

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
ESCUELA DE POSGRADO



**Evaluación del Comportamiento Estructural de Módulos
de Adobe durante Ensayos de Simulación Sísmica**

TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADEMICO DE
MAGISTER EN INGENIERIA CIVIL

Presentada por
Ing. Silvana Faride Ojeda Simborth

Asesor
Mag. Daniel Torrealva Davila

Jurado
Dr. Marcial Blondet Saavedra
Mag. Daniel Torrealva Davila
Mag. Daniel Quiun Wong

Lima - Perú
Abril 2012

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi asesor y profesor Mag. Daniel Torrealva Dávila por orientarme, aconsejarme y permitirme desarrollar la realización de este trabajo de tesis.

A mi profesor Mag. Daniel Quiun Wong por animarme a culminar mi tesis, a todos los ingenieros docentes que contribuyeron en mi formación profesional brindándome sus conocimientos en la Pontificia Universidad Católica del Perú durante mis años de estudio en la maestría de Ingeniería Civil. Dr. Marcial Blondet, Mag. Wilson Silva, Mag. Luis Zegarra Ciquero, Mag. Alejandro Muñoz Pelaez.

Un agradecimiento especial a mi gran amigo Ing. José Acero Martínez, por acercarme al mundo de la investigación y por su orientación en el desarrollo de toda esta tesis.

A mis amigos del Laboratorio de Estructuras de la PUCP que contribuyeron con su apoyo y entusiasmo a la culminación de esta tesis: Ing. Gladys Villa Garcia, Srta. Nancy Trujillo, Ing. Laura Navarro, Ing. Erick Hulburd.

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos por su apoyo
incondicional y su paciencia para
hacer realidad esta tesis.

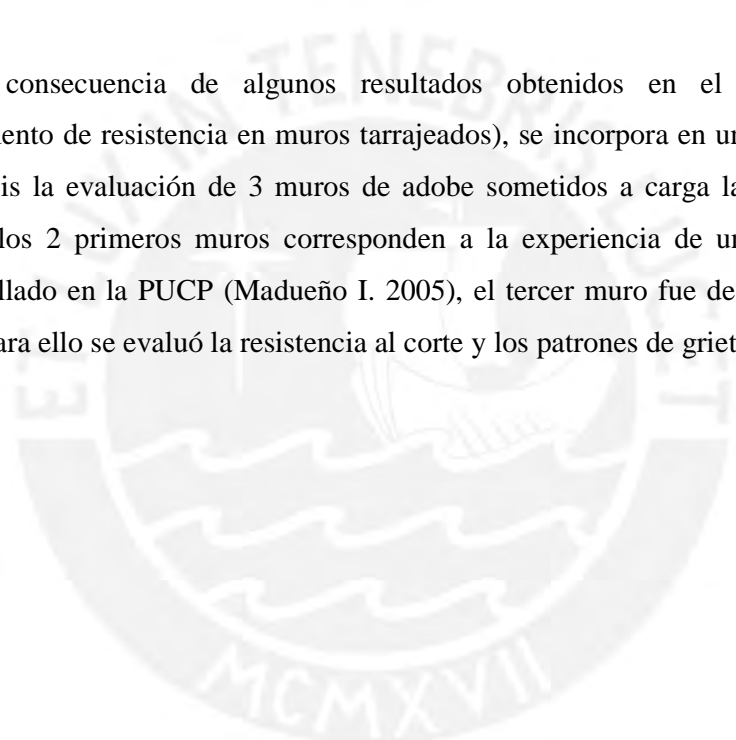
Silvana



RESUMEN

Se ha elaborado la presente tesis que reúne la experiencia de 2 proyectos COPASA-GTZ (Zegarra et al. 2003) y GETTY (Torrealva et al. 2005) ambos desarrollados en la PUCP con diferentes sistemas de reforzamiento, para la evaluación del comportamiento estructural durante estos ensayos de simulación sísmica en mesa vibradora. Para lo cual se analizaron parámetros sísmicos, así también se hace una evaluación de los daños observados al final de cada ensayo mediante patrones de grietas.

Como consecuencia de algunos resultados obtenidos en el proyecto GETTY (incremento de resistencia en muros tarrajeados), se incorpora en una segunda parte de esta tesis la evaluación de 3 muros de adobe sometidos a carga lateral cíclica de los cuales los 2 primeros muros corresponden a la experiencia de un proyecto de tesis desarrollado en la PUCP (Madueño I. 2005), el tercer muro fue desarrollado para esta tesis. Para ello se evaluó la resistencia al corte y los patrones de grietas de los muros.



INDICE

AGRADECIMIENTOS.....	II
DEDICATORIA	III
RESUMEN	IV
INDICE	V

CAPITULO I INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes y justificación	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Organización del trabajo	3

CAPITULO II MARCO TEORICO DEL COMPORTAMIENTO DE MODULOS DE ADOBE DURANTE ENSAYOS SISMICOS

2.1 Introducción.....	4
2.2 Marco Teórico	4
2.2.1. Parámetros sísmicos.....	4
2.2.2. Descripción de los proyectos	5
2.2.3. Descripción de los módulos ensayados	7
2.2.4. Instrumentación de los módulos y procedimientos de ensayo.....	8
2.2.5. Comportamiento sísmico de los módulos	11
2.2.5.1 Módulo Sin Refuerzo (M1).....	11
2.2.5.2 Módulo con Malla Electrosoldada y conectores de alambre (M2) .	13
2.2.5.3 Módulo con malla y viga solera de concreto armado (M3).....	15
2.2.5.4 Módulo con caña (M4).....	17
2.2.5.5 Módulo con geomalla (malla polímero)(M5)	21

CAPITULO III RESULTADOS EXPERIMENTALES DE ENSAYOS DE SIMULACION SISMICA

3.1 Introducción.....	26
3.2 Desplazamientos relativos módulo sin refuerzo M1.....	27
3.3 Desplazamientos relativos módulo malla electrosoldada M2	28
3.4 Desplazamientos relativos módulo malla y viga de concreto armado M3	29
3.5 Desplazamientos relativos módulo con caña M4	30
3.6 Desplazamientos relativos módulo con geomalla M5	31
3.7 Parámetros sísmicos.....	32
3.7.1 Amortiguamiento	32
3.7.2 Periodo fundamental	37
3.7.3 Frecuencia natural	40
3.7.4 Factor de amplificación dinámico	42
3.7.5 Cortante basal máximo.....	43
3.7.6 Coeficiente sísmico.....	46

3.7.7 Demandas de ductilidad	48
3.7.8 Energía disipada.....	51
3.8 Comparación Parámetros sísmicos Vs Daños observados.....	53

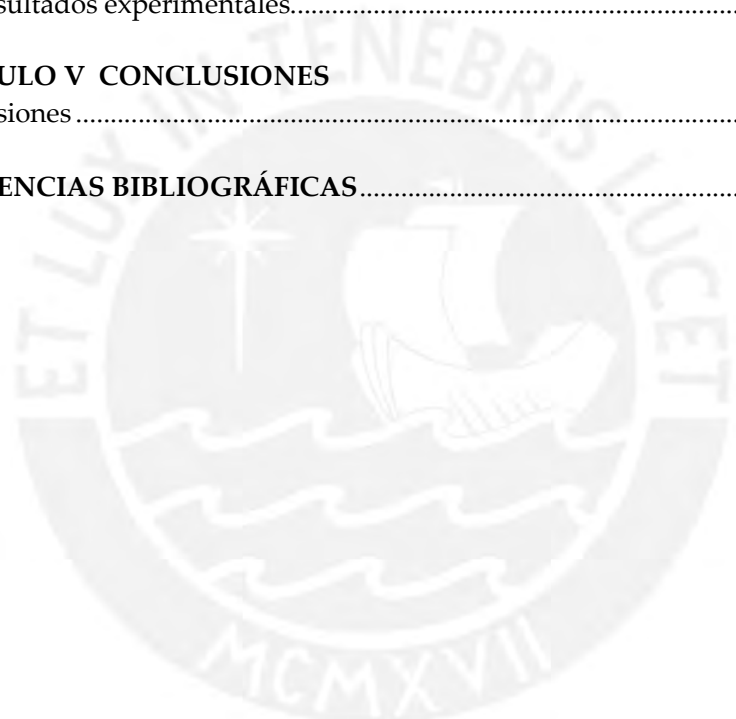
CAPITULO IV RESISTENCIA AL CORTE DE MUROS DE ADOBE

4.1 Antecedentes y justificación	55
4.2 Objetivo.....	55
4.3 Marco Teórico	55
4.3.1. Descripción del proyecto.....	55
4.3.2. Construcción del muro con refuerzo de geomalla y tarrajeo.....	58
4.3.3. Instrumentación y ensayos	59
4.3.4. Ensayos preliminares.....	60
4.4 Resultados experimentales.....	63

CAPITULO V CONCLUSIONES

Conclusiones	68
--------------------	----

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70
--	-----------



CAPITULO I

INTRODUCCION

1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

El adobe es empleado como material de construcción por un gran porcentaje de habitantes en Perú. Se estima que en el Perú, el 65% de la población rural y el 31% de la población urbana vive en construcciones de tierra (Ottazzi et al. 1989). A nivel mundial, las dos terceras partes de la población continúan viviendo en casas de tierra, debido a su bajo costo, fácil disponibilidad, buen aislamiento térmico y posibilidad de autoconstrucción (Ottazzi et al. 1989). Las viviendas de adobe tradicionales demostraron ser altamente vulnerables a los sismos, debido a la deficiente tecnología de construcción, falta de refuerzos apropiados y limitaciones mecánicas propias del material (muros frágiles y poco resistentes). Cuando ocurre un sismo, aún de intensidad moderada, las construcciones de adobe tradicionales colapsan, ocasionando muerte y pérdidas materiales.

En los últimos 30 años, algunos proyectos de investigación han intentado resolver el problema de la baja resistencia sísmica de edificaciones tradicionales hechas de tierra. Estos han sido dirigidos a edificaciones nuevas y existentes usando materiales naturales (madera y caña) e industriales (varillas de acero, malla de acero y cemento).

En las instalaciones del Laboratorio de Estructuras (LEDI) de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) se han realizado algunos ensayos dinámicos en mesa vibradora de muros y módulos de adobe, sin refuerzo y con refuerzos diversos (SENCICO 2000, esta norma ha recogido como posibles refuerzos en los muros de adobe a la caña, mallas de alambre y elementos de concreto armado), sometiéndolos a sismos leves, moderados y severos. En recientes años, se han ensayado muros y módulos de adobe con otros refuerzos industriales (Zegarra et al. 2003, Blondet et al. 2004, Torrealva et al. 2005), los que requieren más investigación para poderse recomendar e incluir en la Norma.

Pese a los múltiples ensayos realizados en el LEDI sobre módulos de adobe, no se cuenta con un parámetro que permita comparar la eficiencia de los sistemas ensayados. Todas las comparaciones se han basado en variables cualitativas intuitivas, comparando siempre los ensayos de un mismo proyecto. Más aún, no se podría establecer comparaciones de eficiencia, entre dos o más configuraciones arquitectónicas diferentes.

Evaluación del Comportamiento Estructural de Módulos de adobe durante Ensayos de Simulación Sísmica 1

En la primera parte de la tesis se estudiarán los proyectos denominados COPASA-GTZ y GETTY (Zegarra et al. 2003, Torrealva et al. 2005), ya desarrollados en la PUCP. En estos proyectos se ensayaron en mesa vibradora tres y dos módulos de adobe, respectivamente, todos de un piso y un ambiente, que presentaban las mismas características geométricas, pero con diferencias en el refuerzo.

El primer proyecto es el realizado entre la PUCP y COPASA, denominado “Consultoría para la Realización de Pruebas de Simulación Sísmica a Modelos de Vivienda de Adobe Reforzados del Proyecto COPASA-GTZ”. El primer módulo (M1), careció de refuerzo; el segundo módulo (M2), fue reforzado exclusivamente con malla electrosoldada, y el tercer módulo (M3), fue reforzado con malla electrosoldada, y con una viga solera de concreto armado, con una disposición similar a la utilizada por COPASA en la construcción de más de 350 viviendas en la zona alto andina de Arequipa (Zegarra et al. 2003).

El segundo proyecto es una investigación conjunta entre el Getty Conservation Institute (GCI) y la PUCP, denominada “Uso de materiales naturales y de polímeros en el refuerzo sísmico de construcciones de adobe”. Se ensayaron 2 módulos de adobe, el primer módulo (M4), tuvo refuerzo con materiales naturales: caña entera vertical, sogá horizontal y conectores de soguilla de yute. El segundo módulo (M5), tuvo refuerzo con materiales industriales: malla polímero TENSAR del tipo BX1200 y conectores de rafia (Torrealva y Acero 2005).

Todos los ensayos dinámicos realizados en el LEDI han utilizado la misma señal sísmica, derivada del registro del 31 de Mayo 1970, del instrumento ubicado en el IGP en Lima. Por tanto, será posible establecer qué parámetros son los que mejor representan el daño observado en el espécimen ensayado, mediante un estudio de los datos instrumentales registrados en cada ensayo.

En la segunda parte de la tesis se analizan 3 muros de adobe sometidos a carga lateral cíclica. El primero es sin refuerzo, el segundo con geomalla sin tarrajeo (Blondet et al. 2004) y el tercero con geomalla tarrajado, el cual fue construido para esta tesis.

1.2 OBJETIVOS

Objetivo general

- Contribuir a disminuir la vulnerabilidad sísmica de las viviendas de adobe.

Objetivos específicos

- Determinar parámetros sísmicos que permitan evaluar el comportamiento sísmico global de los módulos de adobe con diferentes sistemas de reforzamiento observado en los ensayos de simulación sísmica realizados en los proyectos COPASA-GTZ-PUCP, GETTY-PUCP.
- Verificar en qué medida los parámetros obtenidos de la evaluación sirven como medida de daño sísmico y son congruentes con los daños globales observados en los ensayos.

1.3 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

En los capítulos II y III se examinan los resultados de 5 ensayos de simulación sísmica en módulos.

En el capítulo IV se evalúan los ensayos de 3 muros sometidos a carga lateral cíclica.

El capítulo V contiene las conclusiones.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO DEL COMPORTAMIENTO DE MODULOS DE ADOBE DURANTE ENSAYOS SISMICOS

2.1 INTRODUCCION

En el marco teórico se describe las teorías, proyectos y demás documentos relacionados con los dos temas de investigación de la presente tesis (ensayos dinámicos de módulos de adobe y ensayos estáticos de muros de adobe).

Para la evaluación del comportamiento sísmico de los cinco módulos de adobe ensayados de los proyectos COPASA-GTZ-PUCP y GETTY-PUCP, los módulos fueron sometidos a varios movimientos de intensidad creciente (fases). De los resultados obtenidos de los ensayos dinámicos, se evaluarán los parámetros del comportamiento sísmico descritos en el marco teórico.

Por otra parte, de los ensayos de carga lateral cíclica en muros de adobe, se evaluará la resistencia al corte VR y verificará el control de los desplazamientos laterales.

Los resultados obtenidos de la evaluación de los ensayos de módulos y muros de adobe, serán indicadores de su comportamiento estructural.

Dichos resultados dan indicadores si es que los modelos estructurales son compatibles con las estructuras reales y si es que dichos modelos predecirán adecuadamente la respuesta de la estructura ante un terremoto.

2.2 MARCO TEORICO

2.2.1. Parámetros sísmicos

El **Cortante basal máximo (V)** es la fuerza en la base debido a la excitación sísmica de la masa. Esta fuerza dividida entre el peso del espécimen es el **Coefficiente Sísmico**. Con el medidor de diferencia de presiones (DP) se obtendrá la fuerza que acciona la mesa vibradora, luego restando el producto de la aceleración de la mesa (Ao) por la suma de las masas de la mesa y la cimentación del módulo, se determinará esta fuerza cortante sísmica en cada fase del ensayo (Zegarra et al. 2003).

El **Factor de amplificación dinámica** es la relación que existe entre la aceleración en la parte superior de la estructura y la aceleración en la base.

La **Demanda de ductilidad alcanzada** es la capacidad de la estructura de deformarse inelásticamente, sin que se produzcan daños irreparables o una severa degradación en la capacidad de carga (San Bartolomé. 1998). Es difícil cuantificar el factor de reducción por ductilidad ya que el adobe es un material frágil.

La **Energía disipada** es la capacidad de un material a absorber energía por la deformación de los elementos. Se mide en los gráficos de carga vs desplazamiento.

El **Período fundamental** se define como el tiempo que tarda una estructura en completar un ciclo en vibración libre. A pesar de que este parámetro es característico de la respuesta en vibración libre, su valor condiciona en buena medida la respuesta estructural a muchas sollicitaciones dinámicas, como es el caso de los sismos (Muñoz A. 1999).

El **Amortiguamiento** es el proceso por el cual la vibración estable disminuye en amplitud (Chopra. 1995). Una medida sencilla del amortiguamiento es el decremento logarítmico.

Estos parámetros se correlacionarán con los daños observados en los ensayos y se establecerá qué variables son las que mejor representan la eficiencia del sistema que se está probando.

De los ensayos de carga lateral cíclica en muros de adobe, se evaluará:

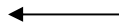
La **Capacidad resistente al corte (VR)** es la resistencia asociada al agrietamiento diagonal al aplicar una fuerza cortante cíclica en muros (San Bartolomé. 1998). Con el cortante basal en función del desplazamiento se puede determinar el nivel de daño de una estructura.

2.2.2. Descripción de los Proyectos de simulación sísmica

El objetivo principal de ambos proyectos (COPASA y GETTY), fue probar que los diferentes refuerzos externos propuestos puedan usarse para garantizar la supervivencia de las edificaciones de tierra durante los terremotos fuertes. Cada proyecto consistió en realizar la simulación sísmica de módulos de 3.21m x 3.21m, construidos con unidades de

adobe y ensayados en la mesa vibradora de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Estas pruebas dinámicas son la mejor forma para entender el comportamiento sísmico de edificaciones de tierra (Krawinkler 1978).

PROYECTO COPASA:



Módulo sin Refuerzo

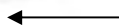


Módulo reforzado con Malla Electrosoldada con Conectores de Alambre

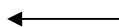


Módulo reforzado con Malla y Viga Solera de Concreto Armado

PROYECTO GETTY:



Módulo reforzado con Caña Exterior Vertical, Soga Horizontal tipo “cabuya” y Conectores de Yute, tarrajado por un lado



Módulo reforzado con Malla Polímero TENSAR BX 1200 con Conectores de Rafia, tarrajado por un lado

2.2.3. Descripción de los módulos ensayados

Los cinco módulos tuvieron la misma configuración y las mismas dimensiones, tal como se muestra en las figuras 2.1 y 2.2. Cada módulo se construyó sobre una viga collar de cimentación de concreto armado, la cual también sirvió para anclar el módulo a la mesa vibradora y como soporte del módulo durante el transporte del patio de construcción al laboratorio. El peso total de cada módulo se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Pesos de los módulos.

Proyecto	Módulo	Peso total kg. (Módulo+anillo)	Peso de la mesa kg.	Peso del anillo kg.	Peso neto del módulo kg.
COPASA	M1 Sin Refuerzo	12,059	18,000	2,898	9,161
	M2 Malla	13,365	18,000	3,102	10,263
	M3 Malla y Viga	13,924	18,000	2,881	11,043
GETTY	M4 Caña	13,860	18,000	2,895	10,965
	M5 Geomalla	14,375	18,000	2,880	11,495

Los módulos fueron construidos usando técnicas tradicionales, con unidades de 0,26 x 0,26 x 0,065 construidas con tierra, arena gruesa y paja en proporción 5:1:1 y asentadas con mortero de barro. El techo estuvo conformado por viguetas de madera y tejas de cemento.

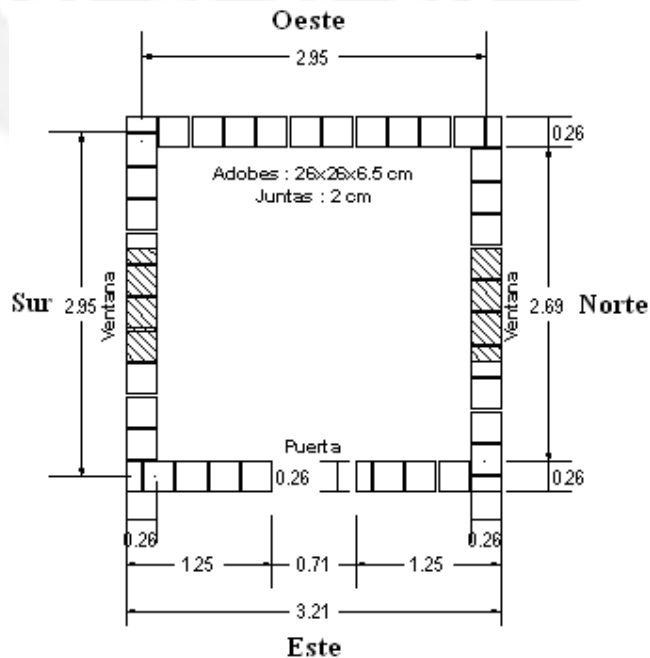


Figura 2.1 Vista en Planta y distribución o emplantillado de los bloques de adobe

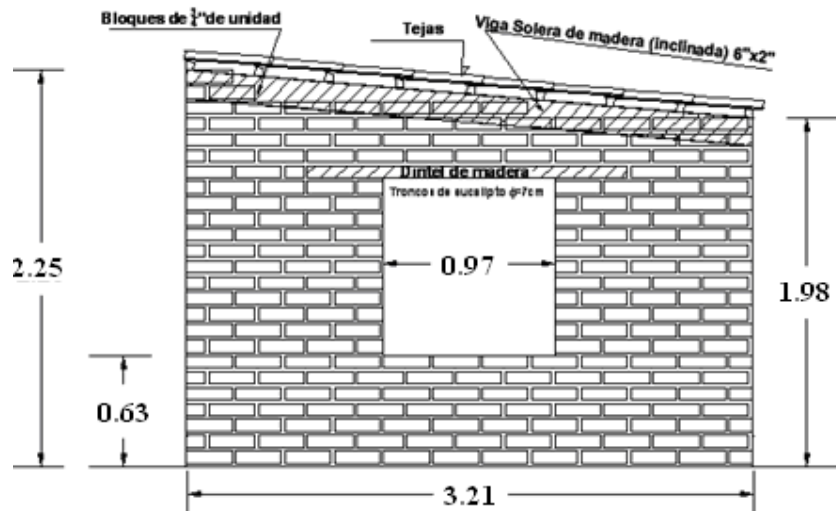


Figura 2.2 Elevación del muro Sur y alturas de los muros transversales.

2.2.4. Instrumentación de módulos y procedimiento de ensayo

Los módulos fueron instrumentados con 6 acelerómetros y 8 transductores de desplazamiento (LVDTs), mostrado en la figura 2.3.

También se midió el desplazamiento, la aceleración y la presión del actuador hidráulico.

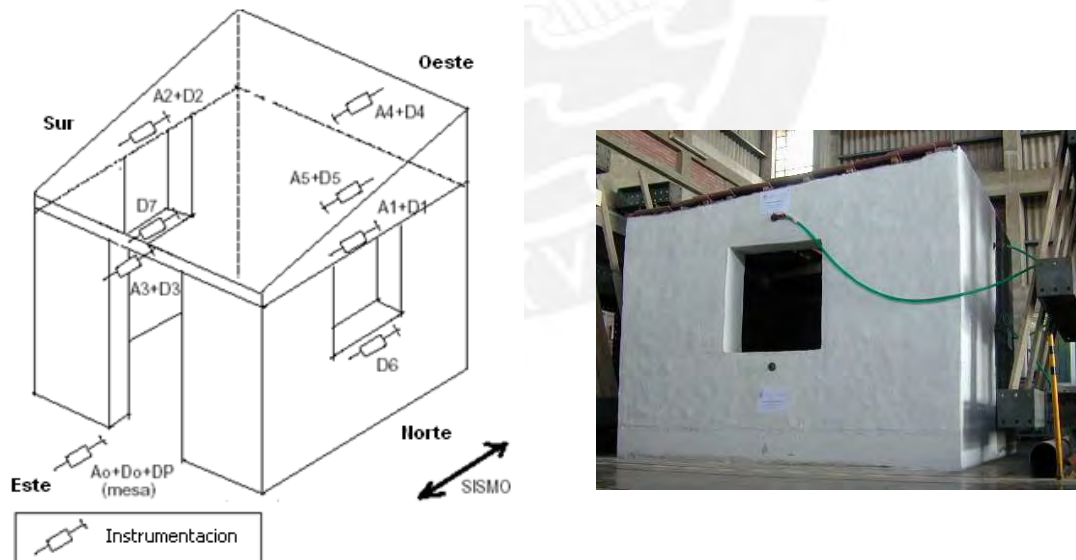


Figura 2.3 Instrumentación del ensayo dinámico.

