mm y una disminución de la cortante basal de alrededor del 50% del valor máximo. Esta disminución no es ideal, ya que indica que a grandes desplazamientos la estructura igual perderá resistencia a pesar del refuerzo, lo cual se quiere evitar.

Los muros de corte tuvieron menores desplazamientos a los muros de flexión, indicando una menor disipación de energía y daño.

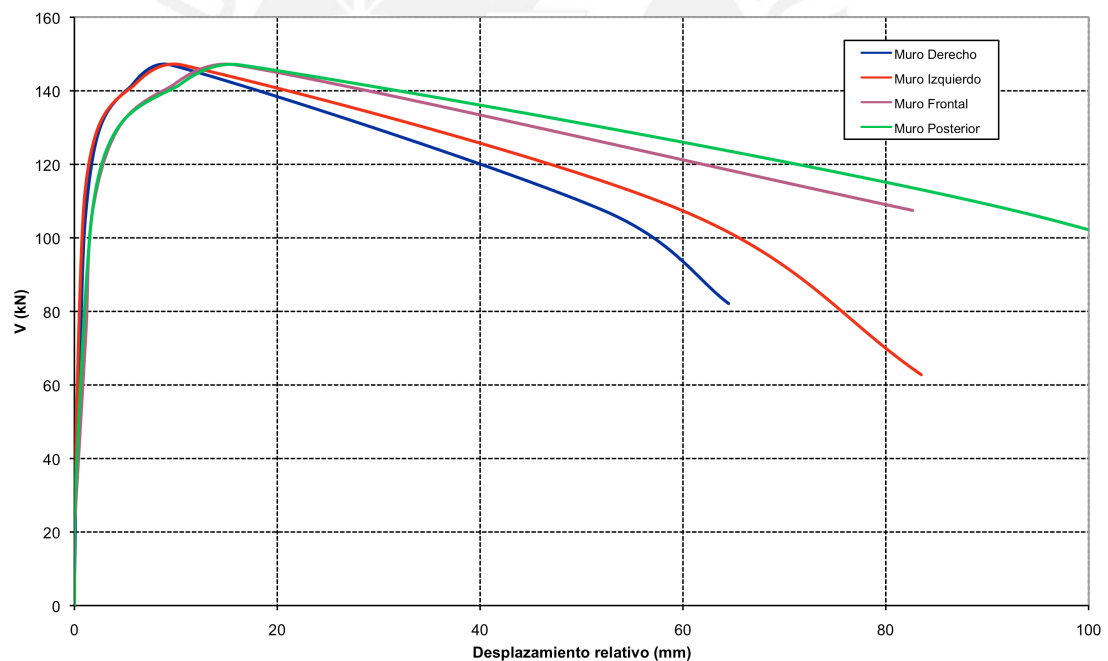


Figura 7.22 Envolventes en el Módulo M100-T4100

8. Módulo Reforzado – Ensayo a 45° (M100-T4100D)

8.1 Introducción

La denominación de este módulo, tomando como referencia investigaciones anteriores, fue M100-T4100D por estar reforzado en el 100% del área de los muros con la geomalla Tensor BX4100 y el movimiento de la mesa vibradora fue en dirección diagonal a los muros.



Figura 8.1 Módulo reforzado M100-T4100D

El peso del anillo de concreto armado que se utilizó como base del módulo fue 28.94kN; el peso del módulo sin tarrajeo fue 103.30kN y el peso del módulo incluyendo el tarrajeo fue 118.12kN, haciendo un peso total en la plataforma de la mesa vibradora de 147.06kN.

Consecuentemente con el módulo M100-T4100, en el cual no se colocó cobertura de tejas, en este módulo tampoco se colocó esta cobertura para que las condiciones del ensayo sean las mismas. El ensayo se llevó a cabo el día 31 de Octubre de 2008 siendo la edad del módulo de 25 días. La dirección del movimiento de la mesa vibradora fue 45° con respecto a los muros, para efectos prácticos denominada dirección diagonal.

8.2. Ensayo Dinámico

8.2.1. Fase 1 ($\Delta = 30\text{mm}$)

Durante la Fase 1 no se observó daño alguno en el módulo. No se presentaron fisuras en el tarrajeo de ningún muro. Según la clasificación de la Tabla 5.1, no hubo daños en la estructura.



Figura 8.2 Daños en el módulo M100-T4100D – Post Fase 1 (30mm)

En la Figura 8.3 y 8.4 se muestran los acelerogramas y desplazamientos más significativos registrados en esta fase. Los instrumentos en los cuatro muros registraron amplificaciones muy similares. El último gráfico en la Figura 8.3 representa la aceleración de la plataforma en la dirección del movimiento de la mesa vibradora, mientras que los demás acelerómetros registraron la aceleración en la dirección transversal y longitudinal a los muros. Es decir, en una dirección de 45° con respecto al movimiento de la mesa.

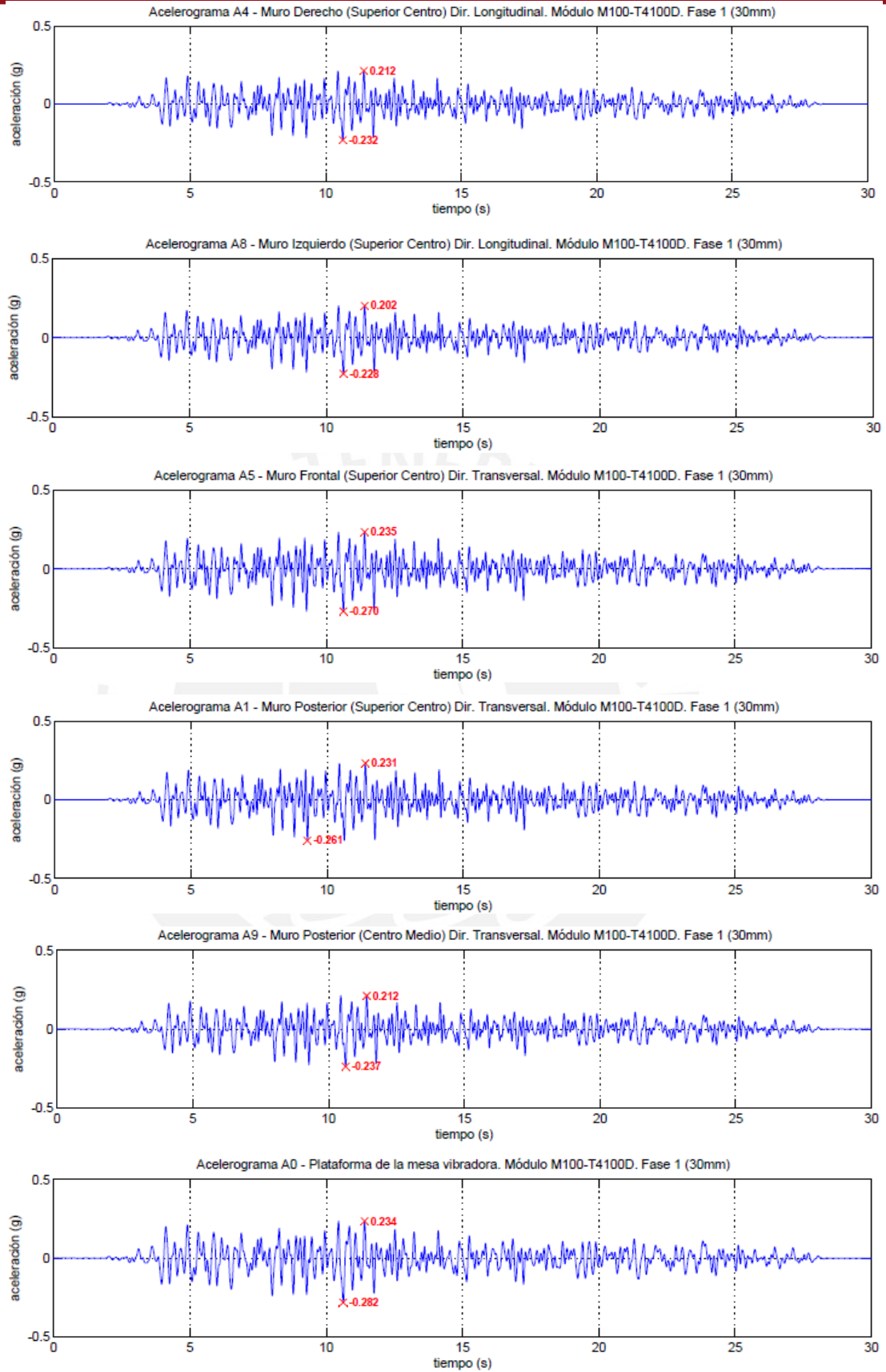


Figura 8.3 Acelerogramas de la Fase 1 (30mm) en el módulo M100-T4100D

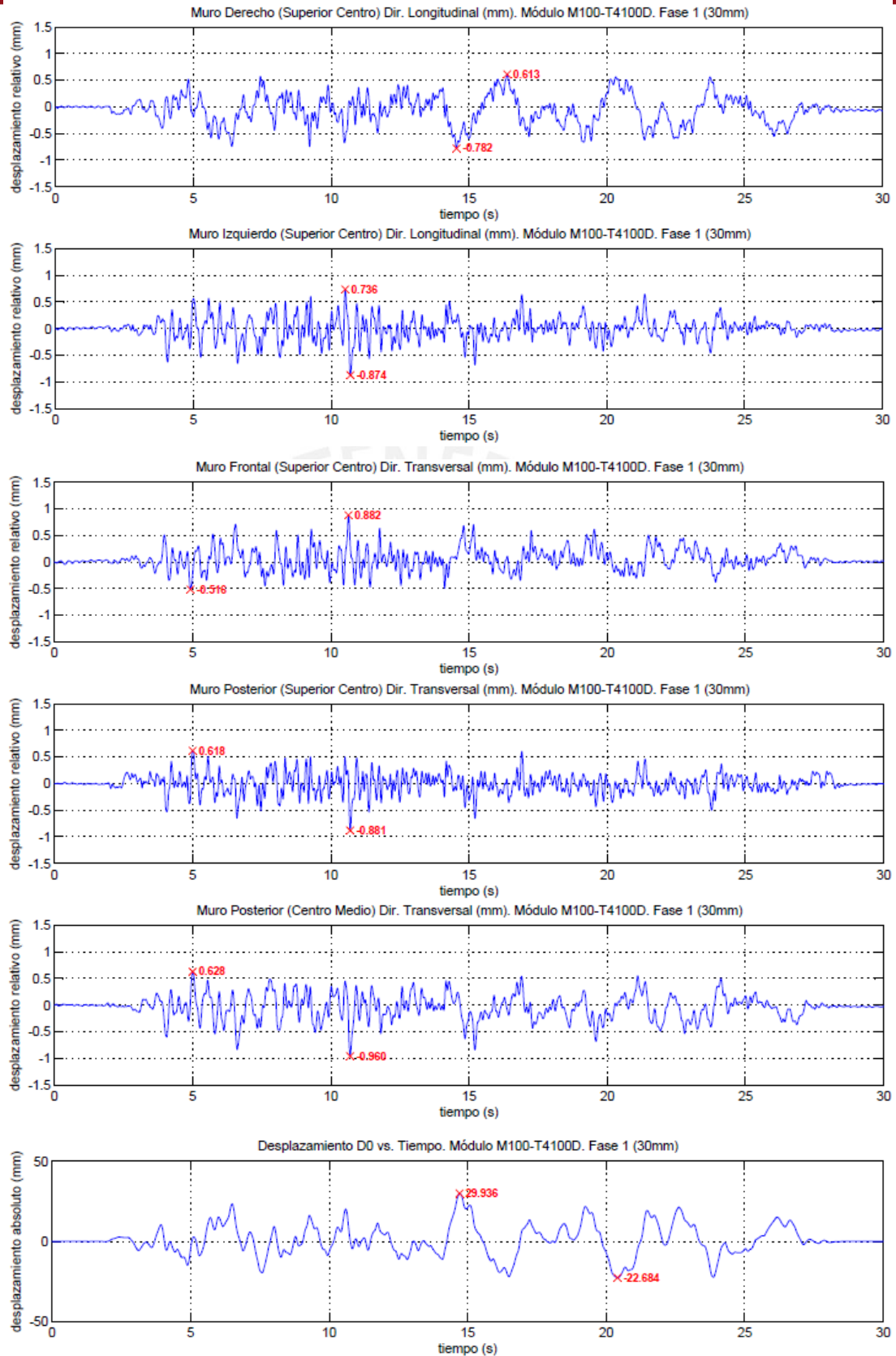


Figura 8.4 Desplazamientos en la Fase 1 (30mm) en el módulo M100-T4100D

Los LVDT's registraron los desplazamientos en el sentido paralelo y transversal al movimiento de la mesa vibradora. Luego, se sumaron las dos componentes en cada muro para hallar los desplazamientos en el sentido transversal y longitudinal de cada muro.

8.2.2. Fase 2 ($\Delta = 80\text{mm}$)

En la Fase 2 se observaron pequeñas fisuras diagonales en el tarrajeo de las esquinas de las ventanas y de la puerta. No se observaron daños estructurales y el daño en el tarrajeo fue mínimo.



Figura 8.5 Daños en el módulo M100-T4100D – Post Fase 2 (80mm)

En la Figuras 8.6 y 8.7 se muestran los acelerogramas y desplazamientos más significativos registrados en esta fase. Los instrumentos en los muros frontal y posterior registraron una amplificación de la señal ligeramente mayor a los muros izquierdo y derecho. Sin embargo, la diferencia entre los cuatro muros no es notoria.

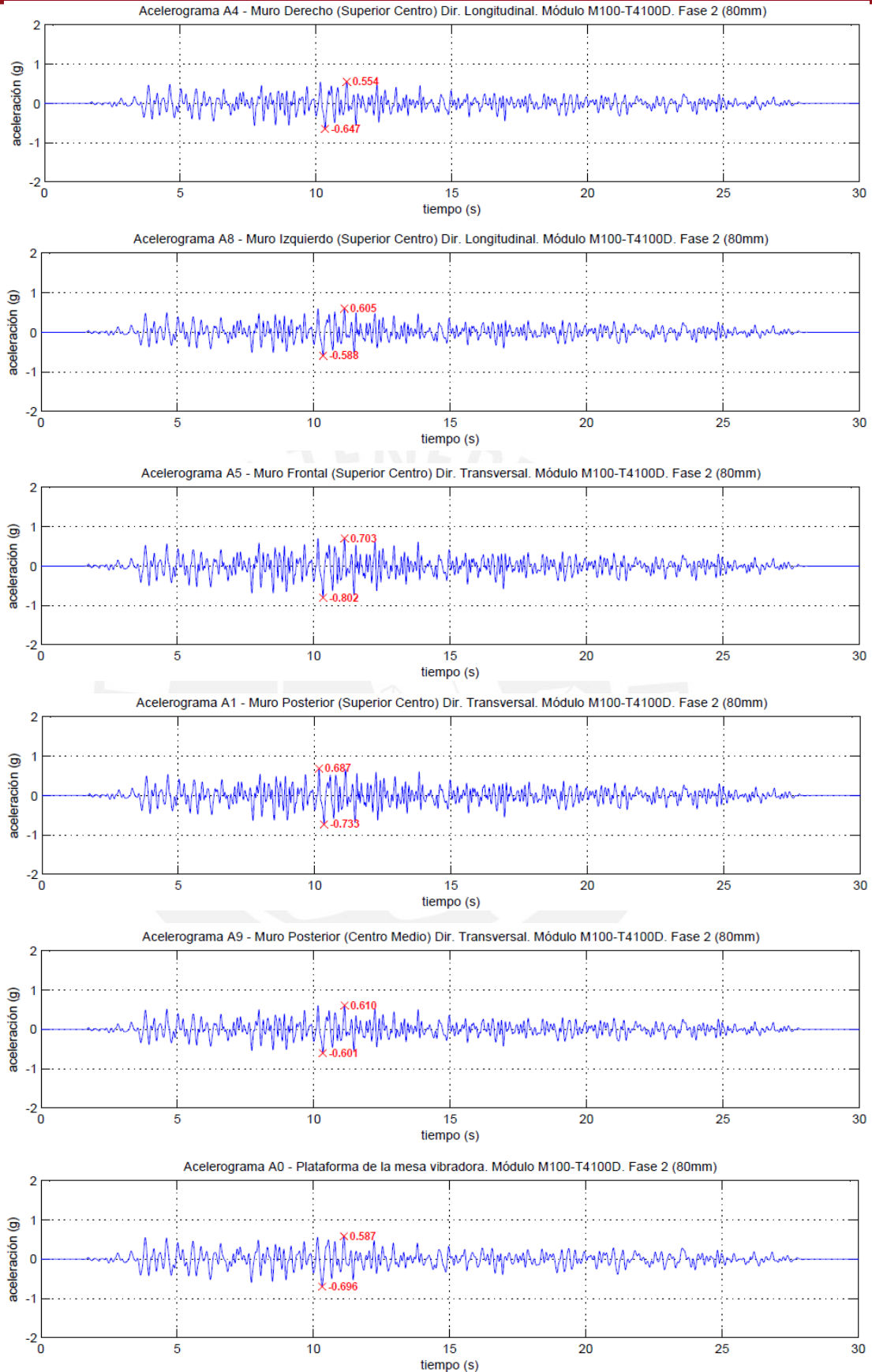


Figura 8.6 Acelerograma de la Fase 2 (80mm) en el módulo M100-T4100D

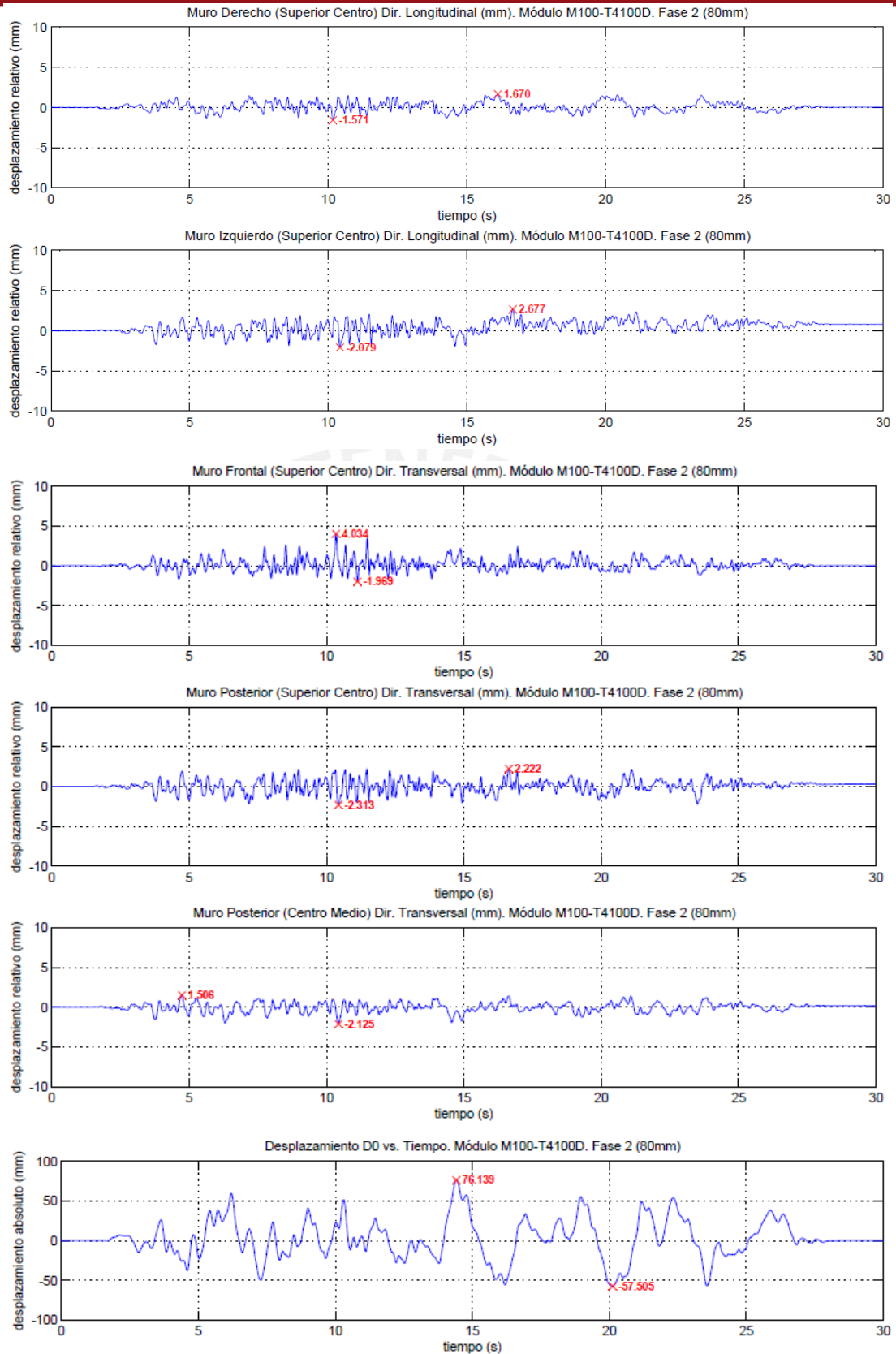


Figura 8.7 Desplazamientos en la Fase 2 (80mm) en el módulo M100-T4100D

8.2.3. Fase 3 ($\Delta = 130\text{mm}$)

En la Fase 3, los muros se deslizaron 20mm aproximadamente con respecto al anillo de cimentación. Se produjo la fisura en forma de “X” en el tarrajeo de los muros izquierdo y derecho debido a fuerzas en su plano y también se observó que estos muros presentaron fisuras por flexión. El módulo presentó daños leves según la clasificación de la Tabla 5.1.

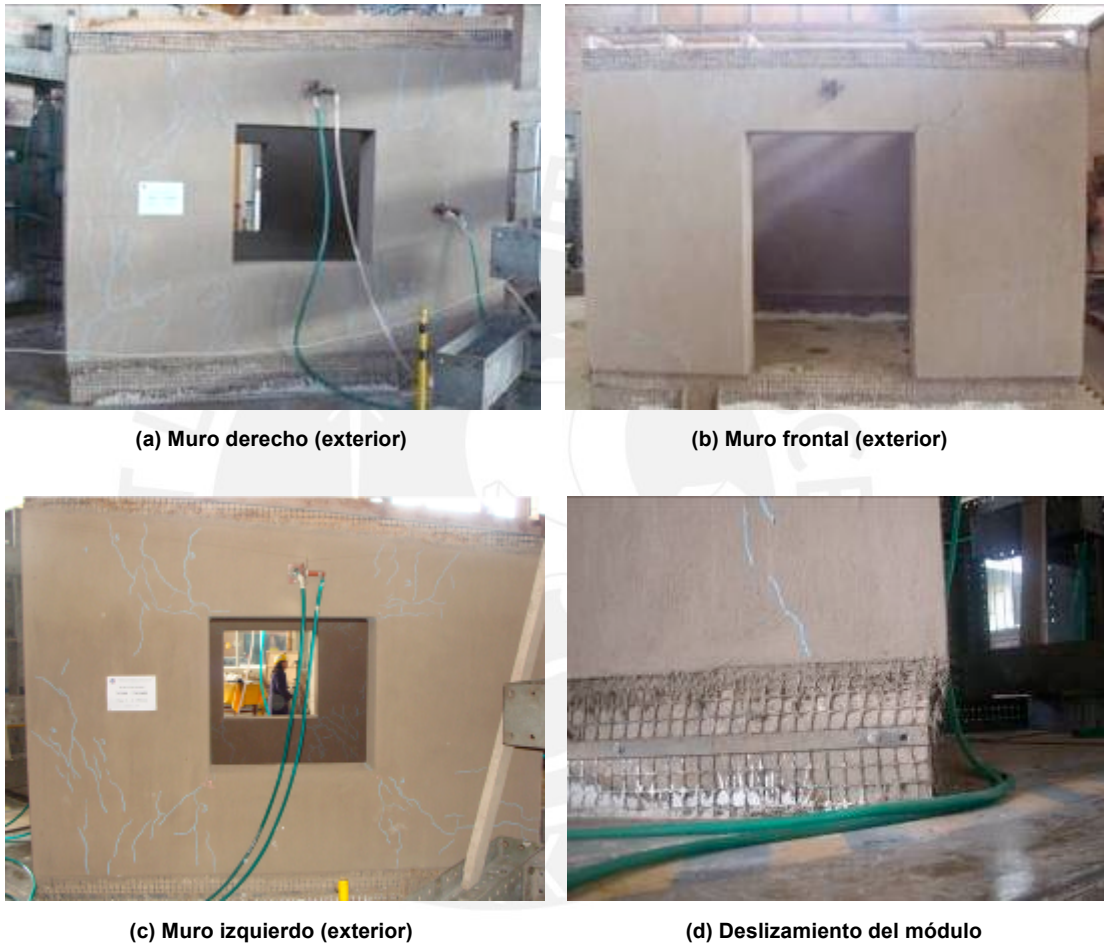


Figura 8.8 Daños en el módulo M100-T4100D – Post Fase 3 (130mm)

En las Figuras 8.9 y 8.10 se muestran las aceleraciones y desplazamientos más representativos registrados en esta fase, respectivamente. Los muros frontal y posterior tuvieron una amplificación de la señal visiblemente mayor que los muros de corte. Al final de los registros de desplazamientos se puede observar que la señal no regresa al desplazamiento cero sino que queda con un desplazamiento relativo remanente con respecto a su posición inicial lo que hace evidente el deslizamiento del módulo.