Todos los módulos fueron sometidos a varios movimientos de intensidad creciente (Fases), la señal de desplazamiento usada corresponde a la componente longitudinal del registro del terremoto peruano del 31 de Mayo de 1970, ver figura 2.4.

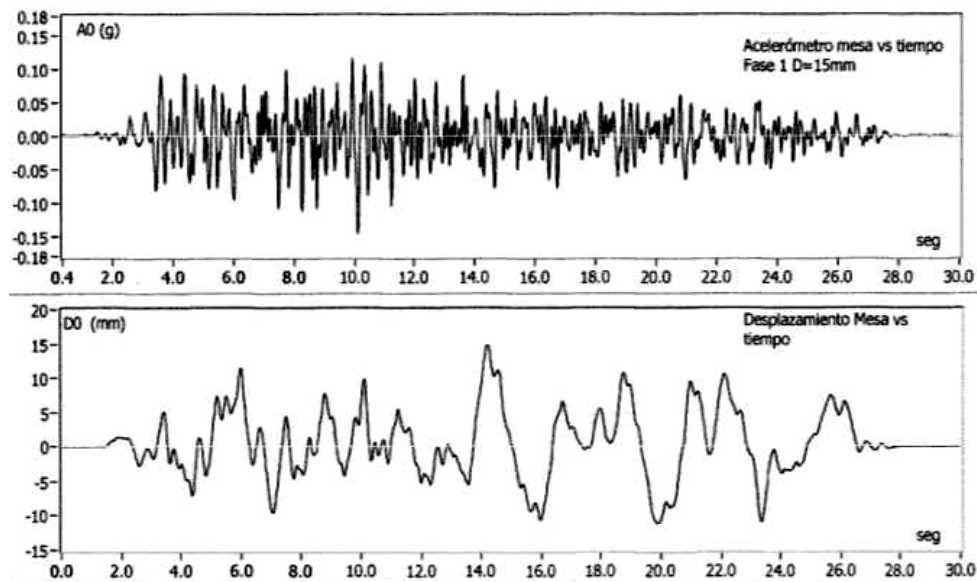


Figura 2.4 Historia del tiempo de aceleración y desplazamiento de la mesa vibradora.

Para determinar la aceleración máxima a aplicar en cada fase del ensayo, se adoptaron las características sísmicas de la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Valores en la mesa vibradora.

Fase del ensayo	Característica del sismo		A0	D0
1	Muy leve o muy frecuente	III-MM	0.15g	15mm
2	Leve o frecuente	VI-MM	0.35g	30mm
3	Moderado o poco frecuente	VII-MM	0.65g	60mm
4	Intermedio entre moderado y severo	VIII-MM	0.80g	80mm
5	Severo o raro	IX-MM	1.00g	100mm
6	Catastrófico o muy raro	X-MM	1.20g	120mm

Antes de cada fase del ensayo, se realizó un ensayo de vibración libre solo para los módulos M4 y M5.

Estos consisten en movimientos tipo pulsos rectangulares en la base del espécimen de 1.5mm. de amplitud. (ver tabla 2.3).

Tabla 2.3 Fases de los ensayos.

Fase del ensayo	A0	D0	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5
			Sin refuerzo	Malla electro soldada	Malla electro soldada + viga	Caña	Geomalla
Vibración libre			1.5 mm	1.5 mm	1.5 mm	1.5 mm	1.5 mm
1	0.15g	15mm	15mm	15mm	15mm	15mm	15mm
Vibración libre			-	-	-	1.5 mm	1.5 mm
2	0.35g	30mm	30 mm	30 mm	30 mm	30 mm	30 mm
Vibración libre			-	-	-	1.5 mm	1.5 mm
3	0.65g	60mm	60 mm	60 mm	60 mm	60 mm	60 mm
Vibración libre			-	-	-	1.5 mm	1.5 mm
4	0.80g	80mm	80 mm	80 mm	80 mm	80 mm	80 mm
Vibración libre			-	-	-	1.5 mm	1.5 mm
5	1.00g	100mm	100 mm	100 mm	100 mm	100 mm	100 mm
5			-	-	-	100 mm	-
Vibración libre			-	-	-	-	1.5 mm
6	1.20g	120mm	-	120 mm	120 mm	-	120 mm
6			-	-	-	-	120 mm

2.2.5. Comportamiento Sísmico de los Módulos

2.2.5.1 Módulo Sin Refuerzo (M1)

Fases 1 y 2. No se apreciaron fisuras significantes en estas dos fases, a excepción de las producidas por el proceso constructivo.

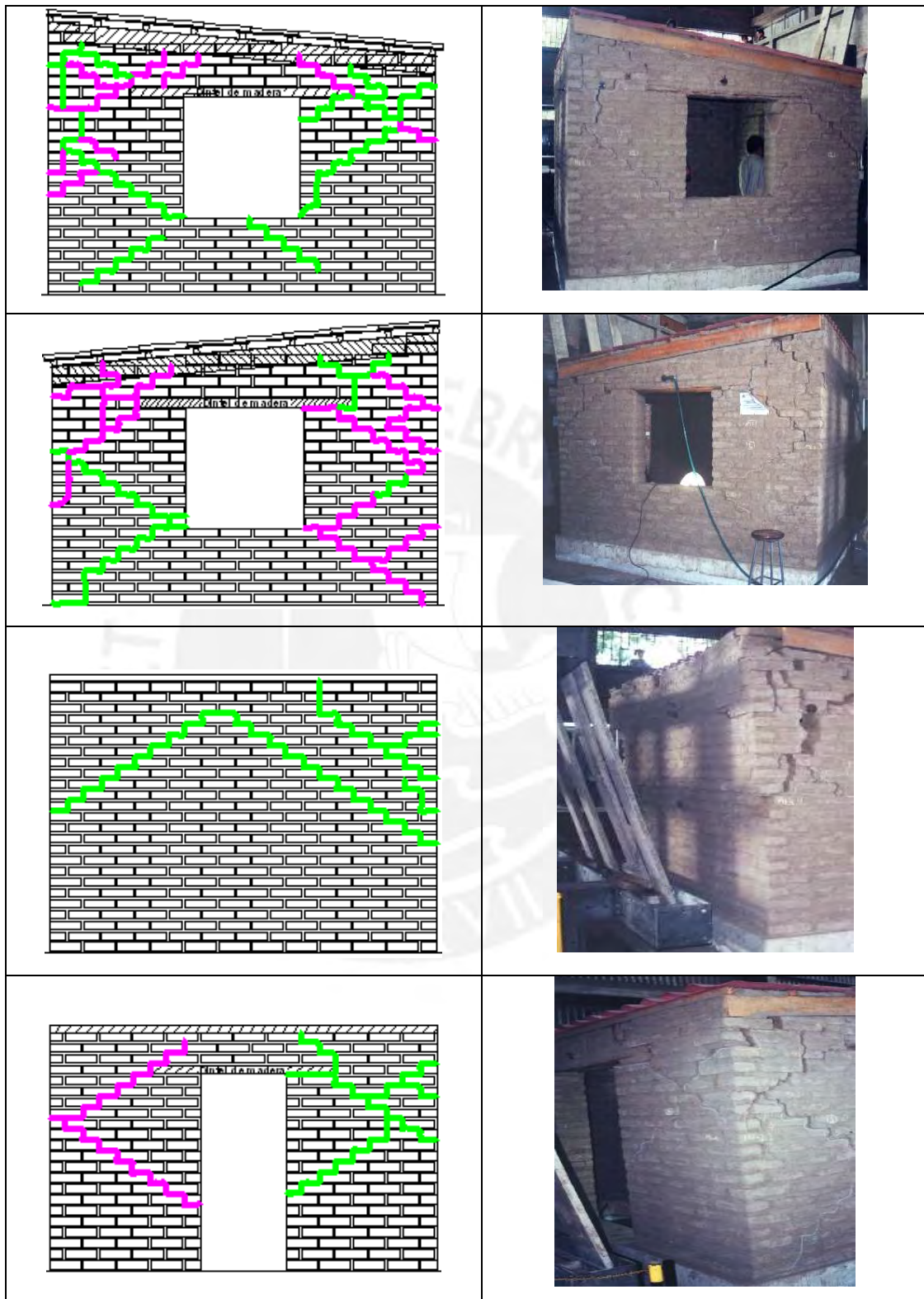
Fase 3 y Fase 4. Se formaron grietas grandes, siguiendo aquellas que se inician en la Fase 3 y aumentando de espesor, tanto en los muros Sur, Este y Oeste (Figura 2.5). Se produjo deslizamiento de Norte y Sur debido a la trituración de las unidades de adobe. Este desplazamiento se puede verificar más adelante en las gráficas correspondientes a la historia de desplazamientos del módulo (Zegarra et al. 2003).



Figura 2.5 Estado final del módulo M1 (Fase 5)

Al fin de la fase 4 el módulo quedó a punto del colapso (ver figura 2.6).

Figura 2.6 ESTADO ANTES DEL COLAPSO DEL MODULO M1 (FASE 4)



2.2.5.2 Módulo con Malla Electrosoldada y conectores de alambre (M2)

Fases 1 y 2. No se apreciaron fisuras significantes en estas dos fases.

Fase 3 y Fase 4. En estas fases, se formaron grietas en la zona de los alféizares.

Fase 5. El módulo empezó a deslizarse en su base. Se formaron grietas en los encuentros de los muros reforzados, y en la intersección de la zona reforzada y la zona no reforzada, se puede verificar más adelante en las gráficas correspondientes a la historia de desplazamientos del módulo (Zegarra, 2003).

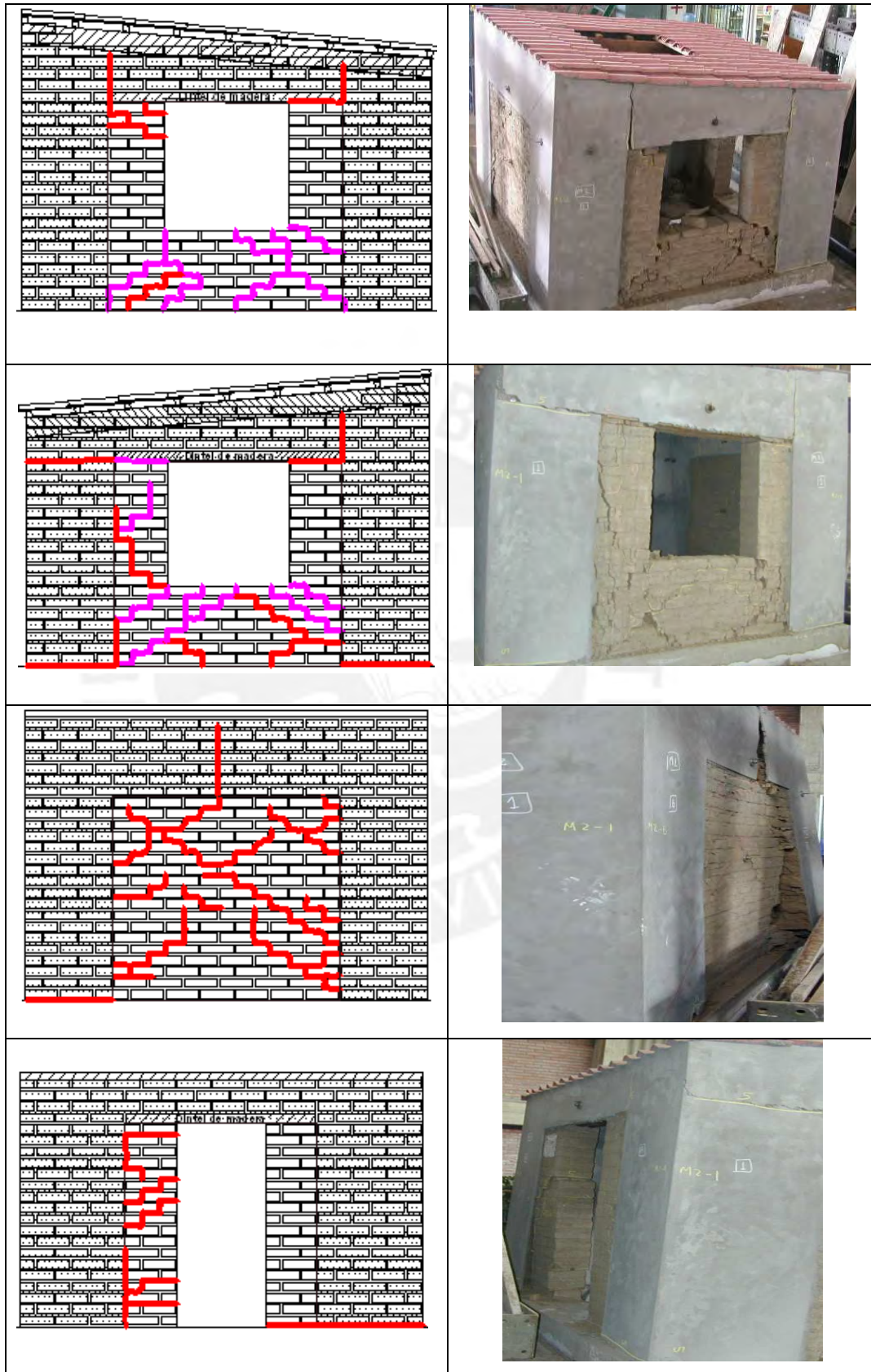
El módulo quedó en colapso parcial en la fase 6 (figura 2.7).



Figura 2.7 Estado final del módulo M2 (Fase 6)

El patrón de grietas al final de la fase 5 se observa en la figura 2.8.

Figura 2.8 ESTADO ANTES DEL COLAPSO DEL MODULO M2 (FASE 5)



2.2.5.3 Módulo con Malla y viga solera de concreto armado (M3)

Fases 1 y 2. No se apreciaron fisuras significantes en estas dos fases.

Fase 3 y Fase 4. En estas fases, se formaron grietas en la zona de los alféizares, grietas leves en la zona delimitada por la solera (en las intersecciones).

Fase 5. El módulo empezó a deslizarse en su base. Se formaron grietas en la zona de las vigas mediante grietas horizontales entre estas y los muros (Zegarra, 2003).

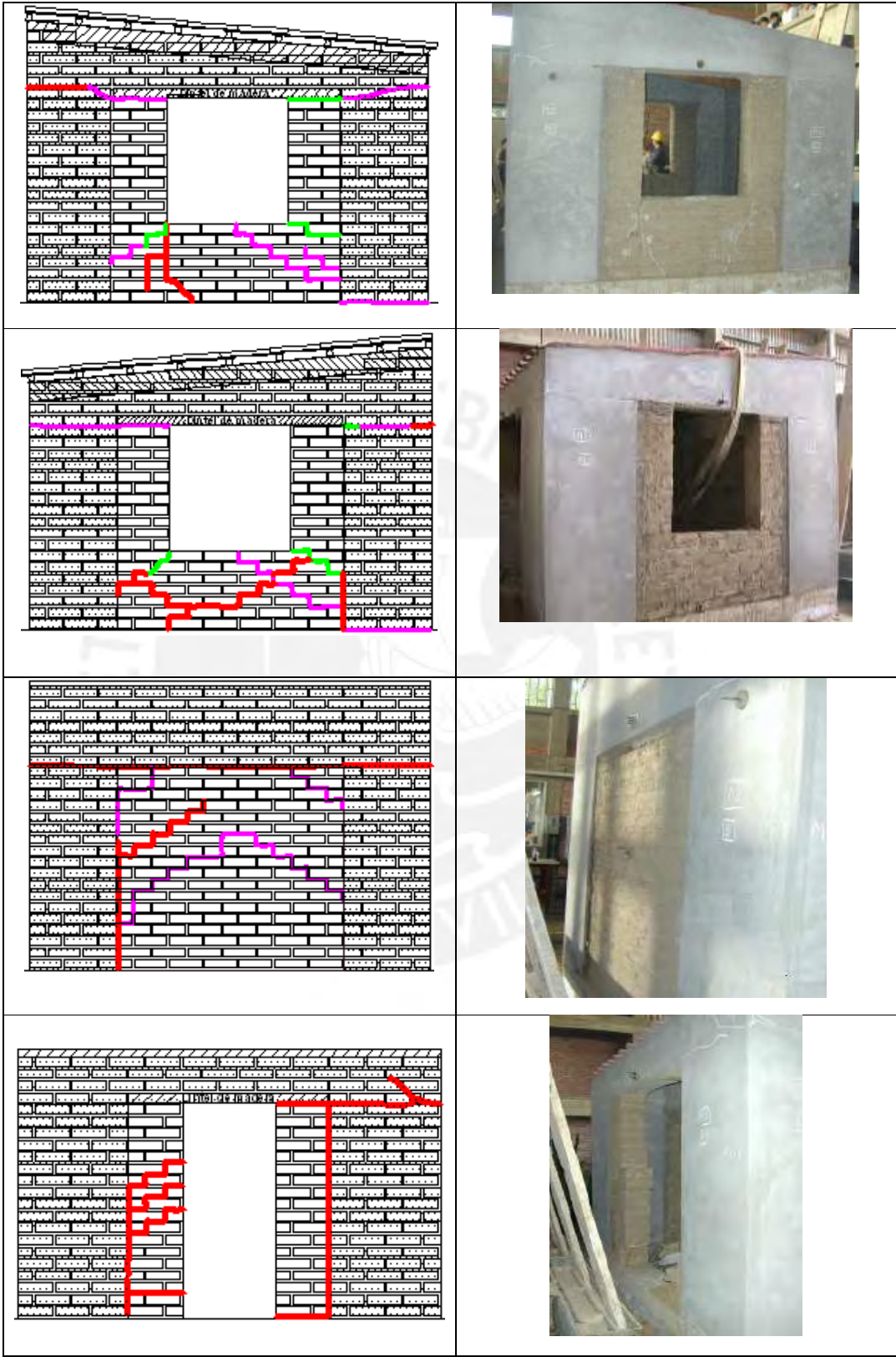
La figura 2.9 muestra el estado final del módulo sin colapso en la fase 6.



Figura 2.9 Estado final del modulo M3 (Fase 6)



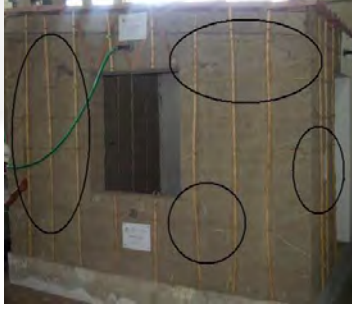
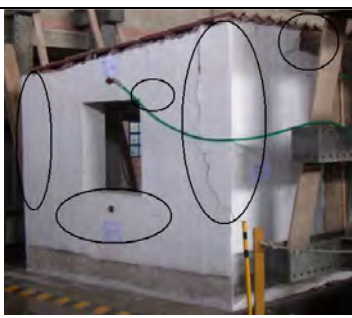
Las grietas antes del colapso al final de la fase 5 se observan en la figura 2.10.





Figura 2.10 ESTADO ANTES DEL COLAPSO DEL MODULO M3 (FASE 5)



2.2.5.4 Módulo Reforzado con Caña (M4)

Tabla 2.4. Descripción del comportamiento del M4

Fase	Lado	Comportamiento	Estado
1 y 2		Se apreciaron las fisuras producidas por contracción de secado.	
3	Sin tarrajeo	Pequeñas fisuras en la parte inferior de la ventana	
3	Con tarrajeo	Pequeñas fisuras diagonales en esquinas de ventanas.	
4	Sin tarrajeo	Grieta vertical entre el muro Sur-Oeste. Fisuras escalonadas en la parte inferior del alfeizar. En Muro Oeste, pequeñas fisuras escalonadas. En muro Este fisura horizontal, con leve deslizamiento.	
4	Con tarrajeo	Fisura vertical entre muros Norte-Este. Grieta vertical entre muro Norte-Oeste. Fisuras diagonales debajo del alfeizar y sobre el dintel del muro Norte. Fisuras en muro Este sobre dintel de puerta. Muro Oeste fisuras en tartajeo.	

5	Sin tarrajeo	Grietas escalonadas y deslizamiento de unidades en la parte superior del muro Oeste. Trituración de dintel de ventana en muro Sur. Trituración de unidades en muro Este. No hubo un estado de colapso total, equilibrio estable, las cañas no sufrieron daño.	
5	Con tarrajeo	Desprendimiento de tarrajeo en dintel de puerta con incremento de fisuras (muro Este). Fisuras en zonas donde se encuentran las cañas, mostrando que estas empiezan a trabajar ante la acción sísmica. Incremento de fisuras en esquinas de ventana de muro Norte. Pequeñas fisuras escalonadas en muro Oeste.	
6 (fines ilustrativos, se retiro Acelerómetros y LVDTs, con características sísmicas similares que en la fase 5)	Sin tarrajeo	Grietas de 1.5 cm en todos los muros. Fisuras escalonadas (muro Oeste). Deslizamiento a mitad del muro de Norte a Sur. Fisuras escalonadas (muro Este), con deslizamiento de la parte superior del dintel de la puerta de Este a Oeste.	
6	Con tarrajeo	Desprendimiento de tarrajeo en muro Oeste. Fisuras verticales generalizadas en la zona donde se encuentran las cañas. No se observó un deslizamiento perceptible del módulo en su base. En muro Oeste fisuras escalonadas en parte interior y superior. Se muestra casi en su totalidad que las unidades de adobe se han aflojado.	

La figura 2.11 muestra el módulo M4 al final del ensayo, se observa en estado estable, no llega al colapso.

Muro sin
tarrajeo



Muro Sur

Muro
tarrajeado

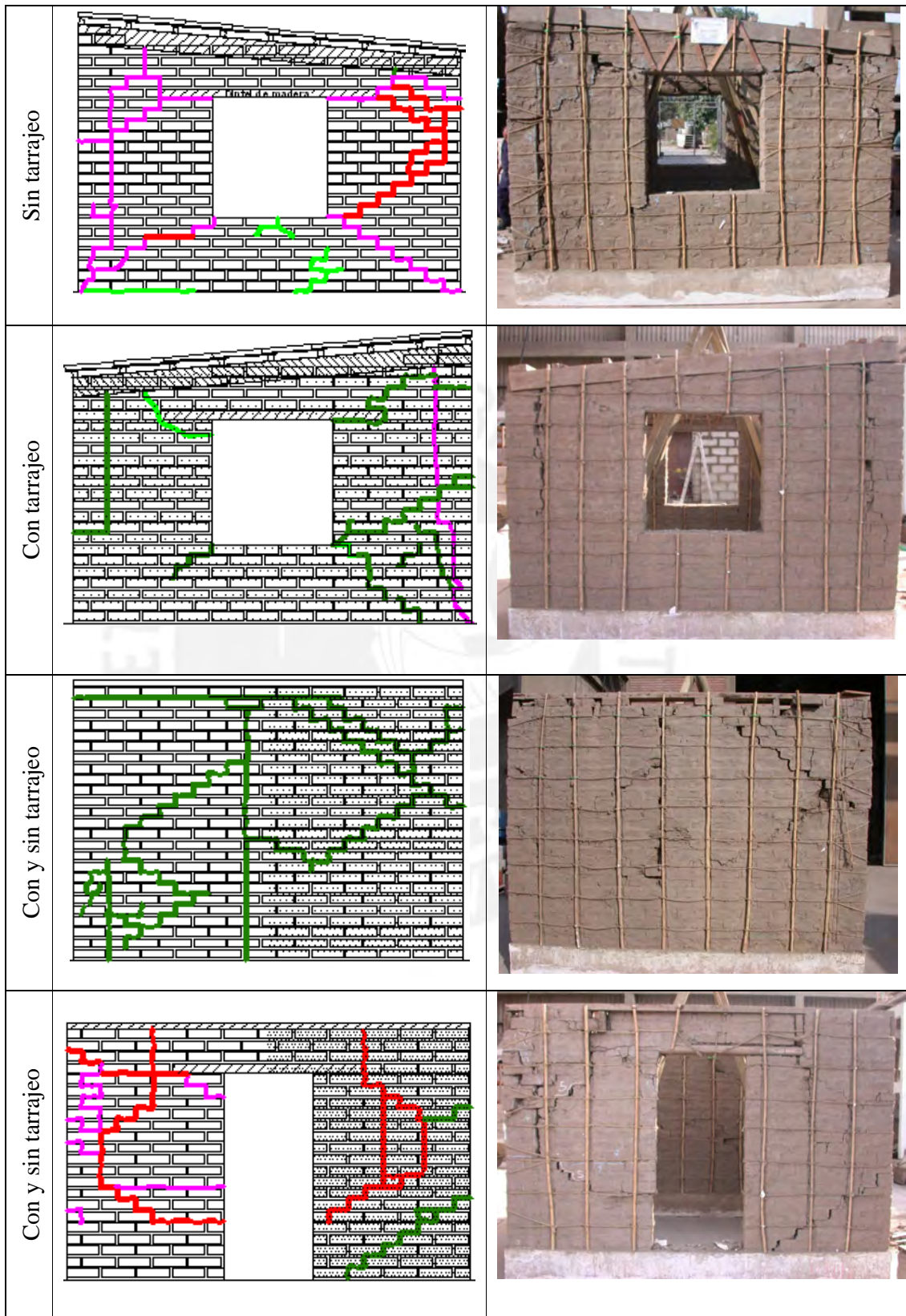


Muro Norte.

Figura 2.11 Estado final del módulo


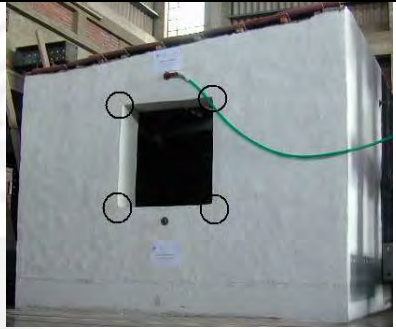

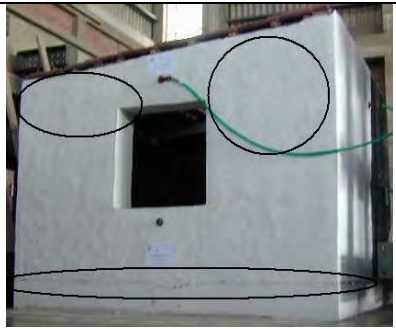
Después del ensayo, se removió el tarrajeo de los muros. El muro sin tarrajeo sufrió más daño que el muro con tarrajeo, el tipo diferente de conexión del dintel con la viga collar en el muro sin tarrajeo (iras de madera diagonales) causó una acción de martilleo en contra de la parte superior del muro. El tarrajeo en el muro incrementó la rigidez del mismo, ya que observa menor daño (figura 2.12).


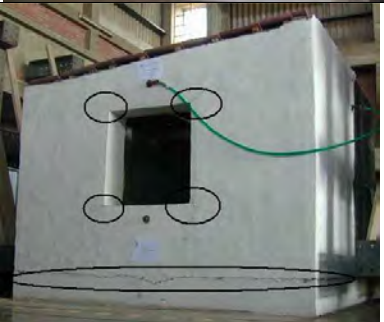

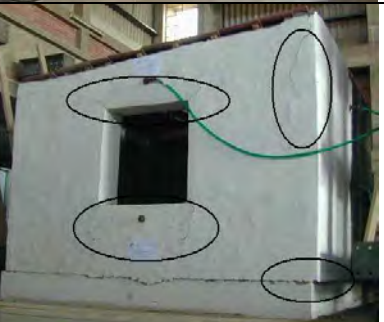

Figura 2.12 Estado final del modulo M4 (Fase 5)




2.2.5.5 Módulo Reforzado con Geomalla (Malla Polímero) (M5)

Tabla 2.5 Descripción del comportamiento del M5

Fase	Lado	Comportamiento	Estado
1 y 2		No se apreciaron fisuras. El módulo tuvo un comportamiento elástico.	
3	Sin tarrajeo	Fisuras en la parte superior de la ventana	
3	Con tarrajeo	Pequeñas fisuras en la parte inferior y superior de la ventana	
4	Sin tarrajeo	Grietas Escalonadas en el lado izquierdo del muro. En la intersección de los muros Este y Sur, se produce una grieta vertical extendida.	
4	Con tarrajeo	Fisuras muy tenues en el tarrajeo. Separación entre el módulo y el anillo de cimentación.	

5	Sin tarrajeo	Grietas escalonadas cerca a la ventana, deslizamiento del muro Este, se nota un pequeño deslizamiento en la base.	
5	Con tarrajeo	Fisuras diagonales que nacen en la ventana. Deslizamiento en la base. Desprendimiento del tarrajeo en la parte superior de la puerta.	
6	Sin tarrajeo	Deslizamiento en la base muro sur y oeste, con dirección Este Oeste. Fisura vertical desde la ventana hasta el anillo de cimentación.	
6	Con tarrajeo	Continuación de las fisuras en ventanas desde la fase 5. Fisuras entre muros Norte y Oeste sin agrietamiento. Deslizamiento en la base.	
7 (fines ilustrativos, se retiraron los LVDTs, con características sísmicas similares que en la fase 5)	Sin tarrajeo	Las fisuras se convirtieron en grietas y hubo mayores deslizamientos.	

7	Con tarrajeo	Aumentaron las fisuras pero no se formaron grietas. Mayor deslizamiento en la base del muro norte (8 cm) dirección Este Oeste y de 2 cm en la dirección Norte Sur.	
---	--------------	--	---

La figura 2.13 muestra el módulo M5 al final del ensayo, se observa en estado estable, no llega al colapso.

Muro sin tarrajeo



Muro Sur

Muro tarrajeado



Muro Norte.

Figura 2.13 Estado Final del Módulo

Después del ensayo, se removió el tarrajeo de los muros. El muro sin tarrajeo sufrió más daño que el muro con tarrajeo. El tarrajeo en el muro incrementó la rigidez del mismo, observándose menor daño (Figura 2.14).

Figura 2.14 Estado final del modulo M 5 (Fase 7)

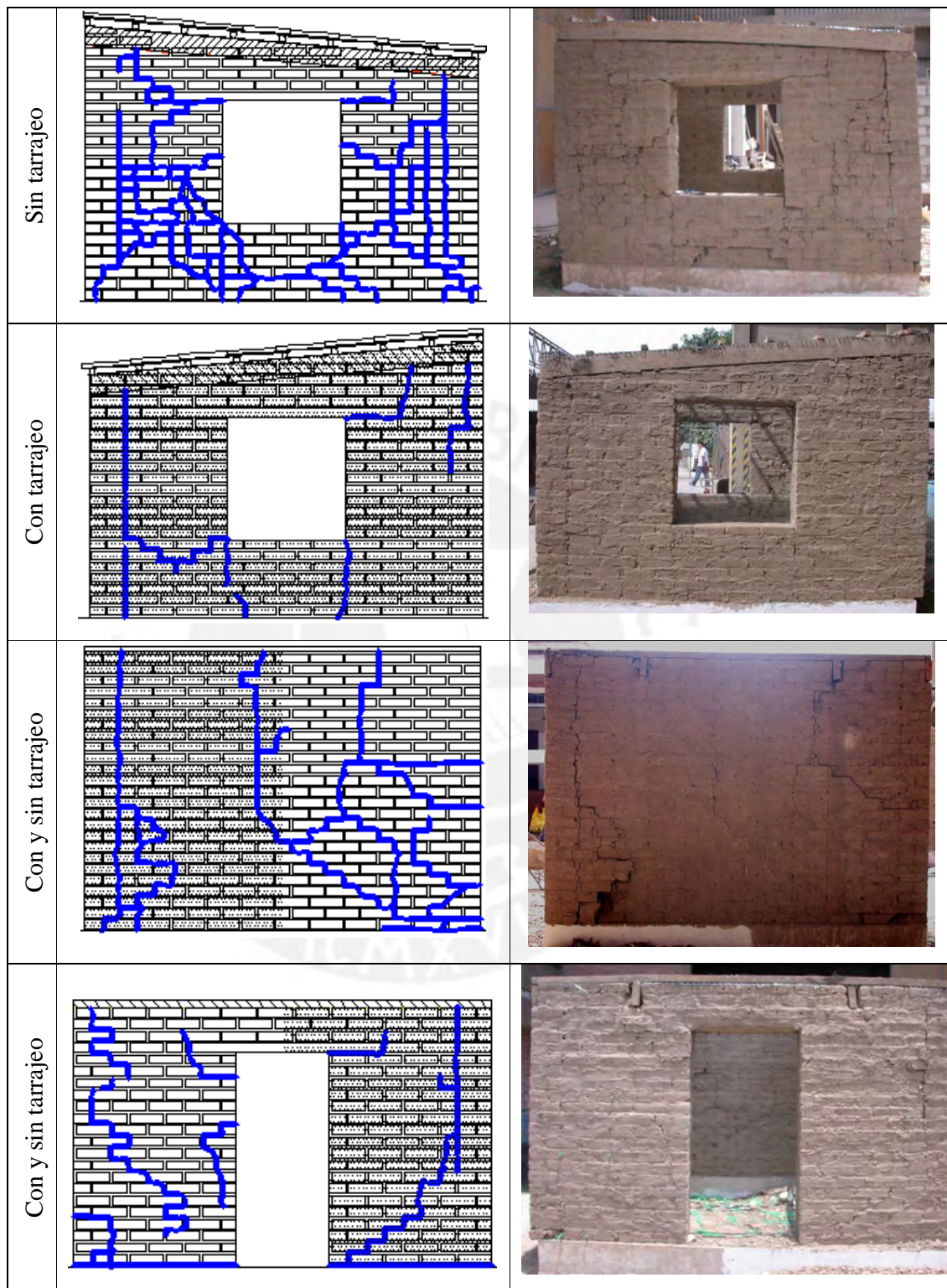







Tabla 2.6 Comparación de los cinco módulos con los diferentes tipos de reforzamiento

Proyecto	Módulo	Características	Comportamiento último	Estado Final
COPASA	M1	Sin refuerzo	Fase 5 (a=1.0·g) sismo severo: se formaron grandes grietas en todos los muros quedando desalineados tanto vertical como horizontalmente, estado inestable.	
	M2	Malla electro soldada + conectores de alambre N° 8	Fase 6 (a=1.2·g) sismo catastrófico: colapso de los muros, se cae el dintel, deslizamiento en la base de 15 cm, grietas verticales en el encuentro de los muros, estado inestable.	
	M3	Malla electro soldada + viga solera de Concreto armado + dientes de concreto + conectores de alambre N° 8	Fase 6 (a=1.2·g) sismo catastrófico: colapso de los muros, deslizamiento en la base de 10 cm, los dientes fallaron por cizalle, estado inestable.	
GETTY	M4	Caña exterior vertical + sogas horizontal + conectores de yute	Fase 5 (a=1.0·g) sismo severo: grietas verticales en los encuentros de los muros, deslizamiento y trituración cerca del dintel, grietas escalonadas en el muro oeste y este, equilibrio estable.	
	M5	Geomalla exterior + conectores de rafia	Fase 6 (a=1.2·g) sismo catastrófico: trituración moderada en los muros, deslizamiento en la base de 7 cm, fisuras verticales en los encuentros de los muros, grietas escalonadas en muro oeste, equilibrio estable.	

CAPITULO III

RESULTADOS EXPERIMENTALES DE ENSAYOS DE SIMULACION SISMICA

3.1 INTRODUCCION

La estimación de los parámetros dinámicos de cada módulo se realizará a partir del análisis de registros de señales (aceleraciones y desplazamientos) obtenidos en puntos específicos de cada estructura. Estos registros se obtienen con los acelerómetros y LVDT's instalados.

Las señales registradas en los diferentes puntos seleccionados de la estructura se ubican como se observa en la figura 3.1.

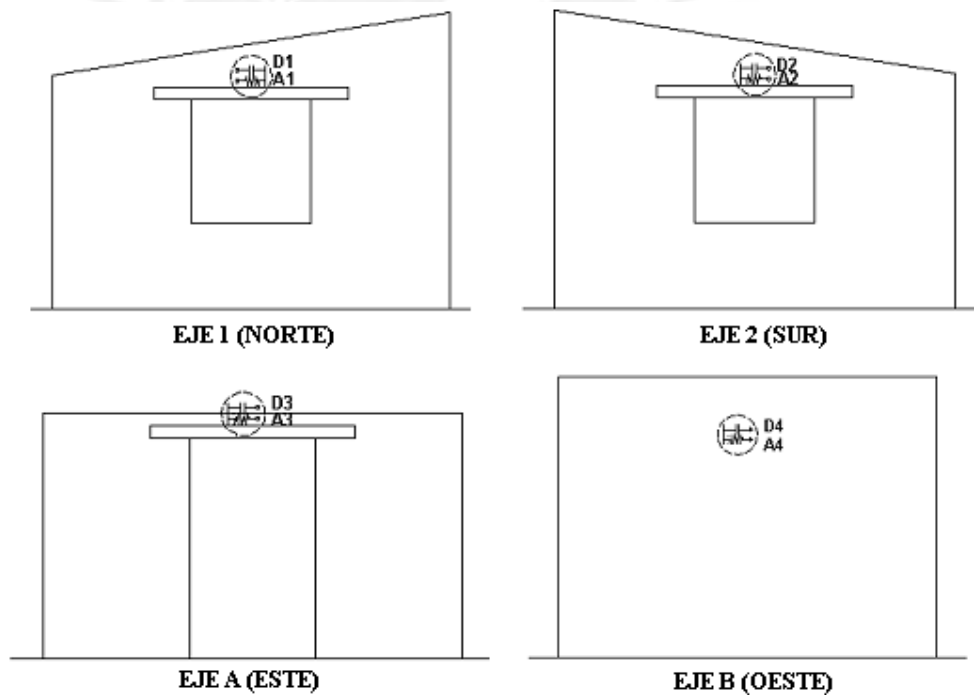


Figura 3.1 Ubicación de los instrumentos instalados

3.2 DESPLAZAMIENTOS RELATIVOS MODULO SIN REFUERZO (M1)

Los desplazamientos ocurridos en la fase 3, (figura 3.2) se pueden verificar con estos gráficos, donde se observa que el desplazamiento máximo fue de 50 mm. registrado en D4, siendo 60 mm. el desplazamiento en la mesa vibradora.

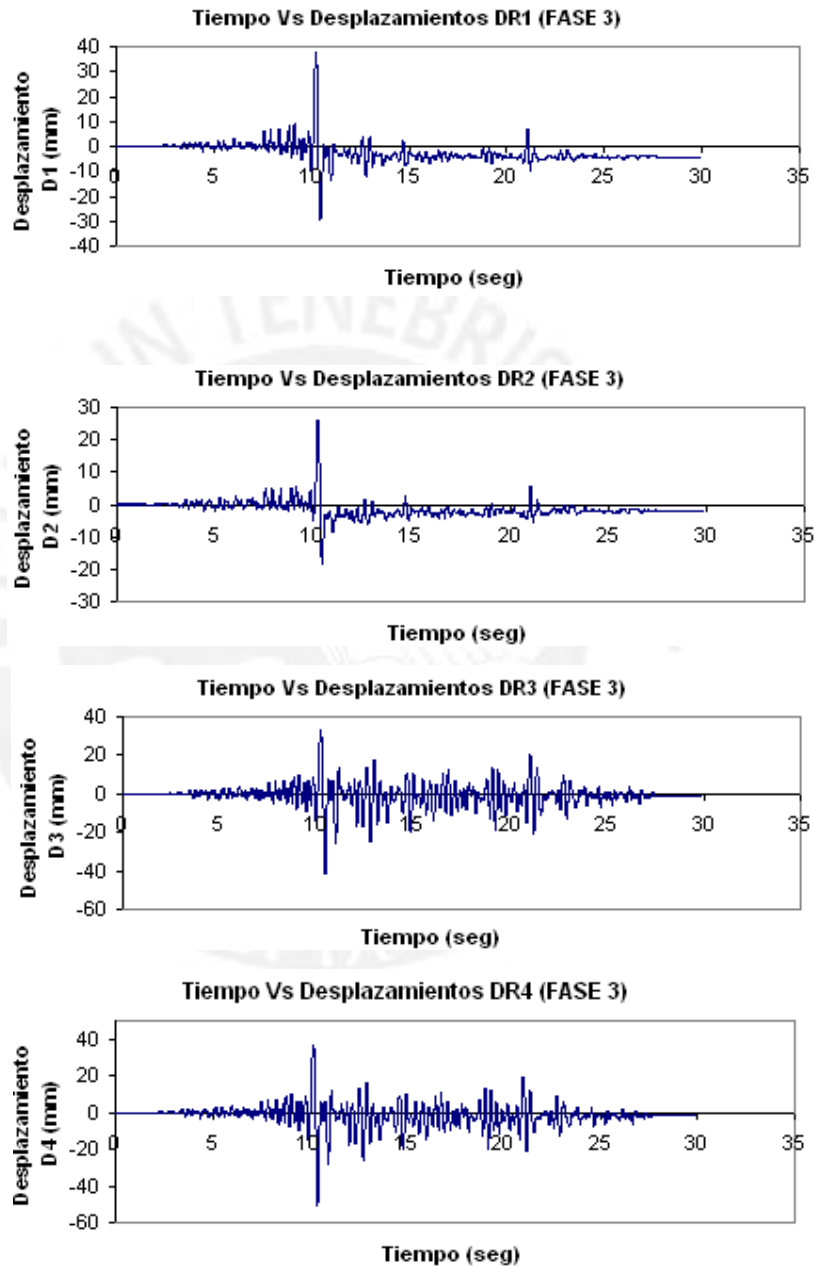


Figura 3.2 Tiempo Vs Desplazamiento en M1

3.3 DESPLAZAMIENTOS RELATIVOS MODULO CON MALLA ELECTROSOLDADA CON CONECTORES DE ALAMBRE (M2)

Los desplazamientos ocurridos en la fase 5, (figura 3.3) se pueden verificar con estos gráficos, donde se observa que el desplazamiento máximo fue de 76 mm., registrado en D2, siendo 100 mm. el desplazamiento en la mesa vibradora.

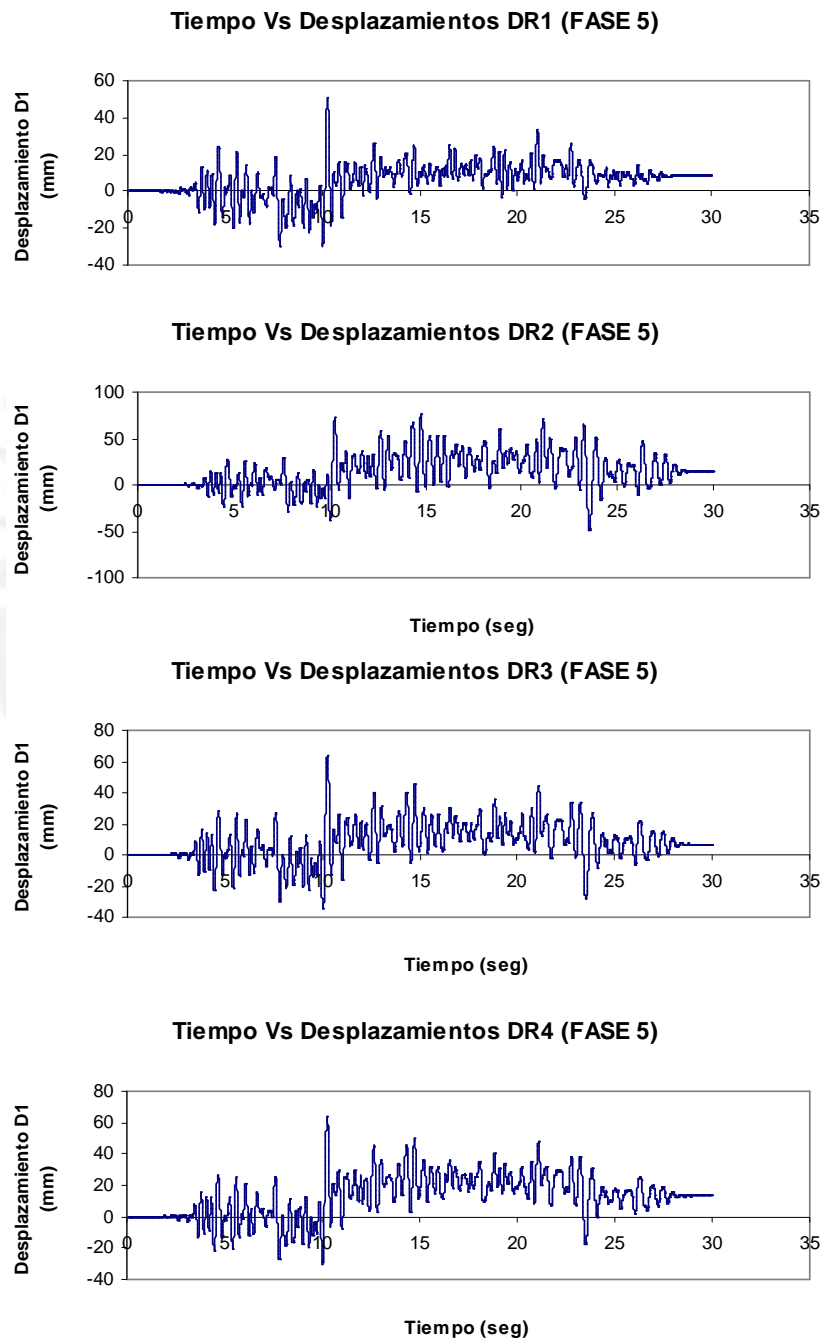


Figura 3.3 Tiempo Vs Desplazamiento en M2

3.4 DESPLAZAMIENTOS RELATIVOS MODULO MALLA Y VIGA SOLERA DE CONCRETO ARMADO (M3)

Los desplazamientos ocurridos en la fase 5, (figura 3.4) se verifican con estos gráficos, donde se observa que el desplazamiento máximo fue de 75 mm., registrado en D2 y D4, siendo 100 mm. el desplazamiento en la mesa vibratora.

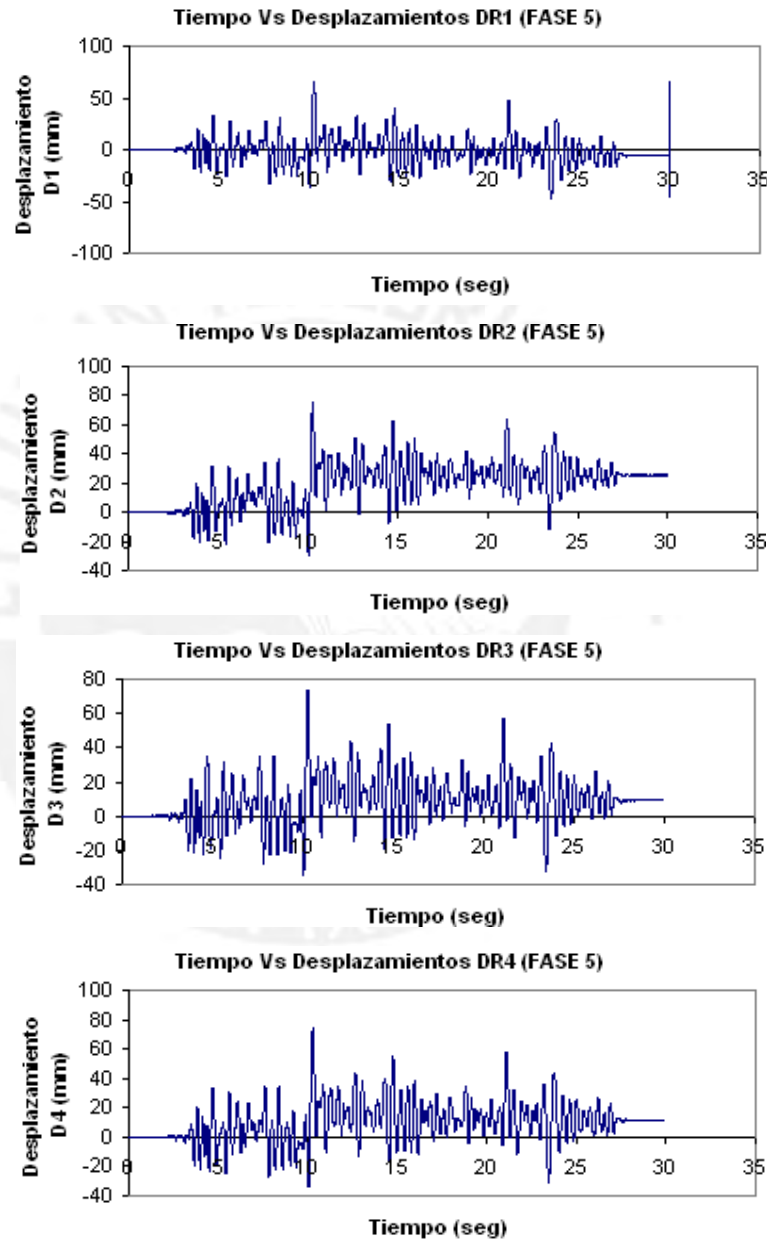


Figura 3.4 Tiempo Vs Desplazamiento en M3

3.5 DESPLAZAMIENTOS RELATIVOS MODULO REFORZADO CON CAÑA (M4)

Los desplazamientos ocurridos en la fase 5, (figura 3.5) se verifican con estos gráficos, donde se observa que el desplazamiento máximo fue de 280 mm., registrado en D1, siendo 100 mm. el desplazamiento en la mesa vibradora.