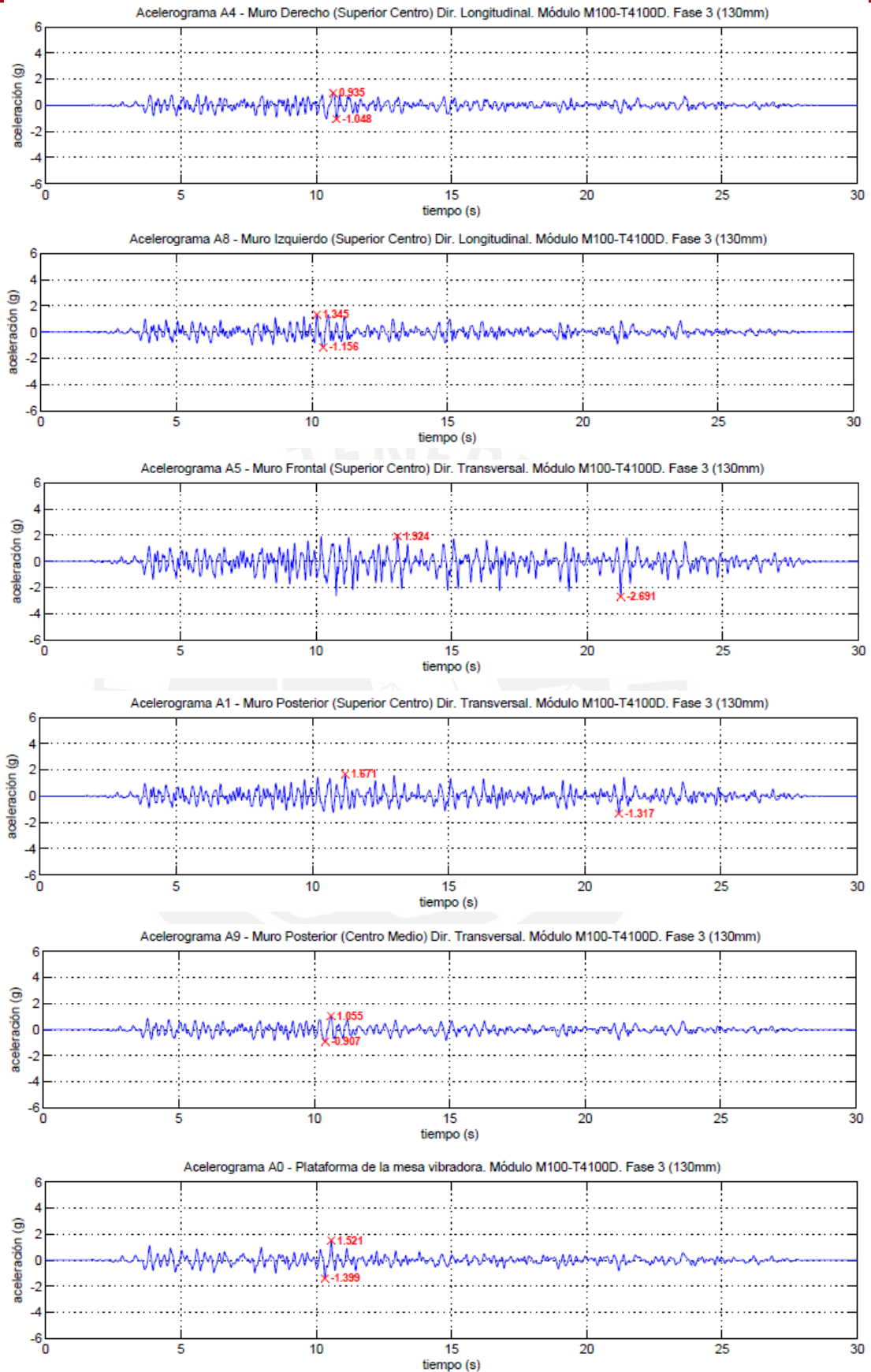


Figura 8.9 Acelerogramas de la Fase 3 (130mm) en el módulo M100-T4100D

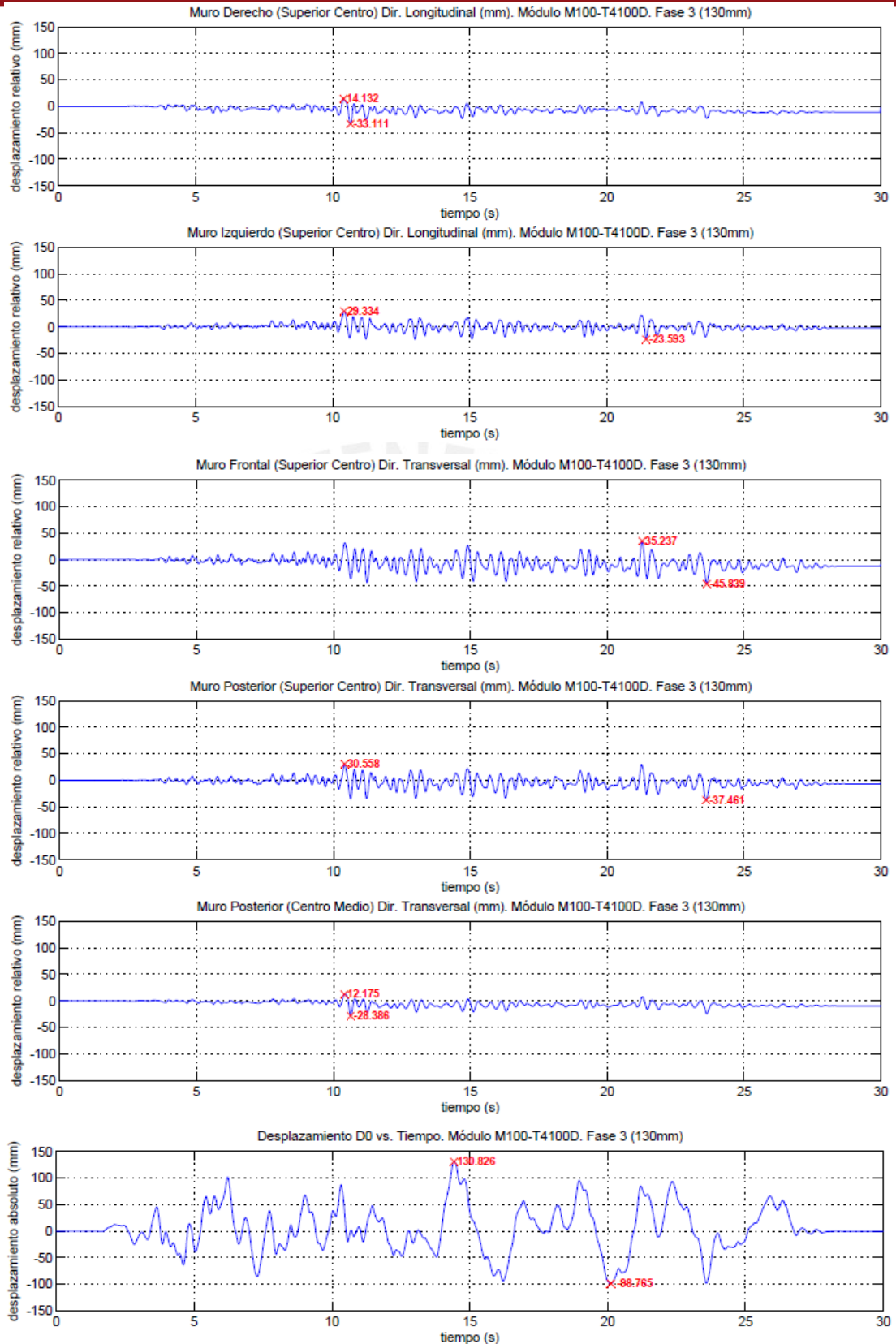


Figura 8.10 Desplazamientos en la Fase 3 (130mm) en el módulo M100-T4100D

8.2.4. Plano de Fisuras del Tarrajeo

La identificación de fisuras se realizó al finalizar cada fase y se marcó en los muros cada una de ellas diferenciándolas por colores. El color negro se utilizó para identificar las fisuras generadas durante la primera fase, el rojo para la segunda fase y el azul para la tercera fase.

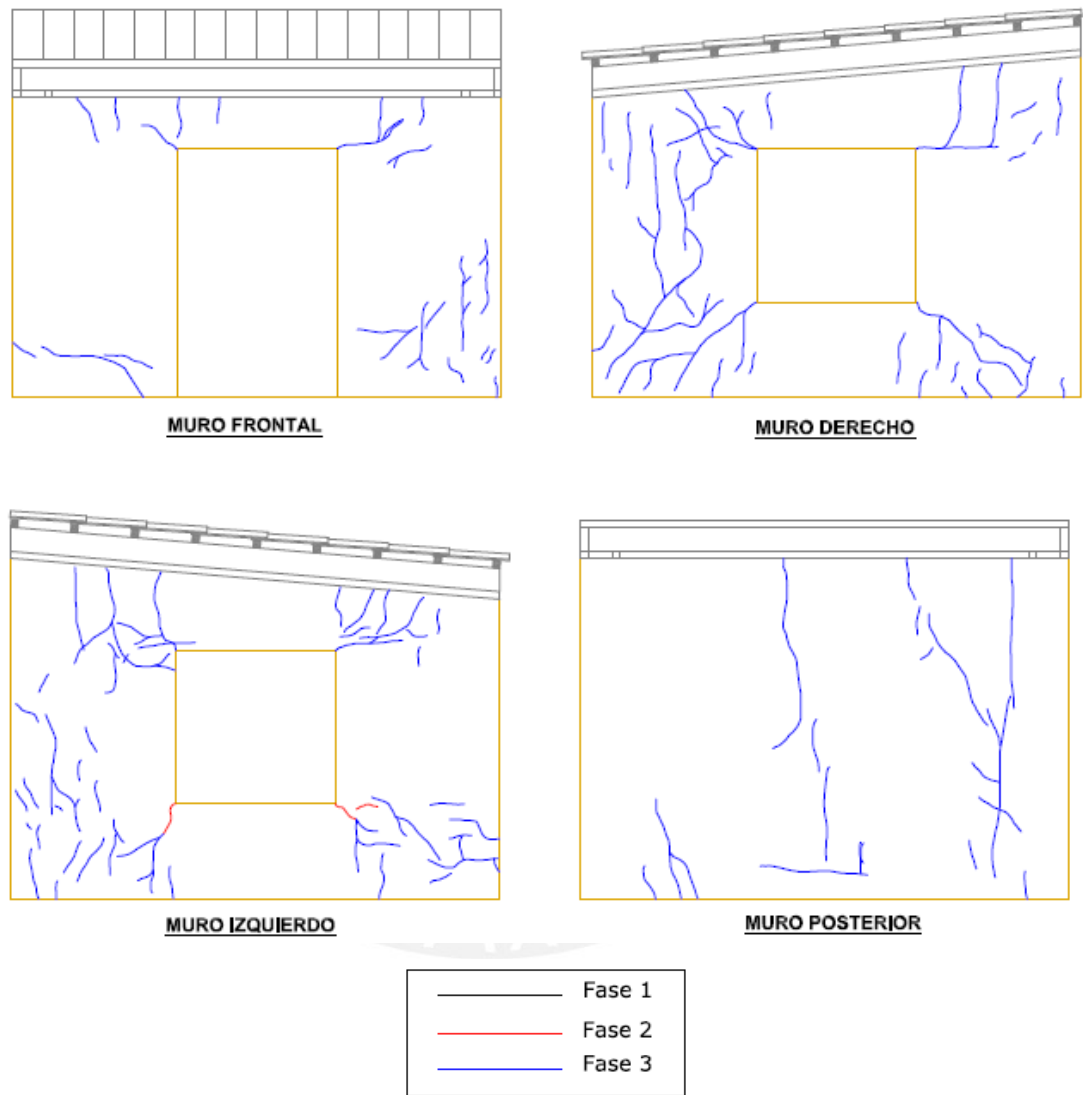


Figura 8.11 Fisuras en tarrajeo exterior – Módulo M100-T4100D

No hubo desprendimientos del tarrajeo en ningún muro. Casi la totalidad de las fisuras en el tarrajeo se produjeron recién en la Fase 3. Además, se puede observar la gran distribución de las fisuras en toda la superficie de los muros, especialmente en los muros derecho e izquierdo.

La mayor cantidad de fisuras se produjo en las esquinas de los vanos y a lo largo de los muros izquierdo y derecho.

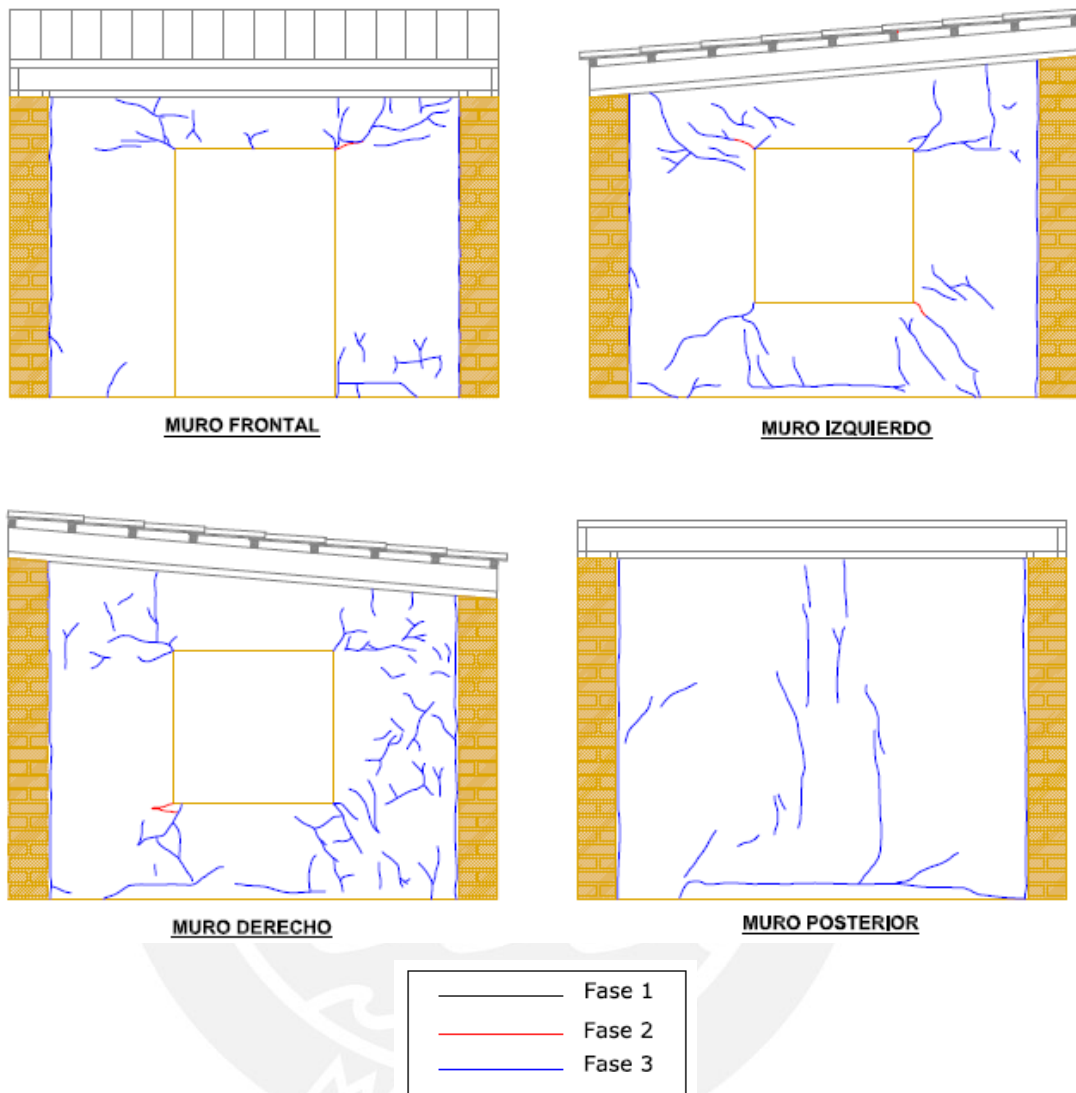


Figura 8.12 Fisuras en tarrajeo interior – Módulo M100-T4100D

8.2.5. Plano de Daños de la Geomalla

Finalizado el ensayo se removió el tarrajeo para observar los daños en el refuerzo de geomalla. Las roturas en la geomalla se denotaron con color rojo.

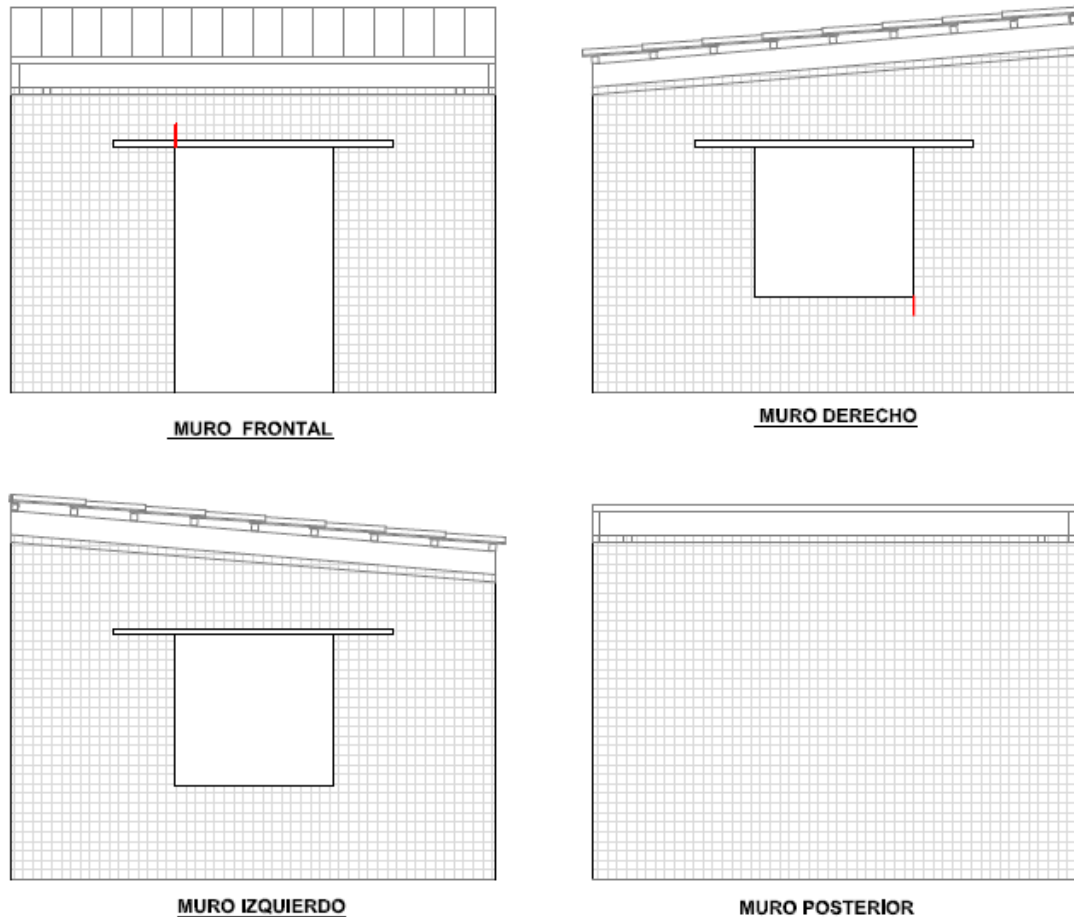


Figura 8.13 Daños en geomalla exterior – Módulo M100-T4100D

Las roturas en la geomalla fueron mínimas, apenas de una o dos costillas. En el exterior, éstas se produjeron en las esquinas de la puerta y la ventana del muro derecho. En el interior se produjo una pequeña rotura en una esquina de la puerta. El deslizamiento que se presentó en la Fase 3 no produjo daño en las geomallas de cimentación. Esto indica que el refuerzo prácticamente no sufrió daño alguno.

En los vanos hubo una mayor concentración de esfuerzos de tracción, evidenciando que en las zonas mencionadas las fuerzas de tracción fueron mayores a la resistencia última de la geomalla BX4100 de 12.8kN/m.