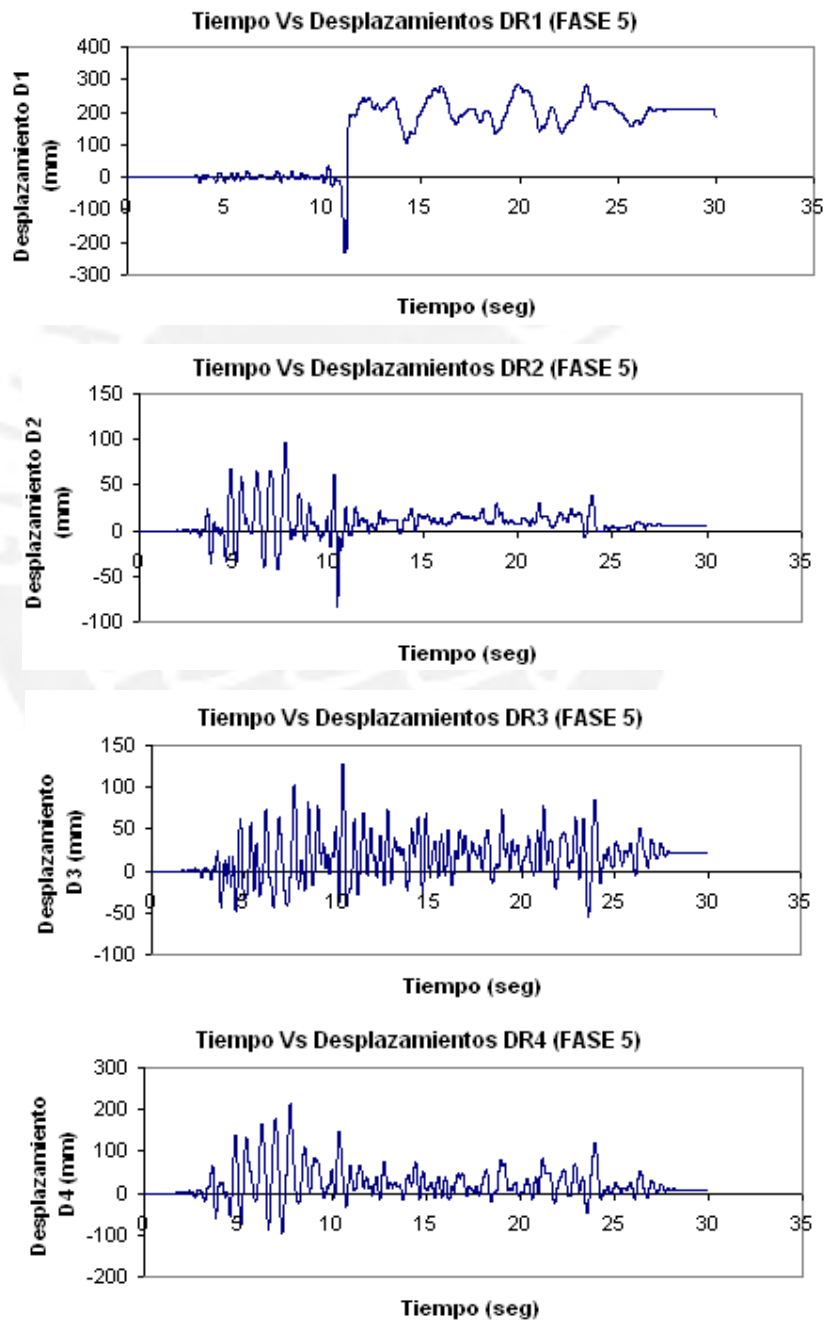


Figura 3.5 Tiempo Vs Desplazamiento en M4

3.6 DESPLAZAMIENTOS RELATIVOS MODULO REFORZADO CON GEOMALLA (Malla Polímero) (M5)

Los desplazamientos ocurridos en la fase 7 (repetición de la fase 6) (figura 3.6) se verifican con estos gráficos, se observa un desplazamiento de 142 mm. registrado en D2, siendo el máximo desplazamiento en la mesa vibratoria de 120 mm.

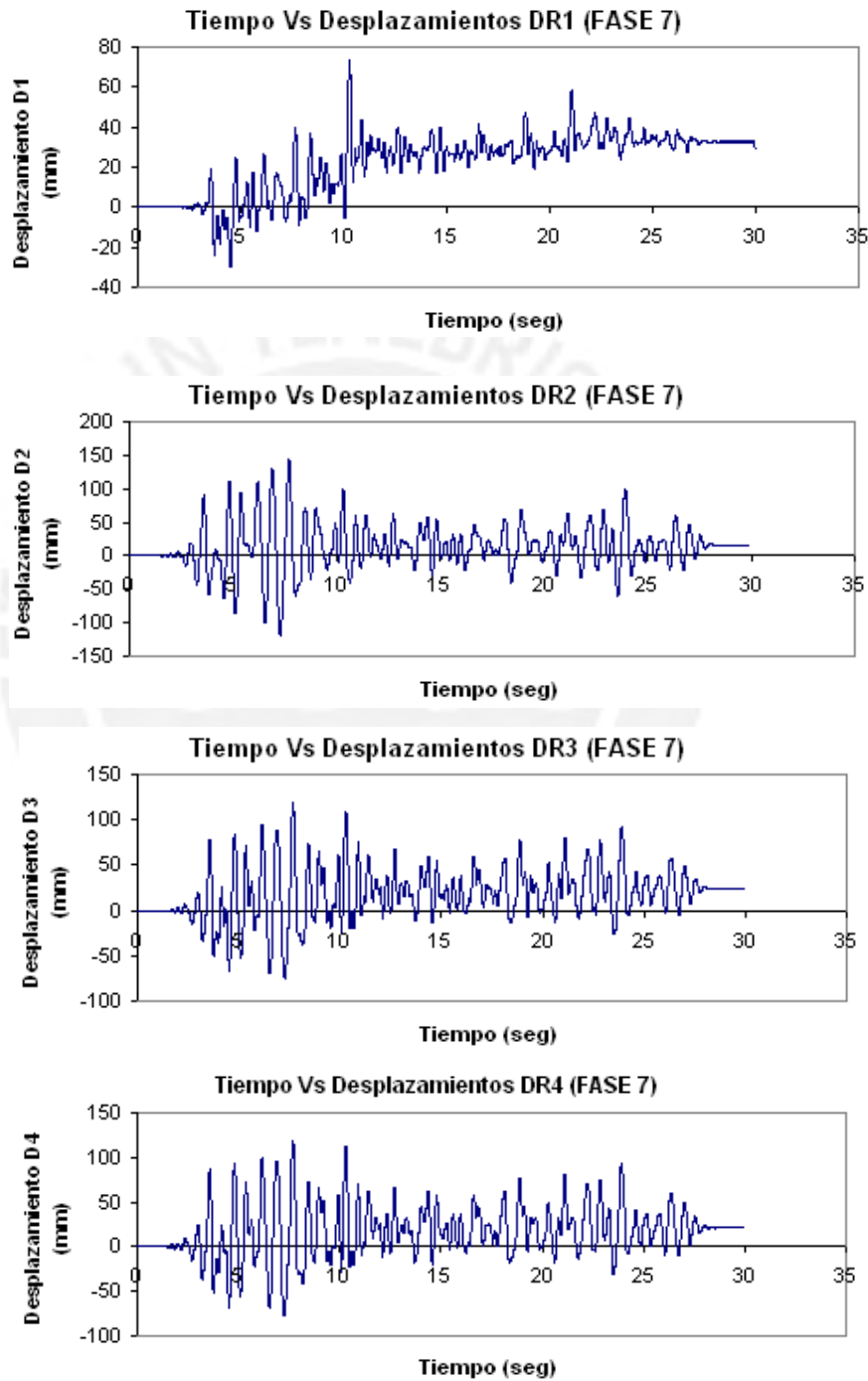


Figura 3.6 Tiempo Vs Desplazamiento en M5

3.7 PARAMETROS SISMICOS

Se hicieron pruebas de vibración libre para determinar el amortiguamiento, el periodo fundamental y la frecuencia natural. Estas pruebas se realizaron solo en los módulos reforzados con Caña (M4) y reforzados con Geomalla (M5), razón por la cual no se muestra los resultados para el resto de módulos: M1, M2 y M3.

3.7.1 AMORTIGUAMIENTO

El proceso por el cual la vibración estable disminuye en amplitud es llamado amortiguamiento (Chopra A.). Una medida sencilla del amortiguamiento es el decremento logarítmico (figura 3.7). Del grafico se logra también el período y frecuencia.

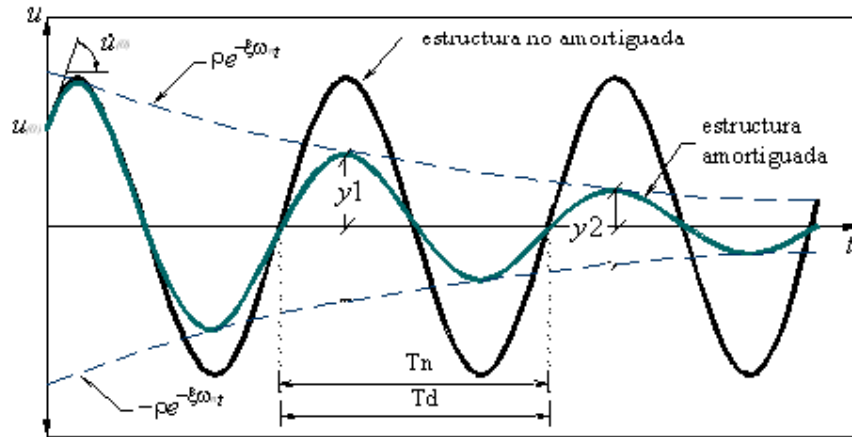


Figura 3.7 Estructura amortiguada

El decremento logarítmico es:

$$\delta = \ln^* \frac{y1}{y2}$$

Donde el amortiguamiento es:

$$\xi = \frac{1}{2\pi} \ln^* \frac{y1}{y2}$$

El período amortiguado Td también puede ser determinado de la vibración libre como:

$$Td = \frac{Tn}{\sqrt{1-\xi^2}}$$

La frecuencia natural se calcula como sigue:

$$\omega n = \frac{\omega d}{\sqrt{1 - \xi^2}}$$

Donde:

$$\omega d = \frac{2\pi}{T_d}$$

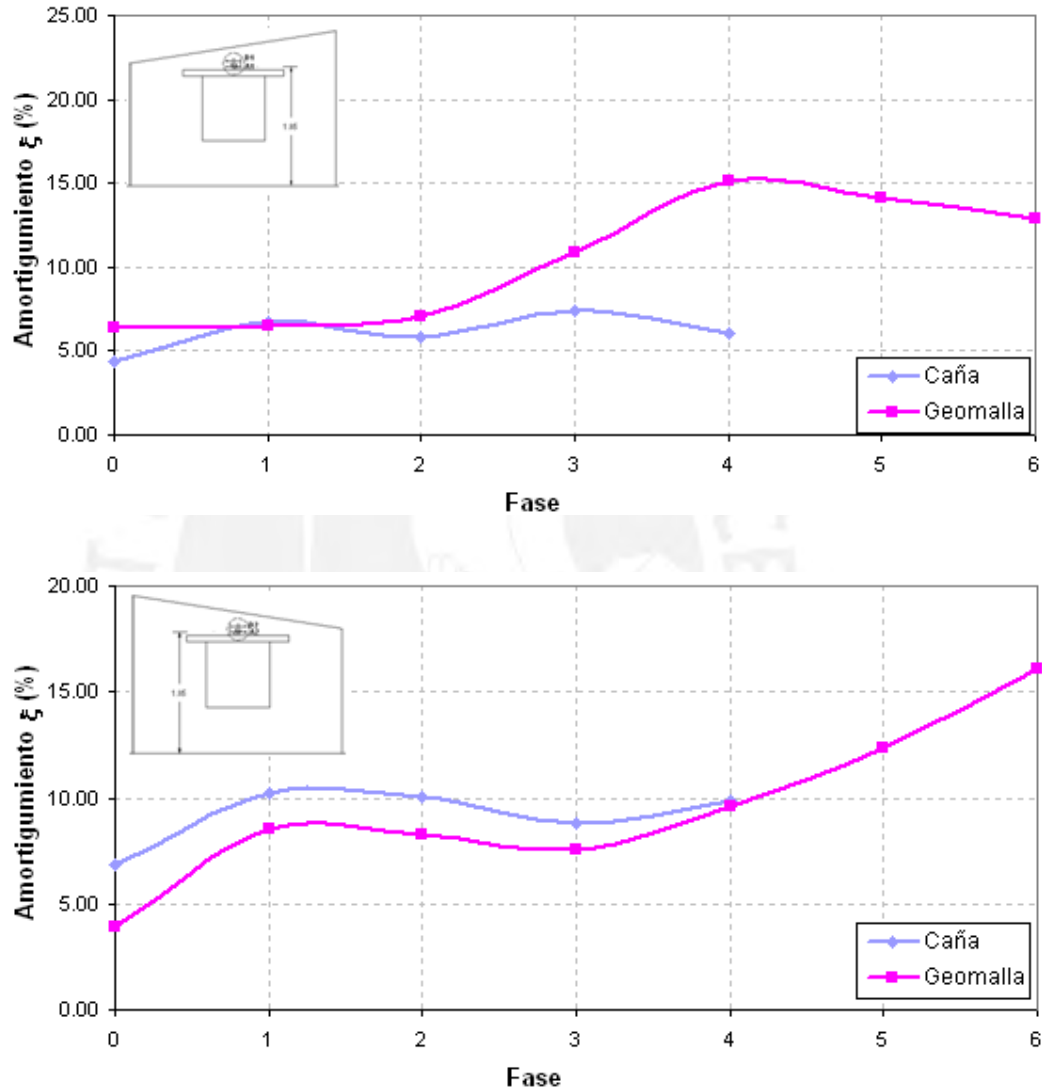


Figura 3.8 Amortiguamiento en A1 y A2

En el módulo reforzado con Geomalla (M5) se alcanza hasta un 15 % de amortiguamiento, comparado con el de la Caña (M4) que alcanza solo un 10% (figura 3.8).

En el muro con tarrajeo (geomalla), el amortiguamiento se incrementa hasta la fase 4, a partir de allí la curva muestra una pendiente negativa, lo que supone que el muro ha

trabajado (se ha degradado y perdido rigidez) hasta la fase 4 y a partir de la fase 5 empieza a trabajar el refuerzo de geomalla.

En el muro sin tarrajeo (geomalla), el amortiguamiento se incrementa y mantiene casi constante hasta la fase 3, y luego se incrementa linealmente hasta la fase 6, sabemos que el aumento de amortiguamiento es sinónimo de pérdida de rigidez, por tanto, hay mayor daño en el muro, como se observa en la fig. 3.9 b.

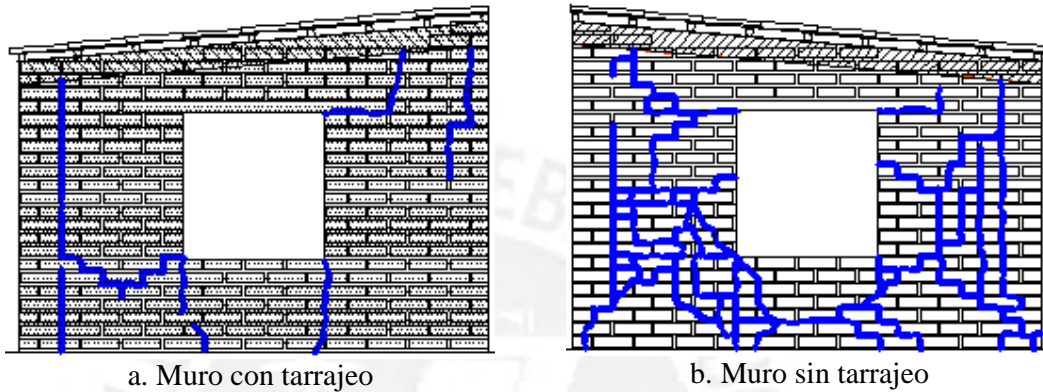
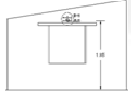
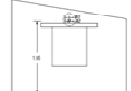


Figura 3.9 Muros con geomalla

De la tabla 3.1 se observa que el muro sin tarrajeo tiene un incremento de 24% de amortiguamiento (mayor daño) con respecto al muro con tarrajeo en la fase 6.

Tabla 3.1 Amortiguamiento en A1 y A2 del módulo M5

Caract.	Geomalla M5	Amortig.	Fase 0	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5	Fase 6
Con Tarrajeo (A1)		$\xi(\%)$	6.37	6.48	7.05	10.83	15.17	14.13	12.93
Sin Tarrajeo (A2)		$\xi(\%)$	3.90	8.57	8.24	7.57	9.62	12.32	16.05
		Incremento (%)	-39	32	17	-30	-37	-13	24

En el muro reforzado con caña y con tarrajeo, el amortiguamiento se mantiene entre 5% y 7% hasta la fase 4, el amortiguamiento se mantiene casi constante.

En el muro reforzado con caña y sin tarrajeo, el amortiguamiento se incrementa hasta la fase 1 y se mantiene casi constante hasta la fase 4 (ver figura 3.8).

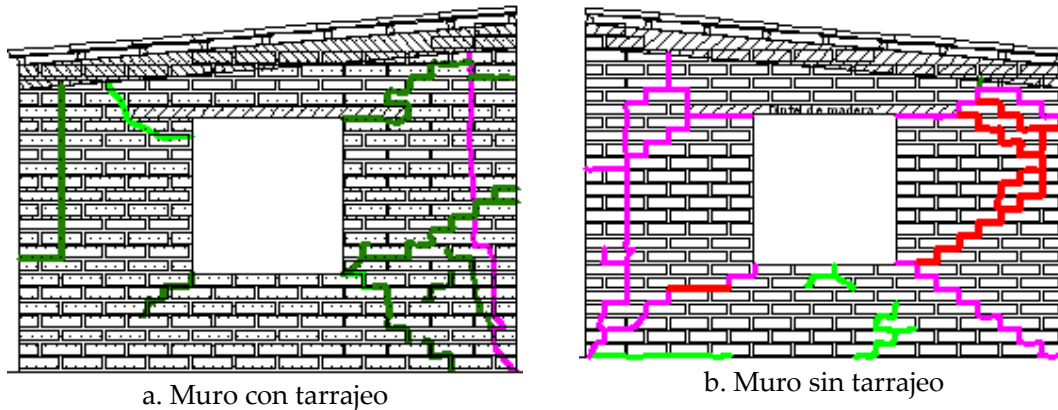
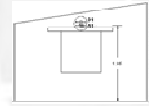
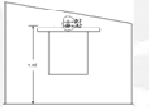


Figura 3.10 Muros reforzados con caña.

De la tabla 3.2 se observa que el muro sin tarrajeo tiene un incremento de 63% de amortiguamiento (mayor daño) con respecto al muro con tarrajeo en la fase 4.

Tabla 3.2 Amortiguamiento en A1 y A2 del módulo M4

Caract.	Caña M4	Amortig.	Fase 0	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4
Con Tarrajeo (A1)		$\xi(\%)$	4.39	6.71	5.87	7.41	6.04
Sin Tarrajeo (A2)		$\xi(\%)$	6.84	10.24	10.04	8.81	9.84
		Incremento (%)	56	53	71	19	63

Las dos curvas (figura 3.11) tanto para el muro reforzado con geomalla como para el muro reforzado con caña tienen una tendencia creciente hasta la fase 4. En el caso del muro reforzado con geomalla el amortiguamiento se sigue incrementando hasta la fase 5, que es hasta donde el muro debe haber alcanzado los mayores daños y a partir de la fase 5 hay una caída en la curva, se puede suponer que es porque la malla empieza a trabajar, reduciendo el amortiguamiento y por tanto los daños en el muro.

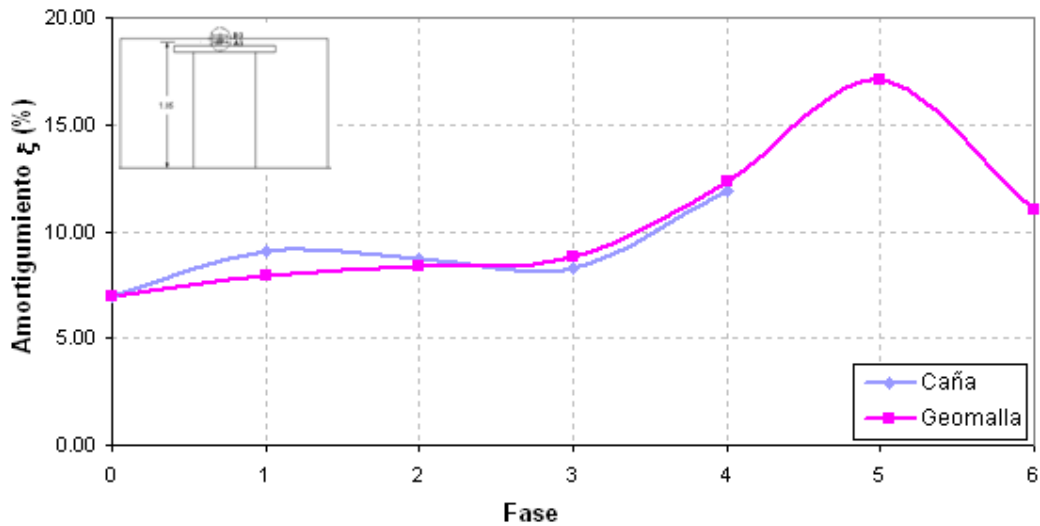


Figura 3.11 Amortiguamiento en A3

En el muro reforzado con caña, la curva de la figura 3.12 tiene una tendencia casi constante manteniéndose entre 10 % a 12 %, la pérdida de rigidez es constante.

En el muro reforzado con geomalla, el amortiguamiento se incrementa hasta la fase 4 manteniéndose constante hasta la fase 6, siendo el máximo valor registrado de 18%.

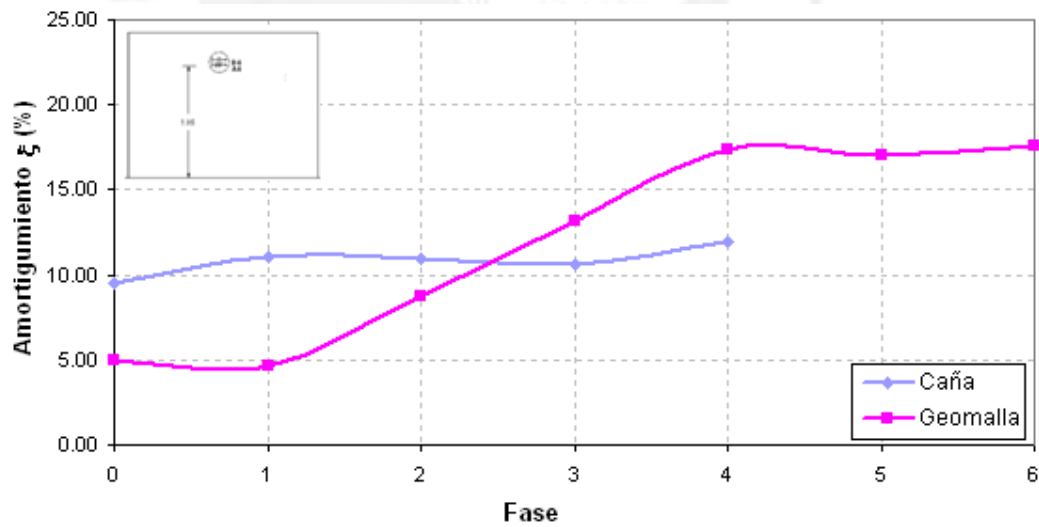


Figura 3.12 Amortiguamiento en A4

3.7.2 PERIODO FUNDAMENTAL

La variación del período fundamental se define como el tiempo que tarda una estructura en completar un ciclo en vibración libre. A pesar de que este parámetro es característico de la respuesta en vibración libre, su valor condiciona en buena medida la respuesta estructural a muchas sollicitaciones dinámicas, como es el caso de los sismos (Muñoz A. 1999), ver figura 3.13.

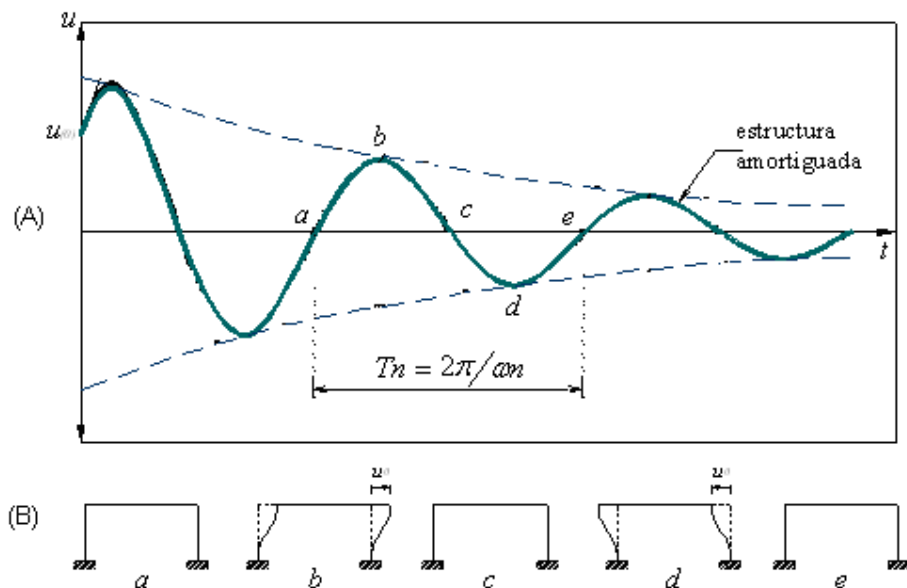


Figura 3.13 Representación del periodo de vibrar de una estructura.

Las variaciones de períodos se observan en las figuras 3.14a, b, c y d.

El comportamiento de ambos muros en el módulo M4 (caña) es similar, cuya tendencia de curva es casi constante hasta la fase 3 presentando un incremento en la fase 4 hasta llegar a 0.16 sg.

El comportamiento en el módulo M5 (geomalla) en ambos muros presenta una tendencia de curva casi constante hasta la fase 3, luego la tendencia es a crecer hasta la fase 5 con un periodo igual a 0.22 seg. (figura 3.14a), que es hasta donde el muro debe haber alcanzado los mayores daños y a partir de la fase 5 hay una caída en la curva, se puede suponer que es porque la malla empieza a trabajar, reduciendo el amortiguamiento con pérdida de rigidez y por tanto más daños en el muro.

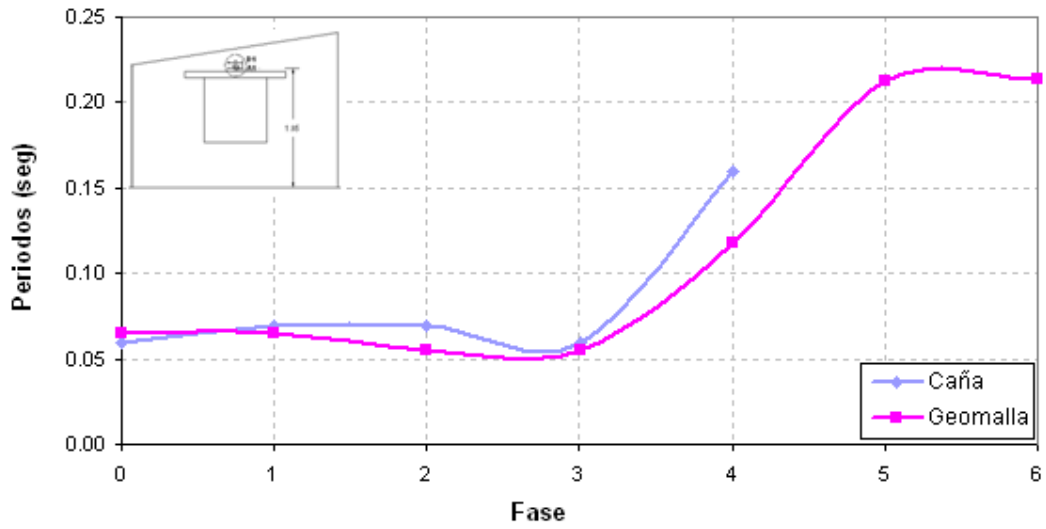


Figura 3.14a Periodo Natural en A1

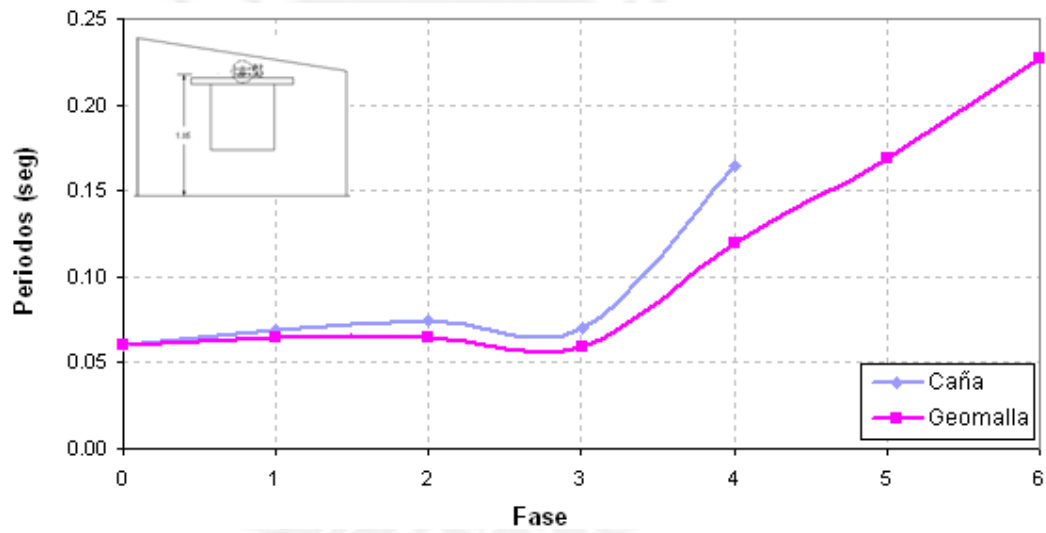


Figura 3.14b Periodo Natural en A2

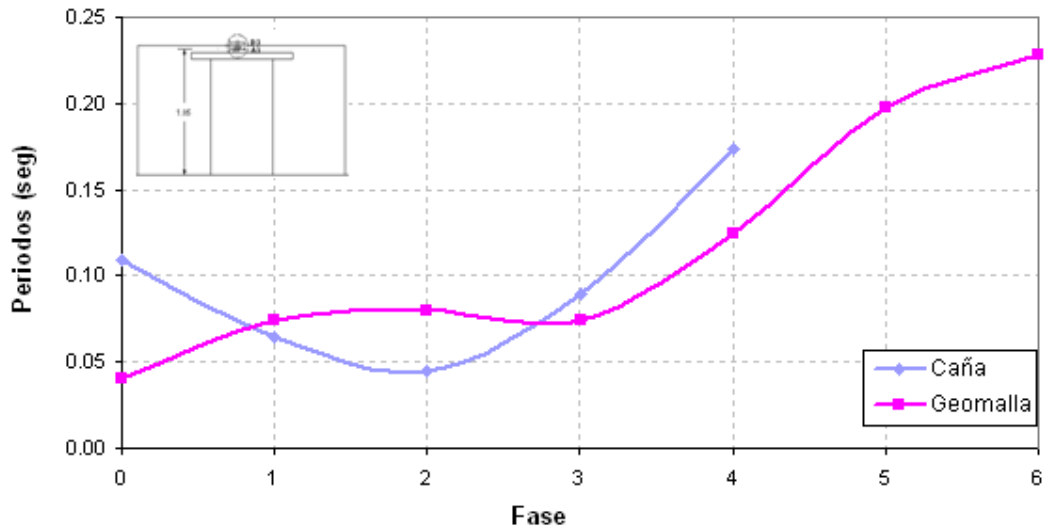


Figura 3.14c Periodo natural en A3

Las dos curvas en la figura 3.14c y d, tanto para el muro reforzado con geomalla como para el muro reforzado con caña tienen una tendencia creciente hasta la fase 4, en el caso del muro reforzado con geomalla el amortiguamiento sigue incrementando hasta la fase 6.

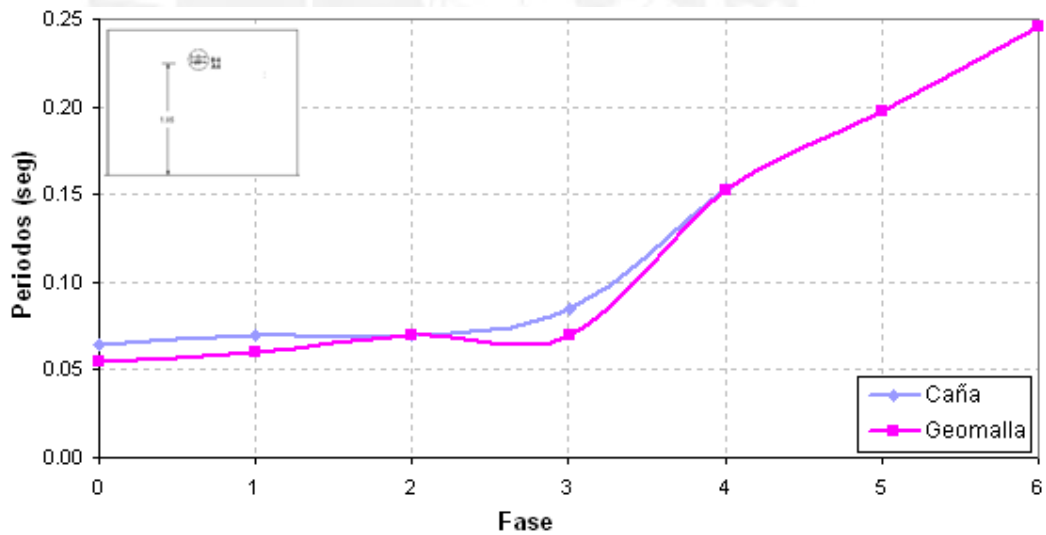


Figura 3.14d Periodo natural en A4

3.7.3 FRECUENCIA NATURAL

El comportamiento de ambos módulos con refuerzo de caña y geomalla es similar (en muros A1 y A2), la tendencia es a incrementarse ligeramente hasta la fase 3 y de allí empieza a decrecer (ver figuras 3.15a, b, c y d).

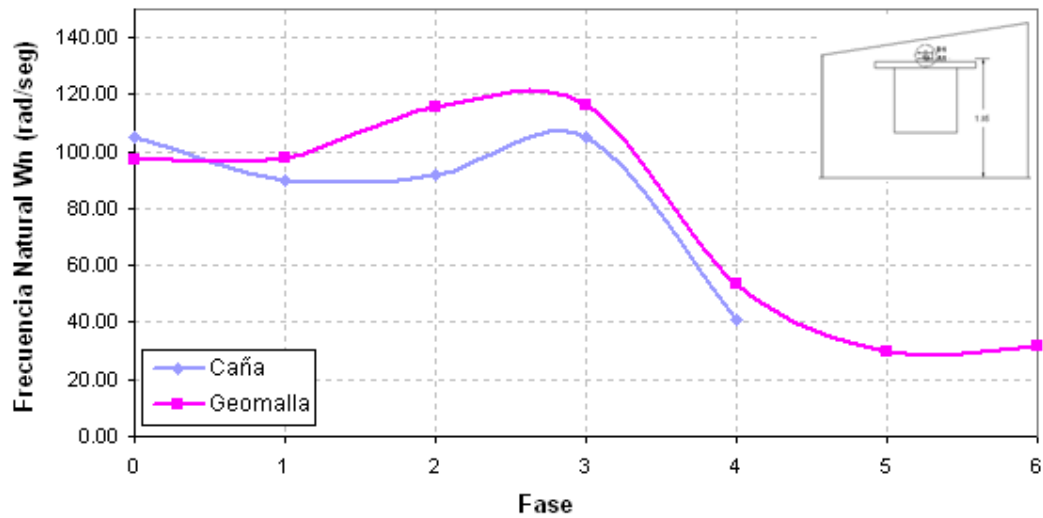


Figura 3.15a Frecuencias Naturales en A1

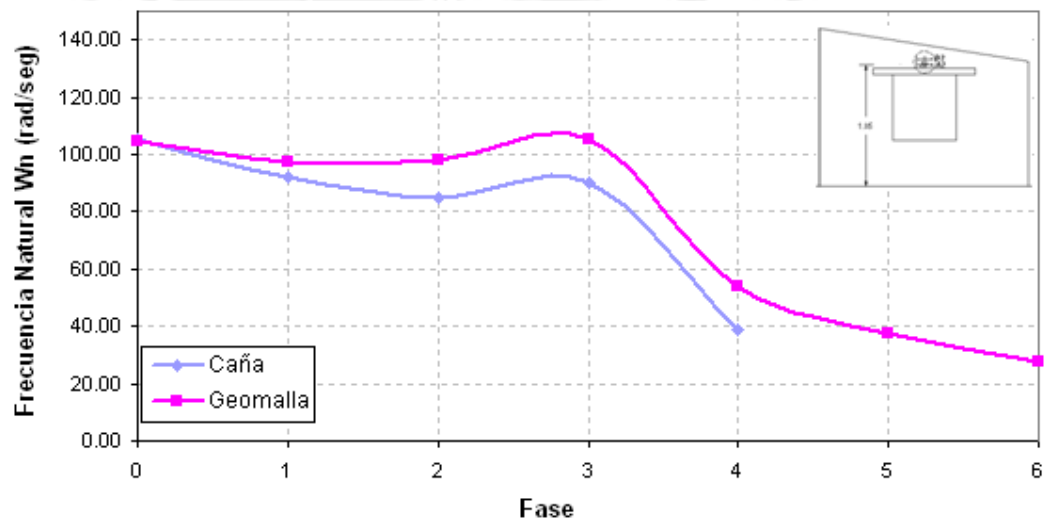


Figura 3.15b Frecuencias Naturales en A2

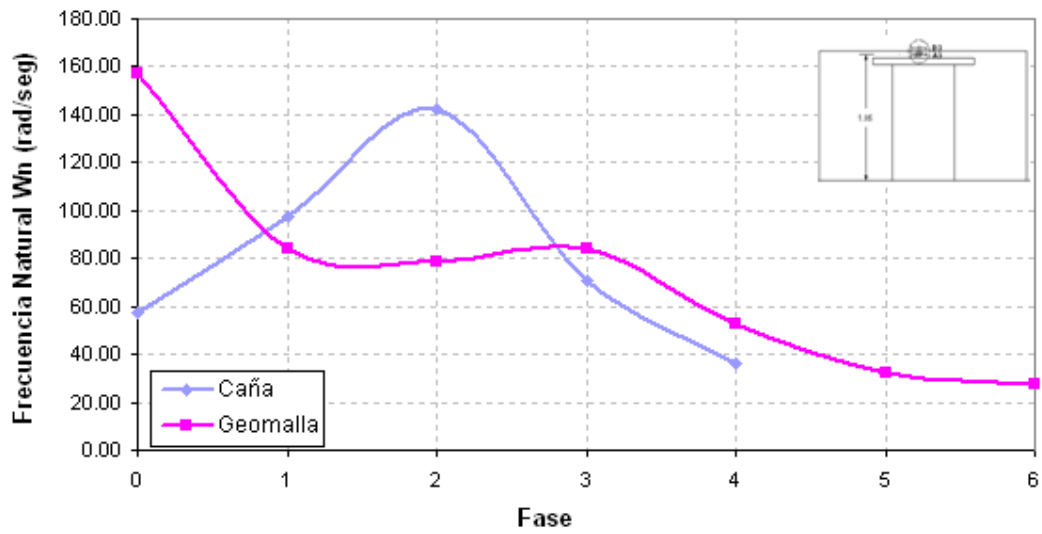


Figura 3.15c Frecuencias Naturales en A3

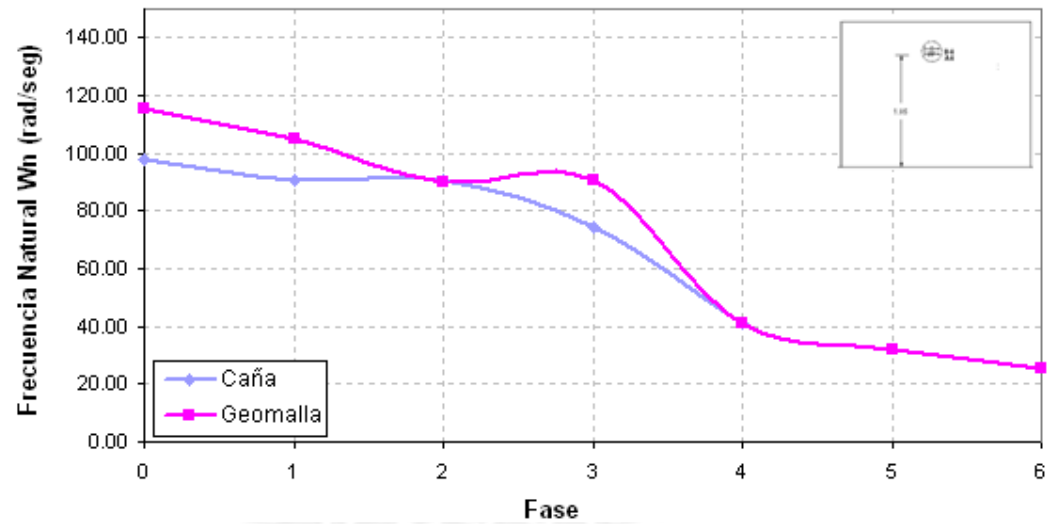


Figura 3.15d Frecuencias Naturales en A4

3.7.4 FACTOR DE AMPLIFICACION DINAMICA (FAD):

La aceleración que recibe la estructura en su base es amplificada, el factor de amplificación dinámico es la relación que existe entre la aceleración en la parte superior de la estructura y la aceleración en la base.

El factor FAD representa la amplificación de aceleraciones respecto a la aceleración en la base, ver figura 3.16.

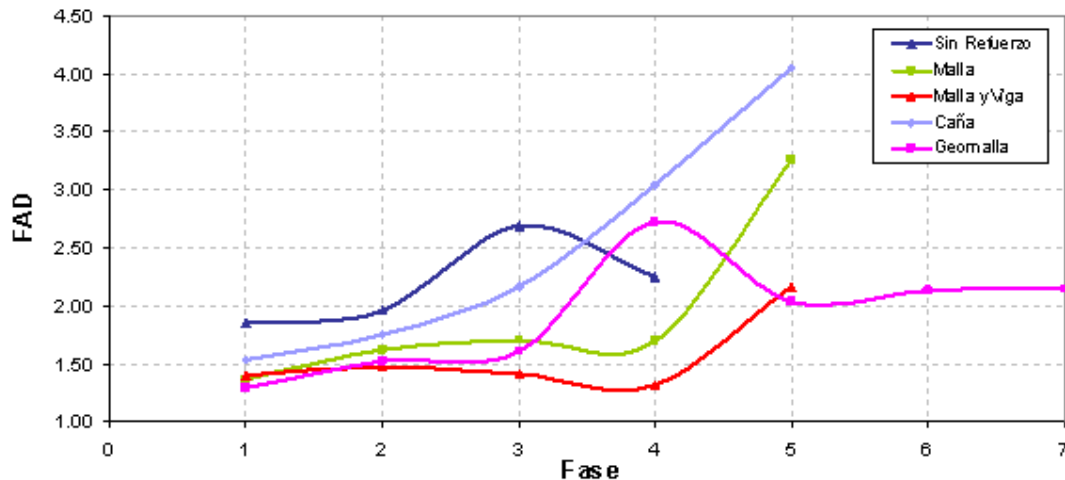


Figura 3.16 Factor de Amplificación Dinámica

Como se observa, el factor FAD aumenta conforme va aumentando el desplazamiento en la mesa vibratoria en el caso del módulo M4 (caña) es 4.1 en la fase 5. Lo que no ocurre con el módulo M5 (geomalla), que ofrece un cierto decaimiento a partir de la fase 4 (donde el FAD es 2.7), probablemente esto se deba a la disipación de energía debido a un deslizamiento en la base como se muestra en las figuras 3.17 y 3.6 (DR1) del modulo M5 (geomalla).

Los módulos M2 (malla) y M3 (malla y viga de concreto) presentan un factor FAD creciente conforme va aumentando el desplazamiento en la mesa vibratoria, siendo estos de 3.3 y 2 respectivamente.



Figura 3.17 Desplazamiento del muro en A1 del M5 (Geomalla)

3.7.5 CORTANTE BASAL MÁXIMO (V)

El cortante basal máximo (V) y coeficiente sísmico es la fuerza en la base debido a la excitación sísmica de la masa. Esta fuerza dividida entre el peso del espécimen es el coeficiente sísmico. Con el medidor de diferencia de presiones (DP) se obtendrá la fuerza que acciona la mesa vibradora, luego restando el producto de la aceleración de la mesa (Ao) por la suma de las masas de la mesa y la cimentación del módulo, se determinará esta fuerza cortante sísmica en cada fase del ensayo (Zegarra et al. 2003).

Cortante = Fuerza en el actuador – aceleración en la mesa (peso mesa + peso anillo).

Tabla 3.3 Decremento del cortante máximo de M3 y M5

Proyecto	Módulo	Peso total kg. (Módulo+anillo)	Peso neto del módulo kg.	Vmax. (Kg.)	V final (Kg.)	Decremento en %
COPASA	M1 Sin Refuerzo	12,059	9,161	7,556	-	-
	M2 Malla	13,365	10,263	11,701	-	-
	M3 Malla y Viga	13,924	11,043	12,981	9,608	26
GETTY	M4 Caña	13,860	10,965	9,335	-	-
	M5 Geomalla	14,375	11,495	12,861	8,966	30

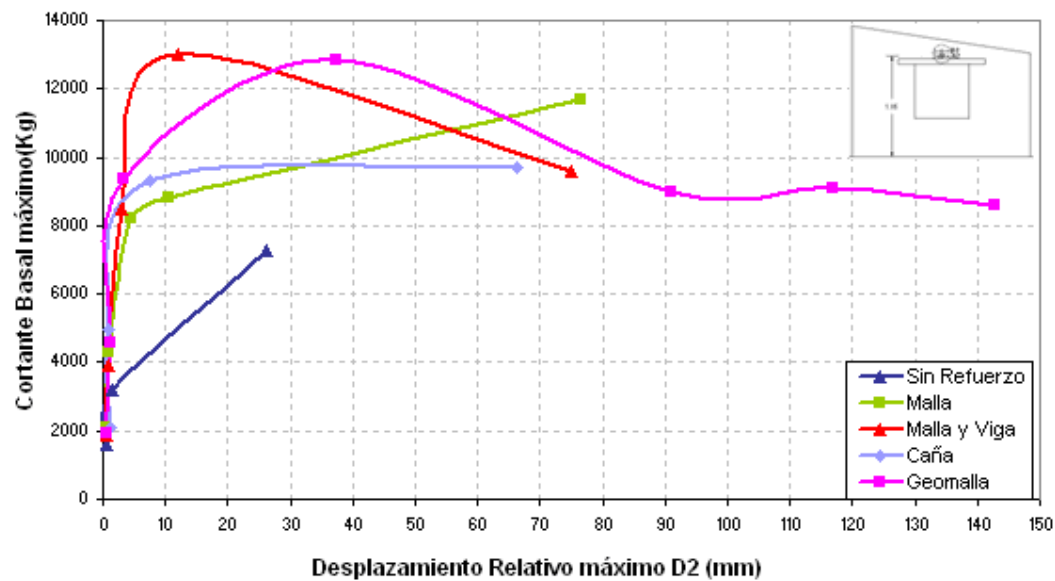
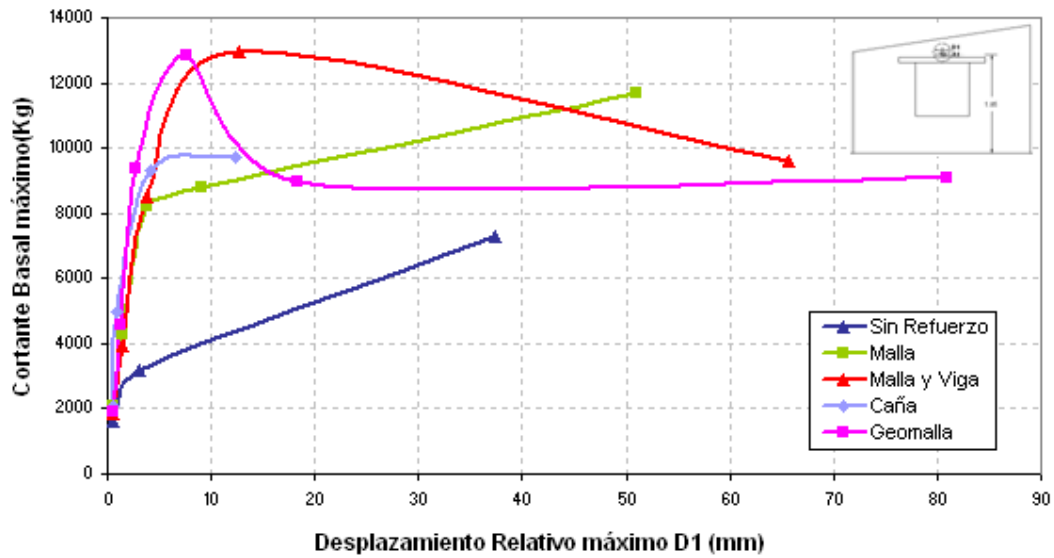


Figura 3.18 Cortante - Desplazamientos Relativos en D1 y D2

Como se observa en las figuras 3.18 y 3.19, la máxima resistencia al corte corresponde a los módulos reforzados con geomalla M5 y al módulo reforzado con malla y viga de concreto M3, con un cortante de 13,000 Kg. A partir de allí en ambos módulos se observa una pérdida de resistencia debido a que los muros de adobe empiezan a fracturarse, observándose un comportamiento dúctil, en el caso del módulo con geomalla, se activa el aporte de la malla como refuerzo de confinamiento y en el caso del muro con malla y viga, se observa el aporte de éstas como refuerzo de confinamiento.