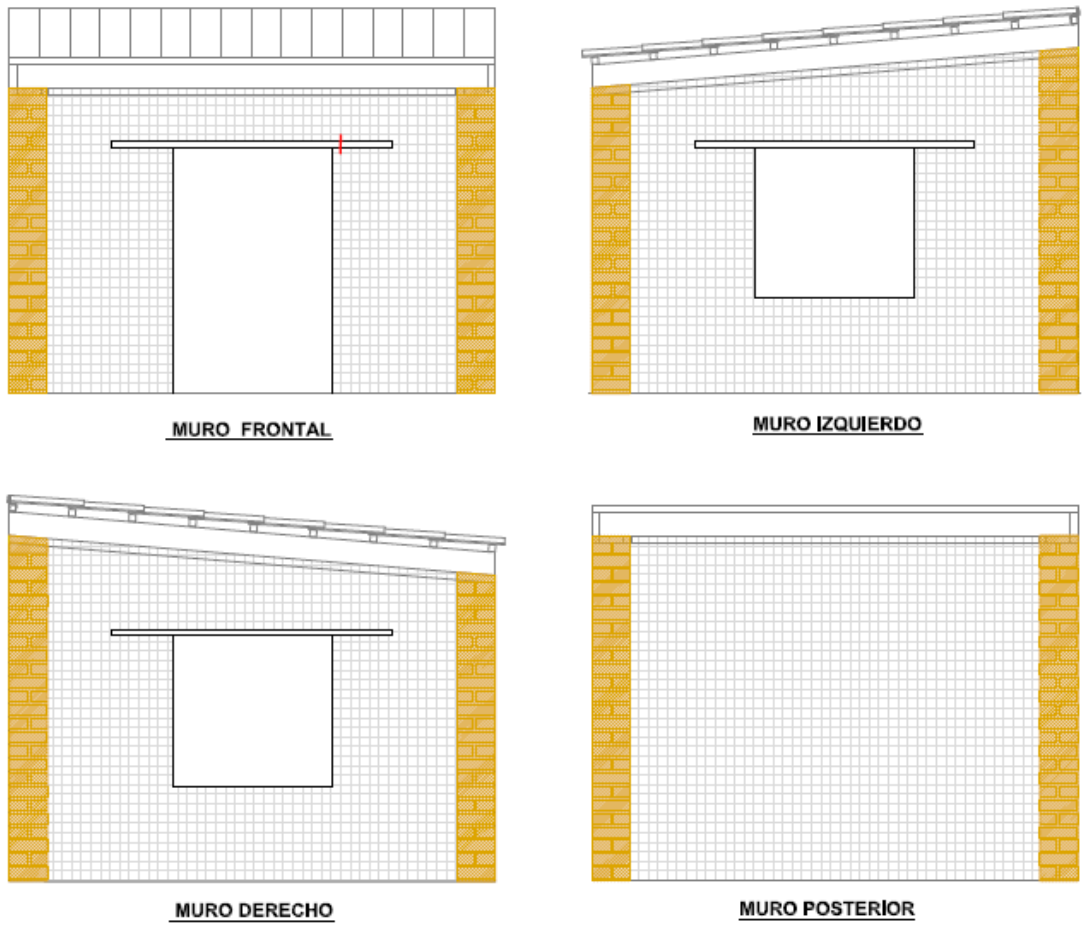


Figura 8.14 Daños en geomalla interior – Módulo M100-T4100D

8.2.6. Plano de Fisuras y Grietas de Muros

Luego de finalizado el ensayo y de remover el tarrajeo, se retiró la geomalla para observar los daños en los muros. Las fisuras se identificaron con color negro y las grietas con color rojo. Las fisuras se clasificaron por un grosor menor o igual a 0.5mm. Las grietas se clasificaron por un grosor mayor a 0.5mm. Este límite es netamente referencial y se usó con el propósito de diferenciar el grado de los daños. El máximo grosor de grieta alcanzado fue 2.5mm. No hubo zonas donde el adobe se desmoronó o desprendió.

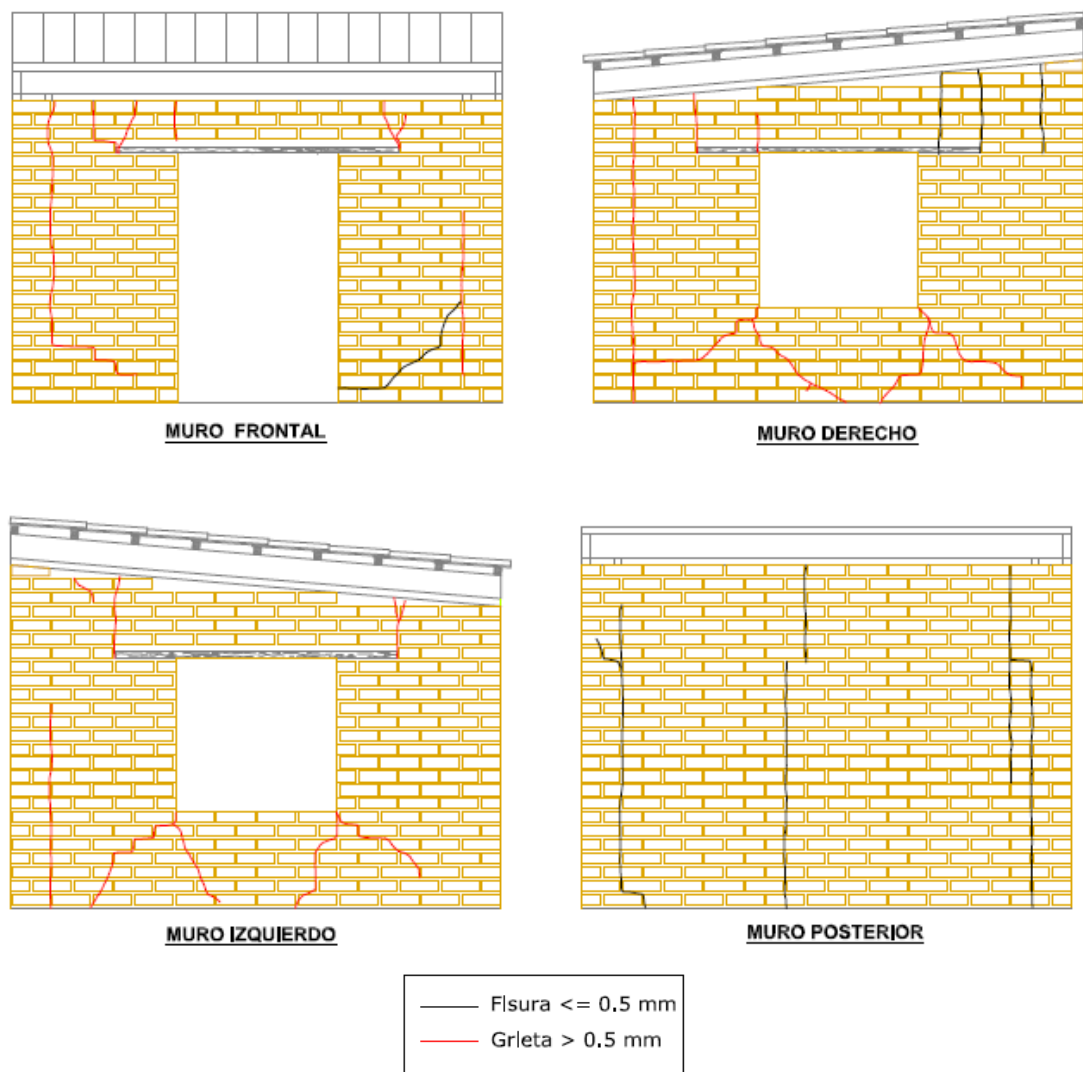


Figura 8.15 Fisuras y grietas exteriores en muros – Módulo M100-T4100D

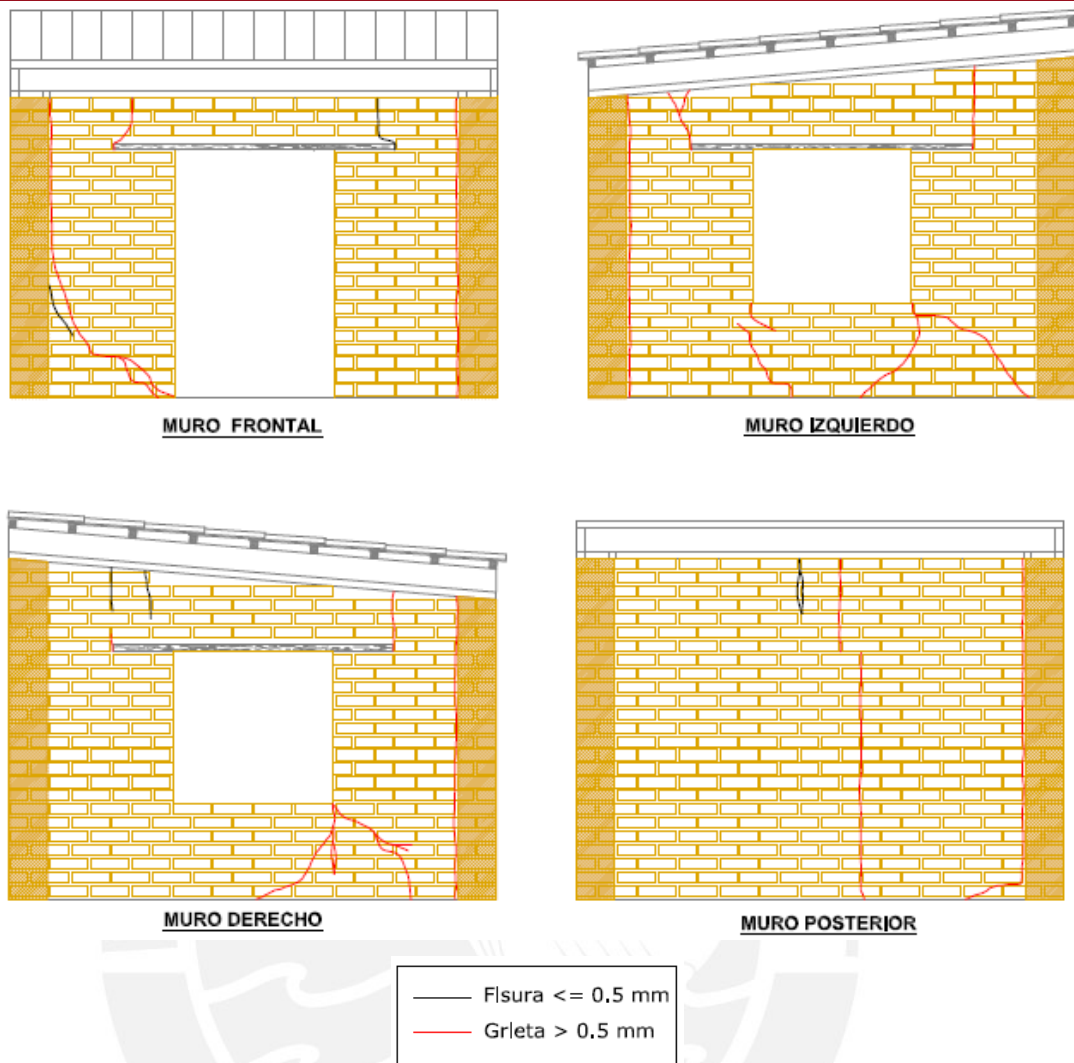


Figura 8.16 Fisuras y grietas interiores en muros – Módulo M100-T4100D

Se puede observar que en el módulo se formaron grietas verticales en algunas esquinas por fuerzas fuera del plano, grietas verticales por flexión en el centro del muro posterior y grietas diagonales por fuerzas cortantes en el muro derecho e izquierdo. Sin embargo, estos daños también fueron producto de acciones combinadas ya que los cuatro muros estuvieron sujetos a fuerzas en su plano y fuera del plano.

La geomalla brindó confinamiento a los muros, reduciendo los daños que no llegaron a poner en peligro la estructura. También se pudo corroborar lo observado en el tarrajeo, que fue una gran distribución de las fisuras y grietas en toda la superficie de los muros.

8.3. Interpretación de Resultados

8.3.1. Valores Máximos

A continuación se resumen los valores máximos registrados en los instrumentos durante las fases de ensayo:

Tabla 8.1. Solicitaciones máximas registradas en la mesa vibradora (M100-T4100D)

| Instrumento | Fase 1 | Fase 2 | Fase 3 |
|-------------|---------|---------|---------|
| A0 (g) | 0.282 | 0.696 | 1.521 |
| A0x (g)* | 0.199 | 0.492 | 1.076 |
| D0 (mm) | 29.936 | 76.139 | 130.826 |
| Fa (kN) | 100.405 | 254.099 | 370.229 |
| Fax (kN)* | 70.995 | 179.67 | 261.79 |
| V (kN) | 43.811 | 111.000 | 138.340 |
| Vx (kN)* | 30.979 | 78.489 | 97.856 |

Tabla 8.2. Aceleraciones máximas registradas en el módulo M100-T4100D (g)

| Instrumento | Descripción | Fase 1 | Fase 2 | Fase 3 |
|-------------|---|--------|--------|--------|
| A0 | Mesa | 0.282 | 0.696 | 1.521 |
| A0x* | Mesa en la dirección Long. o Trans. | 0.199 | 0.492 | 1.076 |
| A1 | Muro Posterior (Superior) Dir. Trans. | 0.261 | 0.733 | 1.671 |
| A2 | Muro Posterior (Superior) Dir. Long. | 0.235 | 0.594 | 1.009 |
| A3 | Muro Derecho (Superior) Dir. Trans. | 0.298 | 0.772 | 2.106 |
| A4 | Muro Derecho (Superior) Dir. Long. | 0.232 | 0.647 | 1.048 |
| A5 | Muro Frontal (Superior) Dir. Trans. | 0.270 | 0.802 | 2.691 |
| A6 | Muro Frontal (Superior) Dir. Long. | 0.238 | 0.719 | 1.430 |
| A7 | Muro Izquierdo (Superior) Dir. Trans. | 0.267 | 0.703 | 2.271 |
| A8 | Muro Izquierdo (Superior) Dir. Long. | 0.228 | 0.605 | 1.345 |
| A9 | Muro Posterior (Centro) Dir. Trans. | 0.237 | 0.610 | 1.055 |
| A10 | Muro Posterior (Centro) Dir. Long. | 0.221 | 0.569 | 0.989 |
| A11 | Muro Derecho (Centro Derecha) Dir. Trans. | 0.223 | 0.580 | 1.240 |
| A12 | Muro Derecho (Centro Derecha) Dir. Long. | 0.230 | 0.608 | 1.094 |
| Amáx | Aceleración máxima en la Fase | 0.298 | 0.802 | 2.691 |
| FADmáx** | Factor de amplificación dinámico máximo | 1.494 | 1.630 | 2.502 |

* Componente a 45° del registro del instrumento

** Valor calculado con respecto a A0x

Tabla 8.3. Desplazamientos absolutos máximos en el módulo M100-T4100D (mm)

| LVDT | Descripción | Fase 1 | Fase 2 | Fase 3 |
|------|--|--------|--------|---------|
| D0 | Mesa | 29.936 | 76.139 | 130.826 |
| D1 | Muro Posterior (Superior Syy) | 0.411 | 1.316 | 31.768 |
| D2 | Muro Posterior (Superior Sxx) | 30.148 | 77.842 | 144.565 |
| D3 | Muro Derecho (Superior Syy) | 1.150 | 2.864 | 18.854 |
| D4 | Muro Derecho (Superior Sxx) | 30.390 | 78.208 | 142.686 |
| D5 | Muro Frontal (Superior Syy) | 0.263 | 1.204 | 17.050 |
| D6 | Muro Frontal (Superior Sxx) | 30.326 | 77.561 | 158.049 |
| D7 | Muro Izquierdo (Superior Syy) | 0.642 | 2.056 | 18.660 |
| D8 | Muro Izquierdo (Superior Sxx) | 30.334 | 77.958 | 142.756 |
| D9 | Muro Posterior (Centro Syy) | 0.588 | 1.956 | 18.852 |
| D10 | Muro Posterior (Centro Sxx) | 30.276 | 77.116 | 132.038 |
| D11 | Muro Derecho (Centro Derecha Syy) | 0.436 | 1.360 | 8.047 |
| D12 | Muro Derecho (Centro Derecha Sxx) | 30.286 | 77.235 | 127.083 |
| D1* | Muro Derecho (Superior) Dir. Long. | 20.676 | 53.376 | 91.051 |
| D2* | Muro Izquierdo (Superior) Dir. Long. | 21.042 | 53.823 | 100.731 |
| D3* | Muro Frontal (Superior) Dir. Trans. | 21.616 | 55.627 | 111.890 |
| D4* | Muro Posterior (Superior) Dir. Trans. | 21.049 | 54.254 | 105.864 |
| D5* | Muro Posterior (Centro) Dir. Trans. | 21.055 | 53.321 | 90.757 |
| D8* | Muro Derecho (Centro Derecha) Dir. Long. | 21.156 | 54.181 | 92.560 |

Tabla 8.4. Desplazamientos relativos máximos en el módulo M100-T4100D (mm)

| LVDT | Descripción | Fase 1 | Fase 2 | Fase 3 |
|------|---|--------|--------|--------|
| DR1* | Muro Derecho (Superior) Dir. Longitudinal | 0.782 | 1.670 | 33.111 |
| DR2* | Muro Izquierdo (Superior) Dir. Longitudinal | 0.874 | 2.677 | 29.334 |
| DR3* | Muro Frontal (Superior) Dir. Transversal | 0.882 | 4.034 | 45.839 |
| DR4* | Muro Posterior (Superior) Dir. Transversal | 0.881 | 2.313 | 37.461 |
| DR5* | Muro Posterior (Centro) Dir. Transversal | 0.960 | 2.125 | 28.386 |
| DR8* | Muro Derecho (Centro Derecha) Dir. Longitudinal | 0.616 | 4.378 | 25.676 |

* El desplazamiento absoluto en el sentido longitudinal y transversal al muro se calculó sumando las dos componentes del desplazamiento absoluto registradas en cada muro. El desplazamiento relativo se calculó restando a los valores anteriores la componente a 45° del desplazamiento absoluto de la mesa vibradora.

8.3.2. Periodo Natural de Vibración y Coeficiente de Amortiguamiento

A continuación se muestran los periodos naturales de vibración obtenidos durante las vibraciones libres:

Tabla 8.5. Periodos naturales de vibración en vibraciones libres en el módulo M100-T4100D (s)

| Instrumento | Descripción | Inicial | Post-Fase 1 | Post-Fase 2 | Post-Fase 3 |
|-------------|---|---------|-------------|-------------|-------------|
| A1 | Muro Posterior (Superior) Dir. Trans. | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.18 |
| A2 | Muro Posterior (Superior) Dir. Long. | 0.08 | 0.08 | 0.10 | 0.18 |
| A3 | Muro Derecho (Superior) Dir. Trans. | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.17 |
| A4 | Muro Derecho (Superior) Dir. Long. | 0.07 | 0.07 | 0.08 | 0.18 |
| A5 | Muro Frontal (Superior) Dir. Trans. | 0.06 | 0.07 | 0.07 | 0.18 |
| A6 | Muro Frontal (Superior) Dir. Long. | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.18 |
| A7 | Muro Izquierdo (Superior) Dir. Trans. | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.18 |
| A8 | Muro Izquierdo (Superior) Dir. Long. | 0.06 | 0.07 | 0.07 | 0.17 |
| A9 | Muro Posterior (Centro) Dir. Trans. | 0.06 | 0.07 | 0.07 | 0.18 |
| A10 | Muro Posterior (Centro) Dir. Long. | 0.07 | 0.08 | 0.08 | 0.18 |
| A11 | Muro Derecho (Centro Derecha) Dir. Trans. | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.17 |
| A12 | Muro Derecho (Centro Derecha) Dir. Long. | 0.07 | 0.07 | 0.08 | 0.15 |

En la Tabla 8.5 se observa que los periodos en los muros no sufrieron mayor variación hasta después de la Fase 2. Luego de la Fase 3, los valores se incrementaron de dos a tres veces su valor inicial. Sin embargo, el periodo que tuvieron los desplazamientos de la plataforma de la mesa vibradora durante las vibraciones libres varió entre 0.17s a 0.23s que pudo haber influenciado los periodos obtenidos en los instrumentos en la vibración libre Post-Fase 3.

Tabla 8.6. Coeficientes de amortiguamiento en vibraciones libres en el módulo M100-T4100D

| Instrumento | Descripción | Inicial | Post-Fase 1 | Post-Fase 2 | Post-Fase 3 |
|-------------|---|---------|-------------|-------------|-------------|
| A1 | Muro Posterior (Superior) Dir. Trans. | 8.92% | 10.14% | 10.36% | 11.10% |
| A2 | Muro Posterior (Superior) Dir. Long. | 6.21% | 6.56% | 10.05% | 10.22% |
| A3 | Muro Derecho (Superior) Dir. Trans. | 6.03% | 8.32% | 8.50% | 8.78% |
| A4 | Muro Derecho (Superior) Dir. Long. | 7.75% | 8.32% | 9.08% | 9.22% |
| A5 | Muro Frontal (Superior) Dir. Trans. | 7.60% | 7.83% | 9.23% | 9.59% |
| A6 | Muro Frontal (Superior) Dir. Long. | 9.08% | 9.43% | 9.28% | 9.28% |
| A7 | Muro Izquierdo (Superior) Dir. Trans. | 8.96% | 9.85% | 9.03% | 9.31% |
| A8 | Muro Izquierdo (Superior) Dir. Long. | 9.22% | 9.28% | 10.03% | 10.20% |
| A9 | Muro Posterior (Centro) Dir. Trans. | 7.91% | 7.79% | 8.83% | 8.93% |
| A10 | Muro Posterior (Centro) Dir. Long. | 10.51% | 10.06% | 10.47% | 13.22% |
| A11 | Muro Derecho (Centro Derecha) Dir. Trans. | 8.99% | 8.87% | 9.84% | 11.02% |
| A12 | Muro Derecho (Centro Derecha) Dir. Long. | 6.23% | 7.26% | 7.98% | 9.76% |

Los coeficientes de amortiguamiento se incrementaron gradualmente durante las fases, llegando a un incremento del 2 al 65% de su valor inicial, indicando un ligero daño progresivo entre cada fase.

8.3.3. Cortante Basal vs. Desplazamiento Relativo

A continuación se muestran los gráficos de Fuerza cortante vs. Desplazamiento relativo de los instrumentos más representativos. Se muestran los gráficos correspondientes a la Fase 1, Fase 2 y Fase 3.

En este módulo usamos una componente de la fuerza cortante aplicada en la base del módulo (V) para poder comparar los resultados con los otros módulos y analizar la misma dirección del movimiento.

Debido a que el módulo estaba orientado a 45° con respecto al movimiento de la mesa vibradora, hay fuerzas aplicadas en la dirección longitudinal y transversal de cada muro durante el ensayo. La componente de la fuerza cortante se obtuvo utilizando la siguiente ecuación:

$$V_{M100-T4100} = \frac{V}{\sqrt{2}} \quad (8.1)$$

Donde:

$V_{M100-T4100}$: Componente de la fuerza cortante aplicada en la base del módulo (kN)

V : Fuerza cortante total aplicada en la base del módulo (kN)

En las Figuras 8.17 a 8.20 se observan las gráficas Cortante Basal vs. Desplazamiento Relativo de los cuatro muros en las tres fases. En las primeras dos fases no se observan grandes desplazamientos y es notorio un comportamiento elástico. En la Fase 3, en cambio, se observa un comportamiento que excede el límite elástico con algunas incursiones en el régimen inelástico. No se observan grandes desplazamientos ni una gran disipación de energía en los cuatro muros. Se observa que los cuatro muros tuvieron un comportamiento similar.