El módulo reforzado con geomalla admite mayores desplazamientos, por tanto, se comporta mejor que el resto de módulos.

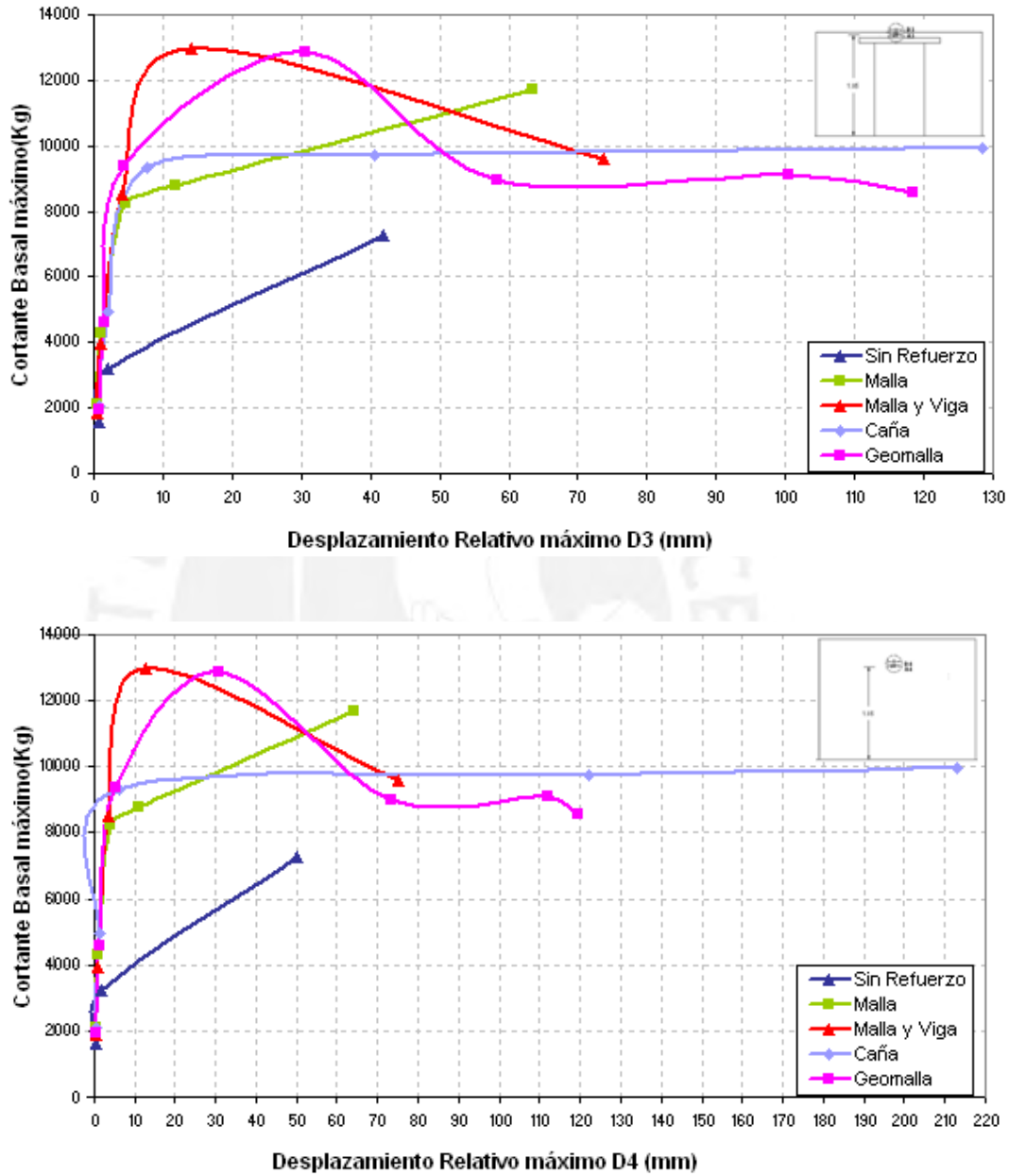


Figura 3.19 Cortante - Desplazamientos Relativos en D3 y D4

3.7.6 COEFICIENTE SISMICO

El coeficiente sísmico es el cortante basal dividido entre el peso del espécimen (figura 3.20).

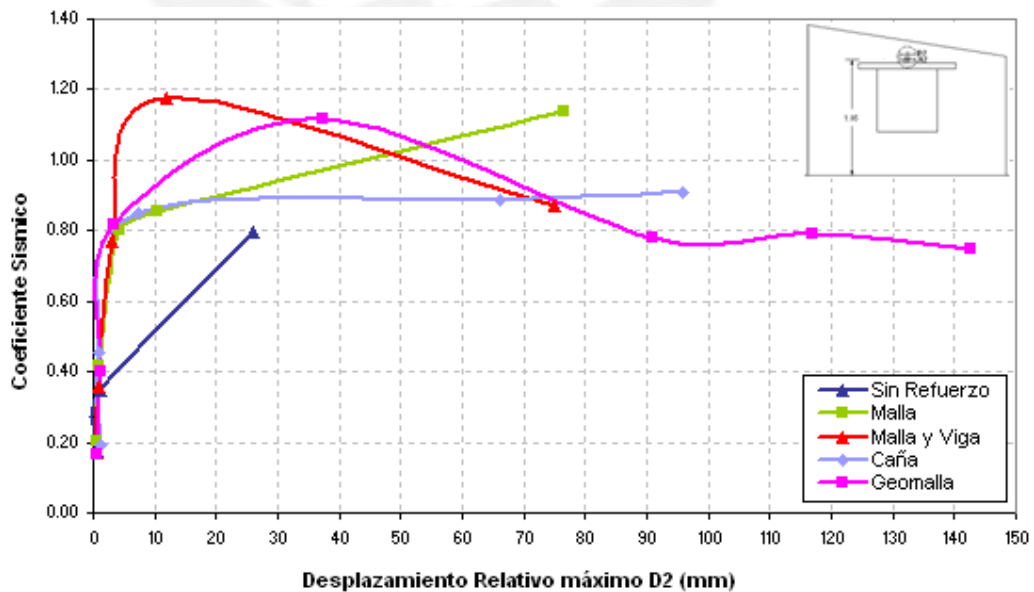
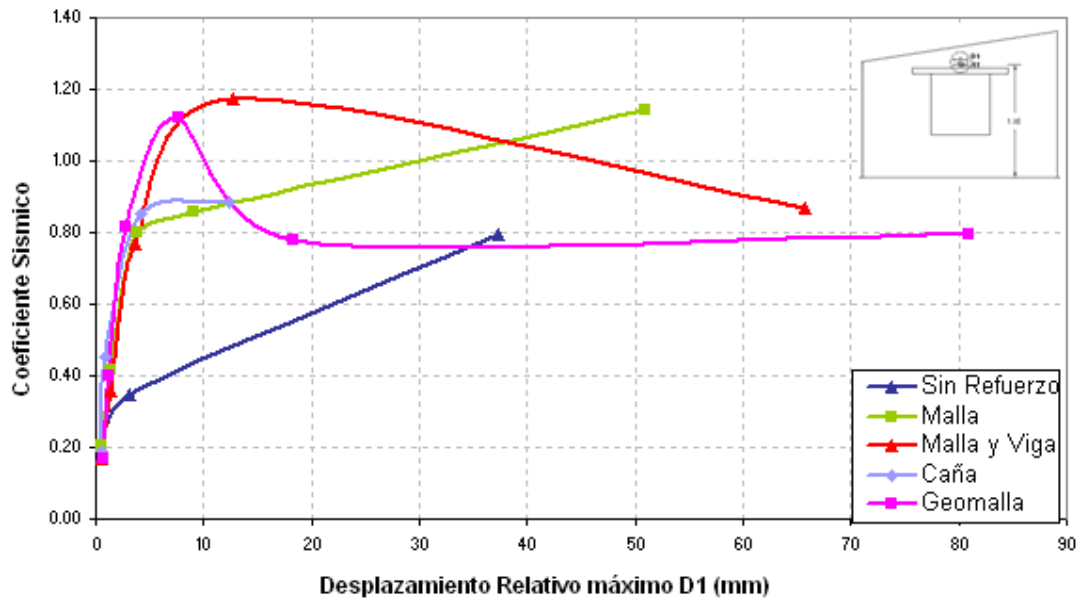
$$C = \frac{V}{P}$$

Donde:

V = cortante basal

C = coeficiente sísmico

P = peso de la estructura



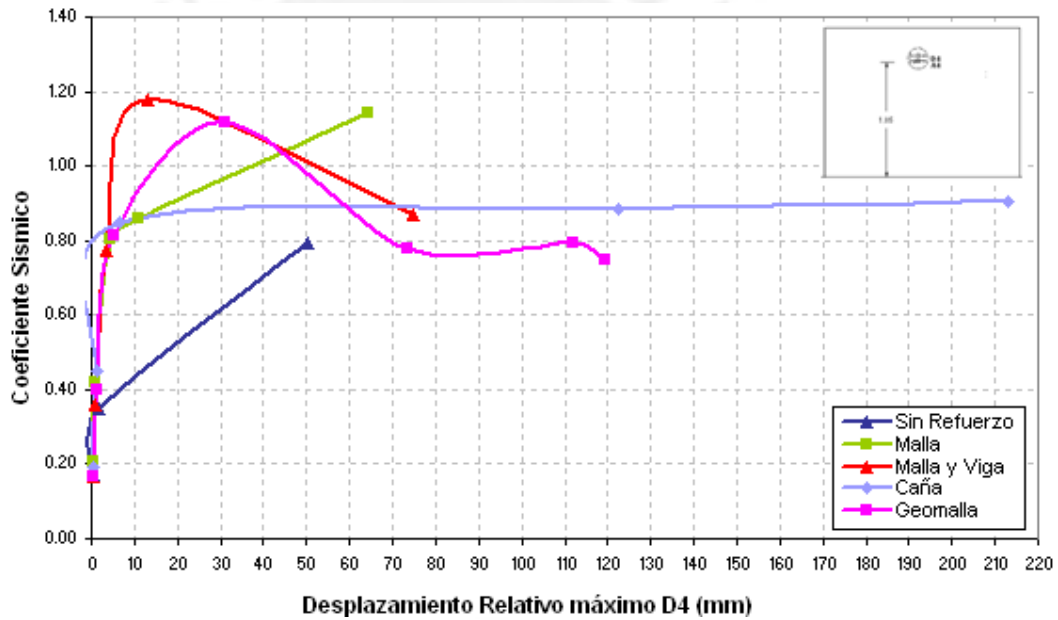
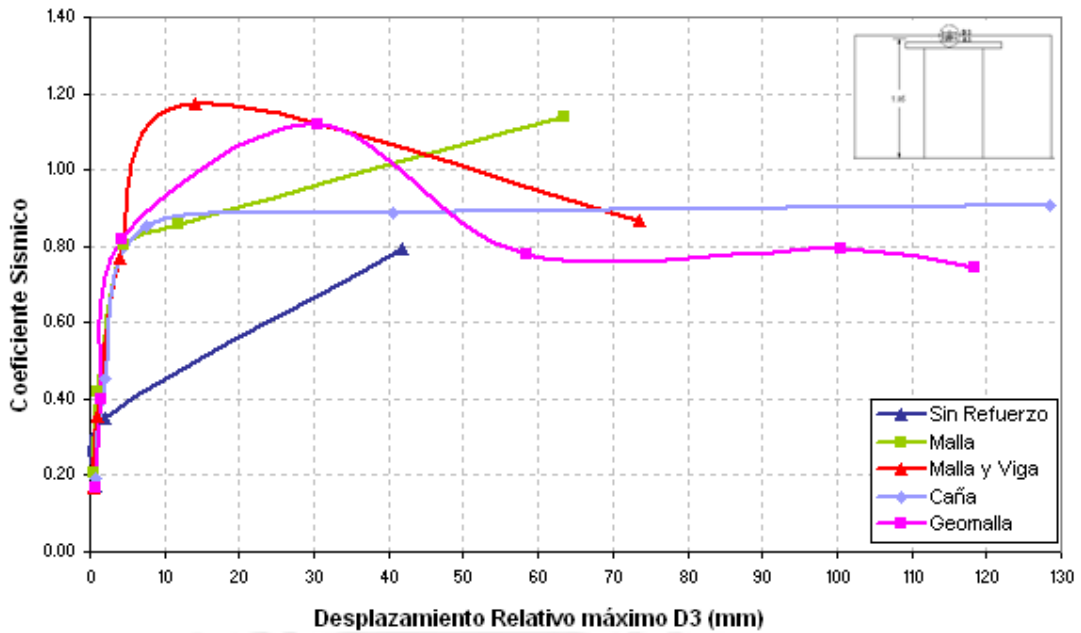


Figura 3.20 Coeficiente Sísmico en D1, D2, D3 y D4

De las curvas de la figura 3.20, el coeficiente sísmico para el módulo M5 (geomalla) es 1.12, lo que indica que la fuerza cortante excede en 12% el peso del módulo, en el caso del modulo M3 (malla y viga) es el 18% y para el modulo M2 (malla) es el 14%.

3.7.7 DEMANDAS DE DUCTILIDAD

La ductilidad es la capacidad de la estructura de deformarse bajo la deformación plástica (figura 3.21).

$$v = \frac{D_{\max}}{D_y}$$

Donde:

v = ductilidad de desplazamientos

D_{\max} = desplazamiento máximo

D_y = desplazamiento de fluencia

De las curvas del Cortante basal máximo Vs Desplazamiento relativo máximo se ha obtenido las ductilidades de desplazamientos mostradas en las gráficas.

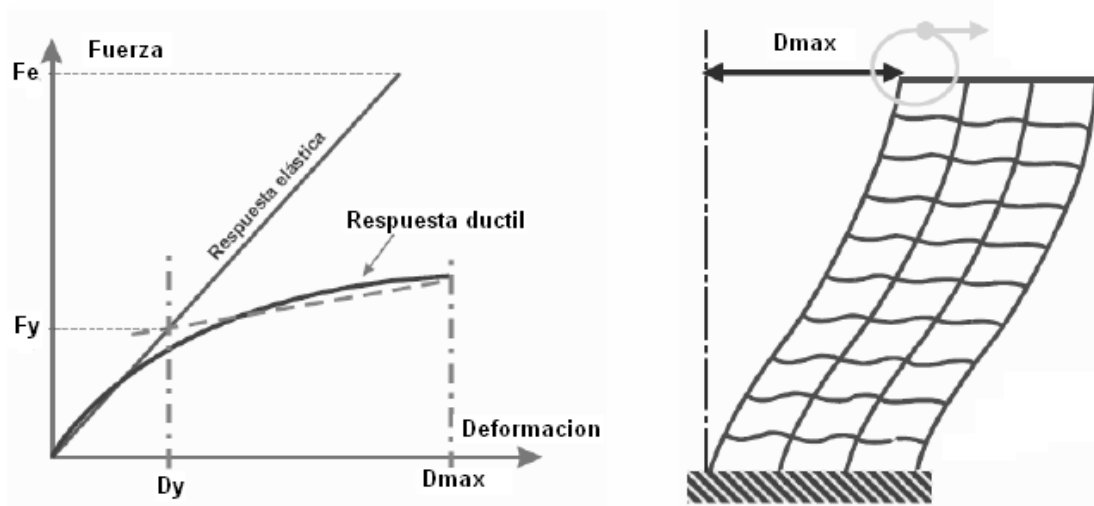


Figura 3.21 Concepto de ductilidad.

En la figura 3.22, en la fase 3, el módulo M1 (sin refuerzo) es el único que presenta ductilidad, debido a que éste ya incursionó en el rango inelástico en esta fase.

El módulo M3 (malla y viga) presenta la mayor ductilidad en la fase 5, seguido por el módulo M2 (malla) y finalmente el módulo M5 (geomalla), esta poca ductilidad del M5 en este muro es comprensible ya que este muro es más rígido por el aporte del tarrajeo.

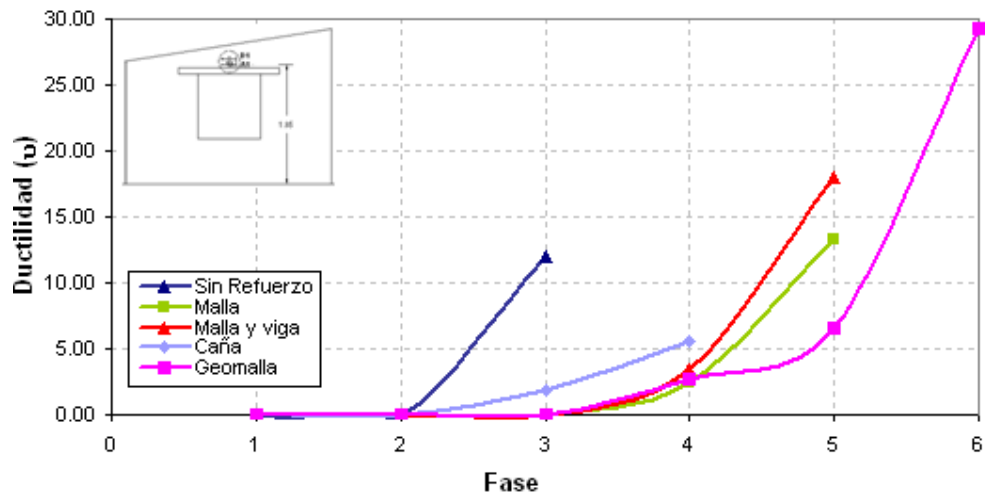


Figura 3.22 Ductilidad de Desplazamientos en D1

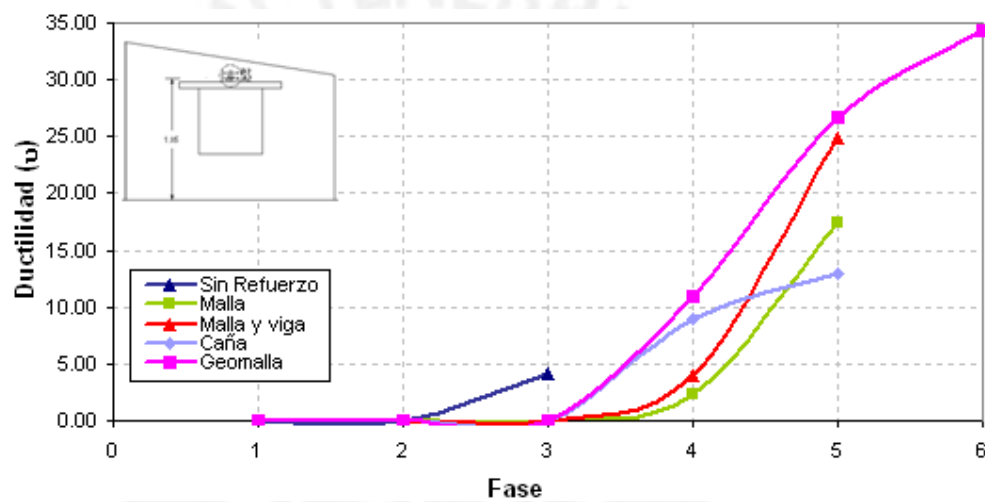


Figura 3.23 Ductilidad de Desplazamientos en D2.

En la figura 3.23 el módulo M5 (geomalla) presenta la mayor ductilidad, seguido por el módulo M3 (reforzado con malla viga de concreto), por el M2 (malla) y por último el M4 (caña).

Comparando ambos muros del M5 (geomalla), en el muro sin tarrajeo en la fase 4 y 5 ya se observan incursiones inelásticas (lo que implica daños en el muro). Sin embargo, el muro con tarrajeo en la fase 4 aún tiene una menor incursión en el rango inelástico (menor ductilidad) que el muro sin tarrajeo, esto se debe a que el muro tarrajeado tiene mayor rigidez, registrando menores desplazamientos y por tanto menor ductilidad.

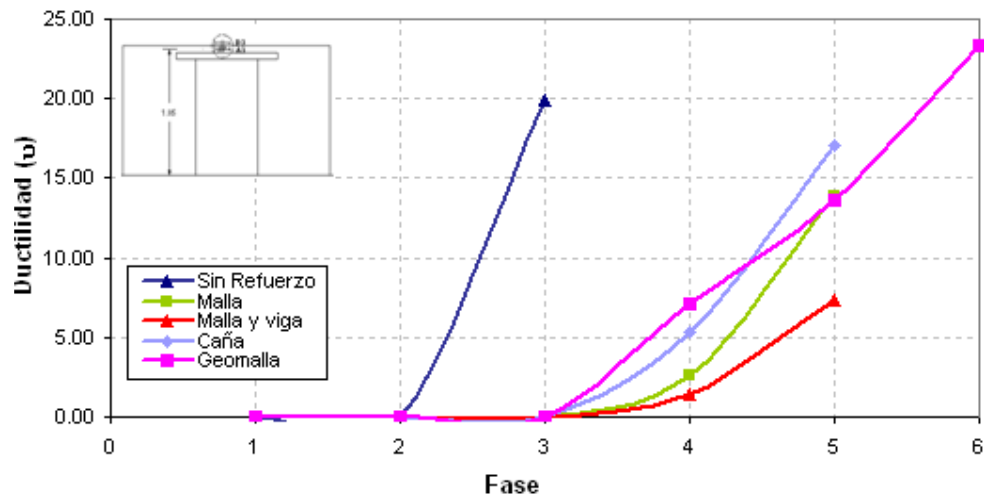


Figura 3.24 Ductilidad de Desplazamientos en D3.

En la fig. 3.24 se observa también mayor ductilidad en el módulo M5 (geomalla).

En la fase 3 en D3, el M1 es el único módulo que presenta ductilidad.

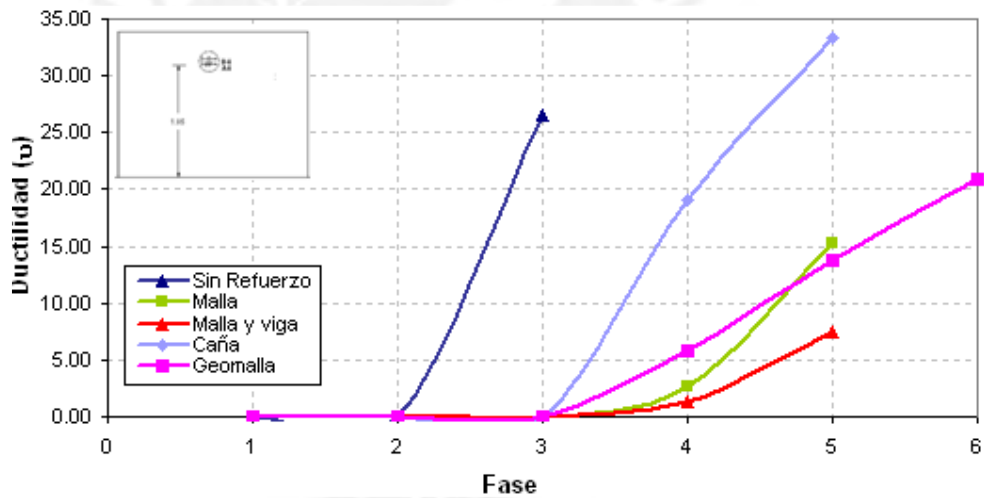


Figura 3.25 Ductilidad de Desplazamientos en D4.

En la fig. 3.25, la ductilidad es mayor para el módulo M4 (caña), seguido por el módulo M5 (geomalla).

3.7.8 ENERGÍA DISIPADA

La energía disipada es la capacidad de absorber energía por la deformación de los elementos. Se mide como el área bajo la curva de carga vs desplazamiento (figura 3.26).