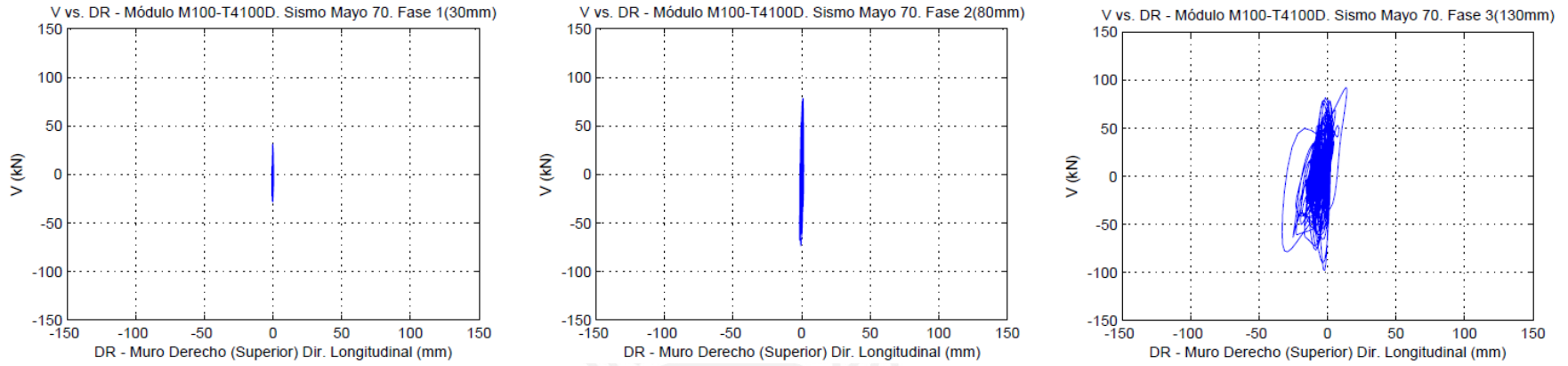


Figura 8.17 Cortante Basal vs. Desplazamiento relativo – Muro Derecho (Superior) del módulo M100-T4100D

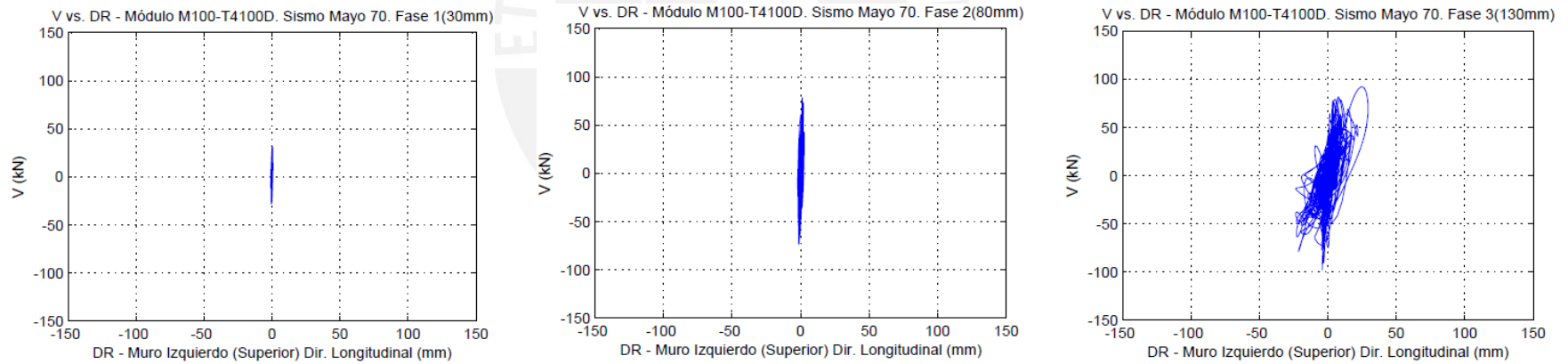


Figura 8.18 Cortante Basal vs. Desplazamiento relativo - Muro Izquierdo (Superior) del módulo M100-T4100D

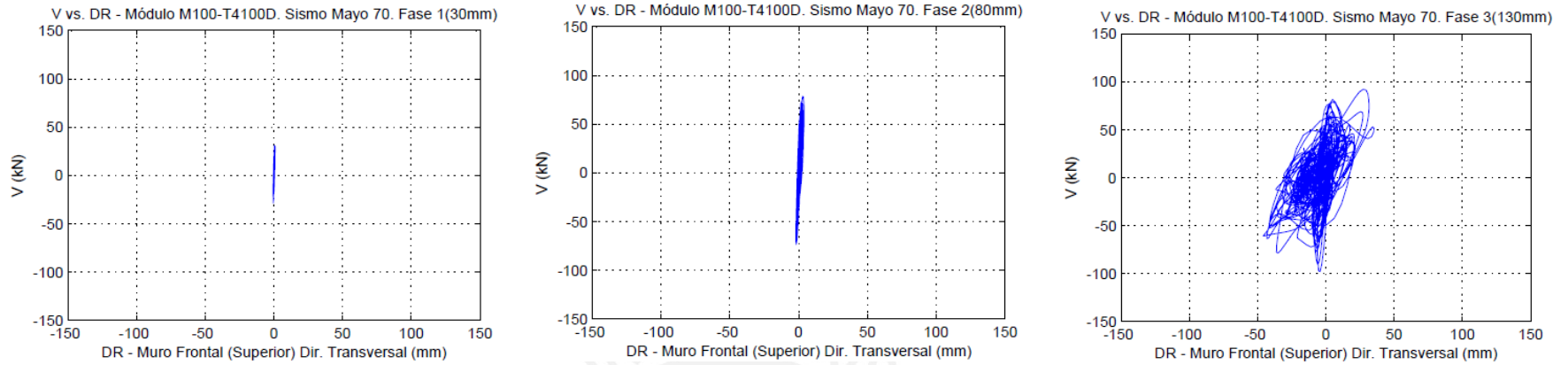


Figura 8.19 Cortante Basal vs. Desplazamiento relativo – Muro Frontal (Superior) del módulo M100-T4100D

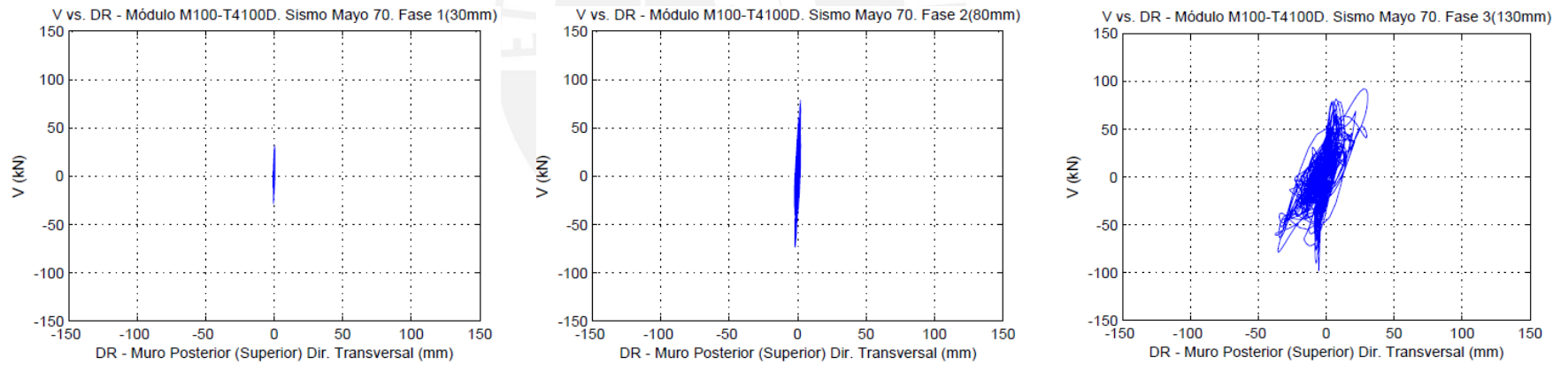


Figura 8.20 Cortante Basal vs. Desplazamiento relativo – Muro Posterior (Superior) del módulo M100-T4100D

8.3.4. Envolvente Cortante Basal vs. Desplazamiento Relativo

Se graficó la envolvente (Figura 8.21) a los gráficos obtenidos en el acápite 8.3.3 para poder establecer una comparación del comportamiento entre cada uno de los muros.

El comportamiento entre los cuatro muros fue muy similar, con desplazamientos ligeramente mayores en el muro frontal y el muro posterior llegando a los 40mm aproximadamente. No hubo una gran disminución de la cortante basal, siendo de un 10 al 40% del valor máximo. Se observó que los muros todavía tenían capacidad de deformarse ya que tuvieron poca incursión en el rango inelástico.

Los muros izquierdo y derecho tuvieron desplazamientos ligeramente menores a los muros frontal y posterior.

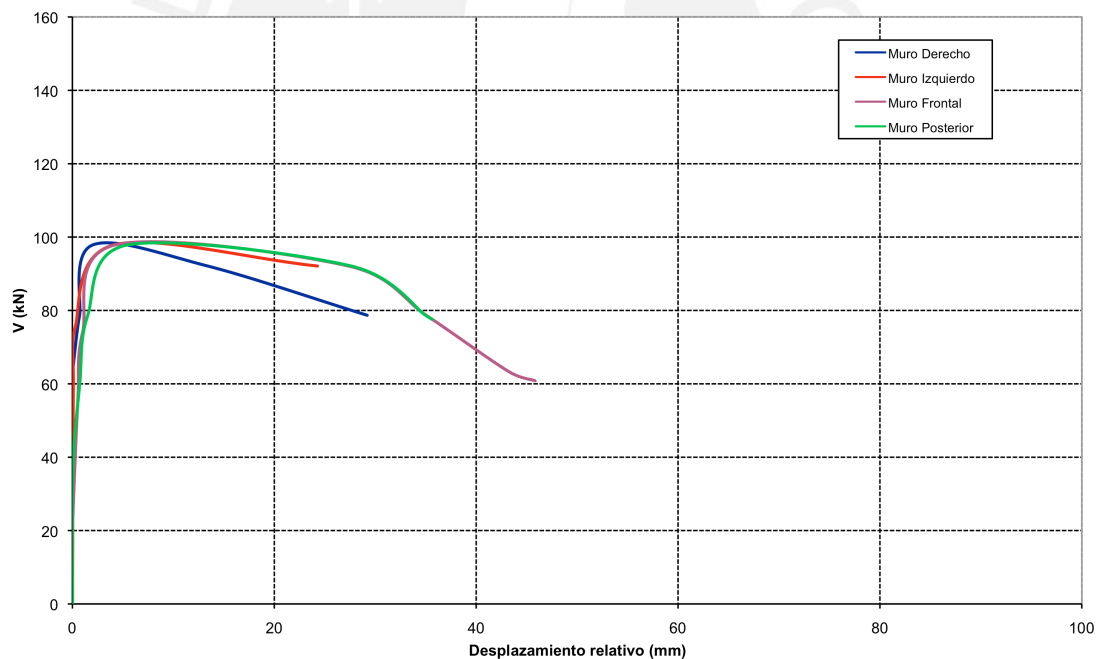


Figura 8.21 Envolventes en el Módulo M100T4100D

9. Discusión de Resultados

En este capítulo se discuten y comparan los resultados obtenidos en los tres módulos concernientes a esta investigación: Módulo No Reforzado (M000), Módulo Reforzado (M100-T4100) y Módulo Reforzado (M100-T4100D). Se pone especial énfasis al comparar el módulo no reforzado con los módulos reforzados con el objetivo de evaluar el aporte del refuerzo con geomalla. Además, se compara el módulo reforzado sometido a un movimiento unidireccional con el módulo reforzado sometido a un movimiento a 45° con respecto a sus cuatro muros. Así, se busca evaluar la influencia en el comportamiento dinámico del módulo al cambiar su orientación con respecto a la dirección del movimiento de la mesa vibradora.

9.1. Comportamiento Sísmico

El diseño del ensayo nos permitió evaluar el desempeño de los módulos ante diferentes intensidades de movimiento de una señal asociada al terremoto del 31 de Mayo de 1970. Al haber construido los tres módulos con la misma configuración, dimensiones y bajo el mismo criterio, es posible comparar el comportamiento sísmico entre cada módulo. En la Tabla 9.1 se describe el comportamiento sísmico durante cada fase de los tres módulos en base a la clasificación de daños en construcciones de adobe descrita en el Capítulo 5.

Tabla 9.1. Comportamiento sísmico de los módulos

| Desplazamiento máximo D_0 (mm) | M000 | M100-T4100 | M100-T4100D(*) |
|----------------------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 30 | Sin Daño | Sin Daño | Sin Daño |
| 80 | Daños graves | Daños leves | Sin Daño |
| 130 | Colapso parcial | Daños moderados | Daños leves |

* En la dirección de los muros el desplazamiento de la plataforma fue $D_0/\sqrt{2}$

El refuerzo con geomalla redujo los daños significativamente de un posible colapso o colapso parcial de la estructura a daños moderados ante un movimiento asociado a un sismo severo. En algunas esquinas de los vanos, la geomalla se rompió, lo que evidencia que el refuerzo trabajó eficientemente confinando al muro y resistiendo fuerzas de tracción.

Al finalizar los ensayos, los módulos reforzados presentaron daños debido a la acción de fuerzas cortantes en el plano de los muros y por flexión fuera del plano; sin embargo, la estructura se mantuvo íntegra y fuera de algún peligro de colapso.

El módulo M100-T4100D presentó menos daños que el módulo M100-T4100. A pesar que los muros en el módulo M100-T4100D estuvieron sometidos tanto a esfuerzos cortantes como a esfuerzos debidos a flexión, los desplazamientos en la dirección longitudinal y transversal en cada muro fueron el 70% de los desplazamientos ejercidos en la dirección unidireccional del módulo M100-T4100 y como consecuencia, el daño fue de menor magnitud.

Los resultados mostraron que el refuerzo externo con geomalla reduce significativamente la vulnerabilidad sísmica de las viviendas de adobe y evita el colapso de la estructura ante movimientos asociados a un sismo severo.

9.2. Envoltente Cortante Basal vs. Desplazamiento Relativo

Se comparan las gráficas de las envolventes obtenidas en los acápite 6.3.4, 7.3.4 y 8.3.4 correspondientes a los muros izquierdo y posterior únicamente. Se escogieron estos muros ya que mostraron un comportamiento más crítico que los muros frontal y derecho. Cabe resaltar que en las gráficas, para los módulos M100-4100 y M100-T4100D, se incluyen las fuerzas y desplazamientos de las tres fases. En cambio, para el módulo M000, sólo se incluyen estos valores hasta la Fase 2 por las razones descritas en el Capítulo 6. Las fuerzas cortantes corresponden a la fuerza cortante aplicada en la base del módulo y no corresponden a la fuerza cortante aplicada a cada muro para cada desplazamiento relativo. Sin embargo, las gráficas nos dan una idea del comportamiento dinámico de cada muro. Además, para que el factor de la masa de los diferentes módulos no influya en los cálculos, se dividieron las fuerzas cortantes entre la masa del módulo y obtener así la cortante basal por unidad de masa, denominada también pseudo aceleración ($S_a=V/M$ en las figuras 9.1 y 9.2).

En la Figura 9.1 se muestran las envolventes del muro izquierdo de los tres módulos. Además, se indican en las envolventes con círculos donde ocurrió el cambio de fase.

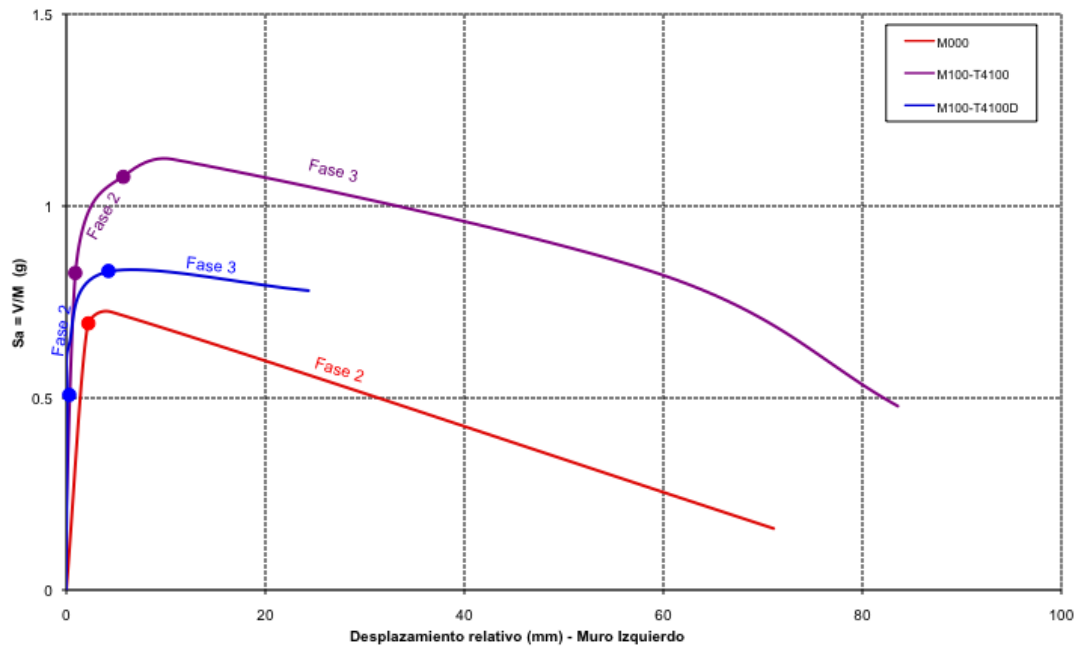


Figura 9.1. Envolturas Muro Izquierdo

Una gran diferencia se observa entre el módulo M100-T4100 y el módulo M000. Se puede observar que en el primero la fuerza cortante por unidad de masa fue 1.122, mientras que en el módulo no reforzado este valor fue 0.724, el 65% del valor obtenido en el módulo reforzado. Además, los grandes desplazamientos ocurrieron en la Fase 3 en el módulo reforzado mientras que en módulo no reforzado éstos ocurrieron en la Fase 2.

En los módulos M100-T4100 y M100-T4100D el comportamiento fue muy similar. En el primer módulo, el muro mostró gran ductilidad y una disminución del cortante máximo del 50% aproximadamente al alcanzar su máximo desplazamiento. En el segundo módulo, el muro también tuvo ductilidad y una disminución del 10% del cortante máximo al alcanzar el máximo desplazamiento. Estos muros tuvieron daños leves al final del ensayo, por lo que todavía tenían una gran capacidad de disipar energía y ductilidad remanente.

En la Figura 9.2 se muestran las envolturas del muro posterior de los tres módulos. El comportamiento en estos muros resulta muy similar al mostrado en el muro izquierdo con la salvedad de que los desplazamientos fueron mayores, por la deformación por flexión de la toma central superior.

En el módulo M000, la fuerza cortante en estos dos muros se redujo casi en un 100%, es decir la estructura prácticamente colapsó ya que no era capaz de soportar mayores fuerzas. En el módulo M100-T4100, la fuerza cortante se redujo aproximadamente el 50% de su valor máximo. Finalmente, en el módulo M100-T4100D, la fuerza cortante se redujo aproximadamente el 20% de su valor máximo al alcanzar su máximo desplazamiento. Por otra parte, resulta inquietante que la pendiente negativa en la etapa inelástica del módulo no reforzado M000 sea similar a la del módulo reforzado M100-T4100, ambos ensayados en sentido unidireccional.

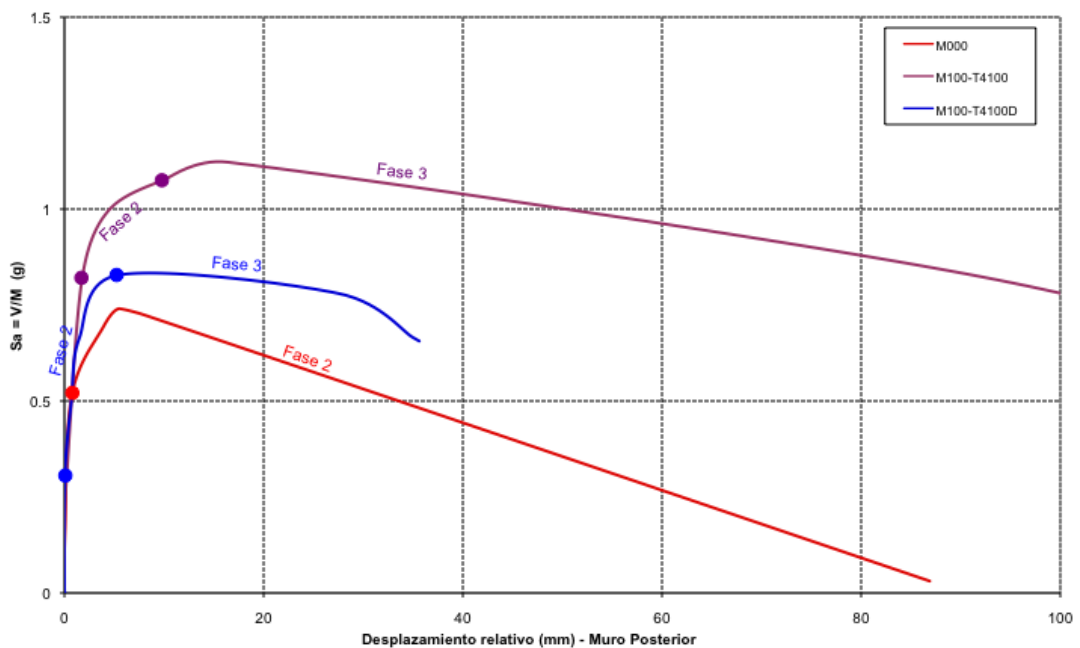


Figura 9.2 Envolventes de Muro Posterior

La fuerza cortante máxima por unidad de masa alcanzada en el módulo ensayado a 45° fue 74% del valor obtenido en el módulo reforzado ensayado en sentido unidireccional. Esto se puede haber debido a la forma de falla por deslizamiento que tuvo el módulo M100-T4100D. En la Fase 3 de la gráfica del módulo ensayado a 45° , el muro se desplaza aproximadamente 20mm sin que incremente la fuerza, lo que se explica con el deslizamiento de 20mm observado en la base del módulo.

El módulo no reforzado alcanzó solo el 65% del módulo M100-T4100, lo que hace evidente el aporte de la geomalla en la resistencia sísmica del módulo de adobe. Sin embargo, este aporte se vería reducido si se presentase la falla por deslizamiento.

Para un mismo desplazamiento, los muros en el módulo M100-T4100D alcanzaron una menor fuerza cortante en comparación a los muros en el módulo M100-T4100 antes de la Fase 3, es decir, antes que ocurra el deslizamiento. Esto se puede haber debido a que los muros, al mismo tiempo de estar sometidos a una fuerza cortante, estaban sometidos a una fuerza perpendicular a su plano de igual magnitud. Sin embargo, es necesario realizar ensayos adicionales para determinar si la acción de esfuerzos combinados de cortante y flexión fuera del plano cambia el comportamiento dinámico de un muro, reduciendo el cortante máximo que tiene la estructura en el rango elástico en comparación a estar sometido a un solo tipo de esfuerzo.

Los ensayos dinámicos con movimientos en dos direcciones resultan ser más representativos que los ensayos dinámicos unidireccionales ya que un movimiento unidireccional en un sismo es altamente improbable.

9.3. Periodo Natural de Vibración y Coeficiente de Amortiguamiento

En la Tabla 9.4 se resumen los periodos naturales de vibración obtenidos en los tres módulos en la parte superior de los muros derecho, izquierdo, frontal y posterior.

Tabla 9.4 Comparación de periodos naturales en vibraciones libres de los módulos M000, M100-T4100 y M100-T4100D (s)

| Instrumento | Descripción | Módulo | VL0 | VL1 | VL2 | VL3 |
|-------------|---------------------------|-------------|------|------|------|------|
| A1 | Muro Derecho (Superior) | M000 | 0.16 | 0.16 | 0.17 | – |
| | | M100-T4100 | 0.08 | 0.09 | 0.09 | 0.11 |
| | | M100-T4100D | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.18 |
| A2 | Muro Izquierdo (Superior) | M000 | 0.15 | 0.17 | 0.17 | – |
| | | M100-T4100 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.25 |
| | | M100-T4100D | 0.08 | 0.08 | 0.10 | 0.18 |
| A3 | Muro Frontal (Superior) | M000 | 0.07 | 0.07 | 0.17 | – |
| | | M100-T4100 | 0.07 | 0.08 | 0.09 | 0.14 |
| | | M100-T4100D | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.17 |
| A4 | Muro Posterior (Superior) | M000 | 0.07 | 0.07 | 0.18 | – |
| | | M100-T4100 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.26 |
| | | M100-T4100D | 0.07 | 0.07 | 0.08 | 0.18 |

Los periodos entre los módulos M100-T4100 y M100-T4100D fueron muy similares hasta después de la Fase 2, en promedio 0.08s en los cuatro muros. Luego de la Fase 3, los periodos se incrementaron hasta tres veces su valor inicial. Sin embargo, no se pudo observar una diferencia clara entre los dos módulos, ya que

en el muro izquierdo y posterior los periodos resultaron mayores en el módulo M100-T4100 mientras que en el muro derecho y frontal los periodos fueron mayores en el módulo M100-T4100D.

En el módulo M000 se observaron dos tendencias marcadamente diferentes. En los muros de flexión (muro frontal y posterior) se observó inicialmente un periodo de 0.07s y luego se incrementó notoriamente después de la Fase 2 hasta 0.18s. En cambio, en los muros de corte (muro derecho e izquierdo) se observó inicialmente un periodo de 0.15seg y se incrementó ligeramente después de la Fase 2 hasta 0.17seg.

Estas incongruencias o diferentes resultados en los periodos obtenidos se pueden haber debido a que la plataforma de la mesa vibradora siempre estuvo en movimiento luego del pulso, sin que se produzca una verdadera vibración libre en el módulo y por lo tanto, influenciando en las frecuencias obtenidas de la transformada de Fourier.

En la Tabla 9.5 se resumen los coeficientes de amortiguamiento obtenidos en los tres módulos en la parte superior de los muros derecho, izquierdo, frontal y posterior. En todos los casos se observó un incremento gradual de los coeficientes de amortiguamiento a través de las tres fases. Los coeficientes de amortiguamiento iniciales en los módulos M100-T4100 y M100-T4100D fueron alrededor del 8% y llegaron a duplicarse después de la Fase 3. Sin embargo, en el módulo M100-T4100D se observa un menor incremento al final del ensayo, lo que se corrobora con los menores daños observados en comparación al módulo M100-T4100.

En el módulo M000 los coeficientes de amortiguamiento fueron muy similares a los de los módulos reforzados hasta la vibración libre medida luego de la Fase 2. Un ligero incremento se observó en el muro derecho y el muro posterior en comparación a los otros dos módulos.

Tabla 9.5 Comparación de coeficientes de amortiguamientos en vibraciones libres de los módulos M000, M100-T4100 y M100-T4100D

| Instrumento | Descripción | Módulo | VL0 | VL1 | VL2 | VL3 |
|-------------|---------------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| A1 | Muro Derecho (Superior) | M000 | 8.58% | 9.21% | 13.80% | – |
| | | M100-T4100 | 7.94% | 11.46% | 11.88% | 16.04% |
| | | M100-T4100D | 8.92% | 10.14% | 10.36% | 11.10% |
| A2 | Muro Izquierdo (Superior) | M000 | 7.04% | 8.09% | 8.49% | – |
| | | M100-T4100 | 8.57% | 9.89% | 11.39% | 17.09% |
| | | M100-T4100D | 6.21% | 6.56% | 10.05% | 10.22% |
| A3 | Muro Frontal (Superior) | M000 | 8.35% | 9.40% | 9.43% | – |
| | | M100-T4100 | 6.89% | 10.65% | 11.70% | 14.70% |
| | | M100-T4100D | 6.03% | 8.32% | 8.50% | 8.78% |
| A4 | Muro Posterior (Superior) | M000 | 11.19% | 13.57% | 13.89% | – |
| | | M100-T4100 | 8.70% | 8.30% | 9.64% | 12.71% |
| | | M100-T4100D | 7.75% | 8.32% | 9.08% | 9.22% |

A pesar de las influencias externas mencionadas que influenciaron en los cálculos, se puede deducir de los valores obtenidos que el refuerzo con geomalla aumentó la rigidez de la estructura, ya que los periodos fueron menores en comparación al módulo no reforzado y el módulo M100-T4100D tuvo menor daño al módulo M100-T4100, debido a que los coeficientes de amortiguamiento y los periodos fueron en promedio menores al finalizar el ensayo.

9.4. Estimación y Variación de la Rigidez

Según lo descrito en el Capítulo 5, el índice de degradación de la rigidez nos permite estimar el porcentaje en que ha disminuido la rigidez después de cada fase en cada muro utilizando las frecuencias de vibración obtenidas. El índice de degradación de la rigidez (S) nos da una estimación del porcentaje en que ha disminuido este parámetro con respecto a su valor inicial. Por ejemplo, la rigidez asociada a un valor de $S=0.10$ en un módulo puede ser mucho mayor que la rigidez asociada a un valor de $S=0.40$ de otro módulo. Este índice no compara las rigideces sino compara el daño en una estructura en relación a su estado inicial.

Se decidió no calcular este índice con las frecuencias obtenidas en las vibraciones libres por las distorsiones que se habían presentado en los resultados y más bien utilizar las rigideces obtenidas de los gráficos Desplazamientos relativo vs. Cortante basal. La rigidez se obtuvo como la rigidez secante asociada al instante en que se producía la máxima fuerza cortante basal.

En la Tabla 9.6 se muestran los índices de degradación de la rigidez en el módulo M000. Se observa que hasta la Fase 2 en que se registraron los desplazamientos, los muros llegaron a perder entre el 54 al 67% de la rigidez inicial asociada a la registrada en la Fase 1.

Tabla 9.6 Índice de degradación de la rigidez en el módulo M000

| Inst. | Descripción | K_0 (kN/mm) | Fase 1 | Fase 2 | Fase 3 |
|-------|---------------------------|---------------|--------|--------|--------|
| A1 | Muro Derecho (Superior) | 88 | 1.00 | 0.25 | - |
| A2 | Muro Izquierdo (Superior) | 62 | 1.00 | 0.36 | - |
| A3 | Muro Frontal (Superior) | 39 | 1.00 | 0.46 | - |
| A4 | Muro Posterior (Superior) | 43 | 1.00 | 0.33 | - |

En la Tabla 9.7 se muestran los índices de degradación de la rigidez en el módulo M100-T4100. La degradación fue prácticamente uniforme en los cuatro muros. Se observa que en la Fase 3 los muros perdieron entre el 86 al 90% de su rigidez inicial.

Tabla 9.7 Índice de degradación de la rigidez en el módulo M100-T4100

| Inst. | Descripción | K_0 (kN/mm) | Fase 1 | Fase 2 | Fase 3 |
|-------|---------------------------|---------------|--------|--------|--------|
| A1 | Muro Derecho (Superior) | 113 | 1.00 | 0.45 | 0.14 |
| A2 | Muro Izquierdo (Superior) | 102 | 1.00 | 0.54 | 0.14 |
| A3 | Muro Frontal (Superior) | 88 | 1.00 | 0.33 | 0.10 |
| A4 | Muro Posterior (Superior) | 67 | 1.00 | 0.45 | 0.13 |

En la Tabla 9.8 se muestran los índices de degradación de la rigidez en el módulo M100-T4100D. En la Fase 3, los muros perdieron entre el 58 al 78% de su rigidez inicial. En comparación al módulo M100-T4100, en este módulo la degradación fue menor con respecto a su valor inicial, lo que también se observó visualmente al presentarse menos fisuras y grietas.

Tabla 9.8 Índice de degradación de la rigidez en el módulo M100-T4100D

| Inst. | Descripción | K_0 (kN/mm) | Fase 1 | Fase 2 | Fase 3 |
|-------|---------------------------|---------------|--------|--------|--------|
| A1 | Muro Derecho (Superior) | 139 | 1.00 | 0.73 | 0.35 |
| A2 | Muro Izquierdo (Superior) | 72 | 1.00 | 0.90 | 0.33 |
| A3 | Muro Frontal (Superior) | 55 | 1.00 | 0.49 | 0.42 |
| A4 | Muro Posterior (Superior) | 83 | 1.00 | 0.45 | 0.22 |

Hasta la Fase 2 en que se midieron los desplazamientos para los tres módulos, la degradación de la rigidez de los muros reforzados fue en general menor que en los muros no reforzados. Esto quiere decir que ante una misma sollicitación los daños fueron menores.

10. Conclusiones y Recomendaciones Constructivas

En este capítulo se dan las conclusiones y recomendaciones constructivas a partir del trabajo realizado en la presente investigación y de las experiencias aprendidas durante la construcción de la Sede de Capacitación Técnica de la PUCP en El Carmen, Chincha la cual se construyó con adobe reforzado con geomalla.

10.1. Conclusiones

- Los ensayos mostraron que el refuerzo en estructuras de adobe es necesario para evitar el colapso ante eventos sísmicos severos. El refuerzo externo con geomalla reduce significativamente la vulnerabilidad sísmica de las viviendas de adobe al reducir los daños y mantener la estructura unida inclusive ante grandes desplazamientos y aceleraciones de 130mm y 1.3g respectivamente en la mesa vibradora unidireccional de la PUCP.
- El refuerzo con geomalla mostró ser compatible con las deformaciones de estructuras de adobe y desarrolló un comportamiento dúctil ante movimientos asociados a un sismo severo. Los muros reforzados llegaron a tener 130mm de desplazamiento relativo sin poner en peligro a la estructura.
- El tarrajeo en muros de adobe mejora el comportamiento sísmico ya que incrementa la rigidez y los daños se reducen significativamente en comparación con los muros de adobe sin tarrajeo.
- Los ensayos dinámicos con movimientos en dos direcciones son más representativos que los ensayos dinámicos unidireccionales ya que un movimiento unidireccional durante un sismo es improbable. Sin embargo, es necesario realizar ensayos adicionales para determinar si la acción de esfuerzos combinados de cortante y flexión fuera del plano cambia el comportamiento dinámico de un muro con respecto a un ensayo unidireccional, ya que el módulo a 45° falló por deslizamiento y por este motivo, la resistencia no llegó a incrementarse.
- Durante un sismo, la ocurrencia de una falla por deslizamiento resulta altamente remota. En la Fase 3 del ensayo, se aplicaron aceleraciones hasta de 1.3g. Sin

embargo, según la Norma E.030 “Diseño Sismorresistente”, la mayor aceleración con una probabilidad de excedencia de 10% en 50 años de exposición asociada a un sismo en la costa del Perú es 0.56g en suelo blando, menos de la mitad del valor ejercido en la Fase 3.

- La geomalla distribuye los esfuerzos de tracción en toda la superficie del muro, distribuyendo los posibles daños en una mayor área del muro. Además, una vez que el muro ha tenido un gran daño, la geomalla confina los bloques en que se ha quebrado el muro e incrementa la seguridad en la vivienda.
- La geomalla TENSAR BX4100 ha sido la geomalla de menor resistencia y de menor costo utilizada en un ensayo en la PUCP, que cumpliendo con los requisitos de la Norma E.080 “Adobe”, dotó a la estructura de adobe de una buena resistencia ante sismos severos. Por lo tanto, se recomienda su uso como elemento de refuerzo. Sin embargo, se recomienda seguir investigando otras alternativas dentro de las geomallas disponibles en el mercado que puedan ser más económicas sin perjudicar su resistencia a la tracción.
- El desempeño de la técnica propuesta en la cartilla “*Construcción de Casas Saludables y Sismorresistentes de Adobe Reforzado con Geomallas*” puesta a prueba en la mesa vibradora de la PUCP, demostró que esta tecnología permite resistir solicitaciones asociadas a un sismo severo presentándose daños de leves a moderados en una estructura de adobe.

10.2. Recomendaciones Constructivas

- **Transferencia de Esfuerzos mediante el Tejido de Traslapes**

En la cartilla se especifica que el amarre vertical de los traslapes entre paños de geomalla y el amarre horizontal entre la geomalla de cimentación y la geomalla de los muros deben ser amarrados con rafia. El procedimiento por el cual se realiza este amarre no está claramente definido.



Figura 10.1. Amarre de traslapes con la rafia ya colocada

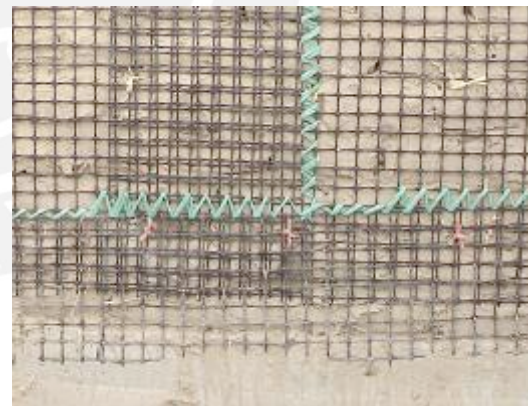


Figura 10.2. Amarre de traslapes colocando puntos de rafia adicionales

Una posibilidad es amarrar los traslapes utilizando los puntos de rafia ya colocados en el muro, sin embargo, éstos no siempre coinciden en el área de traslape. Otra posibilidad es amarrar los traslapes colocando puntos adicionales de rafia luego de amarradas las mallas al muro. No obstante, la alternativa con la cual se logró una transferencia de esfuerzos más efectiva fue tejiendo con rafia las traslapes entre sí. Con esta alternativa se logra “embolsar” por completo al muro con la geomalla asegurando los traslapes entre paños. La población adoptó esta alternativa mayoritariamente ya que a la vez crea una mayor sensación de seguridad en el refuerzo.



(a)



(b)

Figura 10.3. Tejido de traslapes con rafia

- **Distribución de la Geomalla**

El procedimiento descrito en la cartilla establece que la colocación de la geomalla se realice utilizando un paño por cara y luego ambas caras de un muro se traslapen sobre la viga collar, se amarren con rafia y finalmente se claven a la viga. Sin embargo, en la práctica este procedimiento constructivo se

vuelve complicado y el rendimiento en la colocación de la geomalla resulta muy por debajo del esperado en una obra de construcción.

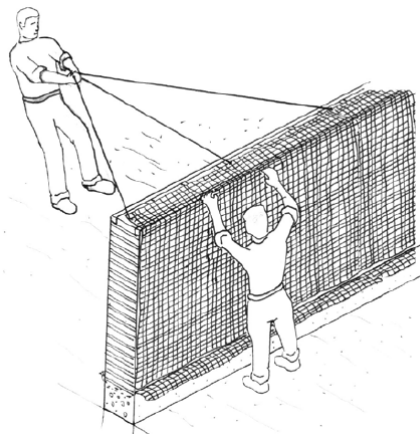


Figura 10.4 Propuesta según cartilla (Vargas et al, 2007)

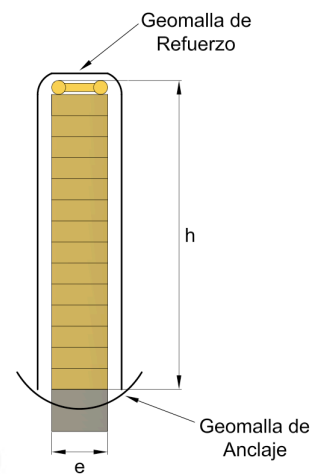


Figura 10.5. Nueva propuesta

El procedimiento con el cual se obtuvo un mayor rendimiento y efectividad fue el de colocar un solo paño por muro con una longitud de dos veces la altura del muro (incluida la viga collar) más el espesor del muro. El paño se pasa por encima del muro y se amarra con rafia primero una cara para luego templar y amarrar la cara opuesta. La primera cara se amarrará de abajo hacia arriba y la segunda cara se amarrará de arriba hacia abajo. Esto evitará la formación de bolsones y pliegues en la geomalla. Además, se ahorra en geomalla al suprimir el traslape de los paños sobre la viga collar.

- **Corte de la Geomalla**

En la cartilla se recomienda cortar los paños de geomalla en la dirección longitudinal del rollo. Sin embargo, esto limita la altura de muros que se pueden construir y, además, está sujeto al ancho disponible de los rollos de geomalla en el mercado.

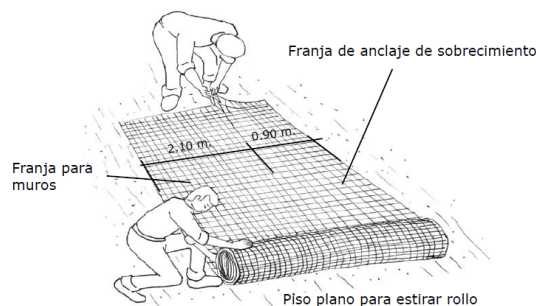


Figura 10.6 Corte de geomalla según cartilla (Vargas et al, 2007)

Se aprovechará mejor la geomalla al cortar los paños de geomalla con una longitud igual al ancho del rollo (3 - 4m) y cortar la altura requerida en la dirección longitudinal del rollo.

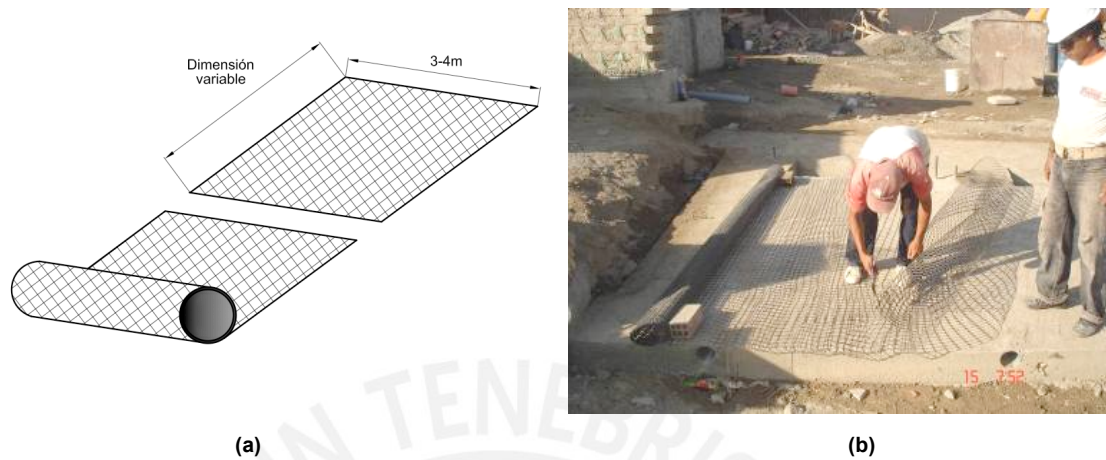


Figura 10.7 Propuesta de corte de geomalla

- **Exposición y Colocación de la Rafia**

La geomalla tiene un contenido de Carbon Black de 1% que le da protección a los rayos UV y asegura el 100% de la resistencia especificada por al menos 500 horas de exposición (según ensayo ASTM D4355). La adición de este material evita que el polipropileno se degrade al absorber la radiación ultravioleta que es lo que causa que este material sintético se dañe. Sin embargo, la rafia disponible en el mercado es un material plástico de fibras de polipropileno sin protección a los rayos UV. La resistencia a la tensión se degrada ante la exposición al sol y por lo tanto la geomalla podrá dejar de estar eficientemente amarrada al muro. En estos casos, la geomalla no actuará como elemento de refuerzo.

En el futuro, se deberá especificar y recomendar un tiempo de exposición entre el asentado del muro hasta el tarrajeo del muro, tiempo en el cuál la rafia y la geomalla están expuestas, para evitar la degradación de la rafia. O en caso, especificar otro material más resistente a la radiación ultravioleta que la rafia.

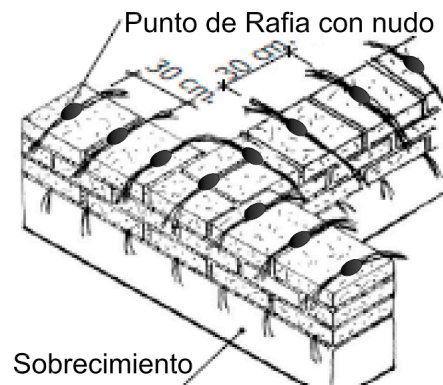
- **Prefabricación de Puntos de Rafia**

Un procedimiento que mejoró el proceso constructivo fue hacerle un nudo a las cuatro cintas de rafia antes del asentado del muro. Esto permitió fabricar en

grandes cantidades los puntos de rafia previamente, disminuir el tiempo de asentado y mejorar la colocación sobre el mortero.



(a)



(b) Figura modificada de Vargas et al, 2007

Figura 10.8 Prefabricación de puntos de rafia

- **Distribución de los Puntos de Rafia**

Se recomienda intercalar los puntos de rafia entre hiladas de rafia contiguas. Esto evita la generación de bolsones en la geomalla que se producen si los puntos de rafia se colocan todos en la misma vertical.

Por último, si la construcción se realiza con adobes de 0.4m de lado es preferible colocar los puntos de rafia espaciados horizontalmente también a la misma distancia. Esto facilita el proceso constructivo ya que los albañiles o las personas que realizan el asentado del muro colocarán la rafia al medio de los adobes o entre cada adobe como referencia. Otro espaciamiento horizontal diferente al ancho del adobe dificultará el proceso constructivo.

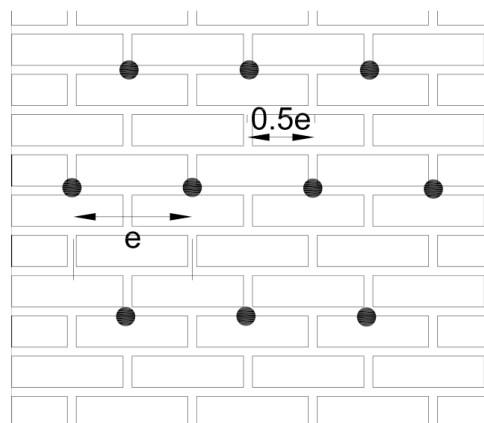


Figura 10.9 Propuesta de disposición de rafias

Referencias y Bibliografía

1. American Society for Testing and Materials (ASTM). 2001. “D 6637 – 01: Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Geogrids by the Single or Multi-Rib Tensile Method”. American Society for Testing and Materials. Pennsylvania, USA.
2. Blondet, M., Ottazi, G., Yep, J., Villa García, G., Ginocchio, F. (1989). “Ensayos de Simulación Sísmica de Viviendas de Adobe”. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
3. Blondet, M., Torrealva, D., Villa García, G., Ginocchio, F. (2006). “Reforzamiento de Construcciones de Adobe con Elementos Producidos Industrialmente: Ensayos de Simulación Sísmica”. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
4. Bothelo, J. (2008). “Dynamic Identification and Vibration-Based Damage Detection of Historical Constructions”. Master Thesis in Structural Analysis of Monuments and Historical Constructions. Erasmus Mundus Programme.
5. Cooperación Alemana al Desarrollo (GTZ). 2009. “Manual de Construcciones Sismorresistentes en Adobe: Tecnología de Geomalla”. Cooperación Alemana al Desarrollo. Lima, Perú.
6. Centro Regional de Sismología para América del Sur (CERESIS). “Manual Técnico para el Reforzamiento de las Viviendas de Adobe Existentes en la Sierra y Costa”. Consulta: Marzo 2010.
<http://www.ceresis.org/proyect/madobe/manual.htm>
7. Chopra, A. (1995). “Dynamic of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering”. Prentice Hall. New Jersey, USA.
8. Dirección Académica de Responsabilidad Social (DARS). “Blog sobre las Actividades de Ayuda y Reconstrucción de las Zonas Afectadas por el Terremoto en el Sur del Perú”. Consulta: Enero 2010.
<http://blog.pucp.edu.pe/index.php?blogid=1009>

9. Delgado, E. (2006). “*Comportamiento Sísmico de un Módulo de Adobe de Dos Pisos con Refuerzo Horizontal y Confinamientos de Concreto Armado*”. Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
10. Earthquake Engineering Field Investigation Team (EEFIT). 2008. “*2007 August 15 Magnitude 7.9 Earthquake near the Coast of Central Peru*”. European Communities. Italy.
11. Hulburd, E. (2008). “*Improvement in Seismic Performance of Adobe Housing through Polymer Mesh Reinforcement*”. Engineering Thesis. Stanford University. California, USA.
12. Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI). 2009. “*Lecciones Aprendidas del Sur - Sismo de Pisco 15 Agosto 2007*”. Instituto Nacional de Defensa Civil. Lima, Perú.
13. Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). 2007. “*Censos Nacionales 2007: XI de Población y VI de Vivienda*”. Instituto Nacional de Estadística e Informática. Lima, Perú.
14. Koerner, R. (2005). “*Designing with Geosynthetics*”. Pearson Prentice Hall. New Jersey, USA.
15. Madueño, I. (2005). “*Reforzamiento de Construcciones de Adobe con Elementos Producidos Industrialmente: Estudio Preliminar*”. Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
16. Muñoz, A. (2009). “*Ingeniería Sismorresistente*”. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
17. Peralta, G. (2009). “*Resistencia a Flexión de Muros de Adobe Reforzados con Geomallas – Influencia del Tipo de Tarrajeo*”. Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.

18. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). 2008. *Manual para el Desarrollo de Viviendas Sismorresistentes*. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Lima, Perú.
19. Quiun, D. (1993). *Estudio de la Respuesta Dinámica de un Especímen de Albañilería Confinada de Tres Pisos*. Tesis para optar el Grado de Magíster en Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
20. Reglamento Nacional de Edificaciones (2000). *Norma Técnica de Edificación E.080 Adobe*. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Lima, Perú.
21. Reglamento Nacional de Edificaciones (2003). *Norma Técnica de Edificación E.030 Diseño Sismorresistente*. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Lima, Perú.
22. Reglamento Nacional de Edificaciones (2004). *Norma Técnica de Edificación E.020 Cargas*. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Lima, Perú.
23. Reglamento Nacional de Edificaciones (2008). *Anexo N°1: Refuerzo de Geomalla en Edificaciones de Adobe – Norma Técnica E.080 Adobe*. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Lima, Perú.
24. Rodríguez, A., Walker, C. (2009). *Expediente Técnico – Módulo Básico de Adobe Reforzado con Geomalla*. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
25. Rubiños, A. (2009). *Propuesta de Reconstrucción Post-Terremoto de Viviendas de Adobe Reforzado*. Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
26. Silva, W. (2000). *Comportamiento Sísmico de una Estructura Aporticada de Dos Pisos hecha de Concreto Armado, a Escala Reducida (3/4)*. Tesis para optar el Grado de Magíster en Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.

27. Tejada, U. (2001). *"Buena Tierra: Apuntes para el Diseño y Construcción con Adobe."* CIDAP. Lima, Perú.
28. Torrealva, D., Acero, J. (2005). *"Reinforcing Adobe Buildings with Exterior Compatible Mesh - The Final Solution Against the Seismic Vulnerability?"*. Sismo Adobe 2005. Lima, Perú.
29. Torrealva, D., Vargas, J., Blondet, M. (2006). *"Earthquake Resistant Design Criteria and Testing of Adobe Buildings at Pontificia Universidad Católica del Perú"*. Proceedings of the Getty Seismic Adobe Project 2006 Colloquium. California, USA.
30. Torrealva, D. (2007). *"Caracterización de Daños, Reparación y Refuerzo en Construcciones de Adobe"*. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
31. Torrealva, D. (2009). *"Diseño Sísmico de Muros de Adobe Reforzados con Geomallas"*. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
32. Vecchi, S. (2009). *"A Finite Element Model Evaluation of the Dynamic Behavior of One-Story Adobe Dwellings Reinforced with Polymer Grid"*. Master Thesis in Civil Engineering. Swiss Federal Institute of Technology. Zurich, Switzerland.
33. Vargas, J., Torrealva, D., Blondet, M. (2007). *"Construcción de Casas Saludables y Sismorresistentes de Adobe Reforzado con Geomallas: Zona de la Costa"*. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
34. Zegarra, L., Quiun, D., San Bartolomé, A., Giesecke, A. (1996). *"Reaconditioning of Existing Adobe Houses to Mitigate Earthquake Effects"*. 11th World Conference on Earthquake Engineering. Acapulco, Mexico.





Anexo A Protocolo de Ensayo

Protocolo de Ensayo

El protocolo de ensayo describe el procedimiento seguido durante el desarrollo del ensayo. El equipo de ensayo se conformó por las siguientes personas:

Tabla A.1. Equipo de ensayo

| Nombre | Responsabilidad |
|----------------------------------|--|
| Nicola Tarque | Coordinador del ensayo |
| Guillermo Pachas | Control del simulador |
| Martín Huamancayo | Asistente electrónico del ensayo Retiro de instrumentos |
| Marcos Fuentes | Encargado del equipo hidráulico |
| Alfredo Floriano | Video en posición 1 |
| Julio Chang | Video en posición 2 |
| Yalí Barrera / Fidel Loyola | Video en posición 3 |
| Lizet Vargas / Stefano Bossio | Video y Fotografía digital en posición 4 y móvil |
| Karina Sánchez / Francisco Pérez | Fotografía digital en posición 5 y móvil |
| Jean Doig / Laura Navarro | Cambio de letreros entre fases |
| Marcial Blondet | Jefe del Proyecto |
| Julio Vargas | Investigador del Proyecto |
| Stefano Bossio | Tesista del Proyecto / Bitácora de Ensayo |
| Gladys Villa García | Jefa del Laboratorio / Control de puerta de ingreso |

Además se contó con personas encargadas de marcar fisuras y personal de apoyo para la limpieza y retiro de los instrumentos.

La secuencia del ensayo fue la siguiente:

Tabla A.2. Secuencia del ensayo

| Fases | Amplitud |
|-----------------------------|----------|
| Vibración libre inicial | 1.5mm |
| Fase 1 | 30mm |
| Vibración libre post Fase 1 | 1.5mm |
| Fase 2 | 80mm |
| Vibración libre post Fase 2 | 1.5mm |
| Fase 3 | 130mm |
| Vibración libre post Fase 3 | 1.5mm |

Durante la ejecución del ensayo se debió seguir ciertas reglas generales para una adecuada obtención de los datos. Las reglas generales fueron las siguientes:

- Sólo el equipo de ensayo entró al área de trabajo.
- Los visitantes de cualquier procedencia, alumnos o externos, se ubicaron en el balcón del segundo piso y tercer piso del laboratorio.

- Sólo el coordinador del ensayo dio indicaciones al personal de control y al resto del equipo de ensayo.
- Los movimientos de vibración libre no fueron filmados. El coordinador del ensayo pidió que se despeje la plataforma del simulador y la zona perimétrica y, verificado ello, autorizó al encargado del control del simulador para que ejecute la vibración libre.
- Antes de dar inicio a cada fase:
 - El coordinador del ensayo solicitó la conformidad del encargado del control del simulador.
 - El encargado del control del simulador verificó que todo esté listo para iniciar el ensayo y se lo comunicó por micrófono al coordinador del ensayo.
 - El coordinador del ensayo verificó que los encargados de los videos estén listos para grabar. Los encargados de los videos anunciaron su conformidad.
 - El coordinador del ensayo indicó oralmente a los encargados de los videos que inicien la grabación.
 - El coordinador del ensayo autorizó verbalmente al encargado del control del simulador para que inicie el ensayo.
- Al término de cada fase, los encargados de la fotografía digital revisaron el módulo para tomar las fotos necesarias.
- De considerarlo pertinente, el coordinador del ensayo indicó a los encargados de los videos que hagan filmaciones de detalles en el módulo.
- Luego de cada fase se procedió a marcar las fisuras observadas con tiza. Para esto, se diferenciaron las fisuras de cada fase con los siguientes colores: Blanca (Fase 1), Rosada (Fase 2) y Celeste (Fase 3). Se indicó el término de la fisura en cada fase.

El coordinador del ensayo y el encargado del control del simulador utilizaron dos micrófonos inalámbricos para facilitar la comunicación y coordinación durante el ensayo.

Se fijaron posiciones fijas y móviles alrededor del módulo para los equipos de filmación y fotografía como se muestra a continuación:

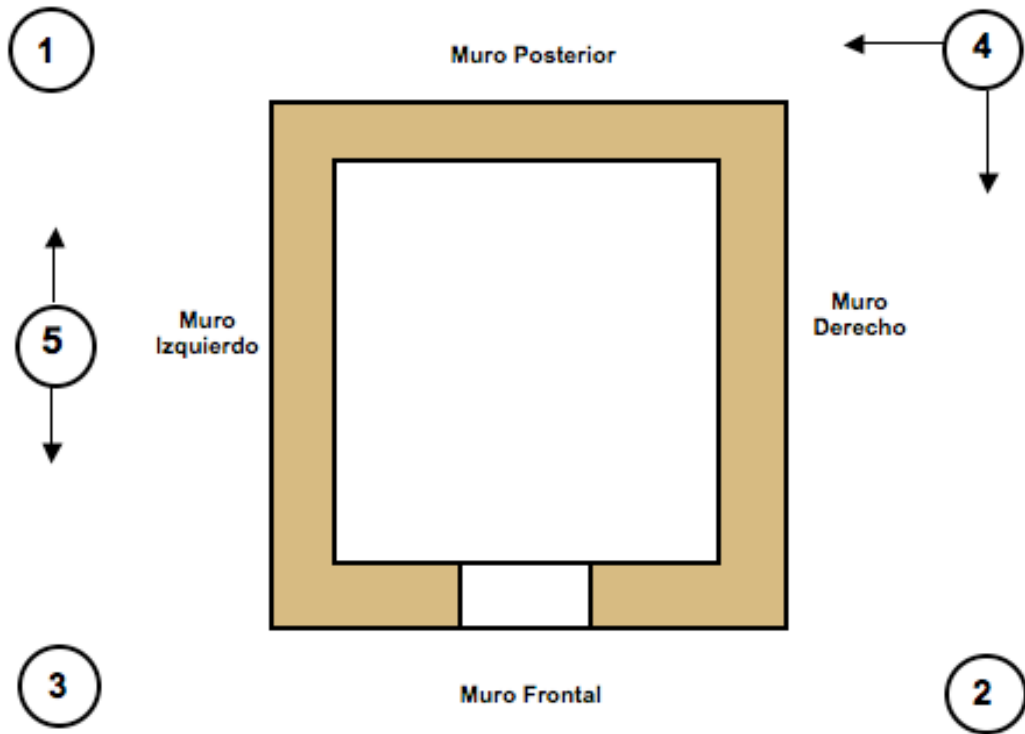
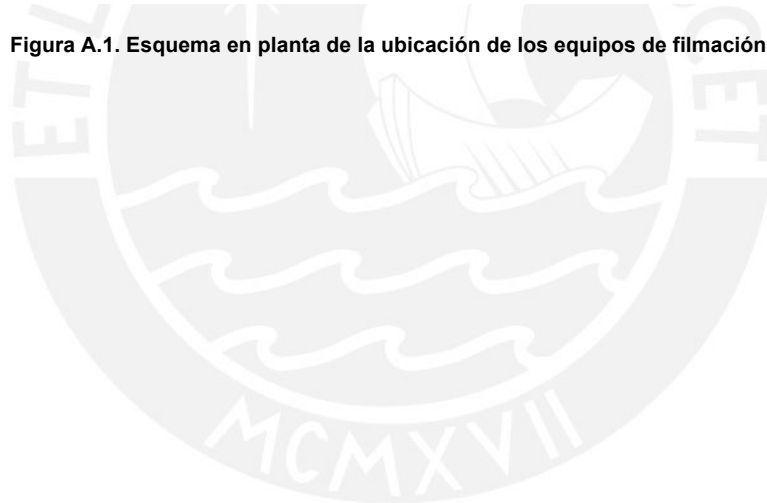
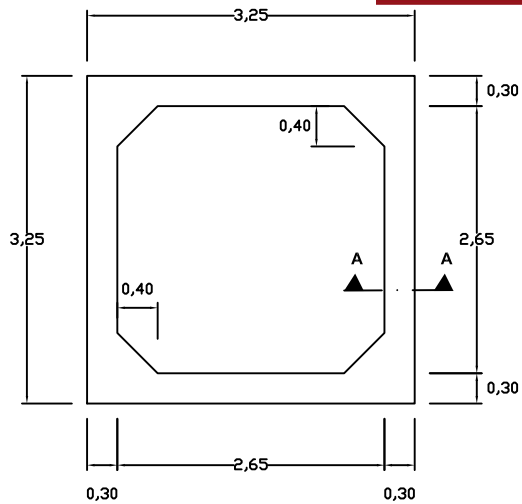


Figura A.1. Esquema en planta de la ubicación de los equipos de filmación y fotografía

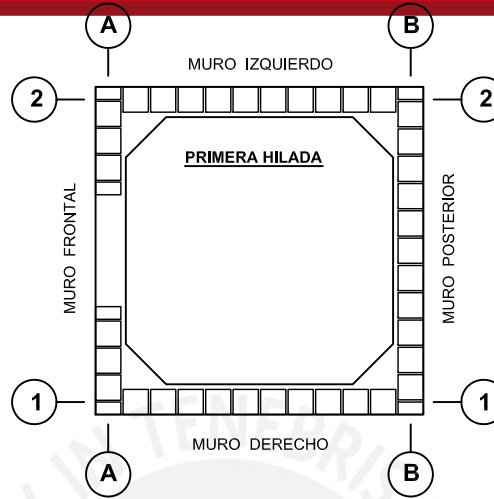
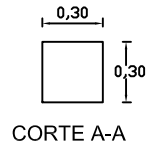


ANEXO B Planos de Arquitectura de los Módulos
M100-T4100 y M100-T4100D

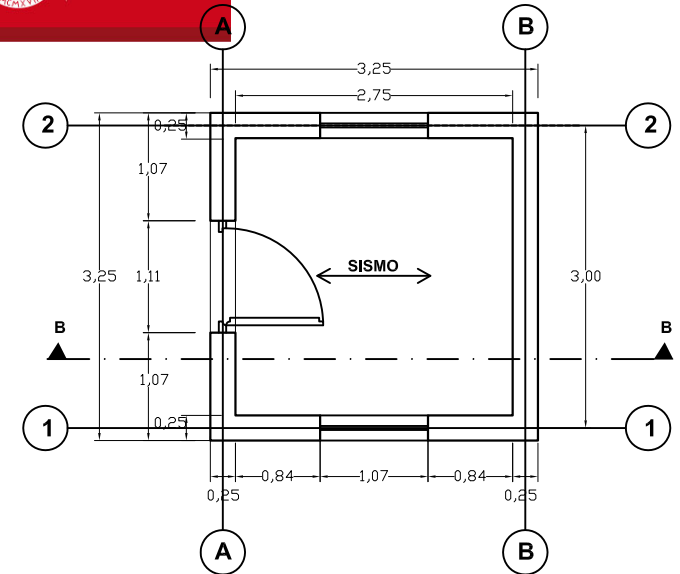




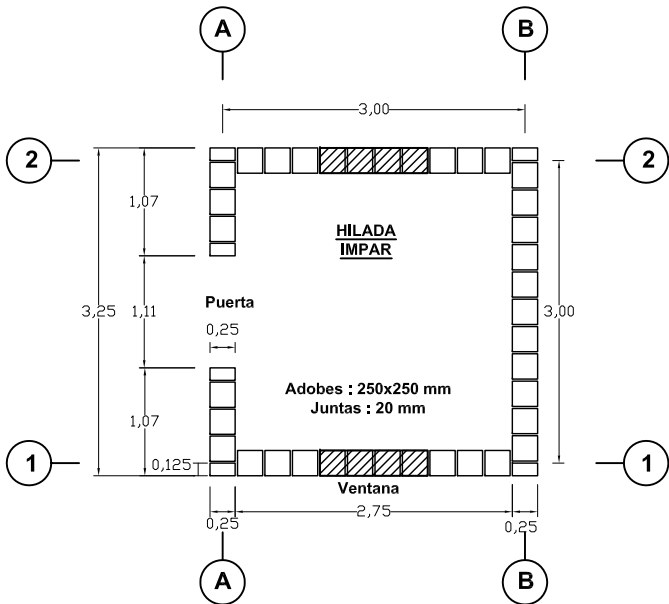
ANILLO DE CIMENTACIÓN



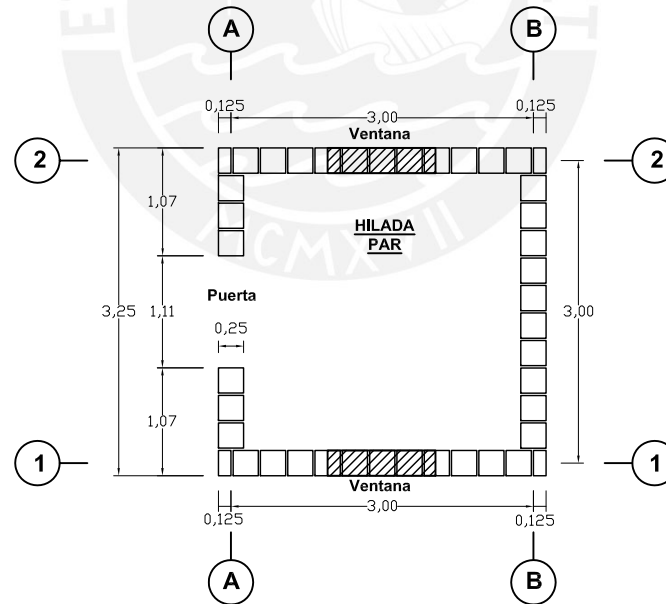
PRIMERA HILADA EN EL ANILLO DE CIMENTACIÓN



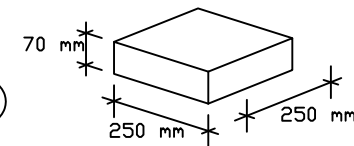
PLANTA DEL MÓDULO



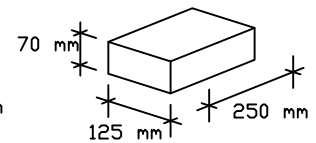
EMPLANTILLADO DE HILADAS IMPARES



EMPLANTILLADO DE HILADAS PARES

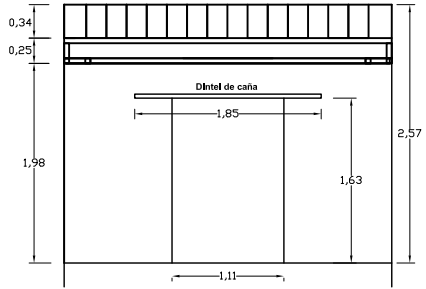


UNIDAD COMPLETA
(Dimensiones finales)

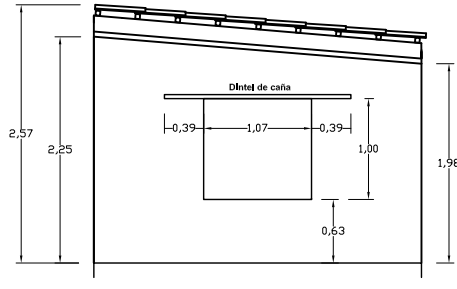


MEDIA UNIDAD
(Dimensiones finales)

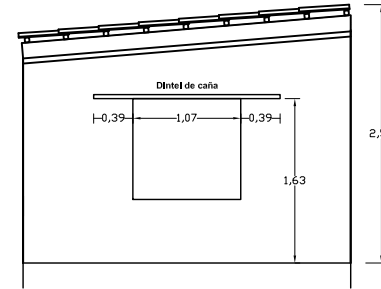
| | | | |
|--|--|---------------------------------|--|
| PUCP | | M100-T4100 y M100-T4100D | |
| PROYECTO : Vivienda de adobe reforzada con malla | | LAMINA : ARQUITECTURA | |
| PLANO : Planta y emplantillado | | A-01 | |
| REFERENCIA : Proyecto Rectorado | | ESCALA : 1/75 | |
| FECHA : Julio 2008 | | DIBUJO : S.B.I. | |



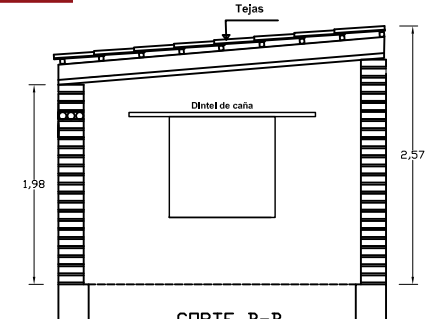
ELEVACIÓN MURO FRONTAL



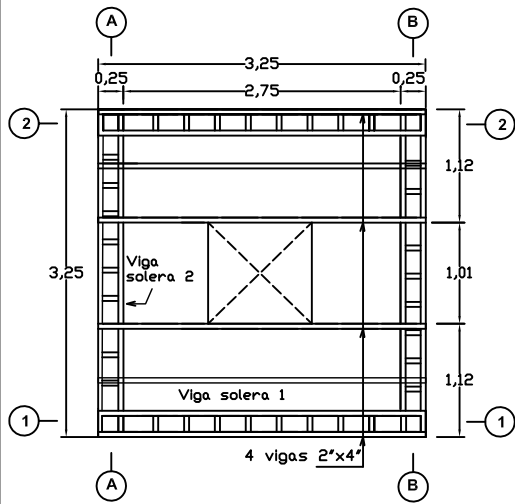
ELEVACIÓN MURO IZQUIERDO



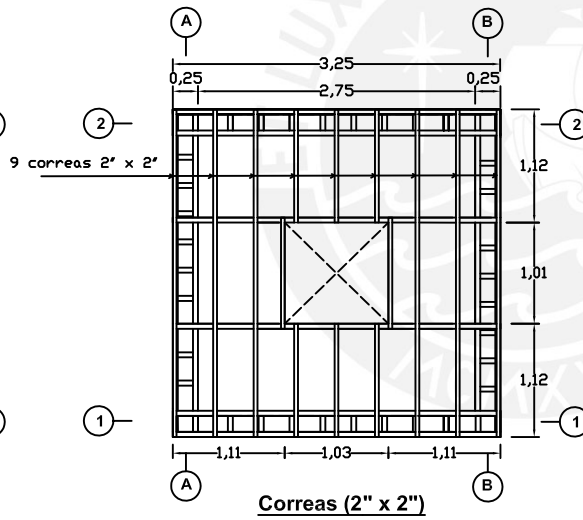
ELEVACIÓN MURO DERECHO



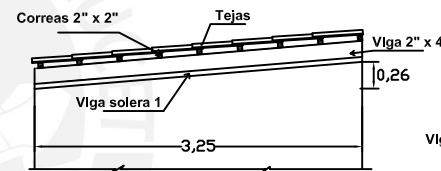
CORTE B-B



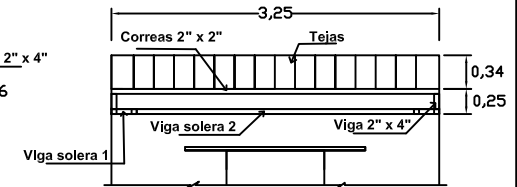
VIGAS (2"X4")



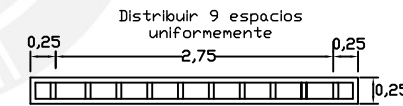
CORREAS (2" x 2")



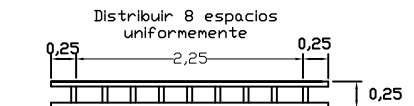
ELEVACIÓN EJES 1 Y 2



ELEVACIÓN EJE A



PLANTA - VIGA SOLERA 1 - EJES 1 Y 2



PLANTA - VIGA SOLERA 2 - EJES A Y B

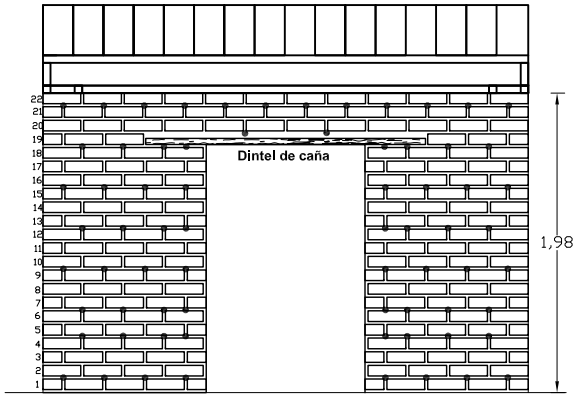
Nota.- Los largueros y los travesaños para las vigas soleras son de 2" x 6"

TECHO

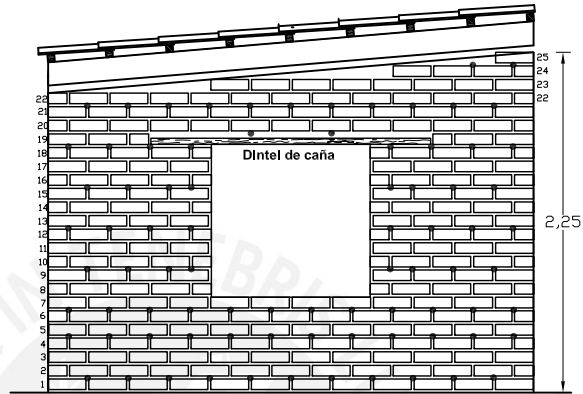
| | | | |
|------------|---------------------------------------|--------------------------|-------------|
| PUCP | | M100-T4100 y M100-T4100D | |
| PROYECTO | Vivienda de adobe reforzada con malla | LAMINA | ESTRUCTURAS |
| PLANO | Elevaciones y techo | A-02 | |
| REFERENCIA | Proyecto Rectorado | | |
| ESCALA | 1/75 | | |
| | | DIBUJO | S.B.I. |

ANEXO C Planos de Estructuras de los Módulos
M100-T4100 y M100-T4100D





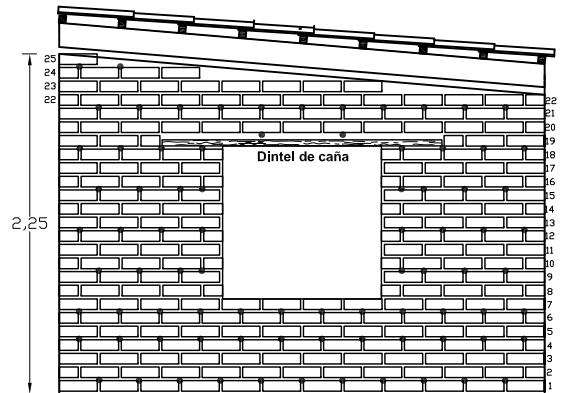
MURO FRONTAL



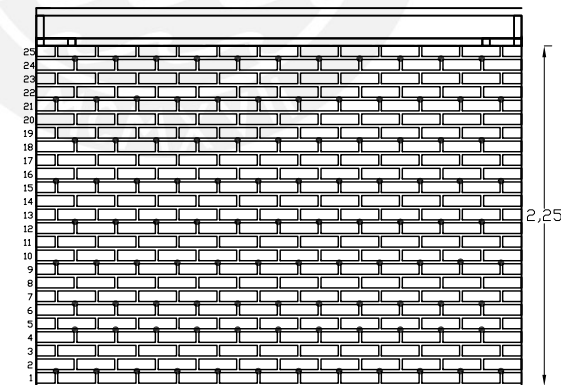
MURO DERECHO

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

- Las rafas se dejarán durante el asentado de los adobes para amarrar la malla al muro.
- La longitud de la rafia será de 2,40 m y se doblará tres veces, de forma de obtener cuatro tiras de 0,60 m.