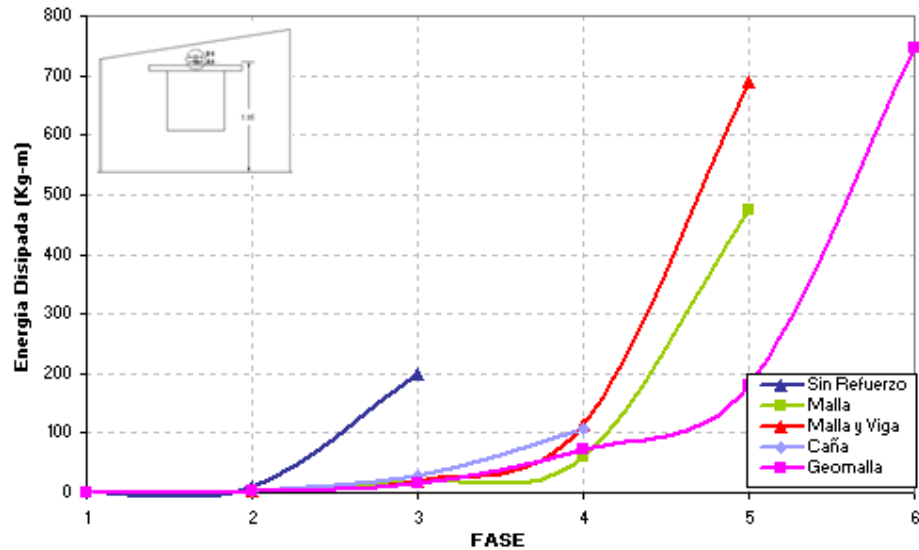


Figura 3.26 Energía Disipada en D1

En la figura 3.26 el módulo M5 (geomalla) muestra en cada fase un incremento proporcional de energía disipada, ello indicaría que la malla trabaja eficazmente aún cuando el muro está agrietado. No se registra datos del módulo M4 (caña) en la fase 5 debido a daños en el LVDT de este muro.

Los módulos M2 (malla) y M3 (malla con viga), muestran una liberación de energía importante en la fase 5, los módulos sufren grandes desplazamientos y fisuras.

En la figura 3.27 todos los módulos a excepción del M1 (sin refuerzo) muestran en cada fase un incremento proporcional de energía disipada, siendo el que disipa más energía el modulo M5 (geomalla).

El módulo M4 (caña) indica una liberación de energía importante, asociado a grandes desplazamientos y fisuras, esto indicaría cierta flexibilidad del muro.

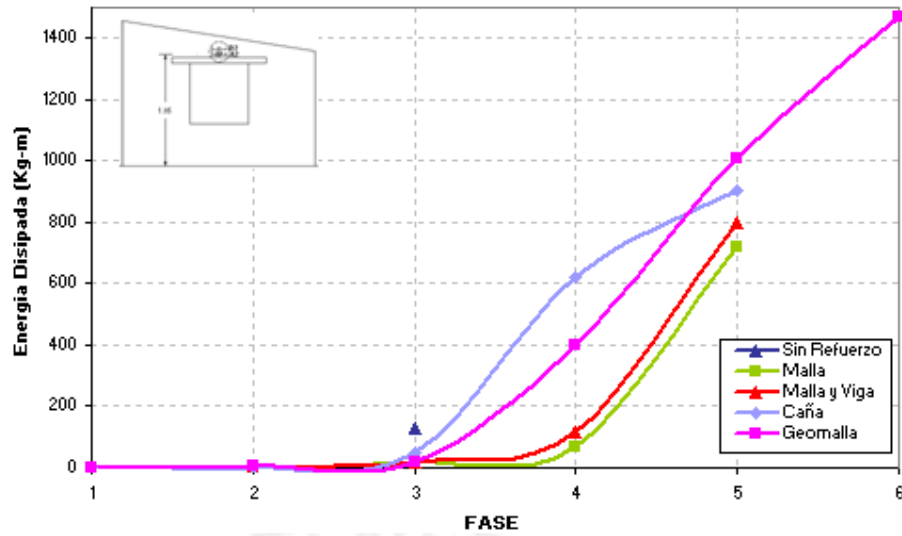


Figura 3.27 Energía Disipada en D2

En el módulo M5 (geomalla) el muro sin tarrajeo presenta mayor disipación de energía comparada con el muro con tarrajeo, considerando que la energía disipada está relacionada a daño (menor energía disipada esta asociado a una menor fisuración), es claro el beneficio adquirido con el tarrajeo de barro y paja en el muro (figura 3.28 y 3.29).

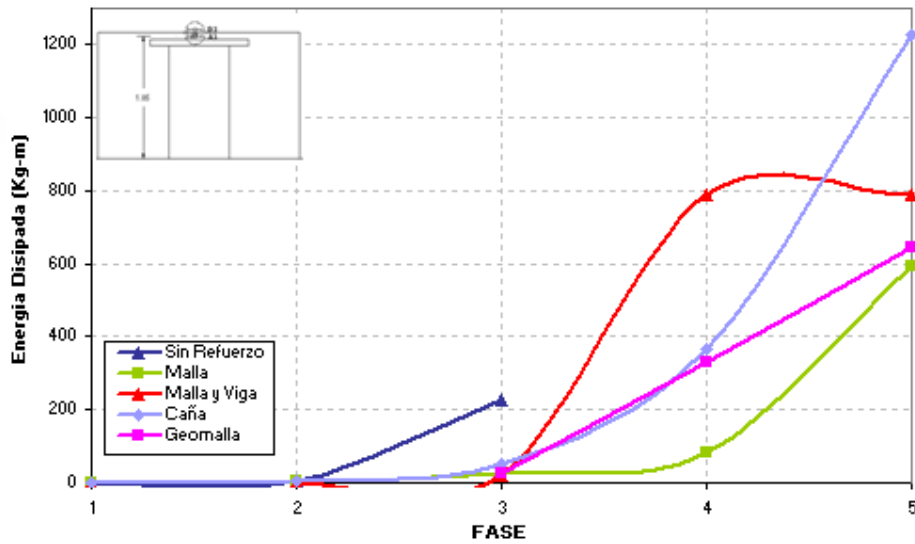


Figura 3.28 Energía Disipada en D3

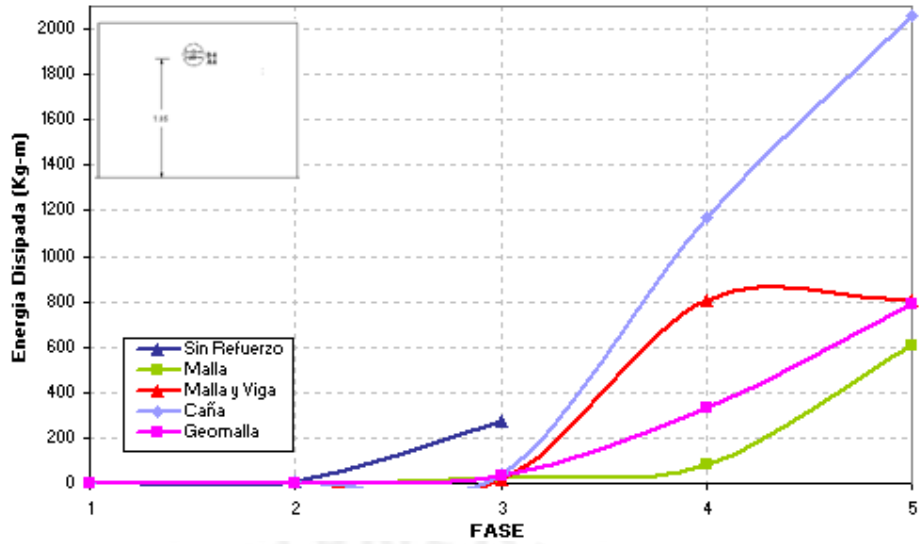


Figura 3.29 Energía Disipada en D4

3.8 COMPARACION PARAMETROS SISMICOS VS DAÑOS OBSERVADOS

En la figura 3.30 y 3.31 se muestran los parámetros sísmicos en porcentajes correspondientes a cada modulo, estos porcentajes han sido calculados con respecto al mayor valor de cada parámetro sísmico registrado.

La comparación de estos parámetros nos permitirá evaluar la efectividad de los refuerzos de los 5 módulos.

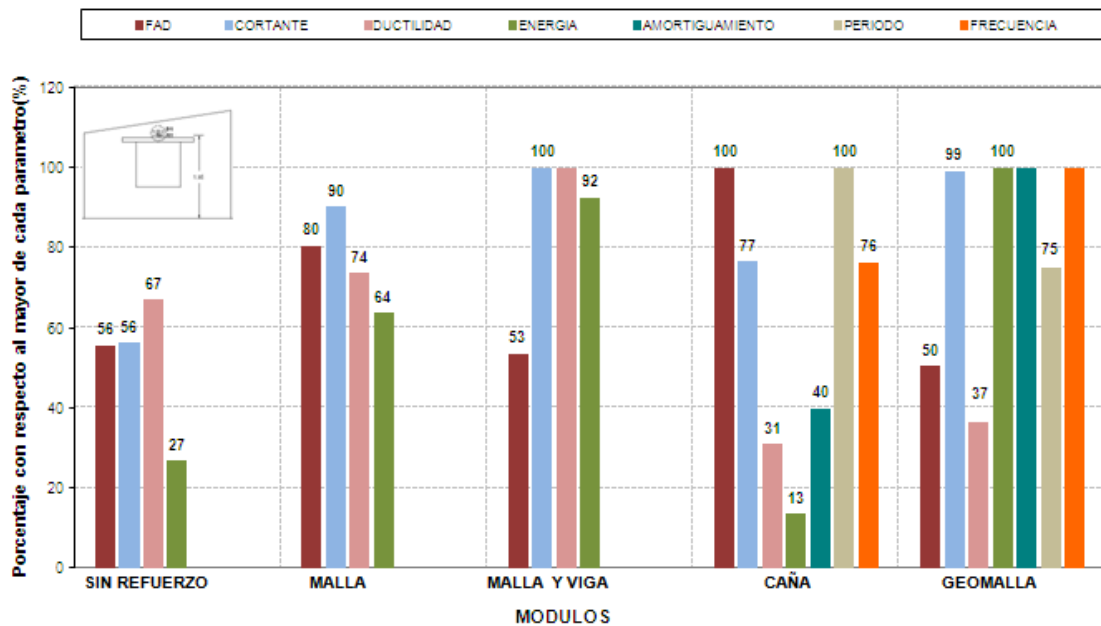


Figura 3.30 Parámetros sísmicos en D1

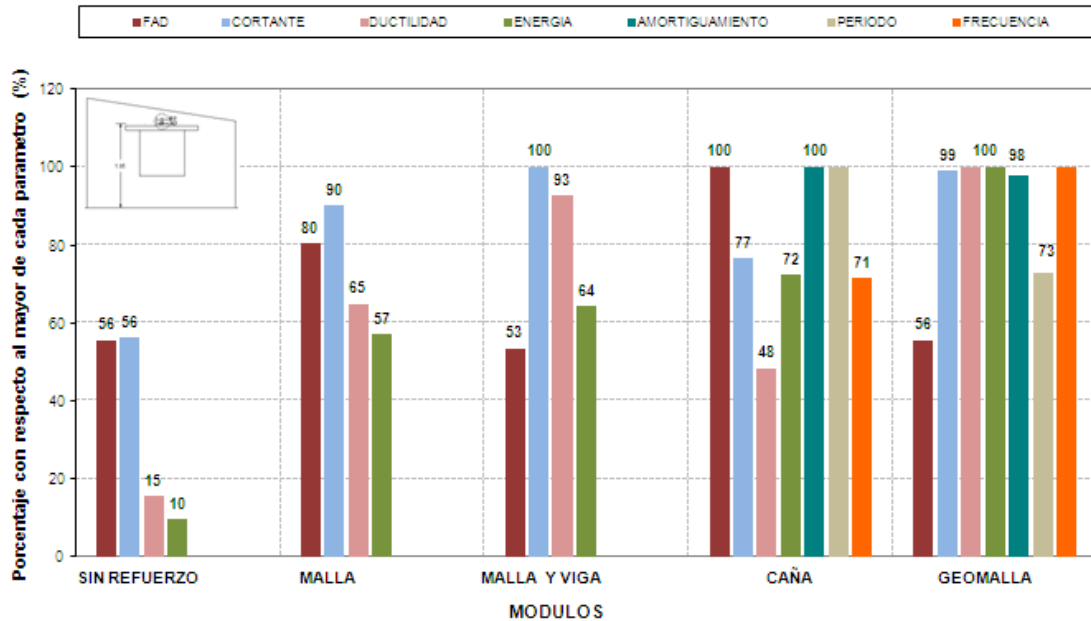


Figura 3.31 Parámetros sísmicos en D2

De la figura 3.30 y 3.31 según los parámetros sísmicos evaluados, los muros de los módulos de adobe que sufren más daño son: el módulo sin refuerzo M1 y el módulo reforzado con caña M4. En ambos casos presentan poca ductilidad, resisten menor fuerza cortante, siendo estos parámetros los que mejor definen su comportamiento el cual se refleja en los daños observados (ver tabla 2.6 del capítulo II).

El módulo reforzado con geomalla M5 desempeña un mejor comportamiento conjuntamente con el módulo reforzado con malla electrosoldada y viga de concreto M3, seguido por el módulo con malla electrosoldada M2. Si bien es cierto el módulo M3 resiste mayor cortante (su falla es frágil), el módulo M5 tiene mayor ductilidad (figura 3.31) y esta ductilidad le da mayor capacidad de deformación a la estructura, la cual es absorbida por la geomalla, siendo los daños menores en el módulo M5, estos parámetros son los que mejor definen su comportamiento lo cual se refleja en los daños observados (ver tabla 2.6 del capítulo II).

CAPITULO IV

RESISTENCIA AL CORTE DE MUROS DE ADOBE

4.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

Del ensayo del módulo de adobe M5 tarrajeado y reforzado con geomalla (GETTY 2005, Sismo Adobe 2005), se observó que el tarrajeo puede aportar rigidez a la estructura y resistencia inicial al corte. Como segunda parte de la tesis se plantea evaluar los resultados de ensayos estáticos de carga cíclica de un muro de adobe con tarrajeo y con refuerzo de geomalla. Estos resultados se compararán con los resultados de dos muros previos: uno sin refuerzo y otro con refuerzo de geomalla sin tarrajeo de una serie de ensayos estáticos de carga cíclica en muros de adobe (Blondet et. al. 2004).

4.2 OBJETIVO

- Hallar un valor de resistencia al corte de los muros de adobe uno con tarrajeo y refuerzo de geomalla y compararlo con el caso de los muros de adobe uno sin refuerzo y otro reforzado con geomalla sin tarrajeo del proyecto previo.

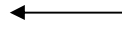
4.3 MARCO TEORICO

De los ensayos de carga lateral cíclica en muros de adobe se evaluará:

La **Capacidad resistente al corte (VR)**: es la resistencia asociada al agrietamiento diagonal al aplicar una fuerza cortante cíclica en muros (San Bartolomé. 1998). Con el cortante basal en función del desplazamiento se puede determinar el nivel de daño de una estructura.

4.3.1 Descripción del Proyecto

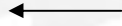
El objetivo principal es comparar la resistencia al corte de los muros de ambos proyectos: los dos primeros muros corresponden al proyecto de una serie de ensayos estáticos de carga cíclica en muros de adobe (Blondet et. al. 2004), el tercer muro se ensayó para el desarrollo de la presente tesis.



Muro sin Refuerzo (ver configuración fig. No 4.01)



Muro con geomalla y sin tarrajeo (ver configuración fig. No 4.01)



Muro con geomalla y con tarrajeo (ver configuración fig. No 4.02)



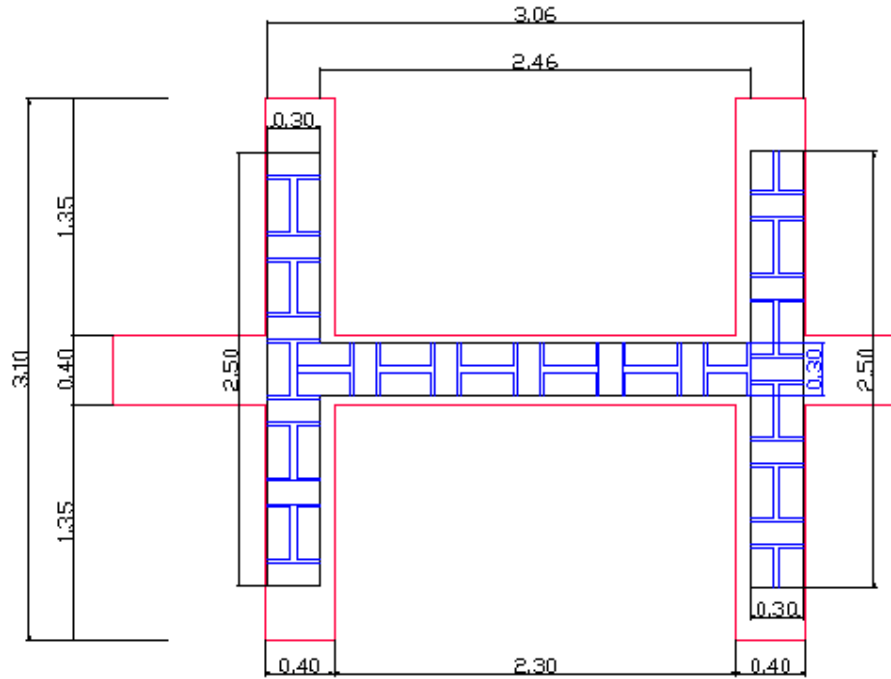


Figura 4.1 Distribución de adobes y dimensiones de muro sin refuerzo y muro con geomalla y sin tarrajeo.

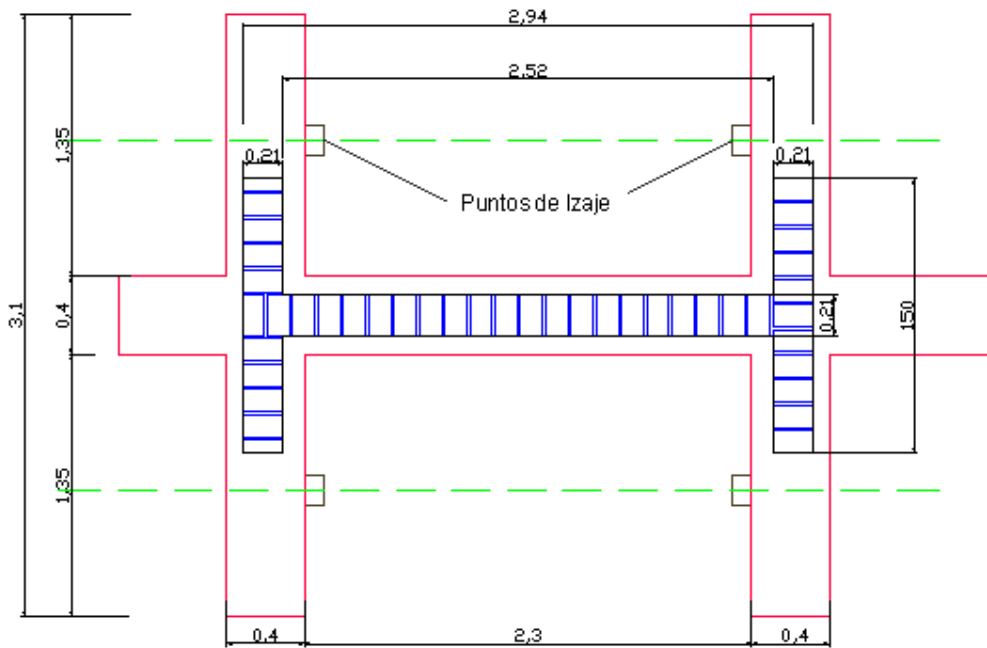


Figura 4.2 Distribución de adobes y dimensiones de muro con geomalla y con tarrajeo.

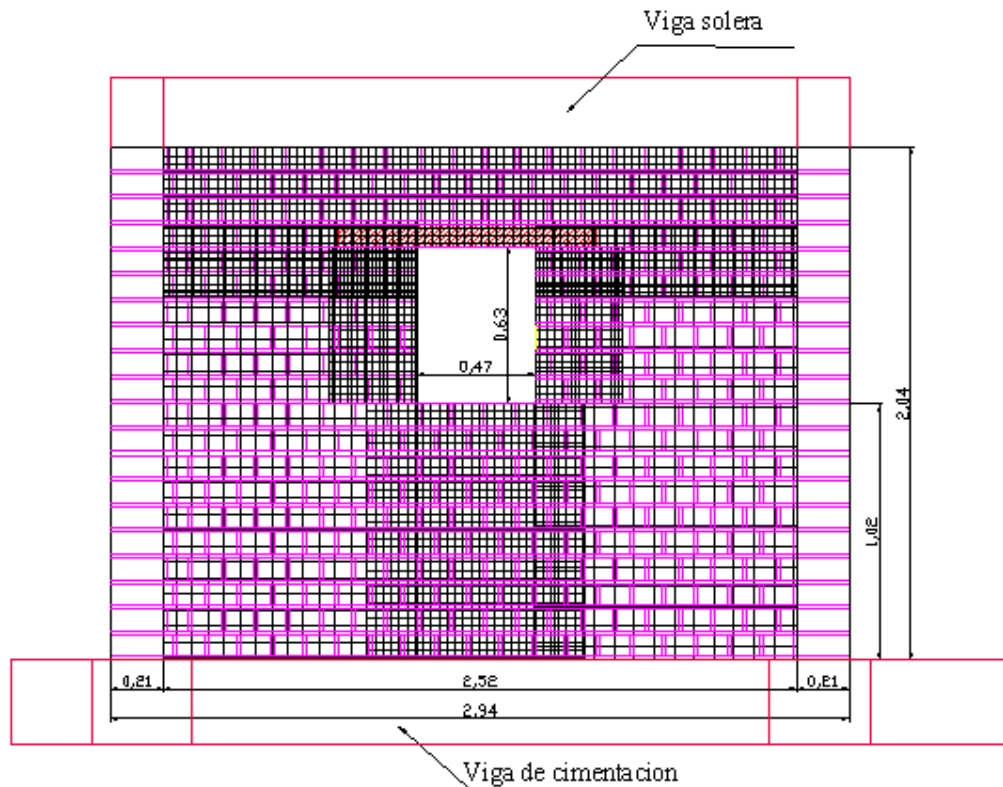


Figura 4.3 Vista en elevación típica para el muro de adobe.

4.3.2 Construcción del muro con refuerzo de geomalla y tarrajeo

Se construyó sobre una viga de cimentación el muro con unidades de adobe de 0.21 x 0.12 x 0.11 m. de tierra y arena. Se reforzó con geomalla polímero en ambas caras del muro conectándose con hileras de rafia, en la parte superior se colocó una viga solera de concreto, finalmente se tarrajeó completamente el muro (figura 4.2, 4.3 y 4.4).



a) Asentado de muro y colocación de rafia



b) Colocación de la geomalla



c) Tarrajeo del muro



d) Muro listo para el ensayo

Figura 4.4 Proceso constructivo del muro con geomalla y con tarrajeo.

4.3.3 Instrumentación y ensayos

Se colocaron 17 sensores de desplazamiento (LDVTS), ver figura 4.5.

Se empleó un actuador hidráulico de 500 kN en la parte superior de los muros para aplicar la carga cíclica lateral como se muestra en la figura 4.6.

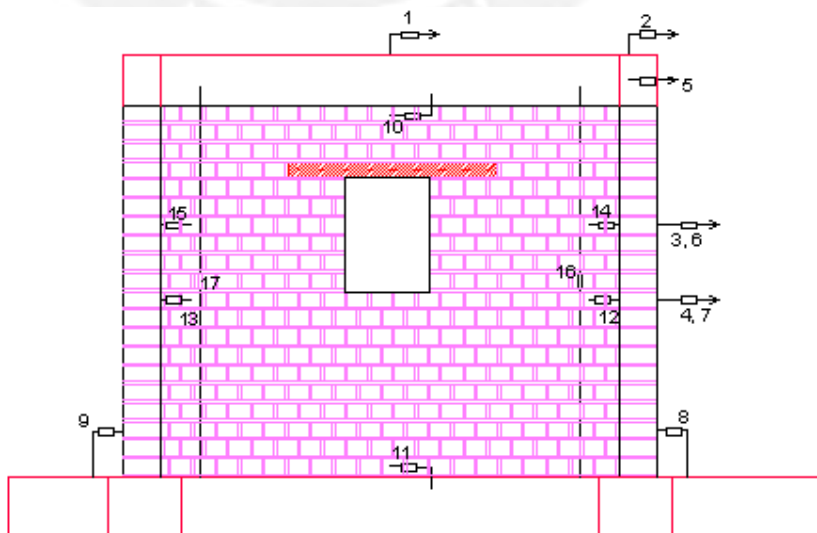


Figura 4.5. Instrumentación del muro.



Figura 4.6 Ubicación del actuador la parte superior del muro.

El ensayo de carga cíclica lateral se realizó en 9 fases (ver tabla 4.1).

Tabla 4.1 Características de las fases

Fase	Velocidad Prom. (mm / min)	Desplazamiento (mm)	Última Fase de ensayo de los Muros
1	0,1	0,1	
2	0,5	0,5	
3	1	1	
4	2	2	
5	5	5	
6	10	10	
7	20	20	
8	20	50	Muro sin refuerzo
9	20	100	Muro con geomalla y muro con geomalla + tarrajeo

4.3.4 Ensayos preliminares

Para determinar las propiedades mecánicas de la albañilería de adobe, se realizaron cinco ensayos de compresión axial en pilas (figura 4.7) y tres ensayos de compresión diagonal en muretes (figura 4.8).