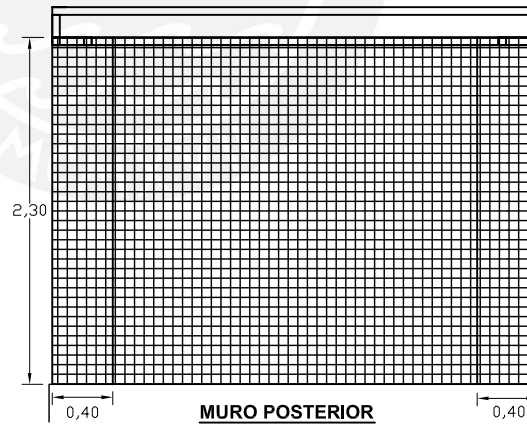
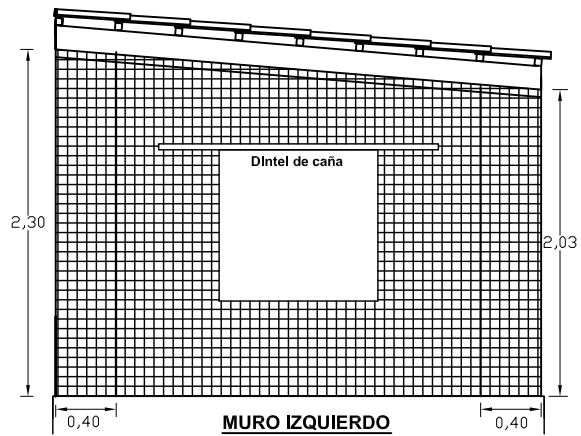
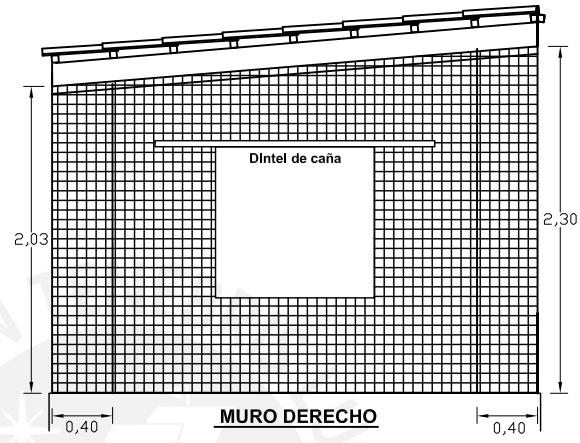
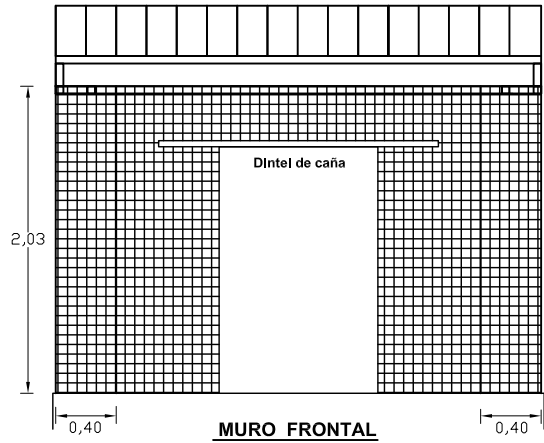


MURO IZQUIERDO



MURO POSTERIOR

| | | | |
|-------------|---------------------------------------|---------------------------------|-------------|
| PUCP | | M100-T4100 y M100-T4100D | |
| PROYECTO | Vivienda de adobe reforzada con malla | LAMINA | ESTRUCTURAS |
| PLANO | Detalle de rafia | E-01 | |
| REFERENCIA | Proyecto Rectorado | | |
| ESCALA | 1/50 | | |
| | | DIBUJO | S.B.I. |

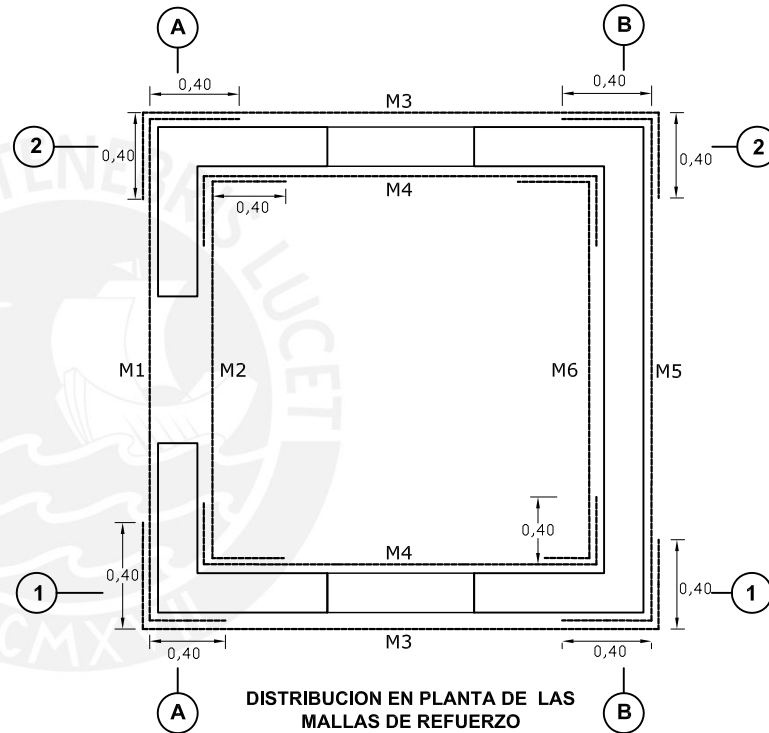
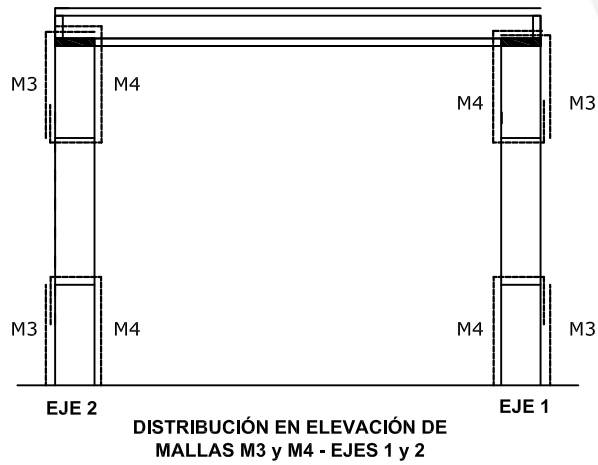
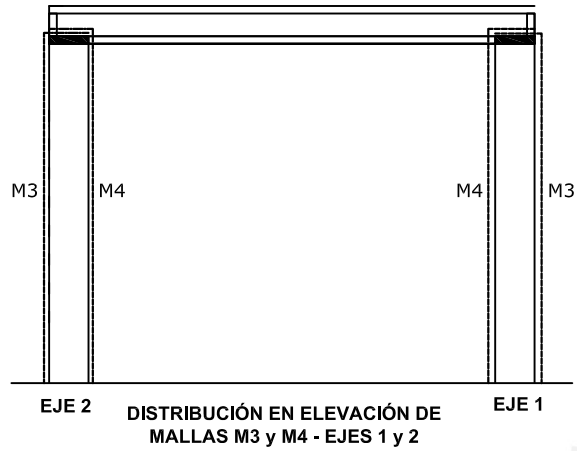


MALLAS DE REFUERZO

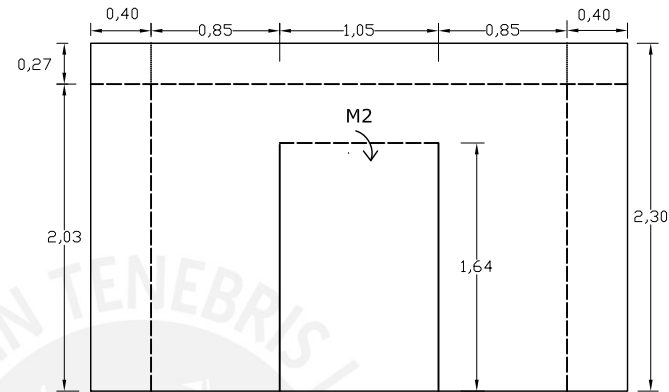
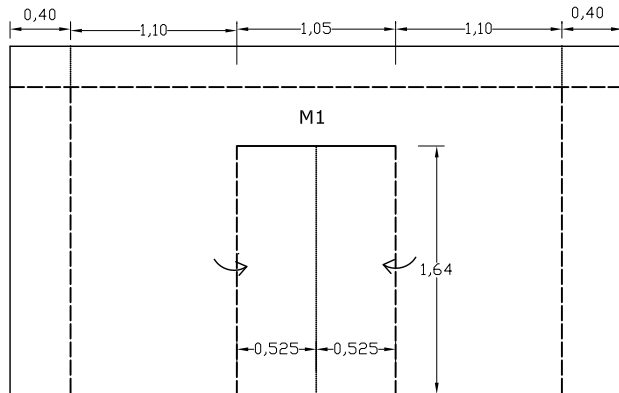
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

- La malla a utilizar será la TENSAR BX-4100.
- Los empalmes verticales de las mallas serán como mínimo de 150 mm.
- Los empalmes horizontales de las mallas serán como mínimo de 150 mm.

| | | | |
|------------|---------------------------------------|--------------------------|-------------|
| PUCP | | M100-T4100 y M100-T4100D | |
| PROYECTO | Vivienda de adobe reforzada con malla | LAMINA | ESTRUCTURAS |
| PLANO | Detalle de malla | E-02 | |
| REFERENCIA | Proyecto Rectorado | | |
| ESCALA | 1/50 | | |
| FECHA | JULIO 2008 | DIBUJO | S.B.I. |



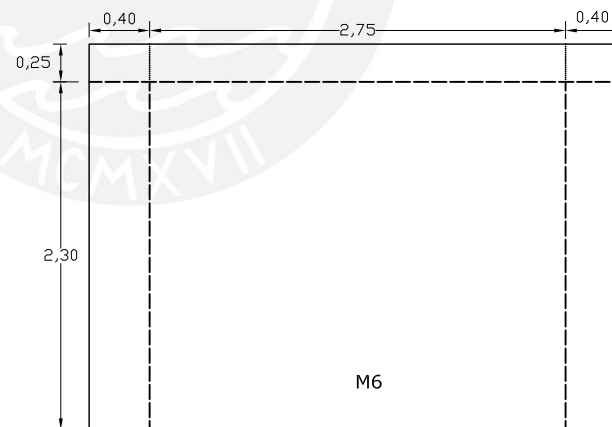
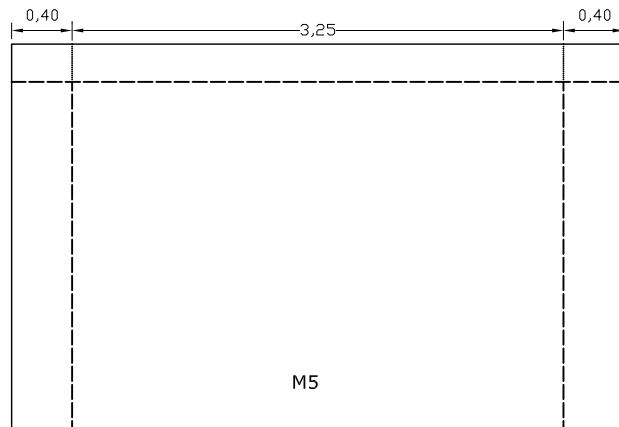
| | | | |
|------------|---------------------------------------|--------------------------|-------------|
| PUCP | | M100-T4100 y M100-T4100D | |
| PROYECTO | Vivienda de adobe reforzada con malla | LAMINA | ESTRUCTURAS |
| PLANO | Planta y elevación de mallas | E-03 | |
| REFERENCIA | Proyecto Rectorado | | |
| ESCALA | 1/50 | | |
| | | DIBUJO | S.B.I. |



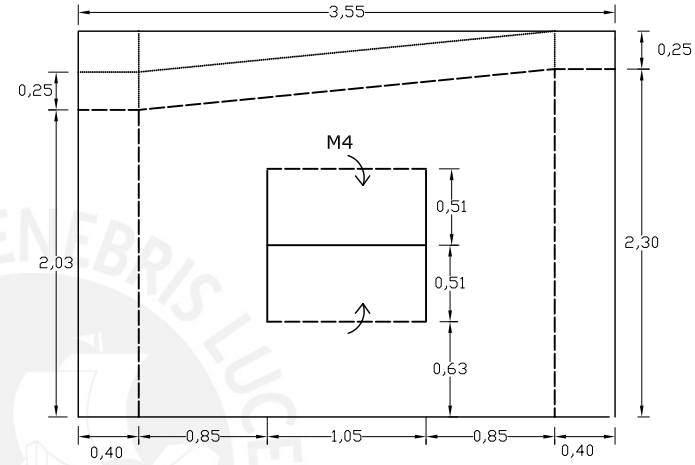
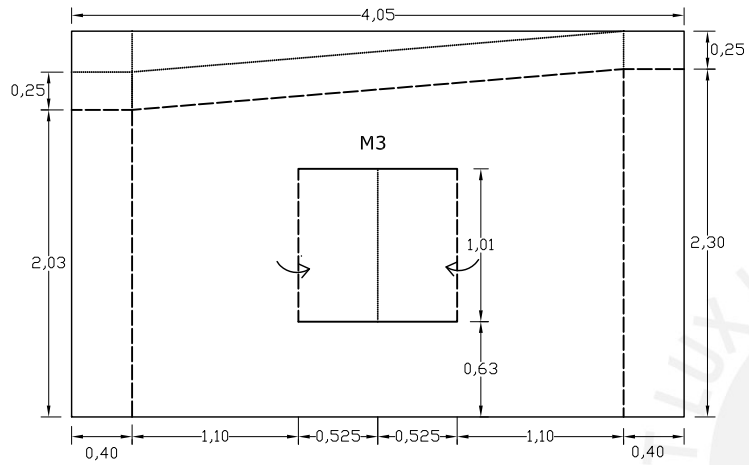
**Corte y doblado
de mallas M1 y M2
(Muro Frontal)**

| LEYENDA | |
|---------|-------|
| Doblado | ----- |
| Corte | |

**Corte y doblado
de mallas M5 y M6
(Muro Posterior)**



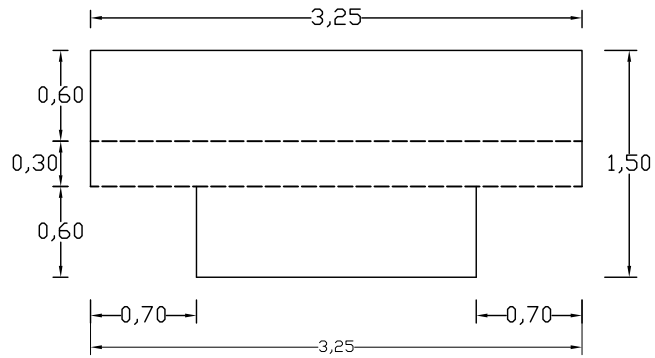
| | | | |
|------------|---|--------------------------|-------------|
| PUCP | | M100-T4100 y M100-T4100D | |
| PROYECTO | Vivienda de adobe reforzada con malla | LAMINA | ESTRUCTURAS |
| PLANO | Corte y doblado de mallas de ejes A y B | E-04 | |
| REFERENCIA | Proyecto Rectorado | | |
| ESCALA | 1/50 | | |
| | | DIBUJO | S.B.I. |



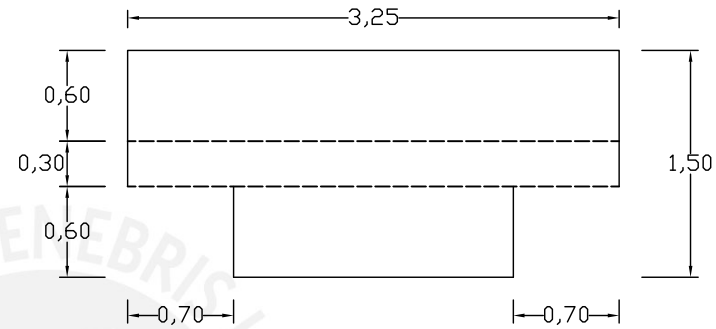
| LEYENDA | |
|---------|-------|
| Doblado | ----- |
| Corte | ————— |

**Corte y doblado
de mallas M3 y M4
(Muros Izquierdo y Derecho)**

| | | | |
|------------|---|--------------------------|-------------|
| PUCP | | M100-T4100 y M100-T4100D | |
| PROYECTO | Vivienda de adobe reforzada con malla | LAMINA | ESTRUCTURAS |
| PLANO | Corte y doblado de mallas de ejes 1 y 2 | E-05 | |
| REFERENCIA | Proyecto Rectorado | | |
| ESCALA | 1/50 | | |
| FECHA | JULIO 2008 | DIBUJO | S.B.I. |



**Corte y doblado
de malla de cimentación
(Muros Frontal y Posterior)**



**Corte y doblado
de malla de cimentación
(Muros Izquierdo y Derecho)**

| LEYENDA | |
|---------|-------|
| Doblado | ----- |
| Corte | ----- |

| METRADO DE MALLA MUROS | | | | | |
|------------------------------|------------|-----------|------------|------------------------|------------------------|
| MALLA | UBICACIÓN | ANCHO (m) | ALTURA (m) | NRO.MALLAS | AREA (m ²) |
| M1 | Eje A | 4,05 | 2,30 | 1 | 9,315 |
| M2 | Eje A | 3,55 | 2,30 | 1 | 8,165 |
| M3 | Ejes 1 y 2 | 4,05 | 2,55 | 2 | 20,655 |
| M4 | Ejes 1 y 2 | 3,55 | 2,55 | 2 | 18,105 |
| M5 | Eje B | 4,05 | 2,55 | 1 | 10,3275 |
| M6 | Eje B | 3,55 | 2,55 | 1 | 9,0525 |
| SUBTOTAL | | | | 8 | 75,62 |
| METRADO DE MALLA CIMENTACIÓN | | | | | |
| MALLA | ANCHO (m) | LARGO (m) | NRO.MALLAS | AREA (m ²) | |
| Muro Frontal | 1,50 | 3,25 | 1 | 4,875 | |
| Muro Posterior | 1,50 | 3,25 | 1 | 4,875 | |
| Muro Izquierdo | 1,50 | 3,25 | 1 | 4,875 | |
| Muro Derecho | 1,50 | 3,25 | 1 | 4,875 | |
| SUBTOTAL | | | | 4 | 19,50 |
| TOTAL | | | | 12 | 95,12 |

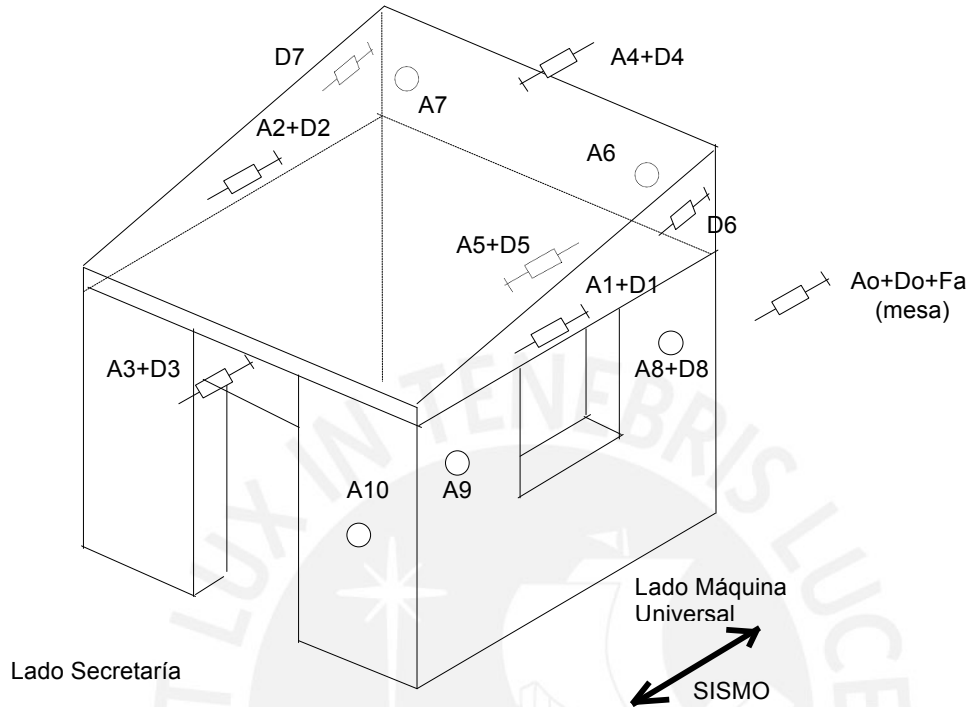
| | | | |
|------------|---|--------------------------|-------------|
| PUCP | | M100-T4100 y M100-T4100D | |
| PROYECTO | Vivienda de adobe reforzada con malla | | LAMINA |
| PLANO | Corte y doblado de malla de cimentación | | ESTRUCTURAS |
| REFERENCIA | Proyecto Rectorado | | |
| ESCALA | 1/50 | FECHA | Julio 2008 |
| | | DIBUJO | S.B.I. |