Las pilas fueron construidas con 5 unidades de adobe con dimensiones promedio de 21 x 11.5 x 49 cm. Los muretes tuvieron dimensiones de 21 x 49 x 49 cm.



Figura 4.7. Ensayo a compresión axial

PILA	f'm (resistencia a la compresión)	
	Kg/cm2	MPa
P1	8.51	0.867
P2	8.15	0.831
P3	8.66	0.883
P4	8.28	0.844
P5	8.07	0.822
$\sigma=$	0.25	0.03
Promedio	8.33	0.85
Prom- σ	8.08	0.82

Tabla 4.2 Resistencia a la Compresión de las pilas de adobe.

El coeficiente de esbeltez (altura/espesor) fue 4.2, por lo que se corrigió por esbeltez. La resistencia a la compresión $f'm$ de las pilas fue de 0.82 MPa (8.08 kg/cm²). Los resultados de los ensayos son mostrados en la tabla 4.2.

De los ensayos de compresión diagonal se determinó la resistencia a corte $f't$ que fue de 0.058 MPa (0.57 kg/cm²). Los resultados de los ensayos son mostrados en la tabla 4.3.



Figura 4.8. Ensayo a compresión diagonal

MURETE	f't (resistencia al corte)	
	Kg/cm2	MPa
M1	0.62	0.063
M2	0.56	0.057
M3	0.63	0.064
$\sigma=$	0.03	0.004
Promedio	0.60	0.061
Prom- σ	0.57	0.058

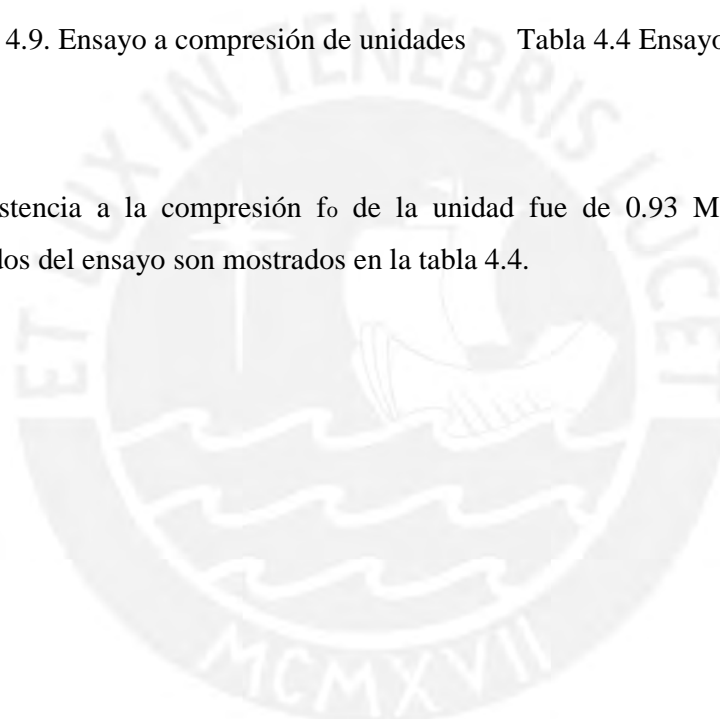
Tabla 4.3 Resistencia a corte del ensayo de compresión diagonal.



UNIDAD	fo (resistencia a la compresión)	
	Kg/cm2	MPa
C1	8.75	0.892
C2	11.88	1.211
C3	11.04	1.125
C4	9.31	0.950
C5	11.66	1.189
$\sigma=$	1.41	0.14
Promedio	10.53	1.07
Prom- σ	9.11	0.93

Figura 4.9. Ensayo a compresión de unidades Tabla 4.4 Ensayo de unidades a compresión

La resistencia a la compresión f_o de la unidad fue de 0.93 MPa (9.11 kg/cm²). Los resultados del ensayo son mostrados en la tabla 4.4.



4.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES



Figura 4.10. Muro sin refuerzo después del ensayo

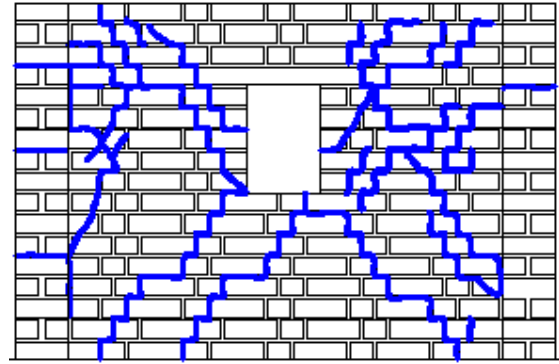


Figura 4.11. Levantamiento de fisuras del muro sin refuerzo (Madueño I.)

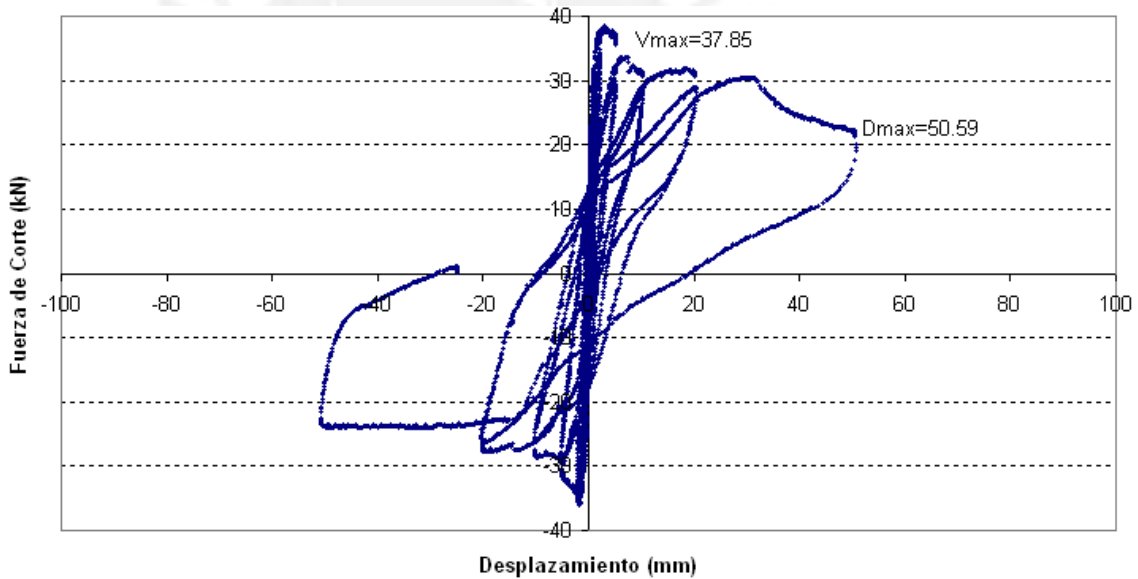


Figura 4.12. Lazos histeréticos de fuerza- desplazamiento de muro sin refuerzo en D1.

En el muro sin refuerzo se formaron grietas de corte en el muro (fig. 4.10 y 4.11).

De la curva fuerza-desplazamiento (fig. 4.12) el cortante máximo es 37.85 kN, luego se observa una pérdida de resistencia de 40%, por tanto, se produce la falla del muro derivando en el colapso del mismo.

El desplazamiento lateral máximo alcanzado fue de 50.60 mm.



Figura 4.13. Muro con geomalla después del ensayo

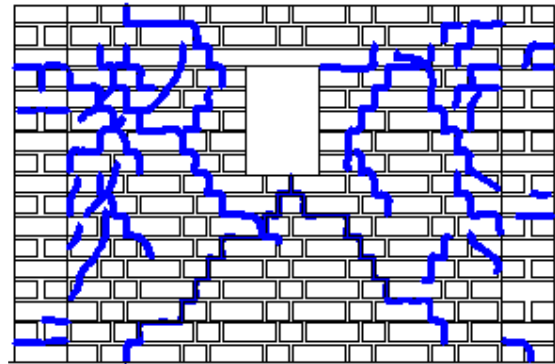


Figura 4.14. Levantamiento de fisuras del muro con geomalla (Madueño I.)

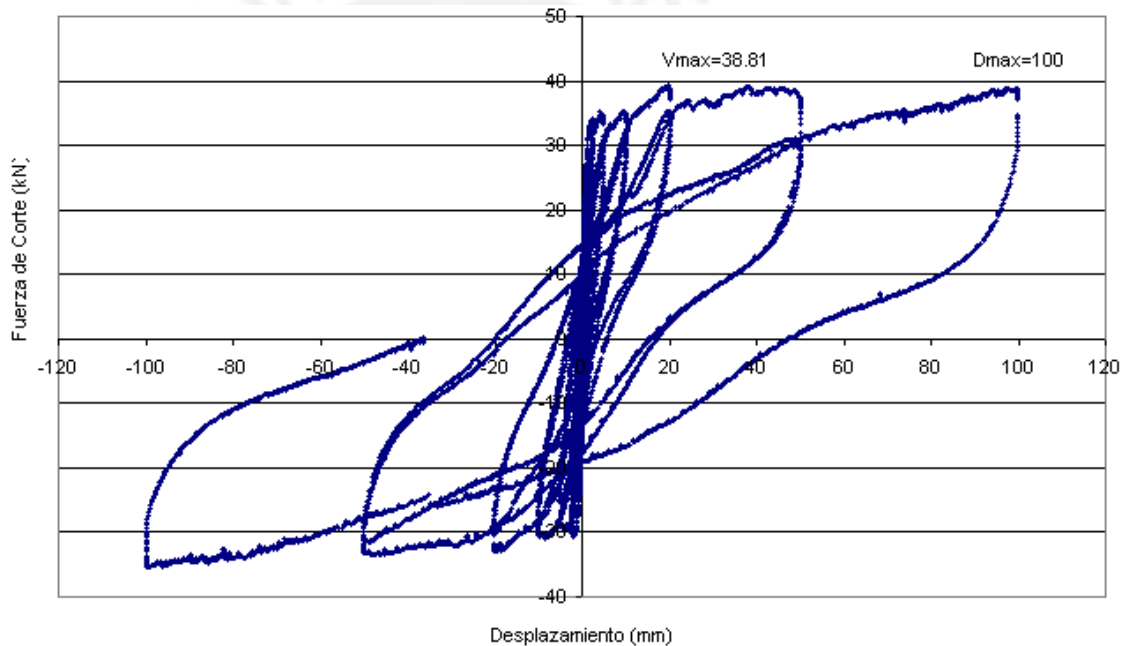


Figura 4.15. Lazos histeréticos de fuerza- desplazamiento en D1 de muro reforzado con geomalla.

En el muro con geomalla (figura 4.13 y 4.14) se formaron grietas de corte similares al del muro sin refuerzo.

De la curva fuerza-desplazamiento (figura 4.15) el cortante máximo es 38.81 kN, alcanzando la misma resistencia que el muro sin refuerzo, sin embargo después del límite elástico la resistencia se mantiene, mostrando un comportamiento dúctil, esto debido a la existencia de la geomalla.

El desplazamiento lateral máximo alcanzado fue de 100 mm.



Figura 4.16 Muro con geomalla antes de retirar el tarrajeo (después del ensayo).

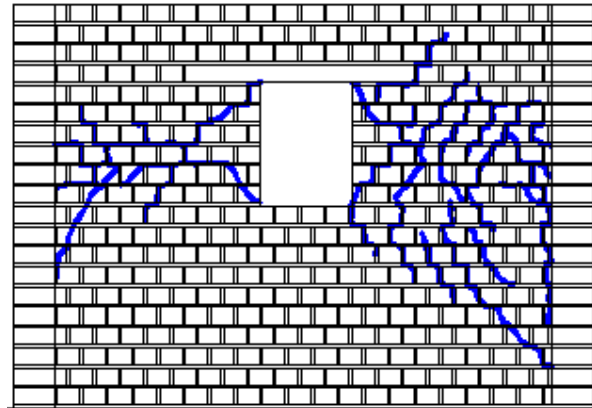


Figura 4.17 Levantamiento de fisuras del muro



Figura 4.18 Muro con geomalla después de retirar el tarrajeo (después del ensayo).

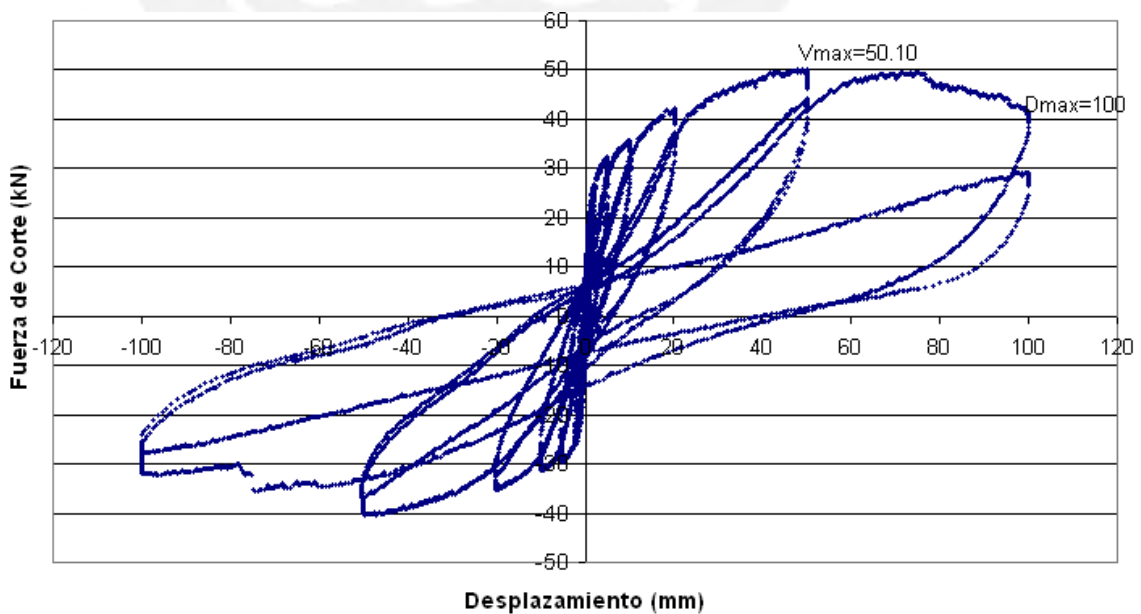


Figura 4.19. Lazos histeréticos de fuerza- desplazamiento en D1 de muro reforzado con geomalla + tarrajeo

En el muro reforzado con geomalla y tarrajeo se formaron grietas distribuidas a la altura de la ventana del muro (figura 4.16, 4.17 y 4.18).

De la curva fuerza-desplazamiento (figura 4.19) el cortante máximo es 50.1 kN, después del límite elástico la resistencia se incrementa, para posteriormente perder resistencia, esto se debe a una pérdida de rigidez asociado al desprendimiento de parte del tarrajeo, haciendo que la malla se comporte ya no como un refuerzo integrado al muro sino como elemento de confinamiento (Torrealva. 2009). El comportamiento del muro fue dúctil.

El desplazamiento lateral máximo alcanzado fue de 100 mm.

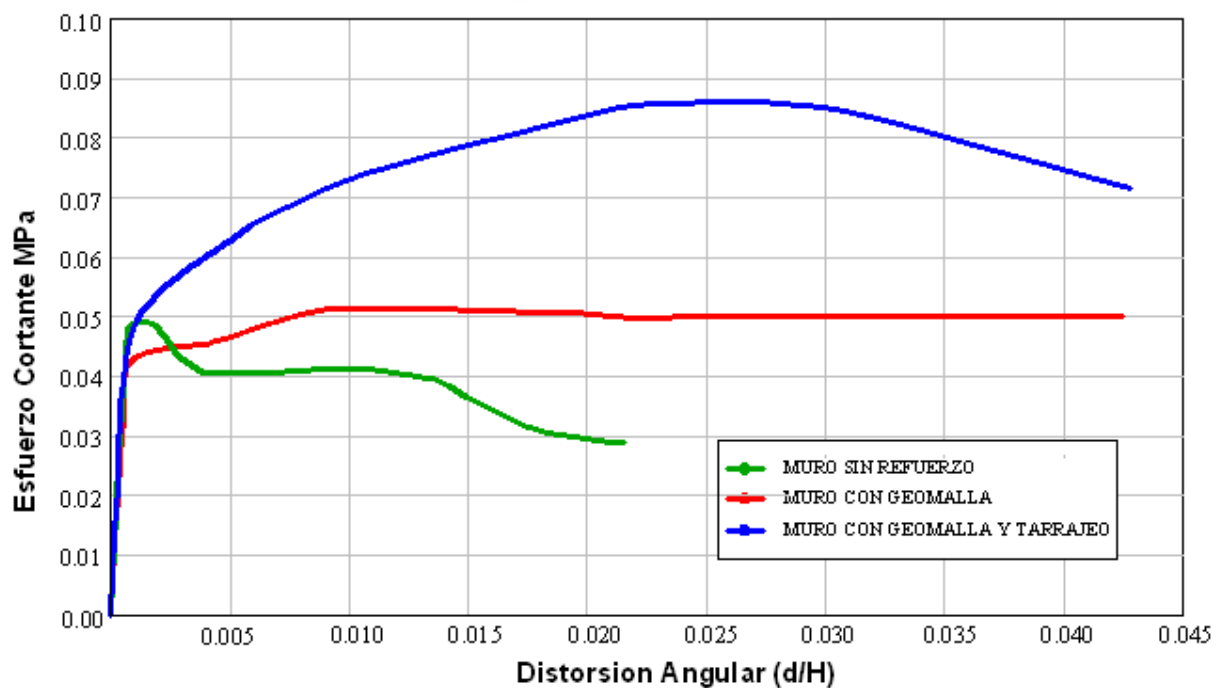


Figura 4.20. Esfuerzo Cortante Vs Distorsión Angular en D1.




Como se observa en las figuras. 4.01 y 4.02, las dimensiones y espesor del muro con geomalla + tarrajeo son diferentes con respecto a los otros dos muros, es por ello que la comparación del comportamiento de los tres muros se hizo considerando las envolventes de la curva esfuerzo cortante vs la distorsión angular, ver figura 4.20.

De las 2 curvas (con geomalla), los muros se comportan elásticamente hasta una resistencia de 0.050 MPa. El muro reforzado + tarrajeo alcanza un esfuerzo cortante de 0.085 MPa para una desviación angular de 0.025, mientras que sin tarrajeo solo resiste 0.05 MPa.

El tarrajeo incrementa en 70% la resistencia del muro.

En la tabla 4.5 se comparan los 3 muros ensayados.

Tabla 4.5 Comparación de los tres muros analizados

Características	Comportamiento último	Estado Final
Sin refuerzo	Fase 8 (D = 50 mm): El cortante máximo fue 37.85 kN, con un Dmax de 50.59 mm. Se formaron grietas de corte en el muro principal y grietas en las uniones de los muros. Desplazamiento horizontal de 40 mm de los muros transversales. El muro perdió resistencia. Estado inestable.	
Con geomalla y sin tarrajeo	Fase 9 (D = 100 mm): El cortante máximo fue 38.81 kN, con un Dmax de 100 mm. Se formaron grietas de corte en el muro principal, grietas horizontales en los muros transversales y grietas verticales en los encuentros entre muros. La geomalla controló la formación de grietas de mayor ancho. Comportamiento estable.	
Con geomalla y con tarrajeo	Fase 9 (D = 100 mm): El cortante máximo fue 50.10 kN, con un Dmax de 100 mm. Se formaron grietas distribuidas en la zona central del muro principal a la altura del vano de la ventana, grietas horizontales en los muros transversales, la geomalla controló la formación de grietas en los encuentros entre muros. Comportamiento estable.	

CAPITULO V

CONCLUSIONES

1.- Los muros de los módulos de adobe sin refuerzo M1 y reforzado con caña M4 presentan poca ductilidad, resisten menor fuerza cortante que el resto de los módulos, lo que se interpreta como estructuras con menor capacidad de deformación y poca capacidad de resistencia por pérdidas de rigidez.

2.- Los muros de los módulos de adobe reforzados con geomalla M5 y con malla electrosoldada y viga M3, desempeñan un mejor comportamiento, el módulo M3 resiste mayor cortante (su falla es frágil), el módulo M5 tiene mayor ductilidad y esta ductilidad le da mayor capacidad de deformación a la estructura, la cual es absorbida por la geomalla, siendo los daños menores en los muros del módulo M5.

3.- El módulo reforzado con malla electrosoldada M2 tiene una buena resistencia al corte, poca ductilidad, por lo que su falla sigue siendo frágil.

4.- El muro sin tarrajeo del M5 (geomalla) tiene mayores incursiones inelásticas que el muro tarrajeado lo que implica mayores daños en este muro, así también el muro con tarrajeo tiene mayor rigidez, registrando menores desplazamientos y menor ductilidad.

5.- El tarrajeo sobre la geomalla incrementa grandemente la resistencia al corte y la rigidez del muro. Controlando los desplazamientos laterales, impide el agrietamiento del muro en grandes extensiones (figura 5.1 y 5.2).

6.-El tarrajeo puede incrementar hasta en un 70% la resistencia de un muro reforzado con geomalla, donde:

El esfuerzo cortante máximo elástico = 0.050 MPa (0.50 Kg/cm²)

El esfuerzo cortante último = 0.085 MPa (0.85 Kg/cm²)



Figura 5.1 Muro de adobe con refuerzo de geomalla M5

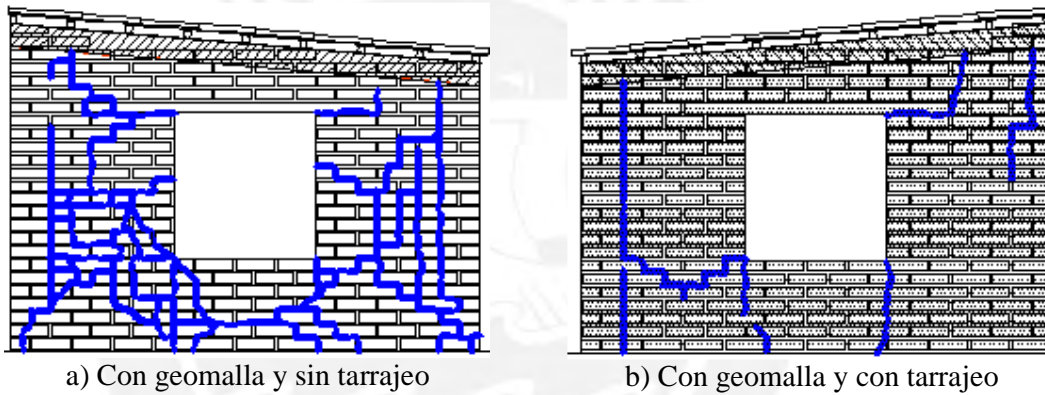


Figura 5.2 Levantamiento de fisuras del Muro de adobe con refuerzo de geomalla M5

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Blondet M, Madueño I, Torrealva D, Villa Garcia G, Ginocchio F. 2004. "Refuerzo de construcciones de adobe con elementos producidos industrialmente. Estudio preliminar". Reporte técnico. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
- Chopra A. 1995. "Dynamics of Structures- Theory and Applications to Earthquake Engineering". New Jersey: Prentice Hall Inc.
- Leroy E, Kimbro E, et al. 2000. "Seismic Stabilization of Historic Adobe Structure". GCI Scientific program reports. Getty Conservation Institute. Los Angeles.
- Madueño I. 2005. "Reforzamiento de Construcciones de Adobe con Elementos Producidos Industrialmente". Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
- Meli R. 1998. "Ingeniería Estructural de los Edificios Históricos". 1a ed. Fundación ICA. A.C.
- Muñoz A. 1999. "Ingeniería Antisísmica". Lima: Fondo Editorial PUCP.
- Ottazi G, Yep J, Blondet M, Ginocchio J, Villa- García G. 1989. "Ensayos de Simulación Sísmica de Viviendas de Adobe". Reporte técnico. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
- San Bartolomé A. 1998. "Construcciones de Albañilería- Comportamiento Sísmico y Diseño Estructural". Fondo Editorial PUCP. Lima, Perú.
- SENCICO. 2000. "Norma Técnica de Edificación NTE-E.080 Adobe". Lima: Ministerio de Construcción, Vivienda y Saneamiento – SENCICO.
- SENCICO. 2003. "Norma Técnica de Edificación NTE-E.030 Diseño Sismorresistente". Lima: Ministerio de Construcción, Vivienda y Saneamiento – SENCICO.
- Torrealva D, Acero J. 2005. "Uso de materiales naturales y de polímeros en el refuerzo sísmico de construcciones de adobe del Proyecto Getty Conservation Institute (GCI) y la PUCP". Informe Final. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.

Torrealva D, 2009. "Diseño Sísmico de Muros de Adobe Reforzados con Geomallas". Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.

Zegarra L, Quiun D, San Bartolomé A. 2003. "Pruebas de simulación sísmica en módulos de vivienda de adobe reforzado del proyecto COPASA-GTZ-PUCP". Informe Final. PUCP. Lima, Perú.