E-06

ANEXO D Planos de Instrumentación del Módulo
M100-T4100



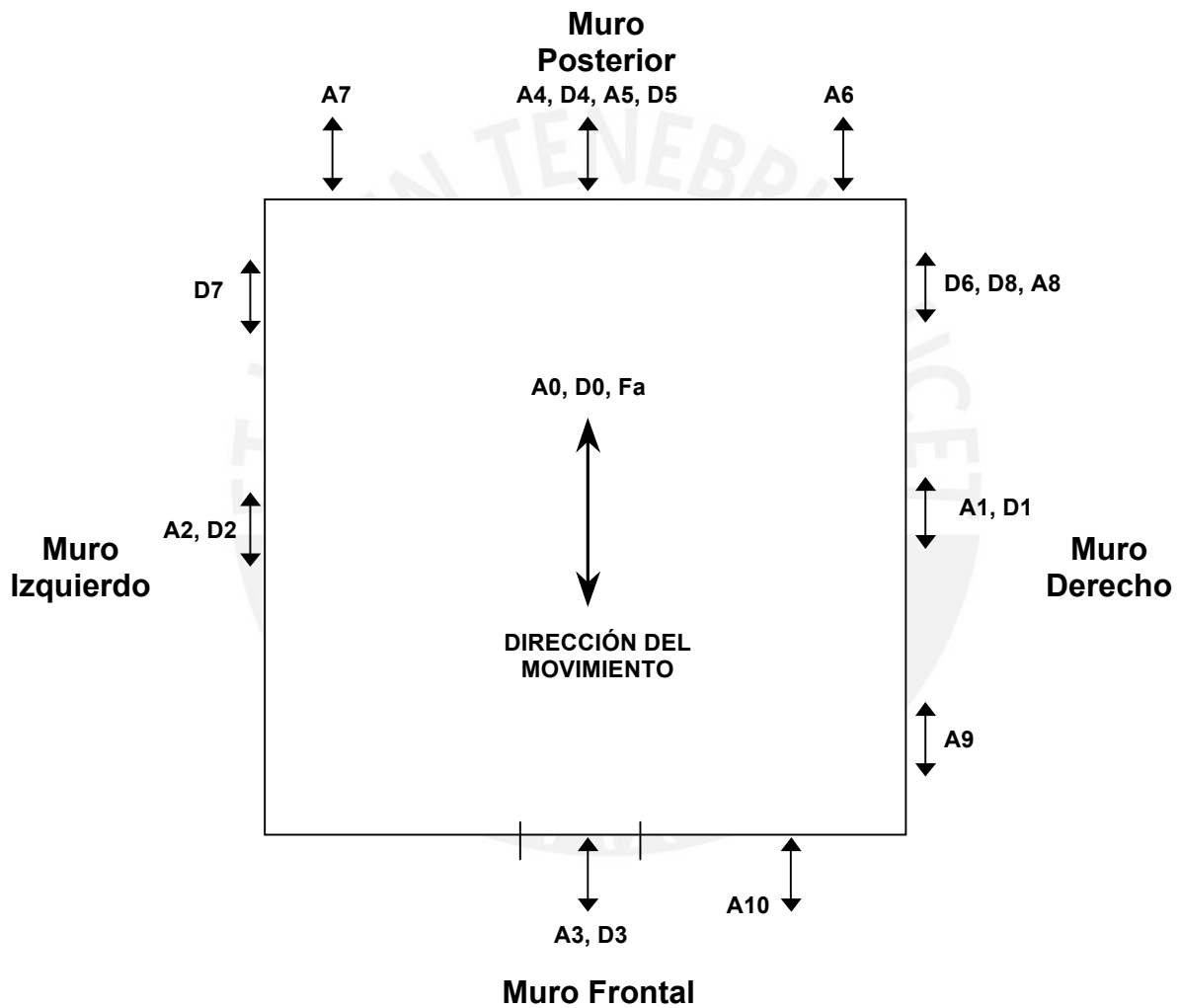
SIMULACIÓN SÍSMICA – PROYECTO RECTORADO
Módulo M100-T4100
Fecha de ensayo: 10 setiembre 2008



CONFIGURACIÓN CANALES

| Caja Cone. | Cable Ch | Canal DAQ | Identificación | Sensor | Amplificador | 1V = | Unidad | Señal Calibr. |
|------------|----------|-----------|----------------|--------------------|--------------|--------|--------|---------------|
| ----- | ----- | 0 | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |
| 1 | 0 | 1 | A0 | B12/200N°30744 | 86508 | 0.5 | g | ----- |
| 2 | 1 | 2 | A1 | B12/200N°3846 | 86509 | 0.5 | g | ----- |
| 3 | 2 | 3 | A2 | B12/200N°3851 | 66247 | 0.5 | g | ----- |
| 4 | 3 | 4 | A3 | B12/200N°5415 | 66252 | -0.5 | g | ----- |
| 5 | 4 | 5 | A4 | B12/200N°5416 | 51108 | 0.5 | g | ----- |
| 6 | 5 | 6 | A5 | B12/200N°5417 | 86502 | 0.5 | g | ----- |
| 7 | 6 | 7 | A6 | B12/200N°30745 | MGCplus ch1 | 0.5 | g | ----- |
| 8 | 7 | 8 | A7 | 12/200N°5419 | MGCplus ch2 | 0.5 | g | ----- |
| 9 | 8 | 9 | A8 | B12/200N°3850 | MGCplus ch3 | 0.5 | g | ----- |
| ----- | ----- | 10 | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |
| 10 | 9 | 11 | A9 | B12/200N°052810483 | MGCplus ch4 | 0.5 | g | ----- |
| 11 | 10 | 12 | A10 | B12/200N°054510057 | MGCplus1 ch4 | -0.5 | g | ----- |
| 12 | 11 | 13 | D1 | W200N°7 | MGCplus1 ch5 | 20 | mm | ----- |
| 13 | 12 | 14 | D2 | W200N°3 | 86503 | 20 | mm | 1000 |
| 14 | 13 | 15 | D3 | W200N°2 | MGCplus ch6 | -20 | mm | ----- |
| 15 | 14 | 16 | D4 | W200N°1 | 51103 | 20 | mm | 1000 |
| 16 | 15 | 17 | D5 | W200N°5 | MGCplus1 ch6 | 20 | mm | ----- |
| ----- | ----- | 18 | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |
| 17 | 16 | 19 | D6 | W50N°8 | 86507 | 5 | mm | 1000 |
| 18 | 17 | 20 | D7 | W50N°2 | 86506 | 5 | mm | 1000 |
| 19 | 18 | 21 | D8 | WA500#081410079 | MGCplus1 ch1 | 25 | mm | ----- |
| | | 22 | D0 | LVDT mesa | MTS 440.22 | 15 | mm | ----- |
| | | 23 | Fa | Delta P | MTS 440.39 | 10.899 | tn | ----- |

MODULO M100-4100
INF-LE: 353-07
31 OCTUBRE 2008



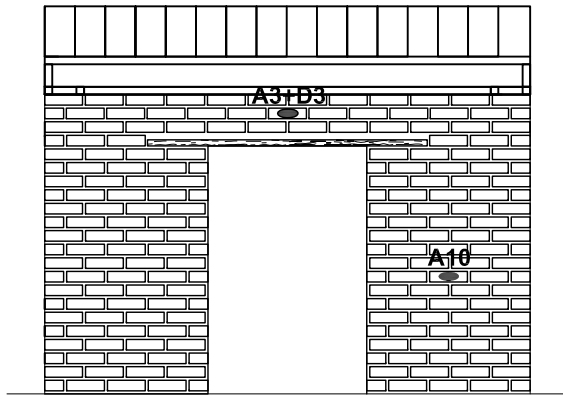
Notas:

A: Acelerómetros

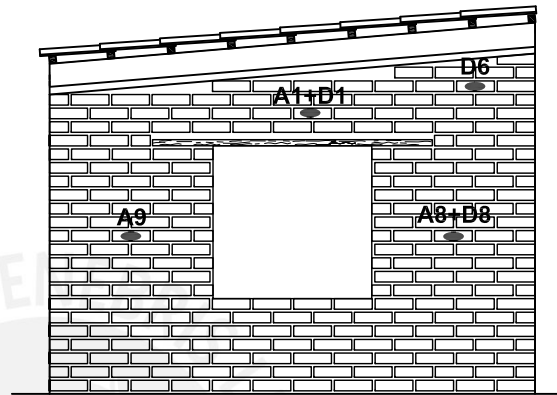
D: Transductores de desplazamiento (LVDT)

Fa: Sensor de fuerza

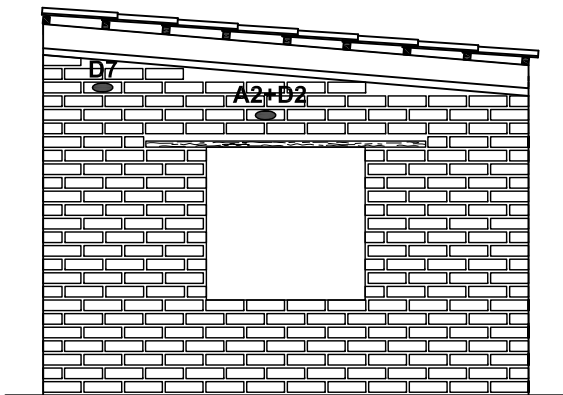
A5, A8, A9, A10, D5 y D8 se encuentran a media altura.



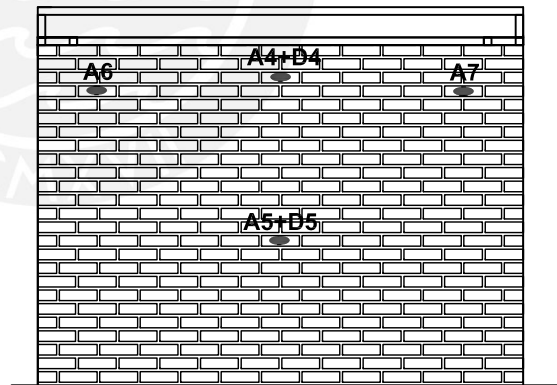
MURO FRONTAL



MURO DERECHO



MURO IZQUIERDO



MURO POSTERIOR

NOTA

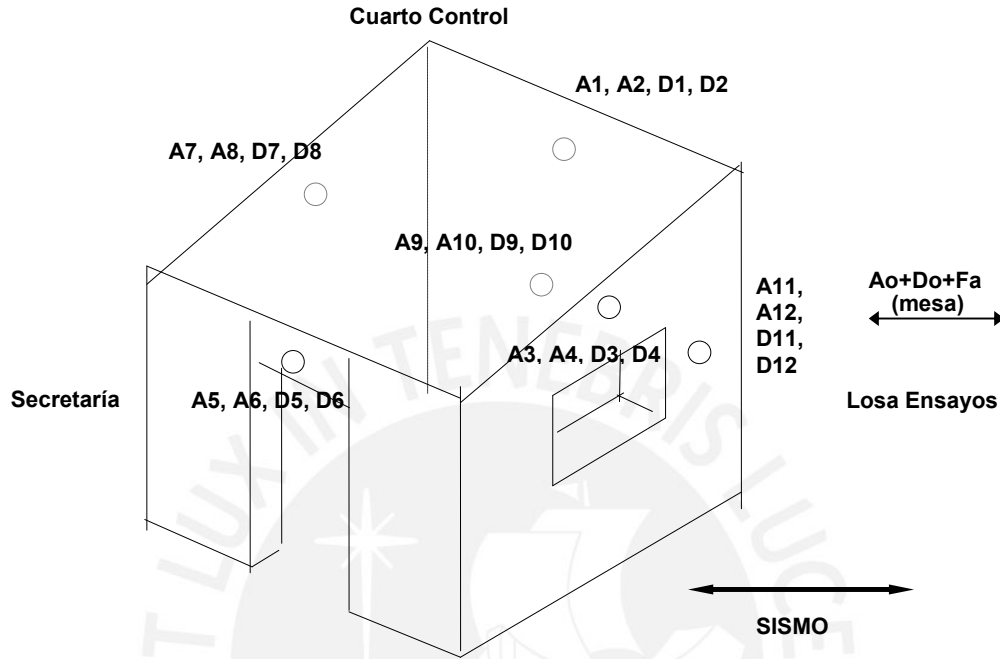
- A: Acelerómetros
- D: Transductores de desplazamiento (LVDT)

| | | | |
|------------|---------------------------------------|------------|-----------------|
| PUCP | | M100-T4100 | |
| PROYECTO | Vivienda de adobe reforzada con malla | LAMINA | INSTRUMENTACION |
| PLANO | Instrumentacion | I-01 | |
| REFERENCIA | Proyecto Rectorado | | |
| ESCALA | 1/50 | | |
| | | DIBUJO | S.B.I. |

ANEXO E Planos de Instrumentación del Módulo
M100-T4100D



SIMULACIÓN SÍSMICA
INF-LE: 353-07
Módulo: M100-4100D
Fecha de ensayo: 31 octubre 2008



CONFIGURACIÓN CANALES

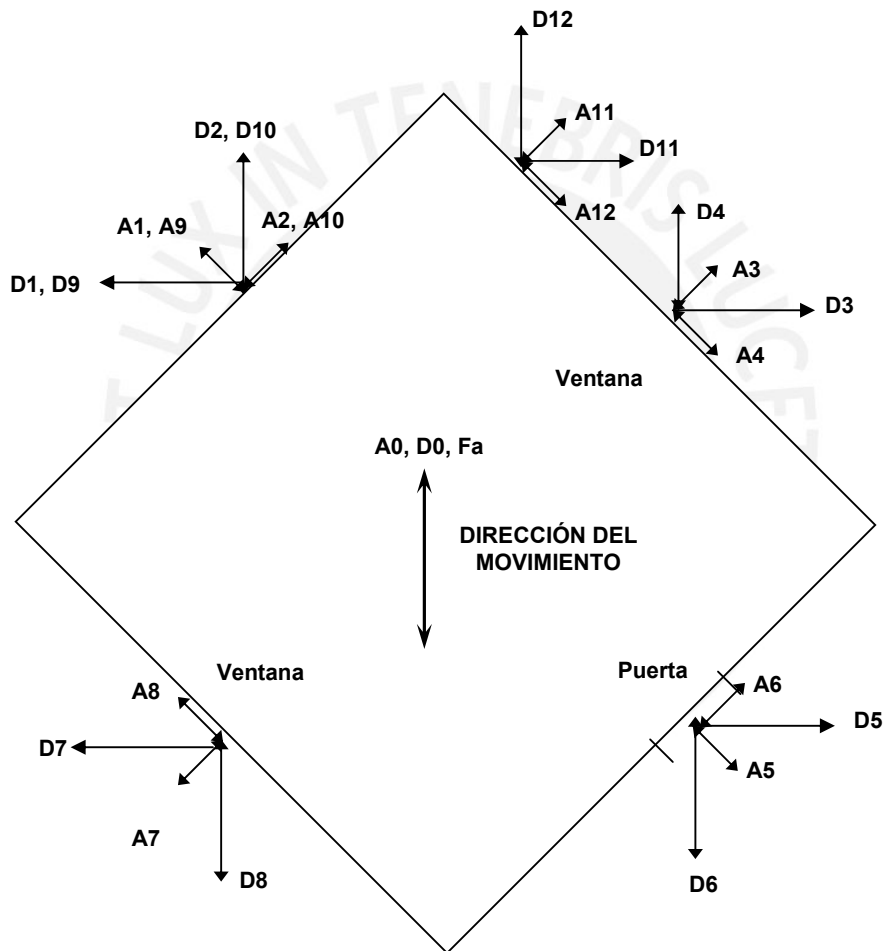
| Caja Conex | Cable | Canal DAQ | Nombre | Sensor | Amplificador | 1V = | Unidad | Señal Calibr. |
|------------|-------|-----------|--------|--------------------|--------------|--------|--------|---------------|
| | | 0 | | | | | | |
| 1 | 0 | 1 | A0 | B12/200N°30744 | HBM 86508 | 0.5 | g | |
| 2 | 1 | 2 | A1 | B12/200N°3846 | HBM 86509 | 0.5 | g | |
| 3 | 2 | 3 | A2 | B12/200N°3851 | HBM 66247 | 0.5 | g | |
| 4 | 3 | 4 | A3 | B12/200N°5415 | HBM 66252 | 0.5 | g | |
| 5 | 4 | 5 | A4 | B12/200N°5416 | HBM 51108 | 0.5 | g | |
| 6 | 5 | 6 | A5 | B12/200N°5417 | HBM 86502 | -0.5 | g | |
| 7 | 6 | 7 | A6 | B12/200N°30745 | MGCplus ch1 | -0.5 | g | |
| 8 | 7 | 8 | A7 | B12/200N°5419 | MGCplus ch2 | -0.5 | g | |
| 9 | 8 | 9 | A8 | B12/200N°3850 | MGCplus ch3 | -0.5 | g | |
| | | 10 | | | | | | |
| 10 | 9 | 11 | A9 | B12/200N°052810483 | MGCplus ch4 | 0.5 | g | |
| 11 | 10 | 12 | A10 | B12/200N°053710464 | MGCplus1 ch3 | 0.5 | g | |
| 12 | 11 | 13 | A11 | B12/200N°054510057 | MGCplus1 ch4 | 0.5 | g | |
| 13 | 12 | 14 | A12 | B12/200N°052110056 | MGCplus0 ch4 | 0.5 | g | |
| 14 | 13 | 15 | D1 | W50#1 | MGCplus0 ch5 | -5 | mm | |
| 15 | 14 | 16 | D2 | W200N°2 | MGCplus ch6 | 20 | mm | |
| 16 | 15 | 17 | D3 | WA100 N° 053210282 | MGCplus0 ch6 | 5 | mm | |
| | | 18 | | | | | | |
| 17 | 16 | 19 | D4 | WA500 N° 081410079 | MGCplus1 ch1 | 25 | mm | |
| 18 | 17 | 20 | D5 | W50N°2 | HBM 86506 | 5 | mm | 1000 |
| 19 | 18 | 21 | D6 | W200N°7 | MGCplus1 ch5 | -20 | mm | |
| 20 | 19 | 22 | D7 | W50N°5 | HBM 86500 | -5 | mm | 1000 |
| 21 | 20 | 23 | D8 | W200N°5 | MGCplus1 ch6 | -20 | mm | |
| 22 | 21 | 24 | D9 | W50N°6 | HBM 66250 | -5 | mm | 1000 |
| 23 | 22 | 25 | D10 | WA500 N° 081410080 | MGCplus1 ch2 | 25 | mm | |
| 24 | 23 | 26 | D11 | W50N°8 | HBM 86507 | 5 | mm | 1000 |
| 25 | 24 | 27 | D12 | W200N°3 | HBM 86503 | 20 | mm | 1000 |
| | | 28 | D0 | LVDT mesa | MTS 440.22 | 15 | mm | |
| | | 29 | Fa | Delta P | MTS 440.39 | 10.899 | tn | |

MODULO M100-4100D

INF-LE: 353-07

31 OCTUBRE 2008

LOSA ENSAYOS



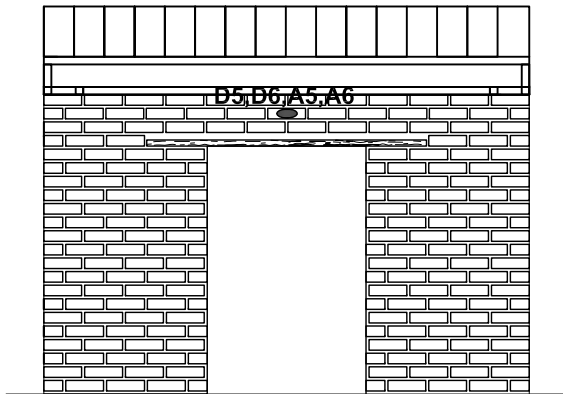
Notas:

A: Acelerómetros

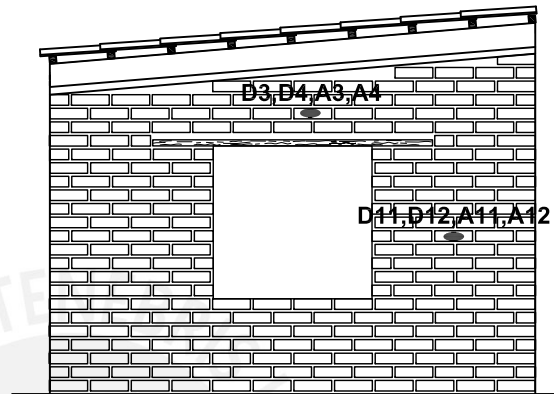
D: Transductores de desplazamiento (LVDT)

Fa: Sensor de fuerza

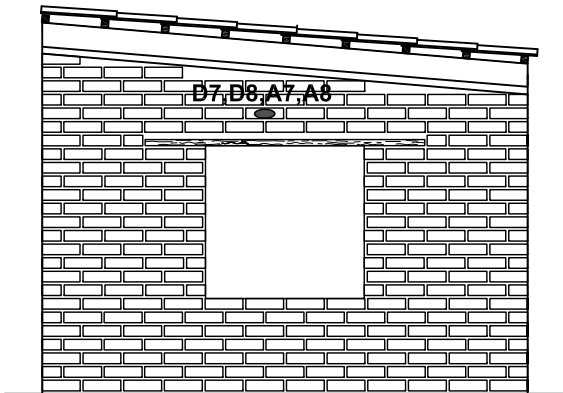
A9, A10, A11, A12, D9, D10, D11 y D12 se encuentran a media altura.



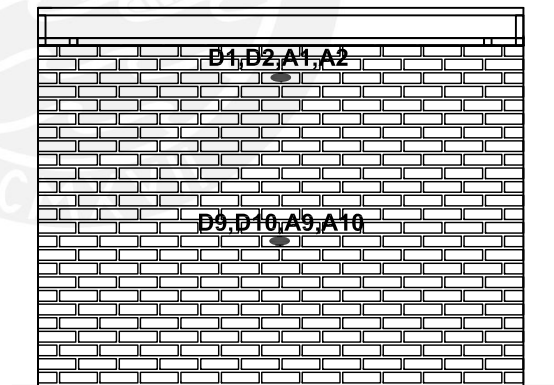
MURO FRONTAL



MURO DERECHO



MURO IZQUIERDO



MURO POSTERIOR

NOTA

- A: Acelerómetros
- D: Transductores de desplazamiento (LVDT)

| | | | |
|------------|---------------------------------------|-------------|-----------------|
| PUCP | | M100-T4100D | |
| PROYECTO | Vivienda de adobe reforzada con malla | | LÁMINA |
| PLANO | Instrumentación | | INSTRUMENTACIÓN |
| REFERENCIA | Proyecto Rectorado | | I-02 |
| ESCALA | 1/50 | FECHA | |
| | | DIBUJO | S.B.I. |